



Fakultät Umweltwissenschaften

Professur für Hydrologie

SAPHIR - Saxonian Platform for High Performance Irrigation

Endbericht

Projektleiter: Prof. Dr. Niels Schütze Mitarbeiter: Dr. Klemens Barfus Dipl.-Ing. Ulrike Grießbach Dipl.-Hydrol. Sebastian Kloß Dipl.-Geogr. Patric Röhm Dr. Sabine Seidel Dr. Peter Stange Dr. Michael Wagner Dipl.-Hydrol. Stefan Werisch

Dresden, Januar 2015







Zusammenfassung

Der Gegenstand des Projektes SAPHIR war die Untersuchung von Trockenstress, Wasserproduktivität und Bewässerungsbedarf landwirtschaftlicher und gemüsebaulicher Nutzpflanzen mit Hilfe von Bewässerungsexperimenten und Simulationswerkzeugen (virtuelles Feld). Das Hauptziel war die Bereitstellung relevanter Informationen, Schlußfolgerungen und Handlungsoptionen für wesentliche Akteure (Landwirte und Entscheidungsträger auf regionaler Ebene) aus der sächsischen Landwirtschaft. Einen einfachen Zugang zu den entwickelten Werkzeugen und Ergebnissen liefert ein webbasiertes Entscheidungshilfesystem mit maßgeschneiderten Schnittstellen für die verschiedenen Akteure, dass die Ermittlung der Bewässerungswürdigkeit beliebiger Standorte und angepasster Anbaumuster für Sachsen für gegenwärtige und zukünftige Klimabedingungen ermöglicht. Die Bestimmung der dafür wichtigen Datengrundlagen, nämlich kulturspezifische Ertragskurven erfolgte auf zwei Wegen: durch konkrete Feldversuche sowie simulationsbasierte Optimierung. Durch die Verwendung von prognostischen Simulationsmodellen ist die Übertragung der Ergebnisse auf andere klimatische Standorte möglich und wurde wird zur Zeit für die Vereinigte Arabische Emirate und den Oman erprobt. Im Rahmen von SAPHIR fand eine intensive Qualifizierung der Nachwuchsforscher statt. Dies umfaßte nicht nur eine umfassende Vermittlung von Spezialwissen über Bewässerungslandwirtschaft inklusive der Teilkomponenten Messung, Modellierung, Analyse und Darstellung sondern auch der Erwerb von Fähigkeiten in Projektmanagement und Kommunikation für eine erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der interdisziplinär zusammengesetzten Forschergruppe.



Abbildung 0.1: Überblick der durchgeführten Arbeiten

Die von uns durchgeführten Arbeiten erfolgten in zwei grundsätzlichen Richtungen (siehe Abb. 0.1). Zum einen entwickelten wir die Werkzeuge zur Entscheidungshilfe in der Reihenfol-

ge: experimentelle Untersuchung \rightarrow Modellierung und Simulation des Bewässerungssystems \rightarrow simulationsbasierte Optimierung des Bewässerungssystems \rightarrow Mikro- und Makroökonomische Bewertung und Optimierung. Zum anderen wurden die Arbeiten auf unterschiedlichen räumlichen Skalen durchgeführt: Mikroskala, Feldskala, Betriebsebene sowie regionale (Meso-) Skala. In Abbildung 0.1 sind alle durchgeführten Arbeitspakete in ein Schema, dass durch die zwei grundsätzlichen Arbeitsrichtungen aufgespannt ist, eingeordnet und mit einer Kapitelreferenz des Berichtes versehen.

Die wesentlichen inhaltlichen Ergebnisse werden im Folgenden "thesenhaft" zusammengefaßt:

Mikroskala – Containerversuche

- Die verwendete Strategie der Defizitbewässerung zeigte sich bei Mais, bezogen auf die Wasserproduktivität, als vorteilhaft gegenüber einer Vollbewässerung. Untersuchungen zur verwendeten sensorbasierten Bewässerungssteuerung haben gezeigt, dass Schwellenwerte der Saugspannung bei der Steuerung eingestellt werden sollten, die außerhalb des Messbereiches von üblicherweise eingesetzten Tensiometern liegen. Alternative Sensoren wurden getestet, sind aber sehr teuer.
- In Containerversuchen konnte nachgewiesen werden, dass sich der Wurzelraum bei der Strategie der Defizitbewässerung vergrößert, indem sich die Wurzel über die gesamte Containerhöhe ausbreitet und somit ihr Einzugsgebiet vergrößert. Demgegenüber verteilt sich bei einer Vollbewässerung der Großteil der Wurzeln gleichmäßig auf die obere Bodenschicht.
- Die durchgeführten hochaufgelösten Strahlungsmessungen können prinzipiell als Abschätzung des Strahlungsdargebotes eines Blattes sowohl für einen Feldbestand, als auch für eine freistehende Pflanze verwendet werden. Das neue entwickelte 3D-Messkonzept der Strahlungsmessung ist erfolgreich getestet worden. Es liefert eine Quantifizierung der Unterschiede bei der Strahlungsexponiertheit von Blättern in verschiedenen Bestandessituationen. Die durchgeführten Experimente zeigen, dass im Vergleich zu Feldbeständen für Standorte mit hoher Rückstrahlung vom Untergrund (wie bei Containerversuchen) der Anteil an zusätzlich zur Verfügung stehender Strahlung nicht vernachlässigt werden darf. Dies zeigt sich im erhöhten Kornertrag der freistehenden Container in der Vegetationshalle als auch im Freiland. Die Bestimmung des tatsächlichen Strahlungskonsums der Pflanzen über die Gesamthöhe der Pflanze bedarf weiterer Experimente und Analysen.

Mikroskala – Lysimeterversuche

• Die in Brandis durchgeführten Bewässerungsexperimente konnten deutlich zeigen, dass Bewässerungsgaben die Evapotranspirationsleistung der angebauten Pflanzen insbesondere in trockenen Phasen deutlich steigern kann. Damit einher gehen deutliche Ertragserhöhungen bzw. -stabilisierungen. Der Vergleich zwischen bewässerten und unbewässerten Lysimetern zeigte ebenfalls signifikante Unterschiede in der Bodenwasserbewegung, die auch Auswirkungen auf den Transport und die Tiefenversickerung von Stoffen wie Düngemitteln haben. So kam es beispielsweise bei einem Starkregenereignis zu einer deutlichen Sickerwasserbildung am unbewässerten Lysimeter, da anhaltende Trockenheit zu einer deutlichen Ausbildung von Schrumpfungsrissen und Ausprägung hydrophober Bodeneigenschaften geführt hatte. Zudem konnte beobachtet werden, dass die bewässerte Kultur in der Aufwuchsphase (Frühjahr) deutlich schneller Wurzeln ausbildete und im Sommer Wasser aus tieferen Bodenschichten ausschöpfen konnte.

Mikroskala – Modellierung

- Für synthetische Simulationsexperimente und die Feldversucheversuche wurden dreidimensionale Bewässerungsmodelle (virtuelles Feld) erstellt. Diese haben einen großen Rechenaufwand und benötigen Hochleistungsrechner zur Simulation. Zur Reduktion der numerischer Komplexität und somit des Rechenaufwandes wurde untersucht, ob die wesentlichen Prozesse von Bewässerungssystemen auch durch zwei- oder eindimensionale Modelle approximiert werden können. Diese wurde sowohl für die Strömungsvorgänge als auch für die Struktur (Wurzel – mikroskopische oder makroskopische Beschreibung) durchgeführt.
- Im Ergebnis wurde deutlich, dass die Verwendung eines mikroskopischen Modells der Wurzel (L-System) nicht praktikabel ist. Die hochkomplexe Geometrie der Wurzel bedingt extrem feiner Gitter, deren Verwendung zum einen numerisch kompliziert ist und die zum anderen extrem lange Rechenzeiten hervorrufen. Einen guten Kompromiss bildet in den meisten Fällen die Verwendung von zweidimensionaler Modellen und makroskopischen Wurzelmodellen, da diese für die meisten Anwendungen hinreichend genaue Ergebnisse bei akzeptablen Rechenzeiten liefern. Eindimensionale Modelle, sollten somit nur in Ausnahmefällen bei besonders einfachen Sachverhalten (Beregnung, homogener Wurzelraum) verwendet werden.
- In Saphir sind mit den entwickelten Modellen umfangreiche Simulationsrechnungen durchgeführt worden, die zur Planung von Bewässerungssystemen mit allen gebräuchlichen Bewässerungsmethoden dienen können. Die Ergebnisse sind in einem digitalen Bewässerungsatlas zusammengestellt worden, der der Öffentlichkeit online und kostenfrei zur Verfügung steht.
- Aus den Simulationsrechnungen für die experimentellen Standorte wird deutlich, daß zur erfolgreichen Kalibrierung eines Bewässerungsmodells (virtuelles Feld) Messungen der bodenhydraulischen Zustandsvariablen sowie der meteorologischen Größen in hoher zeitlicher Auflösung vorliegen müssen. Messungen der Pflanzenkenngrößen sind ebenfalls zwingend notwendig, reichen aber in wöchentlicher Auflösung.

Feldskala – Experimente

- Die Feldexperimente unter realen Produktionsbedingungen, die in Kooperation mit der Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft in Pillnitz durchgeführt wurden, zeigten daß unter den gegebenen Boden- und Witterungsbedingungen am Beispiel des angebauten Weißkohls die aktuellen Empfehlung von Geisenheim zu unproduktiven Wassergaben und Tiefenversickerung des ungenutzten Wassers führen. Es wird deutlich, dass unter den gegebenen Boden- und Klimabedingungen die derzeit für Kopfkohl von Geisenheim empfohlenen Kc- Werte als deutlich zu hoch angesetzt erscheinen.
- Die automatisierte und optimierte, schwellenwertbasierte Bewässerung erreichte dagegen sehr hohen Erträge bei der geringsten eingesetzten Bewässerungsmenge (100 mm geringere Wassergabe). Allerdings muß dafür als Regelgröße die Saugsspannung verwendet werden, was entsprechende Sensoren erfordert, die im Boden eingebracht wurden.

Feldskala – Modellierung

• Die Feldexperimente in Pillnitz sind mit Hilfe eines erstellten Bewässerungsmodells simuliert worden. Dafür ist eine sortenspezifische Kalibrierung des Modells mit den Daten aus den ersten Feldversuchen notwendig gewesen. Die simulierte Gesamtbiomasse und Erträge stimmen mit den beobachteten Werten in beiden Jahren sehr gut überein. Daher kann das Bewässerungsmodell für die Bewertung von Vollbewässerungs- und Defizitbewässerungsstrategien auf andere Standorte (Klima und Boden) übertragen werden. In der Zukunft würde eine umfassende Versuchsreihe mit starkem Trockenstress die Aussagekraft des Bewässerungsmodells erhöhen.

Regionale Skala – Modellierung – Gefährdungsanalyse

- Zur Methodik der Gefährdungsanalyse für den Agrarbereich sind zahlreiche Untersuchungen durchgeführt worden. Dabei hat sich gezeigt, dass einfache Indizes wie z.B. der der Palmer Drought Severity Index (PDSI), welcher auf einem einfachen Zwei-Schicht-Bodenmodell aufbaut, nicht geeignet sind. Daher wurde in Saphir eine komplexere Modellkette entwickelt, die diese Analysen zuläßt. Diese besteht aus: 1) am Standort kalibrierte Bewässerungsmodelle, 2) Wahrscheinlichkeitsmodelle für Klima und Boden sowie 3) stochastischen Ertragsfunktionen für ausgewählte Kulturen, die eine sachsenweite Berechnung von Ertragseinbußen und ihren Wahrscheinlichkeiten unter allen denkbaren Bewirtschaftungsszenarien zulässt.
- Die Anzahl der Trockenperioden nimmt in Sachsen zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu und bleibt dann auf dem höheren Niveau. Gleichzeitig erhöht sich die absolute Schwankungsbreite der Anzahl der Trockenperioden in Sachsen.
- Detaillierte Analysen von typischen sächsischen Standorten zeigen, daß Ertragssteigerungen, Ertragssicherheit und Bewässerungsbedarf nicht nur von Klima und Kulturpflanze, sondern auch von Boden abhängen.
- Der Einfluß des Bodens nimmt in der Zukunft zu. Das liegt an der unterschiedlichen Fähigkeit des Bodens, Wasser zu speichern und damit die geringeren Niederschläge während der Vegetationsperiode zu speichern. Die Analyse der Unsicherheiten für unterschiedliche Bewirtschaftungsszenarien (mit/ohne Bewässerung) zeigt am Beispiel der Kartoffel, dass in ferner Zukunft Bewässerung zu Ertragssteigerung und höherer Ertragssicherheit führen kann.

Regionale Skala – Modellierung – Bewirtschaftungsszenarien

- In Zukunft wird es in Sachsen zu einer deutlichen Abnahme der Grundwasserneubildung und somit zur Abnahme des Wasserdargebots aus dem Grundwasser kommen. Besonders betroffen wird beispielsweise der Nordosten Sachsens sein. Sächsische Regionen mit einer größeren Dichte von natürlichen Oberflächengewässern und künstlichen Speicheranlagen werden weniger von der Abnahme des Wasserdargebots beeinflusst werden. Die Analysen zur "Standortautarkie" im Projekt Saphir zeigen, dass im Süd- und Mittelteil Sachsens im Vergleich zum Norden unter aktuellen Klimabedingungen das Wasser für eine Vollbewässerung zu 100
- In fernerer Zukunft ist die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser zur Bewässerung mehr durch die Zahl der existierenden Stauanlagen als durch die Bildung von Oberflächenwasser begrenzt.

Regionale Skala – Kosten-Nutzen Analysen

• Entscheidungsträgern und der Öffentlichkeit steht der Prototyp eines räumlich hoch aufgelösten, webbasierten Entscheidungshilfesystems zur Gefährdungsanalyse auf der Basis aktueller Niederschlags- und Trockenperiodenprojektionen zur Verfügung. Zusätzlich ist die wasserwirtschaftliche Evaluation und ökonomische Bewertung von potentiellen Bewässerungsmaßnahmen abhängig von Klima, Boden, Wasserverfügbarkeit und Kulturpflanzen in hoher räumlicher Auflösung möglich.

• Die bereitgestellten Ergebnisse werden für Bedingungen ohne Bewässerung, mit optimierter Bewässerung und unter Vollbewässerung berechnet. Zum anderen erhalten Entscheidungsträger Informationen zur Wassernachfrage aus dem landwirtschaftlichen Sektor abhängig von Wasserpreisen, Erzeugerpreisen sowie fixen und variablen Kosten.

Betriebsebene – Agrarökonomie

• Das entwickelte agrarökonomische Modell ermöglicht die Generierung unterschiedlicher optimierter Szenarien mit individueller Anpassung der Ausgangssituation (z.B. gewünschte Ertragssicherheit, Zeitscheibe der klimatischen Randbedingungen, Bewässerungstechnik und -methode). Das darauf aufbauende webbasierte Entscheidungssystem der lokalen Ebene bzw. Feldskala richtet sich primär an Landwirte. Mit Hilfe geeigneter Visualisierungstechniken wird der Landwirt in die Lage versetzt, zuverlässige Entscheidungen bezüglich der Planung seines Bewässerungssystems zu treffen.

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	e/Teilzi	iele des Projektes	1		
	1.1	Bewäs	serungsversuche und Übertragung von Ergebnissen	1		
	1.2	Inform	nationserweiterung durch Modellierung	1		
2	Reg	ionale l	Einordnung	3		
3	Ang	aben z	ur Teilnehmerstruktur	5		
4	Durchgeführte Arbeiten					
	4.1	Feld- ı	und Vegetationshallenversuche	7		
		4.1.1	F2012 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2012	7		
		4.1.2	F2013 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2013	7		
		4.1.3	F2014 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2014 $\ldots \ldots \ldots$	7		
		4.1.4	G2014 Untersuchungen zu Unterschieden in der Strahlungsexposition bei			
			Container experimenten in einer Vegetationshalle im Vergleich zu Feld-			
			beständen	7		
	4.2	Arbeit	spaket A1	8		
		4.2.1	A1.1 Sichtung und Analyse vorhandener Daten (Klima, Boden, Pflanzen,			
		4.0.0	Bewirtschaftung)	8		
		4.2.2	A1.2 Modellwahl (Pflanzenwachstum, Bodenwasserhaushalt)	9		
		4.2.3	A1.3 Auswahl relevanter Leitboden und Kulturpflanzen	10		
	4.9	4.2.4	A1.4 Generierung langjanriger Klimazeitreinen	10		
	4.3	Arbeit	Ap 1 Modellowstellung und kelibrierung	10		
		4.5.1	A2.2 Impangraighe Simulations and Optimicrunggradhungen	10		
		4.3.2	A2.2 Ontimales Bewässerungsmanagement	11		
		4.3.3	A2.3 Optimales Dewasserungsmanagement $\dots \dots \dots$	11		
	44	Arbeit	$\frac{112.4}{3}$	11		
	1.1	4 4 1	A31 Anwendung prognostischer Klimaszenarienrechnungen	11		
		4.4.2	A3.2 Erstellung von stochastischen Ertragsfunktionen	12		
		4.4.3	A3.2 Erstellung von stochastischen Bodenkennfunktionen	12		
		4.4.4	A3.3 Erstellung des Entscheidungshilfesystems	12		
_						
5	Met	hoden		13		
	5.1	Messe	xperimente Freising	13		
		5.1.1	Bewasserungsversuche F2013	13		
		5.1.2	Bewasserungsversuche F2014	14		
	5.0	5.1.3 Maaaa	Stranlungsmessungen F2014	10		
	0.2 5.9	Messe	xperimente Drandis	1ð 91		
	5.3 5.4	Model	xperimente l'inflitz	21 25		
	0.4	5 / 1	Einfluss des Wurzelmodells auf den Wurzelwasserentzug	20 25		
		549	Lysimetermodell	$\frac{23}{97}$		
		0.4.4		41		

	5.5	Modellierung auf der Feldskala 29
		5.5.1 Klimadaten in Dresden Pillnitz
		5.5.2 Modellanalyse und Modellkalibrierung $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 31$
		5.5.3 Modellkalibrierung für den Standort Pillnitz
		5.5.4 Stochastische Ertragsfunktionen – SCWPF $\dots \dots \dots$
	5.6	Modellierung auf der Regionalskala
		5.6.1 Klimadaten
		5.6.2 Regionale Pflanzenmodellierung
		5.6.3 Ableitung des Wasserdargebotes
	5.7	Agrarökonomische Bewertung
		5.7.1 Spline-Interpolation der SCWPF 42
		5.7.2 Feldskala
		5.7.3 Regionalskala
		5.7.4 Optimierung
	5.8	Prototypische Umsetzung des Entscheidungshilfesystems
		5.8.1 Konzept des Entscheidungshilfesystems
		5.8.2 IT-Konzept
		5.8.3 Software
6	Erge	bnisse und deren Dokumentation 53
	6.1	Messexperimente Freising
	6.2	Feldexperimente in Brandis
	6.3	Feldexperimente in Pillnitz 62
	6.4	Auswertung von Klimadaten
		6.4.1 Projizierte Niederschlagsänderung
		6.4.2 Trockenheits indizes – Methode für eine erste Gefährdungsanalyse 67
		6.4.3 Beispielhafte Entwicklung von Temperatur und Niederschlag 69
	6.5	Einfluss des Wurzelmodells auf den Wurzelwasserentzug
	6.6	Modellierungsergebnisse auf der Feldskala
	6.7	Stochastische Ertragsfunktion – dateninduzierte Unsicherheit
	6.8	Modellierungsergebnisse auf der Regionalskala
		6.8.1 Ertrag und Wasserbedarf 80
		6.8.2 Wasserdargebot
		6.8.3 Gegenüberstellung von Wasserdargebot und -bedarf
		6.8.4 Erträge weiterer Kulturen
		6.8.5 Wasserproduktivitäten
	6.9	Agrarökonomie
	6.10	Entscheidungshilfesystem
		6.10.1 Restriktionen
	6.11	Dokumentation der Ergebnisse
7	Nac	hhaltigkeit 99
	7.1	Technologieentwicklung und -transfer
	7.2	Persönliche Qualifikation der Mitarbeiter
Α	Anh	ang: Durchgeführte Arbeiten 103
В	Anh	ang: Ergebnisse 105
	B.1	Messexperimente
	B.2	Ertragssicherheit

B.3 Wasserproduktivität	111 116
Abbildungsverzeichnis	119
Tabellenverzeichnis	125
Literaturverzeichnis	127

1 Ziele/Teilziele des Projektes

Der Gegenstand des Projektes SAPHIR war die Untersuchung von Trockenstress, Wasserproduktivität und Bewässerungsbedarf landwirtschaftlicher und gemüsebaulicher Nutzpflanzen mit Hilfe von Bewässerungsexperimenten und Simulationswerkzeugen (virtuelles Feld). Das Hauptziel war die Bereitstellung relevanter Informationen, Schlußfolgerungen und Handlungsoptionen für wesentliche Akteure (Landwirte und Entscheidungsträger auf regionaler Ebene) aus der sächsischen Landwirtschaft. Einen einfachen Zugang zu den entwickelten Werkzeugen und Ergebnissen liefert ein webbasiertes Entscheidungshilfesystem mit maßgeschneiderten Schnittstellen für die verschiedenen Akteure, dass die Ermittlung der Bewässerungswürdigkeit beliebiger Standorte und angepasster Anbaumuster für Sachsen für gegenwärtige und zukünftige Klimabedingungen ermöglicht. Die Bestimmung der dafür wichtigen Datengrundlagen, nämlich kulturspezifische Ertragskurven erfolgte auf zwei Wegen: durch konkrete Feldversuche sowie simulationsbasierte Optimierung. Durch die Verwendung von prognostischen Simulationsmodellen ist die übertragung der Ergebnisse auf andere klimatische Standorte möglich und wurde wird zur Zeit für die Vereinigte Arabische Emirate und den Oman erprobt. Im Rahmen von SAPHIR fand eine intensive Qualifizierung der Nachwuchsforscher statt. Dies umfaßte nicht nur eine umfassende Vermittlung von Spezialwissen über Bewässerungslandwirtschaft inklusive der Teilkomponenten Messung, Modellierung, Analyse und Darstellung sondern auch der Erwerb von Fähigkeiten in Projektmanagement und Kommunikation für eine erfolgreiche Zusammenarbeit innerhalb der interdisziplinär zusammengesetzten Forschergruppe.

1.1 Durchführung von Bewässerungsversuchen und Übertragung von Ergebnissen auf zukünftige Klimabedingungen und andere Standorte

Im Projekt SAPHIR wurden an drei Versuchsstandorten vielfältige Daten zu Boden- und Pflanzenkennwerten in hoher Auflösung erhoben. Zu den beprobten Versuchsstandorten gehörten die Lysimeterstation Brandis mit ihren Freilandversuchen (Fokus Bodenwasserhaushalt), der Versuchsstandort Pillnitz (Fokus unterschiedliche Kulturen) und die Vegetationshalle des Lehrstuhls für Pflanzenernährung der Technischen Universität München in Freising (Fokus Trockenstressauswirkung auf Pflanzenwachstum). Hier ergänzten Freilandversuche die Containerversuche in der Vegetationshalle. Die in Freising erstellten Bewässerungsmodelle wurden zur Übertragung der Versuchsergebnisse auf andere Standorte bzw. zur Regionalisierung genutzt.

1.2 Informationserweiterung durch Modellierung

Untersuchungsdaten aus Bewässerungsexperimenten können direkt für Empfehlungen zur Bewässerungssteuerung an diesem Standort genutzt werden. Dieser Ansatz ist jedoch limitiert durch den begrenzten Umfang an Beobachtungsdaten und den Aufwand ihrer Erhebung. Verstärkt wird die Limitierung durch üblicherweise kurze Projektlaufzeiten von nur zwei bis drei Jahren, was nur eine kleine klimatische Stichprobe erlaubt. Ein ergänzender Weg ist der Aufbau eines simulationsbasierten, virtuellen Feldes und die Durchführung von Modellrechnungen basierend auf den erhobenen Versuchsdaten. Hierbei werden physikalisch und physiologisch basierte Bewässerungsmodelle genutzt, "virtuelle Felder" zu erzeugen. Diese sind in der Lage, optimale Strategien zur Bewässerungssteuerung sowohl zeitlich (von der Gegenwart in die Zukunft – "Klimawandel") als auch räumlich (von Versuchsstandort auf Praxisstandort) durch geeignete Simulationsrechnungen zu übertragen. Notwendige Vorarbeiten bzw. Voraussetzungen sind die Verifikation des Simulationsmodells, z.B. durch Kalibrierung und Validierung mittels Messdaten, die aus den Feldversuchen gewonnen werden. So entstehen an einem Standort kalibrierte, sortenspezifische Pflanzenparametrisierungen von in Sachsen typischen Sorten für das verwendete Modell, welche dann auf andere Standorte in Sachsen übertragen werden können. Die Übertragbarkeit ermöglicht, die Untersuchungsergebnisse der Bewässerungsexperimente an anderen Standorten in Sachsen zu nutzen.

2 Regionale Einordnung

Als Klimadaten wurden einerseits Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) genutzt. Andererseits kamen Daten der statistischen Downscalingmodelle WEREX V und WETT-REG2010 (beide von Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH) sowie des mesoskaligen Klimamodells REMO (Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg) zur Anwendung. Die Daten konnten teilweise über das regionale Klimainformationssystem für Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen (ReKIS) bezogen werden. Für die regionalen Simulationen von Wasserversorgungsmöglichkeiten wurde mit dem Projekt "Klimaänderungen auf den Wasserund Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten der sächsischen Gewässer" (KliWES) kooperiert. KliWES wird vom sächsischen Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) gefördert. Im Bereich Agrarökonomie erfolgte eine Zusammenarbeit mit dem LfULG bezüglich der Abstimmung zu methodischen Grundlagen bei der Verfahrenskostenberechnung. Ergebnisse aus der Befragung von sächsischen Bewässerungsbetrieben gewährten zudem einen Einblick in die Praxis. Des Weiteren wurden sowohl der aktuelle Stand und die Besonderheiten der Bewässerungslandwirtschaft in Sachsen erörtert und für die Zielstellung bewertet.

Am 24. und 25. September 2013 wurde von der SAPHIR-Arbeitsgruppe die Tagung "Bewässerungslandbau in Deutschland – Forschung trifft Anwendung" durchgeführt. Diese zeigte das Spektrum der aktuellen Forschung im Bereich des Bewässerungslandbaus in Deutschland auf. Über 40 Teilnehmer aus ganz Deutschland (sowie jeweils ein Teilnehmer aus Polen bzw. Syrien) aus Wissenschaft (forschungsbasiert) als auch Behörden und Verbänden (anwendungsbasiert) nahmen an der Tagung teil. International anerkannte Wissenschaftler aus ganz Deutschland stellten ihre Projekte sowie neueste Forschungsergebnisse im Rahmen eines Kolloquiums vor. Einige Teilnehmer des Kolloquiums präsentierten im Rahmen einer Posterausstellung eigene Projekte. Am zweiten Tag der Tagung wurden in zwei Workshops neue Technologien der Modellierung, Simulation und der optimalen Bewässerungssteuerung vorgestellt. In diesen einführenden Workshops konnten am Computer verschiedene Anwendungsbeispiele (u.a. Prozesssimulation von Mikrobewässerungsanlagen, Programmierung von Steuerungsgeräten wie den NMC von Netafim) getestet werden. Im Rahmen des Workshops wurden Kontakte geknüpft und intensiviert. Zum Workshop existiert eine Internetpräsenz¹. Dort befinden sich u.a. die Vorträge und Poster der Tagung.

¹http://tu-dresden.de/die_tu_dresden/fakultaeten/fakultaet_forst_geo_und_ hydrowissenschaften/fachrichtung_wasserwesen/ifhm/hydrologie/forschung/Projekte/saphir/ workshop_2013

3 Angaben zur Teilnehmerstruktur

Alle anvisierten Mitarbeiter waren während des Projektes für SAPHIR tätig. Damit arbeiteten seit Projektbeginn in SAPHIR acht wissenschaftliche Mitarbeiter. Darunter waren folgende Fachrichtungen vertreten: Pflanzenbau, Agrarökonomie, Mathematik, Meteorologie, Hydrologie und Geoinformatik. Weiter wurde eine Vielzahl von studentischen sowie wissenschaftlichen Hilfskräften im Rahmen von SAPHIR beschäftigt.

4 Durchgeführte Arbeiten

Im Folgenden werden die im Projektantrag in den einzelnen Arbeitspaketen definierten und während des Projektes durchgeführten Arbeiten beschrieben. Dabei handelt es sich sowohl um praktische Arbeiten in Feld und Labor sowie um theoretische Aspekte. Alle Arbeitspakete aus dem Antrag konnten durchgeführt werden.

4.1 Feld- und Vegetationshallenversuche

Feld- und Vegetationshallenversuche wurden mit unterschiedlichen Zielsetzungen in Pillnitz, Brandis und Freising in den Jahren 2013 und 2014 durchgeführt.

4.1.1 F2012 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2012

Im Jahr 2012 wurden aufgrund des verspäteten Projektbeginns keine Feldversuche durchgeführt. Jedoch wurden in dem Jahr noch zwei Monolithen auf einem Feldstandort in Diehsa (bei Görlitz) entnommen, die im Folgejahr für Lysimeterversuche in Brandis verwendet wurden. Im Rahmen dieser Probennahme wurde die Umgebung der Monolithen aufwendig beprobt um die Monolithen besser zu charakterisieren.

4.1.2 F2013 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2013

Es wurden umfangreiche Messexperimente in Pillnitz (verschiedene Pflanzenarten und -sorten mit verschiedenen Bewässerungsstrategien), Brandis (zwei Lysimeter mit Böden aus Ostsachsen mit bewässerten Pflanzenkulturen) und Freising (Bewässerungsversuche mit Mais in Containern in einer Vegetationshalle) durchgeführt. Die Bewässerungsversuche in Freising wurden hierbei durch Messungen der Wurzellängendichteverteilung zu verschiedenen Zeitpunkten der Pflanzenentwicklung ergänzt.

4.1.3 F2014 Durchführung von spezifischen Feldversuchen 2014

Es wurden umfangreiche Messexperimente in Pillnitz (zwei Pflanzenarten mit verschiedenen Bewässerungsstrategien) und Brandis (zwei Lysimeter mit Böden aus Ostsachsen mit bewässerten Pflanzenkulturen) durchgeführt. Zusätzlich fanden Experimente in Freising statt, wo neben Bewässerungsexperimenten mit Mais in einer Vegetationshalle, Kontrollexperimente mit Mais im Feld sowie in Containern im Freiland durchgeführt wurden. Diese wurde begleitet durch regelmäßige Strahlungsmessungen in den einzelnen Experimentumgebungen.

4.1.4 G2014 Untersuchungen zu Unterschieden in der Strahlungsexposition bei Containerexperimenten in einer Vegetationshalle im Vergleich zu Feldbeständen

Es wurden umfangreiche Messungen zur Strahlungsexposition von Maispflanzen in freistehenden Containern in einer Vegetationshalle und im Freiland im Vergleich zu Feldbeständen durchgeführt. Dazu wurde ein Messkonzept zur Erfassung zeitlich hoch aufgelöster Strahlungsdaten der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) aus verschiedenen Raumrichtungen entwickelt. Das Messkonzept beinhaltete die Entwicklung eines neuartigen Strahlungssensors mit dem PAR aus insgesamt sechs Raumrichtungen erfasst werden konnte. Die Messungen wurden an drei Standorten in zwei gesonderten Messschritten durchgeführt mit einer Dauermessung über jeweils eine Woche pro Messstandort und einer Spezialmessung zur Aufnahme eines Strahlungsprofils innerhalb des Feldbestandes. Die gesammelten Daten wurden ausgewertet und die Abschwächung der Strahlung an den einzelnen Standorten im Vergleich zu einer Referenz berechnet.

4.2 Arbeitspaket A1 – Vorbereitung/Durchführung

Zu Beginn wurden diverse Vorbereitungen für die Durchführung des Projekts getroffen. Dies beinhaltete primär die Sichtung und Analyse von vorhandenen Daten und Modellen um eine geeignete Auswahl treffen zu können.

4.2.1 A1.1 Sichtung und Analyse vorhandener Daten (Klima, Boden, Pflanzen, Bewirtschaftung)

Klimadaten

In einem übergeordneten Schritt wurden Klimadaten des DWD für Sachsen gesichtet und analysiert. Ebenso wurden Klimaprojektionen basierend auf den Special Report on Emission Scenarios (SRES)-Zukunftszenarien (Nakicenovic und Swart, 2000) wie sie im 4. Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) verwendet wurden, recherchiert und zugänglich gemacht. Die Daten entstammen dem Modell WEREX V (Kreienkamp et al., 2013, 2011; Spekat et al., 2012), der Weiterentwicklung von WETTREG2010. Diese Daten wurden auf das in SAPHIR genutzte Raster regionalisiert.

Daten der Klimastation Dresden-Pillnitz, denen eine zentrale Funktion bei der Generierung von Modellparametrisierungen für die einzelnen Bewässerungsversuche zukommt, wurden auf plausible Werte und Datenlücken analysiert. Existierende Datenlücken wurden geschlossen.

Boden

Die zur Pflanzenmodellierung notwendigen Bodendaten entstammen der Bodenkonzeptkarte (BKkonz) für Sachsen im Maßstab 1:25 000 (Quelle: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Referat 42 Boden, Altlasten). Trotz der Weiterentwicklung zu Bodenkarte BK 50 wird auf die dieser Karte zugrunde liegende BKkonz zurückgegriffen, da die hier benötigten Texturparameter der Bodenarten nicht Bestandteil der BK 50 sind. Im Untersuchungsgebiet gibt es 1248 verschiedene Bodentypen und je Rasterzelle ($5 \times 5 \text{ km}^2$) 1 bis 57 Bodentypen bei einem Median von 14. Da alle Bodentypen spezifische Pflanzensimulationen erfordern, musste die Zahl verringert werden. Für jede Rasterzelle wurden die maximal fünf häufigsten Bodentypen genutzt, die unter betrachteten Ackerflächen liegen.

Pflanzen

Neben den Pflanzenparametrisierungen, die durch die im Rahmen von SAPHIR durchgeführten Versuche entstanden sind, wurden Parametrisierungen aus der Pflanzenbibliothek des SVAT-Modells¹ Daisy (Abrahamsen und Hansen, 2000) genutzt. Das betrifft insbesondere Kartoffelund Maisparametrisierungen. Weiterhin wurden Wurzelmodelle gesichtet und auf ihre Anwendbarkeit hinsichtlich der Erstellung des virtuellen Feldes untersucht.

¹SVAT-Modelle (soil-vegetation-atmosphere-transfer model) beschreiben eine Klasse von Modellen, die die Prozesse und Transporte zwischen Boden, Vegetation und Atmosphäre simulieren

Bewirtschaftung

In Zusammenarbeit mit dem LfULG wurden relevante landwirtschaftliche Bewirtschaftungsdaten gesammelt und analysiert. Weiter wurde besonders für die Kosten der Bewässerungstechnik auf Daten des KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2013a) zurückgegriffen.

4.2.2 A1.2 Modellwahl (Pflanzenwachstum, Bodenwasserhaushalt)

Aufgrund verschiedener für dieses Projekt relevanten Ansätze im Modell (z.B. Richards-Gleichung für die Bodenwasserdynamik), der vorhandenen Parametrisierungen aus der Pflanzenbibliothek (Gemüse), sowie Empfehlungen aus der Literatur (Palosuo et al., 2011) wurde das SVAT-Modell Daisy (Abrahamsen und Hansen, 2000) ausgewählt.

Pflanzenwachstum

Es wurden Sensitivitätsstudien mit Daisy durchgeführt. Dabei wurde insbesondere getestet, wie sensitiv Daisy auf kleine Pertubationen in den Klimadaten reagiert. Sowohl die in Daisy zur Verfügung gestellte Funktionalität als auch die Ergebnisse der Testrechnungen führten zur Wahl von Daisy als geeignetem Modell.

Bodenwasserhaushalt

Während des Projekts wurden unterschiedliche Softwarepakete zur Simulation des Bodenwasserhaushalts verwendet und auf die Eignung zur Modellierung der für SAPHIR interessanten Phänomene untersucht. Zum Einsatz kamen hierbei COMSOL Multiphysics, Hydrus 2D/3D sowie muPhi. Zur Generierung möglichst realitätsnaher, dreidimensionaler Wurzeln wurde im späteren Projektverlauf auf die auf L-Systemen basierende Root-Box zurückgegriffen. Die Kopplung dieses Wurzelmodells mit einem Finite-Elemente-Löser erfordert die Erzeugung eines auf die Wurzel angepassten Berechnungsgitters sowie dessen Export in einem geeigneten Format. Hierfür kam das Programm Distmesh (Persson und Strang, 2004) sowie das auf FORT-RAN basierende Format NASTRAN (MacNeal, 1970) zum Einsatz.

Auf der Grundlage verschiedener Böden und Bewässerungstechnologien wurden mit Hydrus Szenarien modelliert. Die Ergebnisse wurden in mehreren Bewässerungsatlanten publiziert. Diese strukturieren die Ergebnisse übersichtlich für verschiedene Randbedingungen, u.a. die Reaktion des Bodens am Feldstandort Diehsa auf Bewässerung.

4.2.3 A1.3 Auswahl relevanter Leitböden und Kulturpflanzen

Für das Untersuchungsgebiet wurden die Bodentypen aus der Bodenkonzeptkarte entnommen (BKkonz, siehe Abschnitt 4.2.1). An jedem Standort werden die fünf häufigsten Bodentypen als Leitböden eingesetzt.

Die Auswahl der Kulturpflanzen erfolgte hinsichtlich der Relevanz der jeweiligen Kulturen und ihrer Bewässerung in Sachsen. Eingeschränkt wurde die Auswahl durch die notwendige Datenlage, da umfangreiche Daten zu Bewässerungsversuchen zur Verfügung stehen mussten. Getreide ist hierbei tendenziell weniger durch die projizierte Klimaveränderung betroffen als Gemüsesorten. Insbesondere wurden verschiedene Sorten von Kartoffeln, Mais, Erbse und Weißkohl untersucht. Winterweizen und Sommergerste wurden ebenfalls in verschiedenen Varianten ausgewählt.

4.2.4 A1.4 Generierung langjähriger Klimazeitreihen

Für die Parametergewinnung der in Pillnitz aus den Feldexperimenten gewonnenen Messdaten wurden stochastische Klimazeitreihen generiert. Zur Gewinnung dieser werden aus gemessenen Zeitreihen statistische Kenngrößen extrahiert, die dann genutzt werden um Zufallsreihen beliebiger Länge mit entsprechenden statistischen Eigenschaften zu erzeugen. Stochastische Klimazeitreihen ermöglichen die Parametrisierung des Modells an einem ungleich längeren Zeitraum mit Daten als dies mit dem gemessenen Zetraum möglich wäre. Zur Generierung der stochastischen Klimazeitreihen wurde der Wettergenerator LARS-WG (Semenov und Barrow, 1997) genutzt.

4.3 Arbeitspaket A2 – Erstellung des virtuellen Feldes

Unter dem virtuellen Feld versteht man eine computer- bzw. simulationsgestütze Abbildung der relevanten Prozesse auf dem Feld durch ein physiologisch und physikalisch basiertes Pflanzenwachstumsmodell. Im Bewässerungsprojekt SAPHIR wurde der Fokus auf das Pflanzenwachstum sowie den Wasserhaushalt (Bodenwasser, Wassergaben, Verdunstung) gelegt. Andere Prozesse (z.B. Nährstoffe, Krankheiten) wurden nur sekundär betrachtet und so wurde ein mit Nährstoffen voll versorgter, gesunder Bestand angenommen.

4.3.1 A2.1 Modellerstellung und -kalibrierung

Die realitätsgetreue dreidimensionale Modellierung komplexer Bewässerungsvorgänge impliziert einen sehr rechen- und damit zeitaufwendigen Vorgang. Bereits während erster Simulationsläufe im Rahmen des Arbeitspakets "virtuelles Feld" kristallisierte sich heraus, dass in einzelnen Böden insbesondere hochkomplexe Fließvorgänge, welche beispielsweise bei der Kopplung von Wurzelwasserentzug, Evaporation, Niederschlagsereignissen und Tropfbewässerung auftreten, nicht vollständig dreidimensional berechnet werden können. Aus diesem Grund wurde untersucht unter welchen Voraussetzungen es möglich ist auf eine niederdimensionale Approximation (2D/1D) zurückzugreifen. Hierzu wurde für unterschiedliche Setups die Fehlerentwicklung bei der Dimensionsreduktion des Modells betrachtet. Mit Hilfe der Messdaten der Versuche in Pillnitz von 2013 wurden erste Pflanzenparametrisierungen für Weißkohl und Buschbohne sowie die Bodenwasserhydraulik erstellt. Dies erfolgte unter Verwendung von Daisy, einem Optimierungsalgorithmus sowie der 2013 erhobenen Versuchsdaten.

