

Martin Heckmann
Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde

Pflanzenbaulicher und
ökonomischer Vergleich des
Anbaurisikos verschiedener
Ackerbausysteme unter aktuellen
und zukünftigen Klimaszenarien



Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut

Kontakt:

Martin Heckmann
Almushof 2
36208 Wildeck

Die Schriftenreihe „Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut“ veröffentlicht Doktorarbeiten, die in enger Zusammenarbeit mit Universitäten an Instituten des Julius Kühn-Instituts entstanden sind oder herausragende eigenständige Arbeiten aus den Forschungsgebieten des JKI darstellen.

Der Vertrieb dieser Monographien erfolgt über den Buchhandel (Nachweis im Verzeichnis lieferbarer Bücher - VLB) und OPEN ACCESS im Internetangebot www.jki.bund.de Bereich Veröffentlichungen.

Wir unterstützen den offenen Zugang zu wissenschaftlichem Wissen.
Die Dissertationen aus dem Julius Kühn-Institut erscheinen daher OPEN ACCESS.
Alle Ausgaben stehen kostenfrei im Internet zur Verfügung:
<http://www.jki.bund.de> Bereich Veröffentlichungen

We advocate open access to scientific knowledge. Dissertations from the Julius Kühn-Institut are therefore published open access. All issues are available free of charge under <http://www.jki.bund.de> (see Publications).

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation
In der Deutschen Nationalbibliografie: detaillierte bibliografische
Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-95547-005-0

Herausgeber / Editor

Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Quedlinburg, Deutschland
Julius Kühn-Institut, Federal Research Centre for Cultivated Plants, Quedlinburg, Germany

© Julius Kühn-Institut, Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen sowie der genannten Universität, 2013.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersendung, des Nachdrucks, des Vortrages, der Entnahme von Abbildungen, der Funksendung, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

**Pflanzenbaulicher und ökonomischer Vergleich des Anbaurisikos
verschiedener Ackerbausysteme
unter aktuellen und zukünftigen Klimaszenarien**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Martin Heckmann

geboren am 20.07.1984
in Rotenburg a. d. Fulda

Göttingen, im September 2013

D7

1. Referent: Prof. Dr. Jörg Michael Greef

2. Referent: Prof. Dr. Ludwig Theuvsen

Tag der mündlichen Prüfung: 19.11.2013

Alle sagen immer, das geht nicht...

...und dann kam einer, der das nicht wusste und hat es einfach gemacht!

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungen.....	X
1. Einleitung.....	1
1.1. Ausgangssituation und Problemstellung	1
1.2. Zielsetzung	2
2. Anbausysteme und Ertragsmodellierung.....	3
2.1. Beschreibung der Anbausysteme	3
2.2. Standorte Braunschweig und Soest.....	5
2.3. Ertragsmodell „APSIM“	6
2.4. Parametrisierung des Bodens.....	7
2.5. Wetter und Klimaszenarien	9
2.6. Risikominimierung und Schwellenwerte von Extremwetter	10
2.7. Kalibrierung von APSIM	12
2.8. Validierung von APSIM und Erstellung von Ertragssimulationen.....	14
3. Ökonomische Betrachtung.....	16
3.1. Programm „Farmboss“	16
3.2. Grundannahmen zur Bewertung der Anbausysteme	16
3.3. Allgemeine Betriebsdaten	18
3.4. Arbeitserledigung und Maschinenausstattung.....	19
3.5. Erzeugerpreise Pflanzenproduktion	23
3.6. Direktkosten und Faktoransprüche Pflanze	24
4. Ergebnisse	27
4.1. Ergebnisse der Modellvalidierung	27
4.2. Ertragsmodellierung im Szenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig	30
4.3. Ertragsmodellierung im Szenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest	34
4.4. Pflanzenbauliches Anbaurisiko unter definierten Extremwetterereignissen.....	37
4.5. Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen am Standort Braunschweig.....	42
4.6. Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen am Standort Soest.....	49
4.7. Indifferenzpreise der angebauten Kulturen im Vergleich zu Winterweizen	57
4.8. Kalkulatorische Betriebszweigergebnisse am Standort Braunschweig	62
4.9. Kalkulatorische Betriebszweigergebnisse am Standort Soest.....	68

5.	Diskussion	73
5.1.	Stärken und Schwächen der Ertragsmodellierung in APSIM	73
5.2.	Aussagekraft von Klimaszenarien	76
5.3.	Bewertung klimatischer Einflüsse auf die zukünftigen Ertragserwartungen der angebauten Kulturen	80
5.4.	Bewertung des ökonomischen Erfolgs der Anbausysteme unter verschiedenen Preisszenarien	86
6.	Anpassungsempfehlung für ein optimiertes Ackerbausystem im Szenario „STAR-A1B“	90
7.	Zusammenfassung	97
8.	Literatur	100
9.	Anhang	A

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Winterweizen (n=40)	28
Abb. 2: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Wintergerste (n=26).....	28
Abb. 3: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Winterraps (n=30).....	29
Abb. 4: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Ackerbohne (n=27)	29
Abb. 5: Gegenüberstellung der Biomasseerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Silomais (n=26).....	29
Abb. 6: Gleitender Durchschnitt über einen 10-jährigen Zeitraum der Erträge ausgewählter Kulturen aus der Ertragsmodellierung mit dem Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig (1981-2050) (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	31
Abb. 7: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Kornerträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050	32
Abb. 8: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Silomaiserträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050	33
Abb. 9 Gleitender Durchschnitt über einen 10-jährigen Zeitraum der Erträge ausgewählter Kulturen aus der Ertragsmodellierung mit dem Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest (1981-2050) (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)	34
Abb. 10: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Kornerträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050	35
Abb. 11: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Silomaiserträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050	36
Abb. 12: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	43
Abb. 13: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	43
Abb. 14: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	44
Abb. 15: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	45
Abb. 16: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP) .	46

Abb. 17: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	47
Abb. 18: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	48
Abb. 19: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	49
Abb. 20: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	50
Abb. 21: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	51
Abb. 22: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	52
Abb. 23: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)	53
Abb. 24: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	54
Abb. 25: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	54
Abb. 26: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	55
Abb. 27: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)	56
Abb. 28: Graphische Darstellung der errechneten Indifferenzpreise für die am Standort Braunschweig angebauten Kulturen in den Modellbetrieben im Bezug zu Winterweizen inklusive einer farblich angepassten Regressionsgeraden zwischen den Eckpreisen aus dem Hoch- und Tiefpreisszenario	59
Abb. 29: Graphische Darstellung der errechneten Indifferenzpreise für die am Standort Soest angebauten Kulturen in den Modellbetrieben im Bezug zu Winterweizen inklusive einer farblich angepassten Regressionsgeraden zwischen den Eckpreisen aus dem Hoch- und Tiefpreisszenario	62
Abb. 30: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Hochpreisszenario, HP)	63
Abb. 31: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Hochpreisszenario, HP)	64

Abb. 32: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario, HP)	64
Abb. 33: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Tiefpreisszenario, TP)	66
Abb. 34: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Tiefpreisszenario, TP)	67
Abb. 35: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario, TP)	67
Abb. 36: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Hochpreisszenario, HP).....	69
Abb. 37: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Hochpreisszenario, HP).....	69
Abb. 38: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario, HP)	70
Abb. 39: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Tiefpreisszenario, TP)	71
Abb. 40: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Tiefpreisszenario, TP)	72
Abb. 41: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario, TP)	72
Abb. 42: Berechnung der Radiation Use Efficiency (RUE) von Winterweizen aus Ertragsdaten der Standorte Braunschweig und Soest (PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)	75
Abb. 43: Globale Klimaprognosen für den Zeitraum 2000 bis 2100 von unterschiedlichen Klimamodellen zum Anstieg der Lufttemperatur (links) und der Niederschlagsverteilung (rechts) unter den Emissionsszenarien A2 (oben) A1B (Mitte) und B1 (unten) im Vergleich (Solomon et al., 2007)	77
Abb. 44: Gleitender Durchschnitt über einen 30-jährigen Zeitraum der mittleren Monatsniederschläge im Monat August für den Standort Braunschweig nach den Prognosen der Klimaszenarien STAR, REMO, CLM und WETTREG im Emissionsszenario A1B (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	78
Abb. 45: Gleitender Durchschnitt über einen 30-jährigen Zeitraum der mittleren Monatsniederschläge im Monat November für den Standort Braunschweig nach den Prognosen der Klimaszenarien STAR, REMO, CLM und WETTREG im Emissionsszenario A1B (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	79
Abb. 46: Schadenaufwand Landwirtschaftliche Hagelversicherung 1980 – 2011 in Mio. Euro (Anonymus, 2012e)	83
Abb. 47: Ertragssteigerung von Silomais zwischen 1990 und 2012 für Gesamtdeutschland (eigene Darstellung nach Daten des Statistischen Bundesamtes und des AMI)	85

Abb. 48: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Temperatur Standort Braunschweig (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	A
Abb. 49: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Niederschlag Standort Braunschweig (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)	A
Abb. 50: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Temperatur Standort Soest (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	B
Abb. 51: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Niederschlag Standort Soest (Eigene Darstellung nach Daten des DWD).....	B

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Fruchtfolgen der Beispielbetriebe.....	5
Tab. 2: Standortbeschreibung Versuchsfläche Braunschweig	6
Tab. 3: Standortbeschreibung Versuchsfläche Soest.....	6
Tab. 4: Berechnung des AirDry Wertes nach Cresswell et al.	8
Tab. 5: Parameter für Evaporation in APSIM	8
Tab. 6: Auswahl an bedeutenden regionalen Klimamodellen für Europa	9
Tab. 7: Sensible Wachstumsphasen ausgewählter Kulturen in Braunschweig und Soest.....	11
Tab. 8: Schwellenwerte für Extremwetter ausgewählter Kulturen innerhalb der sensiblen Wachstumsmonate für die Standorte Braunschweig und Soest	12
Tab. 9: Berechnete Eingabeparameter für die RUE im Modell APSIM	13
Tab. 10: Verwendete Koeffizienten zur Berechnung der Transpirationseffizienz in APSIM.....	13
Tab. 11: Allgemeine Betriebsdaten für Modellrechnungen in Farmboss	18
Tab. 12: Prämien für Agrarumweltmaßnahmen	19
Tab. 13: Maschinenausstattung der Anbausysteme Marktfrucht und Futterbau konventionell	20
Tab. 14: Maschinenausstattung des Anbausystems Futterbau diversifiziert	21
Tab. 15: Festpreise für zugekaufte Arbeitsgänge durch Lohnunternehmer	21
Tab. 16: Arbeitsgänge zur Bestandesführung einzelner Kulturen	22
Tab. 17: Preisszenarien für Ernteprodukte	24
Tab. 18: Mengen und Preise für Saatgut der betrachteten Kulturen	25
Tab. 19: Angenommene Nährstoffpreise und Nährstoffausnutzung.....	25
Tab. 20: Nährstoffentzüge über das Ernteprodukt ausgewählter Kulturpflanzen.....	25
Tab. 21: Kosten für Pflanzenschutz in den Anbausystemen Marktfrucht, Futterbau konventionell und Futterbau diversifiziert.....	26
Tab. 22: Sonstige Direktkosten der pflanzlichen Produktion in M, V und O.....	26
Tab. 23: Statistische Auswertung der Prognosegenauigkeit von APSIM	27
Tab. 24: Zusammenfassung statistischer Kennzahlen zur Modellvalidierung von APSIM.....	30
Tab. 25: Kennzahlen der Regressionsanalyse modellierter Durchschnittserträge (10-jährig) im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig (1981-2050)	31
Tab. 26: Kennzahlen zur Analyse der Box-Plot-Diagramme aus Abb. 7 und Abb. 8	33
Tab. 27: Kennzahlen der Regressionsanalyse modellierter Durchschnittserträge (10-jährig) im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest (1981-2050)	35
Tab. 28: Kennzahlen zur Analyse der Box-Plot-Diagramme aus Abb. 10 und Abb. 11	37
Tab. 29: Anteil an Monaten mit extremer Hitze innerhalb der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Braunschweig.....	38
Tab. 30: Anteil an Monaten mit extremer Hitze innerhalb der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Soest	38

Tab. 31: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund extremer Hitzeperioden am Standort Braunschweig	39
Tab. 32: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund extremer Hitzeperioden am Standort Soest.....	39
Tab. 33: Anzahl an Monaten mit potentiellm Trockenstress und deren prozentuale Veränderung zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Braunschweig.	40
Tab. 34: Anzahl an Monaten mit potentiellm Trockenstress und deren prozentuale Veränderung zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Soest.....	40
Tab. 35: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund von Trockenstress am Standort Braunschweig.....	41
Tab. 36: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund von Trockenstress am Standort Soest	42
Tab. 37: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Braunschweig in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Hochpreisszenario, HP).....	58
Tab. 38: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Braunschweig in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Tiefpreisszenario, TP).....	59
Tab. 39: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Soest in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Hochpreisszenario, HP)	60
Tab. 40: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Soest in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Tiefpreisszenario, TP)	61
Tab. 41: Berechnung der RUE angebauter Kulturen aus dem Projekt „Optimierter Klimabetrieb“ ..	C
Tab. 42: Kulturspezifisch angepasste Parameter in APSIM.....	D
Tab. 43: Ermittelte Temperatursummen für APSIM	E
Tab. 44: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig im Zeitraum 1981 bis 2010.....	F
Tab. 45: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig im Zeitraum 2021 bis 2050.....	G
Tab. 46: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest im Zeitraum 1981 bis 2010.....	H
Tab. 47: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest im Zeitraum 2021 bis 2050.....	I
Tab. 48: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Hochpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	J
Tab. 49: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Hochpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	K
Tab. 50: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Tiefpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	K
Tab. 51: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Tiefpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	L
Tab. 52: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Hochpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	M

Tab. 53: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Hochpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	N
Tab. 54: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Tiefpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	N
Tab. 55: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Tiefpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050	O
Tab. 56: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Hochpreisszenario (HP))	P
Tab. 57: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario (HP))	Q
Tab. 58: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Tiefpreisszenario (TP))	S
Tab. 59: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario (TP))	T
Tab. 60: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Hochpreisszenario (HP))	V
Tab. 61: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario (HP))	W
Tab. 62: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Tiefpreisszenario (TP))	Y
Tab. 63: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario (TP))	Z

Abkürzungen

AB	Ackerbohne
AfA	Abschreibung für Abnutzung
AKh	Arbeitskraftstunde
AMI	Agrarmarkt Informations-Gesellschaft
APSIM	Agricultural Production Systems Simulator
APSRU	Agricultural Production Systems Research Unit
BD	Bulk Density
BÜK 50	Bodenübersichtskarte 1:50 000
BÜK 1000	Bodenübersichtskarte 1:1000 000
CMP	Common Modelling Protocol
CONA	Parameter aus APSIM für Second Stage Evaporation
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
DB	Deckungsbeitrag
DUL	Drained Upper Limit
DüV	Düngeverordnung
DWD	Deutscher Wetterdienst
EMZ	Ertragsmesszahl
FACE	Free Air Carbon Dioxide Enrichment
Farmboss	Farm-Betriebs-Optimierungs- und Simulations-Software
FB1	System „Futterbau konventionell“
FB2	System „Futterbau diversifiziert“
HP	Hochpreisszenario
IÖW	Institut für ökologische Wirtschaftsforschung ¹
KA 5	Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Auflage
LL15	Lower Limit 15 bar
LN	Landwirtschaftliche Nutzfläche

MB	System „Marktfrucht“
nFK	nutzbare Feldkapazität
N _{min}	Mineralischer Stickstoffgehalt im Boden
P1D	Relative verringerte Entwicklungsrate bei Verkürzung der Photoperiode um eine Stunde unterhalb des Optimums von 20 Stunden
P1V	Relative verringerte Entwicklungsrate für jeden Tag über einer maximalen Vernalisationsdauer von 50 Tagen
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PWP	Permanenter Welkepunkt
RUE	Radiation Use Efficiency
SAT	Saturated Water Content
SM	Silomais
SOILWAT	Soil Water Module in APSIM
TP	Tiefpreisszenario
TUE	Transpiration Use Efficiency
U	Parameter aus APSIM für First Stage Evaporation
UFOP	Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen
VPD	Vapour Pressure Deficit
WG	Wintergerste
WR	Winterraps
WW	Winterweizen
XML	Extensible Markup Language

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation und Problemstellung

In den Augen vieler Experten wird sich das Klima auf der Erde in den nächsten Jahrzehnten signifikant verändern (Eitzinger et al., 2009; Teixeira et al., 2013; Ye et al., 2013). Dies hat mit großer Wahrscheinlichkeit auch Auswirkungen auf die Produktion von Nahrungsmitteln und Energiepflanzen, wodurch die Anpassung an den Klimawandel als eine der größten Herausforderungen des nächsten Jahrhunderts angesehen werden kann (Schwerin, 2012). Einigkeit herrscht darüber, dass es zukünftig zu Veränderungen kommen wird. Über das Ausmaß und die Folgen eines klimatischen Wandels sind sich die Experten jedoch nach wie vor uneinig. Dies zeigt sich unter anderem an der Vielzahl von teils gegensätzlichen Klimamodellen (Anonymus, 2012b; Anonymus, 2013k), die in Abhängigkeit der getroffenen Annahmen und der betrachteten Region zu unterschiedlichen Zukunftsszenarien gelangen (Teixeira et al., 2013).

Gerade die Landwirtschaft wird aufgrund ihrer direkten Abhängigkeit von Wetter- und Witterungsereignissen besonders von den beschriebenen Klimaveränderungen betroffen sein. Sie gehört sowohl zu den Hauptleidtragenden durch ungünstige Witterungen und extremer Wetterlagen, als auch zu den Verursachern von Treibhausgasemissionen (Hillel und Rosenzweig, 2010). Einerseits ist von einem erhöhten Produktionsrisiko in Folge heftiger Extremwetterereignissen und einer Verschlechterung der witterungsbedingten Anbauverhältnisse auszugehen. Starke Niederschläge innerhalb kurzer Zeit oder lang andauernde Trockenphasen können zu Ertragseinbußen bis hin zum Totalausfall einer Kultur führen. Andererseits sind auch ertragssteigernde Einflüsse durch verlängerte Wachstumsperioden und höherer CO₂-Gehalte in der Atmosphäre denkbar (Eitzinger et al., 2009; Weigel und Manderscheid, 2012). Aus Sicht der Welternährung, der angehenden Energiewende und eines einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs stellt sich vor allem die Frage nach den konkreten Auswirkungen des Klimawandels auf das Anbaurisiko und die Ertragsstabilität der einzelnen Nutzpflanzen. Diese Faktoren bestimmen, wie viele Nahrungsmittel und pflanzliche Rohstoffe auf der Welt produziert werden können und stehen darüber hinaus in einem unmittelbaren Zusammenhang mit dem Unternehmenserfolg der landwirtschaftlichen Betriebe.

Trotz zahlreicher Prognosen und Anpassungsempfehlungen zum Anbau unterschiedlichster Kulturen weltweit gibt es derzeit kaum Studien mit quantifizierbaren Daten, die eine Aussage über die effektiven Auswirkungen des Klimawandels auf einen einzelnen Ackerbaubetrieb treffen (Bradshaw et al., 2004; Lee et al., 2011; Reynolds, 2010; Thierfelder et al., 2013). Gerade bei der Betrachtung langfristiger Zeitperioden mit großen Unsicherheiten über zukünftige Ereignisse stellen Modellrechnungen eine nützliche Entscheidungshilfe dar. Durch die Ertragsmodellierung können unterschiedliche Klimaszenarien und deren Bedeutung für die Ertragserwartungen landwirt-

schaftlicher Ackerkulturen in langjährige Simulationen ausgewertet und miteinander verglichen werden. Ohne aufwändige Feldversuche entstehen damit in relativ kurzer Zeit Aussagen zum Anbaurisiko und zum Gesamtertragspotential eines vorhandenen Anbausystems. Außerdem besteht die Möglichkeit, Schwachstellen eines solchen Systems aufzuzeigen und entsprechende Problemlösungen virtuell zu testen. In Verbindung mit einem betriebswirtschaftlichen Modell kann mit den Ergebnissen der Ertragsmodellierung in einem weiteren Schritt auch die ökonomische Situation in Abhängigkeit verschiedener Preis- und Klimaszenarien betrachtet werden. Wünschenswert wären daher computergestützte Rechenmodelle, die auf Basis vorher definierter Grundannahmen die Ertragsentwicklung der angebauten Kulturen innerhalb eines beliebigen Ackerbausystems vorhersagen und daraus eine ökonomische Betriebszweigabrechnung erstellen können. Im optimalen Fall würden diese Modelle auch Auswirkungen unterschiedlicher Managementmaßnahmen wie die Zusammenstellung der Fruchtfolge oder die Strategie der Bodenbearbeitung berücksichtigen.

1.2. Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit sollen daher drei virtuell konstruierte und konventionell wirtschaftende Modellbetriebe, die sich anhand ihrer Bodenbearbeitung, der Fruchtfolge und der Düngerstrategie unterscheiden, mit Blick auf die beschriebenen Fragestellungen analysiert werden. Die genaue Definition dieser Betriebe ist im Abschnitt 2.1 zu finden.

Im ersten Schritt werden anhand des Ertrags-Simulations-Modells „APSIM“ (Agricultural Production Systems Simulator) die Auswirkungen unterschiedlicher Klimaszenarien auf die Ertragsersparungen der Kulturen aus den Modellbetrieben analysiert. Die Kalibrierung von APSIM erfolgt mit Datensätzen aus Feldversuchen an den Standorten Braunschweig und Soest. Diese werden durch ergänzende Angaben aus der Literatur komplettiert. Die Auswahl der Standorte wurde bewusst getroffen, da sie sowohl eine Region mit hohen Niederschlägen (Soest), als auch eine Region mit geringen Niederschlägen (Braunschweig) repräsentieren. Zur Modellvalidierung werden weitere interne und externe Daten aus praktischen Feldversuchen verschiedener Einrichtungen und Testbetriebe verwendet (vgl. 2.8). Durch die Gegenüberstellung der Ertragsprognosen aus dem validierten Modell APSIM unter Berücksichtigung von Klimaszenarien können Rückschlüsse auf das Produktionsrisiko in den verschiedenen Anbausystemen gezogen und die Strategie mit der höchsten Ertragssicherheit bestimmt werden.

Zur Betrachtung des Unternehmenserfolges wird im zweiten Schritt eine ökonomische Analyse der Deckungsbeiträge und der kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse für die oben genannten Anbausysteme mit der „Farm Betriebs Optimierungs- und Simulations-Software“ (Farmboss)

durchgeführt. Als Grundlage dieser Berechnungen dienen die Ergebnisse der Ertragsmodellierung. Ähnlich wie bei dem beschriebenen Vergleich von Klimaszenarien in APSIM werden in Farmboss ein Hochpreis- und ein Tiefpreisszenario betrachtet (vgl. 3.1. bis 3.6). Dies erlaubt nicht nur die Beantwortung der Frage nach dem Verfahren mit dem höchsten Deckungsbeitrag bzw. kalkulatorischen Betriebszweigergebnis, sondern ebenfalls eine Aussage darüber, ob ein System unter bestimmten Voraussetzungen noch gewinnbringend ist und welche Preise mindestens am Markt erzielt werden müssen, damit die Produktionskosten gedeckt sind. Abschließend soll durch Beschreibung eines optimierten Ackerbausystems die Frage geklärt werden, welches der verglichenen Systeme aus Sicht eines landwirtschaftlichen Betriebsleiters die vorzüglichste Bewirtschaftungsform mit einem minimierten Anbaurisiko für aktuelle und zukünftige Klimaverhältnisse darstellt. Dabei ist auch eine Aufweichung starrer Systemgrenzen durch Kombination verschiedener Eigenschaften der Modellbetriebe denkbar.

2. Anbausysteme und Ertragsmodellierung

2.1. Beschreibung der Anbausysteme

Abgeleitet aus dem Projekt „Optimierter Klimabetrieb“ werden in der vorliegenden Arbeit drei unterschiedliche Anbausysteme miteinander verglichen, die sich einerseits in der Intensität der Bodenbearbeitung und andererseits in der Anzahl der angebauten Kulturen unterscheiden. Die einzelnen Systeme sind anhand praxisüblicher Annahmen virtuell konstruiert. Die Fruchtfolgen werden in Feldversuchen an zwei Standorten in Braunschweig und Soest (vgl. 2.2) abgebildet.

System „Marktfrucht“ (MB):

Der Marktfruchtbetrieb simuliert einen konventionellen Praxisbetrieb ohne Viehhaltung mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von 210 ha. Er besitzt eine relativ enge Fruchtfolge aus WR-WW-WW. Um pflanzenbauliche Nachteile solch einer engen Fruchtfolge wie beispielsweise einen erhöhten Krankheitsdruck durch zu kurze Anbaupausen oder Durchwuchs von vorangegangenen Kulturen zu minimieren, führt der Marktfruchtbetrieb eine intensive Bodenbearbeitung durch. Direkt nach der Ernte erfolgt auf allen Flächen eine generelle Stoppelbearbeitung mittels Scheibenegge, gefolgt von einer wendenden Bearbeitung mit einem Pflug vor der Aussaat. Einzig zwischen den Kulturen Winterraps und Winterweizen wird aufgrund der guten Bodengare nach Raps auf den Pflugeinsatz verzichtet und stattdessen eine zweite Stoppelbearbeitung mit einem Grubber durchgeführt. Die Saatbettbereitung und die Aussaat sind durch eine entsprechende Kombination aus Kreiselegge und Drillmaschine in einem Arbeitsgang zusammengefasst.

Die Düngung wird nach der N_{\min} -Methode (Anonymus, 2010a) standortangepasst und unter Annahme maximaler Erträge berechnet. Bei der Düngerform wird ausschließlich Mineraldünger angewendet. Darüber hinaus verbleiben alle Ernterückstände auf der Fläche. Die Erntegüter werden vermarktet und verlassen den Betrieb.

Um die Bestände gesund zu halten und krankheits- bzw. schädlingsbedingte Ertragsverluste so weit wie möglich auszuschließen, wird ein intensiver Pflanzenschutz aufgewandt, bei dem situationsbedingt sowohl protektive als auch kurative Maßnahmen vorgesehen und die Anwendung des kompletten Spektrums aller zugelassenen Mittel erlaubt sind. Aufgrund einer Vielzahl von witterungsbedingten Anforderungen an die Pflanzenschutzmaßnahmen können diese von Jahr zu Jahr variieren.

System „Futterbau konventionell“ (FB1):

Wie der Marktfruchtbetrieb besitzt auch das konventionelle Futterbausystem eine Nutzfläche von 210 Hektar. Es unterscheidet sich vom System Marktfrucht durch die Zusammensetzung der Fruchtfolge und die Intensität der Bodenbearbeitung. Das Primärziel der Produktion liegt hierbei auf der Rohstoffbereitstellung für einen möglichen Betriebszweig Tierhaltung oder Biogas. In der Theorie unterliegt der konventionelle Futterbaubetrieb dem Prinzip eines geschlossenen Nährstoffkreislaufes, in dem die erforderlichen Futtermittel und Gärsubstrate möglichst auf den betriebseigenen Flächen erzeugt werden. Dazu dient die Fruchtfolge WW-WG-SM.

Zusätzlich zu einer generellen Stoppelbearbeitung mittels Scheibenegge erfolgt zwischen den Kulturen Winterweizen und Wintergerste eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug. Die übrigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen beschränken sich auf eine konservierende Bodenbearbeitung mit einer Scheibenegge zur ersten und einem Grubber zur zweiten Stoppelbearbeitung.

Analog zu Marktfruchtssystem wird die Düngung ebenfalls nach der N_{\min} -Methode mit dem Ziel eines maximalen Ertragsniveaus durchgeführt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Systeme wird in der Modellierung die theoretisch anfallende Gülle aus der Tierhaltung oder der Biogasanlage nicht berücksichtigt und durch den Einsatz eines Mineraldüngeräquivalents ersetzt.

Gleichermaßen orientiert sich auch die Strategie des Pflanzschutzeinsatzes am Marktfruchtssystem, um das höchstmögliche Ertragspotential zu erreichen und externe Effekte, die nicht im Modell berücksichtigt werden, weitestgehend ausschließen zu können.

System „Futterbau diversifiziert“ (FB2):

Die Flächenausstattung und Zielsetzung des diversifizierten Futterbausystems baut auf dem konventionellen auf. Der Betrieb verfügt ebenfalls über 210 Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche, auf denen Futtermittel und Gärsubstrate erzeugt werden. Im Gegensatz zur konventionellen Vari-

ante arbeitet die diversifizierte jedoch mit einer weit aufgelockerten Fruchtfolge. Eine komplette Rotation dauert sieben Jahre (vgl. Tab. 1). In dieser Fruchtfolge sind mit der Ackerbohne zusätzlich eine Leguminose und mit dem Winterraps eine Blattfrucht enthalten. Somit wird der Anteil an Halmfrüchten reduziert und über die Leguminose zusätzlicher ein Teil der Stickstoffdüngung im System eingespart.

Darüber hinaus erfolgt die Bewirtschaftung in einer konsequenten Direktsaat ohne jede Bodenbearbeitung. Als flankierende Maßnahme werden die Flächen lediglich einmal im Jahr nach der Ernte gemulcht, um die Erntereste besser zu zerkleinern und die Strohrotte zu fördern. Die Düngungsstrategie richtet sich wie in den bereits genannten Systemen ebenfalls nach der N_{\min} -Methode unter der Prämisse eines maximalen Ertragsniveaus.

Tab. 1: Fruchtfolgen der Beispielbetriebe

Feld	Marktfrucht	Futterbau konventionell	Futterbau diversifiziert
1	WR	WW	WR
2	WW	WG	WW
3	WW	SM	SM
4			AB
5			WG
6			SM
7			WW

Aufgrund umfangreicher Praxiserfahrungen (Anonymus, 2012a; Reich et al., 2006) und Beobachtungen auf Versuchsflächen an den Standorten Braunschweig und Soest wird ein regelmäßiger Glyphosateinsatz im Vorfeld vor jeder Aussaat als Standardmaßnahme eingeplant, da dies als wesentlicher Bestandteil einer funktionierenden Direktsaat erscheint. Darüber hinaus wird wie in den Systemen Marktfrucht und Futterbau konventionell auch im diversifizierten Futterbausystem ein intensiver Pflanzenschutz Aufwand für maximale Ertragserwartungen eingesetzt.

2.2. Standorte Braunschweig und Soest

Die zur vorgestellten Arbeit gehörende Versuchsanlage in Braunschweig (52°16'N, 10°54'E) befindet sich auf einer arrondierten Fläche am Ortsausgang Salzdahlum in Richtung Mascherode. Auf dieser Fläche werden die in Tab. 1 dargestellten Fruchtfolgen auf 13 Großparzellen von je 48 m x 100 m im Praxisanbau abgebildet. Der Standort Braunschweig soll eine Region mit geringer (Standort Soest eine Region mit hoher) Niederschlagsintensität repräsentieren. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge pro Jahr liegt in Braunschweig mit 570 mm ca. 180 mm unter dem Wert der Soester Börde, der 750 mm pro Jahr beträgt.

Tab. 2: Standortbeschreibung Versuchsfläche Braunschweig

Naturraum:	Norddeutsches Tiefland
Höhenlage:	ca. 80 m ü. NN
Klima:	ca. 570 mm Niederschlag, Ø Jahrestemperatur 9,7 °C
Bodentyp:	Pseudogley-Parabraunerde / Pseudogley-Pelosol
Bodenart:	Mittel schluffiger Ton (TU4), 25-35 % Ton
Bonität:	Ackerzahl 51-56, T4V / T3DV
Eigenschaften:	Kurze Bearbeitungsfenster (Minutenboden), druckempfindlich, verschlammungsgefährdet, geringe bis mittlere Luft- und Wasserdurchlässigkeit (Anonymus, 2010d)

Nach der Bodenkundlichen Übersichtskarte im Maßstab 1:50 000 (BÜK 50) handelt es sich am Versuchsstandort Braunschweig um einen recht homogenen Ton-Verwitterungsboden (Anonymus, 2010d), der gelegentlich zu Staunässe neigt. Weitere Angaben sind Tab. 2 zu entnehmen. Demgegenüber befindet sich der Versuchsstandort Soest (51°57'N, 08°00'E) im Naturraum Soester Börde (Niederbörde) nahe dem Ort Merklingsen. Er zeichnet sich vor allem durch einen hohen Schluffgehalt von 70 Prozent und reichhaltige Niederschläge während der Vegetationszeit aus. Detaillierte Eigenschaften sind Tab. 3 zu entnehmen.

Tab. 3: Standortbeschreibung Versuchsfläche Soest

Naturraum:	Soester Börde
Höhenlage:	80 m ü. NN
Klima:	ca. 750 mm Niederschlag, Ø Jahrestemperatur 9,0 °C
Bodentyp:	Pseudogley-Parabraunerde
Bodenart:	Schluffiger bis sandiger Lehm (uL/sL), Schluffanteil ca. 70 %.
Bonität:	Bodenpunkte 70-75, Zustandsstufe L4 Lö
Eigenschaften:	Druckempfindlich, verschlammungsgefährdet, mittlere bis geringe Luft- und Wasserdurchlässigkeit (Cramer, 2006)

2.3. Ertragsmodell „APSIM“

APSIM wurde ursprünglich von der australischen Forschungsabteilung APSRU (Agricultural Production Systems Research Unit), einer gemeinschaftlichen Einrichtung der CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) und den Behörden des australischen Bundesstaates Queensland entwickelt. Es dient als Plattform für ein umfassendes Ertragsmodell und berücksichtigt eine Vielzahl von Wachstumseinflüssen, angefangen von klimatischen Bedingungen und den vorhandenen Bodenverhältnissen bis hin zu verschiedenen Managementmaßnahmen (Keating et al., 2003). APSIM ist eine konsequente Weiterentwicklung vorhergehender Simulationsmodelle wie CERES und PERFECT. Bedeutende Vorteile im Gegensatz zu seinen Vorgängern sind der modulare Aufbau und die offene Programmstruktur. Diese erlaubt es unterschiedlichen Benutzergruppen, selbstständig Module für spezielle Fragestellungen zu erstellen. Die neuen Mo-

dule werden über das Common Modelling Protocol (CMP) in die Programmstruktur eingebunden, das auf die systemübergreifende Transformationssprache XML (Extensible Markup Language) zurückgreift. Durch diesen modularen Aufbau besteht die Möglichkeit einer relativ einfachen Modellerweiterung ohne die Notwendigkeit einer kompletten Neuprogrammierung (Adam et al., 2012; Moore et al., 2007). In dieser Weise unterliegt APSIM einer ständigen Weiterentwicklung durch unabhängige Arbeitsgruppen weltweit.

Die Einsatzbereiche erstrecken sich von der allgemeinen Ertragsmodellierung ackerbaulich relevanter Kulturen bis hin zu speziellen Fragestellungen der Erosionsproblematik oder der Stickstoffauswaschung im Boden. In dieser Arbeit sollen die pflanzenbaulichen und ökonomischen Anbau Risiken verschiedener Ackerbausysteme miteinander verglichen werden. Somit liegt der Fokus des folgenden Teils schwerpunktmäßig auf der Ertragsmodellierung und den damit verbundenen sensitiven Wachstumsparametern der angebauten Kulturen.

2.4. Parametrisierung des Bodens

Eine der Hauptgrundlagen für das Pflanzenwachstum ist der Boden und die in ihm gespeicherte Feuchtigkeit. Er sichert die Versorgung der Pflanzen mit Wasser und Nährstoffen und stellt damit die Grundlage der Ertragsbildung dar.

In APSIM wird der Wasserhaushalt im Boden über das SOILWAT-Modul erfasst (Douglas-Mankin et al., 2010; Keating et al., 2003), in dem das Bodenwasser über die Penman-Monteith Wasserhaushaltsgleichung berechnet wird (Huth et al., 2009; Monteith, 1988; Probert et al., 1998). Die wichtigsten Einflussgrößen stammen aus den Vorgängermodellen CERES (Jones und Kiniry, 1986) und PERFECT (Littleboy et al., 1999a). Das pflanzenverfügbare Bodenwasser wird über die Summe des volumetrischen Wassergehalts in aufeinander folgenden Bodenschichten definiert. Dafür muss zunächst die Feldkapazität bzw. die nutzbare Feldkapazität (nFK) eines Bodens erfasst werden. Die dafür nötigen Parameter sind der permanente Welkepunkt bei 15 Bar Saugspannung (LL15), der Wassergehalt bei Feldkapazität (DUL), der Wassergehalt bei Sättigung des Bodens (SAT) und dessen Lagerungsdichte (BD). Hierbei ist die Trockenrohdichte und nicht die effektive Lagerungsdichte gemeint.

Darüber hinaus erfordert SOILWAT einen KS- und einen AirDry-Wert. KS steht für die gesättigte Wasserleitfähigkeit. Mit AirDry ist der Wassergehalt gemeint, bis zu dem der Boden maximal durch Evaporation ausgetrocknet werden kann. Er berechnet sich nach Cresswell et al. durch die in Tab. 4 dargestellten Formeln (Cresswell et al., 2009). Ist die Feldkapazität eines Bodens bekannt, kann der Wassergehalt über den Niederschlag, die Versickerung, die Wassernachlieferung durch kapillaren Aufstieg und die Verdunstung ermittelt werden. Die Wassernachlieferung durch

kapillaren Aufstieg ergibt sich aus der Korngrößenverteilung und der Mächtigkeit der Horizonte. Die Verdunstung setzt sich aus der Evaporation und der Transpiration zusammen.

Tab. 4: Berechnung des AirDry Wertes nach Cresswell et al.

Tiefe	AirDry (mm/mm)
0-15 cm	0,5 * LL15
15-30 cm	0,9 * LL15
> 30 cm	LL15

Die Evaporation ist vor allem bei der Aussaat von Bedeutung, wenn der Boden noch nicht durch Pflanzen bedeckt ist. Sie wird in APSIM durch die Parameter CONA und U ausgedrückt, welche sich aus dem Vorgängermodell PERFECT ableiten (Littleboy et al., 1999b). CONA ist dabei ein Faktor zur Berechnung der Second Stage Evaporation und U ein Faktor zur Berechnung der First Stage Evaporation (Dalgliesh et al., 2013). Littleboy et al. (1999a) schlagen folgende Werte in Abhängigkeit des Tongehaltes im Boden vor:

Tab. 5: Parameter für Evaporation in APSIM

Tongehalt (%)	CONA	U
10	3,50	6,75
20	3,75	8,50
30	4,00	9,00
40	4,00	9,50
50	4,00	9,00
60	3,75	8,25
70	3,50	7,50
80	3,50	7,00

Quelle: Littleboy et al., 1999a

Die Transpiration ist dann von Bedeutung, wenn der Boden durch lebende Pflanzenmasse bedeckt ist, also wenn sich die Bestände schließen. Je nach Kultur und Entwicklungsstadium werden dann unterschiedliche Mengen an Wasser über die Pflanzen verdunstet. In APSIM ist dies über Wassernutzungseffizienz (Transpiration Use Efficiency, TUE, vgl. 2.7) beschrieben (Ludwig et al., 2009; Sinclair et al., 1984).

In dieser Weise kalkuliert SOILWAT nach der „Cascading Layer“ Methode (Möller et al., 2004) eine Wasserbilanz für jede einzelne Bodenschicht. Die notwendigen Angaben für die im Modell betrachteten Böden können aus der Bodenkundlichen Kartieranleitung (KA 5) in der 5. Auflage (Sponagel et al., 2005) abgeleitet werden. Die dafür erforderlichen Standortbeschreibungen stammen je nach Verfügbarkeit aus der BÜK 50 oder aus der BÜK 1000 und wurden teilweise durch eigene Probennahmen und Bodenuntersuchungen der Bewirtschafter ergänzt.

2.5. Wetter und Klimaszenarien

Für die Ertragsmodellierung in APSIM werden die Parameter Globalstrahlung, maximale und minimale Tagestemperatur sowie Niederschlag jeweils in täglicher Auflösung benötigt (Asseng et al., 2000; Snow und Huth, 2004). An den Versuchsstandorten in Braunschweig und Soest konnten diese Daten von eigenen Wetterstationen abgerufen werden, die in unmittelbarer Nähe der Versuchsflächen installiert sind und eine maximale Datengüte für die Modellkalibrierung gewährleisten (vgl. 2.7.). Weitere Wetterdaten für die Validierung stammen von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die den Flächen der Testbetriebe am nächsten gelegen sind (Anonymus, 2013g).

Die bei den Ertragsprognosen verwendeten Klimaszenarien stammen ebenfalls aus der Datenbank des DWD. Wie aus Tab. 6 hervorgeht, existiert derzeit eine Vielzahl an Klimamodellen unterschiedlicher Herkunft, um klimatische Veränderungen vorherzusagen. Diese Modelle unterscheiden sich u.a. in ihrer geographischen Auflösung oder der grundlegenden Berechnungsmethode und weisen teils deutliche Abweichungen voneinander auf.

Tab. 6: Auswahl an bedeutenden regionalen Klimamodellen für Europa

Modell	Land	Auflösung	Berechnungsmethode
Arpege	Frankreich	50 - 70 km	-
CHRM	Schweiz	56 km	-
CLM	Deutschland	56 km	numerisch
HadRM	Großbritannien	50 km	-
HIRHAM	Dänemark	50 km	-
MRI_JMA	Japan	20 km	-
STAR	Deutschland	ca. 30 km	statistisch
PROMES	Spanien	50 km	-
RACMO	Niederlande	49 km	-
REMO	Deutschland	18 km	numerisch
RCAO	Schweden	50 km	-
WETTREG	Deutschland	ca. 30 km	statistisch

Quelle: Eigene Darstellung nach Daten des DWD (Anonymus, 2013g)

Aus über 20 Klimaszenarien, die vom DWD im Rahmen des EU-Projektes „ENSEMBLES“ (Hewitt, 2005) ausgewertet werden, wurden für die vorliegende Arbeit die vier für Deutschland relevanten Klimamodelle CLM, STAR, REMO und WETTREG unter der Annahme des mittleren Emissionsszenarios A1B des IPCC (Anonymus, 2012b) für die nähere Betrachtung ausgewählt. In einem Vergleich der realen Wetterdaten aus der zurück liegenden Klimaperiode 1981-2010 für die Standorte Braunschweig und Soest mit den Ergebnissen der gewählten Klimamodelle erweist sich das STAR-Szenario als zuverlässigste Option (Anhang, Abb. 48 bis Abb. 51). Sowohl beim Faktor Temperatur,

als auch beim Faktor Niederschlag lag die Modellierung von STAR sehr dicht bei den gemessenen Werten, wohingegen besonders die Szenarien CLM und REMO teils deutlich von den empirischen Daten abweichen. Die Prognosen aus dem WETTREG Szenario liegen demgegenüber etwas dichter an den Messwerten, reichen jedoch speziell beim Faktor Temperatur nicht an die Genauigkeit des STAR-Szenarios heran. Aus diesem Grund konzentrieren sich alle weiteren Betrachtungen der vorliegenden Arbeit weitestgehend auf das STAR-Szenario.

2.6. Risikominimierung und Schwellenwerte von Extremwetter

Eine Risikoanalyse bzw. Risikominimierung erfordert zunächst eine genaue Definition des Begriffs „Risiko“. Im Duden wird Risiko als „möglicher negativer Ausgang bei einer Unternehmung, mit dem Nachteile, Verlust, Schäden verbunden sind“, beschrieben (Anonymus, 2013i). Bezogen auf den Anbau landwirtschaftlicher Nutzpflanzen sind dies pflanzenbauliche bzw. ökonomische Erträge, die unterhalb der Erwartungen liegen. In Verbindung mit klimatischen Veränderungen bedeutet dies, einen Rückgang der durchschnittlichen Ernteerträge und damit verbunden der monetären Gewinnerwartungen eines Betriebes. Eine zunehmende Häufigkeit oder Intensität extremer Wetterlagen (Hitze, Trockenstress, etc.) im Rahmen des Klimawandels könnte zu größeren Ertragsschwankungen bis hin zum Totalausfall einzelner Kulturen führen und somit einen Abfall der langjährigen Durchschnittserträge hervorrufen. Durch eine Anpassung der Anbausysteme (vgl. 2.1) kann dieses Risiko minimiert werden.

Darüber hinaus bedarf es gewisser Indikatoren, an denen Extremwetter gemessen werden kann. Ausgehend von den Wetterdaten, die als Grundlage für die Ertragsmodellierung in APSIM dienen, sind die Parameter Temperatur und Niederschlag von essentieller Bedeutung. Diese Auswahl ermöglicht in einem weiteren Schritt die Festlegung von Schwellenwerten, ab wann und zu welchem Zeitpunkt negative Auswirkungen bei einer Kultur auftreten können.

Beim Faktor Temperatur kann dies zum einen durch extreme Frostperioden geschehen, bei denen die Kulturen erfrieren, oder durch Hitzeperioden, bei denen das Pflanzenwachstum eingestellt wird (Anonymus, 2012b; Kunreuther et al., 2013). Für die Temperaturen in den Wintermonaten prognostizieren alle vier Klimaszenarien einen steigenden Trend und folglich mildere Winter in Braunschweig und Soest. Dies deckt sich mit Aussagen aus der Literatur (Eitzinger et al., 2009; Orlandini et al., 2008), sodass nicht davon auszugehen ist, dass sich das Risiko für Frostschäden in Zukunft erhöht. Es steigt jedoch die Gefahr von Hitzeperioden während der Hauptvegetationszeit. Diese wirken sich, wie in der Literatur umfangreich beschrieben ist, besonders in den sensiblen Wachstumsphasen der Blüte und Kornfüllung aus (Dörfler und Hüffmeier, 1998; Geisler, 1988; Lütke Entrup und Oehmichen, 2006; Schönberger, 2011). Nach Auswertung der genannten Quel-

len erscheint ein Schwellenwert S_{temp} mit einer maximalen Tagestemperatur von 30 °C als geeigneter Indikator für Hitzestress. Ist dieser Schwellenwert in den sensiblen Wachstumsphasen an mindestens sieben Tagen überschritten, kann mit einer erhöhten Gefahr von Ertragseinbußen gerechnet werden. Die sensiblen Wachstumsphasen unterscheiden sich je nach Kultur, Sorte und Region und unterliegen geringfügigen Schwankungen von Anbaujahr zu Anbaujahr. Näherungsweise können diese jedoch für die Regionen Braunschweig und Soest, wie in Tab. 7 gezeigt, eingegrenzt werden.

Tab. 7: Sensible Wachstumsphasen ausgewählter Kulturen in Braunschweig und Soest

Kultur	Sensible Wachstumsphase
Wintergetreide	Mai-Juni
Winterraps	Mai-Juni
Ackerbohne	Juni-Juli
Silomais	Juli-August

In ähnlicher Weise kann auch ein Indikator für Trockenstress definiert werden. Aus verschiedenen Versuchen mit Lysimeterstationen sind die potentiellen Verdunstungsraten der betrachteten Kulturen bekannt (Ehlers und Goss, 2003; Roth et al., 2005). Unter der Annahme wassergesättigter Böden im Frühjahr und der Kenntnis der nFK eines Bodens lässt sich die Niederschlagsmenge berechnen, die eine Pflanze für ihren Maximalertrag benötigt. Der maximale Ertrag kann immer dann erreicht werden, wenn kein Mangel des Faktors Wasser vorliegt und die Möglichkeit einer vollen Ausschöpfung der potentiellen Verdunstungsraten zu jedem Zeitpunkt der Vegetation besteht. Demnach entsteht ein Risiko für Ertragsreduktionen, wenn die Differenz zwischen dem Wasservorrat im Boden und der über die potentielle Transpiration verdunsteten Wassermenge nicht durch den Niederschlag nachgeliefert wird. Darüber hinaus ist bekannt, dass Pflanzen ihre potentielle Verdunstungsrate nicht mehr erreichen, sobald die nFK unter 30 Prozent fällt (Lüttger et al., 2005). Somit ergibt sich ein kulturspezifischer Schwellenwert für die Niederschlagsmenge, ab der eine erhöhte Gefahr für Trockenstress besteht, durch folgende Formel:

$$„S_{rain} = nFK * 0,7 - \text{potentielle Wasserverdunstung in Zeitraum X}“$$

Durch Addition der kulturartspezifischen Schwellenwerte aus den einzelnen Monaten der sensiblen Wachstumsphasen berechnet sich der Schwellenwert S_{rain} , der eine untere Niederschlagsgrenze darstellt. Ab diesem Wert steigen das Risiko einer Unterschreitung der potenziellen Verdunstungsrate und die Gefahr von auftretendem Trockenstress. Die in dieser Weise ermittelten Schwellenwerte der betrachteten Kulturen sind in Tab. 8 nach Standorten gegliedert abgebildet.