Das kalibrierte Modell wurde nun u. a. zur Erstellung eines Bewässerungsplans für 2014 verwendet. Im Rahmen eines Modellupdates von Daisy (von Version 4.57 auf 5.14) wurden Anpassungen von Pflanzenparametrisierungen nötig. Die Anpassung wurde z.B. für Winterweizen und Sommergerste realisiert. Eine Überprüfung der Parametrisierungen wurde mit Hilfe von Plausibilitätstests für Winterweizen durchgeführt.

4.3.2 A2.2 Umfangreiche Simulations- und Optimierungsrechnungen

Zur Ableitung stochastischer Ertragsfunktionen wurden zahlreiche Simulationen an verschiedenen Standorten in Sachsen mit Daisy durchgeführt. Dabei wurden teilweise Pflanzenparametrisierungen aus bereits vorhandenen Bibliotheken als auch neue Parametrisierungen aus den Messexperimenten in Pillnitz genutzt. Eine flächendeckende Simulation mit Daisy ist sehr rechenaufwändig. Daher wurde das Daisy-Framework auf die Hochleistungsrechner der TU Dresden migriert. Damit wurde es möglich, eine ungleich größere Anzahl an Simulationen durchzuführen. Es wurden umfangreiche Simulationsrechnungen zur Modellierung des Wurzelwasserentzugs durchgeführt. Das anfänglich verwendete einfache zweidimensionale, axialsymmetrische Modell wurde im Laufe des Projekts umfassend erweitert. Es fanden unter anderem Simulationen mit makroskopischen sowie detaillierteren Wurzelmodellen für unterschiedliche Bewässerungsarten und -mengen statt. Diese Simulationen wurden im Rahmen von Vergleichsrechnungen sowohl ein-, zwei- als auch dreidimensional durchgeführt.

4.3.3 A2.3 Optimales Bewässerungsmanagement

In den Feld- und Gewächshausversuchen wurden verschiedene Bewässerungsszenarien untersucht. In Pillnitz wurden eine Bewässerungstrategie basierend auf der klimatischen Wasserbilanz (Geisenheimer Bewässerungssteuerung, Paschold et al., 2010a) in mehreren Abstufungen, simulationsbasierte Steuerung sowie eine sensorbasierte Steuerung evaluiert (Seidel et al., 2014). Ziel ist hierbei das Erreichen eines hohen Ertrags sowie einer hohen Wasserproduktivität (Ertrag pro eingesetzten Wasser). Für regionale Simulationen wurden verschiedene Ansätze eines optimalen Bewässerungsmanagements verfolgt. Einerseits wurde eine Optimierung für eine bestimmte Bewässerungsmenge durchgeführt. Dabei wird der Saugspannungsschwellwert zur Bewässerung so lange variiert, bis die gewünschte Bewässerungsmenge erreicht wird. Das System ist durch die vielen notwendigen Modellaufrufe sehr rechenaufwändig. Daher wurden andererseits für umfangreichere regionale Modellierungen eine begrenzte Anzahl verschiedener Saugspannungsschwellenwerte eingesetzt und die Ergebnisse zusammengefasst. Diese erlauben eine statistische Einordnung des Bewässerungsmanagements.

4.3.4 A2.4 Kosten-Nutzen-Analysen

Der Bereich Agrarökonomie hatte die Erstellung von Kosten-Nutzen-Analysen für die ökonomische Bewertung der verschiedenen Bewässerungsverfahren zum Ziel. Auf dieser Basis erfolgte die Konzeption eines regionalen Entscheidungshilfesystems zum integrierten Wasserressourcenmanagement für Entscheidungsträger und Landwirte in Sachsen. Dieses Entscheidungshilfesystem soll sachsenweit Auskunft über die Bewässerungswürdigkeit und geeignete Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel geben. Es wurden Literaturrecherchen zum aktuellen Stand der Bewässerung in Deutschland und Sachsen durchgeführt, die relevanten Bewässerungsverfahren sowie nutzergruppenspezifische Fragestellungen ermittelt. Des Weiteren wurden methodische Grundlagen bei der Kalkulation der Verfahrenskosten sowie deren Eingangsparameter zusammengestellt. Die verfügbaren Daten zur Kostenkalkulation und deren Bewertung für die Nutzung im Rahmen des Projektes wurden sondiert und anschließend in Matlab verknüpft. Dies bildete die Grundlage für die Konzeption der Einbindung in das Entscheidungshilfesystem.

4.4 Arbeitspaket A3 – Erstellung des sachsenweiten Informationssystems

4.4.1 A3.1 Anwendung prognostischer Klimaszenarienrechnungen

Ein Teil der Klimadaten (siehe Abschnitt 4.4.2) wurde zur Simulation mit Daisy herangezogen. Die daraus gewonnenen Daten liefern ein konsistentes Bild zwischen den Eigenschaften der Klimadaten und den dazugehörigen Ergebnissen.

Beispielsweise verursacht die erhöhte Lufttemperatur eine höhere Verdunstung. Mit der Formel nach Magnus (Kraus, 2004) kann aus der relativen Feuchte der Dampfdruck berechnet werden. Der Dampfdruck verhält sich linear zum Wassergehalt und erlaubt somit eine Abschätzung der Verdunstungsänderung bei einer Temperaturänderung, sofern die relative Luftfeuchte gleich bleibt. Bei einer Erwärmung um vier Grad (vgl. Abschnitt 6.4.3) besitzt die Atmosphäre bei gleichen relativen Feuchtigkeiten einen höheren Verdunstungsanspruch von über $100 \,\mathrm{mm\,a^{-1}}$. Je nach Wärmetoleranz der Pflanzenkultur kann eine höhere Temperatur ein schnelleres oder langsameres Ausreifen und damit einen ähnlichen oder höheren Verdunstungsanspruch verursachen. Diese theoretischen Betrachtungen konnten durch die Modellierung bestätig werden.

4.4.2 A3.2 Erstellung von stochastischen Ertragsfunktionen

Stochastische Ertragsfunktionen für Sachsen wurden über eine schwellenwertbasierte Simulation entwickelt. Es wurden stochastische Ertragsfunktionen im Untersuchungsgebiet für die jeweils maximal fünf häufigsten Böden berechnet. Die beteiligten Klimadaten des Regionalmodells WEREX V sind in Tabelle A.1 in Anhang A aufgeführt. Aus allen Simulationen wurden vier als homogen angenommene 30-Jahres-Zeiträume (1961-1990, 1991-2020, 2021-2050, 2071-2100) extrahiert und einzeln ausgewertet.

4.4.3 A3.2 Erstellung von stochastischen Bodenkennfunktionen und Übertragung/Skalierung der Kenngrößen und -funktionen

Analog zur klimatischen Betrachtung sollte auch die Variabilität des Bodens stochastisch beschrieben werden. Hierzu wurden unterschiedliche Verfahren zur Erzeugung stochastischer Bodenkennfunktionen untersucht. Zur Reduktion der Rechenkomplexität basierten diese hauptsächlich auf der Skalierung einzelner Bodenparameter wie beispielsweise der gesättigten Leitfähigkeit (Selim et al., 2003). Allerdings stellte sich heraus, dass die Verwendung stochastisch skalierter Bodendaten im Pfanzenwachstumsmodell im Vergleich zu anderen Variationen (z.B. Klima) nur einen sehr geringen Einfluss hat. Da ihre Nutzung außerdem einen unverhältnismäßig höherer Rechenaufwand bedingte, wurde auf dieses Konzept letztendlich verzichtet. An Stelle dessen fanden die Simulationen mit einer Auswahl an repräsentativen Leitböden für jede Rasterzelle statt (vgl. Kapitel 4.2.3).

4.4.4 A3.3 Erstellung des Entscheidungshilfesystems

Es erfolgten Recherchen, wie ein sachsenweites Informationssystem unter weitgehender Verwendung von Open-Source-Komponenten technisch umzusetzen sei. Dazu wurden einige Softwarelösungen untersucht und eine geeignete ausgewählt. Mit dieser erfolgte eine erste prototypische Umsetzung. Im Laufe des Projektes wurde diese fortlaufend weiterentwickelt. Einige Softwareelemente wurden hierbei wieder verworfen bzw. ausgetauscht.

5 Methoden

5.1 Messexperimente Freising

5.1.1 Bewässerungsversuche F2013

Ziel der Versuche war die Überprüfung der bestehenden Parametrisierung von Mais aus vorangegangenen Untersuchungen. Weiterhin dienten die Versuche dazu, weitere Beobachtungsdaten zu sammeln und Steuerungsstrategien der sensorbasierten Bewässerung zu testen um einen hohen Ertrag bei gleichzeitig hoher Wasserproduktivität zu erreichen. Ebenso hatten die Bewässerungsversuche die messtechnische Bestimmung der Wurzellängendichteverteilung von unterschiedlich bewässertem Mais (bedarfsgerecht und defizitär) zum Ziel, da diese zuvor lediglich indirekt im Model bestimmt werden konnte.

Es wurden umfangreiche Bewässerungsversuche in Pflanzencontainern in einer Vegetationshalle der Technischen Universität München durchgeführt, in denen zwei verschiedenen Maissorten (Pioneer Mais für ein mediterranes Klima, mit dem die meiste Erfahrung besteht, sowie die lokale Maissorte Amanatis) unterschiedlichem Trockenstress ausgesetzt wurden. Eine Übersicht des experimentellen Aufbaus und durchgeführter Untersuchungen gibt Abbildung 5.1.

Der Vorteil von Versuchen in der Vegetationshalle lag in der genauen Steuerung der Wasserzufuhr zu den Pflanzen und der sich daraus ergebenden präzisen Simulation von Trockenstress unter Ausschluss nicht gewünschter Niederschläge, wie sie sonst bei Freilandversuchen in den gemäßigten Breiten üblicherweise auftreten. Die Bewässerungssteuerung erfolgte dabei schwellenwertbasiert über im Boden befindliche Saugspannungssensoren (pF-Meter). Die Bestimmung der Schwellenwerte und zugehöriger Bewässerungsmengen je Bewässerungsereignis wurde zuvor im Modell bestimmt. Das hierfür eingesetzte Framework besteht aus drei Komponenten: (i) dem Wettergenerator LARS-WG, (ii) einem Optimierungsalgorithmus, welcher in der Lage ist, optimale Lösungen für das zu untersuchende Problem zu finden und (iii) dem Pflanzenwachstumsmodell Daisy zur Simulation von Wassertransport und Ertragsentwicklung. Ziel der Optimierung war die Maximierung des 90%-Quantils der Wasserproduktivität.

Zwei Bewässerungstratgien wurden untersucht. Eine bedarfsgerechte und eine defizitäre. Der Schwellenwert für die bedarfsgerechte Bewässerung betrug pF = 2.10 bei einer eingesetzten Wassermenge von 7 mm je Bewässerungsereignis. Für die defizitäre Bewässerung lag der Schwellenwert bei pF = 3.10 und 6 mm Wasser.

Während der Durchführung der Versuche von Mai bis Oktober 2013 wurden umfangreiche Daten erhoben. Dazu gehörten neben meteorologischen Größen wie Globalstrahlung, Temperatur und Feuchte, vor allem Messdaten des Bodenwasserzustandes (Bodenfeuchte und Saugspannung). Diese wurden mit TDR-Sonden (Fa. Campbell Scientific, USA) und pF-Metern (Fa. Ecotech) gemessen. Im Abstand von zwei Wochen wurden die Wuchshöhe der Pflanzen und der Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt. Zu Versuchsende erfolgte die Bestimmung der Pflanzenmassebestandteile (Biomasse und Ertrag). Bereits vor der Ernte wurden bei zwei Containern zu zwei verschiedenen Zeitpunkten Teilernten genommen und Wurzellängendichteverteilungen im Boden bestimmt.

Parallel dazu wurden Freilandversuche mit der selben Maissorte in Containern durchgeführt. Die Container wurden auf einem Feldstandort vergraben und den dort herrschenden Wetterund Standortbedingungen ausgesetzt. Die Container waren mit einem Boden gefüllt, der bereits in vorangegangen Untersuchungen parametrisiert wurde, so dass eine Neubestimmung der bodenhydraulischen Parameter nicht notwendig war. Zusätzlich zur Messung des Bodenwassers in Außencontainern wurden weitere Sensoren angrenzend im Versuchsfeld vergraben um damit Bodenfeuchte und Saugspannung zu messen. Ebenso wie in der Vegetationshalle wurden im zweiwöchigen Abstand Wuchshöhen der Pflanzen und Chlorophyllgehalt der Blätter bestimmt. Eine Übersicht des durchgeführten Versuches einschließlich des experimentellen Aufbaus, Sensorpositionen, Treatmentbezeichnungen und duchgeführter Teiluntersuchungen zeigt Abb. 5.1.

5.1.2 Bewässerungsversuche F2014

Neben neuerlichen Bewässerungsversuchen zur Untersuchung der Wasserproduktivität mit Mais standen bei den Versuchen in Freising in 2014 die Strahlungsunterschiede zwischen Vegetationshalle und Freiland im Fokus. Die Quantifizierung des Strahlungsdargebotes innerhalb der Vegetationshalle soll die Modellierung des Pflanzenwachstums innerhalb von Gewächshäusern und Vegetationshallen verbessern, da diese in entsprechenden Modellen stets überhöht werden müssen, um Erträge wie beobachtet mit dem Modell zu erzielen. Zudem können die gewonnenen Erkenntnisse genutzt werden, um Regressionsbeziehungen zwischen Kornerträgen (Biomasse) der einzelnen Standorte aufzustellen. Dadurch werden die Ergebnisse aus Untersuchungen in den vergangenen Jahren auf das Freiland übertragbar und für das Projekt Saphir verfügbar gemacht. Alle gewonnen Erkenntnisse könnten in die Modellierung einfließen und so Modellvorhersagen und Szenarienrechnungen verbessern.

Der Versuchsaufbau aus 2013 wurde angepasst. In der Vegetationshalle wurden insgesamt 15 freistehende Container aufgestellt. Darin wurde eine lokale Maissorte (KWS Lapriora) mit einer Pflanzdichte von zehn Pflanzen pro Quadratmeter, d.h. fünf Pflanzen pro Container, gepflanzt und jede mit einem Tropfer aus einer Tropfschlauchleitung versehen. Zur Beobachtung des Bodenwassertransportes wurden Tensiometer (Fa. bambach GbR, Tensio Technik) und pF-Meter (Fa Ecotech) für die Saugspannung, und TDR (Campbell Scientific, USA) und VH400 Sonden (Fa. Vegetronix, USA) für den Wassergehalt in vier unterschiedlichen Tiefen und zur Verdichtung des Messnetzes eingebaut. Dies erlaubte zusätzlich einen direkten Vergleich der Eignung der Messinstrumente bei der Beobachtung von Bodenwassergrößen. Zur besseren Beobachtung des Bodenwasserhaushaltes und Aufstellung der Wasserbilanz wurden unter zwei Containern Wägezellen installiert und die Container in ein Minilysimeterumgewandelt. Die Bewässerungssteuerung erfolgte durch in 30 cm Tiefe eingebaute pF-Meter. Bis zum Erreichen der Durchwurzelungstiefe der Pflanzen bis in diese Tiefe wurde bedarfsgerecht bewässert, um vorzeitig auftretenden Trockenstress zu vermeiden. Danach wurde auf sensorbasierte Steuerung umgestellt und entsprechend der vorgesehenen Schwellenwerte bewässert.

Insgesamt wurden drei verschiedene Bewässerungsschwellenwerte (Treatments) angewendet. Eine bedarfsgerechte Bewässerung (FI - full irrigation), eine Defizitbewässerungsstrategie mit einem Schwellenwert (DI - deficit irrigation) und eine Defizitbewässerungsstrategie mit vier Schwellenwerten (DI4) in Abhängigkeit der Entwicklungsphase der Pflanze. Für Treatment FI wurde als Schwellenwert pF = 2.10 und eine Bewässerungsmenge von 7 mm je Bewässerungsereignis verwendet. Die minimale Pause zwischen zwei Bewässerungsereignissen betrug vier Stunden. Treatment DI wurde mit einem Schwellenwert von pF = 3.10 und einer Bewässerungsmenge von 6 mm gefahren, Treatment DI4 mit den Schwellenwerten pF = 3.15/2.18/3.10/3.57 und den Bewässerungsgaben 6/3/11/2 mm.

Des Weiteren wurden drei verschiedene Bodenschüttungen verwendet. Ein Gemisch aus Sand und Schluff in ungestörter Lagerung aus dem Jahr 2013 (abgekürzt mit a), der selbe Boden lediglich neu eingebaut für den aktuellen Versuch (b), und einen natürlich zusammengesetzten Boden aus der Umgebung, ebenfalls neu eingebaut in die Container für diesen Versuch (c). Der Versuch in der Vegetationshalle wurde mit drei Wiederholungen durchgeführt (R1...3



Abbildung 5.1: Experimenteller Aufbau der Bewässerungsversuche Freising 2013 mit Übersicht über untersuchte Treatments (Bewässerungsmengen), Einbautiefen (B, C, D) der Sensoren einschließlich ihrer Bezeichnungen, sowie Untersuchungszeitpunkte (DS0, 1, 2) der Wurzeln.

Sorte: Amanatidis

- replicate). Die Container innerhalb der Vegetationshalle wurden so angeordnet, dass eine größtmögliche Strahlungsexposition zu allen Seiten hin gewährleistet werden konnte, d.h. sich die Container nicht gegenseitig beschatten konnten.

Für den direkten Vergleich zu den Versuchen in der Vegetationshalle wurden acht weitere Container im Freiland aufgestellt. Diese waren ebenfalls mit den Bodenschüttungen *a*, *b* und *c* befüllt, jedoch nicht mehr bewässert, sondern direktem Niederschlag ausgesetzt. Ihre Anordnung erfolgte weitestgehend der aus der Vegetationshalle, so dass keine Beschattungseffekte auftreten konnten. Löcher im Containerboden sollten ein Volllaufen der Container in Fällen von starken Niederschlägen verhindern. Zur Messung des Bodenwasserzustandes wurden TDR-Sonden und Hydrasonden (Fa. Stevens Water, USA) benutzt.

An einem weiteren Standort im Freiland wurden in einem Feldbestand Pflanzreihen so ausgedünnt, dass sie der Aufstellung der Container im Freiland entsprachen, um so die "Beobachtungslücke" zwischen Freilandcontainern und einem reinen Feldbestand zu schließen. Sowohl dieser Standort als auch der vierte Beobachtungsstandort, der reine Feldbestand, befanden sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Freilandcontainern. Eine gesonderte Bewässerung fand hier ebenfalls nicht statt. Versuchsbegleitend wurden über den gesamten Zeitraum der Bewässerungsversuche Pflanzenstadien und Wuchshöhen erfasst. Zur Ernte wurden Biomasse und ihre Bestandteile (Stengel, Blätter, Korn) bestimmt.

Zur Quantifizierung des Einflusses der Globalstrahlung auf die Container/Bestände in Vegetationshalle und Freiland erfolgte die Messung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) an allen Standorten. Dazu wurde ein neuartiger Sensor entwickelt, der die gerichtete Messung der PAR-Strahlung in sechs Raumrichtungen erlaubte. Dies ermöglichte nun erstmalig die genaue Quantifizierung der Unterschiede im Strahlungsdargebot zwischen den einzelnen Versuchsstandorten.

Eine Übersicht des durchgeführten Versuches einschließlich des experimentellen Aufbaus, Sensorpositionen, Treatmentbezeichnungen und duchgeführter Teiluntersuchungen zeigt Abbildung 5.2.

5.1.3 Strahlungsmessungen F2014

Im Rahmen vorangegangener Bewässerungsversuche in der Vegetationshalle kam es zu großen Abweichungen bei der sich anschließenden Simulation der Versuche im Model hinsichtlich der tatsächlichen Ertragsentwicklung der Pflanzen. Als mögliche Ursache konnten diese Unterschiede auf einen Unterschied im Strahlungsgenuss der Pflanzen in der Vegetationshalle im Vergleich zu Pflanzen in einem Feldbestand, der im Modell angenommen wird, zurückgeführt werden.

Containerversuche in einer Vegetationshalle besitzen den Vorteil, dass sie unter absolut kontrollierten Bedingungen ablaufen, kostengünstig sind und die Untersuchung einer Vielzahl unterschiedlicher Bewässerungs- und Managementstrategien erlauben, wie sie so nicht in einem Freilandversuch durchführbar sind. Dem gegenüber steht jedoch die Limitierung auf wenige Pflanzen je Container, was eine Übertragung auf einen Feldbestand schwierig macht und zu Unsicherheiten bei der Modellierung führt.

Ziel der Versuche war daher die Quantifizierung der Unterschiede in der Strahlungsexposition, namentlich der photosynthetisch aktiven Strahlung, von Pflanzen bei Containerversuchen in der Vegetationshalle und Pflanzen in einem Feldbestand.

Für die Untersuchungen der Unterschiede in der Strahlungsexposition bei Containersuchen im Gewächshaus und unter Freilandbedingungen war die Anwendung eines besonderen Messkonzeptes erforderlich. Da sich die Anteile von diffuser und direkter Strahlung mit dem Bedeckungsgrad auch tageszeitlich ändern, mussten diese Messungen zeitlich hochaufgelöst durchgeführt werden und eine möglichst umfassende Anzahl verschiedener Situation erfassen. Dafür



Abbildung 5.2: Versuchsplan der Bewässerungsversuche für Freising 2014 mit Aufstellung der Treatments und Sonden sowie Angabe der Einbautiefe und des verwendeten Bodens.



Abbildung 5.3: Standorte der Sondermessung mit (A) Container in der Vegetationshalle, (B) Container im Freiland und (C1, C2, C3) dem Feldbestand

wurden Messungen der gerichteten photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) durchgeführt, um die Unterschiede der Strahlung aus den einzelnen Raumrichtungen und die entsprechende Strahlungsexposition der Pflanzen besser beschreiben zu können.

Für die Strahlungsmessung innerhalb des Bestandes wurde eine spezielle Messanordnung entworfen. Sechs Einzelsensoren (Fa. LI-COR, USA) wurden so angeordnet und auf einem Träger befestigt, dass sich ein "Strahlungswürfel" ergab, der die Messung von PAR aus sechs Raumrichtungen erlaubte. Die Werte von jeweils drei Sensoren wurde zu einem Wert für den unteren und den oberen Halbraum zusammengefügt. Ein zusätzlicher Strahlungssensor diente als Referenz. Im Freiland wurde zusätzlich ein weiterer Referenzsensor an einer Wetterstation verwendet. Das Messintervall der einzelnen Sensoren betrug eine Sekunde und wurde über 60 Sekunden zu einem Minutenmittel aggregiert. Für die Auswertung wurden 30-Minuten-Mittel gebildet. Der Zeitraum der Messung fand vom 04.07. bis 10.10.2014 statt.

Die Messungen wurden an drei Standorten durchgeführt: (A) in der Vegetationshalle neben den Containern, (B) im Freiland neben dort aufgestellten Containern und (C) in einem Freilandfeldbestand. Standort B fungierte dabei als Übergang und sollte die Lücke zwischen A und C schließen. Der ursprünglich geplante Standort C musste aufgrund von Schwierigkeiten bei der Abstimmung zwei Mal gewechselt werden (im Folgenden mit C1, C2 und C3 bezeichnet) (Abbildung 5.3).

Die Messungen erfolgten zweistufig, bestehend aus einer Dauermessung und einer Sondermessung. Die Dauermessung bestand aus einer kontinuierlichen Aufzeichnung der Strahlung auf halber Pflanzenhöhe über ca. eine Woche und wurde insgesamt an den Standorten A und B fünfmal durchgeführt.

Die Sondermessung (Abbildung 5.4) umfasste die Messung der Strahlung an Standort C und dort über drei Höhen innerhalb des Bestandes (vertikales Strahlungsprofil) und an drei Positionen zum Rand des Feldes hin (horizontales Strahlungsprofil). Die Messung wurde ca. alle zwei Wochen in der Zeit zwischen 10 und 16 Uhr (MEZ) durchgeführt.

5.2 Messexperimente Brandis

Die Bewässerungsexperimente in der Lysimeterstation Brandis verfolgten mehrere Ziele. Zum Einen sollte der direkte Einfluss der Bewässerung auf die Wasserhaushaltsgrößen in Bewässerungssystemen quantifiziert werden:



- Abbildung 5.4: Messanordnung der Sondermessung am Standort C für das vertikale Strahlungsprofil innerhalb des Bestandes (Punkte (3, 1), (3, 2) und (3, 3) mit deren alternativer Bezeichnung voll (unten), voll (mittig), voll (oben)) in Abhängigkeit der Bestandeshöhe *hc* sowie für das horizontale Profil (Punkt (1, 2) -Rand des Feldes, Punkt (2, 2) - Übergangsbereich) inkl. dem Abstand zwischen den Punkten (1, 2), (2, 2) und (3, 2) und die Reihenfolge der Durchführung des Messung an den einzelnen Punkten (blau)
 - Evapotranspiration,
 - Wasserspeicheränderung,
 - Sickerwassermengen.

Zusätzlich sollte durch die zeitlich wie räumlich hoch aufgelöste Beobachtung der Bodenzustandsvariablen, sowie des Pflanzenwachstums ein Referenzdatensatz gewonnen werden. Dieser soll folgende Fragestellungen beantworten:

- Welche Messungen müssen in welcher Auflösung durchgeführt werden um die hochparametrischen dynamischen SVAT Modelle erfolgreich zu parametrisieren?
- Kann die Wurzelentwicklung der Bewässerungskultur aus den Messdaten abgeleitet werden?
- Welche Parameter des verwendeten SVAT Modells können durch Methoden der inversen Parameteroptimierung bestimmt werden und wie hoch sind die verbleibenden parametrischen Unsicherheiten?
- Sind Messungen der Bodenzustandsvariablen repräsentativ für das gekoppelte System Boden-Pflanze-Atmosphäre?
- Kann die Aufgabe der Parameteroptimierung für die hochparametrischen SVAT Modelle in entkoppelte Teilsysteme zerlegt werden?

Weiterhin sollten in Brandis Nebeneffekte der Bewässerung auf Wasser- und Stofftransportverhalten des Bodens untersucht werden. Diese Untersuchungen hatten zwei Schwerpunkte:

• Findet unter Bewässerungssystemen ein verstärkter vertikaler Wassertransport in die Grundwasserzone statt, oder können diese Systeme so automatisch gesteuert werden, dass das zusätzliche Bewässerungswasser komplett in der Wurzelzone gespeichert und anschließend von der Pflanze transpiriert wird?



- Abbildung 5.5: a) schematische Darstellung des Messaufbaus in Brandis. ET(t) bezeichnet die Evapotranspiration, P(t) den Niederschlag, I(t) die Bewässerung, h(t)Pflanzenhöhenentwicklung und LAI(t) die Entwicklung des Blattflächenentwicklung. Zusätzlich wurden die Saugspannung ($\Psi(z,t)$) und der Wassergehalt ($\theta(z,t)$) in verschiedenen Höhen beobachtet. Abbildung b) zeigt die maßgeblichen Prozesse und deren Interaktionen die beim Pflanzenwachstum eine Rolle spielen und die folglich in prognostischen Modellen korrekt abgebildet werden müssen.
 - Wird der Stoffumsatz in der ungesättigten Zone durch Bewässerungsmaßnahmen positiv beeinflusst?

Zur erfolgreichen Beantwortung der Forschungsfragen wurden in der Lysimeterstation Brandis zwei Großlysimeter installiert die im Wasserschutzgebiet Diehsa gewonnen wurden. Die Lysimeter sind jeweils mit 26 Sensoren zur Beobachtung der Zustandsvariablen der ungesättigten Bodenzone ausgerüstet. In der oberen Bodenzone (bis 75 cm unter Geländeoberkante) wurden Saugspannungen und Wassergehalte jeweils an zwei verschiedenen Stellen beobachtet. Eine Schema des Messaufbaus ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Ebenfalls sind die maßgebenden Prozesse abgebildet.

Direkt an der Entnahmestelle der beiden Lysimeter wurden jeweils 10 ungestörte Bodenproben entnommen (Stechzylindervolumen 250 cm^3). Anhand dieser Stechzylinder wurden im Labor mit Hilfe der "Constant-Head" Methode (Reynolds und Elrick, 2002) die gesättigten Leitfähigkeiten (K_s) bestimmt. Anschließend wurden mit ausgewählten Bodenproben vereinfachte

Kontrolltiefe in cm	Saugspannungsschwellenwert in hPa
-20	-600
-35	-600
-55	-600
	-500

Tabelle 5.1: Kontrolltiefen und Bewässerungsschwellenwerte für die Bewässerungsexperimente.

Multistep-Outflow Versuche, entsprechend der in Werisch et al. (2014) vorgestellten Methodik durchgeführt um eine erste Schätzung der horizontspezifischen bodenhydraulischen Parameter zu erhalten.

Beide Lysimeter wurden im Frühjahr 2013 mit Sensorik ausgestattet und anschließen mit Luzerne (Sorte Fee) bepflanzt. Im Juni 2013 wurde ein tensionsgesteuerte Tropfbewässerungsanlage in Betrieb genommen. Eine Bewässerung wurde genau dann ausgelöst, wenn in einer der Kontrolltiefen der Saugspannungsschwellwert erreicht wurde. Die applizierten Schwellenwerte sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Ein Vorteil der sehr hoch aufgelösten Beobachtung der Bodenzustandsgrößen ist die Möglichkeit das Wurzelwachstum abzuschätzen, dessen zeitlicher Verlauf einer der großen Unbekannten in der mathematischen Beschreibung der SVAT Systems darstellt. Natürliches Wurzelwachstum wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst unter anderem: (i) Wasser- und (ii) Nährstoffverfügbarkeit, (iii) Lagerungsdichte des Bodens und (iv) belüftetem Porenraum existieren keine allgemeingültigen, pflanzenspezifischen Wurzelverteilungen. Gleichzeitig stellen die Wurzeln das Bindeglied zwischen Boden und Pflanze dar. Alle relevanten Wetterdaten (Temperaturen (T) in drei Höhen, Windgeschwindigkeit (Ws) in zwei Höhen, relative Luftfeuchte (rF) in drei Höhen, Niederschlag (P) in drei Höhen, Strahlung (R)) werden direkt auf der Lysimeterstation mit zwei parallelen Wetterstationen erhoben und stehen in einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten zur Verfügung. Die Lysimetergewichte (M_L) werden stündlich aufgezeichnet und die Ausflüsse (q) liegen als Tageswerte vor. Aus den zur Verfügung stehenden Daten kann anschließend die aktuelle Evapotranspiration (ET_a) für den Zeitschritt t als Restglied berechnet werden.

$$ET_a^t = (M_L^{t-1} - M_L^t) - P^t - q^t$$
(5.1)

Zusätzlich zu den Wasserbilanzkomponenten und den bodenhydraulischen Zustandsvariablen wurden bei den regelmäßigen Messfahrten zusätzliche Pflanzenparameter erhoben. Diese Parameter umfassen die Entwicklung des Blattflächenindex (*LAI*), die Pflanzenhöhen (h_P) sowie das aktuelle Entwicklungsstadium. Da Luzerne mehrmals im Jahr geerntet wird, stehen für die Jahre 2013 und 2014 jeweils drei Ertragsmessungen zur Verfügung. Parallel dazu wurden durch das Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft (BfUL) chemische Analysen des Sickerwassers durchgeführt.

5.3 Messexperimente Pillnitz

Im Jahr 2012 konnten aufgrund des verspäteten Projektstarts keine Feldversuche durchgeführt werden. In den Jahren 2013 und 2014 wurden in Pillnitz vier (Weißkohl, Zwiebel, Erbse und Buschbohne) bzw. zwei Gemüsekulturen (Weißkohl und Buschbohne) in Bewässerungsversuchen angebaut und umfangreiche Daten erhoben. Die Versuche werden im Folgenden vorgestellt.

Im Jahr 2013 wurden auf der Versuchsfläche des LfULG in Pillnitz Bewässerungs- und Sortenversuche mit Buschbohne (zweimaliger Anbau), Markerbse, Zwiebel (jeweils vier Sorten) und Weißkohl (eine Sorte) durchgeführt. Hierbei wurden fünf Felder betrachtet: auf vier Feldern (LfULG Felder) wurden die oben genannten Kulturen in Sortenversuchen beregnet, im fünften Feld (TUD Feld) fand eine sensorbasierte Tropfbewässerung der vier Kulturen (jeweils nur eine Sorte) statt.

In jedem LfULG Feld (genauer in der Kontrolle) bzw. jeder Kultur im TUD Feld gab es eine Messstelle (insgesamt acht) mit jeweils drei Tensiometern (30, 60 und 90 cm Tiefe¹), einem pF-Meter (30 cm Tiefe) und zwei HydraSonden (30, 60 und 90 cm Tiefe). Mitte Juli wurden die Tensiometer auf 30 cm aus den SMUL Feldern ausgebaut (zu trocken) und in die Variante SIM_TUD auf 30 cm eingebaut (außer Kohl).

2014 wurden auf der Versuchsfläche des LfULG in Pillnitz Bewässerungs- und Sortenversuche mit Buschbohne und Weißkohl (jeweils eine Sorte) durchgeführt. Hierbei wurden drei Felder betrachtet (siehe Abb. 5.6): auf zwei Feldern (LfULG Felder, in Abb. 5.6 oben, SMUL Feld 1 und 2) wurden die oben genannten Kulturen beregnet, im dritten Feld (TU Feld) fand eine sensorbasierte Tropfbewässerung der zwei Kulturen in vier Teilfeldern statt (in Abb. 5.6 unten, TU Felder 1-4). In jedem der Felder gab es mindestens eine Messstelle (insgesamt acht) mit jeweils drei Tensiometern (30, 60 und 90 cm Tiefe im Kohl bzw. 20, 40 und 90 cm in der Bohne. Die Beregnung der entsprechenden Parzellen erfolgte mit einem Parzellen-Gießwagen mit Flachstrahldüsen. Um eine vollständige Infiltration sicherzustellen, wurden je Überfahrt nur 4 mm, vielfach auch nur 2 mm ausgebracht, so dass bis zu 13 Überfahrten pro Beregnungsgabe erforderlich waren. Die Tropfschläuche der Tropfbewässerungsanlage im sogenannten TU Feld wurden im Abstand von 50 bis 75 cm gelegt. Der Emitterabstand betrug 30 cm, die Durchflussrate $1.61 h^{-1}$ je Tropfer.

Bewässerungsvarianten

Aufgrund des kühlen Frühjahrs und des Starkregens im Juni/Juli 2013 wuchsen die Bestände von Bohne und Zwiebel äußerst schlecht. Die Erbse musste nicht bewässert werden. Folglich wird hier primär auf die Versuchsdurchführung für Kohl 2013 sowie die Versuche 2014 (Kohl und Bohne) eingegangen.

Variante Geisenheim (GS)

In der Variante GH nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (Paschold et al., 2010a) wird eine klimatische Wasserbilanz erstellt und damit der Bodenwassergehalt bzw. dessen Änderung über die Zeit berechnet². Allerdings sollte, abweichend von der aktuellen Empfehlung (Stand 05.09.2013), bei dem der Boden durch die Beregnungsgaben nach Absinken auf ca. 60 % nutzbare Feldkapazität (nFK) theoretisch immer auf den Ausgangswassergehalt von rund 90 % nFK aufgefüllt wird, der Boden nur bis ca. 80 % nFK aufgefüllt werden. Dabei wurde zunächst bis Blühbeginn nur die Bodenschicht 0–30 cm einbezogen, danach wurde entsprechend mit 0–60 cm Tiefe kalkuliert (Bohne). Die Berechnung der potentiellen Evapotranspiration des Bestandes (ET_c) und damit der klimatischen Wasserbilanz erfolgt nach der Geisenheimer Bewässerungssteuerung (Paschold et al., 2010b). Dabei wird mit den entsprechenden Kc-Werten für die jeweiligen Kulturen gerechnet, die auf die FAO-Gras-Referenzverdunstung (ET_0) ausgelegt sind (KcFAO, FA-GM 2013b).

Abweichend vom Geisenheimer Modell, das nach starken Niederschlägen mit einer Überschreitung der Feldkapazität (FK) die Bilanzierung für zwei Tage aussetzt und danach mit FKstartet, wird bei der eigenen Kalkulation die Nutzung der über die FK hinausgehenden Wassermenge (langsam bewegliches Sickerwasser) dadurch eingerechnet, dass sich der Boden auf

¹Tensiometer: T4e, UMS München, pF-Meter u HydraSonde: EcoTech, Bonn

 $^{^{2}}Kc$ Faktoren und weitere Details siehe Versuchsberichte von Dr. Laber



Abbildung 5.6: Schematischer Versuchsaufbau in Pillnitz 2014 (die beiden südlichen Felder (oben) sind nicht vollständig zu sehen). Die beiden SMUL Felder wurden beregnet, die vier Teilfelder TU Feld 1-4 tropfbewässert. Die gelben Quadrate markieren die Messpunkte der Tensiometer. Blau beschrieben sind die Messtiefen und die Loggerbelegung. bis zu $105\,\%~nFK$ auffüllen kann und nur die darüber hinausgehende Niederschlagsmenge als versickert angenommen wird.

Variante SVAT Kc

In dieser Variante (nur in 2014 bei Kohl) erfolgte die Bewässerung entsprechend der Geisenheimer Steuerung, wobei jedoch die Kc-Kurve simulationsbasiert ermittelt wurde. Die Kc-Kurve wurde mit Hilfe von Daisy sowie dem stochastischen Wettergenerator LARS-WG erstellt. LARS-WG wurde genutzt um eine 300 Jahre lange Zeitreihe mit Tagesdaten für den Standort zu generieren. Daisy rechnete für 300 Jahre mit den Boden- und Wettereigenschaften des Standorts Pillnitz in denen Weißkohl vollbewässert wurde. So konnten tägliche Kc-Werte (ET_c/ET_0) für 300 Jahre berechnet werden. Diese Kurvenschar gibt Auskunft über die Häufigkeit des Eintretens eines gewissen Kc-Wertes. Die für die Bewässerung gewählte Kc-Kurve entsprach dem 75 % Quantil, d.h. in 75 % der 300 Jahre lag der Kc-Wert unter diesem Wert.

Varianten SVAT 200 bzw. SVAT 250 (simulationsbasierte Echtzeitsteuerung)

In diesen Varianten wurde Daisy anhand der Versuchsdaten (Erträge, Vegetationsdauer, Bodenanalysen) von 2013 kalibiert und anschließend mit dem Modell der Bewässerungsbedarf wöchentlich für die Vegetationsperiode 2014 berechnet.

Jeweils montags wurden Bewässerungswasser und Wetterdaten der letzten Woche in Daisy assimiliert und der Bedarf für die folgende Woche simuliert. Ein Bewässerungsbedarf von 10 mm wurde beim Erreichen der definierten Saugspannung (s. unten) auf 30 cm Bodentiefe vorausgesetzt. Der Bewässerungsbedarf wurde um die Menge des fallenden Niederschlags in der folgenden Woche reduziert und per Beregnungsanlage appliziert. Als zukünftiges Wetter wurde das Jahr 2008 (mittelfeuchtes Jahr) angenommen. Eine kontinuierliche Messung (alle 15 min) der Saugspannung fand seit dem 16. Mai 2014 statt. Eine ähnliche Variante wurde auch 2013 bei Kohl getestet, wobei hier die Versuchsdaten von 2012 zur Kalibrierung verwendet wurden.

Variante Schwellenwertbasierte Tropfbewässerung (TU Feld)

In den Varianten TU Feld 1 bis 4 erfolgte die Bewässerungssteuerung tensionsbasiert. Die Schwellenwerte, bei deren Erreichen eine Bewässerungsgabe automatisch ausgelöst wurde, sind in Tabelle 5.2 dargelegt.

Kultur	Messwerte	Schwellenwert
Kohl Feld 1	$30\mathrm{cm}$	$-250\mathrm{hPa}$
Kohl Feld 2	$30\mathrm{cm}$	$-400\mathrm{hPa}$
Bohne Feld 3	$20\mathrm{cm}$	$-350\mathrm{hPa}$
Bohne Feld 4	$20\mathrm{cm}$	$-200\mathrm{hPa}$

Tabelle 5.2: Schwellenwerte zur Bewässerung in Pillnitz 2014

Bei Überschreitung des Schwellenwerts in der entsprechenden Bodentiefe fand eine Bewässerung von 10 mm mit einer anschließenden Pause von mehreren Stunden (Umverteilung des Wassers) statt (siehe Abb. 6.8).

Zur Steuerung wurde das obere Tensiometer gewählt. Im Kohl wurden die Tropfschläuche ensprechend der Reihen mit 67 cm Abstand, in der Bohne mit 50 cm Abstand voneinander ausgelegt. Der Emitterabstand betrug 30 cm, die Durchflussrate $1.61h^{-1}$ je Tropfer.


Abbildung 5.7: Bodensaugspannung (Stundenmittelwerte) gemessen im Kohl. Die automatische Tropfbewässerung (rote Balken) fand bei -250 hPa statt (TU Feld 1)

Messkonzept

In den beiden Jahren wurden in allen Kulturen eine Vielzahl von Messwerten mit hoher Auflösung gemessen (siehe Abb. 5.8). Bis auf wenige Ausnahmen wurden einmal pro Woche Werte für folgende Parameter aufgenommen: Blattflächenindex (engl. leaf area index, LAI), Pflanzenhöhen (H), stomatäre Leitfähigkeit der Blätter (gs), Blatt-N-Gehalt (N_l), Biomasseaufwuchs (etwa 3 Schnitte in der Vegetationsperiode, Partitionierung in Blatt-, Frucht,- und Stielanteil (B_l , B_h , B_s)), die Erträge (B_h) sowie Bodensaugspannungen in drei Bodentiefen (h(z, t)). Da aufgrund des Starkregens im Frühsommer 2013 die meisten Kulturen (alle außer Kohl) ein ungewöhnliches Wachstum aufwiesen (sehr geringe Biomassebildung, Absterben in der Pflanzen in Bodensenken u.ä.) und ein Teil der Bodenfeuchtemessungen aufgrund des hohen Tongehalts misslang, wird im Folgenden hauptsächlich auf die Daten von Kohl (2013, 2014) und Bohne (2014) eingegangen. Hochaufgelöste Wetterdaten des Standorts stehen zur Verfügung.

5.4 Modellierung auf der Mikroskala

5.4.1 Einfluss des Wurzelmodells auf den Wurzelwasserentzug

Im Rahmen des Arbeitspakets "virtuelles Feld" sollte unter anderem untersucht werden welchen Einfluss die Verwendung verschiedener Modellierungsansätze auf die Qualität der erzielten Simulationsergebnisse haben. Von besonderem Interesse war hierbei eine möglichst realistische, quantitative Berechnung des von der Planze aufgenommenen Bewässerungswassers. Hierfür wurden sowohl verschiedendimensionale, als auch in der Komplexität stark variierende Modellansätze, zum Einen für das Bodenwasserhaushaltsmodell, zum Anderen für die Wurzel, zur Simulation verwendet und miteinander verglichen. Die im Folgenden aufgeführten Modellierungsrechnungen erfolgten mit Comsol Multiphysics. Dieses Softwarepaket stellte sich durch das "Subsurface Flow"-Modul sowie durch umfangreiche mathematische Algorithmen, welche bereits im Programm integriert und größtenteils parallel nutzbar sind, als geeignete Simulationssoftware heraus. Teilweise entsprachen die benötigten Rechenzeiten sowie die Stabilität während der Lösung nicht immer den Erwartungen. Im Gegensatz zu anderen Programmen welche zum Einsatz kamen, bot allerdings nur Comsol die Möglichkeit gekoppelte zeitabhängige Randbedingungen sowie Quell- und Senkenterme mit definierten kontinuierlichen Funktionen in praktikabler Weise zu modellieren.

Erste Simulationsrechnungen umfassten unter anderem die Modellierung eines Lysimeters sowie die Simulation des Wurzelwasserentzugs von Mais in Lehm-, Schluff- und Sandboden. Hierzu kam zunächst ein 2D-achsialsymmetrisches Modell zum Einsatz. Zur Modellerstellung



Abbildung 5.8: Durchgeführte Messungen am Beispiel des Kohls. Blattflächenindex (LAI), Pflanzenhöhen (H), stomatäre Leitfähigkeit (gs), der Blatt-N-Gehalt (N_l) , Biomasseaufwuchs (Blatt-, Frucht,- und Stielanteil (B_l, B_h, B_s)), Erträge (B_h) sowie Bodensaugspannungen in drei Bodentiefen (h(z, t))

und Durchführung der Berechnungen mussten folgende Punkte bearbeitet werden:

- Wahl einer geeigneten Geometrie für Boden, Wurzel und Bewässerungssystem,
- Setup des Modells mit relevanten Bodendaten und geeigneter Retentionsfunktion,
- Implementierung einer Wurzelwasserentzugsfunktion (Senkenterm),
- mathematische Beschreibung von Rand- und Anfangsbedingungen,
- Generierung eines geeigneten Berechnungsgitters zur Ortsdiskretisierung und
- Setup des zeitkontinuierlichen Lösers.

Die hierbei entstandenen Modelle bildeten eine Grundlage für weitere Simulationsrechnungen. Bei der Berechnung umfangreicherer Systeme wurde deutlich, dass die realitätsgetreue dreidimensionale Modellierung komplexer Bewässerungsvorgänge einen sehr rechenintensiven und damit zeitaufwendigen Vorgang impliziert. Insbesondere hochkomplexe Fließbewegungen, welche beispielsweise durch die Kopplung von Wurzelwasserentzug, Evaporation, Perkolation, Niederschlagsereignissen und Bewässerungsvorgängen einhergehen, können teilweise nicht in einem sinnvollen zeitliche Rahmen modelliert werden. Aus diesem Grund wurde im Weiteren untersucht, unter welchen Voraussetzungen es möglich ist, auf eine niederdimensionale Approximation (2D/1D) zurückzugreifen. Hierzu wurde für unterschiedliche Setups die Fehlerentwicklung bei der Dimensionsreduktion des Modells betrachtet.

Unter anderem wurden für folgende Szenarien äquivalente, verschiedendimensionale Modelle erstellt, Simulationen durchgeführt sowie deren Ergebnisse hinsichtlich des Modellierungsfehlers analysiert:



Abbildung 5.9: Berechnungsgitter einer auf L-Systemen basierenden Wurzel

- Beregnung verschiedener Böden,
- Tropfbewässerung verschiedener Böden,
- verschiedene Wurzelwasserentzugsmodelle und
- Tropfbewässerung in Kombination mit Wurzelwasserentzug in verschiedenen Böden.

Nach der umfangreichen Untersuchung des Einflusses der Modelldimension auf das Simulationsergebnis wurde der Einfluss unterschiedlich detaillierter Wurzelmodelle auf die Simulation der Bewässerungsvorgänge analysiert. Die Komplexität des Wurzelwasserentzugs wurde dabei beginnend von einfachen homogenen Funktionen, über makroskopische Ansätze, bis hin zu detaillierten, auf L-Systemen basierenden Modellen, erweitert. Diese wurden jeweils mit einer wasserstressbedingten Reduktionsfunktion gekoppelt. Die geometrisch hochauflösendsten Wurzelmodelle wurden mit dem in Matlab entwickelten Programm Root-Box (Leitner et al., 2010) generiert (siehe Abb. 5.9). Basierend auf dem Konzept der Selbstähnlichkeit konnten hiermit realitätsnahe Wurzeln unterschiedlicher Kulturen nachgebildet werden. Des Weiteren ermöglicht dieses Paket die Integration von verschiedenen Arten von Tropismen während der Wachstumsphase.

Zur Modellierung von Bewässerungsvorgängen war es nötig eine Schnittstelle zwischen der Root-Box und dem Bodenwasserhaushaltsmodell zu schaffen. In einem ersten Ansatz wurde hierzu mit Hilfe des Pakets Distmesh (Persson und Strang, 2004) in Matlab ein Finite-Elemente-Gitter erzeugt um die Geometrie der erzeugten Wurzel darzustellen. Dieses wurde im NASTRAN Format (MacNeal, 1970) an Comsol exportiert. Als alternative Variante wurde die Wurzelverteilungsdichte der von der Root-Box generierten Wurzel berechnet und als räumlich diskrete Funktion als Senkenterm übergeben. Letzteres Vorgehen ermöglicht durch entsprechende Aufsummierungen eine Approximation für niederdimensionale Betrachtungen. Einige der erzielten Simulationsergebnisse bei der Bearbeitung obiger Fragestellungen werden im Abschnitt 6 beispielhaft dargestellt.

5.4.2 Lysimetermodell

Zur Modellierung der Lysimeterexperimente und Durchführung der Sensitivitätsanalyse wurde ein Daisy-Modell aufgebaut. Der schematische Aufbau inklusive der Randbedingungen und



Abbildung 5.10: Schematischer Aufbau des Daisy Modells zur Modellierung der Bewässerungsversuche auf den Lysimetern. Die farbigen Feldern innerhalb der Säule stehen für unterschiedliche Bodenhorizonte, die im Modell durch unterschiedliche hydraulische Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Messtiefen sind durch blaue Punkte gekennzeichnet. Rechts neben der Säule ist die räumliche Diskretisierung des Modells dargestellt. Ebenso sind die untere Randbedingung (Sättigungsfluss - Wasser tropft nur dann aus dem Lysimeter, wenn der Boden im untersten Knoten gesättigt ist) und die oberen Randbedingungen dargestellt. $ET_{pot}(t)$ bezeichnet die potentielle Evapotranspiration, P(t) den Niederschlag und I(t) die Bewässerungsmengen.

der numerischen Diskretisierung ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Das numerische Modell wurde in insgesamt 170 Schichten unterteilt, deren Abstände an der Oberfläche etwas geringer sind und mit zunehmender Tiefe etwas größer werden, um die numerische Stabilität zu erhöhen, die Massenbilanzfehler sowie die numerische Dispersion zu minimieren. Insgesamt wurden sechs Bodenhorizonte durch unterschiedliche hydraulische Eigenschaften berücksichtigt und zu deren Kalibrierung die berechneten Saugspannungs- und Wassergehaltszeitreihen



Abbildung 5.11: Aufbau des Modells Daisy zur Modellierung des Pflanzenwachstums (aus Abrahamsen und Hansen, 2000)

aus den entsprechenden Tiefen verwendet. Als untere Randbedingung wurde Sättigungsfluss angenommen, d.h. es kann nur dann Wasser aus der Modelldomain austreten, wenn die unterste numerische Schicht gesättigt ist. Die obere Randbedingung setzte sich dabei aus der mit dem Penman-Monteith Ansatz berechneten potenziellen Evapotranspiration und den beobachteten Niederschlägen und applizierten Bewässerungsgaben zusammen. Des Weiteren wurden im Modell eine semi-dynamische Wurzelentwicklung in Abhängigkeit der Wachstumsstadien sowie ein dynamisches Pflanzenwachstum berücksichtigt.

5.5 Modellierung auf der Feldskala

Für die Modellierung wurde das Modell Daisy verwendet. Dieses ist ein SVAT-Modell (Soil Vegetation Atmosphere Transfer), welches in Dänemark entwickelt wurde (Abrahamsen und Hansen, 2000). Die maßgeblichen Variablen und Prozesse sind in Abbildung 5.11 aufgeführt. Betrachtet werden Prozesse an der Erdoberfläche, die Prozesse im Boden und die Prozesse der bodennahen Atmosphäre.

Die aus den Bewässerungsversuchen gewonnenen Versuchsdaten wurden verwendet, um robuste Pflanzenparametersets von in Sachsen verbreiteten Sorten für das Pflanzenwachstumsmodell Daisy zu ermitteln.

Ziel war dabei zunächst die Simulation der durchgeführten Bewässerungsexperimente und sich daran anschließende Simulationen zur Bestimmung der Ertragsentwicklung unter verschiedenen Szenarien der Wasserverfügbarkeit um daraus die Ertragsfunktion abzuschätzen, die wiederum in die Datenbank mit regionalspezifischen Nutzpflanzen eingeht. Die Pflanzenparametersets wurden auf unterschiedliche Weise erstellt. Bei den Kulturen Weißkohl, Buschbohne, Erbse, Mais und Luzerne konnte auf eigene Versuchsergebnisse zurückgegriffen werden. Für Winterweizen, Sommergerste und Silagemais (zur Biomassegewinnung) wurde auf Versuchsdaten von nicht im Rahmen von SAPHIR durchgeführten Bewässerungsversuchen zurückgegriffen. Im Fall der Kartoffel wurde auf eine im Modell enthaltene Standardparametrisierung einer Sorte der gemäßigten Zone (Nord-/Zentraleuropa) zurückgegriffen und das Ertragsniveau an das sächsische angepasst.

5.5.1 Klimadaten in Dresden Pillnitz

Grundlage der Modellparameterbestimmung in Dresden-Pillnitz bildeten neben den pflanzenund bodenbezogenen Messdaten an der Klimastation Dresden-Pillnitz erhobene Daten. Diese Daten wurden auf unplausible Werte sowie Datenlücken analysiert.

Im Rahmen dieser Analyse wurden unterschiedliche Methoden zur Datenergänzung bei Datenlücken getestet, um die geeignetste Methode zu ermitteln. Dabei wurden Nearest-Neighbour-Verfahren, Regressionsverfahren (Schneider, 2001), Autoregressive Modelle (Shumway und Stoffer, 1982), Neuronale Netze sowie Analogverfahren getestet. Teilweise benötigen die Verfahren Referenzdatensätze von benachbarten Stationen, die jedoch in Sachsen ausreichend vorhanden sind. Es zeigte sich, dass die Übernahme von Werten von der nächsten Station, wie sie im Nearest-Neighbour-Verfahren realisiert ist, die besten Ergebnisse bringt. Entsprechend wurden fehlende Daten der Station Pillnitz über die umliegenden Stationen des Deutschen Wetterdienstes (Dresden-Hosterwitz, Dresden-Klotzsche, Dresden-Gohlis und Dresden-Strehlen) ergänzt. Dazu wurden diese Stationen zwischendurch mit Hilfe der Online-Plattform des Deutschen Wetterdienstes WebWerdis³ bis zum jeweils aktuellen Zeitpunkt nachgeführt. Zur Ergänzung wurde die jeweils nächste Station herangezogen für die der gesuchte Wert vorhanden war. Für die ergänzte Klimazeitreihe für Dresden-Pillnitz wurden mit Hilfe des Wettergenerators LARS-WG⁴ stochastische Zeitreihen simuliert, die zur Ermittlung von Pflanzen- und Bodenparametern für Daisy genutzt wurden. Da LARS-WG nur stochastische Zeitreihen für die Parameter Minimum- und Maximumtemperatur, Globalstrahlung und Niederschlag simulieren kann, wurde die zu einer optimalen Simulation notwendigen Größen Mitteltemperatur als arithmetisches Mittel aus Minimum-und Maximumtemperatur berechnet. Die Größen relative Feuchte und Windgeschwindigkeit wurden mit einem Analogverfahren ergänzt. Das Analogverfahren basiert dabei auf der Suche nach der ähnlichsten Situation in der Vergangenheit. Hierbei diente als Referenzdatensatz die Messdatenreihe der Station Pillnitz. Als ähnlichkeitsmaß wurde die euklidische Distanz zwischen den von LARS-WG simulierten Größen Minimum- und Maximumtemperatur, Globalstrahlung und Niederschlag und den jeweiligen Größen aus dem Referenzzeitraum verwendet. Aus der ähnlichsten Situation wurden dann die Werte für die relative Feuchte und die Windgeschwindigkeit für die simulierte Reihe adaptiert. Gab es mehrere Situationen im Referenzzeitraum, für die das Ähnlichkeitsmaß dem Minimum entsprach, so wurde die letztendlich genutzte Situation per Zufall bestimmt. Die hier betrachteten Situationen können durch frei wählbare Längen (z.B. ein oder auch drei Tage) beschrieben werden, um zum Beispiel auf typische Wetterabläufe im Zielgebiet einzugehen. Es hat sich jedoch bei Tests gezeigt, daß bei längeren Zeiträume extreme Zustände des Wetters einzelner Tage die Auswahl des Referenzzeitraumes bestimmen, so daß einzelne Werte überproportional zur Ersetzung herangezogen werden. Die Generierung der synthetischen Datenreihen wurde mit der Ermittlung der vom Modell Daisy benötigten Temperaturstatistiken abgeschlossen. Alle Routinen basieren auf dem Wetterdatenformat des Modells Daisy und sind in Fortran programmiert, so daß sie betriebssystemunabhängig betrieben werden können.

Viele der zur Verfügung stehenden Stationen sowie synthetische Zeitreihen des Wettergenerators LARS-WG liefern nur Daten auf Tagesbasis. Die in Daisy implementierte Disaggregierung scheint unzureichend, da zum Beispiel der Niederschlag homogen über den Tag verteilt wird. Im Rahmen einer Literaturstudie wurden alternative Methoden identifiziert. Grundsätzlich können die Methoden unterschieden werden in a) Methoden, die einen Referenzdatensatz zum Anlernen von Modellparametern benötigen und b) Methoden die keinen Datensatz zum Anlernen benötigen. Zu den untersuchten Ansätzen gehören einfache Ansätze, bei denen ein klimatologischer Tagesgang den Daten aufgeprägt wird (z.B. Bregaglio et al. (2010)). Zum

³siehe http://www.dwd.de/webwerdis, Zugriff am 7.2.2014

⁴siehe http://rothamsted.ac.uk/mas-models/larswg.php, Zugriff am 7.2.2014

Teil wird dieser Tagesgang an Tagesdaten der betrachteten Größe sowie jahreszeitabhängigen Parametern skaliert. Andere Ansätze verfolgen einen Analogansatz (Sharif et al., 2013), bei dem in der Vergangenheit nach den ähnlichsten Situationen gesucht wird um dann zum Beispiel die Niederschlags- und Strahlungspartitionierung dieser Situationen auf den entsprechenden Tag zu übertragen. Dadurch kann die Konsistenz zwischen einzelnen Klimaelementen im Gegensatz zu elementbasierten Tagesgangsverfahren gewährleistet werden. Weiterhin wurden Kaskadenmodelle für den Niederschlag getestet (Olsson, 1998), wie sie in der Hydrologie häufig Anwendung finden. Diese basieren auf der Annahme eines regional unterschiedlichen fraktalen Verhalten des Niederschlags. Die Beschreibung des fraktalen Verhaltens ist dabei von unterschiedlichen Bedingungen abhängig, z.B. der Jahreszeit, der Menge des Niederschlages oder der Lage des zu disaggregierenden Niederschlagsintervalls im gesamten Niederschlagsereignis. Die einzelnen Verfahren basieren dabei auf der Nutzung von Dateien mit dem Daisy-Wetterdatenformat und wurden in Fortran programmiert. Um die Verfahren zu testen wurden große Mengen von Klimadaten auf Stundenbasis für den sächsischen Raum sowohl mit Hilfe der Online-Plattform des Deutschen Wetterdienstes WebWerdis sowie dem Online-Zugriff auf agrarmeteorologische Stationen des LfULG zusammengestellt und in das Wetterdatenformat von Daisy überführt. Auswertungen der Ergebnisse zeigen, dass, sofern die Voraussetzungen gegeben sind, das Analogverfahren zur Disaggregierung verwendet werden sollte. Die Ergebnisse für das Kaskadenmodell rechtfertigen hierbei nicht den höheren programmiertechnischen Mehraufwand. Weiterhin wurden Sensitivitätsstudien mit dem Daisy durchgeführt um den Einfluss von kleinsten Schwankungen in den Klimadaten auf den Ertrag zu simulieren. Dazu wurden in den einzelnen phänologischen Phasen Klimadaten neu kombiniert, wobei nur die Reihenfolge der Tage verändert wurde, die einzelnen Klimaelemente der einzelnen Tage aber in ihrer Zusammensetzung gleich blieben. Die Veränderungen gegenüber der Originalreihe sind damit viel geringer als bei einer aus der Originalreihe per Wettergenerator erzeugten stochastischen Zeitreihe. Entsprechend sind auch die Ertragsunterschiede geringer, zeigen jedoch weiterhin Magnituden die nicht vernachlässigt werden können.

5.5.2 Modellanalyse und Modellkalibrierung

Globale Sensitivitätsanalyse

Die Kalibrierung des Modellsystems Daisy ist ein wesentlicher Schritt zur Erstellung eines robusten, prognosefähigen Modells zur Abschätzung des sachsenweiten Bewässerungsbedarfs und der Ausweisung bestmöglicher Bewässerungsstrategien für einzelne Regionen. Den ersten Schritt der Modellanalyse stellt dabei immer eine Sensitivitätsanalyse dar (Saltelli et al., 2010; Saltelli und Annoni, 2010). Ziel der Sensitivitätsanalyse ist vor allem (Pappenberger et al., 2008; Saltelli et al., 2008; Massmann und Holzmann, 2012):

- die Untersuchung der Interaktionen zwischen Modelleingang und Modellausgabe, insbesondere des Einflusses einzelner Modellparameter auf die Variation der berechneten Ausgabegrößen,
- die Identifikation der Haupteinflussfaktoren auf die relevanten Modellausgabegrößen,
- die Detektion von, für die Ausgabegrößen von Interesse, irrelevanten Modellkomponenten zur Reduktion der Modellkomplexität und
- die Detektion von Modellparametern und/oder Modellausgaben die sich gegenseitig beeinflussen.

Verfahren der globalen Sensitivitätsanalyse stellen modellunabhängige und annahmefreie Verfahren dar, bei denen alle Modellparameter gleichzeitig variiert werden. Sie erlauben somit

die Berücksichtigung der gesamten Spannbreite an möglichen Parametervariationen sowie eine simultane Bewertung der Parameterinteraktionen und des Einflusses dieser auf die Modellausgabe. Zusätzlich sind sie die einzigen Verfahren die mit dem Phänomen der Äquifinalität⁵ umgehen können (Pappenberger et al., 2008). Abbildung 5.12 zeigt ein schematisches Ablaufschema der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse. Im Wesentlichen werden die folgenden Schritte abgearbeitet: (i) Generierung einer Eingangsstichprobe aus Parameterkombinationen, (ii) Evaluierung der einzelnen Parameterkombinationen im Modell und (iii) Anwendung des ausgewählten globalen Sensitivitätsanalyseverfahrens zur Zuordnung der Outputvarianz auf den Einfluss einzelner Eingangsparameter und deren Interaktionen. Zur Analyse des Modellsystems wurde das "enhanced Fourier Amplitude Sensitivity Test (eFAST)" (Saltelli et al., 1999) ausgewählt, da es bei einer moderaten Stichprobengröße sowohl die Berechnung des Sensitivitätsindex 1. Ordnung (S_i) sowie des totalen Sensitivitätsindex (ST_i) ermöglicht. Der Sensitivitätsindex 1. Ordnung beschreibt dabei den alleinigen Einfluss des jeweiligen Parameters ohne Berücksichtigung der Interaktionen mit anderen Parametern. Der Einfluss inklusive Parameterinteraktionen wird durch den totalen Sensitivitätsindex beschrieben. Je komplexer das untersuchte numerische Model, desto geringer sind für gewöhnlich die einzelnen S_i (da die Ausgabegrößen in Abhängigkeit einer Vielzahl von Parametern berechnet werden). Aus diesem Grund wird für die Unterscheidung zwischen sensitiven und weniger sensitiven Parametern zumeist der ST_i herangezogen.

Das Modellsystem Daisy kann als sehr komplexes Modell kategorisiert werden, da es eine Vielzahl verschiedenster Prozesse (Bodenwasser- und Stofftransport, Photosynthese, Wurzelentwicklung, Biomassepartitionierung, Trockenstress, Temperatureffekte, u.a.) berücksichtigt und dazu eine Vielzahl an potentiellen Kalibrierparametern benötigt. Zusätzlich ist zur mathematischen Abbildung dieser Prozesse eine numerische Lösung partieller Differentialgleichungssysteme notwendig, welche die Modellläufe zeitaufwendig gestaltet. Abhängig von den Randbedingungen, der räumlich, zeitlichen Diskretisierung und der verwendeten Parameterkombination kann die Simulation der Wachstumsperiode 2013 für eines der Lysimeter mehrere Minuten in Anspruch nehmen. Während das Sobolverfahren (Sobol, 1993) eine gleichzeitige Berechnung spezifischer Parameterinteraktionen ermöglicht hätte, ist die Anzahl der notwendigen Modellevaluierungen für ein derartig komplexes Modell zu hoch um statistisch robuste Sensitivitätsindizes berechnen zu können (Rakovec et al., 2014). Während für das Sobolverfahren weit mehr als 10^6 Modellläufe notwendig sind, reichen für die eFAST-Methode bereits etwas mehr als 2.0 · 10⁵ Evaluierungen. Der dennoch hohe Berechnungsaufwand zur Durchführung einer Sensitvitätsstudie mit dem Modellsystem Daisy wurde durch die Entwicklung eines parallelisierten Frameworks, dass die parallele Ausführung mehrerer Modellinstanzen ermöglicht, auf einen akzeptablen Zeitraum begrenzt. Die Ergebnisse der Sensitivitätsstudie stellen die Grundlage für die zu entwickelnde Strategie zur Modellkalibrierung dar.

Multikriterielle Parameteroptimierung

Als zweiten Schritt zur modelgestützten Experimentanalyse wird eine multikriterielle Kalibrierung von Daisy durchgeführt. Diese Strategie wird gleichermaßen für die Experimente in Brandis, Freising und Pillnitz genutzt. Bei einer multikriteriellen Optimierungsstrategie können verschiedene und zum Teil konträre Ziele simultan als auch getrennt voneinander betrachtet werden (Gupta et al., 1998; Efstratiadis und Koutsoyiannis, 2010), mit dem Ergebnis eines eines Pareto-optimalen Satzes an Lösungen. Diese Lösungen haben die Eigenschaft, dass die Verbesserung in einem einzelnen Kriterium zu einer Verschlechterung in einem anderen Kriterium führt (Vrugt et al., 2003; Wöhling et al., 2013c). Sie stellen also eine Vielzahl an

 $^{^5}$ Äquifinalität bezeichnet das Phänomen, dass verschiedene Parameterkombination einen ähnlichen Modelloutput erzeugen können.



Abbildung 5.12: Ablaufschema der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse (Siebertz et al., 2010)



Abbildung 5.13: Darstellung einer hypothetischen Pareto Front (dunkelgraue Punkte) die aus dem Pareto-optimalen Subset aller Lösungen (helles grau) besteht. Die schwarzen Punkte sind eine Untermenge der Pareto-Front die einen akzeptablen Kompromiss zwischen den beiden Kriterien Φ_1 und Φ_2 erzeugen. Zusätzlich sind die Pareto-extremen Lösungen eingezeichnet (Grüntöne) und die Kompromisslösungen $\overline{\Phi}_e$ und $\overline{\Phi}_d$. (Werisch et al., 2014)

unterschiedlichen Kompromissen zwischen den einzelnen Kriterien dar. Der Vorteil multikriterieller Optimierungsstrategien gegenüber einer aggregierten Berücksichtigung der einzelnen Kriterien ist vielfältig: (i) die Wichtung der einzelnen Kriterien muss nicht vom Modellierer im Vorhinein festgelegt werden (Efstratiadis und Koutsoyiannis, 2010), (ii) die Konflikte zwischen den einzelnen Kriterien werden sichtbar (Efstratiadis und Koutsoyiannis, 2010), (iii) es werden ebenfalls die Lösungen ermittelt die die beste Anpassung an ein Einzelkriterium erreichen (Krauße et al., 2012), (iv) durch die Ermittlung der Konflikte zwischen den einzelnen Kriterien ist eine Bewertung der strukturellen Modellunsicherheiten möglich (Wöhling et al., 2013a). Zusätzlich wird eine simultane Einbindung verschiedener Messungen ermöglicht, die den Informationsgehalt über das zu optimierende System erhöhen (Wöhling et al., 2013b). Schlussendlich kann aus der Pareto-optimalen Lösungsmenge eine oder mehrere Kompromisslösungen extrahiert werden. Idealerweise wird die Lösung ausgewählt, welche den minimalen Abstand zu dem Punkt hat an dem alle Kriterien optimal erfüllt sind (Werisch et al., 2014). Abbildung 5.13 zeigt eine hypothetische Pareto-Front für eine Parameteroptimierung mit zwei Zielfunktionen.

Zur multikriteriellen Parameteroptimierung wurde der von Vrugt und Robinson (2007) entwi-



Abbildung 5.14: Flowchart des verwendeten AMALGAM Algorithmus. Die Parameterkombinationen einer anfänglich zufälligen Startpopulation werden im Model evaluiert. Anschließend werden alle Pareto-optimalen Lösungen ermittelt. In nachfolgenden Schritten werden die Gewichte der einzelnen Suchstrategien entsprechend ihrer Erfolgsrate angepasst. Nach Erreichen einer vorher vom Modellierer festgelegten Anzahl an Modellevaluierungen wird die Pareto-Front ausgegeben.

ckelte AMALGAM Algortihmus verwendet. AMALGAM ist ein genetisches, selbstgesteuertes Multialgorithmus-Suchverfahren für die Lösung multikriterieller Optimierungsprobleme. Der Algorithmus kombiniert dabei vier verschiedene Suchstrategien: (i) nondominated sorting genetic algorithm (NSGA-II) (Deb et al., 2002), (ii) particle swarm optimisation (PSO) (Kennedy et al., 2001), (iii) adaptive metropolis search (AMS) (Haario et al., 2001) und (iv) differential evolution (DE) (Storn und Price, 1997). Die Kombination verschiedener Suchstrategien in einem Algorithmus hat den Vorteil die unterschiedlichen Suchstrategien zu verschiedenen Zeitpunkten während des Optimierungsvorgangs favorisieren zu können. Dadurch wird eine effiziente und verlässliche Lösung des Optimierungsproblems ermöglicht. Abbildung 5.14 zeigt schematisch den Ablauf des AMALGAM Algorithmus.

5.5.3 Modellkalibrierung für den Standort Pillnitz

Vor dem Bewässerungsbeginn 2014 fand eine aufwendige Analyse der erhobenen Versuchsdaten von 2013 statt. Anhand der Daten wurden anschließend die Daisy-Steuerdateien für Kohl und Bohne erstellt und die Pflanzen- und Bodenparameter kalibriert. Da aufgrund der Starkniederschläge im Juni 2013 sowie des sehr kühlen Frühjahrs besonders die Erbse und die Zwiebelbestände litten, konnten hierfür nur die Versuchsdaten von Kohl und Bohne verwendet werden. Folglich wurden 2014 nur noch diese beiden Kulturen betrachtet. Die restlichen Versuchsdaten (Zwiebel, Erbse) wurden jedoch unter pflanzenbaulichen Aspekten ausgewertet. Die 2013 erhobenen Daten dienten einer umfangreichen Kalibrierung der Boden- und Pflanzenparameter unter Verwendung von AMALGAM, des Modells Daisy und der Versuchsdaten. Hierbei wurde die Differenz zwischen simulierten und gemessenen Erträgen, Blattflächenindizes, Pflanzenhöhen und Saugspannungen (in drei Bodentiefen) minimiert (insg. sechs Zielfunktionen). Dieses Modellparameterset wurde für die Bestimmung des Bewässerungsplans der Varianten SVAT Kc (Kohl) und Varianten SVAT 200 (Bohne) bzw. SVAT 250 (Kohl) verwendet. Im Herbst 2014 fand eine erneute Kalibrierung der Pflanzen- und Bodenparameter statt.

5.5.4 Stochastische Ertragsfunktionen – SCWPF

Ziel ist die Grundlage für eine Entscheidung bzgl. der einzusetzenden Bewässerungsmenge bei einer bestimmten Pflanzenkultur zu schaffen. Unter ariden Klimaten mit geringen Varianzen des Niederschlages kann das durch die Optimierung einer kalenderbasierten Bewässerung erfolgen (Schütze et al., 2012). In humiden Klimaten mit naturgegeben starken Varianzen des Niederschlages muss dieses Vorgehen in eine sensorbasierte Bewässerung abgewandelt werden.

Der erste Ansatz zur Optimierung der Bewässerungsmenge erfolgte über die Variation des Schwellenwertes der Saugspannung in einer spezifischen Bodentiefe. Es werden hierbei diskrete Bewässerungsmengen vorgegeben und zu jeder Wassermenge versucht, die zugehörige Saugspannung invers zu optimieren. Durch das weitgehend monotone Verhalten von Saugspannung zu Bewässerungsmenge genügt ein relativ einfacher linearer Löser mit adaptiver Schrittweite. Dazu wird jeweils der Schwellenwert der Saugspannung innerhalb einer Vegetationsperiode (inkl. einem Jahr warm-up Phase) optimiert, bis die gewünschte Bewässerungemenge erreicht ist. Wird dies für verschiedene Bewässerungsmengen durchgeführt, kann eine stochastische Ertragsfunktion abgeleitet werden.

Dieser Ansatz ist durch die iterative Berechnung sehr rechenintensiv und kann nur an Einzelstandorten durchgeführt werden. Ein anderer Ansatz wurde für regionale Betrachtungen genutzt. Dieser wird im Folgenden beschrieben.

Zur Berechnung von SCWPFs (stochastic crop water production function) müssen Wertepaare von Bewässerungswassermenge I und Ertrag Y vorliegen. Es wird im Rahmen von SAPHIR mit Zeitscheiben gearbeitet, für welche das Klima als invariant angenommen werde. Die Zeitscheiben umfassen jeweils 30 Jahre (siehe Abschnitt 5.6.1). Damit liegen bereits aus einer Simulation 30 Wertepaare von I und Y vor. Damit diese über einen weiten Bereich gestreut werden, muss die Grenzsaugspannung im Boden Ψ_S , ab welcher die Bewässerung einsetzt, variiert werden. Das geschieht in neun Schritten (-100 cm, -300 cm, -1000 cm, -3000 cm, -5000 cm, -7500 cm, $-10\,000 \text{ cm}$, $-14\,000 \text{ cm}$) und einer Simulation ohne Bewässerung. Damit sind je Zeitscheibe $30 \cdot 10$ Wertepaare vorhanden (siehe Abb. 5.15a – die Farben stehen für verschiedene Ψ_S). Mit einem 2D-Kernel-Density-Smoothing (beschrieben z.B. in Wilks, 2011) kann die Dichte der Punktwolke berechnet werden (Abb. 5.15b). Wird die Dichtefunktion zweidimensional integriert, wird eine zweidimensionale Unterschreitungswahrscheinlichkeit (Verteilungsfunktion) erhalten (Abb. 5.15c).

Die zweidimensionale Verteilungsfunktion muss in ein Set von eindimensionalen Verteilungsfunktionen überführt werden. Ziel ist z.B. die Verteilung bei einer Bewirtschaftung ohne Bewässerung. Dazu werden aus der 2D-Verteilung ausschließlich die Werte bei I = 0 mm entnommen. Die sich ergebende, streng monotone Kurve muss auf den Bereich [0, 1] transformiert werden und stellt dann die Verteilungsfunktion für einen Anbau ohne Bewässerung dar. Für andere Bewässerungsmengen wird äquivalent vorgegangen. Als Resultat liegen alle gewünschten Quantile der Verteilungsfunktionen bei allen betrachteten Bewässerungsmengen vor. Werden nun die gleichen Quantile miteinander verbunden, entsteht aus mehreren solchen Quantilverbindungen eine SCWPF. Aus dieser kann abgeleitet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einer bestimmten Wassermenge ein bestimmter Ertrag zu erwarten ist.



Abbildung 5.15: Konstruktion von stochastischen Ertragsfunktionen; a) Wertepaare von Bewässerungsmenge (Abszisse) und Ertrag (Ordinate) für verschiedene Ψ_S ; b) die aus den Punkten abgeleitete Dichte mittels 2D-Kernel-Density-Smoothing; c) die 2D-Integration der Abbildung in b)

5.6 Modellierung auf der Regionalskala

5.6.1 Klimadaten

Für die Modellierung wurden weitere Klimadaten bereitgestellt. Neben Messdaten und Daten aus WETTREG 2010 liegen nun weitere Daten vor.

Einerseits liegen Daten des dynamischen Downscalingmodells REMO vom MPI vor. Beschreibungen gibt es z.B. in Jacob et al. (2008) oder Göttel (2009) und auf der Internetpräsenz⁶. Diese umfassen eine Realisierung des Szenario A1B und wurden auf das in SAPHIR genutzte Raster von $5 \times 5 \text{ km}^2$ umgerechnet.

Desweiteren liegen Daten des statistischen Downscalingmodells WEREXV (Wetterlagen-Regionalisierungs-Extreme) von der CEC Potsdam GmbH vor (Kreienkamp et al., 2011; Spekat et al., 2012). Diese umfassen insgesamt 120 Realisierungen im Zeitraum von 1961 bis 2100. Es gibt verschiedene Strategien, die in dem Modell verfolgt wurden und in Tabelle 5.3 beschrieben werden. Jeder Eintrag in der Tabelle umfasst 10 Realisierungen von WEREX V (00, 11, 22, 33, 44, 55, 66, 77, 88, 99). Jedem Lauf liegt ein Globalmodell (GCM-global climate model) zugrunde und bei manchen Strategien gibt es den Zwischenschritt über ein dynamisches Downscaling (RCM-regional climate model). Der letzte Schritt passiert stets mit WEREX V. Auch die Klimadaten von WEREX V wurden auf das $5 \times 5 \text{ km}^2$ Die Interpolation erfolgt mittels Kriging (Bárdossy, 1997), für welches ein performantes System entwickelt wurde. Damit ist es möglich, ordinary wie auch external drift Kriging durchzuführen. Interpoliert werden die meteorologischen Messgrößen: Minimum-, Mittel- und Maximumtemperatur, Globalstrahlung, Dampfdruck, Windgeschwindigkeit und Niederschlag. Die Globalstrahlung wurde mit der Methode nach Angström aus der Sonnenscheindauer berechnet (siehe z.B. DVWK, 1996). Kriging mit externer Driftfunktion kommt bei allen Größen außer dem Niederschlag zur Anwendung. Der Niederschlag aus WEREX V weist bei kleinen Niederschlägen einen erheblich

⁶Homepage: http://remo-rcm.de/, Zugriff am 7.2.2014, Umgang mit REMO-Daten in http://www.remo-rcm.de/fileadmin/user_upload/remo/UBA/pdf/REMO-UBA-Hinweise.pdf, Zugriff am 7.2.2014

ID	GCM	RCM	Szenario					
GCM-Ensemble E1								
1	ECHAM5 Lauf 1	_	E1					
2	HadCM3C Lauf 1	_	E1					
3	HadGEM2 Lauf 1	_	E1					
GCM-Ensemble A1B								
4	ECHAM5 Lauf 1	_	A1B					
5	ECHAM5 Lauf 2	_	A1B					
6	ECHAM5 Lauf 3	_	A1B					
$\overline{7}$	HadCM3C Lauf 1	_	A1B					
8	HadGEM2 Lauf 1	_	A1B					
Kaskade EH5								
9	ECHAM 5 Lauf 3	RACMO	A1B					
10	ECHAM 5 Lauf 3 $$	REMO	A1B					
11	ECHAM 5 Lauf 1	CLM	A1B					
12	ECHAM 5 Lauf 2 $$	CLM	A1B					

Tabelle 5.3: Strategien zum Downscaling mit WEREX V

größeren räumlichen Deckungsgrad im Vergleich zu Messwerten auf. Daher wurde das nicht interpolierende Verfahren des nächsten Nachbarns (nearest neighbor) angewandt. Durch die hohe Anzahl der Niederschlagsstationen ist die räumliche Darstellung des Niederschlagregimes auch mit diesem Regionalisierungsverfahren gut.

Wegen konsistenterer Ergebnisse werden nicht die Minimal- oder Maximaltemperatur direkt regionalisiert, sondern die Differenzen zur Mitteltemperatur.

Die Klimadaten werden als abschnittsweise homogen angenommen. Diese Abschnitte (Perioden) umfassen jeweils 30 Jahre:

- P1: 1961–1990
- P2: 1991–2020
- P3: 2021–2050
- P4: 2071-2100

P1 wird als rezentes Klima, P2 als aktuelles Klima mit beginnender Klimaänderung, P3 als nahe und P4 als ferne Zukunft angesprochen. 30-Jahres-Zeiträume verhindern wirksam eine Überbewertung einzelner Extremwerte. Im Folgenden wird auf diese Perioden verwiesen, wenn es um die Einschätzung zukünftiger Eigenschaften geht.

5.6.2 Regionale Pflanzenmodellierung

Auch die regionale Pflanzenmodellierung ist im Detail eine standortbasierte Modellierung (siehe Abschnitt 5.5), allerdings für eine Vielzahl von Standorten, die ein regionales Bild ergeben. Das in SAPHIR genutzte Raster wird maskiert, da nicht alle Teile Sachsens überhaupt für großräumigere bewässerte Landwirtschaft in Frage kommen. Deutlich wird das im Erzgebirge und dessen Vorländern. Das Kriterium zu Maskierung ist mehrgeteilt. Es wird zuerst eine Maskierung anhand der Daten des Hydrologischen Atlasses Deutschland (HAD, 2000) mit einer klimatischen Wasserbilanz von $P - ET_a < 200 \,\mathrm{mm}$ durchgeführt. Damit fällt der Süden



Abbildung 5.16: Sachsen mit $5 \ge 5 \, {\rm km}^2$ großen Rasterzellen mit $KWB < 200 \, {\rm mm}$ und den Fokusgebieten Nordwest- und Ostsachsen

Sachsens weitgehend heraus. Eine weitere Maskierung findet auf der Grundlage der InVeKoS-Daten⁷ mit der Bezeichnung AL (Ackerland) statt, da im Rahmen von SAPHIR nur bestehende landwirtschaftliche Nutzflächen von Interesse sind. Beide Maskierungen (siehe Abb. 5.16) werden zusammen über die Bodendaten der Bodenkonzeptkarte im Maßstab 1:25 000⁸ gelegt. Die aus dieser Grundlage entstandene Bodenkarte 1:50 000 kann nicht genutzt werden, da in dieser bisher nicht alle notwendigen Daten, insbesondere die Korngrößenverteilungen der Bodenhorizonte, enthalten sind.