Durch Division der Summe aus den Monaten mit auftretendem Extremwetter innerhalb einer Klimaperiode durch die Gesamtzahl der betrachteten Monate kann das Risiko für Ertragsausfälle berechnet werden (vgl. 4.4). In dieser Weise können speziell die klimatisch bedingten Auswirkungen auf die Risiken in den sensiblen Wachstumsphasen der betrachteten Kulturen analysiert werden.

Tab. 8: Schwellenwerte für Extremwetter ausgewählter Kulturen innerhalb der sensiblen Wachstumsmonate für die Standorte Braunschweig und Soest

Kultur	S_{temp} ($T_{max} \geq 30^{\circ}C$)	S_{rain} Braunschweig (nFK 30 % = 119 mm)	S_{rain} Soest (nFK 30 % = 147 mm)
Getreide	30 ° C	131 mm	103 mm
Raps	30 ° C	143 mm	115 mm
Ackerbohne	30 ° C	143 mm	115 mm
Mais	30 ° C	119 mm	91 mm

nFK 30 % = potentiell pflanzenverfügbares Bodenwasser bis zum Erreichen von 30 % nFK, T_{max} = maximale Tagestemperatur, S_{temp} und S_{rain} = Schwellenwerte für Hitze- und Trockenstress

2.7. Kalibrierung von APSIM

Auf Grundlage der in APSIM Version 7.4 bereits enthaltenen Basiskulturen wurden anhand eigener Feldversuche an den Standorten Braunschweig und Soest in den Ernteperioden 2010/2011 und 2011/2012 sowie ergänzender Literaturangaben die Kulturen der betrachteten Anbausysteme (vgl. 2.1) an die deutschen Sorten und Standortverhältnisse angepasst.

Im Wesentlichen berechnet APSIM den Ertrag auf Basis eines täglichen Biomassezuwachses, der zum einen von der eintreffenden Globalstrahlung und zum anderen von dem zur Verfügung stehenden Wasser abhängt (Asseng et al., 1998; Keating et al., 2003; Robertson et al., 2002a; Robertson et al., 2002b). Dafür wird die Biomasse sowohl durch Multiplikation der kulturspezifischen Radiation Use Efficiency (RUE) mit der eintreffenden Strahlung, als auch durch Multiplikation des vorhandenen Bodenwassers mit der TUE berechnet. Der jeweils niedrigste Wert ergibt dann den Tageszuwachs an Biomasse.

Auf den Feldversuchen an den Projektstandorten Braunschweig und Soest wurde mittels einer Quadratmeterernte der maximale Biomasseaufwuchs von allen Kulturen außer Silomais bestimmt. Für Silomais wurde die Biomasse durch Häckseln und Wiegen einzelner Reihen ermittelt. Darüber hinaus wurde die täglich auftreffende Globalstrahlung an den am Standort installierten Wetterstationen gemessen. Da Pflanzen nur Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 400 und 700 Nanometer (Helbling et al., 2013) nutzen können, wurde aus der totalen Globalstrahlung die sogenannte „photosynthetisch aktive Strahlung“ (PAR) berechnet. PAR steht dabei für die engli-

sche Übersetzung „Photosynthetically Active Radiation“ und entspricht etwa 45 Prozent der totalen Globalstrahlung (Kiniry et al., 2004; Kiniry et al., 1989). Durch Division des maximalen Biomasseaufwuchses durch die PAR in der Hauptvegetationszeit (Beginn Frühjahrsvegetation bis Erreichen des maximalen Biomasseaufwuchses) wurde die RUE für jede Kultur ermittelt. Der Mittelwert aller zur Verfügung stehenden Messdaten wurde im Anschluss als erste Kalibrierungsgröße verwendet.

Tab. 9: Berechnete Eingabeparameter für die RUE im Modell APSIM

Kultur	Spannweite RUE (g/MJ)	MW RUE (g/MJ)	Parameter RUE in APSIM (g/MJ)
Winterweizen	1,43 - 1,84	1,60	1,60
Wintergerste	1,16 - 2,13	1,62	1,60
Winterraps	1,98 - 2,59	2,16	2,50
Ackerbohne	1,22 - 1,61	1,37	1,35
Silomais	2,85 - 4,21	3,59	3,75

Nach Abgleich der Ergebnisse aus der Ertragsmodellierung und der realen Ernte sowie einem Vergleich mit Angaben aus der Literatur (Caviglia und Sadras, 2001; Confalone et al., 2010; Kiniry et al., 1989; Lindquist et al., 2005; White, 2003) wurden diese Werte zu den abschließend verwendeten Parametern in APSIM optimiert. Die zur Kalibrierung verwendeten Werte sind in Tab. 9 enthalten. Die dazugehörigen Einzelwerte sind in Tab. 41 im Anhang zu finden.

Die TUE wird in APSIM nach der Methode von Sinclair et al. aus einem kulturspezifischen Transpirationskoeffizienten und dem Dampfdruckdefizit (Vapour Pressure Deficit, VPD) abgeleitet (Inman-Bamber und McGlinchey, 2003; Reyenga et al., 1999; Sinclair et al., 1984; Wang et al., 2004). Aufgrund fehlender Voraussetzungen zur exakten Erfassung der Transpiration mittels einer Lysimeteranlage oder ähnlicher Instrumente, wurden die in APSIM bereits enthaltenen Transpirationskoeffizienten der Kulturen unter Berücksichtigung von Literaturangaben (Caviglia und Sadras, 2001; Robertson und Kirkegaard, 2005; Yu et al., 2004; Zere et al., 2007) anhand von Testsimulationen angepasst. Die sich daraus ergebenden Werte sind in Tab. 10 abgebildet.

Tab. 10: Verwendete Koeffizienten zur Berechnung der Transpirationseffizienz in APSIM

Kultur	TE _{coeff} (kPa)
Winterweizen	0,0060
Wintergerste	0,0060
Winterraps	0,0060
Ackerbohne	0,0035
Silomais	0,0045

Neben der allgemeinen Kalibrierung erfolgte bei einzelnen Kulturen zusätzlich eine Anpassung individueller Parameter. Im Getreide wurden zur besseren Differenzierung zwischen Weizen und

Gerste die potentiellen Kornfüllungsraten verändert (Asseng und van Herwaarden, 2003) und die Koeffizienten für die Sensitivitäten der Vernalisation (P1V) und Photoperiode (P1D) angepasst. Beide Faktoren haben einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklungsdauer von der Aussaat bis zur Blüte und die Blütedauer (Lazar und Lazar, 2010; OrtizFerrara et al., 1995; White et al., 2008). P1V liegt zwischen 0 und 9, wobei der Wert von Sommerkulturen (kurze Vernalisationsphase) zu Winterkulturen (langer Vernalisationsphase) ansteigt (Ghaffari et al., 2002; Weiss et al., 2003). P1D liegt zwischen 0 und 5 und ist bei Wintergetreide etwas höher als bei Sommergetreide. In Anlehnung an die Ergebnisse von Weiss et al. wurden eigene Datenerhebungen ausgewertet und ein P1V von 6,5 sowie ein P1D von 3,5 festgelegt.

Bei Winterraps und Ackerbohne wurden die Eckpunkte zur Beschreibung der potentiellen Auswirkung von Stress auf die Bildung des Harvest Index verschoben, da die Erträge der ersten Simulationen außerhalb eines realistischen Ertragsniveaus lagen. In APSIM ist dies durch Anpassung von Stressfaktoren für die Bildung des Harvest-Indexes in Abhängigkeit der Intensität einer Stresssituation möglich (vgl. Anhang, Tab. 42).

Außerdem wurde beim Silomais die Frostgrenze, ab der der Bestand nach der Aussaat erfriert, auf -10 Grad Celsius gesenkt, da es in den Simulationen oft zu einem temperaturbedingtem Totalausfall der Kultur kam, obwohl in der Realität keine gravierende Beeinträchtigung des Wachstums durch die geringen Temperaturen beobachtet wurde. Wilson et al. begründen dieses Phänomen damit, dass in jungen Beständen mit geringer Wuchshöhe die Bodentemperatur gegenüber der Lufttemperatur überwiegt (Wilson et al., 1995). Somit können kurzfristige Frosttemperaturen durch die im Boden gespeicherte Wärme kompensiert werden. Eine Übersicht der kulturspezifisch angepassten Parameter ist in Tab. 42 im Anhang enthalten.

Als letzter Schritt erfolgte die kulturspezifische Anpassung der Temperatursummen, die zum Erreichen des nächsten Entwicklungsstadiums notwendig sind. Dazu wurden die jeweiligen BBCH-Stadien an den Standorten in Braunschweig und Soest durchgehend über die gesamte Vegetationsphase in wöchentlichen Abständen bonitiert und die dazugehörigen Temperatursummen über die Daten der Wetterstationen bestimmt (Anhang, Tab. 43). Die Temperatursummen dienen in APSIM zur Beschreibung der phänologischen Pflanzenentwicklung sowie der prozentualen Zuteilung der gebildeten Biomasse auf die einzelnen Pflanzenorgane (Huth et al., 2009; Keating et al., 2003; Wang und Engel, 1998; Wang et al., 2012).

2.8. Validierung von APSIM und Erstellung von Ertragssimulationen

Zur Modellvalidierung wurden mit der in 2.7 beschriebenen Kalibrierung eine Reihe von empirischen Ertragsdaten aus den Erntejahren zwischen 2003 und 2012 von unterschiedlichen Standor-

ten in Hessen, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen ausgewertet und die Erträge aus der Simulation in APSIM mit den realen Standortaufzeichnungen verglichen. Bei den Daten handelt es sich um Auszüge aus den Ackerschlagkarteien des Bundessortenamtes, der Fachhochschule Soest, des Julius Kühn-Institutes in Braunschweig, des Landesbetriebs Landwirtschaft Hessen, der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, des Versuchs- und Bildungszentrums Landwirtschaft Haus Düsse in Ostinghausen und des privaten Agrar-Beratungsunternehmens Hanse Agro GmbH.

Die Ernteerträge der genannten Datensätze wurden je nach Verfügbarkeit mittels Parzellendrescher, Handernte oder Fuhrwerkswage exakt erfasst und dokumentiert. Darüber hinaus sind in allen Unterlagen die vollständigen Düngergaben inklusive Datum der Ausbringung, applizierter Menge und Düngerform dokumentiert. Bei den N_{\min} -Werten wurden in der Ertragssimulation die Angaben aus der Schlagkartei und bei fehlenden Informationen Pauschalwerte zwischen 30 und 40 Kilogramm angenommen. Die für die Modellierung notwendigen Bodendaten stammen wie in 2.4 beschrieben aus den vorhandenen Bodenkarten und wurden durch Zusatzinformationen aus den Schlagkarteien ergänzt. Die Wetterdaten stammen von Aufzeichnungen der nächstgelegenen Wetterstationen des DWD.

Mit diesen Input-Daten wurden die real dokumentierten Anbaujahre in APSIM modelliert und einer Regressionsanalyse, in der die gemessenen Felderträge als unabhängige und die modellierten Erträge als abhängige Variable betrachtet werden, unterzogen. Unter der Annahme, dass die modellierten Ergebnisse den gemessenen Felderträgen entsprechen, muss ein linearer Zusammenhang mit einer Steigung von eins zwischen der abhängigen Variablen aus der Modellierung und der unabhängigen Variablen aus der Feldernte bestehen. Die Überprüfung dieser These erfolgte anhand von Regressionsrechnungen für jede Kultur mit einer linearen, einer logarithmischen, einer quadratischen und einer kubischen Gleichungsform inklusive einer Kalkulation der entsprechenden Bestimmtheitsmaße mit einem Signifikanzniveau von fünf Prozent (vgl. 4.1.).

Mit dem erfolgreich validierten Modell wurden im Anschluss Ertragssimulationen für zukünftige Klimaszenarien erstellt. Dazu sind alle angebauten Kulturen für die Jahre 1970 bis 2050 an den Standorten Braunschweig und Soest modelliert worden. Diese Simulationen basieren auf den zuvor parametrisierten Böden und den vorhandenen Wetterdaten aus den Klimaszenarien CLM, STAR, REMO und WETTREG. Die Richtwerte bei der Düngung wurden nach den Düngeempfehlungen der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (Anonymus, 2010a) unter der Erwartung maximaler Erträge berechnet.

3. Ökonomische Betrachtung

3.1. Programm „Farmboss“

Zur ökonomischen Betrachtung der in 2.1 beschriebenen Anbausysteme dient das Programm Farmboss in der aktuellen Studentenversion 2013. Farmboss ist ein deterministisches Betriebssimulationsmodell, das eine ganzheitliche Betriebsplanung über mehrere Anbauperioden ermöglicht (Gocht und Münch, 2006; Münch, 2002). Dabei können auch einzelne Betriebszweige auf unterschiedlichen Planungsebenen betrachtet werden. Farmboss berechnet in einem ersten Schritt die Deckungsbeiträge zuvor definierter Betriebszweige. Darauf aufbauend können in einem weiteren Schritt eine Plan-Betriebszweigabrechnung nach dem Standard der DLG (Anonymus, 2011b) erstellt und der Gesamtbetrieb mittels einer Linearen Programmierung innerhalb vorgegebener Rahmenbedingungen optimiert werden (Battermann, 2010). Wichtige Grundannahmen zu Produkt- und Faktorpreisen, veränderten politischen Rahmenbedingungen oder technischen Fortschritten sind in Szenarien frei definierbar und können bei Bedarf mit beliebigen Steigerungsraten für mehrere Planungsperioden versehen werden.

Darüber hinaus beinhaltet Farmboss eine umfangreiche Datenbank nach den Angaben des KTBL (Anonymus, 2010c; Döhler, 2009), in der eine Vielzahl an Informationen zur Berechnung der Feldarbeitsgänge enthalten ist. Unter anderem können beliebige Arbeitsschritte von der konventionellen Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat bestimmt und der dafür erforderliche Maschinenbestand zusammengestellt werden. Bei Arbeiten, für die keine Maschinen im Betrieb vorhanden sind, können diese als Dienstleistung zu festgelegten Lohnunternehmerpreisen zugekauft werden. Anhand der im KTBL beschriebenen Klimagebiete (Anonymus, 2012g) werden darüber hinaus die zur Verfügung stehenden Feldarbeitstage mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 60 Prozent ermittelt. Sind die nach Klimagebieten definierten Arbeitstage nicht ausreichend, um mit der vorhandenen Kapazität die festgelegten Arbeitsgänge zu erledigen, so können letztgenannte ebenfalls zugekauft werden.

In dieser Weise lassen sich sowohl operative als auch strategische Maßnahmen zur Betriebsanpassungen bis auf die unterste Planungsebene des Anbaus einzelner Kulturen detailliert abbilden und miteinander vergleichen. Farmboss erscheint daher als geeignetes Werkzeug für den ökonomischen Vergleich der Anbausysteme aus 2.1.

3.2. Grundannahmen zur Bewertung der Anbausysteme

Deckungsbeitrag:

Die Berechnung des Deckungsbeitrags in Farmboss orientiert sich an den Vorgaben aus der aktuellen Betriebszweigabrechnung für landwirtschaftliche Betriebe der DLG (Anonymus, 2011b).

Demnach ergibt sich der Deckungsbeitrag aus der Direktkostenfreien Leistung abzüglich der variablen Arbeitserledigungskosten. Zu den Direktkosten werden Kosten für Saatgut, Pflanzenschutz, Dünger und Sonstiges gezählt. Unter den sonstigen Kosten werden unter anderem Pauschalwerte für Trocknung und Hagelversicherung berücksichtigt.

Hinzu kommen die variablen Arbeitserledigungskosten, die sich aus einem kalkulatorischen Lohnansatz für die benötigte Feldarbeitszeit, den variablen Maschinenkosten für Treib- und Schmierstoffe, nutzungsgebundenen Abschreibungen, Reparaturen sowie Kosten für Maschinenmiete bzw. Inanspruchnahme eines Lohnunternehmers zusammensetzen.

Kalkulatorisches Betriebszweigergebnis:

Das kalkulatorische Betriebszweigergebnis besteht aus dem Deckungsbeitrag abzüglich der kalkulatorischen Faktorkosten für Boden, Arbeit und Kapital. Dazu zählen anfallende Kosten für die bewirtschaftete Fläche, Zinskosten für gebundenes Kapital sowie allgemeine Verwaltungskosten. Da sich das Thema der vorliegenden Arbeit auf einen reinen Vergleich von Anbausystemen bezieht, werden keine Gebäudekosten berücksichtigt. Außerdem werden Versicherungskosten für betriebseigene Maschinen aufgrund ihrer geringen Bedeutung am Gesamtergebnis nicht in die Berechnung mit einbezogen. Somit stellt das kalkulatorische Betriebszweigergebnis den Gewinn eines Betriebszweiges vor Abzug von Steuern und außerordentlichen Bilanzkorrekturen dar und entspricht damit dem Unternehmergewinn.

Steuern:

Steuern können in einigen Fällen einen deutlichen Einfluss auf den Unternehmenserfolg haben. Im deutschen Steuerrecht gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Möglichkeiten der Gestaltung einer Unternehmensform (Hopt et al., 2013) und damit der Rechtsgrundlage für die zu tragende Steuerlast. Darüber hinaus besitzen landwirtschaftliche Betriebe eine Wahlmöglichkeit bei der Umsatzbesteuerung. Sie können zwischen der Regelbesteuerung (derzeit 19,0 bzw. 7,0 Prozent) und der Pauschalierung (gegenwärtig 10,7 Prozent) wählen, was sich speziell in Betrieben mit geringen Investitionen und hohen Umsatzerlösen positiv auf den Unternehmenserfolg auswirken kann.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit liegt jedoch auf einem reinen Vergleich von drei unterschiedlichen Ackerbausystemen, die im Hinblick auf ihre Vorzüglichkeit unter klimatischen Veränderungen verglichen werden sollen. Für einen solchen Vergleich ist es nicht von Bedeutung, welcher Besteuerung die Modellbetriebe unterliegen. Aus diesem Grund werden im weiteren Verlauf der Arbeit keinerlei Steuern berücksichtigt. Zur Berechnung der Kosten und Leistungen werden ausschließlich Nettopreise verwendet.

3.3. Allgemeine Betriebsdaten

Beim Anlegen der Betriebe in Farmboss wurden eine Reihe allgemeiner Betriebsgrunddaten in das Programm eingegeben. Dazu zählen die charakteristischen Klimagebiete, auf deren Basis die verfügbaren Feldarbeitstage berechnet werden. Außerdem sind eine standardisierte Standortbeschreibung sowie die allgemeine Festlegungen von Mengen und Preisen für Flächen, Prämien und Arbeiterledigung enthalten. Die beschriebenen Eingabewerte sind in Tab. 11 nach Standort geordnet abgebildet. Sofern es sich nicht um eigene Annahmen handelt, sind in der Tabelle zusätzlich die entsprechenden Quellen vermerkt.

Tab. 11: Allgemeine Betriebsdaten für Modellrechnungen in Farmboss

Standort	Braunschweig	Soest	Quellenangabe
Klimagebiet	7	6	(Anonymus, 2012g)
Intensitätsstufe (Arbeitsgänge)	hoch	hoch	
Terminstufe	mittelfrüh	mittelfrüh	(Anonymus, 2012g)
Bodenart	schwere Böden (Tu3/Tu4)	mittlere Böden (uL/sL)	(Sponagel et al., 2005)
Planungsjahre	30	30	
Bundesland	Niedersachsen	Nordrhein-Westfalen	
Agrarregion 1	Braunschweig	Arnsberg	
Agrarregion 2	Wolfenbüttel	Soest	
Benachteiligtes Gebiet	nein	nein	
Ackerfläche	210 ha	210 ha	
Ø Schlaggröße	5 ha	5 ha	
Pachtpreise	10 €/EMZ	10 €/EMZ	(Anonymus, 2011e; Anonymus, 2012d)
Zahlungsansprüche	350 €/ha	350 €/ha	(Anonymus, 2010b; Anonymus, 2012g; Anonymus, 2013j)
EMZ	50	70	(Anonymus, 2010d; Cramer, 2006)
N _{min} -Wert	35 kg/ha	35 kg/ha	
Lohnkosten	15 €/h	15 €/h	(Anonymus, 2012g)
Max. Länge des Arbeitstages	12 h	12 h	
Anzahl Produktiver AKh/a	1800	1800	
Zinssätze (einheitlich)	5%	5%	
Max. Maschinenlaufzeit	12 h/d	12 h/d	
Eintrittswahrscheinlichkeit Feldarbeitstage	60%	60%	
Preis Agrardiesel	1,04 €/l	1,04 €/l	(Anonymus, 2010b; Anonymus, 2012g; Anonymus, 2013j)
max. Zukaufmenge Agrardiesel	10.000 l/a	10.000 l/a	(BMELV, 2010; BMELV, 2013)
Preis Diesel	1,26 €/l	1,26 €/l	(Anonymus, 2012g)

Ergänzend zu den entkoppelten Zahlungsansprüchen, die für beide Standorte auf aktuell 350 € pro Hektar festgelegt wurden, existieren zusätzliche Prämienansprüche für bestimmte Agrarumweltmaßnahmen, die in die Berechnung mit einbezogen wurden. Die aufgeführten Prämien beziehen sich auf die Regelungen des BMELV Stand 2013 und wurden aus den Angaben der KTBL-Datensammlung übernommen (Anonymus, 2010b; Anonymus, 2012g). Für konservierend bewirtschaftete Flächen im Mulch- und Direktsaatverfahren ist demnach eine Prämie von 55 € pro Hektar und für Fruchtfolgen mit mindesten 5 Hauptkulturen eine Prämie von 75 € pro Hektar vorgesehen (vgl. Tab. 12).

Tab. 12: Prämien für Agrarumweltmaßnahmen

	Prämienhöhe (€/ha)	Prämie Gesamtbetrieb (210ha)	Prämie Gesamtbetrieb (210ha)	Prämie Gesamtbetrieb (210ha)
Anbausystem	-	Marktfrucht	Futterbau konventionell	Futterbau diversifiziert
Fruchtfolgendiversifizierung (mind. 5 Hauptkulturen)	75	0	0	15.750 €
Anwendung von Mulch- und Direktsaatverfahren	55	3.850 €	7.000 €	11.550 €
Summe Prämien für Agrarumweltmaßnahmen	-	3.850 €	7.700 €	27.300 €

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Hochgerechnet auf eine Gesamtfläche von 210 Hektar besitzt der diversifizierte Futterbaubetrieb aufgrund seiner weiten Fruchtfolge und des konsequenten Verzichts auf eine wendende Bodenbearbeitung (vgl. 2.1) mit 27.300 € die höchsten Prämienansprüche für Agrarumweltmaßnahmen. Die Systeme Marktfruchtbau und Futterbau konventionell haben durch die intensivere Bodenbearbeitung und die relativ engen Fruchtfolgen geringere Zahlungsansprüche.

3.4. Arbeitserledigung und Maschinenausstattung

Zur Erledigung der Feldarbeit wurde für jedes Anbausystem nach Einschätzungen von Pflanzenbauexperten des Julius Kühn-Institutes in Braunschweig, der Fachhochschule Südwestfalen in Soest und des Thünen-Instituts in Braunschweig ein virtueller Maschinenpark konstruiert. Dieser orientiert sich an einer praxisüblichen Maschinenausstattung von Betrieben vergleichbarer Größenordnungen. Preise und Leistungsdaten der ausgewählten Maschinen wurden direkt aus Farmboss übernommen und basieren auf Standardwerten des KTBL. Die in dieser Weise zusammengestellten Maschinenbestände der drei Ackerbausysteme sind in Tab. 13 für die Systeme Marktfrucht und Futterbau konventionell sowie in Tab. 14 für das diversifizierte Futterbausystem abgebildet. Aus Gründen einer besseren Vergleichbarkeit der Standorte Braunschweig und Soest wird

eine einheitliche Mechanisierung für die entsprechenden Systeme auf beiden Standorten festgelegt.

Die Unterschiede zwischen den einzelnen Systemen resultieren aus den verschiedenen Bewirtschaftungsstrategien von der konventionellen Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat und den unterschiedlichen Fruchtfolgen. Die Systeme Marktfrucht und Futterbau konventionell besitzen eine identische Maschinenausstattung. Diese beinhaltet zwei Zugmaschinen mit 125 und 200 PS Leistung, drei Geräte für unterschiedliche Arbeitsgänge in der Bodenbearbeitung, entsprechende Düngungs- und Pflanzenschutztechnik sowie einen Schlegelmulcher und zwei Kipper zum Transport der Erntegüter.

Tab. 13: Maschinenausstattung der Anbausysteme Marktfrucht und Futterbau konventionell

Maschine	¹⁾ Anschaffungspreis	Gesamtleistung	AfA nach Leistung	Nutzungsdauer	AfA nach Nutzungsdauer
	€	h;ha;t;m ³	€/ (h;ha;t;m ³)	Jahre	€/Jahr
Allradtraktor, 93 kW (125 PS)	54.000	10.000	5,39	12	4.492
Allradtraktor, 148 kW (200 PS)	87.000	10.000	8,69	12	7.242
Drehpflug, angebaut, 5 - Schare, 175 cm mit Packer	18.500	2.500	7,36	14	1.314
Schwergrubber 3,0 m	5.000	1.500	3,27	14	350
Scheibenegge, angebaut, 3 m	5.113	2.100	2,39	14	358
Kreisleger - Drillkombination 3,0 m	13.600	3.000	4,50	10	1.350
Schleuderdüngerstreuer, angebaut, 1.500 l; 2,0 t	4.000	5.000	0,78	10	390
Pflanzenschutzspritze, angehängt, 3.000 l	35.000	12.000	2,91	10	3.490
Schlegelmulcher, 3 m	6.600	1.500	4,33	8	812
Dreiseitenkipper, zweiachsig, 18 t (14 t)	16.000	54.000	0,29	15	1.060
Dreiseitenkipper, zweiachsig, 18 t (14 t)	16.000	54.000	0,29	15	1.060
Summe	260.813				21.918

¹⁾Nettopreis ohne gesetzliche MwSt.

Im Unterschied zu den Systemen Marktfrucht und Futterbau konventionell enthält der Fuhrpark des diversifizierten Futterbaubetriebs aufgrund der praktizierten Direktsaat keine Geräte zur Bo-

denbearbeitung. Um die Bestände dennoch erfolgreich etablieren zu können, hat dieser anstatt einer Standard Drillmaschine mit Kreiselegge eine speziell für die Direktsaat geeignete Drilltechnik. Ansonsten entspricht die Maschinenausstattung den Systemen aus Tab. 13.

Die Ernte der Druschfrüchte ist in allen Betriebssystemen ausgelagert. Sie wird von einem Lohnunternehmer zu einem festen Kostensatz erledigt. Darüber hinaus werden auch die Ernte des Silomais inkl. Transport sowie dessen Aussaat mit einer Einzelkorndrillmaschine inklusive Unterfußdüngung durch einen Lohnunternehmer zu einem Festpreis pro Hektar erledigt. Die entsprechenden Preisannahmen sind in Tab. 15 aufgeführt.

Tab. 14: Maschinenausstattung des Anbausystems Futterbau diversifiziert

Maschine	¹⁾ Anschaffungspreis	Gesamtleistung	AfA nach Leistung	Nutzungsdauer	AfA nach Nutzungsdauer
	€	h;ha;t;m ³	€/ (h;ha;t;m ³)	Jahr	€/Jahr
Allradtraktor, 93 kW (125 PS)	54.000	10.000	5,39	12	4.492
Allradtraktor, 148 kW (200 PS)	87.000	10.000	8,69	12	7.242
Mulch- bzw. Direktsaatmaschine, 3 m	33.000	2.100	15,67	10	3.290
Schleuderdüngerstreuer, angebaut 1.500 l; 2,0 t	4.000	5.000	0,78	10	390
Pflanzenschutzspritze, angehängt, 3.000 l	35.000	12.000	2,91	10	3.490
Schlegelmulcher, 3 m	6.600	1.500	4,33	8	812
Dreiseitenkipper, zweiachsig, 18 t (14 t)	16.000	54.000	0,29	15	1.060
Dreiseitenkipper, zweiachsig, 18 t (14 t)	16.000	54.000	0,29	15	1.060
Summe	251.600				21.836

¹⁾Nettopreis ohne gesetzliche MwSt.

Tab. 15: Festpreise für zugekaufte Arbeitsgänge durch Lohnunternehmer

Arbeitsganggruppe	¹⁾ Preis (€/ha)	Quelle
AG-Mähdrusch - Getreide, Raps, Hülsenfrüchte	105	(Anonymus, 2013h; Lopotz und Nacke, 2013)
AG-Silomais - Häckseln inkl. Transport	170	
AG-Einzelkornsaat - Mais inkl. Unterfußdüngung	50	

¹⁾Nettopreis ohne gesetzliche MwSt.

Die einzelnen Arbeitsgänge zur Bestandesführung der angebauten Kulturen (vgl. 2.1) sind in Tab. 16 aufgelistet. Die Nummern in der Tabelle stehen dabei für die Anzahl der Überfahrten eines bestimmten Arbeitsgangs. Werte kleiner eins bedeuten, dass nur ein Teil der Fläche überfahren wird. Werte größer eins stehen für eine Wiederholung der Arbeitsgänge.

Tab. 16: Arbeitsgänge zur Bestandesführung einzelner Kulturen

Arbeitsgang	Winterweizen (Direktsaat)	Stoppelweizen (Pflug)	Winterweizen (pfluglos)	Wintergerste (Pflug)	Wintergerste (Direktsaat)	Winterraps (Pflug)	Winterraps (Direktsaat)	Ackerbohnen (Direktsaat)	Silomais (pfluglos)	Silomais (Direktsaat)
¹⁾ Stoppelbearbeitung	0	1	2	1	0	1	0	0	2	0
¹⁾ Pflügen	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0
¹⁾ Saatbettbereitung	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Drillen bzw. Mulch-/Direktsaat	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Einzelkornsaat inkl. Unterfußdüngung	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Mineraldünger Streuen	3	3	3	4	4	3	3	1	1	1
Spritzen ohne Glyphosat	4	3,5	3,5	3	3,5	4,5	5	3,5	1	1
²⁾ Spritzen Glyphosat	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1
Mähdrusch Körnerfrüchte	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Silomais - Häckseln inkl. Transport	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
¹⁾ Mulchen – nicht zeitgebunden	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
²⁾ Mulchen – nicht zeitgebunden	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Transport Druschfrüchte	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0

¹⁾Nicht im System „Futterbau diversifiziert“; ²⁾Nur im System „Futterbau diversifiziert“

Im Marktfrucht- und konventionellen Futterbaubetrieb erfolgt die Aussaat wie bereits erwähnt mit einer konventionellen Drillkombination inklusive Kreiselegge, wohingegen dieser Arbeitsgang im diversifizierten Futterbaubetrieb durch eine spezielle Direktsaatmaschine erledigt wird. Außerdem werden in den Systemen Marktfrucht und Futterbau konventionell nur die Feldränder gemulcht, da die Strohrotte durch die folgende Bodenbearbeitung ausreichend gefördert wird. Aus diesem Grund wird hier nur ein Faktor von 0,25 Überfahrten angesetzt. Im diversifizierten Futter-

baubetrieb wird aufgrund der Direktsaat die komplette Fläche gemulcht, weshalb hier ein Faktor von einer Überfahrt angenommen wird. Als weitere Besonderheit ergeben sich die Nachkommastellen beim Arbeitsgang „Spritzen ohne Glyphosat“ aus der Annahme, dass bestimmte Überfahrten wie beispielsweise die Unkrautbekämpfung im Voraufbau beim Winterweizen nicht in jedem Jahr erforderlich sind. Darüber hinaus erfordern die pfluglosen Anbausysteme in einigen Jahren eine zusätzliche Herbizid- oder Fungizidmaßnahme. Eine Differenz von 0,5 Überfahrten bei der pfluglosen und der konventionellen Variante derselben Kultur bedeutet, dass durchschnittlich in jedem zweiten Jahr eine zusätzliche Überfahrt erforderlich ist.

3.5. Erzeugerpreise Pflanzenproduktion

Die Leistungen der angebauten Kulturen ergeben sich durch Multiplikation der Ernteerträge mit dem aktuellen Marktpreis. Die Ernteerträge stammen aus der in 2.8 beschriebenen Ertragsmodellierung mit dem Klimaszenario STAR übernommen. Zwecks Bestimmung der Marktpreise erfolgte eine Auswertung offizieller Preisstatistiken der Jahre 2000 bis 2012 und basierend auf dem Marktpreis für Winterweizen eine Berechnung von Preisrelationen zu anderen Kulturen. Darüber hinaus wurden ein Hochpreisszenario aus dem Durchschnittspreis der Jahre 2007 bis 2012 und ein Tiefpreisszenario aus dem Durchschnittspreis der Jahre 2000 bis 2006 gebildet. Die Abgrenzung zwischen den Jahren 2006 und 2007 resultiert aus dem sprunghaften Anstieg der Agrarpreise ab 2007 (Anonymus, 2013f). Unter der Annahme, dass sich die derzeitigen Rohstoffpreise auf einem sehr hohen Niveau bewegen und aus aktueller Sicht keine nennenswerten Preisanstiege in den nächsten Jahren zu erwarten sind (Anonymus, 2013f), können die Preise vor 2007 als Tiefpreisniveau angenommen werden.

Für Silomais existieren keine offiziellen Preisstatistiken. Aus diesem Grund wurden die Silomaispreise aus den Angaben des KTBL, der Agrarmarkt-Informations-Gesellschaft (AMI) und der Landwirtschaftskammer Niedersachsen abgeleitet. Als Hochpreis ergibt sich ein Preis von 3,50 € je Dezitonne Frischmasse ab Feld bei einem Trockenmassegehalt von 35 Prozent. Der Tiefpreis wurde aus der Preisrelation zu Winterweizen berechnet und beträgt 2,30 € je Dezitonne Frischmasse.

Eine ähnliche Problematik besteht bei der Preisfindung der Ackerbohne. Da die Anbaufläche von Ackerbohnen in Deutschland im Schnitt der Jahre 2007 bis 2012 weniger als ein Prozent der Anbaufläche von Weizen betrug (Anonymus, 2013d), existiert kein flächendeckender Markt, auf dem Ackerbohnen gehandelt werden. Eigene Berechnungen auf Basis von Erzeugerpreisen aus der Datenbank der AMI zwischen 2007 und 2012 (Anonymus, 2013c) ergeben einen Durchschnittspreis von 16 € pro Dezitonne. Das KTBL gibt einen Preis von rund 14 € pro Dezitonne an (Anonymus, 2012g). Vor dem Hintergrund von Veröffentlichungen der Fachhochschule Südwestfa-

len und der Union zur Förderung von Öl- und Proteinpflanzen (UFOP) scheint dieser Preis zu niedrig angesetzt. Die UFOP gibt für die Jahre 2009 und 2010 einen durchschnittlichen Erzeugerpreis von 20 € pro Dezitonne an (Sauer mann, 2011). Die Fachhochschule Soest hat im Rahmen des Projektes „LeguAN“ für das Jahr 2012 einen erzielbaren Marktpreis von 25 € pro Dezitonne ermittelt (Alpmann et al., 2013). Diese Preise liegen sehr dicht an den jeweiligen Weizenpreisen der betrachteten Zeiträume. Aus diesem Grund wird der Ackerbohnenpreis in den Berechnungen gleich dem Weizenpreis gesetzt.

Tab. 17: Preisszenarien für Ernteprodukte

Kultur	¹⁾ Preis (€/dt)	Preisrelation zu Winterweizen (X:1)	Quelle
Hochpreis (Ø 2007-2012)			
Winterweizen	22	1,0	(Anonymus, 2013f)
Raps	45	2,2	(Anonymus, 2013f)
Wintergerste	21	0,9	(Anonymus, 2013f)
Ackerbohne	22	1,0	(Anonymus, 2012g; Anonymus, 2013c)
Silomais (35% TM)	3,50	0,16	(Anonymus, 2012g; Anonymus, 2013a; Anonymus, 2013d)
Tiefpreis (Ø 2000-2006)			
Winterweizen	14	1,0	Siehe Hochpreisszenario
Raps	32	2,1	
Wintergerste	13	1,0	
Ackerbohne	14	1,0	
Silomais (35% TM)	2,30	0,16	

¹⁾Nettopreise für nicht trocknungsbedürftige Ernteware ab Feld

Die in der beschriebenen Weise erstellten Preisszenarien inklusive der dazugehörigen Literaturquellen sind in Tab. 17 zusammengefasst.

3.6. Direktkosten und Faktoransprüche Pflanze

Zu den Direktkosten der angebauten Kulturen zählen die anfallenden Ausgaben für Saatgut, Düngung und Pflanzenschutz sowie sonstige Kosten für Trocknung und Hagelversicherung. Die vorhandenen Faktoransprüche resultieren aus den entsprechenden Mengen, die von den einzelnen Produktionsfaktoren benötigt werden. Die erforderlichen Mengen- und Preisgerüste für den Bereich Saatgut sind in Tab. 18 dargestellt. Die Nährstoffpreise sowie der Entzug über die Ernteprodukte der Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kali wurden ebenfalls aus den Angaben des KTBL errechnet. Aufgrund der Annahme, dass ein Teil des Stickstoffs bei der Ausbringung und Umsetzung im Boden verloren geht, und der Vorgabe aus der Düngeverordnung (DüV), dass ein durchschnittlicher Bilanzüberschuss von 60 Kilogramm Stickstoff pro Hektar und Jahr nicht über-

schritten werden darf (DüV, 2012), wurde darüber hinaus eine Stickstoffausnutzung von 90 Prozent zugrunde gelegt. Bei Phosphor und Kali wird unterstellt, dass auch hier die zugeführten Nährstoffe nicht zu 100 Prozent pflanzenverfügbar sind, aber der zusätzliche Bedarf aus dem Bodenvorrat gedeckt werden kann. Dadurch ergibt sich für diese Nährstoffe ein Ausnutzungsfaktor von eins. Die entsprechenden Werte zu den Preisannahmen und den Nährstoffentzügen der angebauten Pflanzen sind in Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 19 und Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 20 abgebildet.

Tab. 18: Mengen und Preise für Saatgut der betrachteten Kulturen

Kultur	Preis (€/kg bzw. €/U bei SM)	Menge (kg/ha bzw. U/ha bei SM)
Winterweizen	0,5	160
Wintergerste	0,51	155
Winterraps (Hybrid)	22	3
Ackerbohnen	0,97	100
Silomais	89	2

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 19: Angenommene Nährstoffpreise und Nährstoffausnutzung

Betriebsmittel	Einheit	Wert	Nährstoffausnutzung
Stickstoff (N)	€/kg Reinnährstoff	0,9	90%
Phosphor (P)	€/kg Reinnährstoff	1,0	100%
Kalium (K)	€/kg Reinnährstoff	0,8	100%

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 20: Nährstoffentzüge über das Ernteprodukt ausgewählter Kulturpflanzen

Kultur	Einheit	Stickstoff	Phosphor	Kali
Winterweizen	kg/dt TM Hauptprodukt	2,00	0,40	0,60
Stoppelweizen		2,20	0,40	0,60
Wintergerste		2,00	0,40	0,60
Winterraps		3,60	0,90	0,90
Ackerbohnen		0,00	0,60	1,35
Silomais		1,30	0,26	1,30

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Die Preise für Pflanzenschutz wurden aus gemittelten Pauschalpreisen für die einzelnen Maßnahmen errechnet. Dazu gibt das KTBL nach Kultur und Anwendungsintensität geordnete Preise an. Da die jährlichen Witterungs- und Wachstumsverläufe äußerst unterschiedlich verlaufen und somit jedes Jahr eine individuelle Pflanzenschutzstrategie erfordert, erscheint eine Berechnung

über die einzelnen Wirkstoffpreise für eine langjährige Betrachtung nicht zielführend zu sein. Die verwendeten Preisannahmen sind in Tab. 21 abgebildet.

Tab. 21: Kosten für Pflanzenschutz in den Anbausystemen Marktfrucht, Futterbau konventionell und Futterbau diversifiziert

Kultur	Einheit	Herbizid	Fungizid	Insektizid	Sonstiges	Summe
Winterweizen	€/ha	56	100	13	3	172
Wintergerste	€/ha	56	75	9	11	151
Winterraps	€/ha	79	35	23	28	165
Ackerbohnen	€/ha	78	8	26	50	162
Silomais	€/ha	95	0	0	0	95
<i>Glyphosat vor Aussaat (nur O)</i>	€/ha	50	-	-	-	50

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Ausgehend von den Erfahrungen der Feldversuche in Braunschweig und Soest, konnten außer einer standardmäßigen Behandlung mit einem Totalherbizid vor der Aussaat in der Direktsaat keine Unterschiede zwischen den Systemen festgestellt werden. Aus diesem Grund wird in allen Systemen von den gleichen Pflanzenschutzkosten ausgegangen. Im diversifizierten Futterbausystem wird zusätzlich eine Glyphosatanwendung veranschlagt. Die Kosten für Mäuse- und Schneckenbekämpfung sind unter „Sonstiges“ enthalten, wobei auch hier keine Systemunterschiede beachtet werden.

Tab. 22: Sonstige Direktkosten der pflanzlichen Produktion in M, V und O

Kultur	Trocknungskosten (€/dt TM)	Hagelversicherung (€/1000 € Marktleistung)
Winterweizen	0,5	0,7
Wintergerste	0,5	0,7
Winterraps (Hybrid)	0,5	0,7
Ackerbohnen	0,5	0,7
Silomais	-	0,7

Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Übrige Kosten für Versicherung und Trocknung der Ernteprodukte sind in Tab. 22 zusammengefasst. Beim Silomais wird davon ausgegangen, dass die Ernteprodukte direkt vom Feld vermarktet werden und die Trocknungskosten bereits im Verkaufspreis enthalten sind. Für die anderen Kulturen wurden Standardwerte aus dem KTBL übernommen.

4. Ergebnisse

4.1. Ergebnisse der Modellvalidierung

Wie in 2.8 bereits beschrieben, wird die Güte des Modells durch eine funktionale Beziehung zwischen Modell- und Felderträgen beschrieben. Die statistische Auswertung (Tab. 23) beweist, dass eine lineare Beziehung zwischen den genannten Ertragsdaten besteht. Die Bestimmtheitsmaße liegen bei allen Kulturen über 0,80 und deuten auf einen relativ hohen Zusammenhang zwischen Modell und Realität hin. Die Verwendung anderer Gleichungsformen ergibt, wie erwartet, keine nennenswerten Verbesserungen der Bestimmtheitsmaße. Die F-Werte liegen deutlich über den kritischen Tabellenwerten und bestätigen die Signifikanzen der errechneten Regressionsgeraden. Gleichzeitig liegen auch die P-Werte eindeutig unter der festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent.

Tab. 23: Statistische Auswertung der Prognosegenauigkeit von APSIM

Kultur	Modellzusammenfassung					
	Gleichung	R ²	F-Wert	FG 1	FG 2	P-Wert
WW	Linear	0,913	397,984	1	38	0,000
	Logarithmisch	0,917	422,383	1	38	0,000
	Quadratisch	0,916	202,188	2	37	0,000
	Kubisch	0,916	202,188	2	37	0,000
WG	Linear	0,803	98,130	1	24	0,000
	Logarithmisch	0,788	88,996	1	24	0,000
	Quadratisch	0,826	54,554	2	23	0,000
	Kubisch	0,826	54,405	2	23	0,000
WR	Linear	0,836	137,432	1	27	0,000
	Logarithmisch	0,841	142,562	1	27	0,000
	Quadratisch	0,840	68,270	2	26	0,000
	Kubisch	0,840	68,270	2	26	0,000
AB	Linear	0,896	215,044	1	25	0,000
	Logarithmisch	0,860	153,371	1	25	0,000
	Quadratisch	0,901	108,713	2	24	0,000
	Kubisch	0,901	109,520	2	24	0,000
SM	Linear	0,911	247,145	1	24	0,000
	Logarithmisch	0,898	211,802	1	24	0,000
	Quadratisch	0,912	118,586	2	23	0,000
	Kubisch	0,912	118,586	2	23	0,000

$\alpha = 5 \%$

Abb. 1 bis Abb. 5 enthalten dazu passend die grafischen Darstellungen der linearen Beziehungen zwischen den realen Feld- und den Modellerträgen aus APSIM. Der Wert „n“ steht für die Anzahl der Daten, die zur Validierung verwendet wurden. Aufgrund der hohen Anbauhäufigkeit des Winterweizens, der auf allen Validierungsstandorten in der Fruchtfolge enthalten ist, konnten bei dieser Kultur 40 Datensätze ausgewertet werden. Die übrigen Kulturen besitzen eine geringere ackerbauliche Bedeutung und wurden nicht an allen Standorten angebaut. Dadurch bedingt konnten bei diesen Kulturen nur jeweils 26 bis 30 Datensätze ausgewertet werden. Die dazugehörigen Kennzahlen aus der Regressionsanalyse der Validierungsdaten sind im Anschluss an die grafischen Darstellungen in Tab. 24 abgebildet. Darüber hinaus ist für jede Kultur auch der RMSE aus der Differenz der Feld- und der Modellerträge enthalten. Dieser zeigt an, in welcher Größenordnung die Abweichungen der modellierten Erträge zu den Felderträgen liegen.