Abbildung 5.17 schematisiert den Ablauf von den Grundlagendaten und -parametrisierungen ausgehend bis zur stochastischen Ertragsfunktion. Unter Berücksichtigung der Maskierung werden mit verschiedenen Klimadaten, Pflanzenparametern und Bewässerungsszenarien Daisy-Rechnungen durchgeführt. Aus diesen werden maßgebliche Parameter extrahiert und in den einzelnen Zeitscheiben/Perioden statistisch ausgewertet (u.a. mit einer bivariaten Kernel Density Estimation – KDE, siehe Abschnitt 5.5.4).

Mit Klima-, Boden- und Pflanzendaten an jedem einbezogenen Rasterpixel liegen alle Daten vor, die zur standortdifferenzierten Simulation des Pflanzenwachstums notwendig sind. Aus diesen Simulationen werden die Daten extrahiert, die für die Berechnung von stochastischen Ertragsfunktionen (siehe Abschnitt 5.5.4) benötigt werden. Das Untersuchungsgebiet wird durch eine Vielzahl eindimensionaler Säulen räumlich differenziert betrachtet. Es wird eine Säule pro Kombination aus Klima, Bodentyp, Pflanze (Art und Sorte) und Bewirtschaftungsszenario eingerichtet. Die ständige Grundlage zur räumlich differenzieren Simulation mit einem Klima und einer landwirtschaftlichen Kultur sind die im Untersuchungsgebiet befindlichen 580 Rasterzellen mit den maximal fünf (durchschnittlich 4.8) häufigsten Bodentypen. Konkret müssen 2770 Säulen simuliert werden. Damit eine SCWPF erstellt werden kann, werden die genannten 10 verschiedenen Saugspannungsschwellenwerte eingesetzt. Damit ergeben

⁷www.zi-daten.de, Zugriff am 18.7.2014

⁸http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/boden/11638.htm, Zugriff am 18.7.2014



Abbildung 5.17: Schematische Darstellung der Ermittlung räumlich differenzierter, stochastischer Ertragsfunktionen

sich je Kombination aus Klima und Pflanze 27700 Simulationen mit im Falle von WEREX je 140 Jahren. Auf aktueller Rechentechnik ist in der gewählten Konfiguration von Daisy von etwa 12 Minuten Rechenzeit je 140 Jahresrechnung auszugehen. Die Gesamtrechenzeit für eine Kombination aus 580 Rasterzellen und 4.8 Böden liegt summarisch bei etwa 5000 h Prozessorzeit. Aus den überschlägigen Angaben wird deutlich, dass die Anzahl der zu berechnenden Kombinationen minimiert werden sollte und dass ein herkömmlicher Arbeitsplatzrechner nicht geeignet ist, die Rechnungen für regionale Ertragsfunktionen durchzuführen.

An dieser Stelle sei Dank dem Zentrum für Informationsdienste und Hochleistungsrechnen (ZIH) der TU Dresden für die Bereitstellung von Rechenressourcen ausgesprochen. Für die Berechnung der regionalen SCWPF wurden 250 000 h Rechenzeit in Anspruch genommen.

5.6.3 Ableitung des Wasserdargebotes

Im Projekt KliWES (Schwarze et al., 2011, 2014) wurden Wasserdargebotsdaten für den rezenten Zeitraum wie auch für verschiedene Klimaprojektionen ür die Zukunft auf Einzugsgebietsbasis berechnet. Die Daten sind im Wasserhaushaltsportal Sachsen veröffentlicht⁹. Ziel ist es, diese Daten zu nutzen, um eine räumlich differenzierte Aussage zur Möglichkeit der Bewässerungsgabe zu erhalten. Verlangt ein Standort mit dem dortigen Boden die Bewässerung einer landwirtschaftlichen Kultur, muss eingeschätzt werden, welche Bewässerungsmenge vor Ort erschließbar ist. Im Idealfall ist die geforderte Wassermenge vorhanden (Standortautarkie). Ist sie das nicht, muss entweder ein größeres Einzugsgebiet genutzt, die Pflanze weniger bewässert oder eine andere Sorte oder Art angebaut werden. Das Wasserdargebot wird, wie auch der Wasserbedarf, in 30-Jahres-Mitteln analysiert. Da der Jahresgang so nicht beurteilt werden kann, werden alle Wasserhaushaltskomponenten über ein ganzes Jahr bilanziert.

Aus den von KliWES berechneten Daten interessieren hier die erschließbaren Wasservorräte: der Oberflächenabfluss und die schnelle sowie die langsame Komponente des Basisabflusses. Die

 $^{^{9}}$ http://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/wasser/10881.htm, Zugriff am 10.12.2014



Abbildung 5.18: Typische Rasterzelle mit Siedlungsgebiet (rot), Wald (grün) und Acker (gelb); verfügbares Wasser aus Grundwasserneubildung (Mitte) bzw. aus Oberflächenwasser (rechts)

Evapotranspiration ist bereits a priori abgetrennt. Als Entnahmestellen für Bewässerungswasser kommen Grundwasser und Oberflächenwasser in Frage. Bisher liegt der Fokus in Sachsen auf der Grundwasserentnahme, wie Gramm (2014) darstellt. Beispielsweise wurden 2010 im Bereich der Landesdirektion Leipzig 551 000 m³ Grundwasser und 221 000 m³ Oberflächenwasser zur Bewässerung landwirtschaftlicher Nutzflächen entnommen. Für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Wasserressourcen darf nicht mehr als die jährliche Grundwasserneubildung entnommen werden. Für Oberflächenwasser gilt die gleiche Bedingung.

Nach Schwarze et al. (2014) (Abschnitt 4.3) wird die Grundwasserneubildung auf Festgesteinsflächen durch den langsamen Basisabfluss und auf Lockergesteinsflächen durch die Summe von langsamem und schellem Basisabfluss bestimmt. Der Oberflächenabfluss ist ergo auf Festgesteinsflächen die Summe aus Oberflächenabfluss und schnellem Basisabfluss, bei Lockergesteinsflächen nur die Oberflächenabflusskomponente. Auf einer betrachteten Rasterzelle können sich verschiedene Landnutzungen befinden, die schematisch in Abbildung 5.18 dargestellt werden. Rot sind Siedlungsgebiete, grün Waldgebiete und Ackerflächen in gelb gezeichnet. Die Grundwasserneubildung wird auf der gesamten Rasterzelle gebildet und verwendet. Der Wald muss sich durch das Grundwasser ernähren, genauso wie die Vegetation in Siedlungsgebieten. In letzteren ist durch die Versiegelung mit geringeren Grundwasserneubildungsraten zu rechnen. Durch die zellenweite Verwendung des Grundwassers darf für die Bewässerung nur das unter den Ackerflächen gebildete Grundwasser potentiell entnommen werden (graue unterirdische Fläche in Abb. 5.18 Mitte). Das Oberflächenwasser hingegen wird nicht von Pflanzen konsumiert, sondern gelangt zum Vorfluter. Ist in einer Rasterzelle ein Vorfluter mit Oberflächenspeicher vorhanden, kann das Wasser aus dem Landoberflächenabfluss und dem Vorfluter von stromaufwärts gelegenen Rasterzellen gespeichert werden (graue Fläche in Abb. 5.18 rechts). Ist kein oder kein ausreichender Oberflächenspeicher vorhanden, wird das Wasser stromabwärts weitergeführt. Unterhalb liegende Zellen können das Wasser in einem gegebenenfalls vorhandenen Oberflächenwasserspeicher zurückhalten.

Die Vorgehensweise bedingt, dass Grundwasser relativ gleichmäßig über das Untersuchungsgebiet potentiell gefördert werden kann. Das Oberflächenwasser hingegen ist stark abhängig von Speicherbauwerken. Die Daten zu Oberflächenspeichern werden aus dem ATKIS-Datensatz (digitales Landschaftsmodell des Staatsbetriebes Geobasisinformation und Vermessung Sachsen - GeiSN) entnommen. Es werden alle Standgewässer mit einer Fläche von mindestens 1000 m² betrachtet. Kleinere Gewässer werden nicht als potentieller Bewässerungsspeicher betrachtet, da sie zu klein und häufig als Löschteiche u.ä. eingerichtet sind. Die Volumina der Wasserspeicher können durch eine Regression anhand bekannter Verhältnisse von Oberfläche und

Wasservolumen abgeschätzt werden. Die Entwässerungsrichtungen, um das Wasser zwischen Rasterzellen weiterzugeben, werden anhand der Fließgewässer auf das hier genutzte Raster generalisiert.

Die mit der beschriebenen Methodik abgeschätzte Menge an Grundwasser und Oberflächenwasser stellt einen oberen Grenzwert dar. Es ist weder technisch möglich, noch ökologisch sinnvoll, 100% des jeweiligen Wasservorrats als Bewässerungswasser zu nutzen. Daher wird im weiteren von einer maximalen Nutzung von 50% der Grundwasserneubildung und des Wasserspeicherinhaltes ausgegangen.

Im Rahmen von KliWES wurden die Klimadaten von WETTREG 2010, Szenario A1B in drei Realisierungen (00, 66, 99) eingesetzt. Diese Klimadaten unterscheiden sich von den im Rahmen von SAPHIR zur Berechnung der SCWPF genutzten Klimadaten aus WEREX V. WEREX V basiert auf WETTREG 2010, daher sind die Unterschiede relativ gering. Es wird das gleiche Szenario A1B genutzt. Um den Einfluss unterschiedlicher Klimadaten auf den Wasserhaushalt einschätzen zu können, wurden die Unterschiede zwischen den Wasserhaushaltsdaten aller Kombinationen der drei Realisierungen aus WETTREG 2010 miteinander verglichen. Für die Grundwasserneubildung ergeben sich quadrierte Korrelationkoeffizienten von $R^2 \ge 0.97$ (im Mittel ≥ 0.99), mittlere absolute Fehler von $MAE \le 15 \text{ mm/a}$ (im Mittel $\le 8 \text{ mm/a}$) und $RMSE \le 16 \text{ mm/a}$ (im Mittel $\le 8.9 \text{ mm/a}$). Die Oberflächenwasserverfügbarkeit hat $R^2 \ge 0.99$, $MAE \le 6.6 \text{ mm/a}$ (im Mittel $\le 3.9 \text{ mm/a}$) und $RMSE \le 91 \text{ mm/a}$ (im Mittel $\le 54 \text{ mm/a}$). Die Unterschiede sind gering, weshalb die Daten als Abschätzung des zukünftigen Wasserhaushaltes auch für andere Klimamodelldaten genutzt werden.

5.7 Agrarökonomische Bewertung

Die agrarökonomische Bewertung bildet einen wichtigen Bestandteil im Rahmen des Projektes. Kernpunkt im Entscheidungsprozess um die Einführung neuer Bewässerungsmaßnahmen ist deren Rentabilität. Das bedeutet, der Mehrerlös, der durch die Bewässerung erzielt wird, muss deren Verfahrenskosten in ausreichendem Umfang übersteigen. Diese Prüfung erfolgt mittels der Kosten-Nutzen-Analyse.

Um den Fragestellungen verschiedener Nutzergruppen gerecht zu werden, ist die ökonomische Bewertung der Bewässerung für zwei verschiedenen Skalen konzipiert, die Feld- und die Regionalskala. Die Feldskala widmet sich der Betrachtung eines einzelnen Schlages. Diese Ebene ist vorrangig für Landwirte von Bedeutung, um die Rentabilität eines ausgewählten Bewässerungsverfahrens und den dafür erforderlichen Wasserbedarf standortspezifisch zu ermitteln. Sie bietet zugleich die Grundlage für einen Verfahrensvergleich und die Auswahl einer geeigneten Bewässerungsstrategie in Abhängigkeit der gewünschten Zielgröße. Die Regionalskala ist vor allem für politische Entscheidungsträger konzipiert. Zielstellung der Regionalskala ist die Entwicklung eines integrierten Wassermanagementsystems, welches sowohl die Wassernachfrage als auch das regionale Wasserdargebot berücksichtigt. Beide Skalen sind miteinander verknüpft (siehe Abb.5.19), indem Ergebnisse der Berechnungen auf Feldebene als Eingangsdaten für die Kalkulationen auf regionaler Ebene genutzt werden.

Ein wesentlicher Einflussfaktor, und zugleich die größte Unsicherheitsquelle bei der Ermittlung der Rentabilität, ist der prognostizierte Mehrertrag. Im Rahmen dieses Projektes wird auf die stochastischen Ertragsfunktionen (SCWPFs) zurückgegriffen, die für ausgewählte Kulturen kalibriert und validiert wurden und somit flächendeckend zur Verfügung stehen. Die Darstellung des Mehrertrags in Abhängigkeit der applizierten Bewässerungsmenge ermöglicht darüber hinaus die ökonomische Bewertung verschiedener Bewässerungsstrategien. Neben der standardmäßigen Vollbewässerung, welche stets auf ein Ertragsmaximum abzielt, kann damit auch die Defizitbewässerung (English, 1990) berücksichtigt werden. Hintergrund der Defizitbewässerung



Abbildung 5.19: Schematische Darstellung der Modellstruktur für die agrarökonomische Bewertung auf Feld- und Regionalskala

ist der standardmäßige Verlauf der Ertragskurve. Während bei niedrigen Bewässerungsmengen der Ertrag überproportional zur eingesetzten Wassermenge ansteigt, kommt es bei steigenden Bewässerungsmengen zu einer immer stärkeren Abnahme des Ertragszuwachses. Da die Kostenfunktion jedoch proportional zur Wassermenge ansteigt, ergibt sich ein ökonomischer Vorteil durch die Reduzierung der Gesamtwassermenge (Abb. 5.20). Dieser Gewinnvorteil steigt bei einer Zunahme der variablen Kosten. Durch gezielten Trockenstress in gering ertragswirksamen phänologischen Phasen gelingt somit die Maximierung der Wasserproduktivität und des ökonomischen Gewinns. Besondere Bedeutung erlangt die Defizitbewässerung bei einer Verknappung der Ressource Wasser, wie vor dem Hintergrund des Klimawandels projiziert, aber beispielsweise auch durch Wassermengenreglementierung in Schutzgebieten. Das eingesparte Wasser kann genutzt werden, um zusätzliche Flächen zu bewässern.

5.7.1 Spline-Interpolation der SCWPF

Voraussetzung für die ökonomische Optimierung bilden kontinuierliche Ertragsfunktionen, welche die Beziehung zwischen Bewässerungsmenge und dem maximal zu erzielenden Ertrag beschreiben. Wie bereits in Kapitel 5.5.4 dargestellt, erfolgt die Generierung der SCWPFs zu-



Abbildung 5.20: Kosten-, Erlös- und Gewinnfunktion mit Gewinnmaximum (blauer Punkt) bei Defizitbewässerung



Abbildung 5.21: Links: Interpolation einer diskreten CWPF. Die monotone Interpolation verhindert ein überschwingen. Rechts: Vergleich verschiedener Quantile einer CWPF

nächst als Menge diskreter Funktionen Y_q die für jedes Quantilqaus n Punkten p_{qk} bestehen, z.B.,

$$Y_q = \{p_{qk}\}_{1 \le k \le n} \quad . \tag{5.2}$$

Jeder dieser Datenpunkte steht für den potentiellen Ertrag in Abhängigkeit einer bestimmten Bewässerungsmenge. Für die weiteren Optimierungsrechungen ist die Überführung der Daten in kontinuierliche Ertragsfunktionen notwendig, welche im Folgenden als y(w) bezeichnet werden. Dabei wird das Verfahren der monotonen kubischen Spline-Interpolation angewandt (deBoor, 1978). Dieses Verfahren verbindet die Stützstellen mit Polynomen dritten Grades, verhindert jedoch ein Überschwingen der Funktion und damit künstlich erzeugte Extrema in der Extremwertbetrachtung (vgl. Abb. 5.21, links). Die gepunktete Linie stellt den Verlauf einer kubischen Spline-Interpolation dar, die zu einer Überbewertung der Erträge und damit zu einem unerwünschten künstlichen Maximum im Bereich von 50 mm und 100 mm führt. Auf der rechten Seite der Abbildung 5.21 ist ein Beispiel einer interpolierten SCWPF mit verschiedenen Quantilen (25 %, 55 %, 75 %, 90 %) dargestellt. Das Quantil spiegelt wider, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Ertrag unterschritten wird und gibt damit Aufschluss über die zu erzielende Ertragssicherheit. Mit steigenden Bewässerungsmengen nähern sich die Kurvenverläufe der verschiedenen Quantile einander an. Das ist v.a. auf den Verlauf der untersten Quantil-Linie zurückzuführen, die durch die Bewässerung besonders stark ansteigt.

5.7.2 Feldskala

Ziel der Berechnungen auf Feldskala ist die Erstellung einer Gewinnfunktion. Die Voraussetzung dafür bildet die Berechnung der Kosten und Erlöse in Abhängigkeit der Bewässerungsmenge, die im Folgenden beschrieben wird. In Abbildung 5.22 sind die Zusammenhänge schematisch verdeutlicht. Die Erlösfunktion basiert auf den CWPFs multipliziert mit den zugehörigen Erzeugerpreisen (Datenbasis: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), 2013) reduziert um die ertragsbedingten Mehrkosten (Datenbasis: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), 2013b). Darunter fallen beispielsweise der Mehraufwand durch Düngung und Ernte, bedingt durch den Mehrertrag mittels Bewässerung.

Neben den Kosten des jeweiligen Bewässerungssystems finden auch die Kosten zur Wasserbereitstellung, wie der Investitionsbedarf für notwendig Brunnen, Pumpen und Leitungen Berücksichtigung. Von Interesse ist außerdem die Verteilung der einzelnen Kostenblöcke sowie der Einfluss der Eingangsparameter auf die Gesamtkosten und den Gewinn.

Die Datengrundlage für die Ermittlung dieser Kosten bildet die Datensammlung Freilandbewässerung, herausgeben vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL) (2013a). Diese Datensammlung beinhaltet u.a. Preise und technische Kennzahlen, der für Sachsen typischen Bewässerungsverfahren. Das sind zum einen verschiedene Beregnungsverfahren mit mobilen oder stationären Anlagen und zum anderen die wassereffiziente Tropfbewässerung. Diese Verfahren sind in der Datensammlung differenziert nach unterschiedlichen Maschinengrößenklassen dargestellt. Das ermöglicht eine schlaggrößenspezifische Kostenberechnung. Die Daten wurden mit Hilfe von Matlab modular verknüpft. Dadurch ist es möglich, die Eingangsparameter den jeweiligen Bedingungen anzupassen und standortspezifische Kostenkalkulationen durchzuführen. Die wichtigsten Ausgabegrößen sind die variablen und fixen Kosten, welche die Grundlage für die Erstellung der Kostenfunktion bilden. Diese Funktion spiegelt die Kosten in Abhängigkeit der ausgebrachten Bewässerungsmenge wider.

Anders als in ariden Gebieten, in denen die Bewässerung eine Grundvoraussetzung für die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen darstellt, weist der Bewässerungsbedarf in Sachsen eine starke Varianz zwischen den einzelnen Jahren auf. Die Investition in die Bewässerung ist jedoch mit erheblichen Fixkosten verbunden. Neben den Kosten für die Bewässerungsanlage sind auch die Kosten für die Erschließung neuer Bewässerungsflächen von Bedeutung. Anderes als beispielsweise in Niedersachsen, wo Beregnungsverbände die Wasseranschlüsse gegen ein Entgelt zur Verfügung stellen, obliegt diese Aufgabe in Sachsen den Landwirten. Fixkosten müssen auch in Jahren ohne Bewässerungsbedarf getragen werden und variieren stark in Abhängigkeit vom gewählten Bewässerungssystem und anderen Rahmenbedingungen. Die bedeutendsten Bewässerungssysteme in der sächsischen Landwirtschaft sind die Rohrtrommelberegnung mit Großregner oder Düsenwagen und für größere Schläge Linear- und Kreisberegnungsanlagen. Die Tropfbewässerung spielt derzeit noch eine untergeordnete Rolle, weist jedoch unter der Bedingung von Wasserknappheit ein hohes Potential auf. Eine ausführliche Beschreibung dieser Systeme erfolgt in Gramm (2014). Die Auswahl des Bewässerungssystems für einen bestimmten Standort unterliegt verschiedenen Kriterien beispielsweise dem notwendigen Flächenzuschnitt, der Mobilität, dem Arbeitszeitbedarf und der Verteilgenauigkeit (vgl. Gramm, 2014). Die verschiedenen Bewässerungssysteme werden in mehreren Größen- bzw. Leistungsklassen



Abbildung 5.22: Schematische Darstellung der Modellierung auf Feldskala als Basis für die Ermittlung von Erlösen, Kosten und der sich daraus ergebenden Gewinnfunktion

angeboten. Mit zunehmender Größenklasse sinken die flächenbezogenen Kosten bei einer optimalen Auslastung der Anlage. Die Bewässerung größerer Schläge ist daher günstiger als die kleinerer Schläge.

Ein weitere Vorteil größerer Leistungsklassen ist der verhältnismäßig geringe Arbeitszeitaufwand. Das ist ein wichtiger Faktor, da die Monate in denen beregnet wird zu den arbeitsintensivsten Monaten in der Landwirtschaft gehören. Häufig gibt es jedoch Faktoren die den Einsatz der Großflächentechnik verhindern. Dazu zählen beispielsweise Hindernisse (Bäume, Windräder) und ungünstige Schlagformen.

5.7.3 Regionalskala

Entscheidungsträgern stehen eine Vielzahl von Instrumenten zur Verfügung, um auf die Verknappung von Ressourcen zu reagieren und deren Verteilung zu steuern. Dazu zählen im Wesentlichen ordnungspolitische Instrumente (Auflagen, gesetzliche Vorschriften), mengenpolitische Instrumente (Restriktionen) und ökonomische Instrumente. Letztere zielen darauf ab, finanzielle Anreize zu schaffen, um einen effizienten Ressourceneinsatz zu gewährleisten. Dazu zählen beispielsweise Gebühren, Steuern, Entgelte aber auch Subventionen und damit förderrechtliche Maßnahmen.

Ausschlaggebend für die Wahl eines geeigneten Instrumentes ist eine ausreichende Kenntnis über dessen Konsequenzen auf die landwirtschaftliche Produktion und Wassernachfrage sowie den sich daraus ergebenden Kosten. Die Regionalskala des Entscheidungshilfesystems kann die Verantwortlichen in ihrem Entscheidungsprozessen unterstützen.



Abbildung 5.23: Gewinnfunktionen multipler CWPFs (links) und die zugehörige aggregierte Wassernachfragefunktion (rechts)

Die Kalkulationen auf Regionalebene umfassen die Konkurrenz mehrerer Kulturen auf einem Bodenstück sowie verschiedene Nebenbedingungen. Ziel ist die Erstellung sogenannter Wassernachfragefunktion (nachgefragte Bewässerungsmenge in Abhängigkeit des Wasserpreises), die einen wesentlichen Bestandteil der Wasserpreisregulierung bilden. Analog zu den Berechnungen auf Feldebene werden zunächst die Gewinnfunktionen auf den einzelnen Bodenstücken ermittelt.

Für eine Kultur ist dieses Verfahren in Abbildung 5.23 (links) dargestellt. Jede Kurve basiert auf einer CWPF. Das Sternsymbol kennzeichnet das Maximum der Gewinnfunktion unter Berücksichtigung des jeweiligen Wasserpreises, und damit auch die nachfragte Bewässerungsmenge. Die Nachfragefunktionen (Abbildung 5.23, rechts) ergeben sich durch eine Variation des Wasserpreises, welche die nachgefragte Wassermenge beeinflusst. Die aggregierte Wassernachfragefunktion ergibt sich durch das Aufsummieren der einzelnen Funktionen.

5.7.4 Optimierung

Die bisherige Betrachtung umfasst lediglich eine ausgewählte Kultur. Sobald mehrere Kulturen auf der gleichen Flächen miteinander in Konkurrenz stehen bedarf es einer Optimierung. Ziel dieser Berechnung ist die Maximierung des Gewinns für das betrachtete Gebiet. Dafür werden gleichzeitig die Anbaustruktur und das Bewässerungsmanagement optimiert. Die Anzahl der möglichen Lösungen wird zugleich von verschiedenen Restriktionen begrenzt. Das betrifft beispielsweise die Fruchtfolge. Da die Berechnung für den Durchschnitt mehrerer Jahre erfolgt, kann nur ein bestimmter Anteil der Fläche mit einer Kultur bewirtschaftet werden um dem jährlichen Fruchtwechsel gerecht zu werden. Eine weitere mögliche Restriktion ist das zur Bewässerung verfügbare Wasser. Insbesondere unter zukünftigen Klimabedingungen muss in einigen Regionen Sachsen mit einer sinkenden Grundwasserneubildung und damit auch Wasserverfügbarkeit gerechnet werden. Die Daten zum zukünftigen Wasserhaushalt stammen aus dem Projekt KliWES, welches ebenfalls am Lehrstuhl für Hydrologie betreut wird. Neben der Erstellung von Wassererschließungs- und Verteilungskonzepten spielt in diesem Projekt auch die Ermittlung des potentiellen Wasserdargebotes für eine Ausdehnung der Bewässerung in Sachsen eine Rolle.

Der linke Teil der Abbildung 5.24 verdeutlicht den Sachverhalt der Optimierung unter Berücksichtigung von Restriktionen beispielhaft anhand von zwei Gewinnfunktionen. Das Gitternetz stellt alle möglichen Kombinationen der zwei Kulturen auf eine Fläche dar. Der höchste Punkt des Gitternetzes entspricht dem maximalen Gewinn der je Flächeneinheit durch die Kombination erzielt werden kann. Der dafür benötigte Wasserbedarf kann auf der x- bzw. der



Abbildung 5.24: Optimierung am Beispiel zweier (links) bzw. multipler Ertragsfunktionen unter Berücksichtigung eines limitierten Wasserdargebotes (rechts)

y-Achse abgelesen werden. Bei einer Beschränkung der verfügbaren Wassermenge reduziert sich die Anzahl der möglichen Kombinationen, was zu einer Verschiebung der optimalen Bewässerungsmenge führt. Im rechten Teil der Abbildung 5.24 ist dieser Zusammenhang anhand mehrerer Ertragsfunktionen dargestellt. Es wird deutlich, wie sich in Abhängigkeit des Verlaufs der jeweiligen Ertragsfunktion eine Limitierung des Wasserdargebotes auf die Bewässerung der einzelnen Flächen auswirkt.

Bei der Berechnung wird in den lang- und kurzfristigen Planungshorizont unterschieden. Für den langfristigen Betrachtungszeitraum läuft der Algorithmus mehrere Male mit dazugehörigen Eingabeparametern.

Ziel ist die Bestimmung der optimalen Anbaustruktur einer Gemeinde. Dabei wird unterstellt, dass sowohl die verfügbare Ackerfläche als auch das verfügbare Bewässerungswasser in Form von Grundwasserneubildung und Oberflächenwasser limitiert und vorgegeben sind. Unter dieser Annahme erfolgt die Berechnung der ökonomisch optimierten Anbaustruktur durch die Maximierung des Deckungsbeitrages unter den gegebenen Restriktionen. Dabei wird ermittelt, welche Kultur in welchem Umfang angebaut und welche Teilflächen davon in welcher Höhe bewässert werden.

Um die optimale Anbaustruktur zu ermitteln wird das Optimierungsproblem für jede Region mit den N verschiedenen Böden und M verschiedenen Kulturen gelöst. Im Folgenden sind die einzelnen Böden mit dem Index $i \leq N$ und die verschiedenen Kulturen mit dem Index $j \leq M$ gekennzeichnet. Die Berechnung erfolgt für ein im Vorfeld gewähltes Quantil und damit nicht stochastisch.

Die Zielfunktion ist folgendermaßen definiert:

$$\max_{w_{ij}, a_{ij}} \underbrace{\sum_{i} \sum_{j} a_{ij} \cdot ((P_c - A_c) \cdot y_{ij}(w_{ij}) - (P_w + C_{vw}) \cdot w_{ij} - C_v - C_f)}_{=P(w,a)}$$
(5.3)

mit

$$i \dots \text{Bodenindex}$$

$$j \dots \text{Kulturindex}$$

$$w = \{w_{ij}\} \dots \text{Bewässerungsmenge}$$

$$a = \{a_{ij}\} \dots \text{Anbaufläche}$$

$$y_{ij}(w_{ij}) \dots \text{kontinuierliche SCWPF}$$

$$A_c \dots \text{ertragsbedingte Mehrkosten}$$

$$P_c \dots \text{Erzeugerpreis}$$

$$P_w \dots \text{Wasserpreis}$$

$$C_v \dots \text{variable Kosten pro ha}$$

$$C_{vw} \dots \text{variable Bewässerungskosten pro m3 (ohne Wasserkosten)}$$

$$C_f \dots \text{fixe Bewässerungskosten pro ha}.$$

Die Eingabeparameter C_{vw} und C_f resultieren aus der Berechnung auf Feldebene wie in Kapitel 5.7.2 beschrieben.

Im Fall der Beschränkung der Verfügbarkeit von Wasser und Fläche unterliegt die Zielfunktion (5.3) folgenden Nebenbedingungen:

$$\sum_{j} a_{ij} \leq A_i, \quad \forall i, j : a_{ij} \geq 0 \tag{5.4}$$

$$\sum_{i} \sum_{j} w_{ij} \leq W, \quad \forall i, j : w_{ij} \geq 0,$$
(5.5)

wobei W das verfügbare Wasser für die Bewässerung darstellt und A_i die spezifischen Bodenstücke innerhalb einer Region. An dieser Stelle können weitere Restriktionen eingefügt werden, beispielsweise die Beschränkung der Anbaufläche:

$$A_{\min,j} \le \sum_{i} a_{ij} \le A_{\max,j},\tag{5.6}$$

mit $A_{min,j}$ und $A_{max,j}$ als minimaler bzw. maximaler Anbaufläche j.

Zur Lösung des Optimierungsproblems(5.3)–(5.6) wird ein Interior-Point Verfahren verwendet, welches in der Matlabfunktion fmincon integriert ist. Diese Optimierungsmethode liefert sehr gute Resultate in der hier vorliegenden Fragestellung. Der Startwert für die Optimierungsrechnung ist auf ein Drittel der Bewässerungsmenge für Vollbewässerung festgelegt. Des Weiteren wird für die Anbauflächen, unter Einhaltung der Bedingungen (5.4) und (5.6), initial von einer Gleichverteilung auf jedem Bodenstück ausgegangen.

Bei der saisonalen Betrachtung kann die Anbaustruktur nicht mehr verändert werden, daher erfolgt in diesem Fall ausschließlich die Optimierung der jeweiligen Bewässerungsmengen, die Anbaustruktur hingegen bleibt fest. Folgendes Maximierungsproblem wird gelöst:

$$\max_{w_{ij}} \underbrace{\sum_{i} \sum_{j} a_{ij} \cdot ((P_c - A_c) \cdot y_{ij}(w_{ij}) - (P_w + C_{vw}) \cdot w_{ij} - C_v - C_f)}_{=P(w)}$$
(5.7)

mit dem Unterschied zu (5.3), dass die Flächen a_{ij} fixiert sind. Im Fall ausreichender Wasserverfügbarkeit ist die Lösung von (5.7) durch Nullstellen der einzelnen Ableitungen gegeben:

$$\frac{\mathrm{d}P_{ij}(w_{ij})}{\mathrm{d}w_{ij}} = a_{ij} \cdot \left(P_c \cdot \frac{\mathrm{d}y_{ij}(w_{ij})}{\mathrm{d}w_{ij}} - (C_{vw} + P_w) \right)$$
(5.8)

Diese können für jeden Boden unabhängig voneinander berechnet werden.

Bei beschränkter Wasserverfügbarkeit (5.7) wandelt sich Ungleichung (5.5) zu einer Gleichungsnebenbedingung. Da es in diesem Fall nicht möglich ist das Maximierungsproblem aufzuspalten, wird es mithilfe des Lagrange Verfahrens gelöst:

$$\mathcal{L}(w,\lambda) = P(w) + \lambda(\sum_{i} \sum_{j} w_{ij} - W)$$
(5.9)

Das Maximum des beschränkten Problems ist einer der kritischen Punkte w_{ij}^{\ast} , welche durch die Nullstellen des Gradienten von (5.9) definiert sind:

$$\nabla_{w,\lambda} \mathcal{L} = 0. \tag{5.10}$$

Da P(w) aus kubischen Splines besteht, ist es möglich obige Probleme analytisch zu lösen.

5.8 Prototypische Umsetzung des Entscheidungshilfesystems

5.8.1 Konzept des Entscheidungshilfesystems

Bei dem entwickelten prototypischen Entscheidungshilfesystem handelt es sich um ein wissensbasiertes Expertensystem. Dieses stellt Problemlösungskompetenz, die innerhalb des Projektes erzeugt wurde, zur Verfügung. Das System besteht aus den drei Kernkomponenten:

- Wissensbasis
- Problemlösungskomponente
- Benutzerschnittstelle

Wissensbasis

Die Wissensbasis besteht aus den im Projekt generierten Daten und Erkenntnissen. Hierzu zählen:

- die angepassten Klimaprojektionen
- die Bödenauswahl
- die Pflanzenparametrisierungen
- die daraus abgeleiteten SCWPFs

Unter 5.6.1 ist beschrieben wie die verwendeten Klimaprojektionen auf das in SAPHIR verwendete Raster umgerechnet wurden. In Kapitel 4.2.3 im Arbeitspaket A1.3 ist die Analyse und Auswahl der relevanten Leitböden beschrieben. Die Auswahl erfolgte anhand der Landnutzung Ackerland und der klimatischen Wasserbilanz. Mit Hilfe der Messdaten der Versuche in Pillnitz von 2013 wurden erste Pflanzenparametrisierungen für Weißkohl und Buschbohne erstellt. Dies erfolgte unter Verwendung des Pflanzenwachstumsmodells Daisy, einem Optimierungsalgorithmus sowie der 2013 erhobenen Versuchsdaten. Das Pflanzenwachstumsmodell Daisy liefert für einen parametrisierten Boden, eine parametrisierte Pflanze und einen regionalisierten Klimadatensatz den sich ergebenden Ertrag. Eine iterative Modellierung des Pflanzenwachstums mit variierenden Klimaparametern erlaubt eine stochastische Betrachtung der Ertragsfunktionen. Diese SCWPFs (stochastic crop water production functions) ermöglichen mittels der Angabe von Ertragswahrscheinlichkeiten die Übertragung auf reale Anbausituationen.

Problemlösungskomponente

Über diese approximierten SCWPFs erfolgt eine in Kapitel 5.7.3 beschriebene Extremwertbetrachtung. Diese liefert als Ergebnis die optimale Bewässerungsmenge in Abhängigkeit von sämtlichen auftretenden Kosten und Erträgen.

Benutzerschnittstelle

Auf Grund der Nutzung stellen sich folgende technische Anforderungen an das Entscheidungshilfesystem:

- Auswahl einer geeigneten Datenquelle für das Portal
- möglicher Mehrbenutzerzugriff
- gute Performance

Um diesen Anforderungen zu genügen, wurde das Entscheidungshilfesystem als webbasiertes System im Client-Server-Modell entwickelt. Die Datenquelle muss sowohl Sach- als auch Geometriedaten speichern können und von mehreren Nutzern gleichzeitig über das Internet erreichbar sein. Da diese Funktionalität ein Datenbanksystem bietet, wurde es entsprechend als Datenquelle ausgewählt. Im folgenden wird das IT-Konzept näher erläutert.

5.8.2 IT-Konzept

Der Prototyp des Entscheidungshilfesystems basiert auf einer serviceorientierten Architektur. "(Service Oriented Architecture is) a paradigm for organizing and utilizing distributed capabilities that may be under the control of different ownership domains" (Reference Model for Service Oriented Architecture 1.0, Committee Specification 1, 2 August 2006).

5.8.3 Software

Datenbank

Für das Datenbanksystem stand MySQL (mit Spatial Extension) und PostgreSQL/PostGIS zur Auswahl. Das ehemalige OpenSource-Datenbanksystem MySQL wurde von Oracle übernommen. Da Oracle ebenfalls eine kostenpflichtige Spatial-Extention anbietet, kann vermutet werden, dass die kostenlose Variante, die es für MySQL gibt eventuell nicht mit gleich großem Interesse verfolgt wird. Bei PostgreSQL/PostGIS handelt es sich um ein reines OpenSource-Datenbanksystem mit einer engagierten Community. PostGIS ist eine Erweiterung für die objektrelationale Datenbank PostgreSQL, die geografische Objekte und Funktionen umfasst. PostgreSQL mit PostGIS bildet eine Geodatenbank, die in Geoinformationssysteme eingebunden werden kann. Das Projekt implementiert die Simple Feature Access-Spezifikation des Open Geospatial Consortium und wird von der Open Source Geospatial Foundation betreut. Auf Grund der genannten möglichen Probleme mit MySQL und den Vorteilen eines weit verbreiteten OpenSource-Projekts wurde das Datenbanksystem PostgreSQL mit PostGIS ausgewählt.

Mapserver / Internet Map Server

Mit Hilfe von Mapservern ist es im Internet möglich, aktuelle Karten benutzerspezifisch und individuell bereitzustellen. Die Mapserver-Projekte

- \bullet deegree
- UMN Mapserver

• GeoServer

wurden evaluiert und verglichen. Auf Grund der Erfahrungen mit den Testimplementierungen wurde der Mapserver GeoServer ausgewählt. Dieser zeichnet sich durch Konformität zu Standards des Open Geospatial Consortiums (OGC) aus und implementiert die Dienste:

- Web Map Service (WMS)
- Web Coverage Service (WCS)
- Web Feature Service (WFS, auch transaktional)
- Web Processing Service (WPS)

Die Software ist in Java programmiert und benötigt einen Webserver und Webcontainer. Im Prototypsystem kommen hierfür der Apache HTTP Server und Apache tomcat zum Einsatz.

Client

Als Client wurden verschiedene OpenSource-Projekte verglichen. Untersucht wurden unter anderem die Kombinationen aus OpenLayers/GeoExt und OpenLayers/Bootstrap. Diese wurden im Prototyp implementiert und getestet. Ausgehend von den Erfahrungen der Testimplementierungen der verschiedenen Clientvarianten wurden folgende Komponenten ausgewählt und kommen im Entscheidungshilfesystem zum Einsatz:

- OpenLayers
- Bootstrap
- jQuery
- c3.js

Die JavaScript Bibliothek jQuery ermöglicht clientseitig ein dynamisches Verhalten durch die Navigation und Manipulation des Document Object Model (DOM), event-handling und AJAX (Asynchronous JavaScript and XML)-Kommunikation. Bootstrap ist ein sehr häufig verwendetes CSS-Framework, das die Funktionalität der Layoutgestaltung bereitstellt. Die JavaScript-Bibliothek OpenLayers ermöglicht die Darstellung von Geodaten im Webbrowser. Es sind hierfür typische Webmapping-Elemente verfügbar. Die Schnittstellen zum Einbinden von Geodaten entsprechen den Standards des Open Geospatial Consortiums (OGC). Durch die weite Verbreitung sind eine gute Dokumentation und zahlreiche praktische Beispiele verfügbar. C3.js basiert auf D3.js, einer JavaScript-Bibliothek zur Erstellung und Bedienung von interaktiven grafischen Ausgaben. C3.js erleichtert die Datenvisualisierung auf Basis des D3-Codes und bietet eine große Auswahl an Diagrammtypen und Zugriffsmethoden.

IT-Architektur

Abbildung 5.25 stellt die implementierte IT-Architektur dar. Es handelt sich um eine internetgestützte Zugriffsmöglichkeit auf Geodaten, die sich in einer Datenbank befinden, die in der Lage ist räumliche Daten zu verwalten. Der Mapserver GeoServer stellt, über das Internet, die Daten, aus der Datenbank, in Form von Webservices zur Verfügung. Diese Daten kann der Nutzer über einen Client vom Mapserver abfragen. Der Client übersetzt die graphischen Anfragen des Nutzers, wie das Zoomen in der Karte, in standardisierte requests, die vom Mapserver mit den entsprechenden Kartenausschnitten und Inhalten beantwortet werden.

Abbildung 5.26 zeigt schematisch das IT-Schema mit besonderer Betonung des Client-Server Prinzips.



Abbildung 5.25: IT-Architektur des Entscheidungshilfesystems



Abbildung 5.26: Client-Server-Architektur des Entscheidungshilfesystems

6 Ergebnisse und deren Dokumentation

6.1 Messexperimente Freising

Bewässerungsversuche F2013

Die in der Vegetationshalle durchgeführten Bewässerungsversuche wurden erfolgreich abgeschlossen. Sämtliche aufgenommene Daten wurden zusammengetragen, aufbereitet und ausgewertet. Die Containerversuche im Freiland waren aufgrund einsetzender Starkniederschläge und sich anschließender Überschwemmung nicht erfolgreich.

Die Ergebnisse der Ernte und Wasserbilanzen sind in Tabelle 6.1 zusammengetragen. Für das Freiland sind Ernteerträge von an den Containern sich angrenzendem Versuchsfeld verfügbar. Die Auswertung der Wurzelprofile für T1 und T2 sind als absolute Wurzellängendichteverteilung in Abbildung 6.1 und als relative Wurzellängendichteverteilung in Abbildung 6.2 dargestellt. Darin zeichnet sich ab, dass die Annahme zutreffend ist, dass sich der Wurzelraum bei Defizitbewässerung vergrößert, indem sich die Wurzel über die gesamte Containerhöhe ausbreitet und damit der Pflanze die Wasserentnahme aus dem gesamten Bodenprofil ermöglicht. Demgegenüber verteilt sich bei der Bedarfsbewässerung der Großteil der Wurzeln proportional auf die obere Bodenschicht.

Bilanzkomponente	T1 (FI)	T2 (DI)	T3 (FI)	T4 (DI)	Freiland
I (mm)	617	356	623	513	
$\Delta S \ (\mathrm{mm})$	34	-14	49	25	
ET (mm)	583	370	574	488	
$Y (t ha^{-1})$	8.42	5.41	13.21	10.87	12.08
$WP_I ~(\mathrm{kg}\mathrm{m}^{-3})$	1.36	1.52	2.12	2.12	
$WP_{ET} \ (\mathrm{kg m^{-3}})$	1.44	1.46	2.30	2.23	

Tabelle 6.1: Übersicht der Ergebnisse der Bewässerungsversuche in der Vegetationshalle 2013

Bemerkung: T1 und T2: Versuche mit Pioneer Mais für mediterrane Klimate; T3, T4 und Freiland: Versuche mit lokaler Maissorte Amanatidis; FI = Bedarfsbewässerung; DI = Defizitbewässerung; I = Bewässerung; ΔS = Speicheränderung des Boden zwischen Ende und Beginn der Versuche; ET = Evapotranspiration, berechnet aus $I - \Delta S$; Y = Ertrag; WP_I = Wasserproduktivität, bezogen auf die Bewässerungsmenge; WP_{ET} = Wasserproduktivität, bezogen auf Evapotranspiration

Die verwendete Methode zur Untersuchung und Erhöhung der Wasserproduktivität bei Mais ist vielversprechend. Der Sensor zur Bewässerungssteuerung hat Potenzial, denn er erlaubt es auch Schwellenwerte bei der Steuerung einzusetzen, die außerhalb des Messbereiches von üblicherweise bei der Bewässerungssteuerung eingesetzten Tensiometern liegen. Die Ergebnisse in der Wasserproduktivität zeigen zudem, dass Schwellenwerte größer als pF = 3 Anwendung bei der Verbesserung von Bewässerungssystemen finden können.



Abbildung 6.1: Wurzellängendichteverteilung für T1 (Bedarfsbewässerung) und T2 (Defizitbewässerung) zu Teilerntezeitpunkten DS 0.5 (vegetative Phase), DS 1 (Blüte) und DS 2 (Ernte)



Abbildung 6.2: Proportionale Wurzellängendichteverteilung für T1 (Bedarfsbewässerung) und T2 (Defizitbewässerung) zu Teilerntezeitpunkten DS 0.5 (vegetative Phase), DS 1 (Blüte) und DS 2 (Ernte)

Bewässerungsversuche F2014

Die Bewässerungsversuche in der Vegetationshalle und im Freiland wurden erfolgreich durchgeführt. Für alle Standorte konnten Biomassen bestimmt und für die Vegetationshalle die Komponenten für die Wasserbilanz ermittelt werden. Eine Übersicht der Ergebnisse zeigt Tabelle 6.2.

Der Freilandmais wurde am 30.04.2014 gesät und (vorzeitig) am 26.08.2014 in einem EC-Stadium von 7.3 geerntet, da die Versuchsflächen anderweitig Verwendung finden sollten. Der Mais im Container wurde am 23.05.2014 ausgesät und am 13.10.2014 nach Erreichen des letzten EC-Stadiums geerntet. Kornerträge für die Treatments in der Vegetationshalle lagen im

Standort	Treatment	Anhauzoitraum	Kornertrag (t ha ⁻¹)				1	Р	deltaS	WP (P+I)	WP (I-deltaS)
Stanuort	freatment	Andauzertraum	R1	R2	R3	Mittelwert	(mm)	(mm)	(mm)	(kg m ⁻³)	(kg m ⁻³)
	DI_c		11.7	10.2	13.4	11.8	392	-	-6	3.00	2.96
	DI4_c		10.4	8.5	8.5	9.1	323	-	10	2.83	2.92
Vegetationshalle, Container	FI_C	6.613.10.	13	8.4	7.9	9.8	412	-	40	2.37	2.63
	FI_a		9.4	9.9	6.8	8.7	405	-	k.A.	2.15	-
	FI_b		10.2	8.8	11.9	10.3	414	-	k.A.	2.49	-
	FI_a		20.7	16.9	14.2	17.3	4	364	k.A.	4.69	-
Freiland, Container	FI_b	6.613.10.	14.4	12.1	16.3	14.3	4	364	k.A.	3.88	-
	FI_c		9.7	-	-	9.7	4	364	k.A.	2.64	-
Freiland, Bestand*		20.4 - 26.8	6.5	-	-	6.5	-	397	-	1.64	-
reiland, freistehend*		50.420.8.	10.6	9.4	10.7	10.2	-	397	-	2.58	-
Freiland, Vergleichsfelder 1**		k.A.	14.1	-	-	14.1	-	k.A.	-	-	-
Freiland, Vergleichsfelder 2**		k.A.	13.4	-	-	13.4	-	k.A.	-	-	-

Tabelle 6.2:	Übersicht	der Ei	rgebnisse	der	Bewässerungs	versuche	2014
1000010 0.1	0.001010110		000110000	or or r	Dollar ango	1010010110	

Bemerkungen: FI - Bedarfsbewässerung, DI - Defizitbewässerung mit einem und vier Schwellenwerten, a - Boden, Mischsubstrat, ungestört, b - Boden, Mischsubstrat, gestört, c - Boden, gestört, R - Wiederholung, I - Bewässerung, P - Niederschlag, deltaS - Bodenspeicheränderung, WP - Wasserproduktivität bezogen auf I und P sowie I und deltaS

 \ast berechnet aus fünf geernteten Pflanzen und einer Pflanz
dichte von 12 Pflanzen pro Quadratmeter

 $\ast\ast$ Erntedaten von angrenzenden Versuchsfächen anderer Feldversuche und mit einer anderen Sorte

Mittel zwischen 8.7 und 11.8 t ha⁻¹. Bezogen auf Bodenschüttung c und eingesetzte Wassermenge wurde die höchste WP mit 3.04 kg m⁻³ von DI_c erzielt. Nur wenig schlechter in der WP schloss $DI4_c$ mit 2.87 kg m⁻³ ab, gefolgt von FI_c mit 2.4 kg m⁻³. Die Kornerträge für beide Treatments lagen in etwa in gleicher Höhe (ca. 9.5 t ha⁻¹). Sämtliche FI Treatments in der Vegetationshalle erreichten eine WP von 2.3 kg m⁻³. Alle Treatments in der Vegetationshalle waren während der Versuche unterschiedlich stark von Blattläusen befallen und wurden entsprechend behandelt. Ertragseinbußen durch den Befall sind jedoch nicht auszuschließen.

Die im Freiland stehenden Container mit den Treatments FI_a und FI_b erzielten sehr hohe Erträge mit 17.2 und 14.3 t ha⁻¹ und entsprechend hohen WP von 3.02 und 2.51 kg m⁻³. Dem gegenüber steht FI_c mit lediglich 9.7 t ha⁻¹ und einer WP von 1.7 kg m⁻³. Für dieses Treatment wurde keine Wiederholung durchgeführt, so dass nicht geklärt werden kann, ob es sich um einen Ausreßer handelt. Alle Pflanzen in den Containern entwickelten zwei Kolben je Pflanze statt einem im Vergleich zur Vegetationshalle.

Die sensorbasierte Bewässerungssteuerung in der Vegetationshalle konnte erfolgreich umgesetzt werden. Die erzielten Wasserproduktivitäten (bezogen auf den tatsächlichen Wasserverbrauch der Pflanzen) liegen im Bereich von in der Literatur beschriebenen Werten von 1.1 bis 2.7 kg m⁻³ (Zwart und Bastiaanssen, 2004) und zum Teil darüber. Der Einfluss weiterer Faktoren auf die Wasserproduktivität (Bodenschüttung, Bewässerungsstrategie) bedarf weiterer Untersuchungen. Ebenso steht die Interpretation der statistischen Signifikanz der Ergebnisse noch aus. Weiterhin gilt zu klären, warum der Kornertrag des untersuchten Feldes im Vergleich zu umliegenden Versuchsflächen so gering ausgefallen ist. Die sensorbasierte Steuerung der Bewässerung durch pF-Meter bleibt eine vielversprechende Methode zur effizienten Nutzung vorhandenen Wassers und der Erhöhung der Wasserproduktivität.

Strahlungsmessungen F2014

Dauermessung Vergleichsmessungen der Referenzsensoren (bezeichnet als "Referenz" und "Wetterstation") ergaben für die beiden Freilandstandorte B und C nur geringe Abweichungen.

	1				ablung (Tag	o course month					
			ran-straining (Tagessummen)								
Standort	Monat	Messtage	Referenz (mol / (m² d))	Mittelwert 3D (oben)			Mittelwert 3D (unten)				
			MW	MW	Min (Tag)	Max (Tag)	MW	Min (Tag)	Max (Tag)		
	Juli	10	849.0	0.53	0.27	1.01	0.16	0.10	0.25		
	August	5	677.1	0.58	0.24	1.39	0.17	0.08	0.33		
A (Container Gewächshaus)	September	12	463.1	0.65	0.33	1.29	0.21	0.12	0.37		
	Oktober	0	-	-	-	-	-	-	-		
	MW	-	663.0	0.58	0.28	1.23	0.18	0.10	0.32		
	Juli	7	1,656.1	0.73	0.32	1.64	0.18	0.09	0.37		
	August	7	1,427.4	0.78	0.28	2.13	0.20	0.09	0.45		
B (Container Freiland)	September	6	683.1	0.83	0.41	1.84	0.24	0.11	0.53		
	Oktober	8	737.5	0.89	0.35	1.88	0.32	0.11	0.83		
	MW	-	1,126.0	0.81	0.34	1.87	0.23	0.10	0.55		
	Juli	6	1,869.3	0.14	0.04	0.55	0.01	0.01	0.05		
	August	3	988.6	0.12	0.05	0.48	0.01	0.00	0.04		
C1 (Feld Freiland)	September	0	-	-	-	-	-	-	-		
	Oktober	0	-	-	-	-	-	-	-		
	MW	-	1,287.2	0.13	0.05	0.52	0.01	0.01	0.04		

Tabelle 6.3: Referenz und Abschwächung des 3D-Sensors (Mittelwert über alle vollen Messtage)

Tabelle 6.4: Referenz Wetterstation und Abschwächung des 3D-Sensors (Mittelwert über alle vollen Messtage)

			PAR-Strahlung (Tagessummen)							
Standort	Monat	Messtage	Wetterstation (mol / (m ² d))	M	Mittelwert 3D (oben)			Mittelwert 3D (unten)		
			MW	MW	Min (Tag)	Max (Tag)	MW	Min (Tag)	Max (Tag)	
	Juli	10	1,898.0		0.12	0.45	0.07	0.04	0.11	
	August	5	1,613.9	0.24	0.10	0.58	0.07	0.03	0.14	
A (Container Gewächshaus)	September	12	1,169.7	0.26	0.13	0.51	0.08	0.05	0.15	
	Oktober	0	-	-	-	-	-	-	-	
	MW	-	1,560.5	0.25	0.12	0.51	0.07	0.04	0.13	
	Juli	7	1,702.7	0.71	0.31	1.60	0.17	0.08	0.36	
	August	7	1,633.9	0.68	0.24	1.86	0.17	0.08	0.40	
B (Container Freiland)	September	6	784.3	0.73	0.36	1.61	0.21	0.10	0.46	
	Oktober	8	856.1	0.77	0.30	1.62	0.27	0.10	0.72	
	MW	-	1,244.2	0.72	0.30	1.67	0.21	0.09	0.48	
	Juli	6	1,869.7	0.14	0.04	0.55	0.01	0.01	0.05	
	August	3	1,047.3	0.11	0.05	0.46	0.01	0.00	0.04	
C1 (Feld Freiland)	September	0	-	-	-	-	-	-	-	
	Oktober	0	-	-	-	-	-	-	-	
	MW	-	1,353.4	0.13	0.05	0.50	0.01	0.01	0.04	

Somit konnte der Wert der mobilen Referenz direkt mit der Wetterstation verglichen werden. Die Messung der Referenz in Standort A (Vegetationshalle) ergab im Mittel eine Strahlung über die gesamte Messperiode von $660 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ und eine Außenstrahlung von 1560 mol m⁻² d⁻¹ an der Wetterstation, d.h. eine Abschwächung innerhalb der Vegetationshalle auf 42 % (Tabellen 6.3 und 6.4). Davon abgeleitet betrug die direkte Strahlung in den oberen Halbraumes in der Vegetationshalle 25 % und die diffuse Reflexstrahlung im unteren Halbraum 7 %. Eine Unterscheidung zwischen geöffnetem und geschlossenen Hallendach erfolgte dabei nicht. Für Standort B ergab sich eine mittlere Abschwächung auf 81 % für den oberen Halbraum und 23 % für den unteren Halbraum im Vergleich zur Referenz. An Standort C1 (Messungen nur im Juli und August erfolgt) ergaben sich Abschwächungen auf 13 bzw. 1 % für den oberen und unteren Halbraum.

Sondermessung Durch den Standortwechsel konnte lediglich zwei Mal in C1 (Messtage 1 und 3), ein Mal in C2 (Messtag 4) und drei Mal in C3 (Messtage 5 bis 7) gemessen werden (Tabelle B.1 in Anhang B.1). Die unterschiedliche Exponiertheit der Standorte macht einen direkten



Abbildung 6.3: Mittelwert der Abschwächung des 3D-Sensors (oben) gegenüber der Referenz. Deutliche erkennbar sind die Unterschiede zwischen den Standorten C1 (Sondermessung 1), C2 (Sondermessung 3) und C3 (Sondermessungen 5 bis 7)

Vergleich schwierig bis unmöglich (Abb. 6.3 und 6.4). Die Spannbreite der Strahlungsunterschiede zur Referenz schwankt zwischen 3 und 120% für den oberen und zwischen 0.4 und 60% für den unteren Halbraum. Die mittlere Reihenfolge des vertikalen Profils ergibt dabei das höchste Strahlungsdargebot am oberen Messpunkt (3,3) und das geringste am unteren Messpunkt (3,1). Für das horizontale Profil fallen die Unterschiede nicht eindeutig aus. Für den oberen Halbraum ist die Strahlung im Feldbestand und im Übergang in etwa gleich, am Rand ist sie kleiner. Ein eindeutiger Randeffekt konnte auf der gemessenen Skala von 5 m nicht beobachtet werden.

Zusammenfassung Die durchgeführten Messungen verstehen sich als erste Abschätzung des Strahlungsdargebotes eines Blattes sowohl für einen Feldbestand, als auch für eine freistehende Pflanze und liefern einen wertvollen Beitrag über die Höhe der potenziell zur Verfügung stehenden Strahlung für das Pflanzenwachstum. Insbesondere für Standorte mit hoher Rückstrahlung vom Untergrund (wie bei Containerversuchen in einer Vegetationshalle mit hellem Boden vorhanden) ist der Anteil an potenziell zur Verfügung stehender Strahlung nicht zu vernachlässigen. Es deutet sich an, dass die Hypothese des erhöhten Strahlungsgenusses von Pflanzen trotz des Anbaus in einer Vegetationshalle gegenüber Pflanzen in einem Feldbestand bestätigt werden kann. Dies zeigt sich zudem im erhöhten Kornertrag in der Vegetationshalle im Vergleich zum Feldbestand. Die höchsten Erträge und Strahlungsmengen zeigten die freistehenden Container im Feldland.

Die Messung der Strahlung in der durchgeführten Form unterliegt einigen Einschränkungen. Eine eindeutige Beziehung von Abschwächung zwischen den einzelnen Standorten (besonders zwischen Vegetationshalle und Feldbestand) zu Kornertrag bei Mais konnte nicht abgeleitet werden. Die Bestimmung der Ausbeute der tatsächlichen Strahlung, d.h. ihr integraler Anteil, über die Gesamthöhe der Pflanze mittels eines 3D-Sensors ist schwierig und bedarf weiterer Analysen der gesammelten umfangreichen Daten. Dies trifft vor allem für die Vegetationshalle zu, da hier die Rückstrahlung vom Untergrund nicht vernachlässigt werden kann. Zudem



Abbildung 6.4: Mittelwert der Abschwächung des 3D-Sensors (unten) gegenüber der Referenz. Hier sind ebenfalls die Unterschiede im Standort C3 (Sondermessung 5 bis 7) zu den restlichen Standorten deutlich zu erkennen

kann nicht ausgeschlossen werden, dass es zu Ertragseinbußen bei allen Treatments in der Vegetationshalle durch den Schädlingsbefall gekommen ist.

Die Verwendung eines einzelnen 3D-Sensors macht den Vergleich zwischen verschiedenen Messpunkten der Sondermessung schwierig bis unmöglich, da hier nie zum selben Zeitpunkt an zwei Punkten gleichzeitig gemessen werden kann. Dies wirkt sich besonders bei der Interpretation der Ergebnisse aus, wenn innerhalb der Messperiode witterungsbedingt wechselhafte Bewölkung auftritt und die beobachteten Prozesse einer hohen zeitlichen Dynamik unterliegen.

Der 3D-Sensor wurde nicht gegen die Referenz kalibriert, d.h. der Mittelwert aus den drei Sensoren über dem Halbraum liegt in manchen Fällen höher als der Wert der Referenz. Demzufolge ist ein Vergleich des 3D-Sensors mit der Referenz und den daraus berechneten Abschwächungen für die verschiedenen Messpunkte in vertikaler und horizontaler Höhe bei der Sondermessung zwar ein erster Hinweis über den Strahlungseintrag, erlaubt allerdings keine Aussage über die tatsächliche Höhe der Abschwächung.

Bei der hier vorgestellten Auswertung wurden zunächst Mittel über 30 Minuten gebildet. Hier gilt es noch zu prüfen, ob nicht Minutenwerte besser geeignet sind, da die Abschwächung vom Absolutwert der Strahlung abhängt und bereits bei 30-Minuten-Mitteln und großer Änderung der Strahlungsverhältnisse innerhalb der Messperiode starke Abweichungen auftreten können. Weitere Einflüsse, die die Messungen beeinträchtigten beim Standortwechsel waren neben Sonnenwinkel und Bewölkung die unterschiedliche Entwicklung der Felder und Hangneigung.

Das Messkonzept der Strahlungsmessung kann dennoch als erfolgreich angesehen werden. Es liefert einen wichtigen Hinweis auf die Unterschiede bei der Strahlungsexponiertheit von Blättern in verschiedenen Bestandessituationen. Das Konzept könnte weiter aufgegriffen und für die Berechnung theoretischer Tagesgänge von Pseudoblättern beliebiger Ausrichtung weiterentwickelt werden.

6.2 Feldexperimente in Brandis

Lysimeterexperimente

Die Wasserbilanz der beiden Lysimeter 14-1 und 14-3, die Nummerierung entspricht der Einordnung in das System der Lysimeterstation, ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Im Jahr 2013 wurden beide Lysimeter mit derselben Strategie und denselben Grenzwerten bewässert. Im Jahr 2014 wurde das Lysimeter 14-3 von der Bewässerungsanlage getrennt um Unterschiede zwischen beiden Lysimetern aufzeigen zu können. Die Verläufe der Gesamtmassen im Jahr 2013 sind bei beiden Lysimetern recht ähnlich, auffällig ist, dass das Lysimeter 14-1 nachdem Starkregenereignis im Juni 2013 mehr Wasser dauerhaft im Boden einbinden konnte, als das Lysimeter 14-3. Ebenso fiel im Lysimeter 14-1 mehr Sickerwasser an. Dies ist dadurch bedingt, dass die Luzerne auf dem Lysimeter 14-3 besser angewachsen ist, und zu diesem Zeitpunkt bereits mehr Wasser pro Tag aus dem Bodenwasserspeicher entnommen hat. Der Bodenwasserspeicher konnte den Großteil des Wassers auffangen wodurch im Lysimeter 14-3 weniger Sickerwasser austrat. über den Jahreswechsel 2013/2014 wurden die Bodenwasserspeicher wieder deutlich gefüllt und in beiden Lysimetern fiel Sickerwasser an, wenn auch mit unterschiedlichen Dynamiken. Die Wachstumsperiode 2014 zeigte dann deutliche Unterschiede zwischen den beiden Lysimetern. Die Luzerne, die vor dem Winter auf 10 cm zurückgeschnitten worden war, fand auf dem bewässerten Lysimeter 14-1 deutlich bessere Wachstumsbedingungen vor. Dies ist vor allem daran zu sehen, dass das Lysimeter 14-1 trotz Bewässerung deutliche Gewichtsabnahmen, und damit Bodenwasserspeicherzehrungen, aufwies. Dies liegt darin begründet, dass im Lysimeter 14-1 ein wesentlich besseres Wurzelwachstum stattfand und sich die Pflanzen deutlich schneller entwickelten und damit höhere Transpirationsleistungen erreichten. In der Folge wurde der Bodenwasserspeicher auf dem Lysimeter 14-3 kaum gezehrt und ein Starkniederschlagsereignis im Sommer 2014 führte durch den deutlich volleren Speicher zur Sickerwasserbildung. Nach dem Starkniederschlagsereignis konnte die Luzerne gut auf dem Lysimeter 14-3 aufwachsen was in der zweiten Jahreshälfte zu einer sehr starken Speicherzehrung führte.

Laborergebnisse

Abbildung 6.6 zeigt als eines der wichtigsten Laborergebnisse, die Verläufe der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit mit der Tiefe. Obwohl beide Lysimeter am selben Standort entnommen wurden, zeigen sie auch deutliche Unterschiede. Eine gemeinsame Eigenschaft ist die deutliche Streuung der Leitfähigkeit in 5 cm Tiefe. Stark unterscheiden sich die Leitfähigkeiten im darunterliegenden Horizont. Während der Boden in 40 cm Tiefe im Lysimeter 14-1 Wasser noch immer mit bis zu 580 cm d⁻¹ transportieren kann, sind die Transportgeschwindigkeiten im Lysimeter 14-3 mit maximal 19 cm d⁻¹ um den Faktor 25 kleiner. Dies deutet auf die Existenz einer signifikanten Stauschicht in dieser Tiefe hin. Im weiteren Tiefenverlauf nehmen die Leitfähigkeiten im Lysimeter 14-3 deutlich zu und erreichen ihr Maximum in 130 cm Tiefe. Die anhand der Bodenproben bestimmten Leitfähigkeiten bildeten die Ausgangsparameterisierung für die Sensitivitätsanalyse.

Die restlichen Mualem-van-Genuchten (MvG)-Parameter zur mathematischen Beschreibung der Retentions- und Leitfähigkeitsfunktion wurden durch eine direkte Anpassung an In-situ gewonnene Retentionskurven bestimmt. Dazu wurden die Parameter des MvG-Modells mit Hilfe des DREAM-Algorithmus (Vrugt et al., 2009) angepasst. Der Vorteil in der Anwendung des DREAM-Algorithmus liegt in der gleichzeitigen Erfassung der Parameterunsicherheiten. Abbildung 6.7 zeigt die Retentionskurven die in 35 cm Tiefe im Lysimeter 14-1 beobachtet wurden. Besonders auffällig ist die große Streuung der Messwerte, die durch "Non-equilibrium" Effekte (Diamantopoulos und Durner, 2012) und Hysterese zu erklären sind. Die dunkelgraue



Abbildung 6.5: Evapotranspiration (ET) des Lysimeters 14-1 (oben) im Vergleich zum Lysimetergesamtgewicht (M) beider Lysimeter und den dazugehörigen Ausflüssen (Q). Die Flächen liegen transparent übereinander.

Fläche stellt dabei die Unsicherheit im MvG-Modell durch die parametrische Unsicherheit dar, während die hellgraue Fläche den kombinierten Effekt von parametrischer und Modellunsicherheit zeigt.

Erkenntnisse aus den Lysimeterexperimenten und den Modellstudien

Die in Brandis durchgeführten Bewässerungsexperimente konnten deutlich zeigen, dass Bewässerungsgaben die Evapotranspirationsleistung der angebauten Pflanzen insbesondere in trockenen Phasen deutlich steigern kann. Damit einher gehen deutliche Ertragserhöhungen bzw. -stabiliserungen.

Im Folgenden die wichtigsten Erkenntnisse:

- Zusätzliche Bewässerung kann die Evapotranspirationsleistung der Pflanzen, insbesondere in trockenen Phasen, deutlich steigern.
- Bewässerung führt zu einer deutlichen Ertragserhöhung bzw. -stabiliserung.
- Bewässerung führt nicht zu einem beschleunigten vertikalen Wasserstransport, wenn sie bedarfsgerecht durchgeführt wird. In Brandis konnte im Sommer 2014 während eines starken Niederschlagsereignisses sogar der gegenteilige Effekt beobachtet werden. Während es auf dem unbewässerten Lysimeter 14-3 zu einer deutlichen Sickerwasserbildung kam, trat aus dem bewässerten Lysimeter 14-1 kein Sickerwasser aus. Die anhaltende Trockenheit auf dem Lysimeter 14-3 hatte im Vorfeld des Niederschlagsereignisses zu einer deutlichen Ausbildung von Schrumpfungsrissen und Ausprägung hydrophober Bo-


Abbildung 6.6: Verlauf der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) mit der Tiefe für die beiden Lysimeter 14-1 (links) und 14-3 (rechts). Die Leitfähigkeiten wurden durch Analyse von Bodenproben ermittelt. Die blaue Linie zeigt dabei den Mittelwert zwischen der geringsten (grün) und höchsten Leitfähigkeit (rot) in einer Tiefe.

deneigenschaften geführt, die einen stark beschleunigten vertikalen Wassertransport zur Folge hatten.

- Die bewässerte Luzerne auf dem Lysimeter 14-1 konnte sich deutlich besser entwickeln als der unbewässerte Vergleichsbestand auf dem Lysimeter 14-3. In der Folge konnte die bewässerte Luzerne deutlich schneller Wurzeln ausbilden und Wasser aus tieferen Bodenschichten ausschöpfen. Insbesondere in der Aufwuchsphase der Pflanzen hat Bewässerung einen wichtigen Einfluss auf die Pflanzenentwicklung, ober- wie unterirdisch.
- Die Wurzelentwicklung lässt sich aus Messungen der bodenhydraulischen Zustandsvariablen nur qualitativ bezüglich des Längenwachstums abschätzen. Insbesondere die im Modell sehr wichtige Wurzellängendichteverteilung kann nicht abgeschätzt werden.

Die anschließenden Modellierungsstudien zeigten deutlich, dass:

- Messungen der bodenhydraulischen Zustandsvariablen sowie der meteorologischen Größen in hoher Auflösung vorliegen müssen. Messungen der Pflanzenkenngrößen (Höhen, *LAI*,...) sind ebenfalls zwingend notwendig, reichen aber in wöchentlicher Auflösung, um zu einer robusten Charakterisierung des SVAT-Systems zu gelangen, auf deren Basis eine Modellkalibrierung durchgeführt werden kann.
- nahezu alle untersuchten Parameter des Modellsystems Daisy auf die erfassten Messgrößen sensitiv sind und daher auch theoretisch parameterisiert werden können. Erschwert wird die reale Parametrisierbarkeit durch Parameterinteraktionen höherer Ordnung und vielfältige Rückkopplungen.



Abbildung 6.7: Beispiele für im Feld gemessene Retentionskurven und die entsprechend angepassten MvG-Modelle zusammen mit den Parameterunsicherheiten.

- bedingt durch die Vielzahl der Rückkopplungsprozesse im Modellsystem die Aufgabe der Parameteroptimierung nicht in Teilprobleme zerlegt werden kann.
- die Messungen der Wassergehalte innerhalb der Lysimeter stark durch räumliche Effekte überprägt und für das Gesamtsystem nicht repräsentativ sind.

6.3 Feldexperimente in Pillnitz

Erträge und Wasserproduktivitäten

Die folgenden Ergebnisse beschreiben den in Pillnitz angebauten Weißkohl. Im Jahr 2013 zeigte sich, dass unter den gegebenen Boden- und Witterungsbedingungen auch eine gegenüber der aktuellen Empfehlung von Geisenheim um rund 100 mm geringere Wassergabe nicht zu einer Ertragsreduktion führte (siehe Tabelle 6.5)¹. Varianten, bei denen die Wassergabe noch deutlich stärker vermindert war und bei denen der Bodenwassergehalt zwischenzeitlich auf unter 40 % der nutzbaren Feldkapazität abnahm (z.B. Variante SVAT), reagierten mit nur leichtem bis mäßigem Ertragsrückgang. Die optimierte, schwellenwertbasierte Bewässerung sticht mit ihrem sehr hohen Ertrag sowie der geringsten eingesetzten Bewässerungsmenge hervor.

Im Jahr 2014 konnten zwischen den mit 286 mm (GH2, siehe Tabelle 6.6), abfallend auf 134 mm bewässerten Varianten (nicht gezeigt), bei hohem Ertragsniveau, keine Ertragsunterschiede

¹Dieser Abschnitt wurde teilweise dem Versuchsbericht von Herrn Dr. Laber (LfULG), entnommen

Variante	ME TM	ME FM	Ι	WP
GH2	8.3	105	410	0.93
GH3	8.3	103	306	1.05
GH4	7.9	97	108	1.33
SVAT	7.5	94	106	1.27
TU Feld $(250\mathrm{hPa})$	8.5	112	105	1.45

Tabelle 6.5: Ergebnisse Kohl 2013. Beobachteter Marktertrag (ME, in Trockenmasse TM und Feuchtmasse FM) in t ha⁻¹, Bewässerungsmenge I in mm und Wasserproduktivität WP in kg m⁻³

Tabelle 6.6: Ergebnisse Kohl 2014. Beobachteter Marktertrag (ME, in Trockenmasse TM und Feuchtmasse FM) in t ha⁻¹, Bewässerungsmenge I in mm und Wasserproduktivität WP in kg m⁻³

Variante	ME TM	ME FM	Ι	WP
GH2	10.4	132	286	1.6
Kc	10.4		172	1.9
SVAT	10.2	134	224	1.7
TU Feld $(250 \mathrm{hPa})$	11.1	130	172	2.0
TU Feld $(400 \mathrm{hPa})$	10.5	120	172	1.9
Kontrolle	10.0	125	32	2.4

festgestellt werden. Auch eine (noch) höhere Bewässerung von rund 320 mm, wie sie nach den derzeitig empfohlenen Kc-Werten berechnet worden wäre, dürfte angesichts der ausgebliebenen Ertragssteigerung nicht mit einem Ertragszuwachs verbunden gewesen sein. Die Kontrolle fiel längere Zeit durch ein etwas geringeres Wachstum des Umblattes auf, mit 0.13 t ha⁻¹ war aber nur ein verhältnismäßig geringer Ertragsabfall gegenüber den stärker bewässerten Varianten zu verzeichnen. Untermauert wird diese These durch die kontinuierlich vorliegenden Bodenwassersaugspannungs-Messwerte, die für die spätestens ab der zweiten Kulturhälfte gut erschließbaren tieferen Bodenschichten hohe bis sehr hohe Bodenwassergehalte (bzw. sehr geringe Wasserspannungen) aufzeigen. Damit ist zu konstatieren, dass unter den gegebenen Boden- und Klimabedingungen die derzeit für Kopfkohl von Geisenheim empfohlenen Kc-Werte als deutlich zu hoch angesetzt erscheinen.

Bei einem, auch in der Kontrolle, hohen Ertragsniveau wurden bei der Bohne durch die Zusatzwassergaben signifikante Ertrags- und Aufwuchseffekte ermittelt (siehe Tabelle 6.7). Die schwellenwertbasierte Bewässerung führte zu einem hohen Frischmasse-Mehrertrag bei vergleichsweise hohem Bewässerungsbedarf von 110 bzw. 170 mm.

Die Tabellen 6.5, 6.6 und 6.7 zeigen die wichtigsten Ergebnisse der Feldversuche 2013 und 2014 für Kohl und Bohne. Die Wasserproduktivität wurde hier definiert als Quotient von Trockenmasseertrag zu der Summe von eingesetztem Bewässerungswasser und Niederschlag in der Vegetationsperiode. Letzterer betrug für Kohl 2013 482 mm und 2014 383 mm, für Bohne 2014 204 mm (korrigierter Niederschlag).

Die Abbildung 6.8 zeigt Bodensaugspannungsverläufe welche in einem der sensorbasierten Varianten gemessen wurden. Bei Erreichen des definierten Schwellenwerts (hier -250 hPa) fand eine Bewässerung statt.

TU Feld $(350 \, hPa)$

Ι	in mm und Wasserpro	oduktivität	WP in kg	m ⁻³		
	Variante	$ME \ TM$	$ME \ FM$	A FM	Ι	WP
	GH	2.1	25.2	40.7	70	0.8
	SVAT	1.9	23.8	41.0	137	0.6
	Kontrolle	2.1	20.8	33.4	-	1.0
	TU Feld (200 hPa)	2.3	29.1	52.7	170	0.6

28.2

50.7

110

0.7

2.2

Tabelle 6.7: Ergebnisse Buschbohne 2014. Beobachteter Marktertrag (ME, in Trockenmasse TM und Feuchtmasse FM) und Aufwuchs (A, in FM) in t/ha, Bewässerungsmenge I in mm und Wasserproduktivität WP in kg m⁻³



Abbildung 6.8: Bodensaugspannung (Stundenmittelwerte) in unterschiedlichen Tiefen gemessen unter Kohl. Der Niederschlag ist in blau dargestellt. Die automatische Tropfbewässerung (rote Balken) fand bei -250 hPa statt (TU Feld 1).

Kalibrierungsergebnisse

In diesem Abschnitt soll beispielhaft die Kalibrierung der Pflanzen- und Bodenparameter auf Basis der Messwerte der Variante Kc von 2014 dargestellt werden. Die umfangreichen Messwerte der Pflanzenhöhen, Blattflächenindizes, Biomassen, Erträge und Tensionen wurde für die inverse Bestimmung herangezogen. Hierfür wurde Daisy anhand einer Variante (SVAT Kc) parametrisiert und die simulierten Werte den Messwerten mit Hilfe des evolutionären Optimierungsalgorithmus AMALGAM angenähert. Im Rahmen dieser multikriteriellen Optimierung wurden neun Zielfunktionen (Minimierung der Differenz zwischen den beobachteten Pflanzenhöhen, Erträge, ... siehe oben) definiert und über 40 Modellparameter (Boden und Pflanze) angepasst. Das Ergebnis zeigt ein sehr gute Abbildung der meisten Kennwerte. Die Abbildungen 5.7, 6.10 und 6.11 zeigen exemplarisch simulierte und gemessene Werte. Die Boxplots bilden hierbei die Messwerte ab. Die Linie entstammt der Modellierung. Schwächen zeigen sich bei der Abbildung des LAI im späten Stadium (Abb. 6.11). Dort ist allerdings auch die Streuung bei den Messwerten relativ hoch. Zudem führte die Messung des LAI mit einem PAR Sensor zu einer Überschätzung der LAI Werte und gibt somit eher Anhaltspunkte zur Entwicklung als plausible Maximalwerte.

Die Abbildungen 6.10 und 6.11 zeigen Validierungsergebnisse anhand der Bewässerungsvariante SVAT 250 bzw. TU Feld (250 hPa) unter Verwendung des oben erläuterten Parametersets. Das kalibrierte Modell wurde verwendet, um die Bewässerungsvarianten genauer zu analysieren. Die Tabellen 6.8 und 6.9 stellen eine weiterführende Evaluierung der Kohlbewässerungsversuche von 2013 und 2014 dar. Die Erträge wurden besonders 2014 sehr gut getroffen. Der Kopfmarktertrag für 2013 wird überschätzt, da das Verhältnis von Kohlköpfen zu Blättern



Abbildung 6.9: Gemessene (graue Punkte) und simulierte (blaue gestrichelte Linie) Bodensaugspannungswerte auf etwa 30 cm Bodentiefe im Kohl (Variante Kc, 2014)



Abbildung 6.10: Gemessene (boxplots) und simulierte (Linie) Kohl Pflanzenhöhen der Variante SVAT 250 2014

in dem Jahr geringer war als 2014. Die simulierte Gesamtbiomasse trifft die beobachtete in beiden Jahren relativ gut.

Eine Betrachtung der Verluste ΣL (Summe aus Evaporation des Bodens, Interzeption und Tiefenperkolation) zeigt, dass die GH-Bewässerungsvarianten (Bewässerung nach Geisenheim) zu sehr hohen und unproduktiven Wasserverlusten führen. Eine Überbewässerung ist jedoch nicht nur arbeits- und kostenintensiv, sondern führt auch häufig zu einer Auswaschung wertvoller Nährstoffe wie Stickstoff. Neben der hier angeführten Simulationsstudie, wurden die sortenspezifisch kalibrierten Pflanzenparametersets bei der regionalen Pflanzenmodellierung verwendet.

Insgesamt dienten die Versuchsdaten von 2013 und 2014 einer Kalibierung in Sachsen typischer Buschbohne- und Weißkohlsorten. Die hohen Niederschläge 2013 führten zu einer weitgehend ungenügenden Datenlage. Zudem führte der feuchte Herbst 2014 bei Kohl zu einem Kompensationseffekt (geringe Ertragsunterschiede zwischen allen Varianten). Eine langjährige



Abbildung 6.11: Gemessene (boxplots) und simulierte (Linie) Kohl Blattflächen
indizes (LAI)der Variante TU Feld (250 hPa) 2014

Tabelle 6.8: Ergebnisse Kohl 2013. Simulierter (sim) und beobachteter (obs) Marktertrag (ME) und Aufwuchs (A) in TM t/ha, Bewässerungsmenge I und Verluste ΣL in mm

	ME obs	ME sim	$A \ obs$	A sim	Ι	ΣL
GH2	8.3	9.6	15.8	16.4	410	712
GH3	8.3	9.6	15.3	16.4	306	619
GH4	7.9	9.3	16.2	16.1	108	487
SVAT 250	7.5	9.3	15.7	16.1	106	485
TU Feld $(250 \mathrm{hPa})$	8.5	9.4	16.6	16.1	105	440
Kontrolle	-	-	-	-	0	439

Tabelle 6.9: Ergebnisse Kohl 2014. Simulierter (sim) und beobachteter (obs) Marktertrag (ME) und Aufwuchs (A) in TM t/ha, Bewässerungsmenge I und Verluste ΣL in mm

	$ME \ obs$	ME sim	$A \ obs$	A sim	Ι	ΣL
SVAT Kc	10.4	10.4	16.9	16.9	172	428
SVAT 250	10.2	10.4	16.9	16.9	224	462
GH2	10.4	10.4	16.9	17.4	286	501
TU Feld $(250 \mathrm{hPa})$	11.1	10.4	17.4	16.9	172	388
TU Feld $(400 \mathrm{hPa})$	10.5	10.4	16.6	16.9	172	392
Kontrolle	10.0	9.8	16.7	16.1	32	325



Abbildung 6.12: a) Mittlerer Niederschlag in Sachsen aus WEREX V (ECHAM5 A1B, Lauf 1, Realisierung 00) im Zeitraum P1 und Differenzen des mittleren Niederschlages für die Zeiträume P3 (b) bzw. P4 (c) gegenüber P1

Versuchsreihe einschließlich von Jahren mit starkem Trockenstress würde die Aussagekraft des Modells erhöhen.

6.4 Auswertung von Klimadaten

6.4.1 Projizierte Niederschlagsänderung

Von besonderem Interesse für die Pflanzenmodellierung ist die projizierte Änderung des Niederschlages in Sachsen unter zukünftigen Klimabedingungen (Abb. 6.12). Die mittleren Jahresniederschläge für den Referenzzeitraum P1 schwanken zwischen 570 mm im Nordwesten Sachsens und 1300 mm über dem Erzgebirgskamm. Die generelle Niederschlagsstruktur zeigt einen relativ starken Zusammenhang mit der Höhe. Hierbei sei angemerkt, dass die Regionalisierung des Niederschlages unabhängig von der Höhe durchgeführt wurde (siehe Abschnitt 5.6.1).

6.4.2 Trockenheitsindizes – Methode für eine erste Gefährdungsanalyse

Es gibt unterschiedliche Trockenheitsarten wie die meteorologische Trockenheit, die Bodenfeuchtetrockenheit und die hydrologische Trockenheit. Wanders et al. (2010) geben einen Über-

blick über mögliche Trockenheitsindizes für die einzelnen Trockenheitsarten. Wichtig bei der Wahl des Indexes ist die Berücksichtigung lokaler Verhältnisse, damit Trockenheiten spezifisch für einen Standort angegeben werden können.