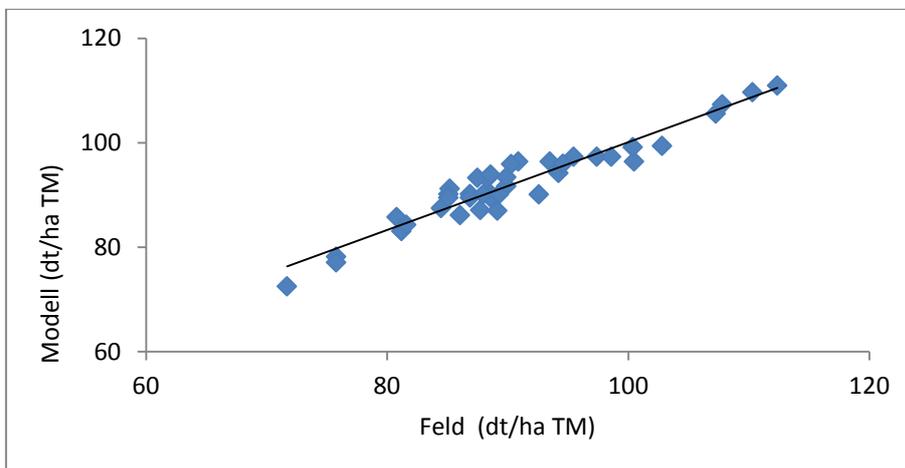


Abb. 1: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Winterweizen (n=40)

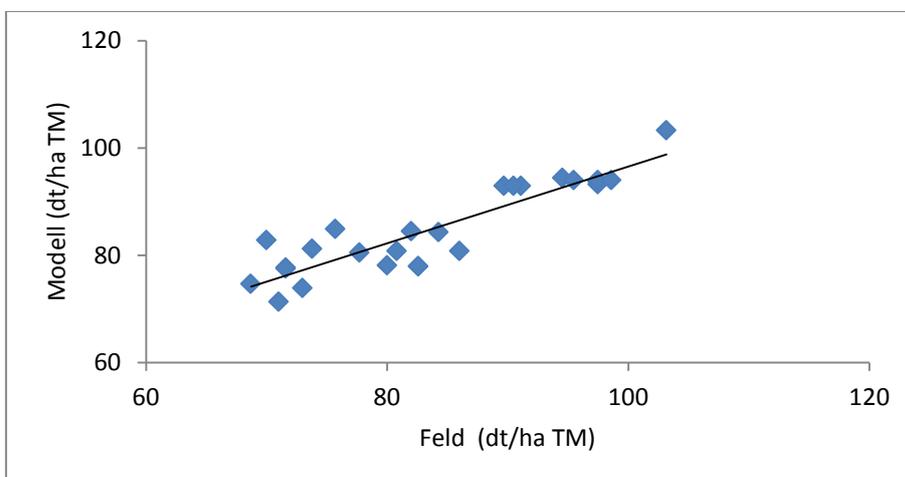


Abb. 2: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Wintergerste (n=26)

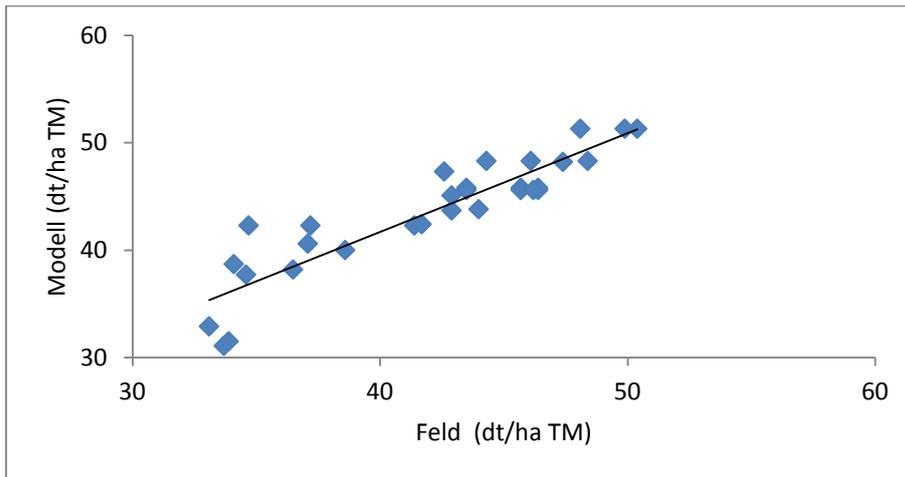


Abb. 3: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Winterraps (n=30)

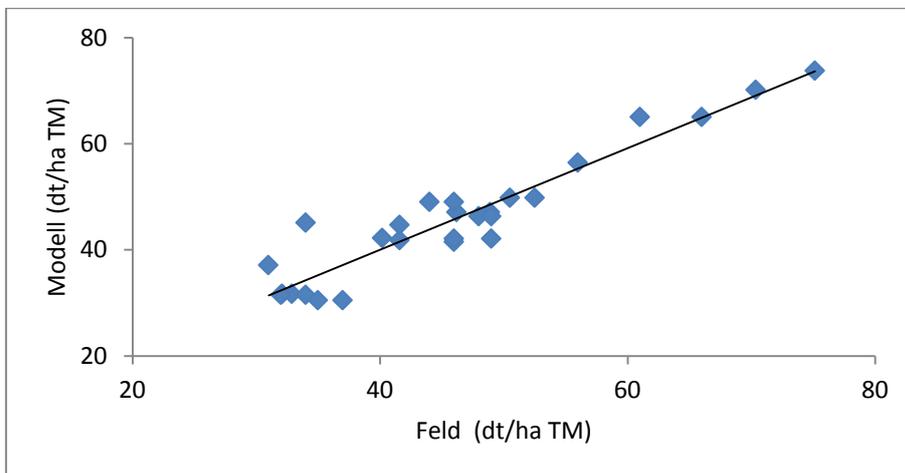


Abb. 4: Gegenüberstellung der Kornerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Ackerbohne (n=27)

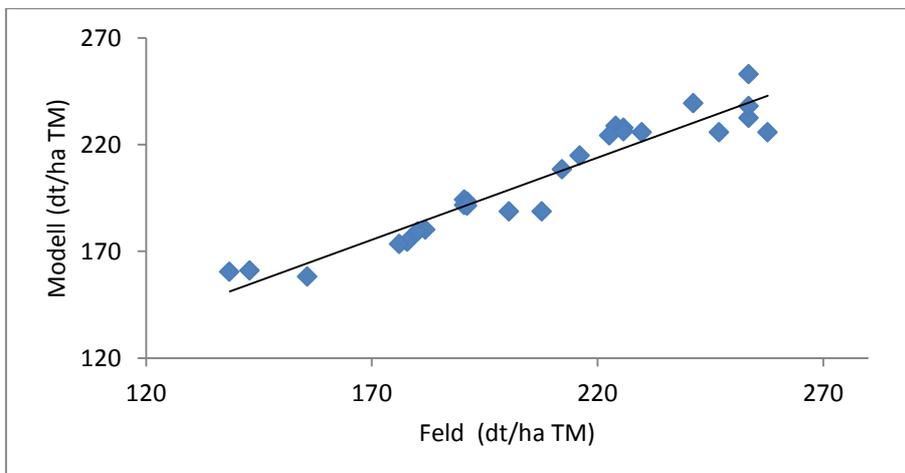


Abb. 5: Gegenüberstellung der Biomasseerträge aus empirischen Aufzeichnungen und der Modellierung in APSIM für die Kultur Silomais (n=26)

Tab. 24: Zusammenfassung statistischer Kennzahlen zur Modellvalidierung von APSIM

Kultur	Anzahl Datensätze	Steigung	Konstante	R ²	RMSE (dt/ha)
Winterweizen	40	0,841	15,881	0,913	3,1
Wintergerste	26	0,704	25,855	0,803	4,8
Winterraps	30	0,923	4,791	0,836	2,7
Ackerbohne	27	0,951	2,025	0,896	3,9
Silomais	26	0,772	43,936	0,911	11,7

Bei den Kulturen Winterweizen, Ackerbohne und Silomais wurde der gemessene Feldertrag mit einer Sicherheit von rund 90 Prozent modelliert. Bei Winterraps und Wintergerste lag dieselbe Wahrscheinlichkeit bei 84 bzw. 80 Prozent. Diese Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den Angaben aus anderen Literaturquellen überein. Liu et al. (2012) konnten bei der Modellierung des Ertrags von Körnermais im Modell „DSSAT-CERES-Maize“ eine Wahrscheinlichkeit zwischen 81 und 85 Prozent erreichen. In weiteren Ertragsmodellierungen verschiedener Kulturen im Modell APSIM konnten Bestimmtheitsmaße zwischen 0,80 und 0,97 erzielt werden (Bassu et al., 2011; Turpin et al., 2003).

4.2. Ertragsmodellierung im Szenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig

Die einzelnen Jahreserträge aus der Modellierung am Standort Braunschweig sind im Anhang in Tab. 44 für den Zeitraum 1981 bis 2010 und in Tab. 45 für den Zeitraum 2021-2050 abgebildet. Für die Beurteilung der Ertragsstabilität im Zuge des Klimawandels sind jedoch die Durchschnittserträge über mehrere Jahre von größerer Bedeutung. Wie empirische Daten belegen, wird für einen nennenswerten züchterischen Fortschritt in der Ertragsbildung landwirtschaftlich genutzter Ackerkulturen ein Zeitraum von mindestens zehn Jahren benötigt (Anonymus, 2012h; Michel, 2012). Innerhalb dieses Zeitraums spielen Ertragseinflüsse durch Sortenanpassungen demnach eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund erscheinen zehn Jahre als geeignete Zeitspanne zur Betrachtung von klimatisch bedingten Veränderungen der durchschnittlichen Felderträge.

Dazu passend zeigt Abb. 6 die tendenzielle Ertragsentwicklung der in den Ackerbausystemen angebauten Kulturen (vgl. 2.1) anhand eines gleitenden Durchschnittsertrages innerhalb des beschriebenen zehnjährigen Zeitraums. Außer bei Silomais entsprechen die Angaben den Trockenmasse-Kornerträgen. Beim Silomais stehen die Werte für den prognostizierten Trockenmasseertrag der geernteten Gesamtbiomasse. Die entsprechenden Kennzahlen aus der Regressionsanalyse der Ertragsdaten sind in Tab. 25 abgebildet.

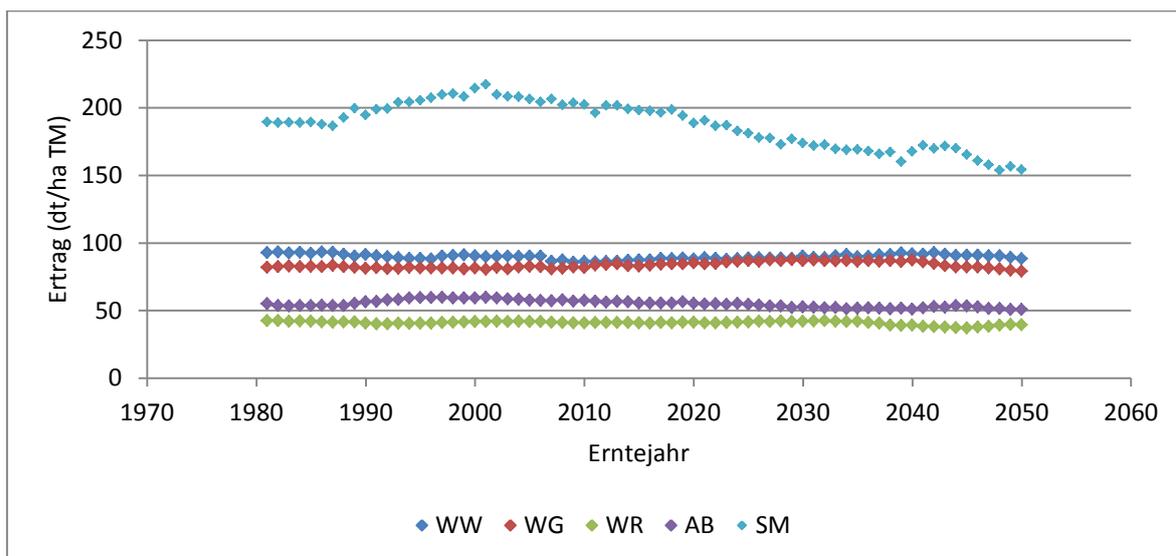


Abb. 6: Gleitender Durchschnitt über einen 10-jährigen Zeitraum der Erträge ausgewählter Kulturen aus der Ertragsmodellierung mit dem Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig (1981-2050) (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

Demnach sind beim Winterweizen keine klimatisch bedingten Ertragsveränderungen im Kornertrag festzustellen. Das Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung liegt bei null und der F-Test zeigt keine Signifikanzen auf. Bei den übrigen Kulturen deutet der F-Test auf mehr oder weniger starke Veränderungen in den kommenden Jahren hin. Bei Wintergerste ergibt sich ein marginaler Ertragszuwachs von 0,05 Dezitonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr an. Bei den Kulturen Winterraps und Ackerbohne werden leichte Ertragsrückgänge prognostiziert, welche sich mit durchschnittlich 0,04 bzw. 0,09 Dezitonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr jedoch ebenfalls auf einem sehr niedrigen Niveau befinden. Demgegenüber liegt der berechnete Ertragsrückgang beim Biomasseertrag von Silomais mit 0,69 Dezitonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr relativ hoch.

Tab. 25: Kennzahlen der Regressionsanalyse modellierter Durchschnittserträge (10-jährig) im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig (1981-2050)

Kultur	Ertragsänderung [dt TM/(ha*a)]	R ²	FG 1	FG 2	F-Wert	P-Wert
Winterweizen	-0,01	0,00	1	68	0,33	0,56
Wintergerste	0,05	0,20	1	68	16,24	0,00
Winterraps	-0,04	0,30	1	68	28,80	0,00
Ackerbohne	-0,09	0,45	1	68	55,39	0,00
Silomais	-0,69	0,65	1	68	123,20	0,00
$\alpha = 5\%$						

Mit Blick auf die Bestimmtheitsmaße muss einschränkend erwähnt werden, dass diese bei Wintergerste und Winterraps mit 0,20 und 0,30 äußerst niedrig ausfallen, was auf eine geringe Aussagekraft der Regressionsgleichungen hinweist.

gekraft der errechneten Regressionsgeraden hindeutet. Bei der Ackerbohne liegt dieser Wert mit 0,45 etwas höher. Dennoch können auch hier die Aussagen zu klimatischen Ertragsveränderungen nur mit 45 prozentiger Sicherheit getroffen werden. Am wahrscheinlichsten sind die Prognosen beim Silomais. In diesem Fall zeigt ein Bestimmtheitsmaß von 0,65 eine verhältnismäßig gute Anpassung der Regressionsgeraden.

Neben den tendenziellen Ertragsentwicklungen wurden auch die Ertragsschwankungen der einzelnen Kulturen in den Klimaperioden 1981-2010 und 2021 bis 2050 miteinander verglichen. Die Ergebnisse sind in Abb. 7 und Abb. 8 anhand von Box-Plot-Diagrammen dargestellt. Dabei sind die mittleren 50 Prozent der nach Größe geordneten Felderträge zwischen dem Q25- und dem Q75-Quartil innerhalb einer Box zusammengefasst. Extreme Ausreißer bei den Ertragsdaten werden mittels Fehlerbalken dargestellt. Betrachtet man die Mittelwerte der einzelnen Datenreihen, so bestätigen sich die in Tab. 25 enthaltenen Schätzungen der zukünftigen Ertragsentwicklung der einzelnen Kulturen. Bei einem Vergleich der Mittelwerte aus der Klimaperiode 1981 bis 2010 mit denen der Periode 2021 bis 2050 sind bei den durchschnittlichen Kornerträgen von Winterweizen, Wintergerste und Winterrapс nur marginale Veränderungen erkennbar. Bei der Ackerbohne zeigt sich im Gegensatz dazu ein leichter Ertragsrückgang von 6,3 Dezitonnen pro Hektar. Noch deutlicher stellt sich der Rückgang bei den Trockenmasseerträgen des Silomaises dar. Hier liegt der Mittelwert aus der Periode 2021 bis 2050 knapp 40 Dezitonnen pro Hektar unter dem zwischen 1981 bis 2010.

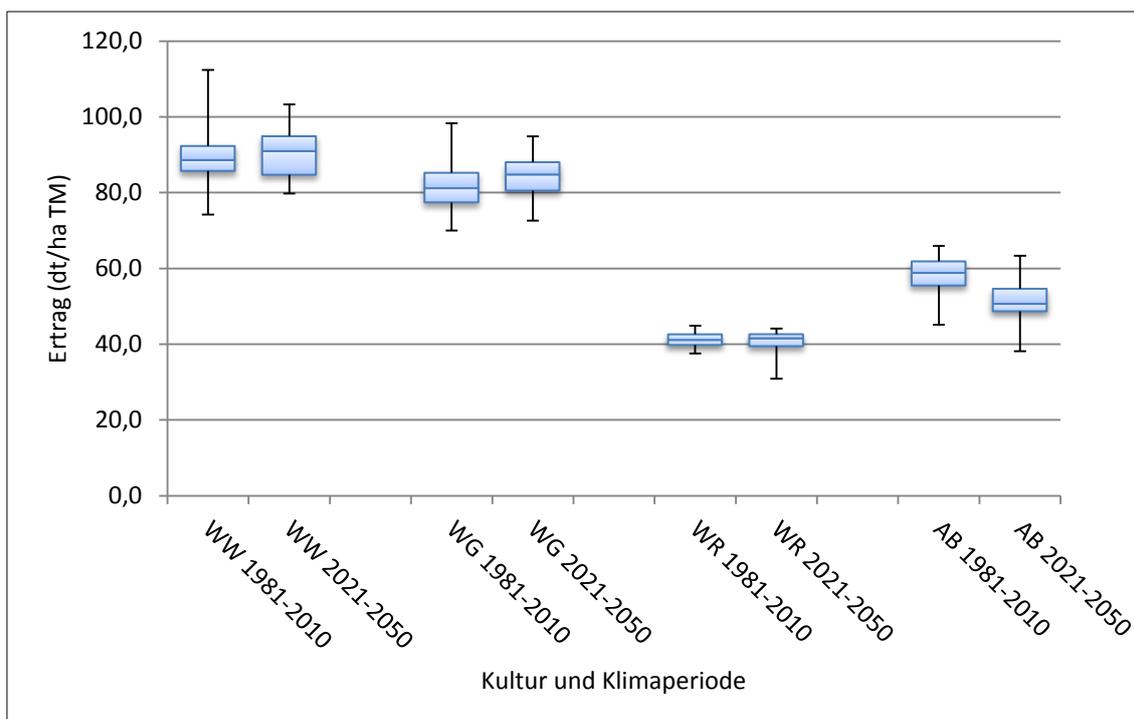


Abb. 7: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Kornerträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050

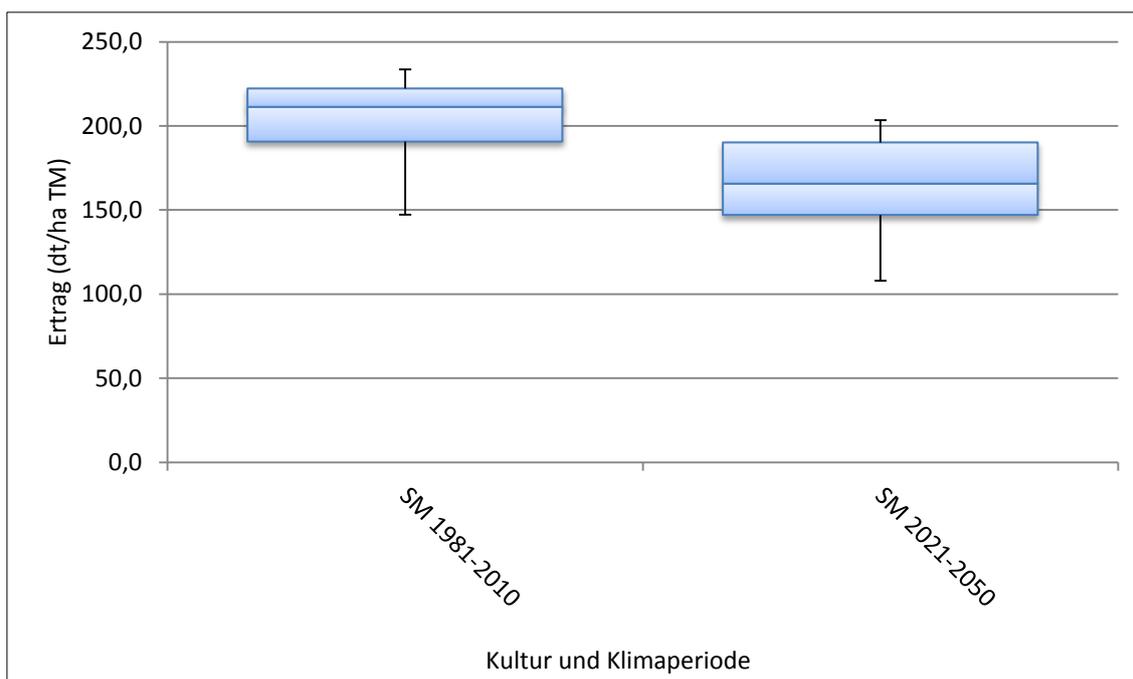


Abb. 8: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Silomaiserträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050

Tab. 26: Kennzahlen zur Analyse der Box-Plot-Diagramme aus Abb. 7 und Abb. 8

Kultur	Einheit	¹⁾ MW 2021-2050 minus 1981-2010	Median 2021-2050 minus 1981-2010	Abstand ²⁾ Q25 bis ³⁾ Q75 (1981-2010)	Abstand ²⁾ Q25 bis ³⁾ Q75 (2021-2050)
Winterweizen	dt/ha TM	0,8	2,4	6,6	10,2
Wintergerste		2,9	3,6	7,8	7,5
Winterraps		-0,8	0,4	2,8	3,2
Ackerbohne		-6,3	-8,2	6,4	5,9
Silomais		-38,6	-45,6	31,6	43,1

¹⁾MW= Mittelwert; ²⁾Q25= 25%-Quartil; ³⁾Q75= 75%-Quartil

Die absoluten Werte zu den abgebildeten Box-Plot-Diagrammen sind in Tab. 26 dargestellt. Zusätzlich sind dort auch die Spannweiten der Ertragsschwankungen zwischen dem 25-Prozent- und dem 75-Prozent-Quartil für die jeweiligen Klimaperioden enthalten. Diese zeigen auf, wie stark die mittleren 50 Prozent der Erträge innerhalb eines betrachteten Zeitraums schwanken, und geben somit Auskunft über die zu erwartende Streuung. Beim Winterweizen nimmt sie durchschnittlich um 3,6 und beim Silomais um 11,5 Dezitonnen pro Hektar zu. Bei den anderen Kulturen liegen die Veränderungen unter zwei Dezitonnen, sodass die die Ertragsstreuung zwar zunehmen aber deutlich geringer ausfallen wird, als beim Winterweizen und beim Silomais.

4.3. Ertragsmodellierung im Szenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest

In gleicher Weise wie in 4.2 wurden auch Ertragssimulationen mit dem Klimaszenario STAR-A1B auch für den Standort Soest durchgeführt. Die prognostizierten Ertragsentwicklungen sind in Abb. 9 anhand eines gleitenden Durchschnittsertrags über einen zehnjährigen Zeitraum abgebildet. Außer bei Silomais entsprechen die Angaben auch hier den Trockenmasse-Kornerträgen. Beim Silomais stehen die Werte entsprechend für den prognostizierten Trockenmasseertrag der geernteten Biomasse. Die passenden Kennzahlen der Regressionsanalyse sind in Tab. 27 dargestellt. Eine Auflistung der einzelnen Jahreserträge für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 findet sich im Anhang in Tab. 46 und Tab. 47.

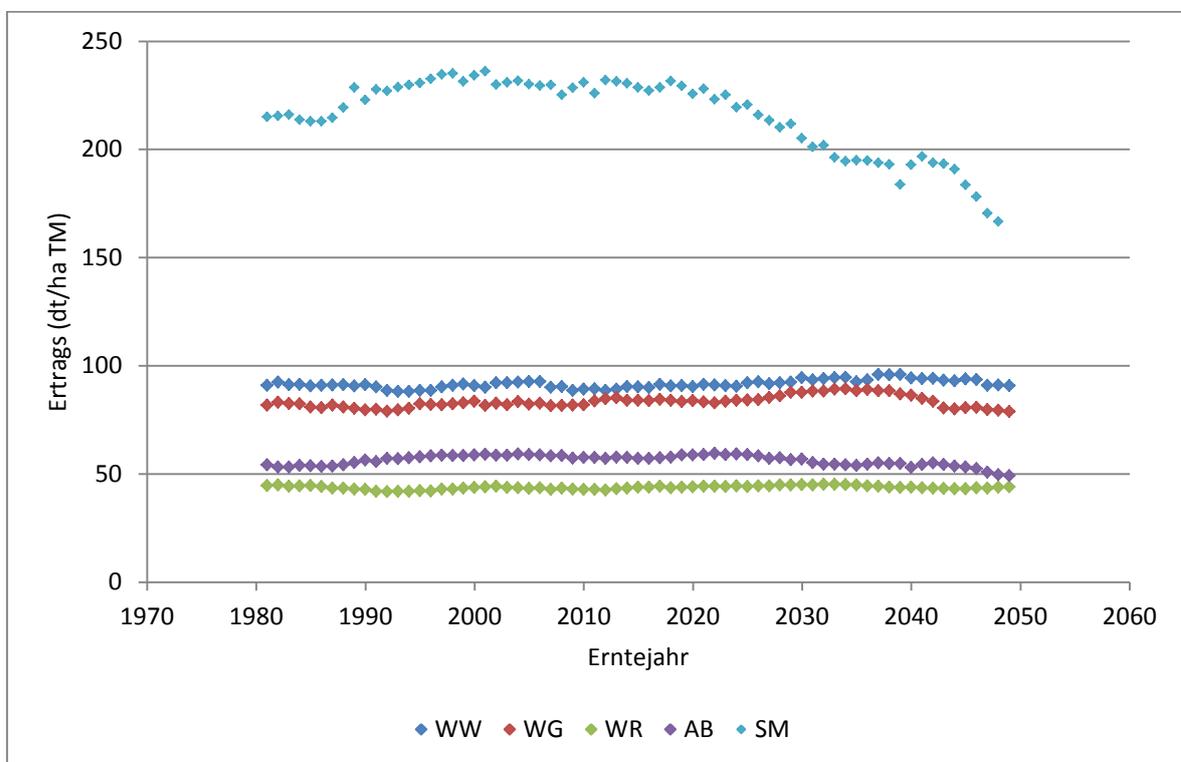


Abb. 9 Gleitender Durchschnitt über einen 10-jährigen Zeitraum der Erträge ausgewählter Kulturen aus der Ertragsmodellierung mit dem Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest (1981-2050) (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

Ein erster Blick auf die graphische Darstellung der zehnjährigen Durchschnittserträge zeigt, dass die Kornerträge der Kulturen Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Ackerbohne trotz klimatischer Veränderungen auf einem relativ konstanten Niveau verbleiben. Einzig bei der Ackerbohne ist ab dem Jahr 2025 ein marginaler Abfall des Durchschnittsertrags feststellbar. Ein anderes Bild zeigt sich beim Silomais. Wie bereits am Standort Braunschweig beobachtet wurde, ist laut der Modellprognose auch am Standort Soest mit rückläufigen Erträgen zu rechnen.

Tab. 27: Kennzahlen der Regressionsanalyse modellierter Durchschnittserträge (10-jährig) im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest (1981-2050)

Kultur	Ertragsänderung [dt TM/(ha*a)]	R ²	FG 1	FG 2	F-Wert	P-Wert
Winterweizen	0,05	0,30	1	68	29,15	0,00
Wintergerste	0,05	0,13	1	68	9,84	0,00
Winterraps	0,01	0,12	1	68	9,23	0,00
Ackerbohne	-0,05	0,15	1	68	12,26	0,00
Silomais	-0,73	0,58	1	68	91,90	0,00
$\alpha = 5\%$						

Die Regressionsanalyse (Tab. 27) bestätigt einen signifikanten Einfluss klimatischer Veränderungen auf den Maiseertrag. Mit einer Sicherheit von 58 Prozent ergibt sich ein Rückgang um 0,73 Dezitonnen pro Hektar und Jahr. Auch bei den übrigen Kulturen zeigt der F-Test eine signifikante Veränderung der Erträge. Unter Berücksichtigung der jährlichen Steigerungsraten sind jedoch nur marginale Veränderungen feststellbar. Auch die Bestimmtheitsmaße liegen in diesen Fällen mit Werten zwischen 0,12 und 0,30 auf einem niedrigen Niveau, sodass auf Basis der Ertragsmodellierung keine klimatisch bedingten Ertragseinflüsse bei den betrachteten Druschfrüchten zu erwarten sind.

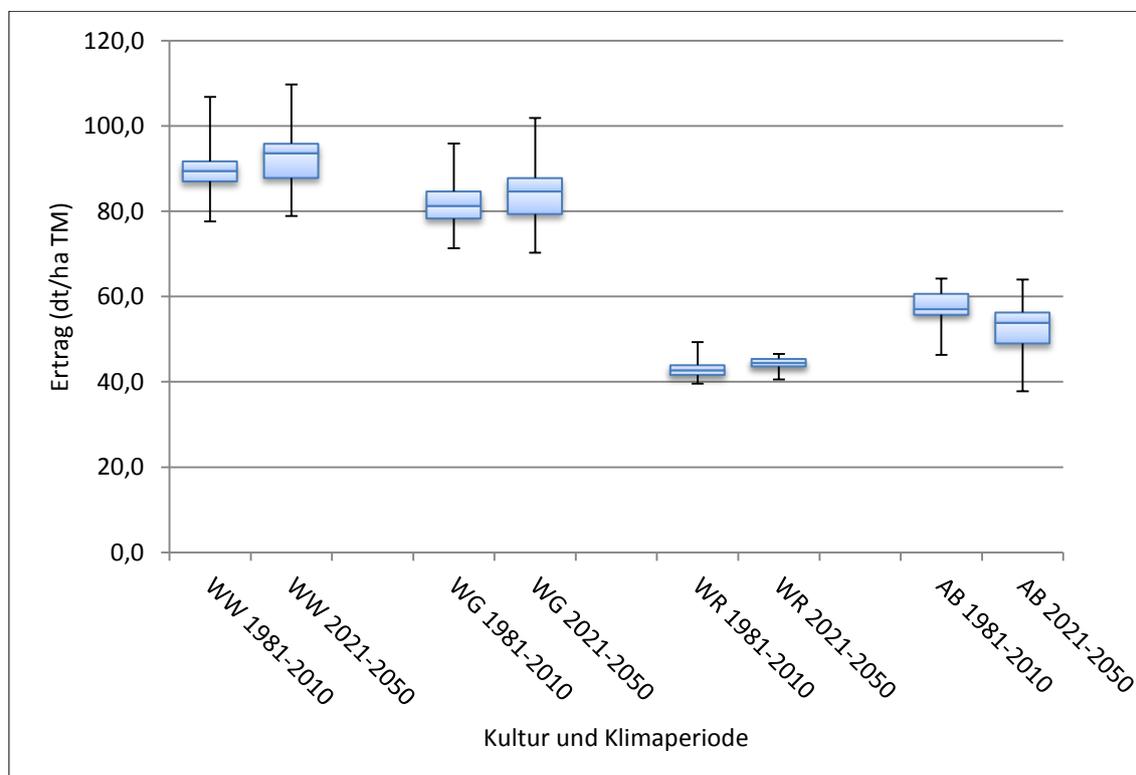


Abb. 10: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Kornerträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050

Die Spannweiten der durchschnittlichen Ertragsschwankungen der Klimaperiode 1981-2010 im Vergleich zu denen der Periode 2021-2050 sind als Box-Plot-Diagramme in Abb. 10 und Abb. 11 aufgeführt. Ergänzend dazu enthält Tab. 28 die exakten Kennzahlen dieser Diagramme. Der Vergleich des mittleren Ertragsniveaus aus den beiden Klimaperioden ergibt bei den Getreidearten Winterweizen und Wintergerste einen Zuwachs von 2,5 Dezitonnen pro Hektar. Bei Winterraps liegt dieser Wert bei einer Zunahme von 1,1 Dezitonnen pro Hektar. Unter Einbeziehung der erwähnten Unsicherheiten bei der Interpretation der Regressionsgleichungen für die einzelnen Erntedaten zwischen 1981 und 2050 (vgl. Tab. 27) sind nach diesen Ergebnissen keine nennenswerten Ertragsveränderungen zu erwarten. Bei der Ackerbohne wird ein leichter Ertragsrückgang von 4,3 Dezitonnen pro Hektar vorhergesagt. Wie bei den zuvor genannten Kulturen lässt das geringe Bestimmtheitsmaß der Regressionsgleichung jedoch keine sichere Prognose zu.

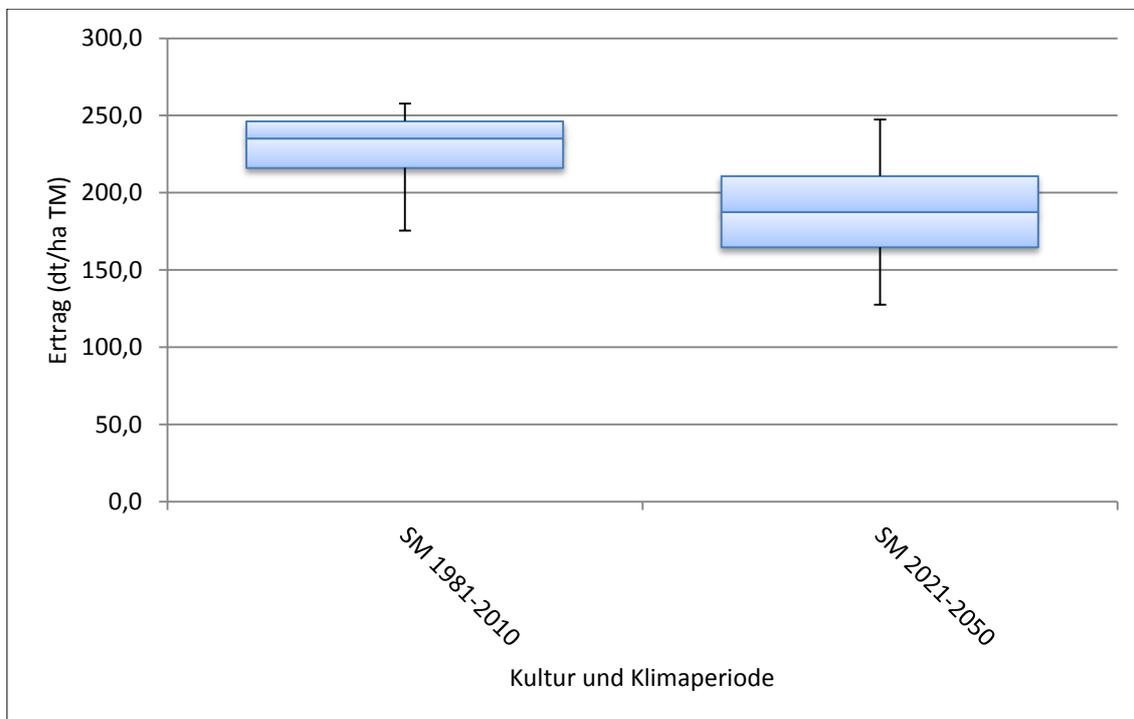


Abb. 11: Vergleich der Schwankungen und des Niveaus von Silomaiserträgen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050

Beim Silomais liegt der mittlere Biomasseertrag zwischen 1981 und 2010 mit rund 40 Dezitonnen pro Hektar unter dem aus der Periode 2021 bis 2050. In diesem Fall zeigen die Ergebnisse der Regressionsanalyse mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,58 eine relativ hohe Wahrscheinlichkeit von klimatischen Ertragseinflüssen. Die Spannweite der Felderträge innerhalb der Quartile Q25 und Q75 steigt um knapp 16 Dezitonnen pro Hektar.

Tab. 28: Kennzahlen zur Analyse der Box-Plot-Diagramme aus Abb. 10 und Abb. 11

Kultur	Einheit	¹ MW 2021-2050 minus 1981-2010	Median 2021-2050 minus 1981-2010	Abstand ² Q25 bis ³ Q75 (1981-2010)	Abstand ² Q25 bis ³ Q75 (2021-2050)
Winterweizen	dt/ha TM	2,5	4,2	4,7	8,0
Wintergerste		2,5	3,4	6,3	8,4
Winterraps		1,1	1,7	2,3	1,7
Ackerbohne		-4,3	-3,2	4,9	7,2
Silomais		-41,0	-47,6	30,2	46,1

¹MW= Mittelwert; ²Q25= 25%-Quartil; ³Q75= 75%-Quartil

Dies deutet auf eine zunehmende Schwankungsbreite der Ernteerträge hin. Bei den Kornenerträgen der übrigen Kulturen fallen die betrachteten Veränderungen deutlich geringer aus. Beim Winterweizen beträgt die entsprechende Zunahme des Abstandes zwischen dem 25-Prozent- und dem 75-Prozent-Quartil 3,3 Dezitonnen je Hektar und bei den Kulturen Wintergerste und Ackerbohne 2,1 bzw. 2,3 Dezitonnen je Hektar. Beim Winterraps nimmt sie dagegen um 0,6 Dezitonnen je Hektar ab, sodass sich die Ertragsschwankungen in diesem Fall verringern werden.

4.4. Pflanzenbauliches Anbaorisiko unter definierten Extremwetterereignissen

Neben der in 4.2 und 4.3 beschriebenen Ertragsstabilität der einzelnen Kulturen wurde das Anbaorisiko darüber hinaus durch Analyse der Wetterdaten aus dem Szenario STAR-A1B in den sensiblen Wachstumsphasen ermittelt. Durch definierte Schwellenwerte für extreme Wetterereignisse (vgl. 2.6) konnten die Monate herausgefiltert werden, in denen eine potenzielle Gefahr für wetterbedingte Ertragsdepressionen besteht. In diesem Zusammenhang enthalten Tab. 29 und Tab. 30 die prozentualen Anteile der Monate mit extremen Hitzeperioden (vgl. 2.6) in Bezug auf die Gesamtzahl der betrachteten Monate innerhalb der jeweiligen Klimaperiode. Bei den dargestellten Ergebnissen zur potentiellen Hitzestressgefahr muss berücksichtigt werden, dass die prozentualen Risikoangaben auf einem pauschal festgelegten Schwellenwert von 30 Grad Celsius beruhen, ab dem die Pflanzen ihr Wachstum reduzieren (vgl. 2.6). Anhand der betrachteten Literaturquellen, in denen unterschiedliche Aussagen zur Hitzetoleranz der Kulturen getroffen werden, stellt der gewählte Schwellenwert eine geeignete Vergleichsbasis zur Risikoanalyse dar. Unter Umständen können einzelne Sorten und Kulturen aber auch höhere Temperaturen tolerieren oder bereits bei Werten unterhalb von 30 Grad Celsius ihr Wachstum reduzieren. Dadurch beschreiben die dargestellten Risikowahrscheinlichkeiten lediglich Tendenzen und können nicht als absolute Größen interpretiert werden.

Tab. 29: Anteil an Monaten mit extremer Hitze innerhalb der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Braunschweig

Monat	Anteil an Monaten mit ¹⁾ Hitzeperiode innerhalb der Klimaperiode 1981-2010	Anteil an Monaten mit ¹⁾ Hitzeperiode innerhalb der Klimaperiode 2021-2050
Mai	0%	0%
Juni	0%	0%
Juli	3%	20%
August	7%	37%

¹⁾Mindestens 7 Tage pro Monat über 30 °C

Sowohl am Standort Braunschweig, als auch in Soest ist demnach in den Monaten Mai und Juni auch in Zukunft nicht mit extremen Hitzeperioden zu rechnen, die sich negativ auf das Ertragspotential der Kulturen auswirken. In den Monaten Juli und August wird das Risiko dagegen an beiden Standorten zunehmen. In Braunschweig wird im Monat Juli in der Klimaperiode 2021-2050 durchschnittlich in jedem fünften Jahr eine extreme Hitzeperiode auftreten. Dies entspricht einer Risikozunahme von 17 Prozentpunkten. Noch deutlicher wird die Gefahr für hitzebedingte Ertragseinbußen im Monat August ansteigen. Hier werden im Schnitt alle 2,7 Jahre extreme Hitzeperioden vorkommen, was einer Risikozunahme von 30 Prozentpunkten entspricht.

Tab. 30: Anteil an Monaten mit extremer Hitze innerhalb der Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Soest

Monat	Anteil an Monaten mit ¹⁾ Hitzeperiode innerhalb der Klimaperiode 1981-2010	Anteil an Monaten mit ¹⁾ Hitzeperiode innerhalb der Klimaperiode 2021-2050
Mai	0%	0%
Juni	0%	0%
Juli	7%	20%
August	3%	23%

¹⁾Mindestens 7 Tage pro Monat über 30 °C

Auch am Standort Soest ist eine steigende Gefährdung der Pflanzenentwicklung durch Hitzestress in den Monaten Juli und August festzustellen. Die Zunahmeintensität liegt jedoch unterhalb der Werte aus Braunschweig. Laut den Berechnungen wird das Risiko extremer Hitzeperioden in Soest im Monat Juli um 13 Prozentpunkte und im August um 20 Prozentpunkte ansteigen.

Durch Division der Anzahl an Monaten mit einer Hitzeperiode in der sensiblen Wachstumsphase einer Kultur durch die Gesamtzahl der betrachteten Monate innerhalb einer Klimaperiode wurde darüber hinaus das Anbaurisiko einer Feldfrucht berechnet (vgl. 2.6). In einem Vergleich der Ergebnisse aus den Perioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 konnte daraus eine kulturspezifische

Veränderung des Anbaurisikos ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in Tab. 31 für den Standort Braunschweig und in Tab. 32 für den Standort Soest dargestellt.

Tab. 31: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund extremer Hitzeperioden am Standort Braunschweig

Kultur	Betrachtete Monate in Klimaperiode	Monate mit ¹⁾ Hitzeperiode 1981-2010	Monate mit ¹⁾ Hitzeperiode 2021-2050	Risikozunahme Braunschweig
Wintergetreide	Mai-Juni	0	0	0%
Winterraps	Mai-Juni	0	0	0%
Ackerbohne	Juni-Juli	1	6	8%
Silomais	Juli-August	3	17	23%

¹⁾Mindestens 7 Tage pro Monat über 30 °C

Tab. 32: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund extremer Hitzeperioden am Standort Soest

Kultur	Betrachtete Monate in Klimaperiode	Monate mit ¹⁾ Hitzeperiode 1981-2010	Monate mit ¹⁾ Hitzeperiode 2021-2050	Risikozunahme Soest
Wintergetreide	Mai-Juni	0	0	0%
Winterraps	Mai-Juni	0	0	0%
Ackerbohne	Juni-Juli	2	6	7%
Silomais	Juli-August	3	13	17%

¹⁾Mindestens 7 Tage pro Monat über 30 °C

Da das Klimaszenario STAR-A1B besonders in den Monaten Juli und August extreme Hitzeperioden prognostiziert, ergibt sich eine besondere Risikozunahme für Kulturen mit einer späten Abreife. Im betrachteten Fall sind die Ackerbohne und noch mehr der Silomais betroffen. Deren Kornfüllungs- und Blütephasen liegen genau in den Monaten, die eine erhöhte Gefahr für extreme Temperaturen aufweisen. Verglichen mit dem Standort Soest steigt die Eintrittswahrscheinlichkeit für hitzebedingte Ertragsdepressionen bei Ackerbohne und Silomais in Braunschweig tendenziell stärker an. Bei den Winterkulturen ist aufgrund der früheren Abreife nicht mit einem zunehmenden Anbaurisiko zu rechnen. In allen betrachteten Monaten besteht für diese Kulturen laut Klimaszenario in beiden Anbauregionen keine Gefahr für länger andauernde Hitzeperioden. Demgegenüber steigt dieses Risiko zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bei der Ackerbohne um acht Prozentpunkte am Standort Braunschweig und um sieben Prozentpunkte am Standort Soest an. Beim Silomais nimmt die Gefahr von Ertragsausfällen in Braunschweig mit 23 Prozentpunkten etwas stärker zu, als in Soest mit 17 Prozentpunkten.

Entsprechend der Beschreibung des Anbaurisikos auf Basis extremer Hitzeperioden wurde selbiges auch anhand extremer Trockenperioden betrachtet (vgl. 2.6). Ähnlich wie bei den zuvor ge-

zeigten Risikowahrscheinlichkeiten für Hitzestress zeigen die folgenden Werte zum Trockenstress ebenfalls nur potentielle Tendenzen und keine absoluten Verhältnisse auf. Unter der pauschalen Annahme, dass Monate mit einer Niederschlagsmenge unter 60 Liter pro Quadratmeter in den sensiblen Wachstumsphasen als „trocken“ bezeichnet werden, sind in Tab. 33 und Tab. 34 die Jahre mit einer potentiellen Trockenstressgefahr innerhalb der Perioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 für die Standorte Braunschweig und Soest abgebildet. Die Angaben sind nach den Monaten, in denen die sensiblen Wachstumsphasen der entsprechenden Kulturen liegen, unterteilt. Darüber hinaus sind auch die prozentualen Veränderungen zwischen der zurückliegenden und der zukünftigen Klimaperiode aufgeführt.

Tab. 33: Anzahl an Monaten mit potentiellm Trockenstress und deren prozentuale Veränderung zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Braunschweig

Monat	Anzahl betrachteter Monate	¹⁾ Anzahl trockener Monate zwischen 1981 und 2010	¹⁾ Anzahl trockener Monate zwischen 2021 und 2050	Veränderung zwischen Periode 1981-2010 und 2021-2050
Mai	30	24	25	3%
Juni	30	17	14	-10%
Juli	30	14	20	20%
August	30	15	22	23%

¹⁾Trockener Monat= Monat, in dem die monatliche Niederschlagssumme unter dem Schwellenwert von 60 mm Niederschlag liegt

Tab. 34: Anzahl an Monaten mit potentiellm Trockenstress und deren prozentuale Veränderung zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 am Standort Soest

Monat	Anzahl betrachteter Monate	¹⁾ Anzahl trockener Monate zwischen 1981 und 2010	¹⁾ Anzahl trockener Monate zwischen 2021 und 2050	Veränderung zwischen Periode 1981-2010 und 2021-2050
Mai	30	12	17	17%
Juni	30	8	10	7%
Juli	30	4	12	27%
August	30	11	17	20%

¹⁾Trockener Monat= Monat, in dem die monatliche Niederschlagssumme unter dem Schwellenwert von 60 mm Niederschlag liegt

Im Unterschied zum Standort Soest fällt nach den Klimaberechnungen im Modell STAR zukünftig in Braunschweig im Juni mehr Niederschlag, sodass das Risiko für Trockenstress in diesem Zeitraum um zehn Prozentpunkte abnimmt. Der Juli und der August werden dagegen trockener. Die Anzahl der Jahre mit geringen Niederschlägen steigt in diesen Monaten um 20 Prozentpunkte im Juli bzw. 23 Prozentpunkte im August an. Im Mai gibt es mit einem Risikoanstieg von drei Prozentpunkten kaum Veränderungen. Am Standort Soest stellt sich eine andere Situation dar. Hier

steigt auch im Mai das potentielle Trockenstressrisiko um 17 Prozentpunkte an. Auch im Juni wird die durchschnittliche Niederschlagsmenge sinken und eine um sieben Prozentpunkte erhöhte Anbaugesfahr hervorrufen. Die Veränderungen in den Monaten Juli und August stimmen im Kern mit denen am Standort Braunschweig überein. Die Ausprägungen weichen mit Anstiegen um 27 Prozentpunkte im Juli und um 20 Prozentpunkte im August leicht von den zuvor genannten ab.

Neben der pauschalen Festlegung eines Schwellenwertes von 60 Liter pro Quadratmeter wurden, basierend auf der potentiellen Wasserverdunstung und der nutzbaren Feldkapazität, auch kulturspezifische Schwellenwerte berechnet (vgl. 2.6). Durch Addition der kulturartsspezifischen Schwellenwerte aus den einzelnen Monaten der sensiblen Wachstumsphasen berechnet sich der Schwellenwert S_{rain} , der eine untere Niederschlagsgrenze darstellt. Ab diesem Wert steigen das Risiko einer Unterschreitung der potenziellen Verdunstungsrate und die Gefahr von auftretendem Trockenstress. Die in dieser Weise ermittelten Schwellenwerte der betrachteten Kulturen sind in Tab. 8 nach Standorten gegliedert abgebildet. Durch Division der Summe aus den Monaten mit auftretendem Extremwetter innerhalb einer Klimaperiode durch die Gesamtzahl der betrachteten Monate kann das Risiko für Ertragsausfälle berechnet werden (vgl. 4.4). In dieser Weise können speziell die klimatisch bedingten Auswirkungen auf die Risiken in den sensiblen Wachstumsphasen der betrachteten Kulturen analysiert werden.

Die Ergebnisse sind in Tab. 35 und Tab. 36 enthalten. Aus den Daten geht hervor, dass sich das Anbaurisiko durch Trockenstress bei Wintergetreide und Winterraps in Braunschweig um sieben bzw. fünf Prozentpunkte verringern wird. Dem Klimaszenario STAR zu Folge steht den Pflanzen in den sensiblen Wachstumsphasen in der Periode 2021 bis 2050 im Vergleich zur Periode 1981 bis 2010 mehr Wasser zur Verfügung. Bei der Ackerbohne ist demgegenüber ein leichter Anstieg der Gefahr für Ertragsausfälle um fünf Prozentpunkte zu verzeichnen. Die höchste Risikozunahme ist beim Silomais zu erkennen. Bei dieser Kultur steigt die Gefährdung in den kommenden Jahren bis 2050 um 22 Prozentpunkte an.