Ein Beispiel ist der Standardized Precipitation Index (*SPI*, McKee et al., 1993; Heinrich und Gobiet, 2012), der aus der Notwendigkeit entwickelt wurde, dass Trockenperioden für den jeweiligen Standort spezifisch eingeschätzt werden müssen. Dem *SPI* liegt zu Grunde, dass Monatssummen mehrerer Monate (z.B. drei oder sechs) einer Verteilung gehorchen. Die Daten werden in eine Normalverteilung transformiert, wodurch allgemeingültige Grenzwerte formuliert werden können, welche in Tabelle 6.10 definiert sind.

Tabelle 6.10: Klassen des SPI SPI Klasse extrem feucht ≥ 2.00 1.50 bis 1.99 sehr feucht 1.00 bis 1.49moderat feucht -0.99 bis 0.99 nahe normal -1.00 bis -1.49moderat trocken -1.50 bis -1.99sehr trocken ≤ -2.00 extrem trocken

Vorteilhaft beim *SPI* ist, dass durch die Struktur Trocken- und Feuchteperioden abgeleitet werden können. Desgleichen ist es möglich, andere Parameter abzuleiten, so z.B. die Anzahl der Trockenperioden und deren typische Länge.

Im Folgenden wird die Nutzung des *SPI* als Werkzeug für eine erste Gefährdungsanalyse von Agrarstandorten am Beispiel Sachsens erläutert.

Abbildung 6.13 zeigt oben Monate mit einem 3-Monats-SPI < -1.5 an 182 in Sachsen liegenden Stationen aus den WETTREG 2010 Daten (Szenario A1B, Realisierung 00). Als Vorgängermodell von WEREXV, dessen Daten zur Modellierung mit dem SVAT-Modell Daisy herangezogen werden, ist die generelle Struktur und Größenordnung der Daten aus WETT-REG 2010 vergleichbar mit WEREX V. Rot dargestellt ist der Indikator, dass ein Monat als Trockenperiode einzuschätzen ist. Rein visuell kann man eine Häufung der roten Indikatoren im mittleren Zukunftsraum von 2040 bis 2080 erkennen. Unterstützend dazu sind im mittleren Teil die Anzahl der Trockenperioden für ein gleitendes 30-Jahres-Fenster dargestellt. Dabei gilt der Wert zu einem bestimmten Monat für den 30-Jahres Bereich davor. Es wird die Anzahl der Trockenperioden als Querverteilung über alle 182 Stationen interpretiert. Daraus ergeben sich die Bereiche unterschiedlicher Graufärbungen. Die Anzahl der Trockenperioden nimmt in dieser Realisierung zur Mitte des 21. Jahrhunderts zu und bleibt dann auf dem höheren Niveau. Gleichzeitig nimmt die absolute Schwankungsbreite der Anzahl der Trockenperioden über die Stationen im Untersuchungsgebiet zu. Das deutet auf eine stärkere Heterogenität des Niederschlagsregime in Sachsen hin. Der untere Teil der Abbildung zeigt die Querverteilungen der Längen von Trockenperioden über die genutzten 182 Stationen. Zur Mitte des 21. Jahrhunderts hin nimmt neben der Anzahl auch die Länge der Trockenperioden zu. Zum Jahr 2100 hin nimmt die charakteristische Dauer etwas ab.

Die Abbildungen gelten nur für eine Realisierung eines Szenarios. Allerdings zeigen andere Realisierungen der Szenarien A1B und A2 ein ähnliches Verhalten, teilweise auch in stärkerer Trockenheitsausbildung. Das Szenario B1 hingegen zeigt erwartungsgemäß² die geringste

²Das IPCC-Szenario B1 ist als globales und umweltorientiertes Szenario im Vergleich zu anderen entwickelten Szenarien eher konservativ und zeigt geringere Änderungen im Zukunftsbereich



Abbildung 6.13: **oben:** 3-Monats-*SPI* an 182 verschiedenen Niederschlagsstationen aus WETTREG 2010, Szenario A1B, Realisierung 00; **Mitte:** gleitendes 30-Jahres-Fenster der Anzahl der Trockenheiten und **unten:** Länge der Trockenperioden im gleitenden 30-Jahres-Fenster in Monaten; alle mit SPI < -1.5; in der Mitte und unten wird die Querverteilung über alle 182 Stationen dargestellt

Neigung zu Trockenperioden und bleibt tendenziell auf dem heutigen Stand.

Als Trockenheitsindex für Bodenfeuchte ist der Palmer Drought Severity Index (*PDSI*, manchmal auch als meteorologischer Trockenheitsindex verwendet) hervorzuheben, welcher auf einem einfachen Zwei-Schicht-Bodenmodell aufbaut. Für beide Schichten werden anhand der meteorologischen Parameter die Bodenfeuchten berechnet. Für eine detaillierte Bewertung von Agrarstandorten ist dieser Index nicht geeignet, da einerseits der Boden in seiner Komplexität und den daraus folgenden Wechselwirkungen nicht dargestellt werden kann und andererseits die darauf angebauten Kulturpflanzen vernachlässigt werden.

6.4.3 Beispielhafte Entwicklung von Temperatur und Niederschlag

Die bivariate Entwicklung von Temperatur und Niederschlag für Daten aus WEREX V, A1B (mit ECHAM5, Lauf 1 Realisierung 00) ist in Abbildung 6.14 für das Fokusgebiet Nordwestsachsen visualisiert. Konform zu anderen Publikationen van der Linden und Mitchell (z.B.



Abbildung 6.14: Bivariate Dichtefunktionen für Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den Zukunftszeiträumen verglichen mit 1961-1990 getrennt für Winter (ND-JFMA) und Sommer (MJJASO) im Fokusgebiet Nordwestsachsen

2009) erhöhen sich die Temperaturen in dem Gebiet. Das betrifft das gesamte Jahr, auch wenn das Sommerhalbjahr hier geringfügig stärker betroffen ist. Ferner ist mit geringen Niederschlagsänderungen zu rechnen. Das betrifft insbesondere das Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober (deutliche Verschiebung der Dichte zu negativen Niederschlagsänderungen). Im Winter bleiben die Niederschläge weitestgehend auf dem heutigen Niveau bestehen.

Ähnliche Ergebnisse sind im Fokusgebiet Ostsachsen zu sehen (Abb. 6.15). In dem Gebiet ist das Signal der abnehmenden Sommerniederschläge noch etwas klarer als im Fokusgebiet Nordwestsachsen und die Temperatur erhöht sich geringfügig mehr.

6.5 Einfluss des Wurzelmodells auf den Wurzelwasserentzug

Im Rahmen des Projekts wurde der Einfluss des Wurzelmodells auf die Bodenwasserhaushaltsmodellierung näher betrachtet. Ausgehend von einer Machbarkeitsstudie, inwieweit Wurzelmodelle in das Subsurface-Flow Modul von Comsol inkludiert werden können, wurden im weiteren Projektverlauf komplexere Modelle verwendet. Beispielhaft seien hierfür exponentielle, makroskopische Ansätze sowie auf L-Systemen beruhende, vollständig dreidimensionale Abbildungen gesamter Wurzeln genannt. Die unterschiedlichen Modelle wurden in zahlreichen Bodenwasserhaushaltssimulationen zusammen mit variierenden Bewässerungsstrategien für verschiedene Bodendaten verwendet. Zur Reduktion von numerischer Komplexität und somit Rechenzeit wurde im Weiteren analysiert, inwieweit komplexe dreidimensionale Modelle niederdimensional approximiert werden können.

Die ersten Simulationsrechnungen dienten zuächst zur Erstellung mehrerer Demonstrationsmodelle in Form von Grafiken und Animationen. Beispielhaft hierfür seien die Darstellungen in Abbildung 6.16.

Alle Teile in Abbildung 6.16 zeigen ein 2D-axialsymmetrisches Modell des Wurzelwasserentzugs einer Maispflanze bei zeitgleicher Evaporation. Der Wurzelwasserentzug wurde durch ein auf Exponentialfunktionen basierendem, makroskopischen Modell realisiert. In dieser Simulation wird der modellierte Lehmboden nach 24 h für 2 h mit $21h^{-1}$ durch einen unterirdischen



Abbildung 6.15: Bivariate Dichtefunktionen für Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den Zukunftszeiträumen verglichen mit 1961-1990 getrennt für Winter (ND-JFMA) und Sommer (MJJASO) im Fokusgebiet Ostsachsen

Tropfer bewässert. Die Farbskala stellt hierbei die Bodenfeuchte in blau bis rot, d.h. von feucht bis trocken, dar. Abbildung 6.16 links oben zeigt den Zeitpunkt nach 24 h, direkt vor Bewässerungsbeginn. Der rechte Teil stellt den Boden nach Ablauf der zweistündigen Bewässerung dar. In Abbildung 6.16 links unten ist die Bodenfeuchte 48 h nach Simulationsbeginn zu sehen. In den darauffolgenden Darstellungen 6.17 bis 6.19 wird ein Teil der Ergebnisse des Vergleichs verschiedendimensionaler Modellierungen präsentiert. Als dreidimensionales Basismodell diente ein trockener sandiger Lehmboden (pF = 3, Saugspannung bei -1000 cm) mit einem Volumen von einem Kubikmeter. Dieser wurde durch vier äquidistant angeordnete, unterirdische Tropfer zu Beginn der Simulation mit je $2.51 h^{-1}$ für vier Stunden bewässert. Die Tropfer befinden sich in einer Tiefe von 25 cm mittig in der yz-Ebene. Zentral um jeden Tropfer wurde jeweils eine Pflanzenwurzel in Form eines dreidimensionalen, auf Exponentialfunktionen basierendem, makroskopischen Modells, als Senkenterm realisiert. Der Wasserstress wurde durch eine stückweise lineare Feddes Funktion implementiert. Der potentielle Wurzelwasserentzug jeder Pflanze betrug $21d^{-1}$.

In Abbildung 6.17 ist die Wasserverteilung im Boden nach 48 h (links) sowie 120 h (rechts) Simulationszeit dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Zeit eine Homogenisierung in x-Richtung eintritt, die Wasserverteilung in der yz-Ebene jedoch durchgängig stark heterogen bleibt.

Aufgrund dieser Beobachtung wurde im nächsten Schritt eine zweidimensionale Approximation des Sachverhalts durchgeführt. Die Dimensionsreduktion erfolgte hierbei durch eine Summation der Flüsse in Tropfschlauchrichtung. In Abbildung 6.18 ist anhand des Vergleichs des Querschnitts aus der dreidimensionalen Simulation mit der direkten zweidimensionalen Rechnung ersichtlich, dass speziell das verfügbare Wasser im Wurzelraum des 2D-Modells deutlich überschätzt wird.

Im Weiteren wurde der Approximationsfehler beim Übergang zum stark vereinfachten 1D-Modell untersucht. Zur Dimensionsreduktion wurden dazu sämtliche Flüsse entlang der horizontalen Richtung aufsummiert.

Die linke Grafik in Abbildung 6.19 zeigt die Saugspannung der eindimensionalen Modellierung



Abbildung 6.16: Links oben: Bodenwasserverteilung nach 24 stündigem Wurzelwasserentzug einer Maispflanze sowie Evaporation ohne Bewässerung. Rechts: Bodenwasserverteilung nach 26 stündigem Wurzelwasserentzug einer Maispflanze, Evaporation sowie zwei Stunden Tropfbewässerung am Ende der Simulationsperiode. Links unten: Bodenwasserverteilung nach 48 stündigem Wurzelwasserentzug einer Maispflanze, Evaporation sowie zwischenzeitlicher zweistündiger Tropfbewässerung

im Vergleich zu den entsprechenden, zu einem Tropfer zentralen Schnittlinen des 2D- sowie 3D-Modells. Eine niedrige Saugspannung korrespondiert mit einem niedrigen Wassergehalt in der jeweiligen Tiefe. Es ist ersichtlich, dass sowohl die zwei- als auch die dreidimensionale Rechnung auf ähnliche Ergebnisse führen, wohingegen durch die eindimensionale Approximation ein signifikanter Fehler erzeugt wurde. Die rechte Grafik derselben Abbildung zeigt die Wurzelwasseraufnahme der gesamten Wurzel für jeden Zeitschritt. Da die Entnahme im Modell durch eine negative Rate dargestellt wurde, entspricht ein hoher negativer Wert einem hohen Wurzelwasserentzug. Es ist ersichtlich, dass auch hierbei die stark vereinfachte eindimensionale Simulation zu einem signifikant falschen Ergebnis führt. Auch die zwei- und dreidimensionale Modellierung weisen je nach Simulationszeit eine erhebliche Differenz zueinander auf.

In Tabelle 6.11 wird die Überschätzung des Wurzelwasserentzugs bei Modellreduktion anhand einiger numerischer Werte dargestellt.

Während im realitätsnahen 3D-Modell für sandigen Lehmboden nur 72.9% des Bewässerungswassers tatsächlich von den Wurzeln aufgenommen werden, wird dieser Wert bei der Verwendung niedrigerer Modelldimensionen mit 80.1% im 2D-Fall sowie 96.4% im 1D-Fall berechnet.



Abbildung 6.17: Bodenwasserverteilung der dreidimensionalen Simulation nach 48 Stunden (links) bzw. 120 Stunden (rechts)



Abbildung 6.18: Bodenwasserverteilung nach 48 Stunden, Querschnitt der 3D-Simulation (links), direkte 2D-Simulation (rechts)

Tabelle 6.11:	Wurzelwasserentz	zug in ve	rschiedenen	Dimensionalitäten
---------------	------------------	-----------	-------------	-------------------

Modell	Bewässerung in mm	Wurzelwasserentzug in mm	Wurzelwasserentzug in $\%$
1D sandiger Lehm	30	28.91	96.4
2D sandiger Lehm	30	24.20	80.1
3D sandiger Lehm	30	21.88	72.9
1D Sand	30	29.20	97.3
2D Sand	30	19.12	63.7
3D Sand	30	15.40	51.3



Abbildung 6.19: Saugspannung entlang einer zum Tropfer zentralen Schnittlinie nach 120 Stunden (links), Wurzelwasserentzug der gesamten Wurzel (rechts)

Dies entspricht einer Überschätzung von 9.8 % bzw. 32.2 %. Bei leitfähigeren Böden liegt dieser Fehler sogar noch deutlich höher. Im Fall des in der Tabelle dargestellten Sandes wird die Wurzelwasseraufnahme bei Verwendung einer eindimensionalen Approximation um 89.6 % überschätzt. Schlussfolgernd ist festzuhalten, dass die Verwendung niedrigdimensionaler Modelle zur Simulation komplexer Bewässerungsvorgänge typischerweise einen teils vielfach höheren Wurzelwasserentzug ergibt. Das führt bei anschließender Verwendung der Daten in Pflanzenwachstumsmodellen sowie bei ökonomischen Betrachtungen zu einer Überschätzung des Ertrags und Gewinns. Niedrigdimensionale Modelle, speziell 1D, sollten somit nur in Ausnahmefällen bei besonders einfachen Sachverhalten (Beregnung, homogener Wurzelraum) verwendet werden. Eine Herausforderung bleibt allerdings auch bei Verwendung neuester Algorithmen die mathematisch anspruchsvolle sowie rechenzeitintensive Lösung der 3D-Probleme.

Im Weiteren soll betrachtet werden, inwieweit die Simulationsgenauigkeit durch die Verwendung komplexerer Wurzelmodelle verbessert werden kann. Hierzu wurde das in Matlab entwickelte Paket "Root-Box" verwendet, welches auf der Verwendung von L-Systemen zur Darstellung der Wurzel basiert. Im Folgenden werden verschiedene Aspekte der Verwendung von komplexen Wurzelmodellen dargestellt. Abbildung 6.20 verdeutlicht anschaulich, dass die Verwendung eines makroskopischen Wurzelmodells bzw. der dabei verwendeten Wurzelwasserentzugsfunktion (Bild links) eine extreme Vereinfachung zur Simulation einer realen Wurzel darstellt. Die in Abbildung 6.20 zum Vergleich rechts dargestellte Maiswurzel wurde mit dem Paket Root-Box in Matlab erzeugt.

Die Abbildung 6.21 zeigt das Modell einer jungen Maiswurzel welche zur Simulation des Wurzelwasserentzugs bei Bewässerungsvorgängen in "COMSOL Multiphysics" eingefügt wurde. Das dargestellte Berechnungsgitter (links) wurde zuvor mit dem Paket "DistMesh" erzeugt. Bereits an diesem räumlich kleinen Beispiel wird deutlich, dass die Verwendung eines dreidimensionalen L-System Modells der Wurzel nicht praktikabel ist. Die hochkomplexe Geometrie der Wurzel bedingt extrem feiner Gitter, deren Verwendung zum einen numerisch kompliziert ist und die zum anderen extrem lange Rechenzeiten hervorrufen.

Einen guten Kompromiss bildet die Verwendung von zweidimensionalen Wurzeldichtefunktionen. Abbildung 6.22 zeigt in der linken Grafik den 2D-Querschnitt des Modells einer Maiswurzel. Deren Wurzeldichteverteilung ist in selbiger Abbildung rechts zu sehen. Die Farbskala stellt hierbei die Wurzeldichte in den jeweiligen diskreten Bodenbereichen dar. Anhand dieser lässt sich für jeden Bereich die entsprechende Wurzelwasserentzugsrate ableiten, welche durch einen Senkenterm im Bodenwasserhaushaltsmodell schließlich realisiert werden kann.



Abbildung 6.20: Makroskopisches Wurzelmodell (links), auf L-Systemen basierendes Wurzelmodell (rechts)



Abbildung 6.21: Finite-Elemente-Gitter zur Modellierung einer jungen Maiswurzel (links), Simulationszwischenergebnis (rechts)

Diese Art der Modellierung bietet einen sehr guten Kompromiss zwischen genauerer Darstellung der Wurzel im Vergleich zu makroskopischen Modellen und dem Informationsverlust gegenüber dem dreidimensionalen Fall. Abbildung 6.23 zeigt den Bodenfeuchtegehalt nach zwölfstündigem Wurzelwasserentzug aus einem lehmigen Sandboden. Die rechte Grafik zeigt das Simulationsergebnis bei Verwendung der Wurzeldichteverteilung basierend auf einer durch L-Systeme generierten Wurzel. In der linken Abbildung ist das Ergebnis bei Verwendung eines entsprechenden makroskopischen Modells zu sehen.

In jedem Fall empfiehlt sich die Verwendung zweidimensionaler Modelle, da diese für die meis-



Abbildung 6.22: Zweidimensionaler Querschnitt des Root-Box Modells einer 60 Tage alten Maiswurzel (links), zugehörige Wurzeldichteverteilung (rechts)

ten Anwendungen hinreichend genaue Ergebnisse bei akzeptablen Rechenzeiten liefern.

6.6 Modellierungsergebnisse auf der Feldskala

Während an den Standorten Pillnitz und Brandis Methodenentwicklung betrieben wird, können die daraus gewonnenen Erkenntnisse an anderen Standorten eingesetzt werden.

An einem Standort im Nordwesten Sachsens wurden Simulationen für die Kartoffelsorte Folva mit der Standardparametrisierung der Daisy-Pflanzenbibliothek durchgeführt. Abbildung 6.24 zeigt verschiedene Ausgabeparameter aus den Simulationen (von oben nach unten: Trockenmasse des Ertrags, Anzahl der Wasserstresstage, Bewässerungswasser, aktuelle Evapotranspiration, Matrixperkolation (Sickerwasser aus dem Boden), mittlere Saugspannung in -31.25 cm Tiefe; vp steht für Vegetationsperiode). Als Klimadaten wurden Daten aus WEREX V A1B (Lauf 1, Realisierung 00) von 1961 bis 2100 genutzt (siehe Abschnitt 5.6.1). Die Bewässerung wurde sensorgesteuert basierend auf der Saugspannung in -30 cm Tiefe veranlasst. Rot ist die Rechnung ohne Bewässerung, blau Bewässerung ab $\Psi = -100 \,\mathrm{cm}$, cyan Bewässerung ab $\Psi = -1000 \,\mathrm{cm}$, grün Bewässerung ab $\Psi = -4000 \,\mathrm{cm}$.

Es wird umso mehr Ertrag generiert, je mehr bewässert wird. In diesem Beispiel gibt es indes kaum Unterschiede zwischen $\Psi = -100$ und $\Psi = -100$ cm. Die Kartoffelsorte kommt auch mit höheren Saugspannungen zurecht. Auch die anderen Parameter unterscheiden sich nur gering zwischen diesen beiden Bewässerungsstrategien.



Abbildung 6.23: Bodenfeuchte in Prozent nach zwölfstündigem Wurzelwasserentzug, makroskopisches Modell (links), auf L-System basierendes Dichtemodell (rechts)



Abbildung 6.24: Sensitivität von Kartoffelparametern bei der Modellierung mit Daisy auf einem Boden im Nordwesten Sachsens



Abbildung 6.25: Differenzen von Kartoffelerträgen zwischen Nichtbewässerung und Bewässerung ab $\Psi = -1000 \,\mathrm{cm}$ sowie die zugehörigen Bewässerungsmengen; a) Ergebnisse für alle Böden in einem Rasterpunkt nordöstlich von Leipzig und b) dito für einen Rasterpunkt südöstlich von Dresden

Was ebenfalls deutlich wird, ist der geringfügig steigende Ertrag in der Zukunft auf Kosten einer höheren Bewässerungsmenge. Diese wird hauptsächlich zur Erfüllung des erhöhten Bedarfs der Evapotranspiration genutzt (bei gleichzeitig etwas geringeren Niederschlägen, hier nicht dargestellt). Die Menge an Sickerwasser bleibt bei den Varianten weitgehend gleich und der Wasserspeicher im Boden, implizit angezeigt durch die mittlere Saugspannung, bleibt ebenfalls auf einem konstanten Niveau. Anders ist die Situation bei geringeren Bewässerungsmengen, wo der Speicher erheblich gelehrt wird und die Evapotranspiration in der Zukunft teilweise geringer wird. Das hat z.T. sinkende Erträge zur Folge und ist nicht nachhaltig in Bezug auf die Wassermenge im Boden und damit die Langzeitnutzbarkeit.

Aus den bisherigen Ergebnissen wird eine Bewässerung der vorliegenden Kartoffelparametrisierung ab einem Schwellenwert von $\Psi = -1000$ cm weiterverfolgt. Das ist unter den vorliegenden Ergebnissen der geeignetste Kompromiss.

In Abbildung 6.25 werden die Differenzen von Kartoffelerträgen zwischen Nichtbewässerung und Bewässerung bei $\Psi = -1000 \,\mathrm{cm}$ und die zugehörigen Bewässerungsmengen dargestellt.

Grundlage im oberen Teil a) ist ein Rasterpixel nordöstlich von Leipzig und im unteren b) ein Rasterpixel südöstlich von Dresden. In der linken Spalte sind die jeweils fünf häufigsten Böden im Körnungsdreieck dargestellt, wobei jeder Punkt einer Schicht eines Bodens entspricht³. Die Bereiche in der rechten Spalte (symbolisiert durch das graue Band) spannen sich zwischen Minimum und Maximum auf. Der Median liegt als schwarze Linie innerhalb des grauen Bandes. Im Fall a) gibt es einige relativ sandige Böden und einen etwas schluffigeren. Im Fall b) hingegen besteht ein größerer Anteil an schluffigen Böden. Die sandigen Böden aus a) benötigen größere Wassermengen als schluffige. Auch gibt es dort eine größere Schwankungsbreite als bei b), wo die Bewässerungsmengen enger geclustert sind. Die Erträge können in a) stärker durch Bewässerung erhöht werden. Begründet werden kann das damit, dass der Einfluss der geringeren Niederschläge in der Zukunft (siehe Abschnitt 5.6.1) in sandigen Böden weniger ge-

³jeder Boden besteht aus mehreren Horizonten, daher ist die Anzahl der Punkte höher als fünf



Abbildung 6.26: Stochastische Ertragsfunktion für Kartoffel (Agria) in den Zeiträumen P1 bis P4 im Fokusgebiet Nordwestsachsen

puffert werden kann als in schluffigen Böden. Die Wasserspannungskurve⁴ zeigt, dass bei Sand eine Wassergehaltsminderung eine überproportionale Wirkung auf die Saugspannung verglichen mit Schluff hat. In diesem Fall steigt bei Sand die Saugspannung stärker als bei Schluff. Die Pflanze auf einem Boden reagiert in erster Linie direkt auf die Saugspannung, weshalb in schluffigen Böden in b) die sinkenden Niederschläge besser gepuffert werden können. Das spiegelt sich in niedrigeren Bewässerungsmengen, aber auch in geringeren Ertragssteigerungen durch Bewässerung wider.

6.7 Stochastische Ertragsfunktion – dateninduzierte Unsicherheit

Für die Bestimmung der Unsicherheit wird das Fokusgebiet Nordwestsachsen herangezogen. Die stochastischen Ertragsfunktionen für Kartoffeln (Agria) an dem Standort sind in Abbildung 6.26 für die Zeiträume P1 bis P4 dargestellt. Der Abbildung liegen die Klimadaten aus WEREX V (ECHAM5 A1B, Lauf 1, Realisierung 00) zugrunde.

Der marktfähige Ertrag muss aus der in Daisy ausschließlich angegebenen Trockenmasse (TM) abgeleitet werden. Für Kartoffeln gilt ein Trockensubstanzgehalt von etwa 20-25 % (Kolbe, 1995).

Im Zeitraum P1 gibt es nur ein geringes Potenzial zur Ertragssteigerung bei Bewässerung. Von unbewässerter zu vollbewässerter Kartoffel liegen im Median etwa $0.3 \text{ t} \text{ ha}^{-1}$ TM, was einer Feuchtmasse von etwa $1.3 \text{ t} \text{ ha}^{-1}$ entspricht. Dahingegen ist die Ertragsschwankung innerhalb einer Bewässerungsmenge groß. 50 % der Erträge (dunkelgrauer Bereich) ohne Bewässerung liegen zwischen 6.7 und $9.2 \text{ t} \text{ ha}^{-1}$ und mit Vollbewässerung zwischen 6.9 und $9.7 \text{ t} \text{ ha}^{-1}$. Die große Schwankung kommt aus der heterogenen Niederschlagsverteilung im humiden, mitteleuropäischen Klima. Je nach Menge und Zeitpunkt kann es zu deutlichen Ertragsschwankungen kommen. In den Zeiträumen P2 und P3 ändern sich die potentiellen Ertragssteigerungen kaum. Erst im Zeitraum P4 wird die Dynamik der Ertragsentwicklung mit Zusatzbewässerung deutlich. Der Ertrag kann von 6.9 auf 9.3 tha^{-1} gesteigert werden. Gleichzeitig gibt es hier eine große Schwankungsbreite.

Die dateninduzierte Unsicherheit der SCWPF wird primär durch drei Einflussfaktoren bestimmt: Durch die Sorte, durch den Boden und durch das Klima. Alle drei Faktoren werden in Abbildung 6.27 adressiert. Es werden drei Kartoffelsorten (Agria, Triada, Folva) und die fünf häufigsten Böden eingesetzt. Die klimainduzierte Unsicherheit wird weiter aufgeschlüsselt in Szenario (A1B und E1), Globalmodell (ECHAM5–EH5, HadCM3C–HC3C, HadGEM2– HCG2), Lauf des Globalmodells (L1, L2, L3) und Realisierung (00, 66, 99). Die jeweils anderen

⁴die Beziehung von Saugspannung zu Wassergehalt

Parameter werden, wenn nicht anders vermerkt, auf dem Standard belassen.

Je nach Zeitraum zeigen die Wahl der Sorte sowie des Bodens die größten Schwankungsbreiten. Weiterhin sind die Ergebnisse stark sensitiv auf die Wahl des Globalmodells sowie des Szenarios. Das Szenario E1 stellt einen Sonderfall dar, da es einem geringen Temperaturanstieg von +2 °C bis zum Jahr 2100 entspricht. Entwickelt wurde das Szenario im ENSEMBLES-Projekt mit Stabilisierung des CO2-Gehaltes bei 450 ppm (van der Linden und Mitchell, 2009). Das Szenario vermeidet die potentiell unsichere Extrapolation der Emissionstrends. Weniger signifikant sind die Variationen innerhalb der Globalmodellläufe und der Realisierungen.

Da innerhalb der nächsten Jahrzehnte mit neuen Sorten zu rechnen ist, verdeutlichen die gewählten Sorten eher das Potential, welches durch die Wahl der Sorte besteht. Der Einfluss des Bodens nimmt in der Zukunft zu. Das liegt an der unterschiedlichen Fähigkeit des Bodens, Wasser zu speichern und damit die geringeren Niederschläge während der Vegetationperiode zu puffern.

Durch die geringe Wirkung von Bewässerung im aktuellen Zeitraum fällt die Unsicherheit hier besonders ins Gewicht. Das bestätigt die bereits aus den Daten der ersten Klimaberandung abgeleitete Schlussfolgerung, dass sich Bewässerung von Kartoffeln unter rezenten Klimabedingungen nur an besonders exponierten Standorten lohnt. Vor allem in P4 wird das Signal-Rausch-Verhältnis größer und die Information signifikanter. Auch nach der Analyse der Unsicherheiten kann die Schlussfolgerung bestätigt werden, dass unter zukünftigen Verhältnissen Bewässerung vorteilhaft sein wird. Diese Information überwiegt die generelle Unsicherheit, die durch die weite Extrapolation der Klimadaten entsteht.

6.8 Modellierungsergebnisse auf der Regionalskala

6.8.1 Ertrag und Wasserbedarf

Die Simulationsrechnungen ermöglichen die Angaben der stochastischen Ertragsfunktionen im gesamten Untersuchungsgebiet. Daraus sei ein Ausschnitt in Abbildung 6.28 für jeweils einen Boden je Rasterzelle gegeben. In der linken oberen Abbildung sind die Erträge ohne Bewässerung für den Zeitraum P1 dargestellt. Im Norden Sachsens gibt es tendenziell geringere Erträge durch die trockeneren Verhältnisse sowie die leichteren Böden im Vergleich zum mittleren und südlichen Teil Sachsens. Die folgenden Zeiträume werden als Differenzen zu P1 dargestellt. Die geringen Veränderungen in P2 und P3 aus dem Einzelbeispiel in Abbildung 6.26 finden sich in der gesamten Region wieder. Erst in P4 werden signifikante Unterschiede deutlich. Es kommt zu Ertragseinbußen von bis zu $2.5 \,\mathrm{t\,ha^{-1}}$ TM v.a. im Norden Sachsens. In der mittleren Spalte sind die Differenzen der vollbewässerten Erträge YI der jeweiligen Zeiträume im Vergleich zum unbewässerten Ertrag Y in P1 visualisiert. Vollbewässerung wird hierbei definiert als Bewässerungsmenge, die 98% des maximal modellierten Ertrags YIm generiert, der aber nicht kleiner ist, als der Ertrag ohne Bewässerung: $YI = \max(Y, 0.98 YIm)$. Diese Konvention verhindert, dass jeweils der maximale Ertrag mit der maximalen Bewässerungsmenge der Vollbewässerung gleichgesetzt wird, was die Bewässerungsmengen deutlich überschätzen würde. Die zugehörigen Bewässerungsmengen werden in der rechten Spalte dazugestellt. In P1 kann der Ertrag durch Bewässerung nur minimal gesteigert werden. Das findet sich auch in der Bewässerungsmenge wieder, welche zumeist nur wenige $10 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{a}^{-1}$ beträgt. In P2 gibt es nur geringfügige Änderungen. Ab P3 wird eine zunehmende Ertragssteigerung durch Einsatz von Bewässerung erreicht. Erst in P4 werden signifikante Unterschiede in den Ertragsentwicklungen ohne bzw. mit Bewässerung deutlich. Durch den Einsatz von Bewässerung können die Erträge stabilisiert und sogar gesteigert werden. So kommt es zu Ertragszuwächsen von bis zu 2.5 tha⁻¹ TM gegenüber dem aktuellen Zeitraum und damit zu einer Wirkung der Bewässerung von bis zu 5 t ha⁻¹ TM. Die negative Seite der Vollbewässerung ist, dass flächendeckend



Abbildung 6.27: Schwankungsbreite des Medians der stochastischen Ertragsfunktion durch Variation von Kartoffelsorte, Boden und Klimadaten (Szenario, Globalmodell, Lauf des Globalmodells und Realisierung des Regionalmodells)

mehrere $100 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{a}^{-1}$ Bewässerungswasser eingesetzt werden müssten.

Die Strukturen von Ertrag und Bewässerungsmenge zeigen sichtbare Ähnlichkeiten. In P1 wird v.a. im nördlichen Teil und im Elbtal weniger Ertrag simuliert. Desgleichen finden sich dort die größeren Bewässerungsmengen. Auch in der Zukunft sind diese Regionen am stärksten von Ertragsminderung betroffen und zeigen hohe Bewässerungsmengen. Lediglich die Steigerungsmenge durch Einsatz von Bewässerung fällt nicht deutlich aus. Aus Abbildung 6.29 wird deutlich, dass auch der Sandanteil des je Rasterzelle häufigsten Bodens mit dieser räumlichen Struktur korreliert. Ein hoher Sandanteil bedingt leichtere Böden und ein geringeres Rückhaltevermögen. Daraus folgen die oben geschilderten Effekte.



Abbildung 6.28: Regionale Erträge der Kartoffel Agria (oben links), Ertragsunterschiede ohne Bewässerung zwischen Zeiträumen P1 und P2 bis P4 (linke Spalte ab der zweiten Zeile), Unterschiede der Erträge mit Vollbewässerung vs. ohne Bewässerung in allen Zeiträumen (mittlere Spalte) und Bewässerungsmengen bei Vollbewässerung (rechte Spalte)



Abbildung 6.29: Sandanteil des je Rasterzelle häufigsten Bodens

6.8.2 Wasserdargebot

Das Wasserdargebot kann entsprechend Abschnitt 5.6.3 berechnet werden (siehe Abb. 5.18). Vor allem im Westen Sachsens in der Region um Leipzig gibt es keine Wasserhaushaltsdaten aus KliWES, da dieses Gebiet massiv bergbaubeeinflusst ist (siehe Abb. 6.30). Die Zeiträume P1 und P2 unterscheiden sich kaum und zeigen flächendeckend Werte zwischen 30 und 90 mm a⁻¹. Mit P3 verringert sich das Wasserdargebot und in P4 kommt es zu massiven Einschränkungen desselben auf Werte zwischen 5 und 40 mm a⁻¹. Deutlich werden die Regionen mit größeren Oberflächenwasserspeichern durch die dunklere Färbung von kleinen Zellclustern. Es zeigt sich im gesamten Untersuchungsgebiet eine Abnahme des zu erwartenden Wasserdargebotes, wobei besonders der Nordosten Sachsens betroffen ist.

6.8.3 Gegenüberstellung von Wasserdargebot und -bedarf

Der Grad an Standortautarkie bzgl. Bewässerungswasser wird anhand der Kartoffel Agria mit den in Abschnitt 6.8.1 beschriebenen Erträgen in Abbildung 6.28 gezeigt. Zur übersichtlichen Darstellung werden einzelne Rasterzellen in Abbildung 6.31 herausgegriffen. Die Füllung der Kreise verdeutlicht, wieviel Prozent des für Vollbewässerung notwendigen Wassers aus der eigenen Rasterzelle kommt. Jeder der vier Kreise pro Rasterzelle steht für einen Zeitraum von P1 bis P4. Während im Süd- und Mittelteil Sachsens im aktuellen Klima (P1 und P2) das Wasser zu Vollbewässerung zu 100% vor Ort erschlossen werden könnte, gibt es im Norden Sachsens bereits unter aktuellen Klimabedingungen Engpässe. Im Zeitraum P3 kann auch im Mittelteil Sachsens nicht mehr der komplette Wasserbedarf vor Ort gefördert werden. Während P4 verschärft sich die Situation weiter. Zum einen wird durch die Pflanzen mehr Wasser konsumiert (vgl. Abb. 6.28), zum anderen steht weniger Wasser zur Verfügung.

Die Daten für die markierten Rasterzellen sind in Tabelle 6.12 zusammengestellt. Neben den Erträgen mit und ohne Bewässerung für jeweils einen Boden pro Rasterzelle sind die Bewässerungsmengen zur Vollbewässerung und die nach ober- und unterirdischen Komponenten aufgeteilten Wasserdargebote dargestellt. Aus Bewässerungswasser und Summe der Wasserdargebote ergibt sich die Standortautarkie. Die Grundwasserneubildung kann negativ werden, wenn die beteiligten Flächen grundwasserzehrend sind, beispielsweise durch hohe Verdunstungsraten (vgl. Schwarze et al., 2011, Kapitel 5.3.5). Die Veränderung des Wasserdargebotes findet ausschließlich über die Grundwasserneubildung statt. Das Oberflächenwasserdargebot



Abbildung 6.30: 50%des Wasserdargebotes aus der Summe von Grundwasserneubildung und Oberflächenwasser im Untersuchungsgebiet



Abbildung 6.31: Grad an Versorgungsautarkie für vollbewässerte Kartoffel (Agria) an nummerierten Einzelstandorten im Untersuchungsgebiet; jeweils 50 % Wassernutzung (Grundwasserneubildung und Oberflächenwasser)

gleicht unter zukünftigen Verhältnissen dem rezenten Dargebot. Die Verfügbarkeit von Oberflächenwasser ist mehr durch die Existenz von Stauanlagen als durch die Bildung von Oberflächenwasser begrenzt. Im Mittel sinkt der Ertrag von P1 zu P4 über die Zellen von 8.0 auf 7.2 t ha⁻¹ (Trockenmasse) ohne Bewässerung, steigt aber von 8.1 auf 9.3 t ha⁻¹. Das im Mittel genutzte Bewässerungswasser für Vollbewässerung steigt von 52 auf über 300 mm a⁻¹. Die Grundwasserneubildung sinkt erheblich. Durch diese zunehmende Diskrepanz von Wasserbedarf und Wasserdargebot wird die Standortautarkie erheblich verschlechtert (von 72 % auf 13 %).

6.8.4 Erträge weiterer Kulturen

In Anhang B.2 werden die bivariaten Dichtefunktionen aus Bewässerungswasser und Ertrag an allen untersuchten Rasterpixeln und Böden ausschließlich für die jeweilige Ertragssicherheit von 90 \% für verschiedene Kulturen abgebildet.

Bei Kartoffeln (Abb. B.1, B.2 und B.3) zeigt sich eine geringe Ertragsstabilisierung durch Bewässerung. Von P1 bis P3 steigt die Stabilisierung an. In P4 kommt es klimatisch bedingt zu großen Streuungen, wo die gleichen Tendenzen wie in P1 bis P3 zu sehen sind, allerdings wesentlich unschärfer. Dieses Verhalten zeigt sich bei allen Sorten und Klimaberandungen, kann also als robust angesehen werden.

Der Sortenunterschied (Abb. B.1) ist insbesondere in der absoluten Ertragsmenge zu sehen, weniger in der charakteristischen Struktur des dargestellten Auszugs der SCWPF. Verschiedene Realisierungen, Globalmodellläufe und Globalmodelle haben nur einen geringen Einfluss (Abb. B.2). Größer ist der Unterschied zwischen den Szenarien (A1B und E1, Abb. B.1 vs. B.3). In E1 kommt es zu größeren Unsicherheiten v.a. in P2 und P3. In P4 hingegen ist die Unsicherheit geringer, was auf die geringere Erwärmung in dem Szenario E1 (ca. 2K gegenüber > 4K in A1B) und den damit einhergehenden geringeren Verdunstungsanspruch zurückzuführen ist.

Mais als C4-Pflanze profitiert in der Pflanzenparametrisierung von der höheren Temperaturen in den Projektionen (Abb. B.4, B.5). Der generelle Ertrag wird höher. Auch hier gilt eine größere Ertragsschwankung in A1B als in E1. Gegenüber Bewässerung zeigt Mais in P1 bis P3 nur geringe Sensitivität. Erst in P4 wird der Niederschlag in der Vegetationsperiode so gering, dass auch Mais große Ertragssteigerungen mit Bewässerung zeigt.

Erbsen zeigen nur geringe Auswirkungen durch Bewässerung und sind weniger als andere Kulturen von Klimaschwankungen und -änderungen betroffen.

Winterweizen zeigt eine nur geringe Ertragsstabilisierung mit Bewässerung, gleich in welcher Periode er angebaut wird. Winterweizen wird im Herbst angebaut und hat dadurch eine sehr lange Vegetationsperiode. In dieser Zeit kommt es auch unter zukünftigen Verhältnissen zu genügend großer Auffeuchtung des Bodens. Damit kann der Verdunstungsanspruch von Weizen aus dem Bodenspeicher nachhaltig bedient werden.

Weißkohl reagiert auf Bewässerung mit einer Ertragsstabilisierung bereits unter rezentem Klima (P1). Fast im gesamten Untersuchungsgebiet können trockenheitsbedingte Ertragsreduktionen durch Bewässerung vermieden werden. In P4 hingegen kommt es zu einer sehr großen Ertragsunsicherheit (in A1B größer als in E1). Aber auch hier kann der Ertrag etwas stabilisiert werden.

Es gibt Unterschiede zwischen den Szenarien A1B und E1. Allerdings weisen die Phänomene die gleiche Richtung auf, was für eine Robustheit der Information bezüglich der Auswertungen spricht.

	P4	6	4	ဗု	6	-7	c,	-7	-19	9	×	54	2	72	9	73	-2	11	13
e in %	$\mathbf{P3}$	100	23	ŝ	79	x	22	21	2-	36	36	100	16	100	62	100	23	48	45
utarki	P2	100	100	16	100	86	33	35	10	100	32	100	24	100	100	100	100	67	71
A	P1	75	100	5 C	100	31	37	100	5	100	56	100	19	100	100	100	100	100	72
a^{-1}	P4	17	1	5	9	7	52	0	2	4	40	164	4	253	13	178	က	7	44
n mm	$\mathbf{P3}$	21	1	7	9	x	52	0	10	4	40	164	ŋ	253	13	178	က	7	45
JFW i	P2	21	1	9	9	9	52	0	10	4	40	164	ŋ	253	13	178	က	7	45
50 %0	$\mathbf{P1}$	19	1	9	9	9	52	0	10	4	40	164	ŋ	253	13	178	ŝ	2	45
$1a^{-1}$	P4	11	6	-15	25	-24	-41	-21	-70	11	-16	18	2	-23	ŋ	19	-10	33	ည
V in mn	$\mathbf{P3}$	33	28	-1	51	2	-14	26	-21	34	5	40	14	2	44	50	10	58	21
GWN	P2	46	45	9	69	17	0	45	1	51	20	50	21	19	66	69	25	83	37
50%	P1	40	39	-1	60	x	-1	41	ဂု	49	20	44	13	14	66	69	22	81	33
ma^{-1}	P4	308	261	336	324	318	342	315	324	260	289	339	351	321	276	270	315	312	309
g I in m	P3	45	129	192	72	123	174	120	159	105	124	78	123	93	90	35	55	126	108
serung	P2	0	0	75	60	27	159	128	105	0	188	72	108	87	69	0	0	126	71
Bewäs	$\mathbf{P1}$	62	39	117	6	48	138	23	120	45	105	18	93	0	0	0	20	27	52
a^{-1}	P4	9.4	10.4	8.6	9.3	9.5	8.4	7.2	8.8	9.8	10.1	9.2	7.6	9.0	9.7	10.2	10.0	10.4	9.3
in th	$\mathbf{P3}$	8.3	8.6	7.8	8.0	8.1	7.6	7.4	7.7	8.4	8.2	8.0	7.7	8.2	8.1	8.7	8.3	8.1	8.1
rag YI	P2	8.1	8.2	7.9	7.7	8.0	7.5	7.4	7.9	8.1	8.6	8.2	7.6	8.0	8.3	8.1	8.2	8.3	8.0
Ertı	$\mathbf{P1}$	8.0	8.1	8.0	8.0	8.0	7.8	7.5	8.0	7.9	8.1	8.3	7.8	8.4	8.5	8.2	8.3	8.3	8.1
a^{-1}	P4	7.9	9.0	6.7	6.9	6.8	5.7	5.9	5.5	9.1	8.5	6.3	5.4	6.8	8.5	8.7	7.3	8.3	7.2
in t h	P3	8.2	8.3	7.4	7.8	7.7	7.0	7.1	6.9	8.1	7.9	7.8	7.4	8.0	7.9	8.6	8.3	7.9	7.8
$\operatorname{rag} Y$	P2	8.1	8.2	7.7	7.6	7.9	7.0	7.2	7.5	8.1	8.3	8.1	7.3	8.0	8.2	8.1	8.2	8.1	7.9
Ert	$\mathbf{P1}$	8.0	8.1	7.7	7.9	7.9	7.4	7.5	7.6	7.9	8.0	8.3	7.7	8.4	8.5	8.2	8.3	8.2	8.0
	Zelle	1	2	3	4	5	9	2	×	6	10	11	12	13	14	15	16	17	Mittel

6.8.5 Wasserproduktivitäten

Im Abschnitt B.3 werden äquivalent zur Ertragsentwicklung verschiedener Kulturen (Abschnitt 6.8.4) die Wasserproduktivitäten visualisiert. Für die Wasserproduktivität (auch Wassernutzungseffizienz) gibt es mehrere Definitionsvorschläge. Hier wird die folgende Definition verwendet:

$$WP = \frac{TM}{ET_a} \qquad \text{in kg m}^{-3} \tag{6.1}$$

mit der Wasserproduktivität WP, der Trockenmasse des marktfähigen Ertrages TM und der aktuellen Evapotranspiration ET_a innerhalb der Vegetationszeit. Die Wasserproduktivität wird als bivariate Dichtefunktion über der Bewässerungsmenge eingeschätzt.

Für Kartoffeln sind die Wasserproduktivitäten aller Rasterzellen mit allen Böden in den Abbildungen B.6, B.7 und B.8 zusammengefasst. Die Wasserproduktivität liegt zumeist zwischen 2 und 2.5 kg m^{-3} . Zwischen den Sorten gibt es teilweise charakteristische Unterschiede. So gibt es bei Agria und Folva ein Maximum der Wasserproduktivität bei 100 bis 300 mm a^{-1} Bewässerung. Bei Triada sinkt die Wasserproduktivität bereits mit der ersten Bewässerungsgabe. Lediglich in P4 gibt es Standorte, an denen die Wasserproduktivität geringfügig ansteigt.

Bei Mais steigen die Erträge durch die projizierte Erwärmung an (Abb. B.9 und B.10). Da die Evapotranspiration sich nicht im gleichen Maße erhöht, kommt es zu einer steigenden Wasserproduktivität in der Zukunft. Mais zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Kartoffelsorten Agria und Folva. Es gibt ein Maximum bei einer Bewässerungsmenge von 100 bis 200 mm a⁻¹ und bei zunehmender Bewässerungsgabe sinkt die Wasserproduktivität wieder.

Erbsen und Winterweizen zeigen nur sehr geringe Abhängigkeiten der Wasserproduktivität vom Klima und von der Bewässerungsmenge. Das ist auf die kürzere Vegetationszeit, ergo einer schnelleren Entwicklungszeit, von Erbsen und Winterweizen zurückzuführen. Die kürzere Vegetationszeit bedingt geringere Evapotranspirationen. Ausgeglichen wird dieser Effekt durch den höheren Verdunstungsanspruch der Atmosphäre durch höhere Temperaturen.

Die Wasserproduktivität des Weißkohls zeigt ein anderes Verhalten. Bereits mit geringen Bewässerungsgaben sinkt die Wasserproduktivität. Durch Bewässerung steigt die Evapotranspiration über Weißkohl. Der Ertrag nimmt indes nicht zu. Beide Effekte führen zu einer sinkenden Wasserproduktivität. Lediglich in P4 kommt es zu Ertragssteigerungen, da die Verhältnisse teilweise sehr trocken sind und Bewässerung tatsächlich zu Ertragssteigerungen führt. Desweiteren sinkt die Wasserproduktivität in den Klimaprojektionen. Als Grund hierfür ist zu vermuten, dass Weißkohl bei höheren Temperaturen (bzw. trockenem Boden) die Spaltöffnungen zeitig schließt, um Wasserverluste über das Blatt zu reduzieren. Dies wurde auch bei den Messungen der stomatären Leitfähigkeit bestätigt, die stomatäre Leitfähigkeit wurde schon ab einer Saugspannung von 500 hPa stark reduziert. Dieser Effekt bedingt eine langsamere Entwicklung des Kohls, demzufolge eine längere Vegetationszeit. Über diese längere Zeit evapotranspiriert mehr Wasser und bei gleichem Ertrag sinkt die Wasserproduktivität.

6.9 Agrarökonomie

Das agrarökonomische Modell ermöglicht die Generierung unterschiedlicher Szenarien mit individueller Anpassung der Eingabeparameter. Im Folgenden werden Ergebnisse am Beispiel einer sächsischen Gemeinde (75 % Quantil, Zeitscheibe 2071-2100, Rohrtrommel mit Düsenwagen) präsentiert. In den Berechnungen wurden fünf verschiedene Kulturen (Kartoffel, Winterweizen, Weißkohl, Mais) berücksichtigt. Die CWPFs der verschiedenen Bodentypen und Kulturen sind in Abbildung 6.32 dargestellt, wobei jeweils eine Farbe einer Kultur entspricht. Die Variabilität und unterschiedlichen Anstiege der CWPFs einer Kultur spiegeln den Einfluss des Bodens im Hinblick auf das Ertragspotenzial wider. Einige Kulturen, wie Kartoffel und Kohl,



Abbildung 6.32: CWPFs verschiedener Kulturen einer Gemeinde, normiert, 75 % Quantil

reagieren deutlich sensitiver auf Bewässerung, weisen jedoch auch ohne Bewässerung starke Unterschiede im potentiellen Ertragsniveau auf.

Unter Berücksichtigung von Preisen und Kosten erfolgt die ökonomische Optimierung der Bewässerungsmenge, die in Abbildung 6.33 durch die Punkte visualisiert wird. In der Abbildung werden zwei Szenarien gegenübergestellt, links die Bewässerungsmengen bei unbeschränkter Wasserverfügbarkeit, rechts bei limitierter Wasserverfügbarkeit. Wie aus der Abbildung deutlich wird, variieren diese Bewässerungsmengen in Abhängigkeit des Bodens und der Kultur. Der Vergleich zeigt eine Reduzierung der Bewässerungsmenge in Abhängigkeit des Anstieges der CWPF. Das diskontinuierliche Verhalten zu Beginn der Bewässerung ergibt sich durch die Fixkosten, die bei einer langfristigen Betrachtung nur im Falle der Bewässerung eine Rolle spielen. In Abbildung 6.34 sind die aufsummierten Anbau- und Bewässerungsflächen in Abhängigkeit des Wasserpreises für das Szenario mit unbeschränkter Wasserverfügbarkeit dargestellt. Der optimale Anbauumfang von Weizen, Erbse und Kartoffel bleibt unbeeinflusst vom Wasserpreis. Dies liegt am fehlenden Bewässerungsbedarf (Weizen, Erbse) bzw. am hohen Deckungsbeitrag auch ohne Bewässerung (Kartoffel). Mit steigendem Wasserpreis sinkt die Anbaufläche von Kohl, während die von Mais steigt. Gleichzeitig sinken die nachgefragten Wassermengen für Kohl und Kartoffeln.

Selbst bei einer Verzehnfachung des Wasserpreises sinkt die bewässerte Fläche auf ein Drittel im Vergleich zu den niedrigen Wasserpreisen. Der Deckungsbetrag der Region sinkt um 10 %, (Abb. 6.35). Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Wasserpreis ein geeignetes Instrument darstellt um Wasser einzusparen. Die ökonomischen Beeinträchtigungen in diesem Beispiel sind jedoch vergleichsweise gering.



Abbildung 6.33: Deckungbeitragsfunktion ausgewählter CWPFs eines Gebietes mit Gewinnmaximum (Punkt), Berücksichtigung verschiedener Kulturen sowie der Bodenvariabilität, Vergleich bei unterschiedlichem Wasserdargebot



Abbildung 6.34: Anbaufläche (links) und bewässerte Fläche (rechts) eines Gebietes in Abhängigkeit des Wasserpreises, differenziert nach Kulturen

Beschränkungen des Modells

Das hier vorgestellte Modell verwendet eine komparativ-statischen Analyse. Dies ermöglicht den Vergleich zweier Zustände (Ist-Ziel), jedoch nicht der dazwischen liegenden Periode. Die zeitliche Auflösung basiert auf jährlichen Werten. Für detaillierter Aussagen wäre ein höhere zeitliche Auflösung der Wasserverfügbarkeit erforderlich. Mithilfe des Modells soll das Verhalten der Landwirte nachgebildet werden. Anders als in der Realität erfolgen die Entscheidungsprozesse im Modell unter Sicherheit. Die Einbindung weiterer Risikokomponenten würde die Modellqualität verbessern. Die Planung der Fruchtfolge erfolgt nicht ausschließlich unter ökonomischen Gesichtspunkten. In der Praxis beeinflussen auch die Verfügbarkeit von Arbeitskräften, Maschinen, Know-how und die Vermarktungsmöglichkeiten die Planung der optimalen Anbaustruktur.



Abbildung 6.35: Wassernachfrage (links) und Gesamtdeckungsbeitrag (rechts) eines Gebietes in Abhängigkeit des Wasserpreises, differenziert nach Kulturen



Abbildung 6.36: Ebenenauswahl im Entscheidungshilfesystem für unterschiedliche Akteure

6.10 Entscheidungshilfesystem

Auf Grund der unterschiedlichen Adressaten und den daraus folgenden unterschiedlichen verwendeten Modellen gliedert sich das Portal in zwei Ebenen. Die lokale Ebene richtet sich an Landwirte und operiert auf der Betriebsebene. Im regionalen Teil können Entscheidungsträger Berechnungen für eine größere Region durchführen. Abbildung 6.36 zeigt das Auswahlmenü in dem die beiden Ebenen ausgewählt werden können.

Das Design der Benutzeroberfläche ist an aktuelle Trends angelegt und soll die Nutzerfreundlichkeit in Form einer aus anderen Bereichen vertrauten Visualisierung und Bedienung erhöhen. Es handelt sich um ein an das single-long-page-webdesign angelehntes Layout in dem alle Inhalte auf einer Seite angezeigt werden. Sowohl die Berechnung der Prozessergebnisse als auch die Darstellung erfolgt mittels AJAX (Asynchronous JavaScript and XML) ohne Störung bzw. neu laden der angezeigten Gesamtseite. Abbildung 6.37 zeigt in der Gesamtansicht die regionale Ebene des Portals. Auf Grund der inhaltlichen Nutzung dieser Ebene gliedert sich die Benutzeroberfläche in folgende Bereiche:

- Kartendarstellung
- Parametereingabe
- Ergebnisausgabe

In der linken Sidebar befinden sich Links, die durch Anklicken die Seite an die entsprechende Stelle scrollen. Mittels eines Buttons läßt sich nach Parametereingabe die Berechnung starten. Einige dieser benötigten Parameter werden aus der Auswahl der Untersuchungsregion des Nutzers abgeleitet.

In dem, in Abbildung 6.37 dargestellten, Bereich der Kartendarstellung erfolgt sowohl eine Ausgabe als auch eine Eingabe von Informationen. Um sich einen Überblick zu relevanten Untersuchungsregionen zu machen, lassen sich im oberen Bereich Gefährdungs- bzw. Informationskarten anzeigen. Darunter fallen z.B. die unter Abbildung 6.12 erläuterten Niederschlagskarten. Aber auch die in Abbildung 6.38 dargestellten Karten, die eine Veränderung der Anzahl von Trockenperioden zeigen, können dargestellt werden. Mittels grafischer Auswahl wird die betrachtete Region ausgewählt. Die ausgewählten Gemeinden definieren hierbei die anzuwendenden SCWPFs und das in der Untersuchungsregion verfügbare Wasser.

Verfügbares Wasser

Die Information über das verfügbare Wasser wurde, wie im Abschnitt 5.6.3 beschrieben, im Projekt KLIWES-Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten der sächsischen Gewässer am Lehrstuhl für Hydrologie im Zuge der Untersuchung des sachsenweiten Wasserhaushalts ermittelt. Die Ergebnisse zu den Wasserhaushaltskomponenten Grundwasserneubildung und Oberflächenwasser wurden auf das in SAPHIR verwendete Raster umgerechnet. Wie in Abschnitt 6.10 beschrieben, erfolgt die Auswahl der Untersuchungsregion auf Gemeindeebene. Auf Grund der Überschneidung der Gemeindegrenzen mit den Grenzen der Klimazellen ist eine weitere Umrechnung nötig. Abbildung B.12 zeigt den Prozessablaufplan der Umrechnung des verfügbaren Wassers auf Gemeindeebene. Im Abschnitt Python erfolgt eine lineare Interpolation der Klimarasterzellen ohne Angabe zum verfügbaren Wasser. Einschränkend ist festzuhalten, dass diese Interpolation durchgeführt wurde um eine flächendeckende Prozessierung zu gewährleisten. Die Ergebnisse für diese Klimarasterzellen besitzen eine deutlich geringere Aussagekraft. Im Falle einer operative Nutzung ist eine erneute Betrachtung der Klimarasterzellen ohne Daten zum verfügbaren Wasser notwendig.

Szenariogenerierung

Abbildung B.13 zeigt den Eingabebereich der für die Szenariogenerierung benötigten Parameter. Eine Spalte steht hierbei für ein durch den Nutzer zu definierendes Szenario. Ausgewählt werden muss

- der Betrachtungszeitraum
- die Ertragssicherheit
- die Bewässerungsmethode
- der Wasserpreis



Abbildung 6.37: Gesamtübersicht des Clients



Abbildung 6.38: Mittlere Differenz der Anzahl von Trockenperioden von 2021-2050 (links) bzw. 2071-2100 (rechts) zu 1961-1990

- die durchschnittliche Schlaggröße
- der Anteil des potenziell verfügbaren Wassers

Im gezeigten Beispiel sind alle Parameter bis auf die Betrachtungszeiträume identisch. Da verschiedene Zeiträume ausgewählt wurden, erfolgt ein Vergleich vom Ist-Zustand mit der fernen Zukunft. Da der Nutzer frei in der Auswahl der Parameter ist, sind eine Vielzahl an Varianten möglich. So kann für den Ist-Zustand ein Vergleich von verschiedenen Bewässerungssystemen, Ertragssicherheiten oder Wasserpreisen gerechnet werden.

Kulturspezifische Parameter

Abbildung B.14 zeigt den Eingabebereich für die kulturspezifischen Parameter. Hierbei müssen die für die Berechnung relevanten Kulturen ausgewählt werden. Je Kultur ist die Eingabe des Erzeugerpreises und der maximale Anbauanteil erforderlich.

Tabellen

Abbildung B.16 zeigt die Ausgabe der Ergebnisse in tabellarischer Form. Wie die Eingabe erfolgt die Ausgabe der Ergebnisse zweispaltig den beiden Szenarien entsprechend. Für den Überblick des Nutzers erfolgt eine Zusammenfassung der Eingabeparameter. Daran anschließend werden je ausgewählter Gemeinde der Anbauumfang je Kultur sowie das nachgefragte Wasservolumen ausgegeben. Wurden z.B. drei Gemeinden ausgewählt, ergeben sich drei Ergebnisbereiche.

Diagramme

Abbildung B.15 zeigt die Ausgabe der Ergebnisse als Diagramme. Analog zu der zweispaltigen Eingabe der beiden Szenarien und der zweispaltigen tabellarischen Ausgabe werden die Diagramme je ausgewählter Gemeinde und je Szenario dargestellt. Je Gemeinde und Szenario werden zum aktuellen Stand zwei Diagramme ausgegeben. Das Linke stellt die Anteile bepflanzter Fläche je Kultur und unbebauter Fläche dar und das Rechte die Anteile bewässerte zu unbewässerte Fläche je Kultur auf bepflanzter Fläche je Kultur. Zwischen den Szenarien fallen die deutlichen Unterschiede zwischen den jeweils rechten Diagrammen auf. Auf Grund des projizierten Klimas in der Periode 2071-2100 steigt die Bewässerungswürdigkeit. Infolge dessen steigt die bewässerte Fläche innerhalb der Kulturen die in der Periode 1991-2020 bereits zu sehr geringen Anteilen bewässert wurden.

6.10.1 Restriktionen

Die vorgestellten beispielhaften Szenarien basieren auf plausiblen Parametern. Die Berechnung eines konkreten Untersuchungsraums erfordert allerdings zusätzliches Wissen über:

- die reale Anbaustruktur
- den realen Anbauumfang
- Risikokomponenten
- die Erzeugerpreise

Fazit und Ausblick

Validierung des Prototypen

Während der Testphase des prototypischen Entscheidungshilfesystems zeigte sich, dass die in Kapitel 5.7.3 beschriebene Extremwertbetrachtung aus Clientsicht sehr rechen- und zeitintensiv ist. Für einen operationellen Betrieb ist vom aktuellen Standpunkt aus ein Jobbetrieb erforderlich.

Regionale Ebene

Entscheidungsträgern, als Adressaten der regionalen Ebene des Entscheidungshilfesystems, steht die Möglichkeit einer Gefährdungsanalyse mittels der Niederschlags- und Trockenperiodenprojektionen zur Verfügung. Eine Evaluation von potentiellen Bewässerungsmaßnahmen ist aufgrund des verwendeten Klimarasters räumlich hochaufgelöst und integriert über die Randbedingungen Klima, Boden, Wasserverfügbarkeit und Kulturparameter möglich. Die in Form von Tabellen und Diagrammen dargestellten Ergebnisse stellen einen Teil der aus der Optimierung resultierenden Ergebnisse dar. Des Weiteren sind in dieser Ebene folgende Ausgaben möglich:

- unter den Bedingungen ohne Bewässerung, mit optimierter Bewässerung und unter Vollbewässerung
 - der reale Anbauumfang
 - Risikokomponenten
 - die Erzeugerpreise
- Zwischenergebnisse aus der Optimierung
- Wassernachfragekurven

Lokale Ebene

Analysen auf der lokalen Ebene bzw. Feldskala richten sich primär an Landwirte. Als Adressaten steht ihnen ein Service für die Planung von Bewässerungssystemen zur Verfügung. Wie in Kapitel 5.7.2 beschrieben, erfolgt eine mikroökonomische Analyse unter Berücksichtigung der lokalen Bedingungen vor Ort. Die Eingabe der in Abbildung 5.17 aufgeführten Parameter erfolgt analog zu der in Abbildung B.13 dargestellten Eingabe in der regionalen Ebene. Der



Abbildung 6.39: Gegenüberstellung zweier Bewässerungsmethoden für einen Standort. Links sind absolute Werte und rechts sind Verhältnisse dargestellt.

Nutzer wählt mit der Karte grafisch seinen Untersuchungsstandort aus. Mittels dieser Auswahl werden die lokalen Bedingungen des vorhanden Bodens und der Klimaprojektion berücksichtigt. Abbildung 6.39 zeigt als ein Ergebnis die Gegenüberstellung zweier Bewässerungsmethoden. Die Daten basieren auf einer Rechnung mit einer parametrisierten Erbse aus Pillnitz in der Gemeinde Kossa in Nordwestsachsen. Deutlich zu erkennen ist der gravierende Unterschied in den Fixkosten der Bewässerungsmethoden und der, bei gleichem Ertrag, daraus resultierende Unterschied im Mehrgewinn. Mit Hilfe dieser und weiterer Informationen wird der Landwirt in die Lage versetzt, Entscheidungen bezüglich der Planung seines Bewässerungssystems zu treffen.

6.11 Dokumentation der Ergebnisse

Journalbeitrag

- 1. Kloss, S., Grundmann, J., Seidel, S.J., Werisch, S., Trümmer, J., Schmidhalter, U. und Schütze, N. (2014) Investigation of deficit irrigation strategies combining SVAT-modeling, optimization and experiments. Environmental Earth Sciences, 72.
- 2. Kloss, S., Schütze, N., Schmidhalter, U. (2014): Evaluation of very high soil water tension threshold values in sensor-based deficit irrigation systems. Irrigation Drainage and Engineering 140 (9).
- 3. Seidel, S.J., Werisch, S., Barfus, K., Wagner, M., Schütze, N. und Laber, H. (2014) Evaluation of different irrigation scheduling strategies based on field experiments using a mechanistic crop growth model. Irrigation and Drainage. Special Issue.
- 4. Seidel, S.J., Schütze, N., Fahle, M. und Ruelle, P. (2014) Optimal irrigation scheduling and irrigation control to increase water productivity and profit in subsurface drip irrigated agriculture. Irrigation and Drainage.

Konferenzpaper

- 5. Seidel, S.J., Werisch, S., Barfus, K., Wagner, M., Schütze, N. und Laber, H. (2014) Evaluation of different irrigation scheduling strategies based on field experiments using a mechanistic crop growth model. 22st International Congress on Irrigation and Drainage and 65th IEC Meeting. 14-20.9.2014, Gwangju, Korea.
- Seidel, S.J. und Werisch, S. (2014) Dependence of the accuracy of crop growth model predictions on calibration procedure and data input. 22st International Congress on Irrigation and Drainage and 65th IEC Meeting. 14-20.9.2014, Gwangju, Korea.

Vorträge bei Konferenzen und Workshops

- 7. Griessbach, U., Stange, P. und Schütze, N. (2014) An economic-based estimation of irrigation water demand. Sustainable Irrigation and Drainage V Management, Technologies and Policies. 17.-19.6.2014, Poznan, Polen.
- 8. Griessbach, U. (2014) Economics of irrigation systems. 62nd UNEP/UNESCO/BMUB International Short Course on Water Management and Climate Change Adaptation for Developing and Emerging Countries (SC 62). 3.-26.9.2014, Dresden.
- 9. Röhm, P. (2014) Ein Entscheidungshilfesystem für die Bewässerungslandwirtschaft in Sachsen. BIOMET 2.-3.12.2014, Dresden.
- 10. Seidel, S.J., Werisch, S., Griessbach, U. und Schütze, N. (2014) From a comprehensively calibrated mechanistic crop model to field applications. ASA, CSSA & SSSA International Annual Meetings. 2.-5.11.2014, Long Beach, USA.
- 11. Wagner, M., Seidel, S. und Schütze N. (2014) Modellierung der Bewässerungslandwirtschaft im Feld- und Einzugsgebietsmaßstab unter veränderlichen klimatischen Randbedingungen in Sachsen. BIOMET 2.-3.12.2014, Dresden.
- Kloss, S., Seidel, S. J., Grundmann, J. und Schütze, N. (2012) Reliable estimation of soil tension threshold values for sensor-based control of deficit irrigation systems. IWRM Koblenz.
- 13. Schütze, N. et al. (2013) Demand driven decision support for efficient water resources allocation in irrigated agriculture. European Geosciences Union (EGU), 27.4.-2, 5.2014, Wien, Österreich.
- 14. Seidel, S.J. et al. (2013) Vorstellung des SAPHIR Projektes. Bewässerungsworkshop des Nationalkomitees der Bundesrepublik Deutschland (GECID) in der Internationalen Kommission für Be- und Entwässerung (ICID). 17.9.2013, Braunschweig.
- 15. Seidel, S.J. et al. (2013) SAPHIR Saxonian Platform for High Performance IRrigation. Bewässerungslandbau in Deutschland -Forschung trifft Anwendung. 24.-25.9.2013.
- 16. Seidel, S.J. et al. (2014) German irrigation project SAPHIR. 22st International Congress on Irrigation and Drainage and 65th IEC Meeting. 14.-20.9.2014, Gwangju, Korea.
- 17. Seidel, S.J., Werisch, S., Barfus, K., Wagner, M., Schütze, N. und Laber, H. (2014) How do current irrigation practices perform? Evaluation of different irrigation scheduling approaches based on experiments and crop model simulations. European Geosciences Union (EGU), 27.4.-2.5.2014, Wien, Österreich.

Poster bei Konferenzen und Workshops

- 18. Barfus, K., Wagner, M. und Schütze N. (2014) Evaluierung von Methoden zur Disaggregierung von Klimadaten auf Tagesbasis für Sachsen. BIOMET 2.-3.12.2014, Dresden.
- Seidel, S.J. und Werisch, S. (2014) Impact of data quality and quantity and the calibration procedure on crop growth model calibration. European Geosciences Union (EGU), 27.4.-2.5.2014, Wien, Österreich.
- Barfus, K., Wagner M. und Schütze N. (2013) Einfluss unterschiedlicher Methoden zur Lückenfüllung von Klimadatensätzen auf die Simulation landwirtschaftlicher Erträge mit einem SVAT-Modell. Deutsch-Österreichisch-Schweizerische Meteorologentagung 2013, 2.-6.9.2013, Innsbruck, Österreich.
- Barfus, K. (2013) Einfluss unterschiedlicher Methoden zur Lückenfüllung von Klimadatensätzen auf die Simulation landwirtschaftlicher Erträge mit einem SVAT-Modell. SAPHIR-Projektworkshop "Forschung trifft Anwendung", 24.-25.9.2013, Dresden.
- 22. Grießbach, U., Stange, P. und Schütze, N. (2014) Konzeption eines Entscheidungshilfesystems für die Bewässerung in der Landwirtschaft: Agrarökonomische Betrachtungen. In GEWISOLA, 17.-19.09.2014, Göttingen.
- Grießbach, U. (2013) Agrarökonomische Betrachtungsebenen. In Bewässerungslandbau in Deutschland. SAPHIR-Projektworkshop "Forschung trifft Anwendung", 24.-25.9.2013, Dresden.
- 24. Schütze, N., Grießbach, U., Röhm, P., Stange, P., Wagner, M., Seidel, J. S., Werisch, S., und Barfus, K. (2014) Demand driven decision support for efficient water resources allocation in irrigated agriculture. European Geosciences Union (EGU), 27.4.-2.5.2014, Wien, Österreich.

- 25. Röhm, P. (2013) Ein Entscheidungshilfesystem für die Bewässerungslandwirtschaft in Sachsen. Agit 2013, 3.-5.7.2013, Salzburg, Österreich.
- 26. Röhm, P. (2013) Entscheidungshilfesystem für Sachsen. SAPHIR-Projektworkshop "Forschung trifft Anwendung", 24.-25.9.2013, Dresden.

Dissertationen

27. Kloss, S. (2014) Simulation-Optimization of Sensor-based Deficit Irrigation Systems. Dissertation, Technische Universität Dresden.

Studentische Abschlussarbeiten – Betreuung durch Projektleiter

- 28. Augustin, M. (2012) Untersuchungen zur natürlichen Wasserproduktivität und Umsetzbarkeit einer Bewässerungslandwirtschaft am Beispiel der Region des Schwarzen Schöps. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- 29. Georgi, C. (2013) Untersuchungen zu Änderungen der Wasserproduktivität und zu einer möglichen Wasserumverteilung unter zukünftig zu erwartenden Klimata im Gebiet des Schwarzen Schöps. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- 30. Lorenz, T. (2013) Vergleich von Methoden zur Bestimmung von Trockenperioden unter veränderlichen Klimata. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden.
- 31. Krüger, K. (2014) Komplexe Biaskorrektur von Klimadaten in Sachsen und deren Sensitivität auf das Pflanzenwachstumsmodell Daisy. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.
- 32. Ebeling, P. (2014) Modellierung der Pillnitzer Bewässerungsversuche mit dem mechanistischen Modell Daisy und Vergleich mit Beobachtungswerten am Beispiel der Erbse. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden.
- 33. Neidhardt, L. (2014) Modellierung der Pillnitzer Bewässerungsversuche mit dem mechanistischen Modell Daisy und Vergleich mit Beobachtungswerten am Beispiel der Bohne. Bachelorarbeit, Technische Universität Dresden.
- 34. Wolf, M. (2014) Modellierung der Bewässerungs- und Sortenversuche in Pillnitz. Diplomarbeit, Technische Universität Dresden.

7 Nachhaltigkeit

7.1 Technologieentwicklung und -transfer

Die im Projekt SAPHIR entwickelten Technologien zur hocheffizienten Präzisionsbewässerung (Modellierung und Optimierung auf der Feldskala) wurden in Feldversuchen im Gemüsebau in Kooperation mit dem LfULG validiert und zeigten signifikante Verbesserungen im Ertrag und beim Wasserverbrauch. Dies führt zu einem erweiterten potentiellen Anwendungsspektrum der entwickelten Bewässerungstechnologie, da diese zuvor in Experimenten für Ackerfrüchte erfolgreich getestet wurde. Diese Projektergebnisse ebneten den Weg zu einer erfolgreichen Vorbereitung von neuen Kooperationsprojekten nach Ablauf der Förderperiode, die den Anwendungstransfer der entwickelten Bewässerungstechnologie zum Gegenstand haben. Für 2015 sind u.a. Anwendungsprojekte (in der Regel die Durchführung und Bewertung von gemeinsamen Bewässerungsexperimenten) mit dem LfULG Sachsen, der United Arab Emirates University in Al-Ain (Vereinigte Arabische Emirate), dem Ministry of Agriculture and Fisheries (Oman) und der TU München in Planung. Das Entscheidungssystem auf regionaler Ebene wird in der letzten Projektphase dem Sächsischen Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft vorgestellt werden und auf potentielle Einsatzmöglichkeiten geprüft. Ebenfalls Interesse besteht beim Ministry of Regional Municipalities & Water Resources im Oman, mit dem im September 2014 ein Transferprojekt vorbereitet wurde. Die Fortsetzung der Forschungstätigkeit am optimalen Bewässerungsmanagements und der Simulation komplexer Bewässerungssysteme wird an der Professur für Hydrologie erfolgen, die u.a. durch die erfolgreiche Durchführung des Projektes ein Alleinstellungsmerkmal auf diesem Forschungsgebiet in Deutschland erhalten hat. Dafür soll ein gemeinsames Forschungsprojekt zusammen mit dem Forschungszentrum Jülich und der Ben Gurion University of the Negev in Israel 2015 beantragt werden.

7.2 Persönliche Qualifikation der Mitarbeiter

Im Rahmen von SAPHIR fand eine weitere Qualifizierung der Nachwuchsforscher statt, indem zusätzliches Wissen über Bewässerungslandwirtschaft inklusive der Teilkomponenten Messung, Modellierung, Analyse und Darstellung vermittelt bzw. erarbeitet wurde. Da das Vorwissen der Wissenschaftler durch ihre unterschiedlichen Qualifikationen sowie die Aufgaben innerhalb des Projektes variierten, waren die Fortbildungsmaßnahmen auf die jeweiligen Mitarbeiter zurechtgeschnitten. Einen grundständigen Wissensaustausch garantierte dabei die Kommunikation innerhalb der interdisziplinär zusammengesetzten Forschergruppe.

Im folgenden werden exemplarisch von Nachwuchsforschern besuchte Fortbildungsveranstaltungen aufgezählt:

- Summerschool on Flow and Transport in Porous Media, Universität Heidelberg (Dr. Peter Stange)
- Comsol Workshop zum CFD-Modul, Berlin (Dr. Peter Stange)
- Matlab Workshop zur Parallelisierung, TU Dresden (Dr. Peter Stange)
- Workshop Individual Based Modelling, Vilnius (Dr. Peter Stange)

- Weiterbildungsmaßnahme Projektmanagement, TU Dresden (Dr. Peter Stange, Dr. Sabine Seidel)
- Weiterbildungsmaßnahme Erfolgreiches Schreiben eines Projektantrages (Dr. Sabine Seidel)
- Einführung in parallele Programmierung mit MPI, OpenMP und PETSc (Dr. Klemens Barfus)
- Einführung in die Programmiersprache Fortran (Dr. Sabine Seidel)

Im Rahmen der Aufgabenstellung erarbeiteten sich die einzelnen Gruppenmitglieder Kompetenzen oder bauten vorhandene Kompetenzen aus. Zum Teil nutzten Gruppenmitglieder im Rahmen des Projektes Modelle (wie z.B. das SVAT-Modell Daisy) zum ersten Mal und konnten so ihr Portfolio erweitern. Auch hier sei auf die folgende exemplarische Aufzählung erworbener und ausgebauter Softwarekompetenzen verwiesen:

- Comsol, Hydrus, muPhi, Distmesh, Root-Box, NASTRAN (Dr. Peter Stange)
- PHP, objektrelationale Datenbank PostgreSQL mit der Erweiterung PostGIS (Patric Röhm)
- Mapserver-Software GeoServer, CSS-Framework Bootstrap, JavaScript-Bibliothek Open-Layers, JavaScript-Bibliothek jQuery (Patric Röhm)
- Matlab (Ulrike Grießbach)
- SVAT-Modell Daisy (Dr. Klemens Barfus)
- SVAT-Modell Daisy, Matlab/Octave, Umgang mit Großrechnersystemen (Dr. Michael Wagner)

Dadurch erlangten und erweiterten die Mitarbeiter ihre Kenntnisse und Kompetenzen um z.B. Fragestellungen in den Bereichen Wurzel- und Bodenwasserhaushaltsmodellierung, Pflanzenmodellierung, inverse Parameterbestimmung in hochkomplexen Modellen sowie regionale agrarökonomische Zusammenhänge zu beantworten. Die Kenntnisse und Kompetenzen wurden verwendet, um im Rahmen des Projektes anfallende Fragestellung zu beantworten. Die von den Gruppenmitgliedern entwickelten Lösungsvorschläge wurden auf nationalen und internationalen Konferenzen vorgestellt sowie in wissenschaftlichen Zeitschriften publiziert (siehe Publikationen). Die damit einhergehende Außendarstellung sorgt für verbesserte Berufs- und Karrierechancen der Nachwuchsforscher im nationalen und internationalen Bereich.

Neben der Kompetenzerweiterung im Modell- und Softwarebereich wurden im Rahmen der Feldexperimente ebenso Kenntnisse und Fähigkeiten im Bereich der Messtechnik erweitert. Durch die Einbindung aller Teilnehmer in Aufbauten, Wartung und Abbau der unterschiedlichen Messeinrichtungen konnten auch Gruppenmitglieder, die bisher keine Erfahrung mit entsprechenden Instrumenten hatten, Basiskompetenzen erlangen.

Neben erworbenen technischen Fähigkeiten erfolgte die Qualifizierung der Mitarbeiter auch im Bereiche des Projektmanagements (Organisation und Dokumentation), was zum Teil durch oben beschriebene Maßnahmen unterstützt wurde. Weiterhin wurden von den Mitarbeitern Kontakte innerhalb des Forschungsbereiches als auch zu Institutionen und Behörden geschaffen, die für spätere Projekte sowie den weiteren Berufsweg der Mitarbeiter im Fachbereich Agrarhydrologie und Bewässerungslandwirtschaft hilfreich sein können. Ebenso wurde den Gruppenmitgliedern ein Überblick als auch detaillierte Einblicke in spezifische Forschungsfragen

dieses Forschungsbereiches ermöglicht, die zu neuen Projektideen einzelner Gruppenmitglieder führten.

Die oben beschriebenen Qualifikationsmaßnahmen führen dazu, dass die Nachwuchsforscher nach Projektabschluss verbesserte Chancen sowohl im Bereich der agrarhydrologischen Forschung als auch bei Institutionen und Behörden im nationalen und internationalen Bereich haben. Ebenso verbesserten sich die Chancen für den Schritt in die Selbständigkeit im Rahmen einer beratenden Tätigkeit sowie als Consultant.

A Anhang: Durchgeführte Arbeiten

Stochastische Ertragsfunktionen für Sachsen wurden über eine schwellenwertbasierte Simulation entwickelt. Es wurden stochastische Ertragsfunktionen im Untersuchungsgebiet für die jeweils maximal fünf häufigsten Böden berechnet für:

RCM	GCM	Szen.	GCM-Lauf	Realis.	Kultur
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Kartoffel Triada (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Kartoffel Folva (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Mais Pioneer
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Erbse (aus Pillnitz)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Weißkohl (aus Pillnitz)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Winterweizen (aus Freising)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Winterweizen (Standard)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	00	Sommergerste (aus Freising)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Kartoffel Triada (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Kartoffel Folva (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Mais Pioneer
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Erbse (aus Pillnitz)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Weißkohl (aus Pillnitz)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Winterweizen (aus Freising)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Winterweizen (Standard)
WEREX V	ECHAM5	E1	1	00	Sommergerste (aus Freising)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	66	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	1	99	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	2	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	ECHAM5	A1B	3	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	HadCM3C	A1B	1	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)
WEREX V	HadGEM2	A1B	1	00	Kartoffel Agria (angepasst an Sachsen)

Tabelle A.1: Durchgeführte regionale Simulationsrechnungen. RCM – regionales Klimamodell, GCM – globale Klimamodell, Szen. – Szenario, Realis. – Realisierung

B Anhang: Ergebnisse

B.1 Messexperimente

Tabelle B.1: Referenz und Abschwächung	des 3D-Sensors	zu jeder	Sondermessung	und	an je-
dem Messpunkt in Freising					

	Magatag		vol	l (obe	n)	vol	l (mitt	ig)	voll	(unte	en)	Ü	berga	ang		Rand	
	IV	lesstag	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max	MW	Min	Max
	1	16.07	160	131	171	114	36	140	111	54	180	124	37	154	156	125	165
	2	01.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	14.08	70	58	81	17	9	28	87	71	116	54	42	89	61	40	119
Referenz (mol / (m ² d))	4	28.08	130	73	151	121	118	126	124	37	139	132	123	139	99	34	147
	5	10.09	88	67	109	67	52	113	89	51	113	64	49	99	61	47	87
	6	24.09	96	93	101	97	92	101	81	65	88	104	98	108	101	94	106
	7	10.10	85	44	91	48	43	<mark>53</mark>	82	70	97	62	44	102	82	44	101
	1	16.07	0.42	0.14	0.78	0.37	0.15	1.04	0.17	0.08	0.44	0.24	0.02	0.91	0.18	0.05	0.77
	2	01.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	14.08	0.31	0.25	0.37	0.15	0.13	0.19	0.08	0.07	0.15	0.20	0.05	0.21	0.19	0.14	0.54
Mittelwert 3D oben (-)	4	28.08	0.29	0.10	0.93	0.29	0.03	1.13	0.04	0.02	0.34	0.21	0.04	1.02	0.13	0.15	0.54
	5	10.09	0.61	0.41	0.92	0.23	0.22	0.20	0.10	0.08	0.16	0.23	0.18	0.53	0.30	0.17	0.47
	6	24.09	0.50	0.11	1.20	0.18	0.06	0.55	0.14	0.04	0.93	0.14	0.06	0.79	0.19	0.08	0.76
	7	10.10	0.68	0.27	1.53	0.26	0.23	0.28	0.12	0.05	0.99	0.38	0.15	1.03	0.15	0.17	0.17
	1	16.07	0.03	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02
	2	01.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	14.08	0.03	0.02	0.04	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.03	0.03	0.01	0.04
Mittelwert 3D unten (-)	4	28.08	0.03	0.02	0.07	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.05	0.03	0.02	0.03
]	5	10.09	0.11	0.06	0.20	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.09	0.03	0.03	0.04	0.03	0.02	0.03
]	6	24.09	0.11	0.04	0.41	0.06	0.02	0.25	0.02	0.01	0.14	0.05	0.02	0.28	0.06	0.03	0.32
	7	10.10	0.20	0.08	0.59	0.04	0.03	0.06	0.01	0.01	0.02	0.05	0.03	0.22	0.06	0.04	0.07

B.2 Entwicklung der 90 % Ertragssicherheit im gesamten Untersuchungsgebiet

Die nachfolgenden Abbildungen B.1, B.2, B.3, B.4 und B.5 bilden die bivariaten Dichtefunktionen zwischen Bewässerungswasser und Ertrag an allen untersuchten Rasterpixeln und Böden nur für die jeweiligen Ertragssicherheiten von 90 % ab. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten liegen demzufolge bei 10 %. Geschätzt wurden die Dichtefunktionen mit Gauss-Kernels. In weißen Bereichen liegen keine oder sehr wenige Tupel. Die Anzahl an Tupeln steigt über gelb nach grün an. Dunkelgrüne Bereiche zeigen an, wo sich an vielen Standorten/Böden im Untersuchungsgebiet 90 % Ertragssicherheiten befinden.