Tab. 35: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund von Trockenstress am Standort Braunschweig

Kultur	Betrachtete Monate in Klimaperiode	Monate mit extremer Trockenheit 1981-2010	Monate mit extremer Trockenheit 1981-2010	Risikozunahme Braunschweig
Wintergetreide	Mai-Juni	46	42	-7%
Winterraps	Mai-Juni	48	45	-5%
Ackerbohne	Juni-Juli	40	43	5%
Silomais	Juli-August	29	42	22%

Tab. 36: Veränderung des Anbaurisikos einzelner Kulturen zwischen den Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 aufgrund von Trockenstress am Standort Soest

Kultur	Betrachtete Monate in Klimaperiode	Monate mit extremer Trockenheit 1981-2010	Monate mit extremer Trockenheit 1981-2010	Risikozunahme Soest
Wintergetreide	Mai-Juni	14	20	10%
Winterraps	Mai-Juni	20	23	5%
Ackerbohne	Juni-Juli	12	21	15%
Silomais	Juli-August	7	17	17%

Eine ähnliche Veränderung kann mit einem Anstieg von 17 Prozentpunkten bei der zuletzt genannten Kultur auch für den Standort Soest festgestellt werden. Neben dem Silomais wächst das Anbaurisiko der Ackerbohne in Soest um 15 Prozentpunkte relativ stark. Die Gefährdung für Ertragsausfälle durch Wassermangel beim Wintergetreide und Winterraps nehmen um zehn bzw. fünf Prozentpunkte zu.

4.5. Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen am Standort Braunschweig

Mit den in 4.2 und 4.3 beschriebenen Ergebnissen aus der Ertragsmodellierung wurden die betrachteten Anbausysteme einer umfassenden ökonomischen Analyse unterzogen. Für einen Vergleich der Vorzüglichkeit der unterschiedlichen Fruchtfolgen in den Anbausystemen wurden zunächst die Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen unter einem Hochpreis- und einem Tiefpreisszenario für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 ermittelt.

Hochpreisszenario:

Die Ergebnisse des Hochpreisszenarios am Standort Braunschweig sind Abb. 12 bis Abb. 14 dargestellt. Neben den reinen Deckungsbeiträgen ohne Prämien und staatlichen Zuschüssen enthalten die Abbildungen farblich abgegrenzt auch die Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen und die allgemeine Flächenprämie. Die exakten Werte zu den Abbildungen sind im Anhang in Tab. 48 enthalten.

Im Marktfruchtsystem liegt der höchste Deckungsbeitrag ohne Prämien und Zuschüsse mit 1468 Euro pro Hektar in der Anbauperiode 1981 bis 2010 beim pfluglos bestellten Winterweizen. Hinzu kommen eine Mulchsaatprämie von 55 Euro pro Hektar und die allgemeine Flächenprämie in Höhe von 350 Euro pro Hektar. Damit steigt der Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen für den pfluglos bestellten Winterweizen auf 1873 Euro je Hektar. Der des konventionell bestellten Winterweizens fällt aufgrund höherer Arbeitserledigungskosten und der nicht vorhande-

nen Mulchsaatprämie mit 1780 Euro je Hektar etwas niedriger aus. Auf einem ähnlichen Niveau bewegt sich mit 1762 Euro pro Hektar auch der konventionell bestellte Winterraps.

In der Klimaperiode 2021 bis 2050 sind aufgrund der geringen Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf den Weizenertrag (vgl. 4.2) kaum Veränderungen der Deckungsbeiträge des Winterweizens zu beobachten. Beim Winterraps liegt der Durchschnittsertrag in der zukünftigen Klimaperiode minimal unter dem aus der Periode 1981 bis 2021. Damit sinkt auch der Deckungsbeitrag dieser Kultur um 36 Euro je Hektar.

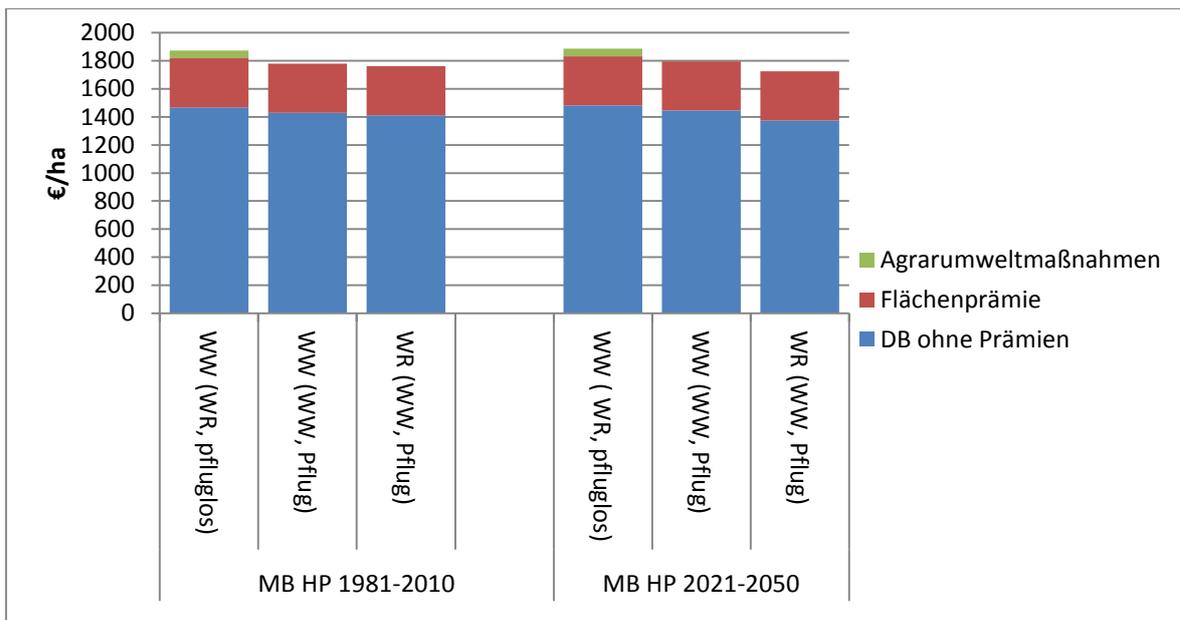


Abb. 12: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfucht“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

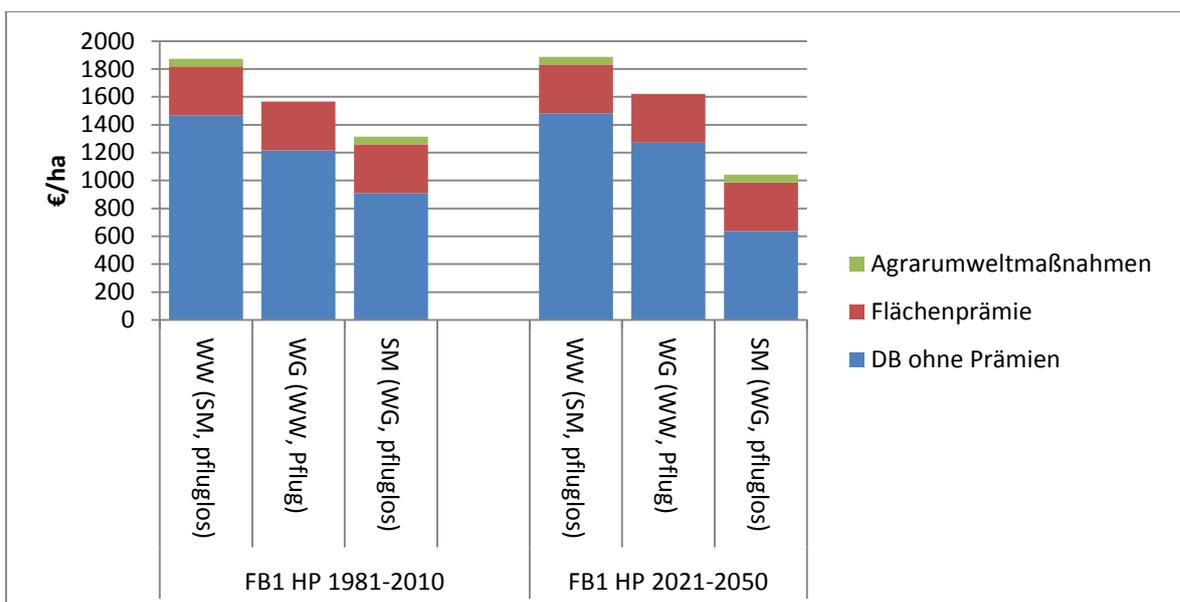


Abb. 13: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Im konventionellen Futterbausystem besitzt der Winterweizen mit durchschnittlich knapp 1900 Euro pro Hektar im Zeitraum 1981 bis 2010 ebenfalls den höchsten Wert. Auch hier ist neben der allgemeinen Flächenprämie aufgrund der pfluglosen Bestellung eine Mulchsaatprämie enthalten. Letztgenannte entfällt bei der konventionell bestellten Wintergerste. Aus diesem Grund und wegen der geringeren Ertragserwartung in Verbindung mit einem geringeren Marktpreis für die geerntete Ware liegt der Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen hier mit 1567 Euro je Hektar um rund 300 Euro unter dem des Winterweizens. Trotz der gezahlten Mulchsaatprämie für den pfluglos bestellten Silomais befindet sich dessen Erfolgskennzahl mit 1314 Euro je Hektar um weitere 250 Euro unter dem der Wintergerste. Einer der Gründe dafür liegt im hohen Nährstoffbedarf, der zum Ausgleich der Biomasseabfuhr bei der Ernte benötigt wird. Der Abstand des Deckungsbeitrages von Silomais im Vergleich zu Wintergerste und -weizen wird sich nach den Ergebnissen der Modellierung in der Klimaperiode 2021 bis 2050 noch weiter vergrößern, da der durchschnittliche Feldertrag des Silomais sinken wird, während die Kornerträge beim Wintergetreide nahezu konstant bleiben. Nach den Berechnungen ergeben sich in der zukünftigen Periode Deckungsbeiträge von 1888 Euro je Hektar beim Winterweizen, 1622 Euro je Hektar bei der Wintergerste und 1042 Euro je Hektar beim Silomais.

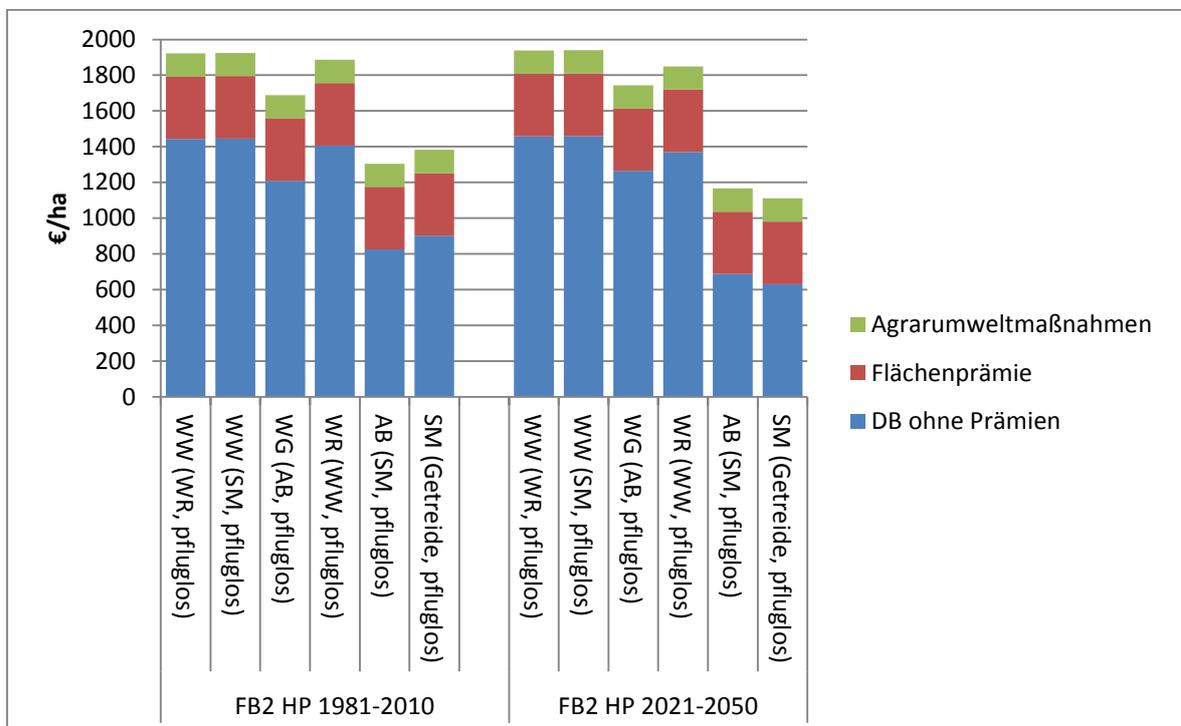


Abb. 14: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Im diversifizierten Futterbausystem werden die höchsten Prämien innerhalb der drei Vergleichsbetriebe gezahlt. Neben der allgemeinen Flächenprämie hat dieser Betrieb auf der kompletten

Fläche Anspruch auf eine Mulchsaatprämie in Höhe von 55 Euro pro Hektar für die pfluglose Bewirtschaftung. Hinzu kommt eine Vergütung für besondere Agrarumweltmaßnahmen. Diese beträgt 75 Euro je Hektar und wird aufgrund der diversifizierten Fruchtfolge angerechnet. Somit liegen die Deckungsbeiträge vergleichbarer Kulturen im diversifizierten Futterbausystem über denen der anderen Ackerbausysteme. Auch im betrachteten Fall ist der Winterweizen mit einem Wert von rund 1920 Euro je Hektar in der Klimaperiode 1981 bis 2010 am vorzüglichsten. Als nächstes folgen der Winterraps mit rund 1890 Euro pro Hektar und die Wintergerste mit knapp 1690 Euro je Hektar. Mit einem relativ hohen Abstand stellen der Silomais und die Ackerbohne die Kulturen mit den geringsten Deckungsbeiträgen dar. Hier liegen letztgenannte bei 1382 bzw. 1305 Euro je Hektar. Beim Silomais ist dies, wie bereits erwähnt wurde, im Wesentlichen auf den kostenintensiven Ausgleich der abgefahrenen Nährstoffe zur Ernte zurückzuführen. Bei den Ackerbohnen schlagen sich die im Vergleich zu Winterweizen geringen Erträge und der im Vergleich zu Winterraps geringere Marktpreis im Ergebnis nieder.

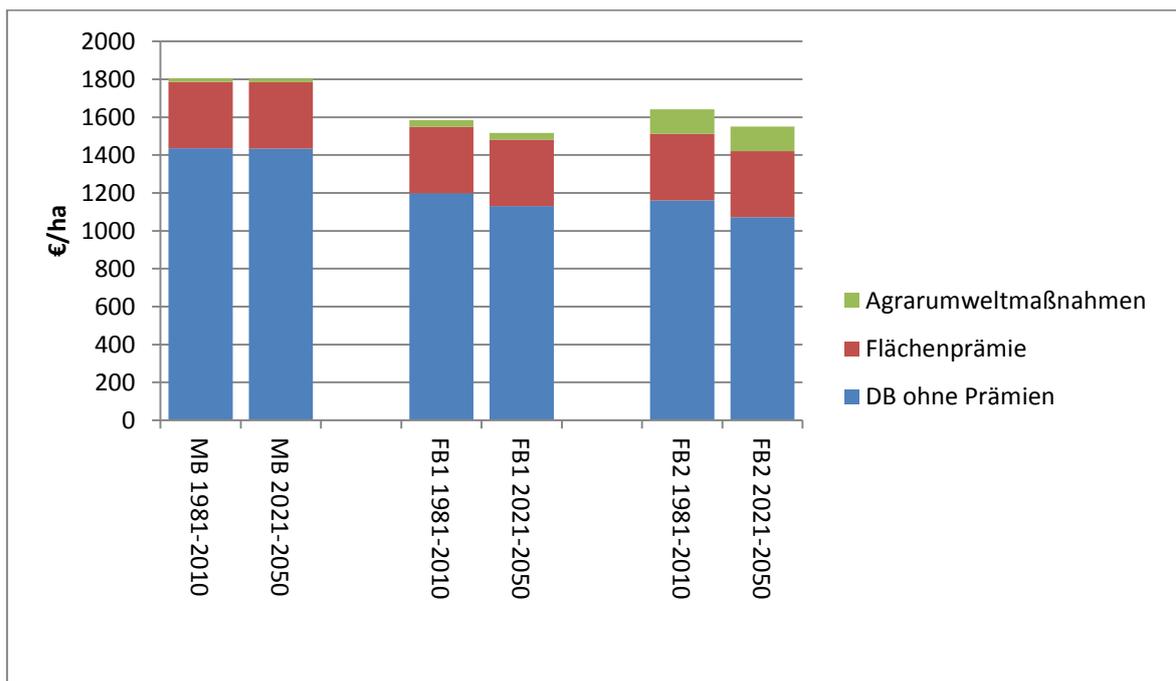


Abb. 15: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Neben den Deckungsbeiträgen der einzelnen Kulturen wurden diese auch für den gesamten Betriebszweig Ackerbau der drei Modellbetriebe berechnet. Die Ergebnisse für die Perioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 unter der Annahme eines Hochpreisszenarios sind in Abb. 15 dargestellt. Die exakten Werte sind im Anhang in Tab. 49 abgebildet. Wie zu erwarten ist, bringt die Fruchtfolge im Marktfruchtssystem mit rund 1800 Euro je Hektar in beiden Anbauperioden den höchsten Deckungsbeitrag. Darüber hinaus bewegt sich dieser auch unter Berücksichtigung klimatischer

Veränderungen auf einem konstanten Niveau. Trotz höherer Prämienansprüche rangiert der durchschnittliche Deckungsbeitrag des diversifizierten Futterbausystems rund 160 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 und rund 250 Euro je Hektar in der Periode 2021 bis 2050 unter dem des Marktfruchtsystems. Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen würde die Differenz bei rund 280 bzw. 360 Euro je Hektar liegen. Das konventionelle Futterbausystem liegt mit einem Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen von 1585 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 knapp 60 Euro unter der diversifizierten Vergleichsvariante. Ohne Prämien und Zuschüsse würde es mit 1198 Euro je Hektar um rund 40 Euro über dem des diversifizierten Futterbausystems liegen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch für die Klimaperiode 2021 bis 2050, wobei sich die Abstände zu Gunsten der konventionellen Variante minimal verändern. In diesem Zeitraum befindet sich ihr Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüsse nur noch rund 40 Euro unter dem des diversifizierten Betriebes. Abzüglich der Prämien und Zuschüsse in beiden Systemen würde er letztgenannten noch um 60 Euro übertreffen.

Tiefpreisszenario:

In gleicher Weise wurden die Deckungsbeiträge auch für ein Tiefpreisszenario berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 16 bis Abb. 18 graphisch dargestellt. Die dazugehörigen Zahlenwerte befinden sich im Anhang in Tab. 50.

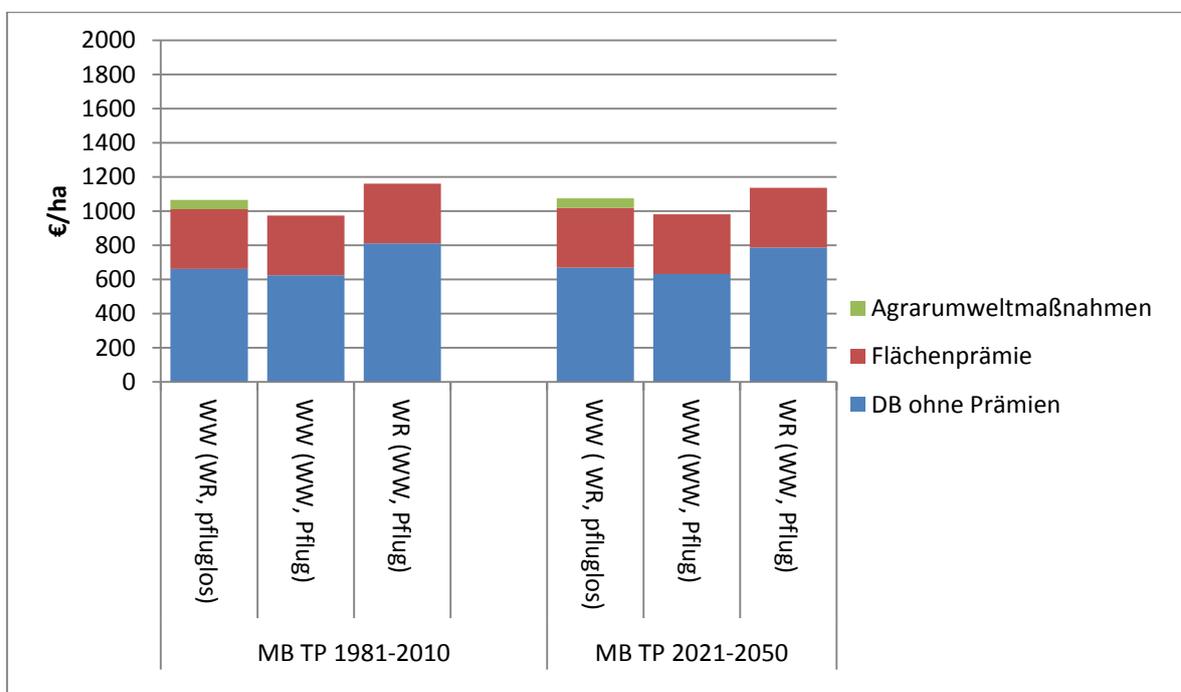


Abb. 16: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Unter den getroffenen Tiefpreisannahmen gewinnt der konventionelle Winterrapss demnach im Marktfruchtssystem an Vorzüglichkeit. Trotz fehlender Voraussetzungen für eine Mulchsaatprämie liegt dessen Deckungsbeitrag in der Periode 1981 bis 2010 mit 1160 Euro um knapp 100 Euro über dem des pfluglosen und um rund 190 Euro über dem des konventionell bestellten Winterweizens. Auch in der Klimaperiode 2021 bis 2050 zeigt sich, bedingt durch die konstanten Ertragserwartungen bei allen drei Kulturen, ein ähnliches Bild.

Im konventionellen Futterbausystem ist der Weizen nach wie vor die vorzüglichste Kultur. Der Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüsse beträgt im Durchschnitt der Jahre 1981 bis 2010 knapp 1070 Euro je Hektar. Im Vergleich zu den anderen Kulturen der betrachteten Fruchtfolge übersteigt dieser Wert den der Wintergerste um rund 240 und den des Silomaises um rund 440 Euro je Hektar. Anzumerken ist, dass bei der Wintergerste die Mulchsaatprämie aufgrund der konventionellen Bewirtschaftung nicht berücksichtigt ist. Wie im Hochpreisszenario bereits erwähnt, nimmt die Differenz des Deckungsbeitrags zwischen Silomais und Winterweizen aufgrund sinkender Durchschnittserträge beim Silomais bei gleichzeitig konstanten Weizenerträgen in der Periode 2021 bis 2050 weiter zu. Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen liegt der Deckungsbeitrag von Silomais mit 76 Euro pro Hektar nur noch knapp über einem Wert von Null. Zwischen Wintergerste und Winterweizen bleibt der Abstand nahezu unverändert.

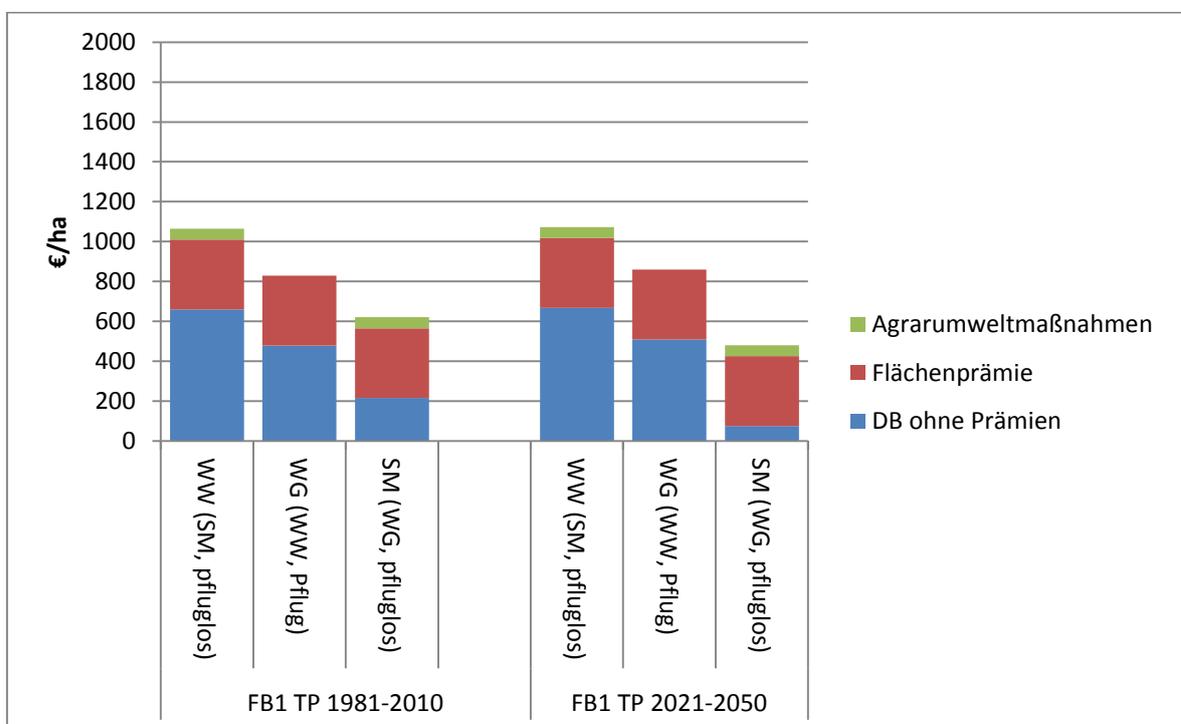


Abb. 17: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

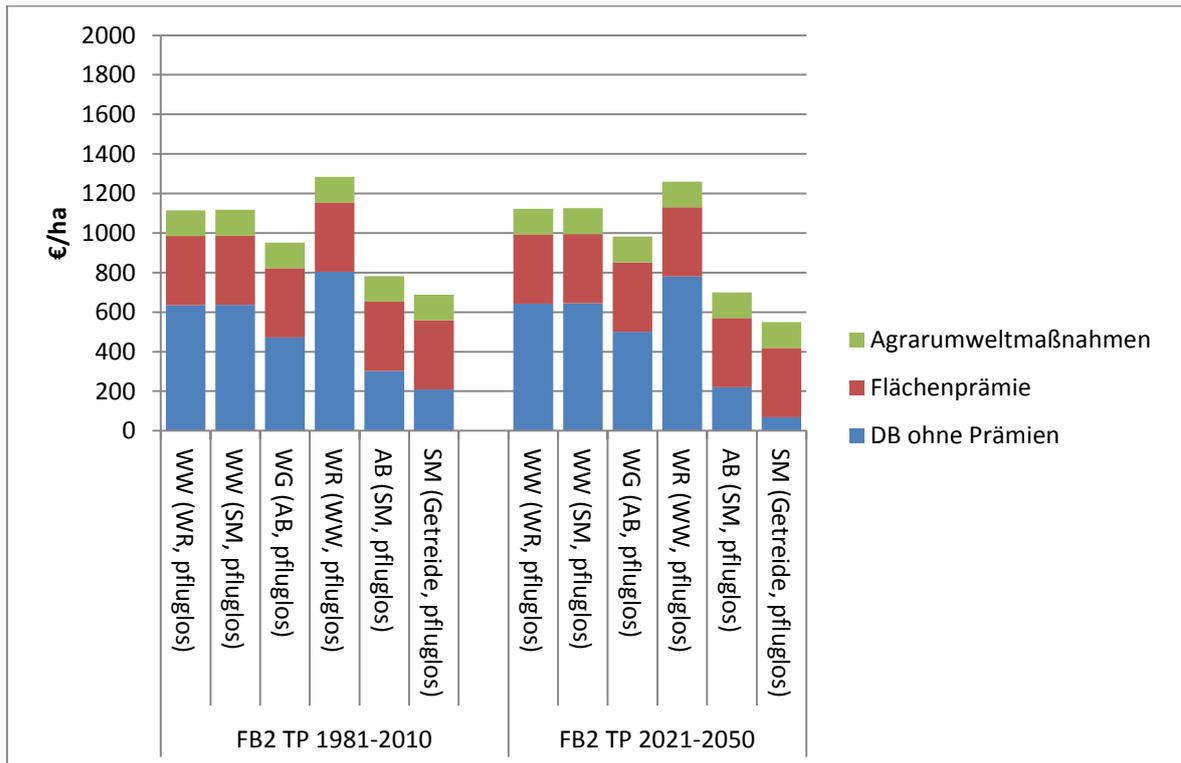


Abb. 18: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Im diversifizierten Futterbausystem besitzt der Winterraps wie auch im Marktfruchtsystem die höchsten Deckungsbeiträge. In der Periode 1981 bis 2010 liegt dessen Wert bei 1284 Euro je Hektar. Mit knapp 1120 Euro je Hektar folgen der Winterweizen und die Wintergerste mit 952 Euro pro Hektar. Im Gegensatz zum Hochpreisszenario befindet sich die Ackerbohne mit einem Deckungsbeitrag von 782 Euro je Hektar bei der Tiefpreisannahme vor dem Silomais, dessen Deckungsbeitrag 689 Euro pro Hektar beträgt. Analog zum Hochpreisszenario rangieren beide Kulturen jedoch deutlich unter den Ergebnissen der angebauten Winterungen. Darüber hinaus fallen die Deckungsbeiträge von Ackerbohne und Silomais in der prognostizierten Klimaperiode zwischen 2021 bis 2050 um 82 bzw. 140 Euro ab, wohingegen die Beträge der übrigen Kulturen nahezu unverändert bleiben. Auch in diesem Fall kann ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen beim Silomais nur ein Deckungsbeitrag von knapp 70 Euro je Hektar erwirtschaftet werden.

Die Ergebnisse für den gesamten Betriebszweig Ackerbau der betrachteten Anbausysteme sind in Abb. 19 dargestellt. Die zugrundeliegende Datenbasis ist in Tab. 51 im Anhang abgebildet. Aufgrund der Vorzüglichkeit von Winterweizen und Winterraps besitzt das Marktfruchtsystem auch im Tiefpreisszenario die höchsten Deckungsbeiträge, die darüber hinaus in der zukünftigen Klimaperiode 2021 bis 2050 nahezu unverändert bleiben. Aufgrund der hohen Prämienansprüche folgt das diversifizierte Futterbausystem. Dessen durchschnittliches Ergebnis liegt in der Periode

1981 bis 2010 um knapp 120 und in der Periode zwischen 2021 und 2050 um knapp 170 Euro unter dem Marktfruchtssystem.

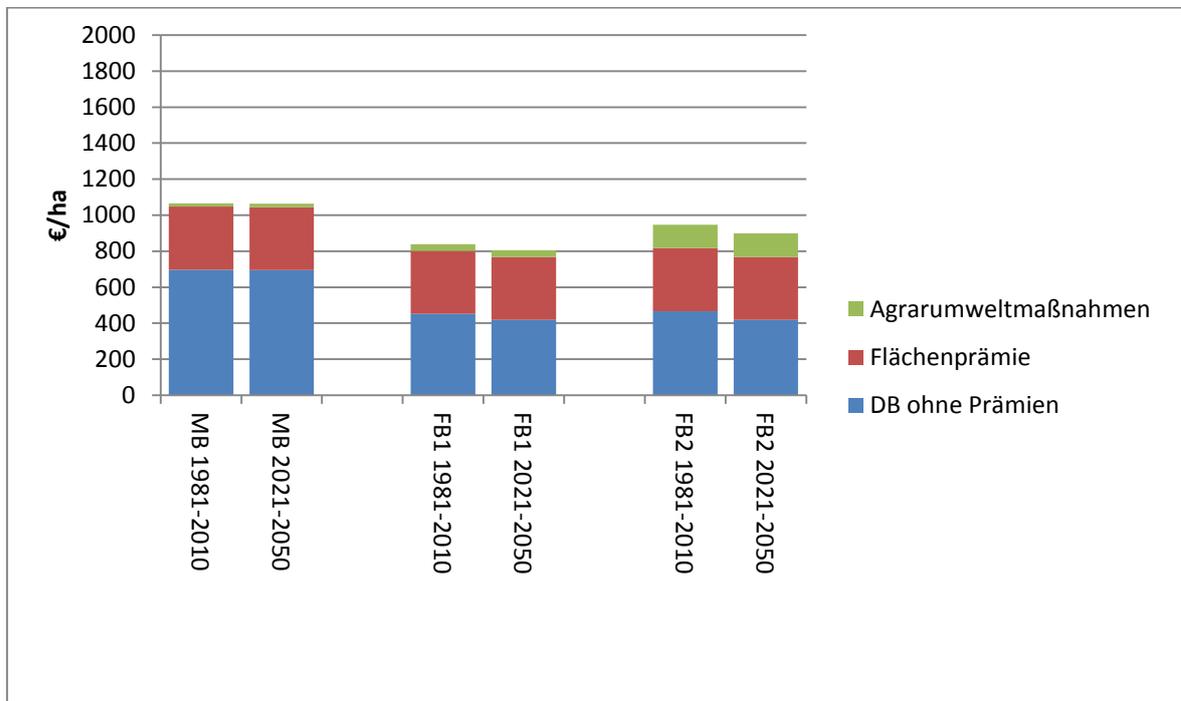


Abb. 19: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen würde der konventionelle Futterbaubetrieb nahezu gleichauf mit dem diversifizierten System liegen. Bedingt durch die niedrigeren Zahlungsansprüche befinden sich dessen Erfolgskennzahlen inklusive Prämien und Zuschüssen in der Periode 1981 bis 2010 knapp 110 Euro und 2021 bis 2050 rund 90 Euro unter dem des diversifizierten Modellbetriebes.

4.6. Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen am Standort Soest

Analog zum Standort Braunschweig wurden auch für den Standort Soest die Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen aus den Anbausystemen und des gesamten Betriebszweigs Ackerbau für die Perioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 berechnet.

Hochpreisszenario:

Die Ergebnisse des Hochpreisszenarios am Standort Braunschweig sind in Abb. 20 bis Abb. 22 dargestellt. Ebenfalls enthalten sind neben den reinen Deckungsbeiträgen ohne Prämien und staatliche Zuschüsse in farblicher Abgrenzung die Zahlungen für Agrarumweltmaßnahmen und die

allgemeine Flächenprämie. Die absoluten Werte zu den Abbildungen stehen im Anhang in Tab. 52 und Tab. 48.

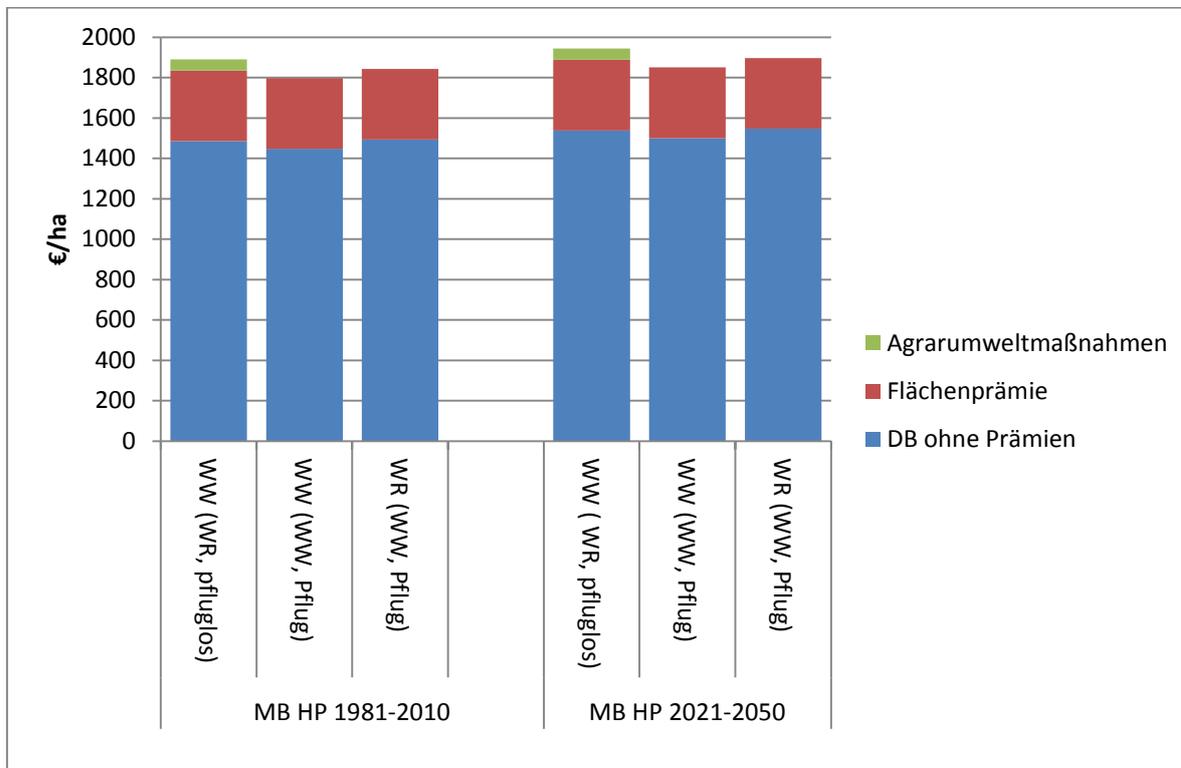


Abb. 20: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfrucht“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Ähnlich wie am Standort Braunschweig liegen die Deckungsbeiträge von Winterweizen und Wintertraps auch am Standort Soest sehr nahe beieinander. Den höchsten Wert in der Klimaperiode 1981 bis 2010 erreicht der pfluglos bestellte Winterweizen mit 1890 Euro je Hektar inklusive Prämien und Zuschüssen. Darin enthalten sind eine Mulchsaatprämie in Höhe von 55 Euro pro Hektar und die allgemeine Flächenprämie in Höhe von 350 Euro je Hektar. Der konventionell bestellte Winterweizen besitzt keinen Anspruch auf eine Mulchsaatprämie. Aus diesem Grund und wegen der höheren Kosten in der Bodenbearbeitung liegt der Deckungsbeitrag hier um rund 90 Euro unter dem der pfluglosen Variante.

Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen erreicht der konventionell bestellte Wintertraps dagegen einen um knapp 10 Euro höheren Deckungsbeitrag als der pfluglose Winterweizen. Da beim Raps keine Mulchsaatprämie gezahlt wird, liegt dessen Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen mit 1843 Euro je Hektar knapp unter dem des Weizens. Auch in der Periode 2021 bis 2050 bewegen sich die Abstände der Ergebnisse aller drei Kulturen auf einem ähnlichen Niveau. Aufgrund leicht steigender Ertragserwartungen liegen alle Werte um wenige Euro über denen zwischen 1981 und 2010.

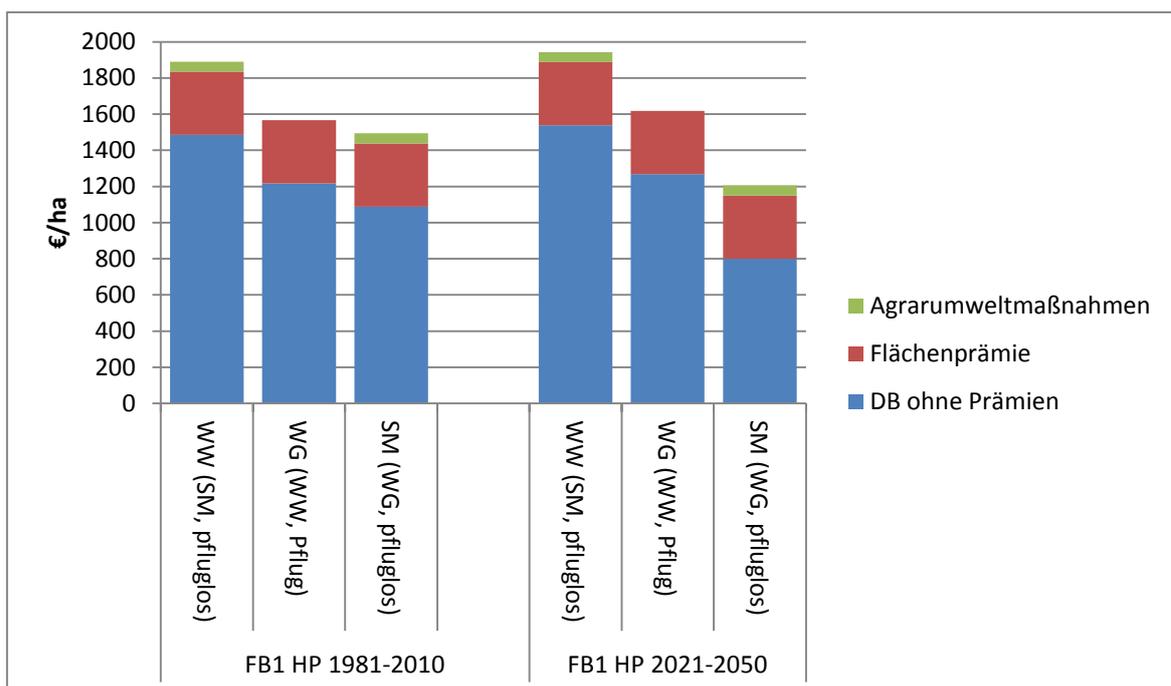


Abb. 21: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Im konventionellen Futterbausystem besitzt der Winterweizen in der Periode 1981 bis 2010 mit einem Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen in Höhe von 1890 Euro je Hektar den mit Abstand höchsten Wert. Die Wintergerste liegt mit 1567 Euro pro Hektar rund 320 darunter. Neben geringeren Ertragserwartungen und einem niedrigeren Marktpreis als bei Weizen hat die konventionell bestellte Wintergerste auch keinen Anspruch auf eine Mulchsaatprämie.

Beim pfluglos bestellten Silomais besteht dieser Anspruch, sodass dessen Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen mit knapp 1500 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 nur geringfügig unter dem der Wintergerste liegt. Aufgrund sinkender Ertragserwartungen beim Mais und leicht steigender Erträge bei Wintergetreide vergrößert sich diese Differenz in der Klimaperiode 2021 bis 2050. Der durchschnittliche Deckungsbeitrag für Silomais sinkt in diesem Zeitraum auf rund 1200 Euro je Hektar, wohingegen der der Wintergerste auf 1618 Euro je Hektar ansteigen kann.

Analog zum Standort Braunschweig besitzt das diversifizierte Futterbausystem durch die praktizierte Direktsaat und die ausgedehnte Fruchtfolge auch am Standort Soest die höchsten Prämienansprüche, sodass die Deckungsbeiträge vergleichbarer Kulturen im diversifizierten Futterbausystem höher ausfallen als in den übrigen Anbausystemen. Die besten Werte werden bei Winterraps und Winterweizen erzielt. Beide Kulturen liegen in der Periode 1981 bis 2010 mit Deckungsbeiträgen von 1972 bzw. 1947 Euro je Hektar inklusive Prämien und Zuschüsse fast gleichauf. Als nächstes folgen die Wintergerste mit knapp 1700 Euro je Hektar, der Silomais mit rund 1570 Euro je

Hektar und die Ackerbohne mit rund 1310 Euro pro Hektar. Da jede dieser Kulturen die gleichen Prämienansprüche besitzt, entsprechen die Differenzen der genannten Deckungsbeiträge auch denen ohne Prämien und Zuschüsse.

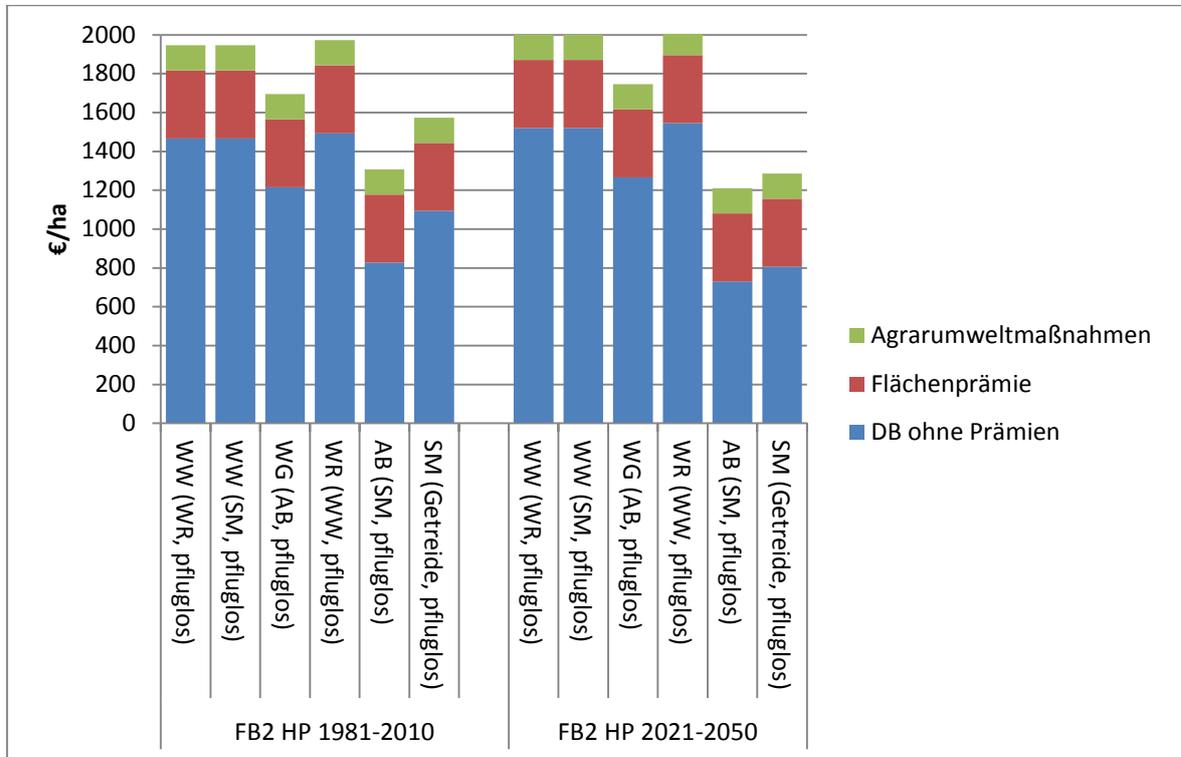


Abb. 22: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

In der Klimaperiode 2021 bis 2050 ändert sich nichts an der beschriebenen Rangfolge. Die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Winterungen und Sommerungen wachsen jedoch an. Während bei den Deckungsbeiträgen der winterharten Kulturen ein minimaler Zuwachs zu verzeichnen ist, sinken die Deckungsbeiträge bei Ackerbohne um knapp 100 Euro und bei Silomais um knapp 290 Euro. Die Gründe liegen in den unterschiedlichen Veränderungen der Ertragserwartungen. Während diese bei den winterharten Kulturen konstant bleiben oder leicht ansteigen, sinken sie bei den spät abreifenden Sommerungen (vgl. 4.3).

Die Ergebnisse für den gesamten Betriebszweig Ackerbau der betrachteten Anbausysteme sind in Abb. 23 dargestellt. Die exakten Werte der Berechnung befinden sich im Anhang in Tab. 53. Ähnlich wie am Standort Braunschweig können auch am Standort Soest die höchsten Deckungsbeiträge im Marktfruchtsystem erzielt werden. Diese liegen bei 1844 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 und steigen auf knapp 1900 Euro pro Hektar in der Periode 2021 bis 2050 an. Dahinter folgt aufgrund der hohen Prämienansprüche das diversifizierte Futterbausystem mit Durchschnittswerten von 1717 Euro je Hektar im Zeitraum 1981 bis 2010 und 1651 Euro je Hektar zwi-

schen 2021 und 2050. Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen würde das konventionelle Futterbausystem nahezu dieselben Deckungsbeiträge wie das diversifizierte erreichen. Aufgrund der engeren Fruchtfolge und der intensiveren Bodenbearbeitung erhält dieser Modellbetrieb jedoch geringere staatliche Zuwendungen, sodass die Höhe der Deckungsbeiträge geringfügig unter denen des diversifizierten Systems liegt.

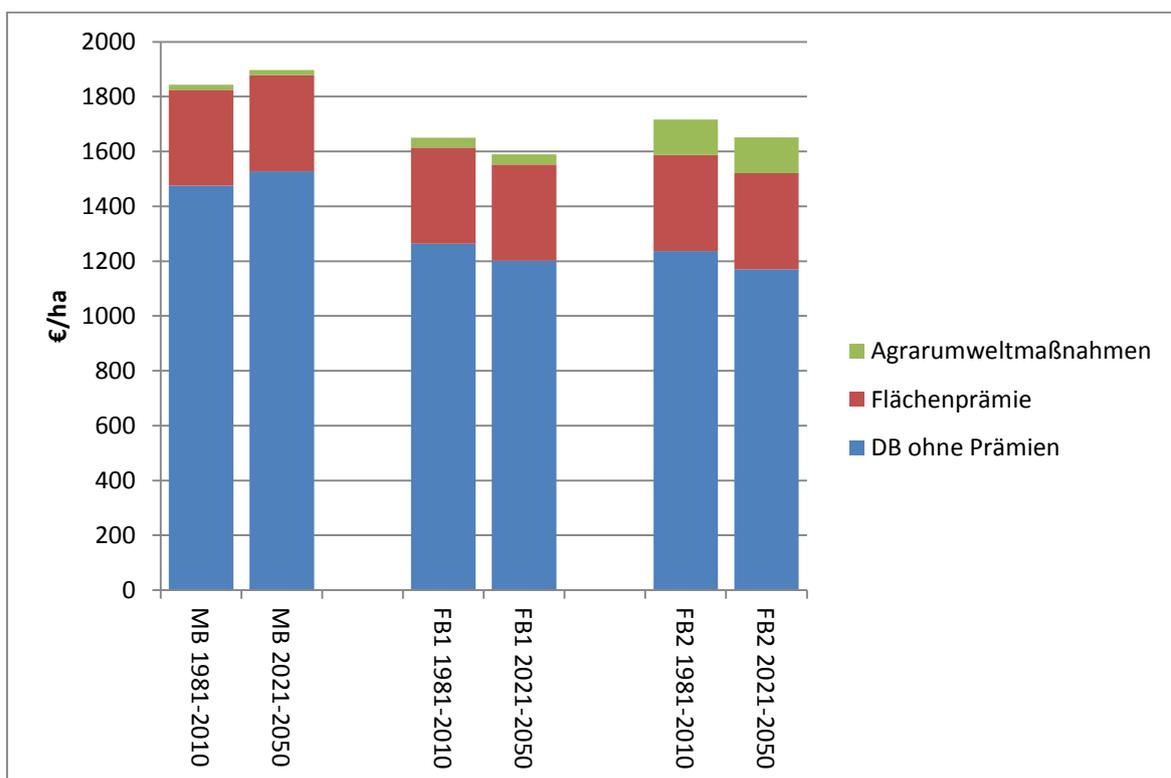


Abb. 23: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Hochpreisszenario, HP)

Tiefpreisszenario:

Entsprechend den Ergebnissen aus dem Hochpreisszenario sind die des Tiefpreisszenarios für die einzelnen Kulturen der Anbausysteme in den Abb. 24 bis Abb. 26 dargestellt. Die dazugehörigen Zahlenwerte aus der Berechnung befinden sich in Tab. 54 im Anhang.

Im Gegensatz zum Hochpreisszenario, in dem die Deckungsbeiträge der angebauten Kulturen im Marktfurchtsystem sehr nahe beieinander lagen, besitzt der Winterraps im Tiefpreisszenario einen deutlicheren Vorsprung vor dem Winterweizen. Trotz fehlenden Anspruchs auf eine Mulchsaatprämie liegt dessen Deckungsbeitrag mit 1214 Euro je Hektar knapp 140 Euro über dem des pfluglos bestellten Winterweizens, bei dem zusätzlich eine Mulchsaatprämie in Höhe von 55 Euro je Hektar gezahlt wird. Im Vergleich zum Winterweizen mit Pflugeinsatz beträgt diese Differenz rund 230 Euro.

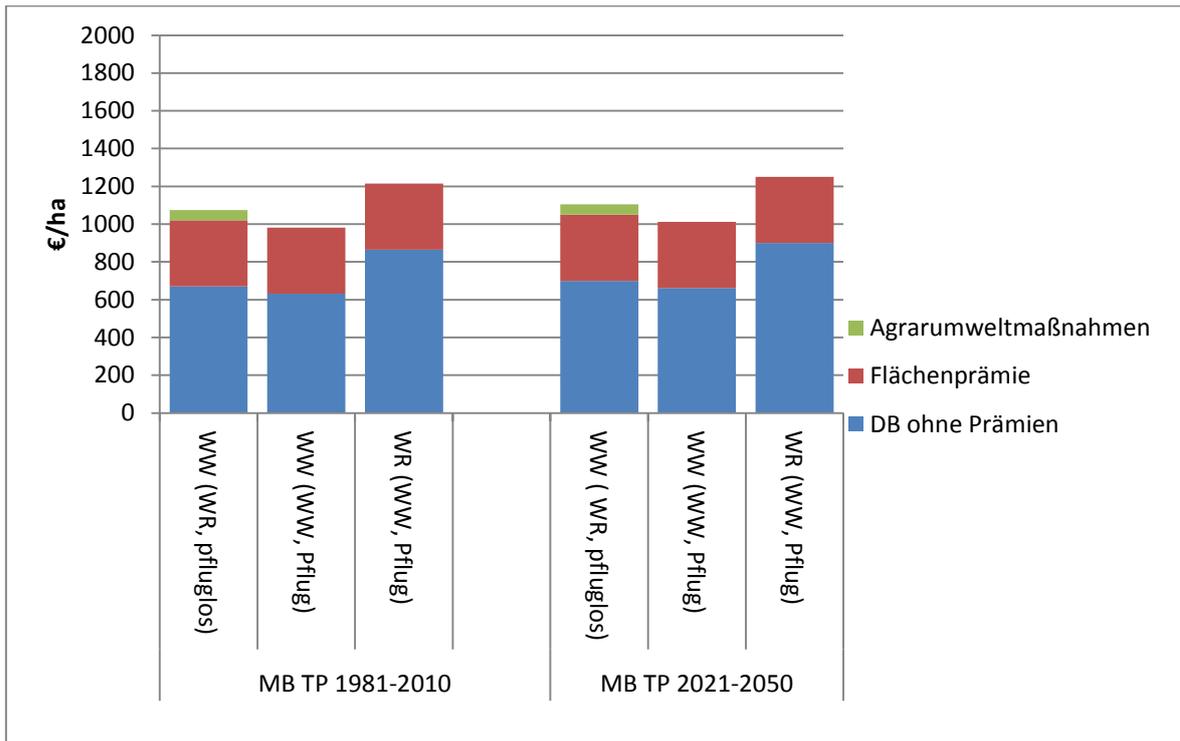


Abb. 24: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Marktfucht“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

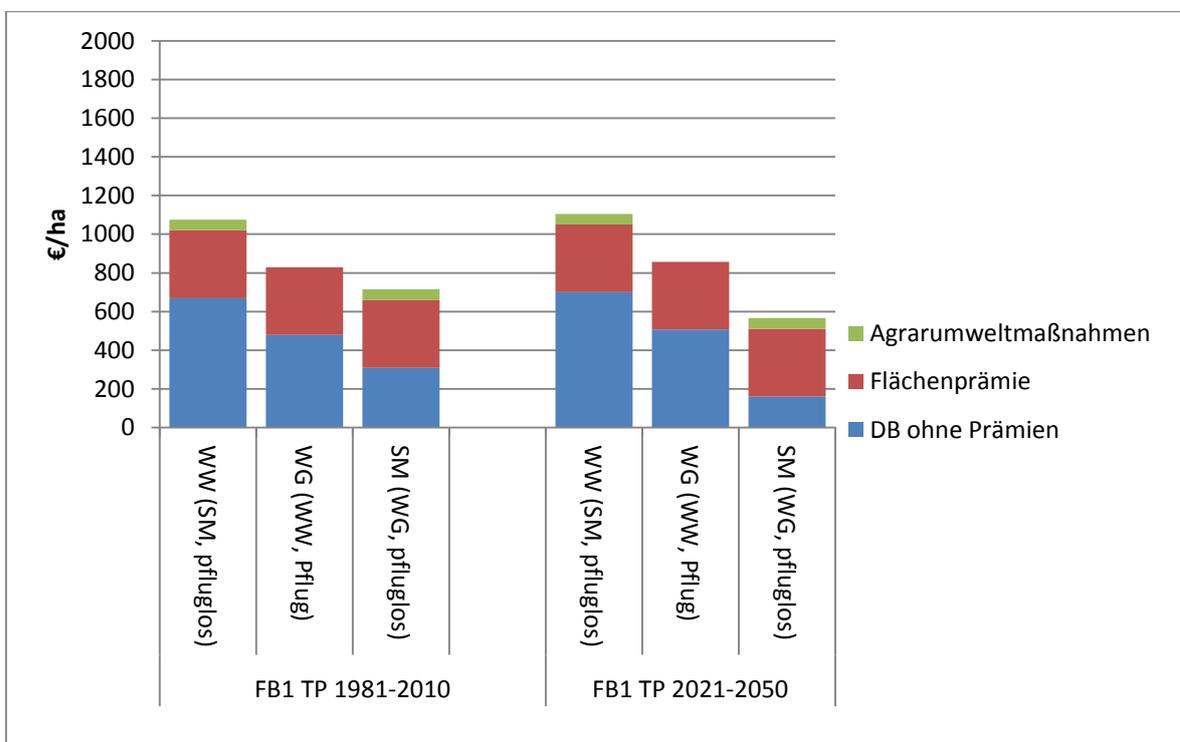


Abb. 25: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau konventionell“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Im konventionellen Futterbaubetrieb befindet sich der Deckungsbeitrag des Winterweizens in der Klimaperiode 1981 bis 2010 mit 1105 Euro je Hektar knapp 250 Euro über dem der Wintergerste.

Im Gegensatz zum Weizen wird diese konventionell bestellt und besitzt damit keinen Anspruch auf eine Mulchsaatprämie. Der Silomais erreicht trotz Mulchsaatprämie mit 719 Euro pro Hektar nicht den Betrag der Wintergerste und besitzt damit den niedrigsten Wert innerhalb der betrachteten Fruchtfolge. In der Periode 2021 bis 2050 sinkt dieser aufgrund einer verminderten Ertragserwartung weiter auf rund 570 Euro je Hektar, während bei Weizen und Gerste leichte Zuwächse zu beobachten sind.

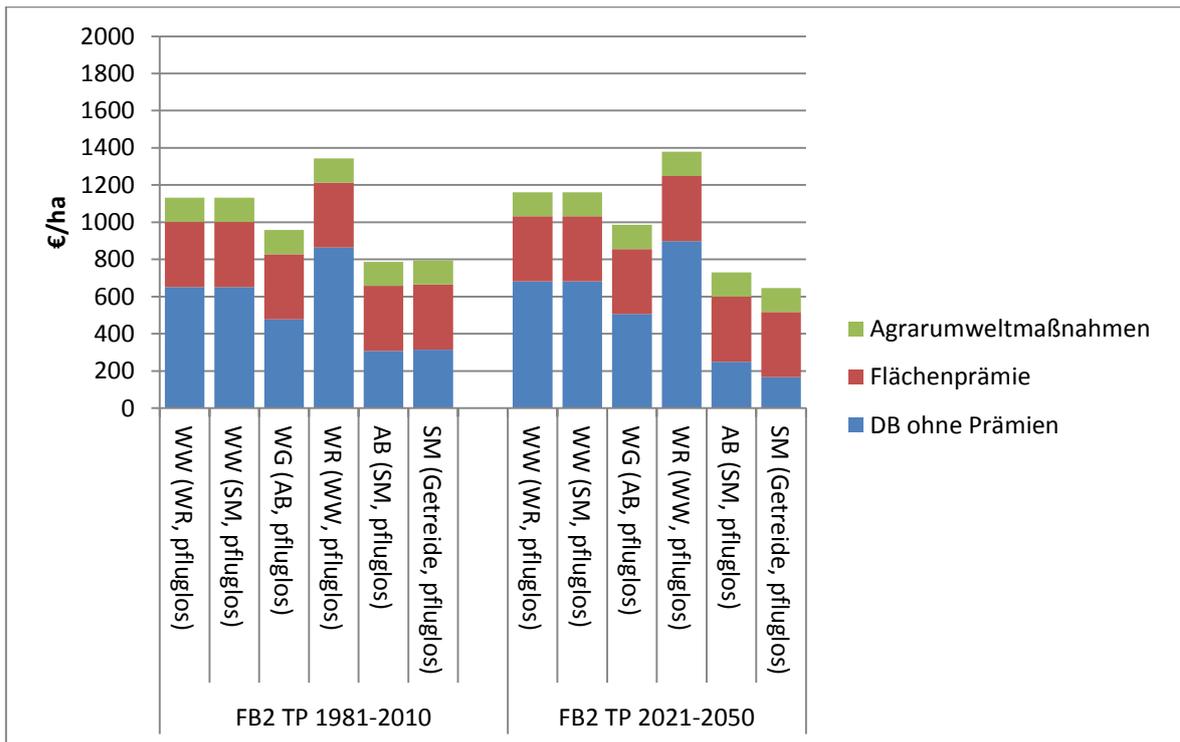


Abb. 26: Deckungsbeträge inklusive Prämien der Einzelkulturen im System „Futterbau diversifiziert“ am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Im diversifizierten Futterbausystem besitzt der Winterraps in beiden Klimaperioden die mit Abstand höchsten Deckungsbeiträge. Mit 1343 Euro je Hektar im Zeitraum 1981 bis 2010 bzw. 1379 Euro je Hektar zwischen 2021 und 2050 liegen die Werte rund 210 bzw. 220 Euro über denen des Winterweizens, bei dem der zweitstärkste Wert erreicht wird. An dritter Stelle folgt die Wintergerste mit rund 960 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 und knapp 990 Euro je Hektar in der zukünftigen Periode. Die Ackerbohne und der Silomais liegen im Zeitraum 1981 bis 2010 mit einem Deckungsbeitrag inklusive Prämien und Zuschüssen von rund 790 Euro je Hektar nahezu gleichauf. Während dieser bei der Ackerbohne in der Klimaperiode 2021 bis 2050 nur leicht auf 730 Euro je Hektar sinkt, sind beim Silomais deutlichere Verluste zu erkennen. Hier fällt der Wert um knapp 150 Euro auf insgesamt 646 Euro je Hektar.

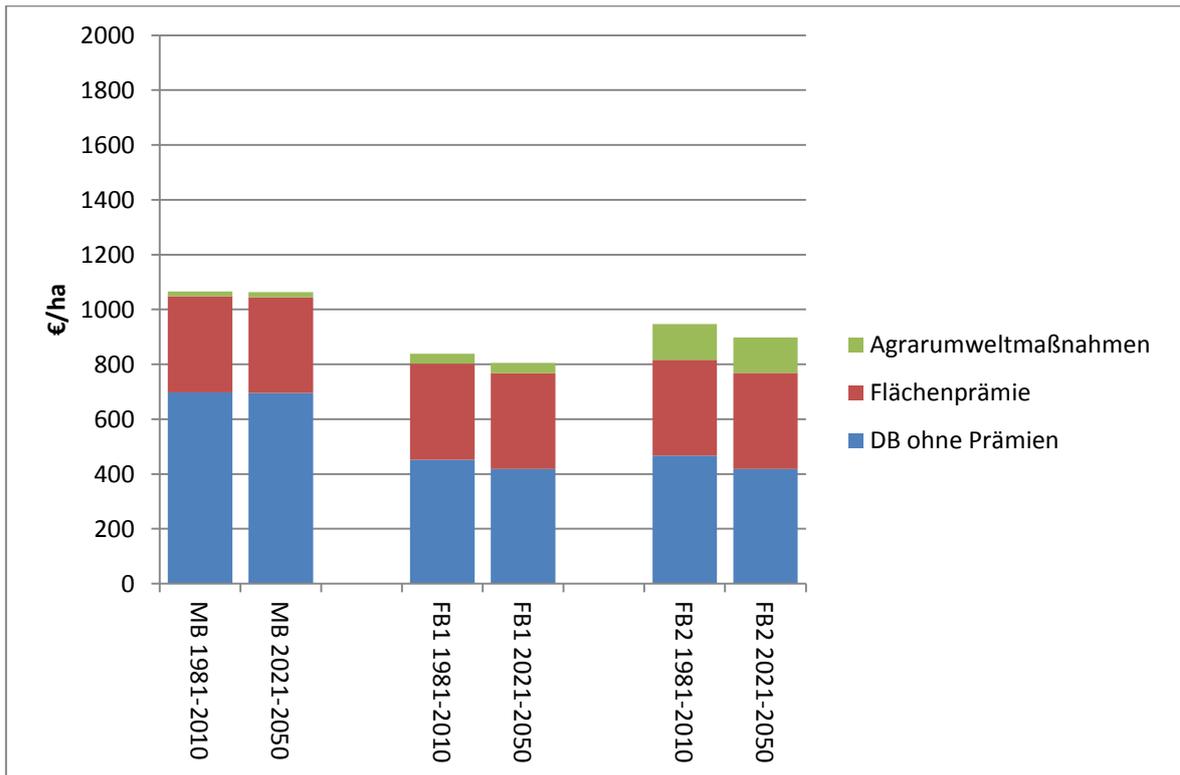


Abb. 27: Deckungsbeträge inklusive Prämien des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in den Perioden 1981-2010 und 2021-2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Die Ergebnisse für den gesamten Betriebszweig Ackerbau der einzelnen Anbausysteme sind in Abb. 27 dargestellt. Die zugrundeliegenden Zahlenwerte aus der Berechnung stehen im Anhang in Tab. 55. Wie in den bereits vorgestellten Ergebnissen besitzt das Marktfruchtsystem auch im Tiefpreisszenario am Standort Soest die höchsten Deckungsbeiträge. Diese liegen in der Klimaperiode 1981 bis 2010 bei 1090 Euro pro Hektar und in der Periode 2021 bis 2050 bei 1122 Euro je Hektar. Das diversifizierte Futterbausystem folgt mit Deckungsbeiträgen von rund 990 Euro je Hektar zwischen 1981 und 2010 bzw. rund 960 Euro je Hektar zwischen 2021 und 2050. Damit rangiert der Deckungsbeitrag in der zurückliegenden Periode knapp 100 Euro und in der zukünftigen Periode rund 160 Euro unter dem Marktfruchtsystem. Die geringsten Werte werden im konventionellen Futterbaubetrieb erreicht. Maßgeblich beeinflusst durch die geringeren Prämienansprüche im Vergleich zum diversifizierten System fallen sie mit 873 Euro je Hektar in 1981 bis 2010 und 843 Euro je Hektar in 2021 bis 2050 um rund 115 Euro geringer aus, als in der diversifizierten Variante. Ohne Berücksichtigung von Prämien und Zuschüssen würden beide Futterbausysteme nahezu gleichauf liegen. Bei einem Vergleich der gegenwärtigen mit den prognostizierten Deckungsbeiträgen fällt auf, dass diese im Marktfruchtsystem minimal ansteigen, wohingegen sie in den anderen Systemen aufgrund der negativen Ertragsentwicklungen bei den Sommerungen sinken.

4.7. Indifferenzpreise der angebauten Kulturen im Vergleich zu Winterweizen

Die Ergebnisse der Deckungsbeitragsrechnungen in den Abschnitten 4.5 und 4.6 hängen stark von den zugrunde gelegten Preis- und Mengengerüsten beim Ertrag und Erlös der betrachteten Ernteware ab. Darüber hinaus basieren die beschriebenen Deckungsbeiträge der angebauten Kulturen in den Modellbetrieben auf festen Preisrelationen in Bezug auf den Weizenpreis. In einigen Fällen kann es vorkommen, dass die aufgeführten Anbaualternativen zum Winterweizen einen höheren Marktpreis erzielen, als der über die beschriebenen Preisrelationen ermittelte. Somit besteht die Möglichkeit, dass der Austausch des Winterweizens durch eine andere Kultur eine Steigerung des Deckungsbeitrags bewirken kann.

Aus diesem Grund ist es sinnvoll, den Marktpreis zu bestimmen, ab dem eine andere Kultur den gleichen Deckungsbeitrag wie der Winterweizen erzielt. Diese Preisgrenze entspricht dem Indifferenzpreis (Toews und Kuhlmann, 2009). Liegt der Marktpreis einer Kultur oberhalb des Indifferenzpreises, ist diese aus ökonomischer Sicht vorteilhaft in Bezug auf den Weizenanbau.

Standort Braunschweig:

Ähnlich wie der Deckungsbeitrag ist auch der Indifferenzpreis eng mit den Ertragsleistungen und dem Marktpreisen korreliert. Im betrachteten Fall wurde der Feldertrag der geernteten Frischmasse aus dem Durchschnitt der Jahre 1981 bis 2010 mit den Ergebnissen aus der Ertragsmodellierung berechnet. Die variablen Kosten zur Ermittlung des Deckungsbeitrages sind ebenfalls aus den durchschnittlichen Beträgen der Periode 1981 bis 2010 für eine konservierende Bodenbearbeitung bestimmt. Beim Preis für Winterweizen werden die obere und untere Preisgrenze aus den bereits beschriebenen Preisszenarien in Tab. 17 angenommen. Im Hochpreisszenario liegt der Weizenpreis bei 22 Euro je Dezitonne getrockneter Marktware und im Tiefpreisszenario bei 14 je Dezitonne. Staatliche Prämien und Zuschüsse sind nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse zur Berechnung des Indifferenzpreises sind in Tab. 37 für das Hochpreisszenario und in Tab. 38 für das Tiefpreisszenario abgebildet.

Unter der vereinfachten Annahme konstanter variabler Kosten würde die Wintergerste im Hochpreisszenario ab einem Preis von 23,73 Euro je Dezitonne die gleichen Deckungsbeiträge wie der Winterweizen liefern. Beim Winterraps beträgt der Indifferenzpreis 45,55 Euro je Dezitonne, bei der Ackerbohne 31,15 Euro je Dezitonne und beim Silomais 4,43 Euro je Dezitonne. Verglichen mit den errechneten Preisrelationen müsste der Preis von Wintergerste um 13 Prozentpunkte, der von Winterraps um 1 Prozentpunkt, der von Ackerbohne um 42 Prozentpunkte und der von Silomais um 27 Prozentpunkte über dem aus empirischen Preisrelationen errechneten Wert liegen, um den gleichen Deckungsbeitrag wie beim Winterweizen erwirtschaften zu können.

Tab. 37: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Braunschweig in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Hochpreisszenario, HP)

	Einheit	WW	WG	WR	AB	SM
<i>Ertrag (FM)</i>	<i>dt/ha</i>	102	92	47	66	582
<i>Preis/Indifferenzpreis (FM)</i>	<i>€/dt</i>	22	23,73	45,55	31,15	4,43
Leistung	€/ha	2244	2183	2141	2056	2579
Saatgut	€/ha	80	79	66	97	178
Dünger	€/ha	258	230	208	110	555
Pflanzenschutz	€/ha	172	151	165	162	95
Trocknungskosten	€/ha	51	46	23	33	0
Hagelversicherung	€/ha	16	14	15	10	14
Direktkosten gesamt	€/ha	577	520	477	412	842
Var. Maschinenkosten ohne Diesel	€/ha	34	34	33	33	26
Dieselskosten	€/ha	52	50	51	44	38
Lohnkosten	€/ha	93	91	92	79	70
Lohnunternehmer	€/ha	105	105	105	105	220
Arbeits erledigungskosten gesamt	€/ha	284	280	281	261	354
Variable Kosten gesamt	€/ha	861	800	758	673	1196
Deckungsbeitrag	€/ha	1383	1383	1383	1383	1383

Im Tiefpreisszenario betragen die Indifferenzpreise für Wintergerste 14,86 Euro je Dezitonne, für Winterraps 28,19 Euro je Dezitonne, für Ackerbohne 18,79 Euro je Dezitonne und für Silomais 3,03 Euro je Dezitonne. In der prozentualen Betrachtung wären Preissteigerungen um 14 Prozentpunkte bei Wintergerste, 34 Prozentpunkte bei Ackerbohne und 32 Prozentpunkte bei Silomais in Bezug auf den durch die Preisrelation errechneten Marktpreis erforderlich, um mit dem Anbau von Winterweizen gleichzuziehen. Der Wert von Winterraps liegt um 12 Prozentpunkte unterhalb des verglichenen Betrags.

Passen zu diesen Ergebnissen zeigt Abb. 28 eine graphische Darstellung der errechneten Indifferenzpreise in Bezug auf preisliche Veränderungen des Winterweizens. Abgebildet sind die Eckpreise von Winterweizen aus den beschriebenen Hoch- und Tiefpreisszenarien und die dazugehörigen Indifferenzpreise der übrigen Kulturen aus den Anbausystemen. Darüber hinaus sind die entsprechenden linearen Regressionsgeraden zwischen den Eckpreisen einer jeweiligen Kultur enthalten. Diese zeigen einen tendenziellen Verlauf der Indifferenzpreise im Bezug auf einen sich ändernden Weizenpreis. Es fällt auf, dass sich die Preisabstände anderer Kulturen zum Weizenpreis bei steigenden Marktpreisen vergrößern.

Tab. 38: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Braunschweig in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Tiefpreisszenario, TP)

	Einheit	WW	WG	WR	AB	SM
Ertrag (FM)	dt/ha	102	92	47	66	582
Preis/Indifferenzpreis (FM)	€/dt	14	14,86	28,19	18,79	3,03
Leistung	€/ha	1428	1367	1325	1240	1763
Saatgut	€/ha	80	79	66	97	178
Dünger	€/ha	258	230	208	110	555
Pflanzenschutz	€/ha	172	151	165	162	95
Trocknungskosten	€/ha	51	46	23	33	0
Hagelversicherung	€/ha	16	14	15	10	14
Direktkosten gesamt	€/ha	577	520	477	412	842
Var. Maschinenkosten ohne Diesel	€/ha	34	34	33	33	26
Dieselskosten	€/ha	52	50	51	44	38
Lohnkosten	€/ha	93	91	92	79	70
Lohnunternehmer	€/ha	105	105	105	105	220
Arbeits erledigungskosten gesamt	€/ha	284	280	281	261	354
Variable Kosten gesamt	€/ha	861	800	758	673	1196
Deckungsbeitrag	€/ha	567	567	567	567	567

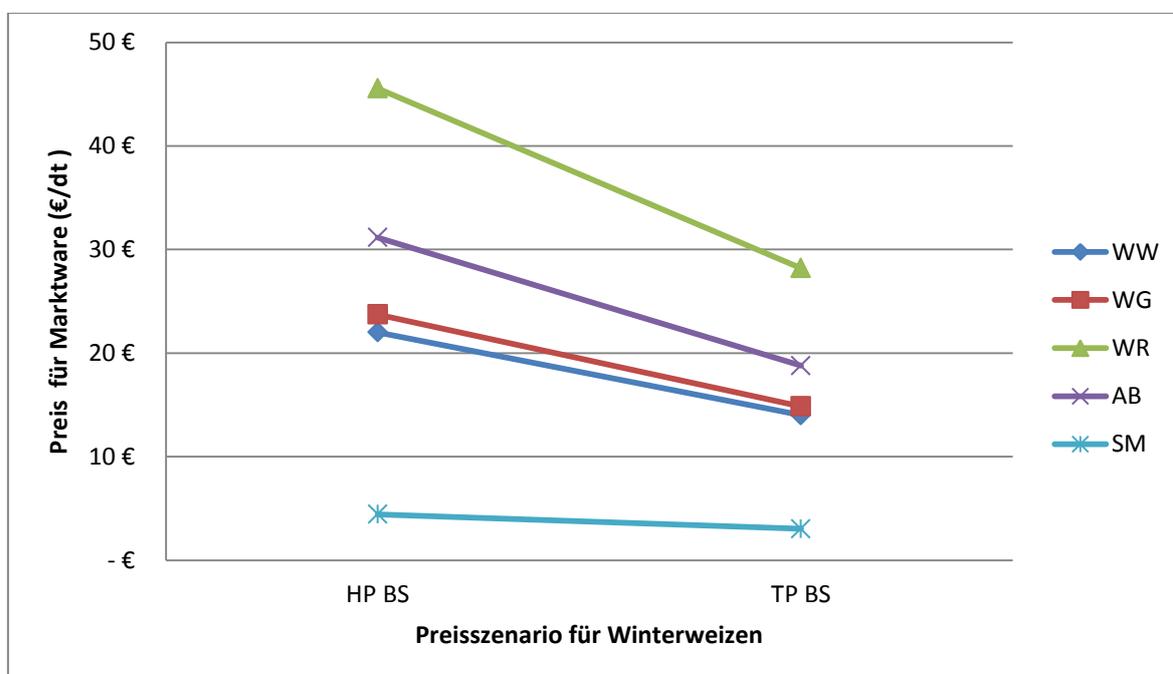


Abb. 28: Graphische Darstellung der errechneten Indifferenzpreise für die am Standort Braunschweig angebauten Kulturen in den Modellbetrieben im Bezug zu Winterweizen inklusive einer farblich angepassten Regressionsgeraden zwischen den Eckpreisen aus dem Hoch- und Tiefpreisszenario

Standort Soest:

Analog zum Standort Braunschweig wurden auch am Standort Soest die Preisschwellen berechnet, ab denen eine Kultur den gleichen Deckungsbeitrag wie der Winterweizen liefert. Die Ergebnisse des Hochpreisszenarios sind in Tab. 39, die des Tiefpreisszenarios in Tab. 40 dargestellt.

Tab. 39: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Soest in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Hochpreisszenario, HP)

	Einheit	WW	WG	WR	AB	SM
Ertrag (FM)	dt/ha	103	93	49	65	654
Preis/Indifferenzpreis (FM)	€/dt	22	23,72	44,35	31,94	4,08
Leistung	€/ha	2266	2206	2173	2076	2671
Saatgut	€/ha	80	79	66	97	178
Dünger	€/ha	261	232	219	110	628
Pflanzenschutz	€/ha	172	151	165	162	95
Trocknungskosten	€/ha	51	46	24	33	0
Hagelversicherung	€/ha	16	14	15	10	16
Direktkosten gesamt	€/ha	580	522	489	412	917
Var. Maschinenkosten ohne Diesel	€/ha	35	35	35	35	24
Dieselskosten	€/ha	52	51	51	44	38
Lohnkosten	€/ha	93	92	92	79	71
Lohnunternehmer	€/ha	105	105	105	105	220
Arbeits erledigungskosten gesamt	€/ha	285	283	283	263	353
Variable Kosten gesamt	€/ha	865	805	772	675	1270
Deckungsbeitrag	€/ha	1401	1401	1401	1401	1401

Unter den getroffenen Annahmen würden die Wintergerste ab einem Marktpreis von 23,72 Euro je Dezitonne, der Winterraps ab 44,35 Euro je Dezitonne, die Ackerbohne ab 31,94 Euro je Dezitonne und der Silomais ab 4,08 Euro je Dezitonne den Deckungsbetrag des Winterweizens erreichen. Verglichen mit dem nach Preisrelationen berechneten Werten ergeben sich notwendige Preisanstiege bei Wintergerste um 13 Prozentpunkte, bei Ackerbohnen um 45 Prozentpunkte und bei Silomais um 17 Prozentpunkte. Der Indifferenzpreis von Winterraps ist im betrachteten Fall nahezu identisch mit dem nach Preisrelationen berechneten Wert.

Tab. 40: Indifferenzpreise der angebauten Kulturen am Standort Soest in Bezug auf Winterweizen für eine konservierende Bodenbearbeitung (Tiefpreisszenario, TP)

	Einheit	WW	WG	WR	AB	SM
Ertrag (FM)	dt/ha	103	93	49	65	654
Preis/Indifferenzpreis (FM)	€/dt	14	14,86	27,53	19,26	2,82
Leistung	€/ha	1442	1382	1349	1252	1847
Saatgut	€/ha	80	79	66	97	178
Dünger	€/ha	261	232	219	110	628
Pflanzenschutz	€/ha	172	151	165	162	95
Trocknungskosten	€/ha	51	46	24	33	0
Hagelversicherung	€/ha	16	14	15	10	16
Direktkosten gesamt	€/ha	580	522	489	412	917
Var. Maschinenkosten ohne Diesel	€/ha	35	35	35	35	24
Dieselskosten	€/ha	52	51	51	44	38
Lohnkosten	€/ha	93	92	92	79	71
Lohnunternehmer	€/ha	105	105	105	105	220
Arbeits erledigungskosten gesamt	€/ha	285	283	283	263	353
Variable Kosten gesamt	€/ha	865	805	772	675	1270
Deckungsbeitrag	€/ha	577	577	577	577	577

Im Tiefpreisszenario betragen die Indifferenzpreise 14,86 Euro je Dezitonne bei Wintergerste, 27,53 Euro je Dezitonne bei Winterraps, 19,26 Euro je Dezitonne bei Ackerbohne und 2,82 Euro je Dezitonne bei Silomais. Bezogen auf die nach Preisrelationen berechneten Werte ergeben sich zum Erreichen des Deckungsbeitrags von Winterweizen erforderliche Preisanstiege in Höhe von 14 Prozentpunkten bei Wintergerste, 38 Prozentpunkten bei Ackerbohne und 23 Prozentpunkten bei Silomais. Bei Winterraps liegt der Indifferenzpreis unterhalb des Preises nach Preisrelationen, sodass dieser bereits unter aktuellen Marktpreisen eine ökonomisch sinnvolle Alternative zum Winterweizen darstellt.

Den Zusammenhang der Indifferenzpreise bei einer preislichen Veränderung des Weizenpreises innerhalb der betrachteten Szenarien ist in Abb. 29 ebenfalls anhand der linearen Regressionsgeraden dargestellt. Wie auch am Standort Braunschweig vergrößern sich die absoluten Preisabstände zwischen Winterweizen und den anderen Kulturen bei steigenden Marktpreisen.

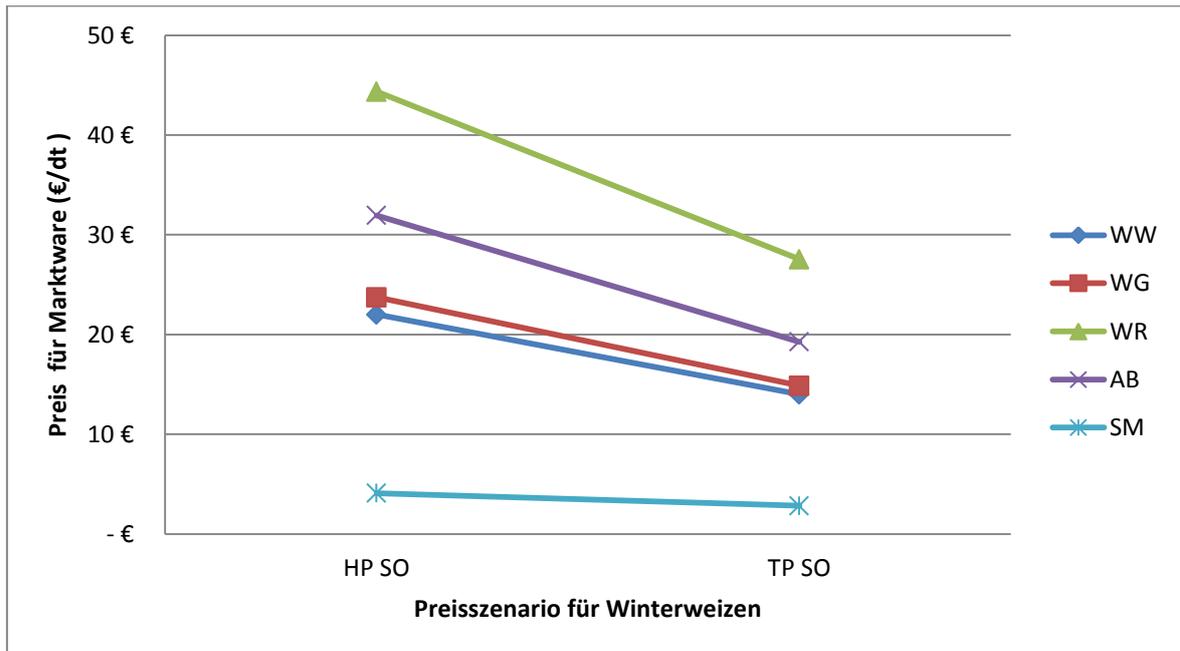


Abb. 29: Graphische Darstellung der errechneten Indifferenzpreise für die am Standort Soest angebaute Kulturen in den Modellbetrieben im Bezug zu Winterweizen inklusive einer farblich angepassten Regressionsgeraden zwischen den Eckpreisen aus dem Hoch- und Tiefpreisszenario

4.8. Kalkulatorische Betriebszweigergebnisse am Standort Braunschweig

In Folge der unterschiedlichen Fruchtfolgen und abweichender Strategien in der Bodenbearbeitung besitzen die Anbausysteme verschiedene Maschinenausstattungen sowie differenzierte Ansprüche an die benötigte Kapazität zur Arbeitserledigung. Somit variieren auch die Fixkosten der Modellbetriebe, welche in einer reinen Deckungsbeitragsrechnung nicht berücksichtigt werden. Ein Vergleich der Deckungsbeiträge ist daher ein geeignetes Instrument für die kurz- und mittelfristige Beurteilung von Produktionsverfahren. Für einen langfristigen Betriebsvergleich ist jedoch die vollkostenbasierte Betriebszweigabrechnung die geeignete Wahl. Aus diesem Grund werden im folgenden Teil die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse und wesentliche Unterscheidungsmerkmale der verglichenen Anbausysteme dargestellt.

Hochpreisszenario:

Die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse der drei Anbausysteme für die Perioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 sind in Abb. 30 für das Hochpreisszenario bezogen auf einen Hektar dargestellt. Die detaillierten Ergebnisse dieser Leistungs-Kostenrechnung befinden sich in Tab. 56 und Tab. 57 im Anhang.

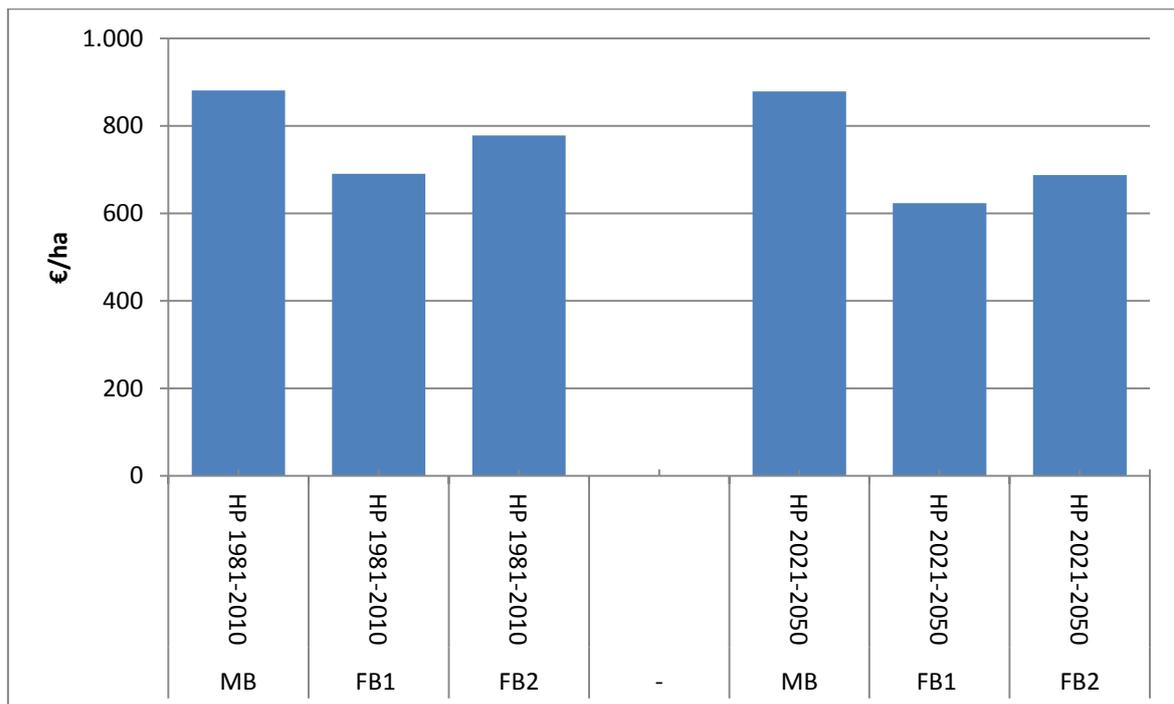


Abb. 30: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Hochpreisszenario, HP)

Auf den ersten Blick fällt auf, dass alle drei Anbausysteme unter der Erwartung hohe Marktpreise sowohl in der Klimaperiode 1981 bis 2010, als auch in der Periode 2021 bis 2050 im Schnitt der Jahre ein positives Betriebszweigergebnis besitzen. Die berechneten Gewinnerwartungen schwanken jedoch zwischen den einzelnen Modellbetrieben. Die höchsten Beträge werden dabei im Marktfruchtsystem erwirtschaftet. Nach Abzug aller Kosten verbleibt in diesem System ein durchschnittlicher Unternehmergewinn von 881 Euro je Hektar im Zeitraum 1981 bis 2010 und 878 Euro je Hektar zwischen 2021 und 2050. Im Vergleich dazu betragen die Ergebnisse im konventionellen Futterbausystem 690 bzw. 623 Euro je Hektar und im diversifizierten Futterbausystem 777 bzw. 688 Euro je Hektar. Somit fallen für Flächennutzung im System des konventionellen Futterbaus in Relation zum Marktfruchtsystem Opportunitätskosten von 191 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 und 255 Euro je Hektar zwischen 2021 und 2050 für die alternative Bewirtschaftungsform an. Im diversifizierten Futterbausystem betragen diese trotz der bereits hohen Prämienansprüche (vgl. 4.5 und 4.6) 104 bzw. 190 Euro pro Hektar.

Über einen linearen Zusammenhang in Bezug zur gesamten Betriebsfläche von jeweils 210 Hektar können die Gewinnerwartungen der Vergleichsbetriebe ermittelt werden. Daraus folgt, dass der Marktfruchtbetrieb mit einem durchschnittlichen Unternehmergewinn von rund 185.000 Euro pro Jahr in der Periode 1981 bis 2010 gegenüber dem diversifizierten Futterbausystem einen finanziellen Vorteil von jährlich knapp 22.000 Euro besitzt. Gegenüber dem konventionellen Futterbausystem beträgt dieser Vorteil knapp 40.000 Euro (vgl. Abb. 31). Unter Berücksichtigung der

Ertragsprognosen bei klimatischen Veränderungen würden sich diese Differenzen im Betriebszweigergebnis auf jährlich rund 40.000 Euro zwischen dem Marktfrucht- und dem diversifizierten Futterbausystem bzw. 54.000 Euro zwischen dem Marktfrucht und dem konventionellen Futterbausystem vergrößern.

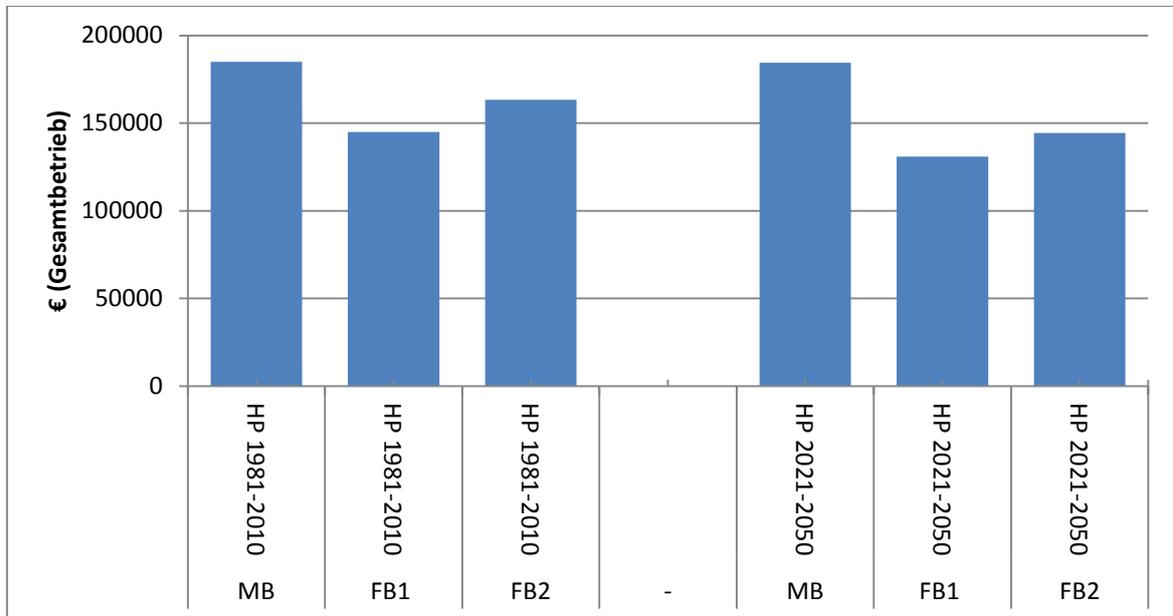


Abb. 31: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Hochpreisszenario, HP)

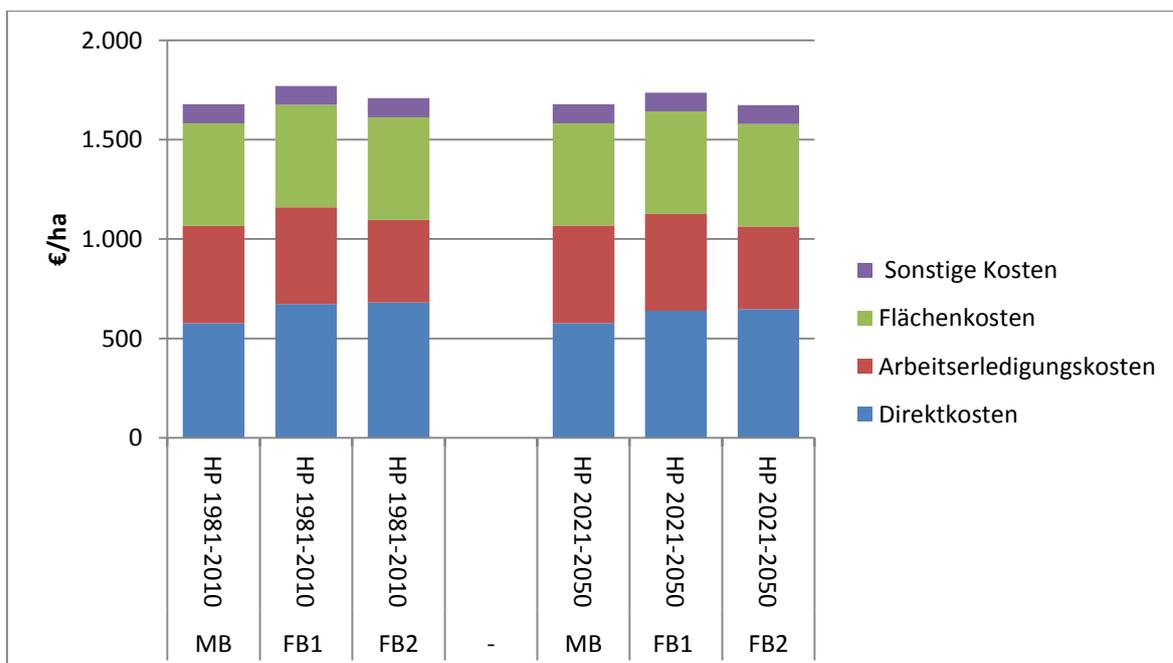


Abb. 32: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario, HP)

Die Ursachen der systembedingten Unterschiede in den kalkulatorischen Betriebszweigergebnissen resultieren aus abweichenden Ertrags- und Marktleistungserwartungen der Einzelkulturen sowie Differenzen bei den Direkt- und Arbeitserledigungskosten. Die unterschiedlichen Ertragspotentiale und die daraus erzielbaren Marktleistungen der Einzelkulturen wurden in den vorangegangenen Kapiteln bereits ausgiebig erläutert.