Abbildung B.1: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung $_{00}$



Abbildung B.2: Kartoffelsorte Agria A1B in verschiedenen Realisierungen, Globalmodellläufen, Globalmodellen



Abbildung B.3: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung $_{00}$



Abbildung B.4: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00



Abbildung B.5: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00

B.3 Entwicklung der Wasserproduktivität bei 50 % Ertragssicherheit im gesamten Untersuchungsgebiet

Die nachfolgenden Abbildungen B.6, B.7, B.8, B.9 und B.10 zeigen die bivariaten Dichtefunktionen zwischen Wasserproduktivität und Bewässerungswasser an allen untersuchten Rasterpixeln und Böden nur für die jeweiligen Ertragssicherheiten von 50% ab. Geschützt wurden die Dichtefunktionen mit Gauss-Kernels. In weißen Bereichen liegen keine oder sehr wenige Tupel. Die Anzahl der Tupel steigt mit Blautönen an.



Abbildung B.6: Wasserproduktivität: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00



Abbildung B.7: Wasserproduktivität: Kartoffelsorte Agria A1B in verschiedenen Realisierungen, Globalmodellläufen, Globalmodellen



Abbildung B.8: Wasserproduktivität: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00



Abbildung B.9: Wasserproduktivität: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00



Abbildung B.10: Wasserproduktivität: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00

B.4 Entscheidungshilfesystem



Abbildung B.11: Clientbereich Karte mit Ein- und Ausgabefunktionen



Abbildung B.12: Prozessablaufplan räumliche Umrechnung verfügbares Wasser

Szenario	ge	ene	ra	tior	า								
Betrachtungs- zeitraum	196 ⁻ 199 ⁻ 202 ⁻ 207 ⁻	1-1990 1-2020 1-2050 1-2100				Betrach ze	tungs- itraum	196 ² 199 ² 202 ² 207 ²	1-1990 1-2020 1-2050 1-2100				
Ertragssicherheit [%]	95 10	90 5	75	50	25	Ertrags	sicherheit [%]	95 10	90 5	75	50	25	
Bewässerungs- system	Einz Düs L	elregne enwage Linear Kreis	en			Bewäss s	erungs- system	Einz Düse L	celregn enwag inear Kreis	er en			
Instrumente	Tropf Wasserpreis [€/m³] 0.025			Instru	mente	0.0	Tropf Wasse 025	erpreis	[€/m³]				
Ø Schlaggröße [ha]	20		Ť			Ø Schlagg	größe [ha]	20		×			
GWN-Anteil OFWco-Anteil	0.3 0.3	}	× ×			GWN-Ant	eil nteil	0.3		×			

rati 0

Abbildung B.13: Parametereingabe für die Szenariogenerierung

Kulturen

Kartoffel		Mais	Weize	en	Weißko	bhl	Erbse
On	Off						
I	Erzeug	gerpreis [€/	t]:	14	5	*	
maxi	male /	Anbauantei [%	ile 6]:	25		*	

Abbildung B.14: Kulturspezifische Parametereingabe

Diagramme



Abbildung B.15: Ausgabe der Szenarioergebnisse nach der Prozessierung als Diagramme

Tabelle Szenario 1

Eingabegrößen

Zeitreihe	1991-2020
aktueller Wasserpreis	0.025 €/m³
durchschnittliche Schlaggröße	20 ha
Erzeugerpreis Kartoffel	145 [€/t]
Erzeugerpreis Mais	165 [€/t]
Erzeugerpreis Weizen	172 [€/t]
Erzeugerpreis Weißkohl	60 [€/t]
Erzeugerpreis Erbse	288 [€/t]

Gemeinde Meißen 14280240

Ausgabegrößen 204 ha Anbauumfang Kartoffel Anbauumfang Mais 0 ha Anbauumfang Weizen 204 ha Anbauumfang Weißkohl 204 ha Anbauumfang Erbse 204 ha 7846 m³ nachgefragtes Wasservolumen Kartoffel nachgefragtes Wasservolumen Mais 0 m³ nachgefragtes Wasservolumen Weizen 0 m³ 34612 m³ nachgefragtes Wasservolumen Weißkohl 0 m³

nachgefragtes Wasservolumen Erbse

Abbildung B.16: Tabellarische Ausgabe der Szenarioergebnisse nach der Prozessierung

Szenario 2

Eingabegrößen

Zeitreihe	2071-2100
aktueller Wasserpreis	0.025 €/m³
durchschnittliche Schlaggröße	20 ha
Erzeugerpreis Kartoffel	145 [€/t]
Erzeugerpreis Mais	165 [€/t]
Erzeugerpreis Weizen	172 [€/t]
Erzeugerpreis Weißkohl	60 [€/t]
Erzeugerpreis Erbse	288 [€/t]

Gemeinde Meißen 14280240

Ausgabegrößen	
Anbauumfang Kartoffel	203 ha
Anbauumfang Mais	50 ha
Anbauumfang Weizen	153 ha
Anbauumfang Weißkohl	203 ha
Anbauumfang Erbse	203 ha
nachgefragtes Wasservolumen Kartoffel	86809 m³
nachgefragtes Wasservolumen Mais	0 m³
nachgefragtes Wasservolumen Weizen	0 m³
nachgefragtes Wasservolumen Weißkohl	113188 m³
nachgefragtes Wasservolumen Erbse	0 m³

Abbildungsverzeichnis

0.1	Überblick der durchgeführten Arbeiten	iii
5.1	Experimenteller Aufbau der Bewässerungsversuche Freising 2013 mit Übersicht über untersuchte Treatments (Bewässerungsmengen), Einbautiefen (B, C, D) der Sensoren einschließlich ihrer Bezeichnungen, sowie Untersuchungszeitpunkte (DS0, 1, 2) der Wurzeln	15
5.2	Versuchsplan der Bewässerungsversuche für Freising 2014 mit Aufstellung der Treatments und Sonden sowie Angabe der Einbautiefe und des verwendeten Bodens	17
5.3	Standorte der Sondermessung mit (A) Container in der Vegetationshalle, (B) Container im Freiland und (C1, C2, C3) dem Feldbestand	18
5.4	Messanordnung der Sondermessung am Standort C für das vertikale Strahlungs- profil innerhalb des Bestandes (Punkte $(3, 1), (3, 2)$ und $(3, 3)$ mit deren alter- nativer Bezeichnung voll (unten), voll (mittig), voll (oben)) in Abhängigkeit der Bestandeshöhe <i>hc</i> sowie für das horizontale Profil (Punkt $(1, 2)$ - Rand des Fel- des, Punkt $(2, 2)$ - Übergangsbereich) inkl. dem Abstand zwischen den Punkten (1, 2), (2, 2) und $(3, 2)$ und die Reihenfolge der Durchführung des Messung an den einzelnen Punkten (blau)	19
5.5	a) schematische Darstellung des Messaufbaus in Brandis. $ET(t)$ bezeichnet die Evapotranspiration, $P(t)$ den Niederschlag, $I(t)$ die Bewässerung, $h(t)$ Pflan- zenhöhenentwicklung und $LAI(t)$ die Entwicklung des Blattflächenentwicklung. Zusätzlich wurden die Saugspannung ($\Psi(z,t)$) und der Wassergehalt ($\theta(z,t)$) in verschiedenen Höhen beobachtet. Abbildung b) zeigt die maßgeblichen Prozesse und deren Interaktionen die beim Pflanzenwachstum eine Rolle spielen und die folglich in prognostischen Modellen korrekt abgebildet werden müssen	20
5.6	Schematischer Versuchsaufbau in Pillnitz 2014 (die beiden südlichen Felder (oben) sind nicht vollständig zu sehen). Die beiden SMUL Felder wurden bereg- net, die vier Teilfelder TU Feld 1-4 tropfbewässert. Die gelben Quadrate mar- kieren die Messpunkte der Tensiometer. Blau beschrieben sind die Messtiefen und die Loggerbelegung.	23
5.7	Bodensaugspannung (Stundenmittelwerte) gemessen im Kohl. Die automatische Tropfbewässerung (rote Balken) fand bei -250 hPa statt (TU Feld 1)	25
5.8	Durchgeführte Messungen am Beispiel des Kohls. Blattflächenindex (LAI) , Pflan- zenhöhen (H) , stomatäre Leitfähigkeit (gs) , der Blatt-N-Gehalt (N_l) , Biomas- seaufwuchs (Blatt-, Frucht,- und Stielanteil (B_l, B_h, B_s)), Erträge (B_h) sowie	
	Bodensaugspannungen in drei Bodentiefen $(h(z,t))$	26
5.9	Berechnungsgitter einer auf L-Systemen basierenden Wurzel	27

5.10	Schematischer Aufbau des Daisy Modells zur Modellierung der Bewässerungs- versuche auf den Lysimetern. Die farbigen Feldern innerhalb der Säule stehen	
	draulische Eigenschaften berücksichtigt werden. Die Messtiefen sind durch blaue	
	Punkte gekennzeichnet. Rechts neben der Säule ist die räumliche Diskretisierung	
	des Modells dargestellt. Ebenso sind die untere Randbedingung (Sättigungsfluss Wasser tropft nur dann aus dem Lysimeter, wonn der Beden im untersten	
	Knoten gesättigt ist) und die oberen Randbedingungen dargestellt. $ET_{not}(t)$	
	bezeichnet die potentielle Evapotranspiration, $P(t)$ den Niederschlag und $I(t)$	
-	die Bewässerungsmengen.	28
5.11	Aufbau des Modells Daisy zur Modellierung des Pflanzenwachstums (aus Abra-	20
5.12	Ablaufschema der varianzbasierten Sensitivitätsanalyse (Siebertz et al., 2010)	29 33
5.13	Darstellung einer hypothetischen Pareto Front (dunkelgraue Punkte) die aus	
	dem Pareto-optimalen Subset aller Lösungen (helles grau) besteht. Die schwar-	
	zen Punkte sind eine Untermenge der Pareto-Front die einen akzeptablen Kom- promiss gwischen den beiden Kriterien Φ , und Φ , erzeugen. Zugötzlich eind die	
	Pareto-extremen Lösungen eingezeichnet (Grüntöne) und die Kompromisslösun-	
	gen $\overline{\Phi}_e$ und $\overline{\Phi}_d$. (Werisch et al., 2014)	33
5.14	Flowchart des verwendeten AMALGAM Algorithmus. Die Parameterkombina-	
	tionen einer anfänglich zufälligen Startpopulation werden im Model evaluiert.	
	den Schritten werden die Gewichte der einzelnen Suchstrategien entsprechend	
	ihrer Erfolgsrate angepasst. Nach Erreichen einer vorher vom Modellierer fest-	
	gelegten Anzahl an Modellevaluierungen wird die Pareto-Front ausgegeben. $\ . \ .$	34
5.15	Konstruktion von stochastischen Ertragsfunktionen; a) Wertepaare von Bewäs-	
	den Punkten abgeleitete Dichte mittels 2D-Kernel-Density-Smoothing: c) die	
	2D-Integration der Abbildung in b)	36
5.16	Sachsen mit $5 \ge 5 {\rm km}^2$ großen Rasterzellen mit $KWB < 200 {\rm mm}$ und den Fokus-	
5 17	gebieten Nordwest- und Ostsachsen	38
0.17	scher Ertragsfunktionen	39
5.18	Typische Rasterzelle mit Siedlungsgebiet (rot), Wald (grün) und Acker (gelb);	00
	verfügbares Wasser aus Grundwasserneubildung (Mitte) bzw. aus Oberflächen-	
5 10	wasser (rechts)	40
5.19	tung auf Feld- und Regionalskala	42
5.20	Kosten-, Erlös- und Gewinnfunktion mit Gewinnmaximum (blauer Punkt) bei	
	Defizitbewässerung	43
5.21	Links: Interpolation einer diskreten CWPF. Die monotone Interpolation verhin- dert ein überschwingen. Rechts: Vergleich verschiedener Quantile einer CWPF	49
5.22	Schematische Darstellung der Modellierung auf Feldskala als Basis für die Er-	43
	mittlung von Erlösen, Kosten und der sich daraus ergebenden Gewinnfunktion	45
5.23	Gewinnfunktionen multipler CWPFs (links) und die zugehörige aggregierte Was-	
5.94	Optimiorung am Boispiel gwoier (links) have multipler Extragsfunktionen unter	46
0.24	Berücksichtigung eines limitierten Wasserdargebotes (rechts)	47
5.25	IT-Architektur des Entscheidungshilfesystems	52

5.26	Client-Server-Architektur des Entscheidungshilfesystems	52
6.1	Wurzellängendichteverteilung für T1 (Bedarfsbewässerung) und T2 (Defizitbewässerung) zu Teilerntezeitpunkten $DS 0.5$ (vegetative Phase), $DS 1$ (Blüte) und $DS 2$ (Ernte)	54
6.2	Proportionale Wurzellängendichteverteilung für T1 (Bedarfsbewässerung) und T2 (Defizitbewässerung) zu Teilerntezeitpunkten <i>DS</i> 0.5 (vegetative Phase), <i>DS</i> 1 (Blüte) und <i>DS</i> 2 (Ernte)	54
6.3	Mittelwert der Abschwächung des 3D-Sensors (oben) gegenüber der Referenz. Deutliche erkennbar sind die Unterschiede zwischen den Standorten C1 (Son- dermessung 1), C2 (Sondermessung 3) und C3 (Sondermessungen 5 bis 7)	57
6.4	Mittelwert der Abschwächung des 3D-Sensors (unten) gegenüber der Referenz. Hier sind ebenfalls die Unterschiede im Standort C3 (Sondermessung 5 bis 7) zu den restlichen Standorten deutlich zu erkennen	58
6.5	Evapotranspiration (ET) des Lysimeters 14-1 (oben) im Vergleich zum Lysime- tergesamtgewicht (M) beider Lysimeter und den dazugehörigen Ausflüssen (Q) . Die Flächen liegen transparent übereinander.	60
6.6	Verlauf der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit (K_s) mit der Tiefe für die beiden Lysimeter 14-1 (links) und 14-3 (rechts). Die Leitfähigkeiten wurden durch Analyse von Bodenproben ermittelt. Die blaue Linie zeigt dabei den Mit-	
	telwert zwischen der geringsten (grun) und hochsten Leitfahigkeit (rot) in einer Tiefe.	61
6.7	Beispiele für im Feld gemessene Retentionskurven und die entsprechend ange- passten MvG-Modelle zusammen mit den Parameterunsicherheiten.	62
6.8	Bodensaugspannung (Stundenmittelwerte) in unterschiedlichen Tiefen gemessen unter Kohl. Der Niederschlag ist in blau dargestellt. Die automatische Tropfbe- wässerung (rote Balken) fand bei -250 hPa statt (TU Feld 1)	64
6.9	Gemessene (graue Punkte) und simulierte (blaue gestrichelte Linie) Bodensaug- spannungswerte auf etwa 30 cm Bodentiefe im Kohl (Variante Kc , 2014)	65
6.10	Gemessene (boxplots) und simulierte (Linie) Kohl Pflanzenhöhen der Variante SVAT 250 2014	65
6.11	Gemessene (boxplots) und simulierte (Linie) Kohl Blattflächenindizes (<i>LAI</i>) der Variante TU Feld (250 hPa) 2014	66
6.12	a) Mittlerer Niederschlag in Sachsen aus WEREX V (ECHAM5 A1B, Lauf 1, Realisierung 00) im Zeitraum P1 und Differenzen des mittleren Niederschlages für die Zeiträume P3 (b) bzw. P4 (c) gegenüber P1	67
6.13	oben: 3-Monats- <i>SPI</i> an 182 verschiedenen Niederschlagsstationen aus WETT- REG 2010, Szenario A1B, Realisierung 00; Mitte: gleitendes 30-Jahres-Fenster der Anzahl der Trockenheiten und unten: Länge der Trockenperioden im glei- tenden 30-Jahres-Fenster in Monaten; alle mit $SPI < -1.5$; in der Mitte und unten wird die Querverteilung über alle 182 Stationen dargestellt	69
6.14	Bivariate Dichtefunktionen für Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den Zukunftszeiträumen verglichen mit 1961-1990 getrennt für Winter (NDJF- MA) und Sommer (MJJASO) im Fokusgebiet Nordwestsachsen	70
6.15	Bivariate Dichtefunktionen für Temperatur- und Niederschlagsänderungen in den Zukunftszeiträumen verglichen mit 1961-1990 getrennt für Winter (NDJF- MA) und Sommer (MJJASO) im Fokusgebiet Ostsachsen	71

6.16	Links oben: Bodenwasserverteilung nach 24 stündigem Wurzelwasserentzug ei- ner Maispflanze sowie Evaporation ohne Bewässerung. Rechts: Bodenwasser- verteilung nach 26 stündigem Wurzelwasserentzug einer Maispflanze, Evapora- tion sowie zwei Stunden Tropfbewässerung am Ende der Simulationsperiode. Links unten: Bodenwasserverteilung nach 48 stündigem Wurzelwasserentzug ei-	
	ner Maispflanze, Evaporation sowie zwischenzeitlicher zweistündiger Tropfbe-	
0.1	wässerung	72
6.17	Bodenwasserverteilung der dreidimensionalen Simulation nach 48 Stunden (links)	79
6 1 9	Dzw. 120 Stunden (recnts)	73
0.10	direkte 2D-Simulation (rechts)	73
6.19	Saugspannung entlang einer zum Tropfer zentralen Schnittlinie nach 120 Stun-	10
0.10	den (links), Wurzelwasserentzug der gesamten Wurzel (rechts)	74
6.20	Makroskopisches Wurzelmodell (links), auf L-Systemen basierendes Wurzelm-	
	odell (rechts)	75
6.21	Finite-Elemente-Gitter zur Modellierung einer jungen Maiswurzel (links), Simu-	
	lationszwischenergebnis (rechts)	75
6.22	Zweidimensionaler Querschnitt des Root-Box Modells einer 60 Tage alten Mais-	
	wurzel (links), zugehörige Wurzeldichteverteilung (rechts)	76
6.23	Bodenfeuchte in Prozent nach zwölfstündigem Wurzelwasserentzug, makrosko-	
C 0 4	pisches Modell (links), auf L-System basierendes Dichtemodell (rechts)	77
6.24	Sensitivitat von Kartoffelparametern bei der Modellierung mit Daisy auf einem	77
6 25	Differenzen von Kartoffelerträgen zwischen Nichtbewässerung und Bewässerung	11
0.20	ab $\Psi = -1000 \mathrm{cm}$ sowie die zugehörigen Bewässerungsmengen: a) Ergebnisse für	
	alle Böden in einem Rasterpunkt nordöstlich von Leipzig und b) dito für einen	
	Rasterpunkt südöstlich von Dresden	78
6.26	Stochastische Ertragsfunktion für Kartoffel (Agria) in den Zeiträumen P1 bis	
	P4 im Fokusgebiet Nordwestsachsen	79
6.27	Schwankungsbreite des Medians der stochastischen Ertragsfunktion durch Va-	
	riation von Kartoffelsorte, Boden und Klimadaten (Szenario, Globalmodell, Lauf	
	des Globalmodells und Realisierung des Regionalmodells)	81
6.28	Regionale Ertrage der Kartoffel Agria (oben links), Ertragsunterschiede ohne	
	ten Zeile) Unterschiede der Erträge mit Vollbewässerung vs. ohne Bewässerung	
	in allen Zeiträumen (mittlere Spalte) und Bewässerungsmengen bei Vollbewäs-	
	serung (rechte Spalte)	82
6.29	Sandanteil des je Rasterzelle häufigsten Bodens	83
6.30	50% des Wasserdargebotes aus der Summe von Grundwasserneubildung und	
	Oberflächenwasser im Untersuchungsgebiet	84
6.31	Grad an Versorgungsautarkie für vollbewässerte Kartoffel (Agria) an numme-	
	rierten Einzelstandorten im Untersuchungsgebiet; jeweils 50 % Wassernutzung	
6.00	(Grundwasserneubildung und Oberflächenwasser)	84
6.32	UWPFs verschiedener Kulturen einer Gemeinde, normiert, 75 % Quantil	88
0.33	Deckungbeitragsfunktion ausgewahlter UWPFs eines Gebietes mit Gewinnma- vinum (Punkt) Berücksichtigung vorschiedener Kulturen sowie der Bedener	
	riabilität Vergleich bei unterschiedlichem Wasserdargebot	80
6.34	Anbaufläche (links) und bewässerte Fläche (rechts) eines Gebietes in Abhängig-	00
	keit des Wasserpreises, differenziert nach Kulturen	89

6.35	Wassernachfrage (links) und Gesamtdeckungsbeitrag (rechts) eines Gebietes in
	Abhängigkeit des Wasserpreises, differenziert nach Kulturen 90
6.36	Ebenenauswahl im Entscheidungshilfesystem für unterschiedliche Akteure $\ .\ .\ .\ 90$
6.37	Gesamtübersicht des Clients
6.38	Mittlere Differenz der Anzahl von Trockenperioden von 2021-2050 (links) bzw.
	2071-2100 (rechts) zu 1961-1990
6.39	Gegenüberstellung zweier Bewässerungsmethoden für einen Standort. Links sind
	absolute Werte und rechts sind Verhältnisse dargestellt
B.1	Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00106
B.2	Kartoffelsorte Agria A1B in verschiedenen Realisierungen, Globalmodellläufen,
	Globalmodellen
B.3	Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00 108
B.4	Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl A1B, ECHAM5,
	Lauf 1, Realisierung 00
B.5	Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weißkohl E1, ECHAM5,
	Lauf 1, Realisierung 00
B.6	Wasserproduktivität: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada A1B, ECHAM5,
	Lauf 1, Realisierung 00
B.7	Wasserproduktivität: Kartoffelsorte Agria A1B in verschiedenen Realisierungen,
	Globalmodellläufen, Globalmodellen \hdots
B.8	Wasserproduktivität: Kartoffelsorten Agria, Folva und Triada E1, ECHAM5,
	Lauf 1, Realisierung 00
B.9	Wasserproduktivität: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weiß-
	kohl A1B, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00
B.10	Wasserproduktivität: Mais, Erbse, Winterweizen, Winterweizen/Freising, Weiß-
	kohl E1, ECHAM5, Lauf 1, Realisierung 00 115
B.11	Clientbereich Karte mit Ein- und Ausgabefunktionen
B.12	Prozessablaufplan räumliche Umrechnung verfügbares Wasser
B.13	Parametereingabe für die Szenariogenerierung
B.14	Kulturspezifische Parametereingabe 117
B.15	Ausgabe der Szenarioergebnisse nach der Prozessierung als Diagramme 118
B.16	Tabellarische Ausgabe der Szenarioergebnisse nach der Prozessierung 118

Tabellenverzeichnis

$5.1 \\ 5.2 \\ 5.3$	Kontrolltiefen und Bewässerungsschwellenwerte für die Bewässerungsexperimente. Schwellenwerte zur Bewässerung in Pillnitz 2014	21 24 37
$6.1 \\ 6.2$	Übersicht der Ergebnisse der Bewässerungsversuche in der Vegetationshalle 2013 Übersicht der Ergebnisse der Bewässerungsversuche 2014	$53 \\ 55$
$6.3 \\ 6.4$	Referenz und Abschwächung des 3D-Sensors (Mittelwert über alle vollen Messtage) Referenz Wetterstation und Abschwächung des 3D-Sensors (Mittelwert über alle	56
6.5	vollen Messtage)	56
	und Feuchtmasse FM) in tha ⁻¹ , Bewässerungsmenge I in mm und Wasserpro- duktivität WP in kg m ⁻³	63
6.6	Ergebnisse Kohl 2014. Beobachteter Marktertrag (ME , in Trockenmasse TM und Feuchtmasse FM) in tha ⁻¹ , Bewässerungsmenge I in mm und Wasserpro-	
6.7	duktivität WP in kg m ⁻³	63
6.8	TM und Feuchtmasse FM) und Aufwuchs $(A, in FM)$ in t/ha, Bewässerungs- menge I in mm und Wasserproduktivität WP in kg m ⁻³	64
	(ME) und Aufwuchs (A) in TM t/ha, Bewässerungsmenge I und Verluste ΣL in mm	66
6.9	Ergebnisse Kohl 2014. Simulierter (sim) und beobachteter (obs) Marktertrag (ME) und Aufwuchs (A) in TM t/ha, Bewässerungsmenge I und Verluste ΣL	
6.10	in mm	66 68
$\begin{array}{c} 6.11 \\ 6.12 \end{array}$	Wurzelwasserentzug in verschiedenen Dimensionalitäten \ldots Trockenmassen der Erträge ohne (Y) und mit (YI) Bewässerung; Bewässerungswasser für Vollbewässerung (I) ; 50 % Grunwasserneubildung (GWN); 50 % Oberflächenwasser (OFW) und Standortautarkie für die markierten Zellen aus	73
	Abbildung 6.31	86
A.1	Durchgeführte regionale Simulationsrechnungen. RCM – regionales Klimamodell, GCM – globale Klimamodell, Szen. – Szenario, Realis. – Realisierung	103
B.1	Referenz und Abschwächung des 3D-Sensors zu jeder Sondermessung und an jedem Messpunkt in Freising	105

Literaturverzeichnis

- ABRAHAMSEN, P.; HANSEN, S.: An Open Soil-Crop-Atmosphere Model. Environmental Modelling and Software 15 (2000), Nr. 3, S. 313–330
- BÁRDOSSY, A.: Introduction to Geostatistics. University of Stuttgart, Institute for Hydraulic Engineering and Water Resources Management, 1997
- BREGAGLIO, Simone ; DONATELLI, Marcello ; CONFALONIERI, Roberto ; ACUTIS, Marco ; OR-LANDINI, Simone: An integrated evaluation of thirteen modelling solutions for the generation of hourly values of air relative humidity. *Theoretical and Applied Climatology* 102 (2010), NOV, Nr. 3-4, S. 429–438
- DEB, K. ; PRATAP, A. ; AGARWAL, S. ; MEYARIVAN, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on 6 (2002), Nr. 2, S. 182–197
- DEBOOR, C.: A Practical Guide to Splines. Springer Verlag, 1978
- DIAMANTOPOULOS, E. ; DURNER, W.: Dynamic Nonequilibrium of Water Flow in Porous Media: A Review. Vadose Zone Journal 11(3) (2012)
- DVWK: Merkblatt 238/1996; Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), 1996
- EFSTRATIADIS, A.; KOUTSOYIANNIS, D.: One decade of multi-objective calibration approaches in hydrological modelling: a review. *Hydrological S* 55 (2010), S. 58 – 78
- ENGLISH, M.: Deficit irrigation: I. Analytical framework. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 116(3) (1990), S. 399–412
- GÖTTEL, H.: Einfluss der nichthydrostatischen Modellierung und der Niederschlagsverdriftung auf die Ergebnisse regionaler Klimamodellierung, MPI für Meteorologie, Dissertation, 2009
- GRAMM, M.: Bewässerung in Sachsen / Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, Heft 17. 2014. – Forschungsbericht
- GUPTA, Hoshin V.; SOROOSHIAN, Soroosh; YAPO, Patrice O.: Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable measures of information. Water Resources Research 34 (1998), Nr. 4, S. 751–763
- HAARIO, H.; SAKSMAN, E.; TAMMINEN, J.: An adaptive Metropolis algorithm. *Bernoulli* 7(2) (2001), S. 223 242
- HAD: *Hydrologischer Atlas von Deutschland*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2000
- HEINRICH, G.; GOBIET, A.: The future of dry and wet spells in Europe: a comprehensive study based on the ENSEMBLES regional climate models. *International Journal of Climatology* 32 (2012), S. 1951–1970

- JACOB, D. ; GÖTTEL, H. ; KOTLARSKI, S. ; LORENZ, P. ; SIECK, K.: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland / Umweltbundesamt. 2008. – Forschungsbericht
- KENNEDY, J.; EBERHARDT, R. C.; SHI, Y.: Swarm Intelligence. Morgan Kaufmann, 2001
- KOLBE, H.: Einflussfaktoren auf die Inhaltsstoffe der Kartoffel, Teil 1: Trockensubstanz und Stärke. *Kartoffelbau* 10 (1995), S. 404–411
- KRAUS, H.: Die Atmosphäre der Erde. Springer Verlag, 2004
- KRAUSSE, T. ; CULLMANN, J. ; SAILE, P. ; SCHMITZ, G. H.: Robust multi-objective calibration strategies - possibilities for improving flood forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16 (2012), S. 3579 – 3606
- KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: Ergebnisse regionaler Szenarienläufe für Deutschland mit der statistischen Methode WETTREG auf der Basis der SRES Szenarios A2 und B1 modelliert mit ECHAM5/MPI-OM / Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH, finanziert vom Climate Service Center. 2011. – Bericht
- KREIENKAMP, F. ; SPEKAT, A. ; ENKE, W.: The Weather Generator Used in the Empirical Statistical Downscaling Method, WETTREG. *atmosphere* 4 (2013), S. 169–197
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL): KTBL- Datensammlung Freilandbewässerung - Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. KTBL, 2013
- KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (KTBL): KTBL- Faustzahlen für die Landwirtschaft. KTBL, 2013
- LANDESAMT FÜR UMWELT, LANDWIRTSCHAFT UND GEOLOGIE (LFULG): Datenbank Planungsrichtwerte. 2013
- LEITNER, D. ; KLEPSCH, S. ; BODNER, G. ; SCHNEPF, A.: A dynamic root system growth model based on L-systems. *Plant and Soil* 332 (2010), Nr. 1, S. 177–192
- LINDEN, P. van der (Hrsg.); MITCHELL, J.F.B. (Hrsg.): *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project.* Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK, 2009
- MACNEAL, R. H.: NASTRAN Theoretical manual / NASA SP-221. 1970. Forschungsbericht
- MASSMANN, C. ; HOLZMANN, H.: Analysis of the behavior of a rainfall-runoff model using three global sensitivity analysis method evaluated at different temporal scales. *Journal of Hydrology* 475 (2012), S. 97 110
- MCKEE, T.B.; DOESKEN, N.J.; KLEIST, J.: The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Eighth Conference on Applied Climatology, 17-22 January, 1993, S. 179–184
- NAKICENOVIC, Nebojsa; SWART, Robert: Special report on emissions scenarios. Special Report on Emissions Scenarios, Edited by Nebojsa Nakicenovic and Robert Swart, pp. 612. ISBN 0521804930. Cambridge, UK: Cambridge University Press, July 2000. 1 (2000)
- OLSSON, J: Evaluation of a scaling cascade model for temporal rainfall disaggregation. HY-DROLOGY AND EARTH SYSTEM SCIENCES 2 (1998), MAR, Nr. 1, S. 19–30

- PALOSUO, T. ; KERSEBAUM, K.C. ; ANGULO, C. ; HLAVINKA, P. ; MORIONDO, M. ; OLESEN, J. E. ; PATIL, R. H. ; RUGET, F. ; RUMBAUR, C. ; TAKAC, J. ; TRNKA, M. ; BINDI, M. ; CALDAG, B. ; EWERT, F. ; FERRISE, R. ; MIRSCHEL, W. ; SAYLAN, L. ; SISKA, B. ; RÖTTER, R.: Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy* 35(3) (2011), S. 103–114
- PAPPENBERGER, F. ; BEVEN, K. ; RATTO, M. ; MATGEN, P.: Multi-method global sensitivity analysis of flood inundation models. *Advances in Water Resources* 31 (2008), S. 1 14
- PASCHOLD, P.-J. ; KLEBER, J. ; MAYER, N.: Geisenheimer Bewässerungssteuerung / Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. URL http://botanik. forschungsanstalt-geisenheim.de/uploads/media/kc_Werte_01.pdf. - Zugriffsdatum: 7. Februar 2014, 2010. - Forschungsbericht
- PASCHOLD, P.-J. ; KLEBER, J. ; MAYER, N.: Geisenheimer Bewässerungssteuerung – für Penman-Verdunstung / Forschungsanstalt Geisenheim - Fachgebiet Gemüsebau. URL http://www.hs-geisenheim.de/fileadmin/user_upload/Gemuesebau/ Geisenheimer_Steuerung/kc-Werte_PENMAN_2013.pdf. – Zugriffsdatum: 7. Februar 2014, 2010. – Forschungsbericht
- PERSSON, P.-O. ; STRANG, G.: A Simple Mesh Generator in MATLAB. SIAM Review 46 (2004), Nr. 2, S. 329–345
- RAKOVEC, O. ; HILL, M. C. ; CLARK, M. ; WEERTS, A. ; TEULING, A. ; UIJLENHOET, R.: Distributed Evaluation of Local Sensitivity Analysis (DELSA), with application to hydrologic models. *Water Resources Research* 50 (2014), S. 409 – 426
- REYNOLDS, W. D.; ELRICK, D. E.; DICK, W. A. (Hrsg.): Methods of Soil Analysis, Part 4: Physical Methods. Soil Science Society of America, Inc., Madison, Wisconsin, USA, 2002
- SALTELLI, A. ; ANNONI, P.: How to avoid perfunctory sensitivity analysis. Envrionmental Modelling & Software 25 (2010), S. 1508 – 1517
- SALTELLI, A. ; PANNONI, P. ; AZZINI, I. ; CAMPOLONGO, F. ; RATTO, M. ; TARANTOLA, S.: Variance based sensitivity analysis of model putput. Design and estimator for total sensitivity index. *Computer Physics Communications* 181 (2010), S. 259 – 270
- SALTELLI, A. ; RATTO, M. ; ANDRES, T. ; CAMPOLONGO, F. ; CARIBONI, J. ; GATELLI, D. ; SAISANA, M. ; TARANTOLA, S.: *Global Sensitivity Analysis: The Primer*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, England, 2008
- SALTELLI, A. ; TARANTOLA, S. ; CHAN, K. P. S.: A Quantitative Model-Independent Method for Global Sensitivity Analysis of Model Output. *Technometrics* 41 (1999), Nr. 1, S. 39 – 56
- SCHNEIDER, T: Analysis of incomplete climate data: Estimation of mean values and covariance matrices and imputation of missing values. *Journal of Climate* 14 (2001), Nr. 5, S. 853–871
- SCHÜTZE, N. ; DE PALY, M. ; SHAMIR, U.: Novel simulation-based algorithms for optimal openloop and closed-loop scheduling of deficit irrigation systems. *Journal of Hydroinformatics* 14.1 (2012), S. 136–151

- SCHWARZE, R. ; DRÖGE, W. ; HOFMANN, J. ; MALESKA, V. ; LÜNICH, K. ; SCHÖNFELD, M. ; SPITZER, S.: KliWES - Abschätzung der für Sachsen prognostizierten Klimaänderungen auf den Wasser- und Stoffhaushalt in den Einzugsgebieten sächsischer Gewässer. Teil 1: Wasserhaushalt, Kernkomponente / Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, Heft 44. 2011. – Forschungsbericht
- SCHWARZE, R. ; HAUFFE, C. ; BALDY, A. ; WINKLER, P. ; DRÖGE, W. ; WAGNER, M. ; RÖHM, P.: KliWES Klimawandel und Wasserhaushalt in Sachsen. Wasserhaushaltsberechnungen für den Ist-Zustand und verschiedene Klima- bzw. Landnutzungsszenarien / Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie des Freistaates Sachsen, Heft 32. 2014. – Forschungsbericht
- SEIDEL, S. J.; WERISCH, S.; BARFUS, K.; WAGNER, M.; SCHÜTZE, N.; LABER, H.: Evaluation of different irrigation scheduling strategies based on field experiments using a mechanistic crop growth model. *Irrigation and Drainage* (2014). – under review
- SELIM, M.H.; PACHEPSKY, Y.; RADCLIFFE, D.E.: Scaling Methods in Soil Physics. CRC Press, 2003
- SEMENOV, M ; BARROW, E: Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. *Climatic Change* 35 (1997), Nr. 4, S. 397–414
- SHARIF, Mohammed ; BURN, Donald H. ; HOFBAUER, Karen M.: Generation of Daily and Hourly Weather Variables for use in Climate Change Vulnerability Assessment. WATER RESOURCES MANAGEMENT 27 (2013), MAR, Nr. 5, S. 1533–1550
- SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S.: An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm. *Journal of Time Series Analysis* 3 (1982), Nr. 4, S. 253–264
- SIEBERTZ, K.; BEBBER, D. van; HOCHKIRCHEN, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments. Springer, Heidelberg, Berlin, 2010
- SOBOL: Sensitivity Analysis for Nonlinear Mathematical Models. Mathematical Modeling /& Computational Experiment 1 (1993), S. 407 – 414
- SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F. ; ENKE, W.: Neue Ergebnisse aus der regionalen Modellierung WEREX V. 10. KlimaTisch des LfULG, 2012
- STORN, Rainer ; PRICE, Kenneth: Differential Evolution: A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization 11 (1997), Nr. 4, S. 341–359
- VRUGT, J.; BRAAK, C. J. F. ter; DIKS, C. G. H.; ROBINSON, B. A.; HYMAN, J. M.; HIDGON, D.: Accelerating Markov Chain Monte Carlo Simulation by Differential Evolution with Self-Adaptive Randomizes Subspace Sampling. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation* 10 (2009), S. 271 – 288
- VRUGT, J.; GUPTA, H. V.; BASTIDAS, L. A.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S.: Effective and efficient algorithm for multiobjective optimization of hydrologic models. *Water Resources Research* 39 (2003)
- VRUGT, J.A.; ROBINSON, B.A.: Improved evolutionary optimization from genetically adaptive multimehtod search. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS) 104(3) (2007), S. 708 – 711

- WANDERS, N. ; LANEN, H.A.J. van ; LOON, A.F. van: Indicators for Drought Characterization on a global Scale / Wageningen University - Hydrology and Quantitative Water Management Group (WUR). 2010. – Technical Report No. 24
- WERISCH, S.; GRUNDMANN, J.; AL-DHUHLI, H.; ALGHARIBI, E.; LENNARTZ, F.: Multiobjective parameter estimation of hydraulic properties for a sandy soil in Oman. *Environmental Earth Sciences* 72 (2014), Nr. 12, S. 4935 – 4956
- WILKS, D.: Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Third Edition. International Geophysics Series Volume 100, 2011
- Wöhling, T.; Gayler, S.; Priesack, E.; Ingwersen, J.; Wizemann, H.-D.; Högy, P.; Cuntz, M.; Attinger, S.; Wulfmeyer, V.; Streck, T.: Multiresponse, multiobjective calibration as a diagnostic tool to compare accuracy and structural limitations of five coupled soil-plant models and CLM3.5. *Water Resources Research* 49 (2013), S. 1 – 22
- WÖHLING, T. ; GEIGES, A. ; NOWAK, W. ; GAYLER, S. ; HÖGY, P. ; WIZEMANN, H. D.: Towards optimizing experiments for maximum-conficence model selection between different soil-plant models. *Procedia Environmental Sciences* 19 (2013), S. 514 – 523
- WÖHLING, Thomas ; SAMANIEGO, Luis ; KUMAR, Rohini: Evaluating multiple performance criteria to calibrate the distributed hydrological model of the upper Neckar catchment. *Environmental Earth Sciences* 69 (2013), Nr. 2, S. 453–468
- ZWART, S. J. ; BASTIAANSSEN, W. G. M.: Review of Measured Crop Water Productivity Values for Irrigated Wheat, Rice, Cotton and Maize. Agricultural Water Management 69 (2004), Sep 15, Nr. 2, S. 115 – 133