Einen Überblick über die gesamte Kostenstruktur im Hochpreisszenario gibt Abb. 32. Die Arbeitserledigungskosten sind aufgrund der getroffenen Annahmen unabhängig von den betrachteten Preis- und Klimaszenarien in allen Anbauperioden identisch. Das Marktfruchtsystem ist laut Definition das System mit der intensivsten Bodenbearbeitung. Erwartungsgemäß fallen die Arbeitserledigungskosten in diesem Betrieb mit 490 Euro je Hektar am höchsten aus. Im konventionellen Futterbaubetrieb, der den Pflug nur bei der Aussaat von Wintergerste einsetzt, liegen sie unwesentlich niedriger bei 487 Euro je Hektar. Die geringsten Arbeitserledigungskosten fallen im diversifizierten Futterbausystem an, das vollständig auf die Bodenbearbeitung verzichtet. In diesem System liegen die Kosten zur Arbeitserledigung bei 415 Euro pro Hektar.

Bei den Direktkosten gibt es geringfügige Variationen zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050. Diese beruhen auf sich verändernden Ertragserwartungen, die wiederum eine Abweichung des Düngerbedarfs sowie minimale Anpassungen bei den Kosten für Trocknung und Hagelversicherung bewirken. Die geringsten Direktkosten hat in diesem Fall das Marktfruchtsystem. Durch den Verbleib der kompletten Strohreste aller Kulturen auf dem Acker und einen reduzierten Anspruch an Pflanzenschutzmaßnahmen, aufgrund der intensiven Bodenbearbeitung, besitzt dieses System mit 577 Euro je Hektar die niedrigsten Direktkosten. Das konventionelle Futterbausystem ist charakterisiert durch einen relativ geringen Pflanzenschutzaufwand aufgrund des Anbaus von Silomais. Dieser führt durch hohe Nährstoffverluste beim Abfahren der Biomasse aber auch zu einem hohen Düngerbedarf in dieser Variante, sodass sich die direkten Kosten im konventionellen Futterbaubetrieb mit 673 Euro je Hektar über denen des Marktfruchtsystems befinden. Die höchsten Direktkosten fallen beim diversifizierten Futterbausystem an. Neben den geschilderten Auswirkungen des Anbaus von Silomais besitzt dieses System durch die praktizierte Direktsaat den höchsten Anspruch an Pflanzenschutzmaßnahmen, sodass dessen Direktkosten 682 Euro je Hektar betragen.

Tiefpreisszenario:

Die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse des Tiefpreisszenarios am Standort Braunschweig sind in Abb. 33 hektarbezogen dargestellt. Die dazugehörigen Teilergebnisse der kompletten Betriebszweigabrechnung befinden sich in Tab. 58 und Tab. 59 im Anhang. Bei der Annahme eines niedrigen Preisniveaus kann nicht in allen Anbausystemen ein positives Betriebszweigergebnis

erreicht werden. Nur das Marktfruchtsystem und das diversifizierte Futterbausystem erreichen mit 142 bzw. 83 Euro je Hektar in der Klimaperiode 1981 bis 2010 und 139 bzw. 35 Euro je Hektar in der Periode 2021 bis 2050 positive Gewinnerwartungen. Das konventionelle Futterbausystem schreibt unter der Berücksichtigung aller Kosten mit minus 56 Euro je Hektar im Zeitraum 1981 bis 2010 und minus 89 Euro je Hektar zwischen 2021 und 2050 Verluste auf der bewirtschafteten Fläche. Das Marktfruchtsystem besitzt damit in der Periode 1981 bis 2010 gegenüber dem diversifizierten Futterbausystem einen finanziellen Vorteil von 59 Euro pro Hektar und gegenüber der konventionellen Variante von 198 Euro pro Hektar. Unter der Annahme von klimatisch bedingten Veränderungen in den Ertragserwartungen der angebauten Kulturen zwischen 2021 und 2050 steigt die Differenz im Unternehmergewinn des Marktfruchtsystems in Relation zu den Futterbausystemen weiter an. Bezogen auf den diversifizierten Futterbau liegt diese nun bei 104 Euro je Hektar und im Vergleich zum konventionellen Futterbausystem bei 228 Euro je Hektar.

In der Betrachtung des Gesamtbetriebs mit einer landwirtschaftlichen Nutzfläche von 210 Hektar würde das Marktfruchtsystem im Zeitraum 1981 bis 2010 auch auf dem unteren Preisniveau einen durchschnittlichen Unternehmergewinn von jährlich rund 30.000 Euro erwirtschaften (vgl. Abb. 34). Im diversifizierten System ergeben sich an gleicher Stelle rund 17.500 Euro pro Jahr als Betriebszweigergebnis. Der konventionelle Futterbaubetrieb würde im gleichen Zeitraum jährlich knapp 12.000 Euro Verlust schreiben. In der Klimaperiode 2021 bis 2050 liegt der Marktfruchtbetrieb mit einer durchschnittlichen Gewinnerwartung von rund 29.000 Euro pro Jahr knapp 22.000 Euro vor dem diversifizierten und knapp 49.000 Euro vor dem konventionellen Futterbausystem.

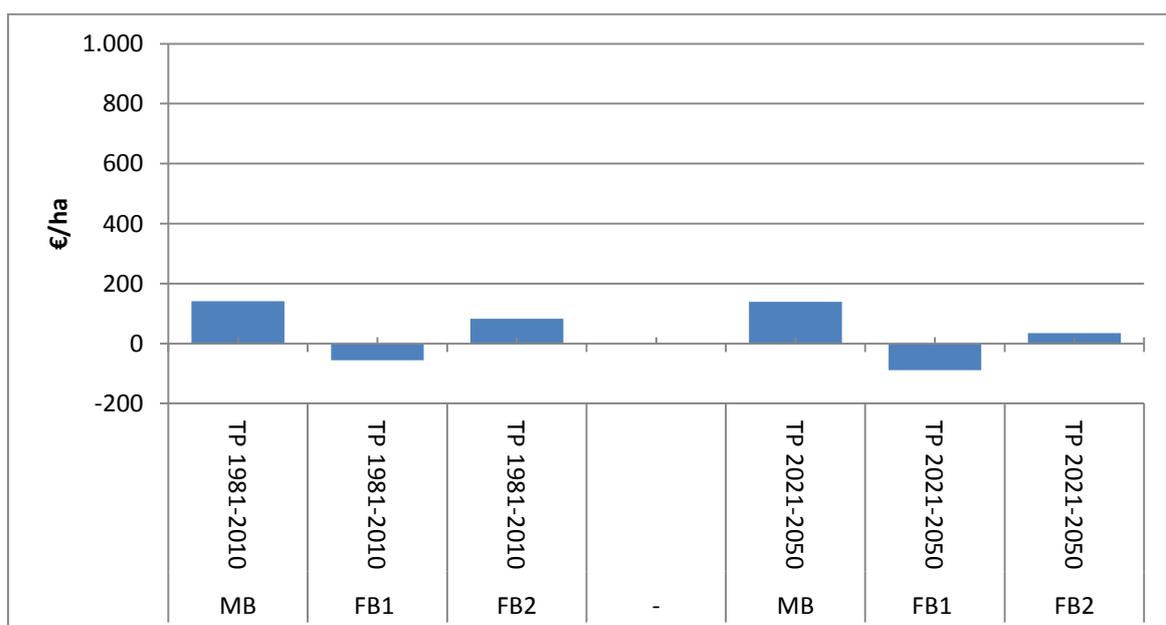


Abb. 33: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Tiefpreisszenario, TP)

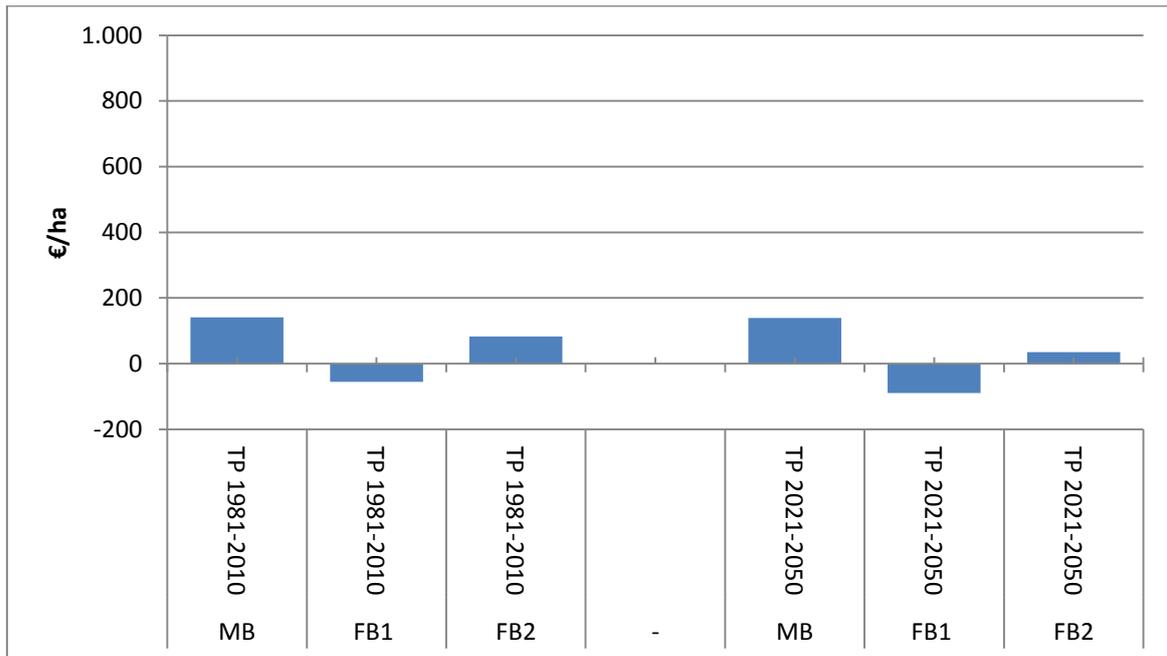


Abb. 34: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Braunschweig für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Tiefpreisszenario, TP)

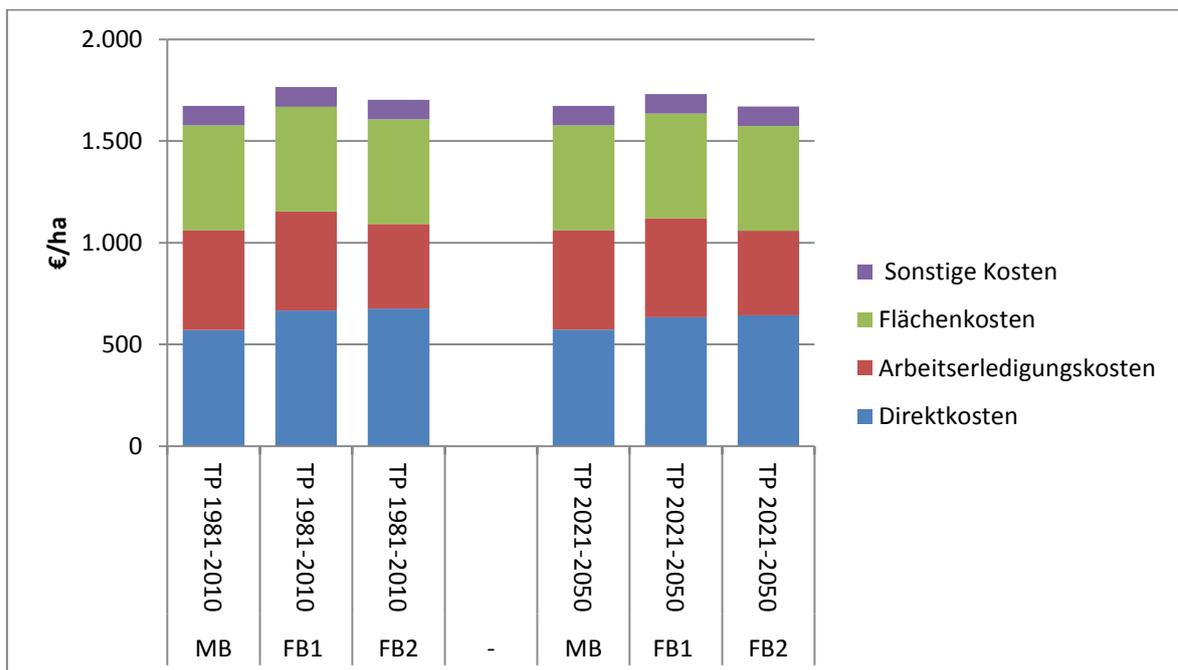


Abb. 35: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Die Ursachen für das negative Ergebnis beim konventionellen Futterbausystem liegen zum einen an den im Vergleich zum diversifizierten System geringeren Leistungen aus staatlichen Direktzahlungen. Zum anderen besitzt der konventionelle Futterbau, bedingt durch den Maisanbau, hohe Direktkosten und in Folge der relativ intensiven Bodenbearbeitung ebenfalls hohe Arbeitserledi-

gungskosten (vgl. Abb. 35). Demgegenüber können im Marktfruchtsystem durch die geringe Nährstoffabfuhr bei der Ernte und die intensive Bodenbearbeitung Direktkosten und im diversifizierten Futterbau durch die Direktsaat Arbeitserledigungskosten eingespart werden. Ein nach Kostengruppen geordneter Gesamtüberblick über die anfallenden Ausgaben in den Anbausystemen ist in Abb. 35 enthalten. Die Größenordnungen unterscheiden sich nur unwesentlich von denen aus dem Hochpreisszenario und werden daher nicht weiter erläutert.

4.9. Kalkulatorische Betriebszweigergebnisse am Standort Soest

Analog zum Standort Braunschweig werden im folgenden Teil die Betriebszweigergebnisse und wesentliche Unterscheidungsmerkmale der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest unter der Annahme eines Hoch- und eines Tiefpreisszenarios beschrieben.

Hochpreisszenario:

Die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse bezogen auf einen Hektar landwirtschaftlicher Nutzfläche sind in Abb. 36 enthalten. Die detaillierten Teilergebnisse dieser Betriebszweigabrechnung im Hochpreisszenario befinden sich im Anhang in Tab. 60 und Tab. 61. Wie am Standort Braunschweig besitzen auch am Standort Soest alle Anbausysteme eine positive Gewinnerwartung unter der Annahme hoher Marktpreise für die Ernteprodukte. Auch hier werden im Marktfruchtsystem mit einem durchschnittlichen Unternehmergewinn von 719 Euro je Hektar in der Periode 1981 bis 2010 und 771 Euro je Hektar im Zeitraum 2021 bis 2050 die höchsten Ergebnisse erzielt. Dahinter folgen das diversifizierte Futterbausystem mit 673 bzw. 607 Euro je Hektar und der konventionelle Futterbau mit 556 bzw. 495 Euro je Hektar.

Im Vergleich zum Standort Braunschweig liegen die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse am Standort Soest durchweg niedriger. Dies liegt daran, dass aufgrund der besseren Bodenverhältnisse höhere Flächenkosten als in Braunschweig anfallen. Auf den niedersächsischen Vergleichsflächen liegt die Ertragsmesszahl bei 50 Bodenpunkten, in der Soester Börde bei 70 Bodenpunkten. Unter der Annahme eines Pachtpreises von zehn Euro je Bodenpunkt ergeben sich Flächenkosten von 500 Euro je Hektar in Braunschweig und 700 Euro je Hektar in Soest. Trotz geringfügig höherer Felderträge am Standort Soest kann diese Differenz in den Flächenkosten nicht ausgeglichen werden.

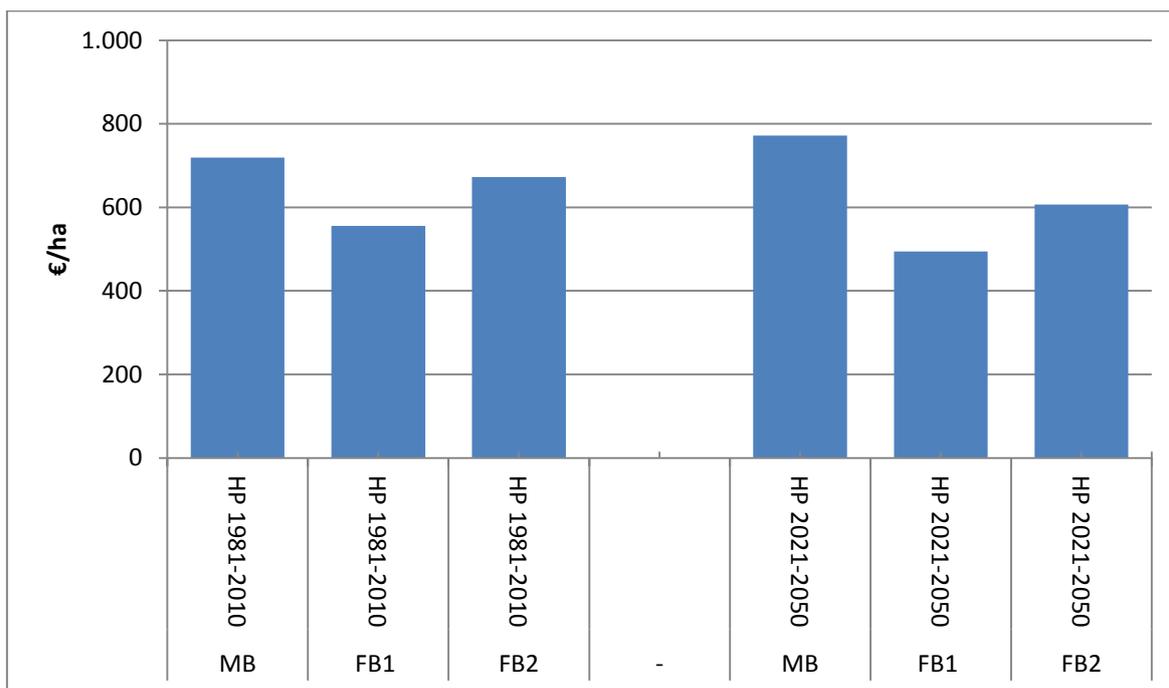


Abb. 36: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Hochpreisszenario, HP)

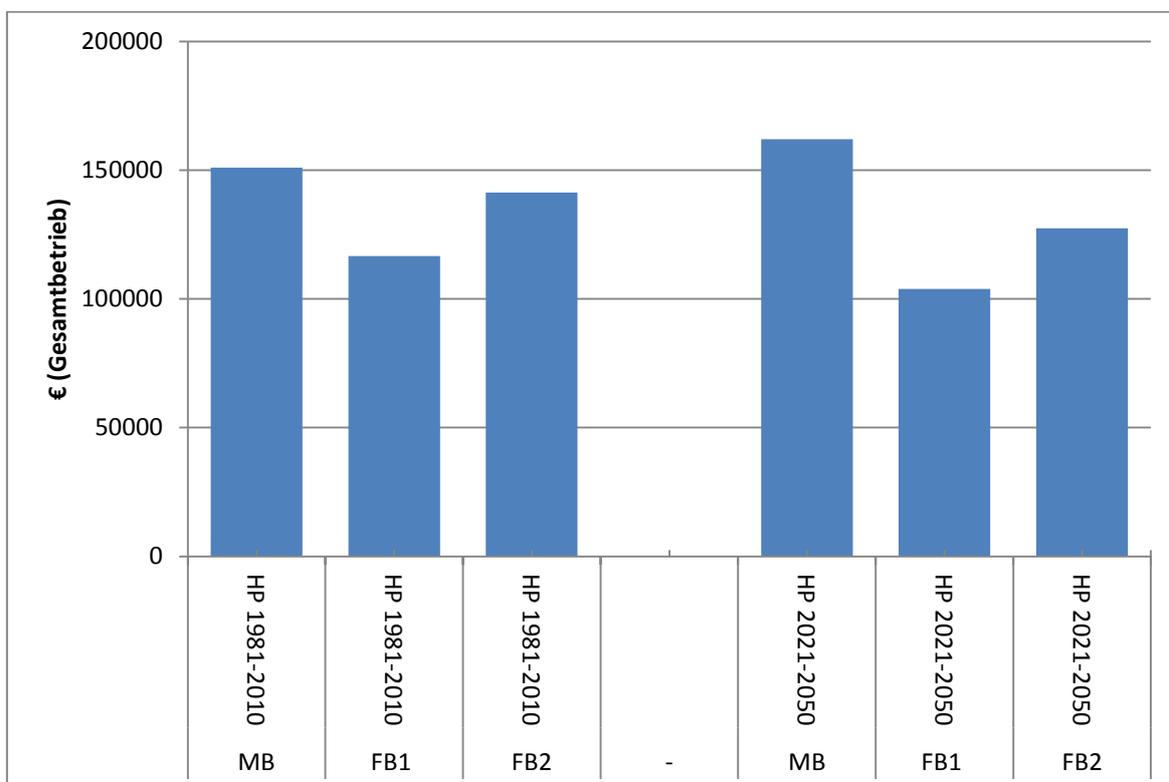


Abb. 37: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Hochpreisszenario, HP)

Bei Betrachtung des Betriebszweigergebnisse des Ackerbaus der Gesamtbetriebe liegt der Marktfruchtbetrieb in der Periode 1981 bis 2010 bei durchschnittlich rund 151.000 Euro pro Jahr und im Zeitraum 2021 bis 2050 bei rund 162.000 Euro pro Jahr (vgl. Abb. 37). Der finanzielle Vorteil gegenüber dem diversifizierten Futterbausystem beträgt damit jährlich rund 10.000 Euro in der Klimaperiode 1981 bis 2010 und 34.500 Euro zwischen 2021 und 2050. Im Vergleich zum konventionellen System betragen diese Differenzen rund 34.000 bzw. 58.000 Euro.

Neben unterschiedlichen Erwartungen bei der Marktleistung der einzelnen Kulturen liegen die Ursachen für die abweichenden Gewinnerwartungen in den Kostenstrukturen der Modellbetriebe (vgl. Abb. 38). Bei den Direktkosten können im Marktfruchtsystem durch die intensive Bodenbearbeitung Ausgaben im Bereich Pflanzenschutz eingespart werden. Darüber hinaus werden in der gewählten Fruchtfolge nur die Kornerträge in der Ernte abgefahren, sodass im Vergleich zu den Futterbausystemen weniger Nährstoffe aus dem Wirtschaftskreislauf ausscheiden. Dadurch bedingt liegen die Direktkosten im Marktfruchtbetrieb mit 584 Euro je Hektar in der Klimaperiode 1981 bis 2010 und 594 Euro je Hektar im Zeitraum 2021 bis 2050 um 115 bzw. 71 Euro je Hektar unter denen des konventionellen Futterbaus und um 122 bzw. 81 Euro je Hektar unter denen des diversifizierten Futterbaus.

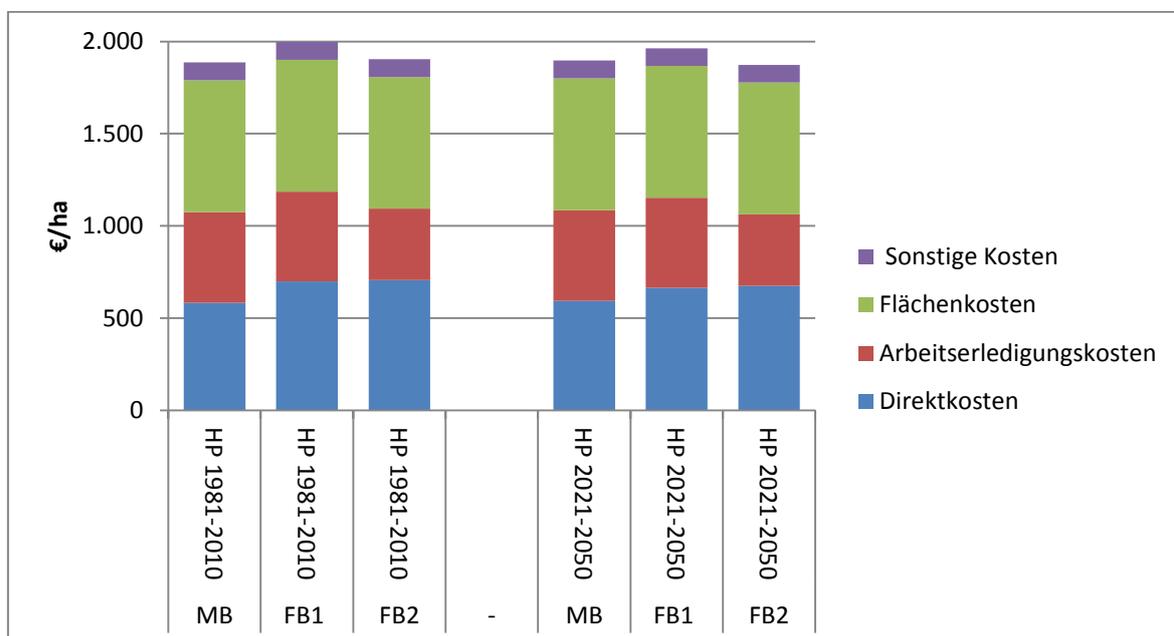


Abb. 38: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario, HP)

Die Arbeiterledigungskosten sind wie auch am Standort Braunschweig nahezu unbeeinflusst von Preisszenarien der Marktpreise für Erntegüter und klimatisch bedingten Veränderungen in den Ertragserwartungen. Somit verbleiben sie in den betrachteten Zeiträumen auf einem konstanten

Niveau. Das diversifizierte Futterbausystem besitzt durch den Verzicht auf Bodenbearbeitung die geringsten Kosten im Bereich der Arbeitserledigung. Mit durchschnittlich 387 Euro pro Hektar hat es gegenüber den anderen Modellbetrieben einen Vorteil von rund 100 Euro je Hektar.

Tiefpreisszenario:

Die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse aus dem Tiefpreisszenario sind in Abb. 39 hektarbezogen dargestellt. Die dazugehörigen Teilergebnisse der Vollkostenrechnung befinden sich im Anhang in Tab. 62 und Tab. 63. Bedingt durch die hohen Flächenkosten am Standort Soest kann unter der Annahme einer unteren Marktpreisgrenze für die Erntegüter keines der Anbausysteme ein positives Betriebszweigergebnis im Schnitt der betrachteten Klimaperioden erwirtschaften. Das Marktfruchtssystem erreicht in der Periode 2021 bis 2050 einen nahezu neutralen Unternehmensgewinn von minus drei Euro je Hektar, bewegt sich aber dennoch im negativen Bereich. Im Zeitraum 1981 bis 2010 liegt die Gewinnerwartung mit minus 34 Euro je Hektar noch unterhalb der zurückliegenden Periode. Der diversifizierte Futterbaubetrieb erzielt zwischen 1981 und 2010 ein durchschnittliches Betriebszweigergebnis von minus 52 Euro pro Hektar und in der Klimaperiode 2021 bis 2050 von minus 85 Euro je Hektar. In den gleichen Zeiträumen liegen die Ergebnisse des konventionellen Futterbausystems bei minus 222 bzw. minus 252 Euro je Hektar.

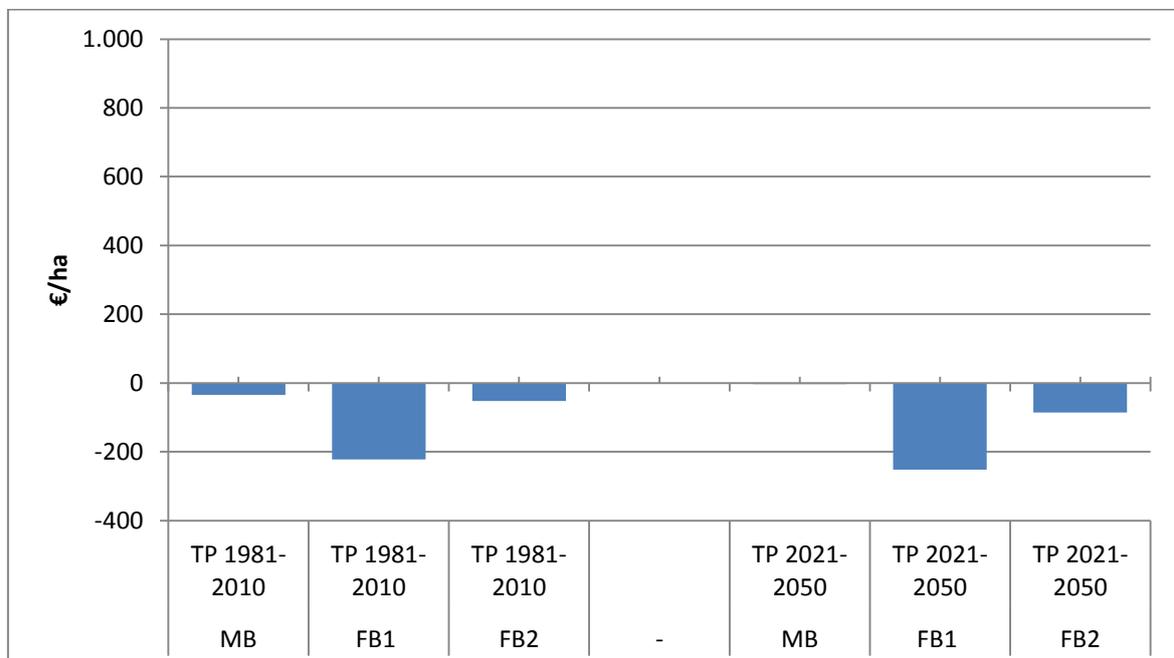


Abb. 39: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf einen Hektar (Tiefpreisszenario, TP)

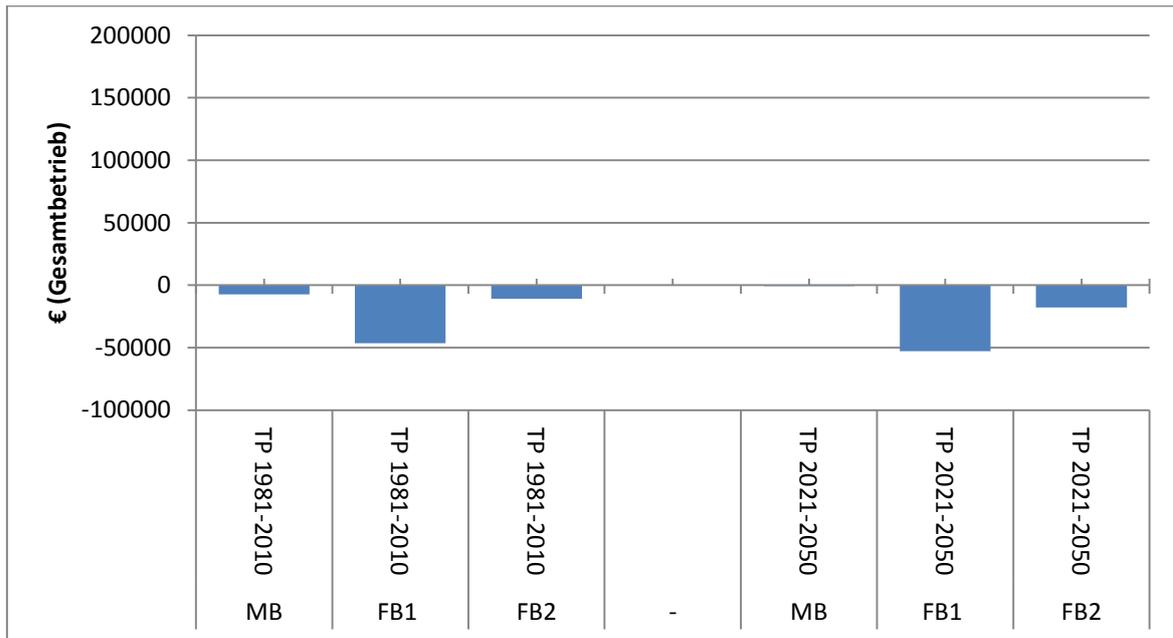


Abb. 40: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der betrachteten Anbausysteme in Soest für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 bezogen auf die Gesamtfläche von 210 Hektar (Tiefpreisszenario, TP)

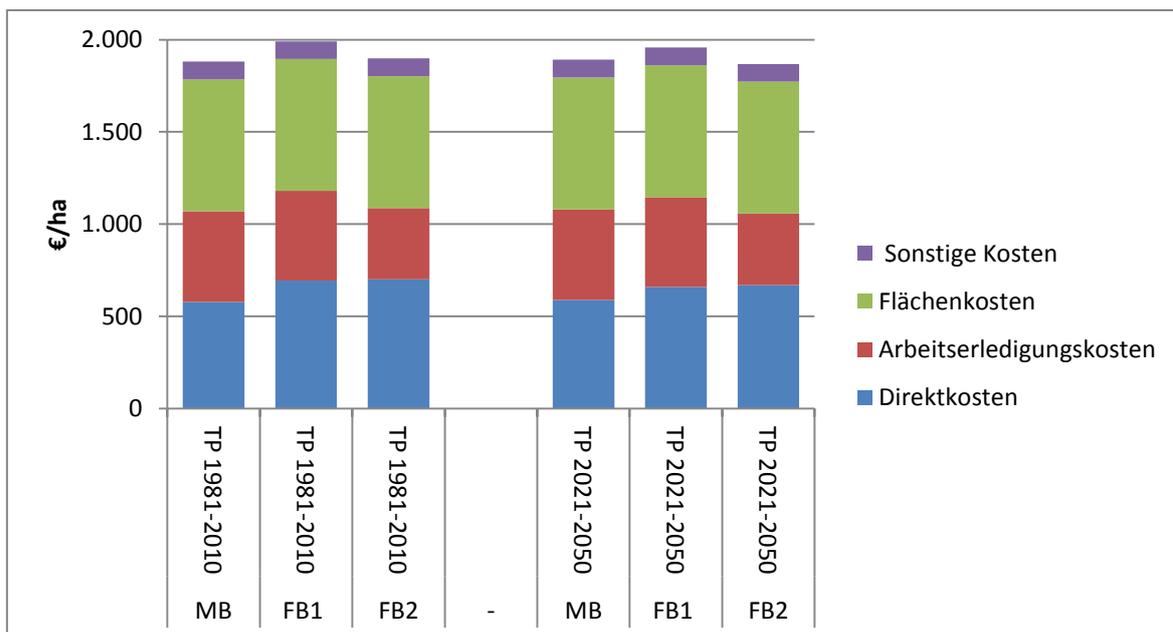


Abb. 41: Kostenverteilung der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario, TP)

Hochgerechnet auf die gesamte Betriebsfläche würde der Marktfruchtbetrieb unter der Berücksichtigung aller anfallenden Kosten damit einen durchschnittlichen Jahresverlust von rund 7.000 Euro in der Periode 1981 bis 2010 und 630 Euro im Zeitraum 2021 bis 2050 erwirtschaften (vgl. Abb. 40). Die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse des diversifizierten Futterbausystems

liegen in den gleichen Perioden durchschnittlich bei minus 11.000 Euro bzw. minus 17.800 Euro, die des konventionellen Futterbaus bei minus 46.500 Euro bzw. minus 53.000 Euro.

Die Systemunterschiede resultieren wie in den Abschnitten zuvor bereits mehrfach erwähnt aus den vergleichsweise hohen Marktleistungen der angebauten Kulturen im Marktfruchtsystem, unterschiedlich hohen Prämienansprüchen und abweichenden Kostenstrukturen innerhalb der Betriebe. Letztgenannte sind in Abb. 41 dargestellt und entsprechen im Wesentlichen denen aus dem Hochpreisszenario. Bei den Arbeitserledigungskosten besitzt das diversifizierte Futterbausystem die geringsten Werte, gefolgt vom Marktfrucht- und konventionellen Futterbausystem. Bei den Direktkosten liegen die geringsten Ausgaben beim Marktfruchtbetrieb. Es folgen die beiden Futterbausysteme, welche annähernd gleich hohe Ausgaben bei den Direktkosten besitzen. Die Flächenkosten und die sonstigen Ausgaben sind unabhängig von der Bewirtschaftungsstrategie in allen Systemen identisch.

5. Diskussion

5.1. Stärken und Schwächen der Ertragsmodellierung in APSIM

Nach einer erfolgreichen Validierung können mit der computergestützten Ertragsmodellierung losgelöst von aufwendigen Feldversuchen die Auswirkungen ausgewählter Einflussfaktoren auf das Pflanzenwachstum und die Ertragsbildung analysiert werden. Unter definierten Ausgangsbedingungen ermöglicht die Modellierung mit geringem zeitlichen Aufwand eine gezielte Betrachtung der Einflüsse einzelner Wachstumsparameter (Therond et al., 2009; Therond et al., 2011) und die Erstellung von unterschiedlichen Szenarien. Besonders im Zusammenhang mit klimatischen Veränderungen und deren Bedeutung für das Ertragspotential einer bestimmten Kultur ergeben sich daraus entscheidende Vorteile.

Im Gegensatz zu kurzfristig auftretenden Wetterereignissen beschreibt der Klimabegriff immer einen mehrjährigen Zeitraum (Eitzinger et al., 2009). In der Regel wird bei der Betrachtung des Klimawandels eine Periode von 30 Jahren zugrunde gelegt (Anonymus, 2013n). Um daraus entstehende Folgen auf das Pflanzenwachstum beobachten zu können, müssen also langjährige Zeiträume ausgewertet und miteinander verglichen werden. In praktischen Feldversuchen, in denen die Geschwindigkeit des Pflanzenwachstums ausschlaggebend für den zeitlichen Umfang eines Projektes ist, sind Versuche zu den Klimaauswirkungen auf die Pflanzenentwicklung daher mit großem Aufwand verbunden und nur in begrenztem Umfang möglich. In der Modellierung können dagegen eine Vielzahl unterschiedlicher Klima- und Wachstumsszenarien parallel und über mehrere Jahre hinweg simuliert werden.

Das verwendete Modell APSIM erlaubt in diesem Zusammenhang die Betrachtung von Einflüssen des Wasser- und Nährstoffgehaltes im Boden sowie der Wachstumsfaktoren Niederschlag, Beregnung (Cichota et al., 2013; Huth et al., 2012; Paydar et al., 2009) und Düngung (Akponikpe et al., 2010; Asseng et al., 2012). Außerdem besteht die Möglichkeit, Umsetzungsprozesse von organischen Komponenten wie Pflanzenresten oder organischen Düngemitteln in Abhängigkeit des Wasserangebotes im Modell zu beschreiben (Mohanty et al., 2011). In Verbindung mit entsprechenden Wetterdaten werden die wesentlichen Standortparameter für eine Ertragsmodellierung in APSIM erfasst. Über die Einbeziehung von Pflanzenmodulen (Jones et al., 2001; Ramankutty et al., 2013), in denen die Wachstumsprozesse einer Kultur anhand mathematischer Funktionen enthalten sind, können somit Wachstumsszenarien einer beliebigen Pflanze oder eines kompletten Bestandes erstellt werden.

Trotz der großen Anzahl an berücksichtigten Einflussparametern auf die Ertragsbildung von Nutzpflanzen gibt es weitere Faktoren, die nicht Bestandteil der hier angewandten Modellierung sind aber dennoch Einflüsse auf die Ernteerträge einzelner Kulturen haben können. Wichtige Punkte in diesem Zusammenhang sind der Bereich Pflanzenschutz, Einflüsse der Bodenbearbeitung auf den Feldaufgang und die Wurzel Ausbildung, Steigende CO₂-Gehalte in der Atmosphäre sowie Extremwetterereignisse wie Hagelschäden oder Überschwemmungen (vgl. 2.1 und 5.2).

Ferner hängt die Qualität der Modellierung davon ab, wie genau die ablaufenden Prozesse im Modell durch entsprechende Gleichungen beschrieben werden. Aufgrund der hohen Komplexität von Wachstumsabläufen innerhalb einer Pflanze oder des Zusammenspiels verschiedener Umweltparameter, kann jedoch immer nur ein bestimmter Teil der Realität abgebildet werden. Der übrige Teil, der nicht erfasst wird, führt zu Unsicherheiten, wodurch die Modellergebnisse nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit zutreffen werden. Dennoch konnte in einer Vielzahl von Versuchen nachgewiesen werden, dass speziell in der Modellierung des Pflanzenwachstums bereits wenige Parameter ausreichen, um die Ertragsentwicklung von landwirtschaftlich genutzten Kulturen mit hoher Wahrscheinlichkeit abbilden zu können (Farre et al., 2002; Farre et al., 2004; Pembleton et al., 2013; Robertson et al., 2002a). Auch im betrachteten Fall von APSIM konnten die real gemessenen Felderträge der Kulturen aus den Anbausystemen mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von mindestens 80 Prozentpunkten beschrieben werden (vgl. 4.1).

Einer der Hauptgründe für die beobachteten Abweichungen zwischen den realen Ertragsdaten und denen aus Modellierung ist die Methode der Berechnung des täglichen Biomassezuwachses. Letztgenannter wird entweder in Abhängigkeit des Bodenwassers oder der eintreffenden Globalstrahlung ermittelt (vgl. 2.3 und 2.7). APSIM teilt die gebildete Gesamtbiomasse anschließend anhand festgelegter Anteile und in Abhängigkeit des Entwicklungsstadiums einer Pflanze auf die einzelnen Pflanzenorgane auf. Damit ist die Biomassebildung die wichtigste Ausgangsgröße für

das Ertragspotential einer bestimmten Kultur. Das Problem besteht darin, dass die Nutzungseffizienzen einer Pflanze für den Zuwachs von neuem Pflanzenmaterial in Abhängigkeit der genannten Faktoren über die statischen Parameter der WUE und der RUE berechnet werden.

Diese lassen sich über das Verhältnis der gebildeten Biomasse und der zur Verfügung stehenden Ressourcen an Wasser und Strahlungsenergie für jede Kultur berechnen. In der Praxis kommt es jedoch vor, dass bei gleichen Sorten unter gleichen Standortbedingungen unterschiedliche Biomasseerträge gemessen werden. Die Ursachen können an einer Vielzahl von Parametern liegen, die im Modell bisher nicht berücksichtigt sind. Einige Möglichkeiten sind ein punktuell auftretender Schädlingsbefall, Pflanzenkrankheiten oder eine kleinräumige Bodenvariabilität. Da unter theoretisch gleichen Ausgangsbedingungen unterschiedliche Biomassen gemessen werden, ergibt sich als logische Konsequenz für die RUE und WUE, dass diese nur als Mittelwert mehrerer Wiederholungen bestimmt werden können. Darüber hinaus besteht aus den genannten Gründen auch die Möglichkeit von jährlichen Schwankungen der RUE und WUE zwischen verschiedenen Anbauperioden.

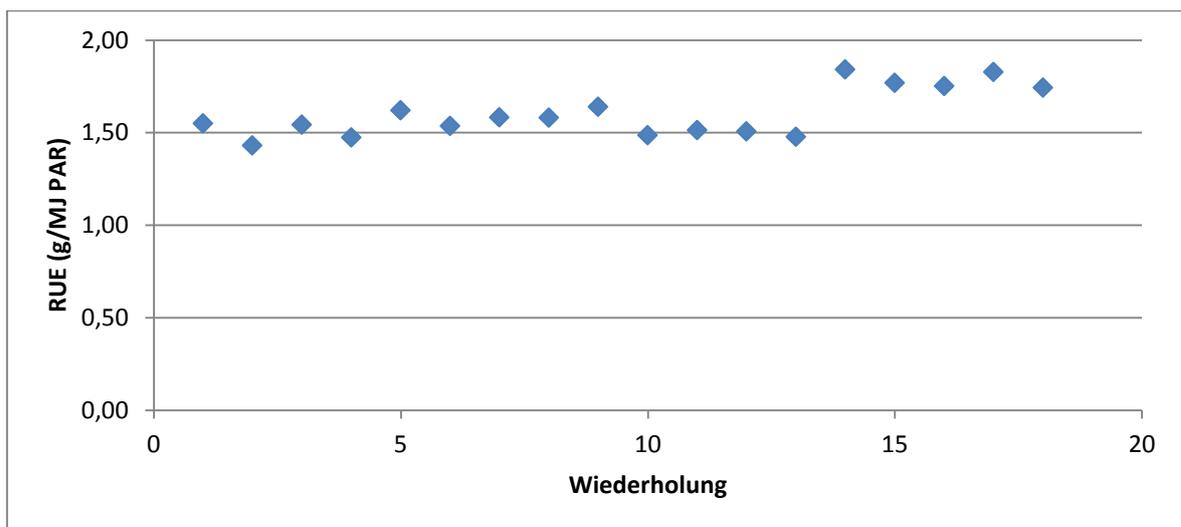


Abb. 42: Berechnung der Radiation Use Efficiency (RUE) von Winterweizen aus Ertragsdaten der Standorte Braunschweig und Soest (PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung)

Am Beispiel der RUE von Winterweizen zeigt sich in Abb. 42, dass diese innerhalb der betrachteten Wiederholungen zwischen 1,43 und 1,84 Gramm je Megajoule PAR liegt. Als Mittelwert für die Modellierung ergibt sich eine RUE von 1,60 Gramm je Megajoule PAR. Dieser kann im Einzelfall mehr oder weniger stark vom realen Wert abweichen und damit zu fehlerhaften Ertragsprognosen führen. Ähnliche Beispiele sind auch für den statischen Parameter der WUE denkbar. Zur Lösung dieses Problems müssten alle Faktoren, die zu Ertragsabweichungen innerhalb einer Kultur bzw. Sorte führen herausgefiltert und die statischen Parameter durch dynamisch angepasste er-

setzt werden. Durch den enormen Umfang an anzupassenden Parametern und die fehlende Kenntnis aller Einflussfaktoren auf den Ertrag ist dies zum jetzigen Zeitpunkt jedoch noch nicht möglich.

Modelle können daher eher Tendenzen als absolute Aussagen liefern. Je komplexer ein betrachtetes System innerhalb festgelegter Grenzen ist, desto größer wird die Wahrscheinlichkeit von Unsicherheiten innerhalb der Modellaussagen. Da Feldversuche, außer es sind Dauerversuche von mehr als 10 bis 20 Jahren, Rückschlüsse auf zukünftige Ereignisse jedoch nahezu ausschließen, bleiben mathematische Modelle die einzige Möglichkeit Zukunftsszenarien in ihren Tendenzen abzubilden.

5.2. Aussagekraft von Klimaszenarien

Ähnlich wie bei der Ertragsmodellierung kann aufgrund der hohen Komplexität auch in der Klimamodellierung nur ein kleiner Teil aller Prozesse erfasst werden, die das Klima beeinflussen. Aktuell gibt es weltweit eine enorme Vielfalt an unterschiedlichsten Klimaszenarien für globale und regionale Betrachtungen (Dufresne et al., 2013; Harris et al., 2013; Vizy et al., 2013; Wang et al., 2013; Zhang und Shi, 2012). Über einen numerischen oder statistischen Weg (vgl. 2.5) ermitteln diese Klimamodelle entweder anhand einer Interpolation gemessener Wetterdaten oder durch Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten aus empirischen Wetteraufzeichnungen die zukünftigen Klimaentwicklungen. Je nach Umfang und Gewichtung der in den Modellen enthaltenen Parameter sind die getroffenen Zukunftsprognosen mit einer mehr oder weniger hohen Eintrittswahrscheinlichkeit behaftet. Darüber hinaus existiert zusätzlich eine Reihe von unterschiedlichen Emissionsszenarien, mit denen der anthropogene Einfluss auf den Klimawandel in den Modellen berücksichtigt wird. Da vom heutigen Standpunkt aus nicht abzusehen ist, wie sich der Ausstoß von Treibhausgasen durch den Menschen in Zukunft entwickeln wird, kommt es zu weiteren Unsicherheiten bei Klimaprognosen (Solomon et al., 2007).

In diesem Zusammenhang zeigt Abb. 43 einen Vergleich von Prognosen mehrerer globaler Klimamodelle. Auf der linken Seite ist die Entwicklung der Jahresdurchschnittstemperatur unter der Annahme von drei abweichenden Emissionsszenarien abgebildet. Im oberen Diagramm befinden sich die Klimaprognosen aus dem Szenario A2 des IPCC, im mittleren aus dem Szenario A1B und im unteren die des Szenarios B1. In gleicher Weise wie die Klimaprognosen zum Temperaturanstieg sind in der rechten Spalte die Ausblicke der prozentualen Niederschlagsveränderung dargestellt. Auf den ersten Blick fällt auf, dass die Ergebnisse der einzelnen Klimamodelle immer stärker voneinander abweichen, je weiter sie in die Zukunft blicken. Im Emissionsszenario A1B liegen

die Prognosen zum durchschnittlichen Temperaturanstieg bis 2100 in Abhängigkeit des verwendeten Klimamodells zwischen zwei und über vier Grad Celsius.

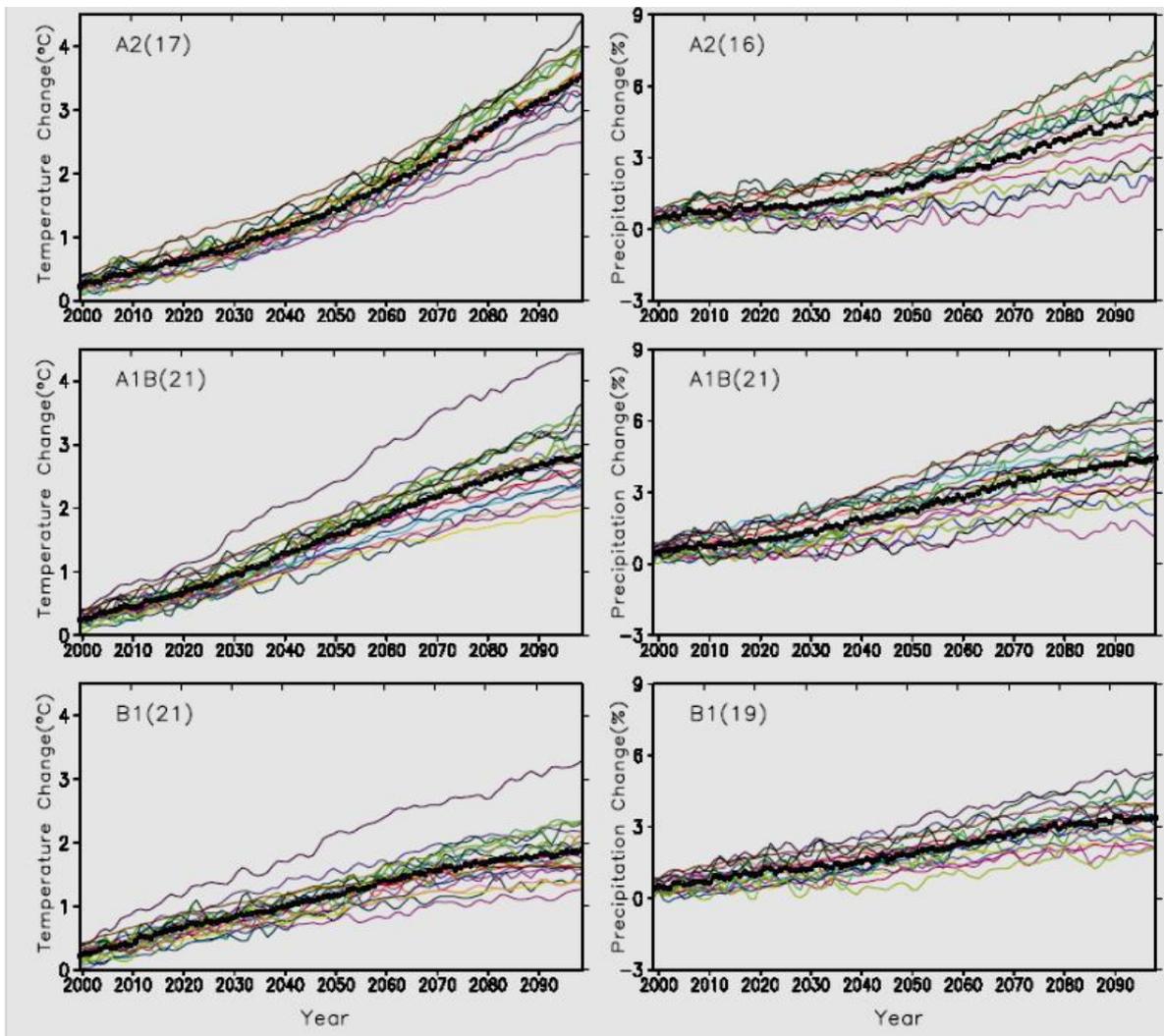


Abb. 43: Globale Klimaprognosen für den Zeitraum 2000 bis 2100 von unterschiedlichen Klimamodellen zum Anstieg der Lufttemperatur (links) und der Niederschlagsverteilung (rechts) unter den Emissionsszenarien A2 (oben) A1B (Mitte) und B1 (unten) im Vergleich (Solomon et al., 2007)

Beim Niederschlag bewegen sie sich im gleichen Zeitraum zwischen einer Zunahme von rund einem Prozentpunkt bis hin zu sechs Prozentpunkten. Darüber hinaus sind auch die Einflüsse der Emissionsszenarien auf die Klimaprognosen der einzelnen Modelle zu erkennen. Im Szenario B1 wird der durchschnittliche Temperaturanstieg bis 2100 um rund ein Grad Celsius niedriger als im Szenario A1B und um rund ein halbes Grad Celsius tiefer als im Szenario A2 vorhergesagt. Bei den Niederschlägen liegen die prognostizierten Zunahmen im B1-Szenario mit durchschnittlich rund drei Prozentpunkten ebenfalls unterhalb der Emissionsszenarien A1B und A2, welche sich bei rund vereinhalb bzw. fünf Prozentpunkten bewegen.

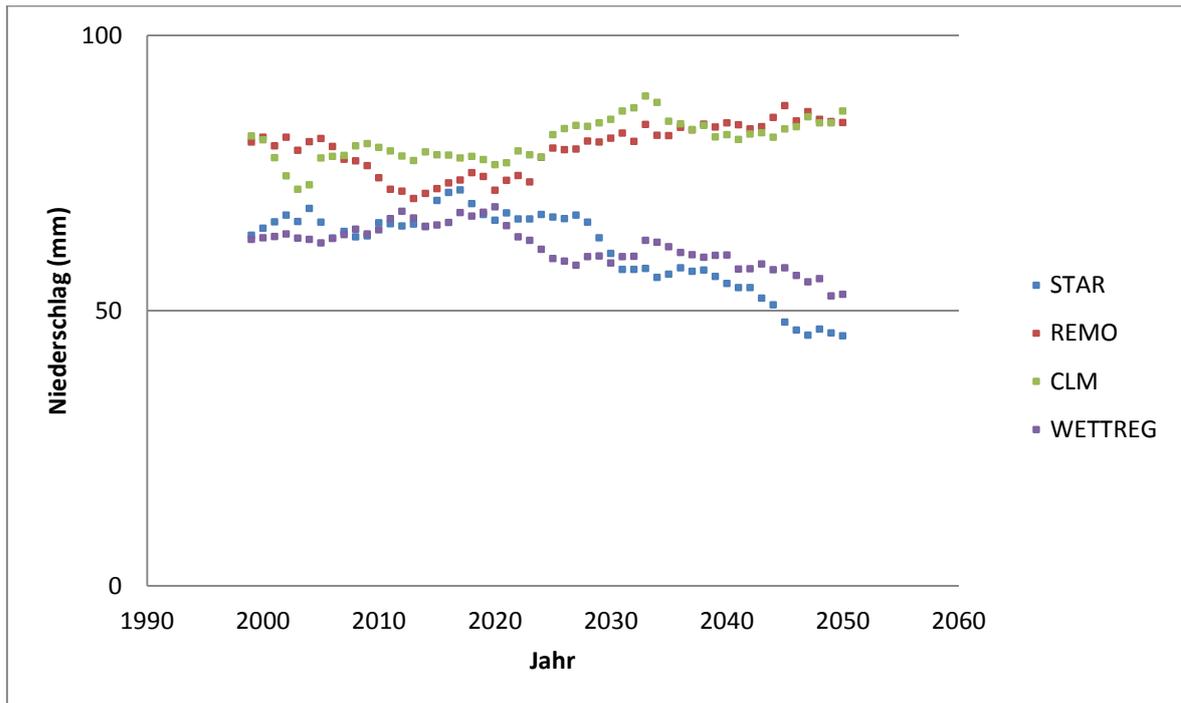


Abb. 44: Gleitender Durchschnitt über einen 30-jährigen Zeitraum der mittleren Monatsniederschläge im Monat August für den Standort Braunschweig nach den Prognosen der Klimaszenarien STAR, REMO, CLM und WETTREG im Emissionsszenario A1B (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

Trotz Abweichung der absoluten Größenordnungen aus den Prognosen zeigen die globalen Klimamodelle eine einheitliche Tendenz von zunehmenden Niederschlägen und steigenden Temperaturen im Durchschnitt eines Jahres. Dies ist jedoch nicht immer der Fall. In bestimmten Fällen gelangen die Klimaszenarien auch zu gegensätzlichen Aussagen. Am Beispiel der Vorhersagen für die mittlere Niederschlagsentwicklung im Monat August am Standort Braunschweig zeigt Abb. 44, dass die Klimamodelle STAR und WETTREG unter Annahme des Emissionsszenarios A1B eine Abnahme der durchschnittlichen Niederschlagsmenge prognostizieren. Demgegenüber ist nach den Modellen REMO und CLM von zunehmenden Niederschlagsmengen im gleichen Monat auszugehen.

Neben der Berücksichtigung der geschilderten Unsicherheiten von Klimaprognosen bei der Interpretation solcher Daten, ist darüber hinaus der betrachtete Zeitraum von ausschlaggebender Bedeutung. So können sich beispielsweise Trockenphasen im Vorsommer und zunehmende Niederschläge in den Wintermonaten im Jahresschnitt gegenseitig aufheben. Der durchschnittliche Jahresniederschlag bleibt in diesem Fall gleich. Dies kann zu der falschen Aussage verleiten, dass sich die Erträge einer Kultur aufgrund gleichbleibender Niederschlagsmengen nicht verändern werden. In Wahrheit kann es aber dennoch zu einer Ertragsbeeinflussung kommen, da gerade in den sensiblen Wachstumsphasen nicht genügend Wasser zur Verfügung steht.

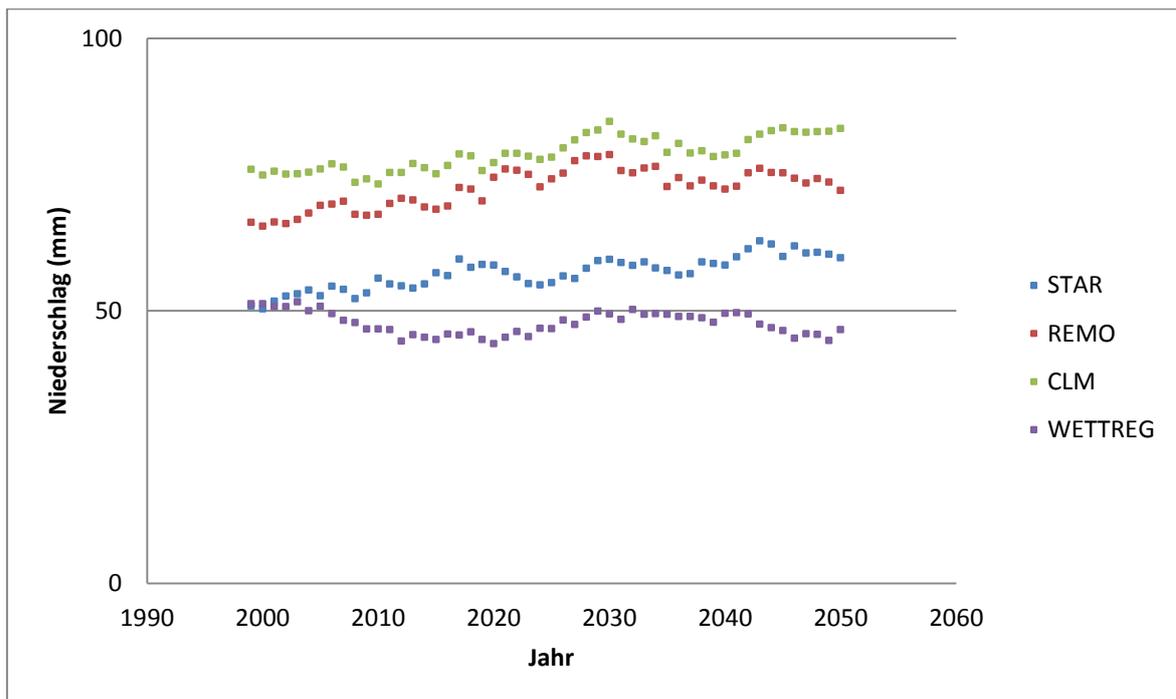


Abb. 45: Gleitender Durchschnitt über einen 30-jährigen Zeitraum der mittleren Monatsniederschläge im Monat November für den Standort Braunschweig nach den Prognosen der Klimaszenarien STAR, REMO, CLM und WETTREG im Emissionsszenario A1B (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

Passend zum genannten Beispiel aus Abb. 44 zeigt Abb. 45 die durchschnittlich erwarteten Niederschlagsmengen in einem 30-jährigen Trend für den Monat November am Standort Braunschweig. Bei einem Vergleich der beiden Abbildungen am Beispiel des Klimamodells STAR ist zu erkennen, dass die Niederschläge im August ab- und im November zunehmen werden. Im Jahresdurchschnitt ergeben sich aufgrund der ausgleichenden Tendenzen im betrachteten Modell kaum Veränderungen der prognostizierten Niederschlagsmengen. Dennoch wird der August trockener werden, was besonders bei spät abreifenden Kulturen wie dem Silomais zu Ertragseinbußen führen kann.

Zu ähnlichen Fehlinterpretationen, wie gerade am Beispiel der temporären Skalierung gezeigt wurde, kann es auch durch einen ungeeigneten räumlichen Maßstab kommen. Sind die Klimamodelle für die Betrachtung einer bestimmten Region zu grob skaliert, wäre zum Beispiel die Modellaussage eines steigenden Trends der Jahrestemperatur für ganz Deutschland denkbar. Trotz dieser Aussage besteht die Möglichkeit, dass es dennoch in bestimmten Regionen zu sinkenden Temperaturen kommen kann. Dies ist neben unterschiedlichen Berechnungsansätzen auch eine der Ursachen für die Abweichungen der Niederschlagsprognosen der einzelnen Klimamodelle in Abb. 44 und Abb. 45. STAR und WETTREG besitzen eine räumliche Auflösung von 30 Kilometer. Die Niederschlagsprognosen dieser Modelle liegen relativ nahe beieinander. Demgegenüber hat CLM eine räumliche Auflösung von 56 Kilometer und REMO eine von 18 Kilometer. Letztgenannte Klimamodelle liegen hinsichtlich der prognostizierten Niederschlagsmengen tendenziell oberhalb

von STAR und WETTEG und weisen darüber hinaus im Monat August einen abweichenden Entwicklungstrend auf. Trotz einer niedrigeren Auflösung liegt das Modell STAR im Vergleich zum genauer auflösenden REMO in der vorliegenden Arbeit dichter an den historischen Wetterdaten der Standorte Braunschweig und Soest (vgl. 2.5).

Aufgrund der geschilderten Tatsachen ist bei der Verwendung und Interpretation von Klimaszenarien stets auf eine geeignete temporäre und räumliche Skalierung der Modelle zu achten. Darüber hinaus besitzen Prognosen auf Basis eines einzigen Modells in der Regel nur eine geringe Aussagekraft. Erst die Betrachtung eines Ensembles aus mehreren Klimamodellen ermöglicht überhaupt Aussagen zu klimatischen Veränderungen (Hewitt, 2005; Wilks, 2006). Bedingt durch die enorme Vielfalt an Einflussparameteren auf den Klimawandel und durch die Tatsache, dass keine eindeutige Vorhersage der Entwicklung zukünftiger Treibhausgasemissionen möglich ist, sollten die absoluten Ausprägungen der Ergebnisse aus der Klimamodellierung stets kritisch betrachtet und untereinander verglichen werden (Reifen und Toumi, 2009).

5.3. Bewertung klimatischer Einflüsse auf die zukünftigen Ertrags Erwartungen der angebauten Kulturen

Unter Berücksichtigung der in 5.1 und 5.2 beschriebenen Einschränkungen der Ertrags- und Klimamodellierung werden im folgenden Teil die Ergebnisse aus den Abschnitten 4.2 und 4.3 diskutiert. Dabei wird auch auf zusätzliche Einflussparameter auf die Ertragsbildung und Anbaustabilität der einzelnen Kulturen eingegangen, die in der Modellierung unbeachtet bleiben.

Schwachpunkte der modellierten Ertragsprognosen:

Bei der Interpretation der prognostizierten Ertragsleistungen ist zu beachten, dass der Bereich Pflanzenschutz sowie die Mäuse- und Schneckenthematik kein Bestandteil der Modellierung sind. Zur Kalibrierung und Validierung von APSIM wurde deshalb darauf geachtet, eine Ertragsreduzierung durch unerwünschte Pflanzenkonkurrenz und Krankheiten in den Beständen unter Anwendung eines intensiven Pflanzenschutzeinsatzes in den Praxisbetrieben bestmöglich zu vermeiden. Somit konnten die nicht im Modell berücksichtigten Ertragseinflüsse weitestgehend isoliert werden. APSIM ist dadurch auf Basis konventioneller Pflanzenbestände, die in Abhängigkeit der natürlichen Standortverhältnisse ihr volles Ertragspotential ausschöpfen, kalibriert und validiert.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass im Modell gezielt Ertragsschwankungen aufgrund des Stickstoffangebotes und der eingespeisten Wetterdaten aus den Klimaszenarien betrachtet werden können. Gleichzeitig werden Abweichungen in den Prognosen durch unberücksichtigte Ertragsfaktoren minimiert. Nachteilig ist, dass nicht alle Einflussparameter in der Modell-

rechnung enthalten sind und dass die in dieser Weise kalibrierten Ertragsmodelle nicht ohne Weiteres auf extensiv bewirtschaftete Ackerbausysteme angewendet werden können, die aufgrund ihrer reduzierten Anbauintensität ein deutlich geringeres Ertragspotential besitzen als die betrachteten Modellbetrieb.

Am Beispiel des in 5.1 diskutierten Falls der RUE und der WUE wird das Problem der Übertragbarkeit deutlich. Ein biologisch angebaute Getreidebestand besitzt durch den Verzicht auf mineralische Düngerformen und auf chemische Pflanzenschutzmaßnahmen in der Regel ein geringeres Ertragspotential als vergleichbare konventionelle Bestände (Herold und Wagner, 2010). Diese Aussage trifft für alle in den Systemen angebaute Kulturen zu. Werden beispielsweise am gleichen Standort ein konventioneller und ein ökologische Weizenbestand nebeneinander angebaut und aus den Bestandsbonituren die RUE und WUE für Winterweizen berechnet, ergeben sich abweichende Werte für beide Bestände. Der konventionelle Bestand kann durch die intensive Bestandesführung in der gleichen Zeit mehr Biomasse und einen höheren Ertrag ausbilden als die Vergleichsvariante. Da beiden Kulturen die gleiche Menge an Wasser und Strahlungsenergie zur Verfügung steht, liegen die RUE und WUE des konventionellen Bestandes über denen der biologisch bewirtschafteten Variante. Bei der Ertragsmodellierung extensiver Bestände mit den Parametern aus der Kalibrierung mit intensiv bewirtschafteten Beständen kommt es dadurch zu einer Überschätzung der Ertragspotentials dieser Varianten.

Darüber hinaus erfolgte auf den Versuchspartellen des diversifizierten Futterbaubetriebes an den Standorten Braunschweig und Soest aufgrund der Direktsaat eine intensive Kontrolle und Bekämpfung von Mäusen und Schnecken, die in diesem Umfang in der Praxis nicht üblich ist. Aus einer Reihe von Versuchsergebnissen ist bekannt, dass solche Schädlinge des landwirtschaftlichen Ackerbaus besonders bei unsachgemäßer, nicht ausreichender Bodenbearbeitung ein zunehmendes Risiko für die Ertragsstabilität eines Anbausystems darstellen können (Allgaier und Albert, 2008; Anonymus, 2010e; Bockholt, 2010; Hygnstrom et al., 2000). Bei unzureichenden Gegenmaßnahmen vermehren sich Mäusepopulationen rasant und führen zu erheblichen Ertragsausfällen (Benker, 2008). Auf den genannten Feldversuchen kam es in der Anbauperiode 2012/2013 am Standort Braunschweig zu einem Totalausfall durch Schneckenfraß auf einer in Direktsaat bestellten, 0,5 Hektar großen Roggenparzelle, bei der auf die Ausbringung eines Molluskizids zur Aussaat verzichtet wurde. Die in dieser Arbeit präsentierten Ergebnisse der Ertragsmodellierung legen jedoch zugrunde, dass unabhängig von der Intensität der Bodenbearbeitung keine Ertragsbeeinflussungen durch Schnecken und Mäuse bestehen. Das Ertragspotential der einzelnen Kulturen ist damit in allen Anbausystemen identisch und wird im Modell allein durch die Standortfaktoren der Wetterdaten und des Stickstoffangebots limitiert.

Darüber hinaus wird im Zusammenhang mit den Auswirkungen des Klimawandels oft über die ertragssteigernde Wirkung erhöhter CO₂-Gehalte in der Atmosphäre diskutiert (Calzadilla et al., 2013; Ruiz-Vera et al., 2013). Durch eine Stimulation des Pflanzenwachstums und eine damit verbundenen Steigerung der Wassernutzungseffizienz können Ertragsdepressionen in Folge von Hitzestress bis zu einem gewissen Grad vermindert werden (de Oliveira et al., 2013; Liu und Tao, 2012) oder sogar ertragssteigernde Effekte auftreten (Anonymus, 2011c). Gerade die C₄-Pflanze Mais besitzt auf den ersten Blick im Vergleich zu den anderen C₃-Pflanzen aus den betrachteten Anbausystemen das Potential, besonders von einem „CO₂-Düngungseffekt“ zu profitieren. Ergebnisse von Weigel (2009) zeigen signifikante Wechselwirkungen zwischen den Faktoren Trockenstress und CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Bei genauerer Betrachtung dieser Ergebnisse stellt sich heraus, dass der Mais jedoch nur unter kontrollierten Bedingungen in Klimakammern bzw. Gewächshäusern und unter relativ hohen CO₂-Konzentrationen zwischen 550 und 700 ppm im Vergleich zu aktuellen Gehalten von 350 bis 385 ppm Ertragssteigerungen von durchschnittlich knapp 30 Prozent realisieren konnte. Der Winterweizen als C₃-Pflanze besaß unter gleichen Bedingungen nur einen durchschnittlichen Mehrertrag von zehn Prozent. Bei einer Wiederholung dieser Studie unter realen Feldbedingungen mit der FACE-Methode (Free Air Carbon Dioxide Enrichment) waren demgegenüber keine ertragssteigernden Effekte beim Mais messbar, wohingegen der Ertrag von Winterweizen um 7 Prozent zunahm. Dies legt die Vermutung nahe, dass die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bereits heute „nahe am Optimum für C₄-Gräser“ wie Silomais liegt (Taubе und Herrmann, 2009; Wienforth, 2008) und ein weiterer Anstieg des Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre vor allem C₃-Pflanzen zu Gute kommen würde.

Generelle Auswirkung der Klimaveränderungen:

Wie die Ergebnisse der Modellrechnungen zeigen, besitzen die betrachteten Kulturen mit Ausnahme von Silomais und Ackerbohne äußerst robuste Ertragserwartungen unter der Annahme klimatischer Veränderungen. Dies liegt unter anderem daran, dass sich die klimatischen Rahmenbedingungen der Faktoren Temperatur und Wasser innerhalb der sensiblen Wachstumsphasen von früh abreifenden Nutzpflanzen nicht nachteilig verändern werden (vgl. 4.4). Auch andere Modellrechnungen auf europäischer Ebene bestätigen, dass das Ertragspotential auf westeuropäischen Hohertragsstandorten nur eine geringe Sensitivität gegenüber den prognostizierten Klimaveränderungen besitzt (Orlandini et al., 2008).

Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich jedoch nur auf die Klimafaktoren Niederschlag und Temperatur. Daneben gibt es noch weitere Parameter, die zwar in den Modellrechnungen unberücksichtigt bleiben, aber dennoch Auswirkungen auf die die Ertragserwartungen einer Kultur haben können. Neben dem bereits diskutierten Effekt steigender CO₂-Konzentrationen können

auch extreme Wetterereignisse zu bestimmten Zeitpunkten während der Vegetation zu massiven Ertragsschwankungen führen. Als Beispiel besteht die Gefahr, dass die Bestände durch häufiger oder intensiver auftretende Hagel- und Sturmereignisse vor der Ernte bis hin zum Totalausfall geschädigt werden können (Schaap et al., 2011). Vor allem der Winterraps, der kurz vor der Ernte äußerst anfällig gegenüber mechanischen Umwelteinflüssen ist (Keller et al., 2002), wäre davon betroffen. Ein ähnliches Risikopotential besitzen auch Starkniederschläge. Ein Vergleich verschiedener Klimaszenarien zeigt, dass sich die Intensität von Niederschlagsereignissen in den kommenden Jahrzehnten verstärken könnte (Deuschländer und Dalelane, 2012). Dennoch sind solche Prognosen immer vor der in 5.2 diskutierten Unsicherheit von Klimaprognosen zu betrachten. Sicher ist jedoch, dass die Ausgaben der Versicherungsgesellschaften für wetterbedingte Ertragsausfälle in den letzten Jahren zugenommen haben. Eine Statistik des Gesamtverbandes der Deutschen Versicherungswirtschaft (Abb. 46) zeigt, dass die Aufwendungen der landwirtschaftlichen Hagelversicherung in Deutschland zwischen 1980 und 2011 durchschnittlich gestiegen sind (Anonymus, 2012e). Dabei nahm nicht die Häufigkeit der Schadensereignisse sondern deren Ausprägung zu. Die auftretenden Hagelschäden führten demnach in den vergangenen Jahren aufgrund einer ansteigenden Intensität zu höheren Ertragsausfällen als in der Vergangenheit.

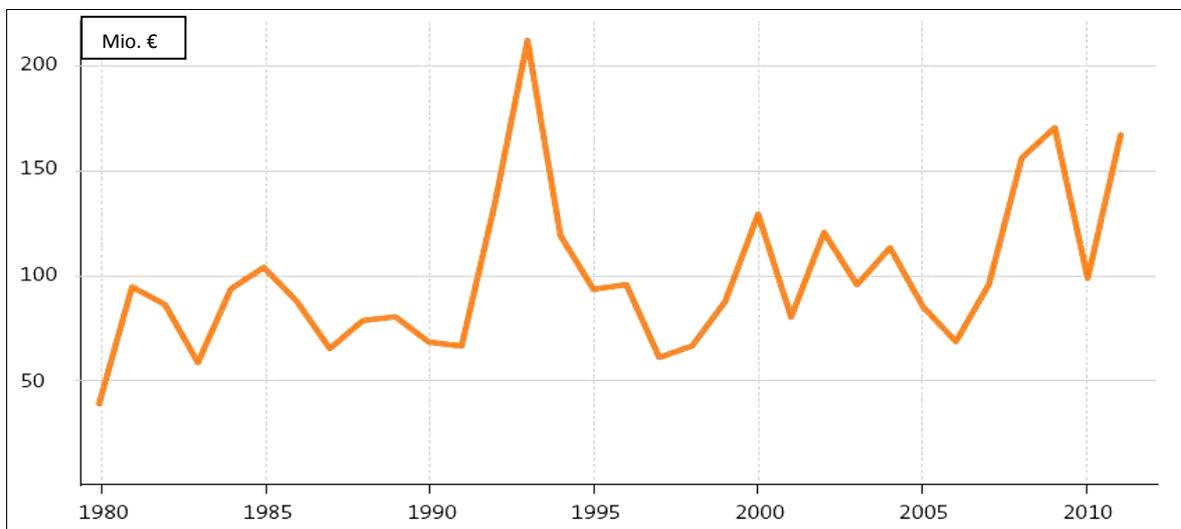


Abb. 46: Schadenaufwand Landwirtschaftliche Hagelversicherung 1980 – 2011 in Mio. Euro (Anonymus, 2012e)

Neben diesen negativen Ertragseinflüssen könnten klimatische Veränderungen auch positive Auswirkungen auf die genannten Kulturen haben. Ein erhöhter Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre kann wie bereits erwähnt zu steigenden Ertragserwartungen führen (Qiao et al., 2010). Am Beispiel von Winterweizen besteht nach einigen Modellrechnungen sogar die Möglichkeit, dass die ertragssteigenden Klimaeinflüsse an europäischen Hohertragsstandorten die negativen Fol-

gen überlagern werden und es in Summe zu höheren Felderträgen kommen wird (Ewert et al., 2005). Diese Ergebnisse lassen sich in gleicher Weise auch auf andere Kulturen übertragen (Weigel, 2009). Im Gegensatz dazu gibt es aber auch Stimmen, die für den Standort Europa in Summe ein sinkendes Ertragsniveau aufgrund klimatischer Veränderungen prognostizieren (Olesen et al., 2011). Vor allem an Grenzertragsstandorten, die bereits heute mit extremen Wetterereignissen zu kämpfen haben, könnten die Erträge in Zukunft weiter sinken.

Die Vielzahl an unterschiedlichen Aussagen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die zukünftigen Felderträge deutet auf die großen Unsicherheiten hin, mit denen die heutigen Klimamodelle behaftet sind. Darüber hinaus bleiben bei fast allen Prognosen die Einflussfaktoren technologischer Fortschritte in der Anbautechnik und in der Züchtung unberücksichtigt. Gerade die technologische Fortschritte in der Landtechnik und züchterische Weiterentwicklungen der Kulturen haben in der Vergangenheit zu erheblichen Ertragszuwächsen geführt. So hat sich der heutige Durchschnittsertrag von Winterweizen für den Standort Deutschland im Vergleich zum Stand von 1960 durch diese Maßnahmen in einem relativ kurzen Zeitraum mehr als verdoppelt (Anonymus, 2012h). Mit Blick auf die nur marginalen Klimaveränderungen in diesem Zeitraum (Anonymus, 2013g) besaß die Anpassung der Managementmaßnahmen damit einen deutlich höheren Ertragseinfluss als der Klimawandel.

Besonderheiten Ackerbohnen und Silomais:

Analog zu den beschriebenen Winterungen beruht auch die Ertragsbildung der Sommerungen Ackerbohne und Silomais auf den gleichen Einflussfaktoren klimatischer Umweltbedingungen. Der Unterschied besteht jedoch im Verlauf der Vegetationsphasen dieser Kulturen. Die Blütephase und die Abreife von Ackerbohnen und Silomais setzen im Vergleich zu den winterharten Kulturen einige Tage bis Wochen später ein (vgl. 2.6). Während die früher geernteten Kulturen weitgehend von extremen Wetterereignissen verschont bleiben, steigt bei den später abreifenden die Gefahr von Hitzestress und Wassermangel (Burkhardt und Gaiser, 2010; Taube und Herrmann, 2009; Wechsung et al., 2008). In der Ertragssimulation ergeben sich demzufolge sinkende Ertragswartungen bei Ackerbohnen und Silomais (vgl. 4.2 und 4.3). Da in der betrachteten Ertragsmodellierung in APSIM der zuvor beschriebene CO₂-Düngungseffekt bislang nicht berücksichtigt wird, besteht die Möglichkeit, dass die in 4.2 und 4.3 dargestellten Ertragsrückgänge geringer ausfallen, als diese in den Simulationen vorhergesagt werden. Speziell die Ackerbohne als C3-Pflanze würde im genannten Fall profitieren. Unter dieser Voraussetzung könnten jedoch auch die Ertragsleistungen der übrigen C3-Pflanzen ansteigen, weshalb die grundlegenden Tendenzen der zuvor abgebildeten Ertragsentwicklungen plausibel erscheinen.

Aufgrund der späten Ernte von Ackerbohnen und Silomais steigt darüber hinaus die Gefahr, dass diese Kulturen von extremen Sturm- und Hagelereignissen erfasst werden, die auftreten, nachdem beispielweise der Winterweizen schon geerntet ist. Beide Kulturen besitzen im Vergleich zu einem erntereifen Rapsbestand einerseits eine geringere Anfälligkeit gegenüber solchen Ereignissen (Keller et al., 2002), doch andererseits stehen sie gerade in den Sommermonaten, in denen ein erhöhtes Risiko für Sturm- und Hagelschäden besteht (Anonymus, 2013g; Deutschländer und Dalelane, 2012), auch mehrere Tage bis Wochen länger im Feld als früher geerntete Winterungen. Allerdings besitzt besonders die Ackerbohne noch ein erhebliches züchterisches Potential. Während der Winterraps und das Wintergetreide bereits einer intensiven züchterischen Bearbeitung unterzogen wurden, verläuft dieser Prozess bei Körnerleguminosen um ein Vielfaches langsamer (Siddique et al., 2012). Dies spiegelt auch ein Blick auf die Sortenzulassungen wider (Anonymus, 2013p). Besteht mittlerweile bei den genannten Winterungen eine umfangreiche Auswahl verschiedener Sorten, sind bei der Ackerbohne aktuell nur einige wenige Alternativen vorhanden. Dies ist einer der Gründe dafür, dass deren Ertragsleistung starken jährlichen Schwankungen unterliegt (Anonymus, 2007; Anonymus, 2012f; Anonymus, 2013m), die sich negativ auf den Durchschnittsertrag auswirken. Durch eine Intensivierung der Züchtungsaktivitäten bei den Körnerleguminosen bestünde daher großes Potenzial, klimatisch bedingten Ertragsrückgängen entgegenzuwirken.

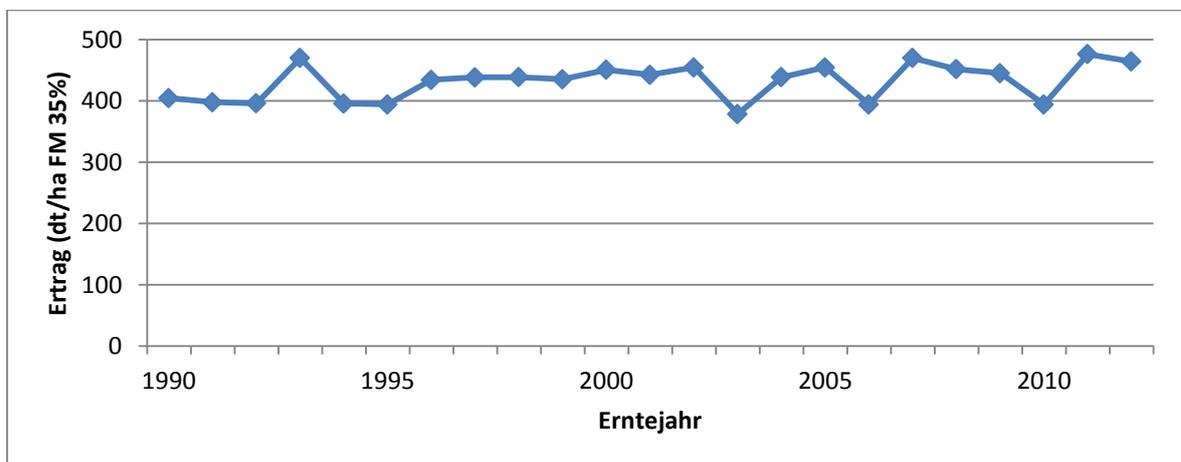


Abb. 47: Ertragssteigerung von Silomais zwischen 1990 und 2012 für Gesamtdeutschland (eigene Darstellung nach Daten des Statistischen Bundesamtes und des AMI)

Am Beispiel von Silomais in Abb. 47 wird deutlich, wie die Ertragsleistungen zwischen 1990 und 2012 mit Ausnahme der ertragsschwachen Erntejahre 2003, 2006 und 2010 und des überdurchschnittlich hohen Ertrags in 1993 kontinuierlich gesteigert werden konnten (Anonymus, 2013d; Anonymus, 2013l). Ein entscheidender Faktor dieses Fortschritts war die Verbesserung der Ertragsstabilität mit dem Einzug der Hybridzüchtung (Anonymus, 2013e; Schmidt, 2006). Durch die

gezielte Kombination von Eigenschaften homozygoter Inzuchtlinien konnte die Sensitivität des Silomais gegenüber negativen Umwelteinflüssen verringert und die Ertragsleistungen stabilisiert werden. Ähnliche Effekte wären auch bei der Ackerbohne denkbar (Link, 2009). Auch die Züchtung winterharter Kulturen könnte unter der Voraussetzung, dass die Winter milder werden zu einer Ertragssteigerung bei der Ackerbohne führen. Aufgrund fehlender ökonomischer Anreize sind derartige Verbesserungen derzeit jedoch nicht in Sicht (Vogt-Kaute et al., 2008).

5.4. Bewertung des ökonomischen Erfolgs der Anbausysteme unter verschiedenen Preisszenarien

Neben der reinen Betrachtung von Ertragserwartungen unter zukünftigen Klimabedingungen stellt sich auch die Frage, welches der drei Anbausysteme den höchsten ökonomischen Erfolg besitzt und wie dieser durch klimatische Veränderungen und unterschiedliche Preisszenarien beeinflusst wird. Durch den Anbau ertragsstarker Kulturen und den Verzicht auf aus ökonomischer Sicht schwächere Nutzpflanzen wie Ackerbohne und Silomais (Hanff et al., 2008) werden die höchsten Unternehmergewinne im Marktfruchtensystem erwartet. Der wirtschaftliche Erfolg in den Futterbausystemen liegt aufgrund einer anderen Produktionsausrichtung mit dem Primärziel der Bereitstellung von Futtermitteln unter dem des reinen Marktfruchtanbaus. Es ist bekannt, dass Veredlungsbetriebe mit bestehenden Stallanlagen auf entsprechende Rohstoffe zur Versorgung der Tierbestände angewiesen sind und ihre Produktionsausrichtung kurzfristige nicht vollkommen umstellen können. Dennoch besitzen auch die Futterbausysteme im Hinblick auf die zukünftige Klimaperiode 2021 bis 2050 die Möglichkeit, ihre Zielsetzung im Ackerbau neu auszurichten. Kurzfristig könnten fehlende Futtermengen in Folge einer Anpassung des Anbauprogramms durch den externen Zukauf ersetzt werden. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der ökonomischen Betriebsmodellierung (vgl. 4.5 bis 4.9) unter Einbeziehung von ergänzenden Überlegungen diskutiert.

Bei der Interpretation aller dargestellten Ergebnisse zur ökonomischen Betriebsbewertung ist zu berücksichtigen, dass in allen Anbausystemen unabhängig von der Intensität der Bodenbearbeitung mit den gleichen Ertragspotentialen der entsprechenden Kulturen gerechnet wurde. Somit hat beispielsweise ein in Direktsaat bestellter Winterweizen denselben Feldertrag wie ein konventionell bestellter. Besitzen gleiche Kulturen in den verschiedenen Anbausystemen jedoch unterschiedliche Ertragserwartungen, können sich die abgebildeten Differenzen zwischen den Systemen verschieben. Viele Untersuchungen zeigen, dass sich in der Praxis durchaus Unterschiede aus abweichenden Anbaustrategien ergeben können (Anonymus, 2011d; Goddard et al., 2008; Schneider, 2009; Zimmer und Nehring, 2008). Einerseits kann eine Reduzierung der Bodenbearbeitung zu sinkenden Erträgen führen. Populationen von Schnecken und Mäusen breiten sich

verstärkt aus und das Risiko einer schlechten Bestandsetablierung steigt an (Anken, 2007). Andererseits können eine verbesserte Bodenstruktur und höhere Humusgehalte für ein größeres Wasserhaltevermögen und eine gesteigerte Infiltration sorgen und vor allem unter extremen Witterungsbedingungen ertragsfördernde Effekte besitzen. Darüber hinaus entscheiden auch die Kenntnisse und Erfahrungen eines Betriebsleiters wie auch die Standorteigenschaften über den Erfolg und Misserfolg eines bestimmten Anbausystems.

Generell zeigt sich, dass das Marktfruchtssystem an beiden Projektstandorten sowohl bei den Deckungsbeiträgen, als auch bei den kalkulatorischen Betriebszweigergebnissen die höchsten monetären Erträge erwirtschaften kann. Dies liegt vor allem daran, dass sich die Fruchtfolge dieses Systems mit Winterweizen und Winterraps aus zwei ertragsstarken Kulturen zusammensetzt, die auch unter der Annahme klimatischer Veränderungen stabile Erträge liefern. Darüber hinaus können beide Kulturen am Markt zu relativ hohen Preisen verkauft werden. Somit liegen die durchschnittlichen Flächenerlöse trotz geringer Prämienansprüche unter allen betrachteten Preisszenarien über denen der anderen Anbausysteme (vgl. Tab. 56 bis Tab. 63). Einzig im Tiefpreisszenario der Klimaperiode 1981 bis 2010 am Standort Soest realisiert der diversifizierte Futterbaubetrieb aufgrund hoher Prämienansprüche für besondere Umweltleistungen identische Flächenerlöse. Die Annahmen zu den Prämienansprüchen basieren auf den aktuellen Regelungen für das Erntejahr 2013 nach den Darstellungen des KTBL (Anonymus, 2012g). Derzeit findet eine intensive Diskussion über die Fortsetzung der gemeinsamen europäischen Agrarpolitik statt, in der die Neuregelung der Prämienzahlungen ein wesentlicher Bestandteil ist (Lakner et al., 2013). Zu diesem Zeitpunkt kann noch keine abschließende Aussage getroffen werden, in welcher Weise oder ob in Zukunft überhaupt staatlichen Ausgleichszahlungen vergeben werden. Derzeit gibt es eine Reihe von Ansätzen, Prämien im Rahmen eines „Greening-Programms“ an bestimmte Umweltleistungen zu koppeln. Damit könnten ausgedehnte Fruchtfolgen und reduzierte Bodenbearbeitungsverfahren, wie sie im diversifizierten Futterbaubetrieb angewendet werden, profitieren. Langfristig betrachtet ist die Entwicklung der Gemeinsamen europäischen Agrarpolitik jedoch nicht vorhersehbar.

Neben den Faktoren Ertrag und Prämien werden die monetären Flächenleistungen der Anbausysteme maßgeblich durch die Preise der vermarkteten Produkte bestimmt. In der vorliegenden Arbeit wurde daher versucht, über die Bildung von festen Preisrelationen in Bezug auf einen Eckpreis von Winterweizen (vgl. 3.5), die Marktpreise der einzelnen Kulturen nach einem möglichst objektiven Verfahren zu bestimmen. Dennoch kann nicht garantiert werden, dass diese Preisrelationen auch in Zukunft konstant bleiben. Politisch oder klimatisch bedingte Veränderungen von Rahmenbedingungen sind nur zwei Beispiele, die zu Verschiebungen der berechneten Preisrelationen führen und die Vorzüglichkeit der angebauten Kulturen verändern könnten. Zum Beispiel profitiert der relativ hohe Rapspreis derzeit von einer staatlichen Biotreibstoffpolitik (Busse und

Brümmer, 2010), die einen festen Bestandteil an Biokraftstoffen an den üblichen fossilen Treibstoffen vorschreibt. Ein Wegfall dieser Reglementierung würde sich nachteilig auf die Nachfrage nach Rapsprodukten und damit auf den Marktpreis auswirken. Darüber hinaus können klimatische Veränderungen in andern Teilen der Welt das Risiko für Ertragsausfälle deutlich erhöhen. Sinkende Niederschläge und höhere Temperaturen in wichtigen Getreideanbauregionen, die bereits heute ein großes Anbaurisiko besitzen, würden häufiger zu Missernten führen. Durch den kurzfristigen Ausfall eines bedeutenden Anteils der weltweit gehandelten Erntemengen käme es dann zu sprunghaften Anstiegen der Weltmarktpreise einzelner Produkte. Ein solches Szenario könnte laut aktuellen Prognosen für die Weizenproduktion in Australien (Turner et al., 2011) eintreten.

Neben den Unterschieden bei den Leistungen der verglichenen Anbausysteme ergeben sich auch Abweichungen auf der Kostenseite. Der diversifizierte Futterbaubetrieb besitzt aufgrund seiner angewendeten Direktsaat die geringste Anzahl an Maschinen. Da der Anschaffungspreis von 33.000 Euro für die Direktsaattechnik (vgl. Tab. 14) mehr als doppelt so hoch ist wie die 13.600 Euro für eine entsprechende Standarddrillkombination inklusive Kreiselegge (vgl. Tab. 13), werden die Mehrkosten für die Bodenbearbeitungsgeräte in Marktfurcht- und konventionellen Futterbausystem zum Teil ausgeglichen. Die durchschnittliche Maschinenabschreibung im diversifizierten Futterbaubetrieb liegt somit nur geringfügig unterhalb der aus den anderen Betrieben, die Zinskosten für das gebundene Maschinenkapital sogar leicht über denen des Marktfrucht- und des konventionellen Futterbausystems. Demgegenüber wird in der Direktsaatvariante durch den Verzicht auf Bodenbearbeitung weniger Zeit zur Erledigung der Feldarbeit benötigt, was dazu führt, dass die Lohnkosten und die Kosten zur Maschinenunterhaltung geringer ausfallen als in den Systemen mit Bodenbearbeitung. In Summe liegen die Arbeitserledigungskosten im diversifizierten Futterbausystem damit um rund 75 Euro je Hektar in Braunschweig und rund 105 Euro je Hektar in Soest unter denen der arbeitsintensivsten Variante des Marktfruchtensystems (vgl. 4.8 und 4.9).

Mit einem Blick auf die anfallenden Direktkosten in den Systemen verschwindet dieser Kostenvorsprung im diversifizierten Futterbausystem. Höhere Kosten für Saatgut und Pflanzenschutz wirken sich negativ auf das Betriebsergebnis aus und zehren bereits einen Großteil des Vorteils auf. Die potentiellen Mehrkosten für die in 5.3 diskutierte Bekämpfung von Mäusen und Schnecken sind dabei noch nicht berücksichtigt. Außerdem gehen sowohl im konventionellen, als auch im diversifizierten Futterbausystem hohe Nährstoffmengen durch die Vermarktung von Silomais als Gärsubstrat verloren. Vor allem der Nährstoff Kali, der hauptsächlich im Halm und in den Blättern von Pflanzen vorkommt, wird dabei dem Boden entzogen. Das KTBL gibt für Silomais einen durch-

schnittlichen Entzug von 1,3 Kilogramm Kali je Dezitonne geernteter Trockenmasse an (vgl. Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 20). Bei einem Preis von 0,80 Euro je Kilogramm Reinnährstoff (vgl. Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 19) und einem Trockenmasseertrag von 180 Dezitonnen je Hektar betragen die Kosten des Kalientzugs damit knapp 190 Euro je Hektar. Bei einem Ertrag von 220 Dezitonnen Trockenmasse je Hektar liegen diese bei rund 230 Euro je Hektar. Wird der Silomais als reine Marktware wie der Winterweizen und der Winterraps im Marktfurchtsystem betrachtet, müssen die beschriebenen Kosten des Kalientzuges voll angerechnet werden, sodass die Direkt- und Arbeiterledigungskostenfreie Leistung der Futterbausysteme trotz erhöhter Prämienansprüche deutlich unter der des Marktfruchtsystems liegt.

In der Praxis besteht jedoch vielmals die Möglichkeit, einen Teil der abgefahrenen Nährstoffe über anfallende Gülle aus der Tierhaltung oder Substrate aus der Biogasproduktion kostengünstig zurück ins System zu führen. Da Gülle in den meisten Fällen kostenlos zur Verfügung steht, hängt der Preis für den „Rückkauf“ der Nährstoffe in Form organischer Düngemittel stark von den Ausbringungskosten bzw. der Hof-Feld-Entfernung ab (Toews, 2009). In Regionen mit einem dichten Viehbesatz und hohem Güllevorkommen kann sogar ein Entsorgungsproblem entstehen (Niederau und Jedrusiak, 2005), sodass die Gülle inklusive der Ausbringung in diesem Fall kostenfrei zur Verfügung steht (Schukat, 2010). Ein solches Entsorgungsproblem würde wiederum auch die Ausgaben für die Nährstoffbeschaffung im Marktfruchtsystem senken. Aufgrund der beschriebenen Problematik zur monetären Bewertung der Gülleausbringung, gestaltet sich die Berechnung organischer Düngemittel äußerst schwierig.

Um einen möglichst objektiven Vergleich der Anbausysteme gewährleisten zu können, wurden im vorliegenden Fall die Kosten unabhängig von der eingesetzten Düngerform auf Basis des Entzugs von Reinnährstoffen berechnet. Ein in der Praxis normalerweise vorkommender Kostenvorteil aus dem Rückfluss der Nährstoffe über die anfallenden Wirtschaftsdünger wird dadurch berücksichtigt, dass in den Futterbausystemen keine Kosten für die Gülleausbringung und die entsprechende Technik im Maschinenbestand veranschlagt werden.

Ein anderer Weg der Bewertung von Nährstoffrückflüssen aus der Biogasgülle ist die Annahme, dass diese in einem geschlossenen Nährstoffkreislauf kostenfrei zur Verfügung steht. Im genannten Fall wären anstatt der Nährstoffkosten für den Kalidünger beim Silomais die Ausbringkosten der organischen Düngung anzurechnen. Diese liegen bei der Ausbringung im Schleppschlauchverfahren und einer Hof-Feld-Entfernung von fünf Kilometern bei rund sechs Euro je Kubikmeter (Schindler, 2011; Schleicher, 2011). Biogasgülle enthält circa drei Kilogramm Kali je Kubikmeter (Reinhold et al., 2012). Bei einem angenommenen Kalientzug von 1,3 Kilogramm je Dezitonne

abgefahrener Trockenmasse und einem Silomaisertrag von 180 Dezitonnen je Hektar müssten rund 80 Kubikmeter Biogäsgülle ausgebracht werden, damit der Kalientzug von rund 235 Kilogramm je Hektar ausgeglichen ist. Die Ausbringungskosten belaufen sich damit auf circa 480 Euro je Hektar. In der ausgebrachten Biogäsgülle sind neben dem genannten Kali auch 0,8 Kilogramm Phosphor und 4,3 Kilogramm Stickstoff je Kubikmeter enthalten, die an anderer Stelle eingespart werden können. Letztgenannter ist durch Ausbringungsverluste nur zu circa 60 Prozent pflanzenverfügbar (DüV, 2012; Wendland et al., 2011). Mit den in Quelle: Eigene Darstellung nach Angaben des KTBL (Anonymus, 2012g)

Tab. 19 beschriebenen Preisen für die Einzel Nährstoffe können somit zusätzlich Stickstoff im Wert von rund 185 Euro je Hektar und Phosphor im Wert rund 65 Euro je Hektar ersetzt werden. In Summe ergeben sich also Ausbringungskosten der Gärgülle abzüglich zusätzlicher Nährstoffeinsparungen von rund 230 Euro je Hektar, die anstatt der veranschlagten Kosten des bei der Ernte abgefahrenen Kalis berechnet werden müssten.

Im beschriebenen Beispiel liegen die Ausbringungskosten somit nahe an den über den Entzug von Reinnährstoffen berechneten Dünungskosten. Wäre ein Betrieb in der Lage, die Gülle zu einem geringeren Kostensatz auszubringen, könnten sich an dieser Stelle Einsparungen ergeben. Ab einem Ausbringungspreis von rund drei Euro je Kubikmeter Gülle ständen die Nährstoffe kostenfrei zur Verfügung, wodurch sich die Betriebszweigergebnisse der beiden Futterbaubetriebe entsprechend erhöhen würden. Vor dem Hintergrund steigender Treibstoffkosten und zunehmender gesetzlicher Einschränkungen bei den Ausbringungsverfahren (Didam et al., 2011; Krentler, 2009; Sauter, 2010) ist es jedoch fraglich, ob solch niedrige Kostensätze in Zukunft realisierbar sind. Wahrscheinlicher ist, dass die Ausbringungskosten weiter ansteigen werden, wenn aufwändigere Technik zur direkten Einarbeitung der Gülle eingesetzt wird.

6. Anpassungsempfehlung für ein optimiertes Ackerbausystem im Szenario „STAR-A1B“

Wie in den Abschnitten 5.1 bis 5.4 deutlich wird, hängt die Empfehlung für eine bestimmte Strategie der Flächenbewirtschaftung stark von den getroffenen Annahmen über zukünftige Entwicklungen ab. Auch mit der Entscheidungsunterstützung durch verschiedene Arten der Modellierung können kommende Ereignisse nie mit absoluter Sicherheit vorhergesagt werden. Dies liegt an einer Reihe von zufällig auftretenden und teils unbeeinflussbaren Faktoren, die nicht mathematisch erfasst sind aber dennoch maßgebliche Auswirkungen auf die Ertragsleistung und den Betriebserfolg haben. Trotz der beschriebenen Unsicherheiten tragen die verwendeten Modellrech-

nungen dazu bei, die Irrtumswahrscheinlichkeit einer Prognose im Gegensatz zu einer reinen Spekulation signifikant zu vermindern. In dieser Weise sind in der vorliegenden Arbeit verschiedene Zukunftsszenarien erstellt und deren Auswirkungen analysiert worden. Unter der Angabe eines statistischen Fehlers ermöglichen diese Szenarien, eine pflanzenbauliche und ökonomische Risikoanalyse verschiedener Ackerbausysteme und eine Empfehlung für die Variant mit dem bestmöglichen Erfolg.

Ertragsstabilität:

In Bezug auf die Ertragsstabilität eines Systems unter klimatischen Veränderungen besitzen nach den vorgestellten Ergebnissen der Standorte Braunschweig und Soest vor allem die Kulturen mit einer frühen Abreife Vorteile, da sie nicht von den verstärkt auftretenden Wetterextremen in den Monaten Juli und August betroffen sind. Dies trifft vor allem auf die züchterisch bereits intensiv bearbeiteten und winterharten Kulturen zu. Abgesehen von der nur marginal veränderten Gefährdung durch Klimaveränderungen in den sensiblen Wachstumsphasen werden die vorgestellten Kulturen Winterweizen, Wintergerste und Winterraps darüber hinaus mit großer Wahrscheinlichkeit von einer verlängerten Wachstumsperiode in Folge steigender Temperaturen und milderer Winter profitieren. Sollte es in Einzeljahren dennoch zu Auswinterungsschäden kommen, hätte ein Betrieb, der Winterungen anbaut im Frühjahr die Gelegenheit, ersatzweise eine Sommerung anzubauen.

Neben den positiven Eigenschaften besitzt der Anbau dieser Kulturen auch negative Eigenschaften, die ein Risiko für die Ertragsstabilität darstellen. In Jahren mit starken Niederschlägen zur Aussaatzeit könnte es zu Problemen bei der Bestandsetablierung kommen (Schäfer, 2012). Aufgrund sinkender Niederschlagsersparungen im Monat August (vgl. 4.4) wird sich dieses Risiko beim Winterraps aller Voraussicht nach verringern. Das Aussaatfenster von Wintergerste beträgt im Zeitraum von Mitte September bis Anfang Oktober rund zwei bis vier Wochen (Anonymus, 2012c), das von Winterweizen zwischen Mitte September und Anfang Dezember mehr als acht Wochen. Bedingt durch die langen Zeitspannen für die Aussaat der genannten Getreidearten ist das Risiko einer fehlschlagenden Bestandsetablierung durch schlechte Aussaatbedingungen als gering einzustufen.

Im Gegensatz dazu steigt das Anbaurisiko vor allem bei den Sommerungen. Diese reifen aufgrund ihrer Frühjahrsaussaat erst mehrere Tage bis Wochen nach den im Herbst zuvor gesäten Winterungen ab. Anders als bei Sommerkulturen sind die Herbstsaaten zum Vegetationsbeginn im Frühjahr bereits etabliert und erreichen demzufolge schneller die Blütephase. Die sensiblen Wachstumsphasen der Ackerbohne und des Silomais werden dagegen erst im späteren Jahresverlauf erreicht, in dem ein steigendes Risiko für Extremwetter vorhergesagt wird. Außerdem stehen

diese Kulturen in den Sommermonaten, in denen die Unwettergefahr am größten ist (Anonymus, 2013b; Anonymus, 2013k) länger im Feld, was die Wahrscheinlichkeit für Ertragsausfälle zusätzlich erhöhen könnte. Darüber hinaus werden in den Wintermonaten steigende Niederschläge prognostiziert (Anonymus, 2013g), wodurch sich die Aussaatbedingungen im zeitigen Frühjahr verschlechtern könnten. Würde eine Aussaat in schlechten Jahren fehlschlagen, könnte dies beim Anbau von Sommerungen zu einem Totalausfall der Ernte führen, da anders als bei Winterungen keine zweite Kultur in der gleichen Vegetationsperiode mehr angebaut werden kann. In Summe der aufgeführten Sachverhalte sind die durchschnittlichen Ertragserwartungen im Marktfruchtssystem unterer Annahme klimatischer Veränderungen am stabilsten anzusehen.

Ökonomischer Erfolg:

Die modellierten Felderträge bilden die Basis der ökonomischen Bewertung. Da der betriebswirtschaftliche Erfolg eines Anbausystems im Wesentlichen von den Felderträgen und den erzielbaren Marktpreisen abhängt, liegen die Deckungsbeiträge und das kalkulatorische Betriebszweigergebnis folglich ebenfalls beim Marktfruchtssystem am höchsten. Neben stabilen Erträgen bei den Kulturen Winterraps und Winterweizen können deren Ernteprodukte zu relativ hohen Preisen am Markt abgesetzt werden. Bei den Futterbaubetrieben wirken sich rückläufige Ertragserwartungen bei Ackerbohne und Silomais zwischen der Klimaperiode 1981 bis 2010 und dem Zeitraum 2021 bis 2050 sowie hohe Düngerkosten beim Anbau von Silomais negativ auf den Unternehmergewinn aus. Die geringeren Marktleistungen in Verbindung mit den relativ hohen Direktkosten können auch durch geringere Arbeiterledigungskosten und relativ hohe Prämienansprüche in der Direktsaatvariante des diversifizierten Futterbaubetriebs nicht ausgeglichen werden.

Die höheren Prämienansprüche, die derzeit für besondere Umweltleistungen gezahlt werden, steigern die Deckungsbeiträge der einzelnen Kulturen nur in geringem Umfang (vgl. 4.5 und 4.6). Als Beispiel müssten bei einem Vergleich der reinen Deckungsbeiträge ohne Prämien und Direktzahlungen für die Klimaperiode 2021 bis 2050 am Standort Braunschweig im konventionellen Futterbausystem im Hochpreisszenario rund 300 Euro je Hektar mehr an Zuschüssen gezahlt werden, um den Wert des Marktfruchtbetriebes zu erreichen. Beim diversifizierten Futterbaubetrieb wären im gleichen Fall rund 360 Euro je Hektar an zusätzlichen Direktzahlungen notwendig. Darüber hinaus kann zum jetzigen Zeitpunkt nur spekuliert werden, ob, wofür und in welcher Höhe in Zukunft staatliche Ausgleichszahlungen verteilt werden (vgl. 5.4). Diese Tatsache wirkt sich wiederum negativ auf die Planungssicherheit eines Betriebes aus.

Fruchtfolge:

Nicht berücksichtigt wurden in den bisherigen Anpassungsempfehlungen die langfristigen Auswirkungen der Fruchtfolgen und der Bodenbearbeitung. Ein theoretisch positiver Effekt der Fruchtfolge im diversifizierten Futterbausystem ist beispielsweise die Nährstoffanreicherung im System durch den Anbau der Ackerbohne. Dies führte in eigenen Versuchen an den Standorten Soest und Braunschweig in den Jahren 2011, 2012 und 2013 dazu, dass bei der folgenden Wintergerste eine Güllegabe mit einem Stickstoffgehalt von rund 40 bis 50 Kilogramm Stickstoff je Hektar eingespart werden konnte, ohne dass Mindererträge bei der Gerste zu verzeichnen waren. Multipliziert mit dem prozentualen Anbauumfang an der gesamten Betriebsfläche würde der diversifizierte Futterbaubetrieb damit durchschnittlich ca. sechs bis sieben Kilogramm Stickstoff je Hektar der bewirtschafteten Ackerfläche einsparen. Dauerversuche zum Vorfruchtwert von Leguminosen der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft zwischen 1994 und 2003 ergaben durchschnittliche Stickstoffeinsparungen bei der Folgekultur von maximal 30 Kilogramm je Hektar (Albrecht und Guddat, 2004). Zwar konnten in diesen Versuchen durch die gute Vorfruchtwirkung bei dem nachfolgenden Winterweizen Mehrerträge zwischen 4,8 und 14,3 Prozentpunkten im Gegensatz zu Stoppelweizen erzielt werden, doch lagen diese positiven Effekte auf einem ähnlichen Niveau wie beim Weizenertrag nach Winterraps. Damit die Ackerbohne vergleichbare Ergebnisse wie der ökonomisch vorteilhafte Winterraps erzielen kann, müsste sich der aktuelle Stickstoffpreis auf rund zwei Euro je Kilogramm nahezu verdoppeln (Gocht, 2011). Außerdem kann es bei einer fehlenden innerbetrieblichen Verwertungsmöglichkeit zu Problemen bei der Vermarktung der Ackerbohne kommen. Da deren aktuelle Anbaufläche in Deutschland mit knapp 16.000 Hektar nur 0,5 Prozent der Anbaufläche des Winterweizens entspricht (Anonymus, 2013d), ist zum momentanen Zeitpunkt kein flächendeckender Markt vorhanden. Abzuwarten bleibt, welche Veränderungen sich ergeben, wenn der Leguminosenanbau von staatlicher Seite gezielt gefördert werden sollte (Häusling, 2011).

Bisher nicht genannte Vorteile einer diversifizierten Fruchtfolge sind die Verminderung phytosanitärer Probleme sowie mehr Gestaltungsmöglichkeiten bei der Unkraut- und Ungrasregulierung. Als Beispiel besteht speziell bei engen Getreidefruchtfolgen mit einem Anteil von mehr als 75 Prozent an Wintergetreide (Anonymus, 2011a) ein vermehrtes Auftreten von konkurrenzstarken Ungräsern wie Ackerfuchsschwanz und Windhalm (Klaaßen und Freitag, 2004). Werden die Anbau Grenzen einzelner Kulturen dauerhaft unterschritten kann dies zu Herbizidresistenzen führen (Anonymus, 2009). Diese werden darüber hinaus durch eine reduzierte Bodenbearbeitung und fehlende Wirkstoffwechsel bei den Pflanzenschutzpräparaten gefördert (Anonymus, 2013o) und können in Einzelfällen spürbaren Anbauproblemen führen.

Aufgrund der engen Zusammenhänge und Wechselbeziehungen sind die konkreten Auswirkungen einer engen Fruchtfolge auf das Ertragspotential nur schwer messbar. Trotz des Risikos potentiell geringerer Ertragsenerwartungen durch die geschilderten pflanzenbaulichen Nachteile überwiegt in der Regel der ökonomische Nutzen einer ertragsstarken Fruchtfolge (Anonymus, 2012i). Die Wirkungen von Fruchtfolgen wurden dazu in mehrjährige Feldversuche zwischen 1988 und 2000 am Standort Kiel zur Ertragsstruktur und -stabilität von Winterweizen, Wintergerste und Winterraps in unterschiedlichen Anbaukonzentrationen getestet (Christen, 2001). Die Ergebnisse zeigen, dass ertragssteigernde Effekte vor allem auf der angebauten Vorfrucht und weniger auf der gesamten Fruchtfolge basieren. Durch gezielte Managementmaßnahmen konnten nachteilige Auswirkungen enger Fruchtfolgen zu einem großen Teil ausgeglichen, jedoch nicht völlig vermieden werden. In Bezug auf eine Weizen-Monokultur lag der Ertrag des Winterweizens im „günstigsten“ Fall rund zehn Prozentpunkte höher. Ähnliche Ergebnisse zeigten sich bei Wintergerste. Zwischen der Winterraps-Monokultur und den maximalen Rapsenerträgen betrug die Differenz 18 Prozentpunkte. Im Vergleich mit den in dieser Arbeit betrachteten Ackerbausystemen sind dies jedoch Extrembeispiele. Selbst in der hier beschriebenen engen Fruchtfolge des Marktfrucht-systems wird eine zweijährige Anbaupause beim Winterraps eingehalten, sodass die Ertragsunterschiede zwischen dem Marktfrucht- und dem diversifizierten Futterbausystem vermutlich deutlich geringer ausfallen würden. Praktische Feldversuche an den Standorten Braunschweig und Soest zwischen 2010 und 2013 zeigen bisher noch keine fruchtfolgebedingten Ertragsabweichungen.

Bodenbearbeitung:

Anders, als bei den relativ geringen Ertragsunterschieden durch verschiedene Fruchtfolgen kann sich eine reduzierte oder nicht erfolgte Bodenbearbeitung bereits nach kürzester Zeit in Mindererträgen in Folge schlechter Feldaufgänge und Bestandsentwicklungen niederschlagen. In Großflächenversuchen an mehreren Standorten in Süd- und Ostdeutschland zwischen 1994 und 2003 konnten die Weizenerträge bei konservierender Bodenbearbeitung auf dem gleichen Niveau wie in einer konventionellen Pflugvariante (Pringas und Koch, 2004) gehalten werden. Demgegenüber nahmen die Ertragsschwankungen in der Direktsaatvariante zu, sodass teils signifikante Ertragseinbußen beobachtet wurden. Ähnliche Tendenzen lassen sich unter anderem durch ein vermehrtes Vorkommen von Schnecken und Mäusen und unterschiedliche Feldaufgänge bei den betrachteten Kulturen auch auf den beschriebenen Versuchsflächen in Braunschweig und Soest bestätigen.

Dennoch bietet die Direktsaat auch Vorteile. Unter dem Gesichtspunkt der aktuell diskutierten Thematik zur Bodenerosion können die Flächen umso besser geschützt werden, je mehr Pflanzenmaterial an der Bodenoberfläche verbleibt (Hiller, 2004). Diese Tatsache spricht für eine redu-

zierte Bodenbearbeitung bis hin zur Direktsaat. Durch die enthaltenen Strukturelemente besitzt der Boden eine höhere Aggregatstabilität, kann bei starken Niederschlägen mehr Wasser aufnehmen und ist damit weniger verschlammungsgefährdet (Voßhenrich und Brunotte, 2011). Darüber hinaus können pfluglos bewirtschaftete Böden gerade bei Trockenheit mehr Wasser aus unteren Bodenschichten nachliefern und somit unter bestimmten Bedingungen einen ertragssteigernden Effekt besitzen (Basch et al., 2012).

In Summe der aufgeführten Argumente bietet eine in der Intensität variierende Mulchsaat die größten Vorteile in der Praxis. Anders als bei der Direktsaat können die die Ertragserwartungen der angebauten Kulturen nachhaltig auf dem hohen Niveau eines konventionell bewirtschafteten Systems gehalten werden. Auf einen standardmäßigen Glyphosateinsatz (vgl. 2.1) kann durch die Möglichkeit der mechanischen Unkrautbekämpfung verzichtet werden, was vor dem Hintergrund anhaltender Kritik am übermäßigen Einsatz von Totalherbiziden (Steinmann, 2013) kein unwesentliches Argument ist. Darüber hinaus werden die Auflaufbedingungen der ausgebrachten Saat durch eine mehr oder weniger intensive Saatbettbereitung optimiert, wodurch sich wiederum das Anbaurisiko und Ertragsschwankungen reduzieren. Gleichzeitig sinkt die Erosionsgefahr durch an der Oberfläche verbleibende Pflanzenreste und eine verbesserte Bodenstruktur. Systeme mit einer angepassten Bodenbearbeitung können den Boden schonen und durch eine geringere Bearbeitungsintensität in Bezug auf die Bestellung mittels Pflugeinsatz zu Einsparungen bei den Arbeitserledigungskosten führen (Brunotte, 2011).

Optimiertes Anbausystem:

Nach Auswertung aller dargestellten Ergebnisse und unter Berücksichtigung ergänzender Aussagen aus diversen Literaturquellen kann der Erfolg eines Ackerbausystems an den Standorten Braunschweig und Soest aus pflanzenbaulicher und ökonomischer Sicht durch mehrere Faktoren optimiert werden.

Zum einen zeigen ertragsstarke und züchterisch weit bearbeitete Kulturen wie Winterraps, Wintergerste und Winterweizen, unter aktuellen sowie unter zukünftigen Klimaverhältnissen, stabile oder leicht steigende Ertragserwartungen. Die Unterschiede zwischen den betrachteten Standorten in Braunschweig und Soest fallen dabei äußerst gering aus. Bei Einhaltung der notwendigen Anbaupausen von Winterraps können mit einer Fruchtfolge aus den genannten Kulturen die höchsten Flächenleistungen erzielt werden. Im Anbauplan des betrachteten Marktfruchtssystem erscheinen langfristig stabile Rapsrerträge aufgrund der Unterschreitung einer dreijährigen Anbaupause jedoch als fragwürdig (Anonymus, 2008). Durch den zusätzlichen Anbau von Wintergerste oder einer vergleichbaren Kultur wie Wintertriticale oder Winterroggen kann dieses Problem vermieden werden. Die genannten Getreidearten besitzen ähnliche Ertragsleistungen wie der

Winterweizen und deren Marktpreise liegen in der Regel nur geringfügig unter denen des Weizens. Darüber hinaus besteht weiteres Optimierungspotential in der Bodenbearbeitungsstrategie des genannten Marktfruchtensystems. Nicht immer ist der Pflugeinsatz zwingend erforderlich. Wie aus den gezeigten Beispielen hervorgeht, kann unter Umständen sogar komplett auf eine konservierende Bodenbearbeitung umgestellt werden. Bei gleichbleibenden Erträgen könnten Kosten in der Arbeitserledigung eingespart, die Bodenerosion vermindert und Gefahr von Trockenstress gesenkt werden.

Als weiterer Schritt der Optimierung wird derzeit auf unterschiedlichen Ebenen intensiv über „Strip-Till-Verfahren“ nachgedacht. Neben den bekannten Strategien der konventionellen Bearbeitung sowie der Mulch- und Direktsaat stellt dieses Verfahren eine neue Möglichkeit dar, die die Vorteile eines Mulchsaatsystems mit denen der Direktsaat zu verbinden (Archer und Reicosky, 2009; Mahidi und Hanna, 2008). Sämtliche Maßnahmen der Bodenbearbeitung und Bestandesführung erfolgen bei der Strip-Till-Variante nur innerhalb der Saatreihe. Der Zwischenbereich bleibt ähnlich wie bei der Direktsaat unberührt. Um eine getrennte Bearbeitung der Saatreihen gewährleisten zu können, müssen jedoch ausreichende Reihenabstände vorhanden sein. Aus diesem Grund bieten sich zunächst Reihenkulturen wie der Mais für dieses Verfahren an. In wieweit auch andere Kulturen in dieser Weise angebaut werden können ist in zukünftigen Forschungsarbeiten zu klären. Voraussetzung für die Strip-Till-Technik ist jedoch eine entsprechende Steuerungs- und Regeltechnik bei den Landmaschinen und der Einsatz satellitengestützter Spurführungssysteme. Ob sich diese technisch aufwändige Variante des Precision Farmings als Alternative zu den bekannten Strategien in der Bodenbearbeitung bewähren kann, bleibt abzuwarten.

7. Zusammenfassung

Der Klimawandel zählt zu einem der meist diskutierten Themen dieser Zeit. Trotz vieler unterschiedlicher und teils gegensätzlicher Aussagen zur Ausprägung der bevorstehenden Klimaveränderungen stimmen die Experten darin überein, dass sich die Bedingungen in den nächsten Jahrzehnten verändern werden. Gerade die Landwirtschaft, deren Betriebszweig Pflanzenbau direkt und unmittelbar von Umweltbedingungen und Wetter- bzw. Witterungsereignissen beeinflusst ist, wird von einem solchen Wandel besonders betroffen sein. Bedingt durch die mittel- und langfristig vorherrschenden Anbaubedingungen können die Felderträge in diesem Zusammenhang ansteigen oder abnehmen. Bisher gibt es aufgrund der enormen Vielfalt an globalen und regionalspezifischen Einflussfaktoren auf den Klimawandel, die bis heute noch nicht vollständig erforscht sind, kaum belastbaren Prognosen zu den konkreten Ausprägungen der genannten Veränderungen. Durch eine modellhafte Betrachtung vorhandener Klimaszenarien können jedoch unter vorher getroffenen Annahmen einzelne Parameter auf die landwirtschaftliche Produktion und das dazugehörige Anbaurisiko analysiert sowie notwendige Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden.

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bestand daher in der Beschreibung der pflanzenbaulichen und ökonomischen Folgen des Klimawandels auf das Anbaurisiko landwirtschaftlicher Nutzpflanzen an den deutschen Standorten Braunschweig und Soest. Dazu wurden drei virtuell konstruierte Modellbetriebe mit abweichenden Fruchtfolgen und Strategien in der Bodenbearbeitung unter Berücksichtigung verschiedener Klimaszenarien miteinander verglichen. Bei den genannten Ackerbausystemen handelte es sich um einen weitgehend konventionell wirtschaftenden Marktfruchtbetrieb mit der Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen-Winterweizen, einen überwiegend konservierend arbeitenden Futterbaubetrieb mit der Fruchtfolge Winterweizen-Wintergerste-Silomais und einen vergleichbaren Futterbaubetrieb, der die Fruchtfolge Winterraps-Winterweizen-Silomais-Ackerbohne-Wintergerste-Silomais-Winterweizen durchgehend im Direktsaatverfahren anbaut.

Mittels der Ertragsmodellierung im australischen Modell APSIM wurden zunächst die jährlichen Ernteerträge der Kulturen aus den Modellbetrieben für die Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 analysiert. Grundlage dieser Berechnungen waren entsprechende Szenarien aus regionalen Klimamodellen für die beschriebenen Standorte Braunschweig und Soest unter Annahme eines mittleren Emissionsszenarios A1B des IPCC. Durch eine Betrachtung der Ertragserwartungen aus den Modellrechnungen in Verbindung mit einer Analyse des klimatisch bedingten Wachstumsstresses in den sensiblen Wachstumsphasen der Nutzpflanzen konnten Rückschlüsse auf das vorhandene Anbaurisiko in den Anbausystemen gezogen werden.

Mit diesen Ergebnissen erfolgte im Anschluss eine ökonomische Bewertung der einzelnen Modellbetriebe im Betriebssimulationsmodell Farmboss. Anhand eines Hoch- und eines Tiefpreisszenarios wurden darin die durchschnittlichen Deckungsbeiträge sowie die kalkulatorischen Betriebszweigergebnisse der einzelnen Kulturen bzw. der gesamten Betriebszweige in den jeweiligen Ackerbausystemen berechnet.

Die Auswertung der Ergebnisse zeigte eine tendenzielle Zunahme von extremen Hitze- und Trockenperioden mit Temperaturen oberhalb der Wachstumstoleranzen einzelner Kulturen und Niederschlägen unterhalb der potentiellen Verdunstungsraten in den Monaten Juli und August. In diesem Zeitraum befinden sich die sensiblen Wachstumsphasen spät abreifender Kulturen wie Ackerbohne und Silomais, deren Risiko für Ertragsausfälle unter den getroffenen Modellannahmen ansteigt. Durch das erhöhte Anbaurisiko ergaben die Berechnungen bei diesen Kulturen somit sinkende Ertragserwartungen in der Zukunft. Die sensiblen Phasen der früher abreifenden Winterungen liegen demgegenüber in den Monaten Mai und Juni, in denen bei Analyse der Klimaszenarien keine negativen Klimaveränderungen zu erkennen waren. Deren Erträge blieben daher im Vergleich der Klimaperioden an beiden Versuchsstandorten konstant oder konnten sogar leicht zulegen. Diese Resultate hatten einen unmittelbaren Einfluss auf die ökonomische Bewertung der Anbausysteme. Die Wirtschaftlichkeit der vorhandenen Winterungen lag in allen Modellbetrieben in Braunschweig und Soest über derjenigen der Sommerungen. Die relativ hohen Markterlöse der vorzüglichen Kulturen konnten auch durch die Annahme staatlicher Sonderprämien für spezielle Umweltleistungen oder durch teils vorhandene Kosteneinsparungen in der Direktsaatvariante nicht ausgeglichen werden. Aufgrund der zukünftig sinkenden Ertragserwartungen beim Mais und bei der Ackerbohne stiegen die Differenzen der Anbausysteme zwischen den Klimaperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050 weiter an.

Relativierend zu diesen Ergebnissen muss berücksichtigt werden, dass unabhängig von der Bewirtschaftungsform in allen Betrieben von gleichen Ertragserwartungen bei den entsprechenden Kulturen ausgegangen und nur die Einflüsse klimatischer Veränderungen durch die Faktoren Niederschlag und Temperatur analysiert wurden. In der Realität können diese durch die Fruchtfolgegestaltung und unterschiedliche Intensitäten in der Bodenbearbeitung jedoch voneinander abweichen. Darüber hinaus ist die CO₂-Konzentration in der Luft kein Bestandteil der angewandten Ertragsmodellierung. In bestimmten Fällen können hohe Kohlendioxidgehalte die Wassernutzungseffizienz einer Kultur erhöhen und deren Ertragspotential gerade unter trockenen Bedingungen stabilisieren. Dies würde gerade bei den spät abreifenden Sommerungen, die von einer steigenden Trockenheit im Juli und im August betroffen sind zu geringeren Ertragsrückgängen führen, als sie in den Ergebnissen der Modellierung abgebildet sind. Der gleiche Punkt könnte auch zu Mehrerträgen bei den Winterungen führen.

Als Fazit der vorliegenden Arbeit bleibt daher festzuhalten, dass sowohl unter aktuellen, als auch unter zukünftigen Klimabedingungen das konventionelle Marktfruchtssystem mit dem höchsten Fruchtfolgeanteil an ertragsstarken Winterungen aus ökonomischer Sicht am vorteilhaftesten war. Der Anbau von spät abreifenden Sommerungen oder von Nischenkulturen, die züchterisch bislang wenig bearbeitet wurden, führte in Summe dagegen zu einer Zunahme des Anbaurisikos und damit verbunden zu einer verminderten Gesamtwirtschaftlichkeit eines Systems. Unter Berücksichtigung weiterer pflanzenbaulicher Überlegungen fallen die dargestellten Differenzen zwischen den Systemen in der Realität vermutlich geringer aus, als dies auf den ersten Blick der Fall ist. Gerade die betrachteten Futterbausysteme lagen in ihren Betriebszweigergebnissen nahe beieinander. Dennoch muss bei allen in dieser Arbeit getroffenen Aussagen berücksichtigt werden, dass diese auf der Grundlage von Modellrechnungen beruhen, die immer nur einen Teil der Realität abbilden und eine bestimmte Entwicklung daher nie mit vollkommener Sicherheit vorhersagen können. Darüber hinaus hängt das Ergebnis einer ökonomischen Berechnung sehr stark von den ausgewählten Mengen- und Preisgerüsten ab, die aus empirischen Erkenntnissen resultieren. Inwieweit diese Annahmen auch in Zukunft Bestand haben, kann jedoch nicht vorhergesagt werden.

8. Literatur

- Adam M., Corbeels M., Leffelaar P.A., Van Keulen H., Wery J., Ewert F. (2012) Building crop models within different crop modelling frameworks. *Agricultural Systems* 113:57-63. DOI: DOI 10.1016/j.agsy.2012.07.010.
- Akponikpe P.B.I., Gerard B., Michels K., Biolders C. (2010) Use of the APSIM model in long term simulation to support decision making regarding nitrogen management for pearl millet in the Sahel. *European Journal of Agronomy* 32:144-154.
- Albrecht R., Guddat C. (2004) Welchen Wert haben Körnerleguminosen in der Fruchtfolge. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Allgaier C., Albert R. (2008) Schadschnecken. Biologie, Arten und Bekämpfung aid infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft, Bonn.
- Alpmann D., Braun J., Schäfer B.C. (2013) Auswertung einer Analyse der Wirtschaftlichkeit des konventionellen Körnerleguminosenanbaus aus dem Jahr 2012, Fachhochschule Südwestfalen.
- Anken T. (2007) Mulch- und Direktsaaten. Ursachen reduzierter Feldaufgänge ART, Bibliothek, Ettenhausen.
- Anonymus (2007) Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Ackerbohnen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Anonymus (2008) Merkblatt Fruchtfolgestellung von Winterraps. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Anonymus (2009) Herbizidresistenz – unvermeidbar? Fachausschuss Herbizidresistenz am Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen.
- Anonymus (2010a) Düngeempfehlungen Stickstoff, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, Geschäftsbereich Landwirtschaft. http://www.lufa-nord-west.de/data/documents/Downloads/IFB/Nmin__Empfehlungen_zur_N-Duengung.pdf. Stand 25.06.2013.
- Anonymus (2010b) Grundsätze für die Förderung einer markt- und standortangepassten Landbewirtschaftung im GAK-Rahmenplan 2010 bis 2013, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz.
- Anonymus (2010c) Betriebsplanung Landwirtschaft 2010/2011. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 22. Aufl. Landwirtschaftsverl., Münster, Westf.
- Anonymus (2010d) Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie - Bodenkundliche Übersichtskarte von Niedersachsen im Maßstab 1:50.000 (BÜK 50).
- Anonymus (2010e) Mulch- und Direktsaat für Profis. 10 Praktiker zeigen, wie's geht. 1. Aufl. Emminger, Berlin.

- Anonymus (2011a) Ratgeber 2011: Gestaltung der Fruchtfolge. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Anonymus (2011b) Die neue Betriebszweigabrechnung. Ein Leitfaden für die Praxis ; Vorschlag für bundeseinheitliche Gestaltungen von Betriebszweigabrechnungen auf der Grundlage des BMVEL-Jahresabschlusses. 3., vollst. überarb. Aufl. DLG-Verlag, Frankfurt am Main.
- Anonymus (2011c) Klimawandel und Landwirtschaft Auswirkungen der globalen Erwärmung auf die Entwicklung der Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen. Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen.
- Anonymus (2011d) Tagungsband zum Feldtag Bodenbearbeitung und Ertragssicherheit, Herleshausen, 22.06.2011, in: H. Hessen / Landesbetrieb Landwirtschaft, Fachinformationen - Pflanzenproduktion ; 2011/4, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, Kassel. 51 S.
- Anonymus (2011e) Pressemitteilung 58/2011, Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen.
- Anonymus (2012a) Bodenbearbeitungssysteme im Fokus von Ökonomie und Ökologie - Handreichung für eine differenzierte Beurteilung, Landwirtschaftskammer Rheinland-Pfalz und Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz.
- Anonymus (2012b) Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation, in: C. B. Field, et al., A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582.
- Anonymus (2012c) Ratgeber 2012: Saatzeiten und Saatstärken. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Anonymus (2012d) Zahlen zur Landwirtschaft in Nordrhein-Westfalen, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Referat 21, Unternehmens- und Arbeitnehmerberatung, Bonn.
- Anonymus (2012e) Naturgefahrenreport 2012: Naturgefahren und versicherte Schäden in Deutschland – eine statistische Übersicht von 1970 bis 2011. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft e. V.
- Anonymus (2012f) Ratgeber 2012 - Körnerleguminosen, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Anonymus (2012g) Betriebsplanung Landwirtschaft 2012/2013. Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft. 23. Aufl. Landwirtschaftsverl., Münster, Westf.
- Anonymus (2012h) Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland. 2012 Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup.
- Anonymus (2012i) Resistenzmanagement im Ackerbau 2012. Bayer CropScience Deutschland GmbH.
- Anonymus (2013a) Preis für Silomais richtig kalkulieren - Maispreisrechner 2013, Landwirtschaftskammer Niedersachsen, <http://www.lwk->

- niedersachsen.de/index.cfm/portal/betriebumwelt/nav/360/article/17878.html. Stand 29.06.2013.
- Anonymus (2013b) Deutscher Klimaatlas, Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de/>. Stand 27.08.2013.
- Anonymus (2013c) AMI Datenbank - Erzeugerpreise für Leguminosen, Agrarmarkt Informations-Gesellschaft, <http://www.ami-informiert.de/ami-shop/ami-shop-startseite.html>. Stand 15.06.2013.
- Anonymus (2013d) AMI-Marktbilanz . Daten, Fakten, Entwicklungen ; Deutschland, EU, Welt, Agrarmarkt Informations-Gesellschaft, Bonn.
- Anonymus (2013e) Online Informationen: Mais - Zea Mays, Bundesverband deutscher Pflanzenzüchter, <http://www.bdp-online.de/de/Pflanzenzuechtung/Kulturarten/Getreide/Mais/>. Stand 20.08.2013.
- Anonymus (2013f) Dataset: OECD-FAO Agricultural Outlook 2000-2022, Onlinedatenbank der OECD: <http://stats.oecd.org/>. Stand. 28.06.2013.
- Anonymus (2013g) Klima und Umwelt - Klimadaten-Auskünfte, Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt&_nfls=false. Stand 06.03.2013.
- Anonymus (2013h) Erfahrungssätze für Maschinenring-Arbeiten, Erfahrungssätze nach Landwirtschaftlichem Wochenblatt Westfalen-Lippe, Ausgabe 18/2013, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, <http://www.landwirtschaftskammer.de/landwirtschaft/technik/aussenwirtschaft/erfahrungssaezte.htm>. Stand 03.07.2013.
- Anonymus (2013i) Duden online, Bibliographisches Institut GmbH in Mannheim. <http://www.duden.de/woerterbuch>. Stand 27.06.2013.
- Anonymus (2013j) Förderung & Agrarsozialpolitik, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. http://www.bmelv.de/DE/Landwirtschaft/Foerderung-Agrarsozialpolitik/foerderung_node.html. Stand: 24.06.2013.
- Anonymus (2013k) Klimaszenarien-Rechnungen für Deutschland, Deutscher Wetterdienst. http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?_nfpb=true&_pageLabel=dwdwww_klima_umwelt&_nfls=false. Stand 06.03.2013.
- Anonymus (2013l) Genesis-Online-Datenbank - Ernte und Betriebsbericht Feldfrüchte und Grünland, Statistisches Bundesamt, <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online>. Stand 20.08.2013.
- Anonymus (2013m) Erträge Ackerbohnen, Ministerium für Energiewende, Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein. http://www.schleswig-holstein.de/UmweltLandwirtschaft/DE/LandFischRaum/04_AgrarberichtStatistik/08_PflanzlicheErzeugnisse/08_ErtraegeFlaechenWeitereKulturarten/03_ErtraegeAckerbohnen/ein_node.html. (Stand 15.08.2013).
- Anonymus (2013n) Wetterlexikon, Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de/lexikon>. Stand 04.06.2013.

- Anonymus (2013o) Herbizidresistenz von Ackerfuchsschwanz und Windhalm in Getreide. Online Informationen des Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. <http://www.llh-hessen.de/pflanzenproduktion/ackerbau>. Stand 19.09.2013.
- Anonymus (2013p) Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte, Bundessortenamt, Hannover.
- Archer D.W., Reicosky D.C. (2009) Economic Performance of Alternative Tillage Systems in the Northern Corn Belt. *Agronomy Journal* 101:296-304. DOI: DOI 10.2134/agronj2008.0090x.
- Asseng S., van Herwaarden A.F. (2003) Analysis of the benefits to wheat yield from assimilates stored prior to grain filling in a range of environments. *Plant and Soil* 256:217-229. DOI: Doi 10.1023/A:1026231904221.
- Asseng S., van Keulen H., Stol W. (2000) Performance and application of the APSIM Nwheat model in the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 12:37-54.
- Asseng S., McIntosh P.C., Wang G.M., Khimashia N. (2012) Optimal N fertiliser management based on a seasonal forecast. *European Journal of Agronomy* 38:66-73. DOI: DOI 10.1016/j.eja.2011.12.005.
- Asseng S., Keating B.A., Fillery I.R.P., Gregory P.J., Bowden J.W., Turner N.C., Palta J.A., Abrecht D.G. (1998) Performance of the APSIM-wheat model in Western Australia. *Field Crops Research* 57:163-179.
- Basch G., Kassam A., González-Sánchez E.J., Streit B. (2012) Making sustainable agriculture real in cap 2020: The role of Conservation Agriculture. The European Conservation Agriculture Federation (ECAAF).
- Bassu S., Asseng S., Richards R. (2011) Yield benefits of triticale traits for wheat under current and future climates. *Field Crops Research* 124:14-24. DOI: DOI 10.1016/j.fcr.2011.05.020.
- Battermann H.W. (2010) Landwirtschaft im ökonomischen und gesellschaftlichen Kontext. Die Beispiele Pflanzenschutzdokumentation und Feldberegnung, Internationale Reihe Agribusiness ; 4, Cuvillier, Göttingen. II, 307 S.
- Benker U. (2008) Zunehmende Probleme mit Feldmäusen im Acker / Grünland - Ursachen und Lösungsansätze. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Pflanzenschutz.
- Bockholt K. (2010) Mit Mulch- und Direktsaat zum Erfolg. 1. Aufl. Dt. Landwirtschaftsverl., München.
- Bradshaw B., Dolan H., Smit B. (2004) Farm-level adaptation to climatic variability and change: Crop diversification in the Canadian prairies. *Climatic Change* 67:119-141. DOI: DOI 10.1007/s10584-004-0710-z.
- Brunotte J. (2011) Boden schonen und Kosten senken KTBL, Darmstadt.
- Burkhardt J., Gaiser T. (2010) Modellierung der Folgen des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion in Nordrhein-Westfalen. Abschlussbericht, im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz der Universität Bonn, Abteilung Pflanzenernährung (INRES-PE); Bonn.

- Busse S., Brümmer B. (2010) Bestimmung der Determinanten der Rapspreisentwicklung in der Hochpreisphase auf Basis von Markovzeitreihenmodellen, Agrar- und Ernährungsmärkte nach dem Boom, Landwirtschaftsverl., Münster. pp. 301-313.
- Calzadilla A., Rehdanz K., Betts R., Falloon P., Wiltshire A., Tol R.S.J. (2013) Climate change impacts on global agriculture. *Climatic Change* 120:357-374. DOI: DOI 10.1007/s10584-013-0822-4.
- Caviglia O.P., Sadras V.O. (2001) Effect of nitrogen supply on crop conductance, water- and radiation-use efficiency of wheat. *Field Crops Research* 69:259-266.
- Christen O. (2001) Ertrag, Ertragsstruktur und Ertragsstabilität von Weizen, Gerste und Raps in unterschiedlichen Fruchtfolgen. *Pflanzenbauwissenschaften*, 5 (1), S. 33 – 39.
- Cichota R., Vogeler I., Snow V.O., Webb T.H. (2013) Ensemble pedotransfer functions to derive hydraulic properties for New Zealand soils. *Soil Research* 51:94-111. DOI: Doi 10.1071/Sr12338.
- Confalone A., Lizaso J.I., Ruiz-Nogueira B., López-Cedrón F.-X., Sau F. (2010) Growth, PAR use efficiency, and yield components of field-grown *Vicia faba* L. under different temperature and photoperiod regimes. *Field Crops Research* 115:140-148.
- Cramer B. (2006) Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- Cresswell H.P., Hume I.H., Wang E., Nordblom T.L., Finlayson J.D., Glover M. (2009) Catchment Response to Farm Scale Land Use Change., CSIRO; NSW Department of Industry and Investment. 1-85.
- Dalgliesh N., Hochman Z., Huth N., Holzworth D. (2013) A Protocol for the Development of Soil Parameter Values for use in APSIM, CSIRO Ecosystem Sciences.
- de Oliveira E.D., Bramley H., Siddique K.H.M., Henty S., Berger J., Palta J.A. (2013) Can elevated CO₂ combined with high temperature ameliorate the effect of terminal drought in wheat? *Functional Plant Biology* 40:160-171. DOI: Doi 10.1071/Fp12206.
- Deutschländer T., Dalelane C. (2012) Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt Technisches Hilfswert, Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt.
- Didam R., Teichler A., Zieseniß H., Lindwedel V. (2011) Leittext: Umweltgerechte Lagerung und Ausbringung von Gülle. Herausgegeben vom aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz e. V.
- Döhler H. (2009) Faustzahlen für die Landwirtschaft. 14. Aufl. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. KTBL, Darmstadt.

- Dörfler J., Hüffmeier H. (1998) Pflanzliche Erzeugung. Grundlagen des Acker- und Pflanzenbaus, Grundlagen des integrierten Landbaus, Produktionstechnik der Kulturpflanzen, Dauergrünland, Nachwachsende Rohstoffe, Ökologischer Landbau, Naturschutz, Landschaftspflege. 11. Auflage BLV-Verl.-Ges., München
- Douglas-Mankin K.R., Srinivasan R., Arnold J.G. (2010) Soil and Water Assessment Tool (Swat) Model: Current Developments and Applications. *Transactions of the Asabe* 53:1423-1431.
- Dufresne J.L., Foujols M.A., Denvil S., Caubel A., Marti O., Aumont O., Balkanski Y., Bekki S., Bellenger H., Benschila R., Bony S., Bopp L., Braconnot P., Brockmann P., Cadule P., Cheruy F., Codron F., Cozic A., Cugnet D., de Noblet N., Duvel J.P., Ethe C., Fairhead L., Fichefet T., Flavoni S., Friedlingstein P., Grandpeix J.Y., Guez L., Guilyardi E., Hauglustaine D., Hourdin F., Idelkadi A., Ghattas J., Joussaume S., Kageyama M., Krinner G., Labetoulle S., Lahellec A., Lefebvre M.P., Lefevre F., Levy C., Li Z.X., Lloyd J., Lott F., Madec G., Mancip M., Marchand M., Masson S., Meurdesoif Y., Mignot J., Musat I., Parouty S., Polcher J., Rio C., Schulz M., Swingedouw D., Szopa S., Talandier C., Terray P., Viovy N., Vuichard N. (2013) Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics* 40:2123-2165. DOI: DOI 10.1007/s00382-012-1636-1.
- DüV (2012) Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen Düngeverordnung - DüV), Düngeverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 27. Februar 2007 (BGBl. I S. 221), die zuletzt durch Artikel 5 Absatz 36 des Gesetzes vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212) geändert worden ist.
- Ehlers W., Goss M. (2003) *Water dynamics in plant production*, CABI Publishing, Wallingford. Online-Ressource (xiv + 273).
- Eitzinger J., Kersebaum K.C., Formayer H. (2009) *Landwirtschaft im Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa* Agrimedia, Clenze.
- Ewert F., Rounsevell M.D.A., Reginster I., Metzger M.J., Leemans R. (2005) Future scenarios of European agricultural land use I. Estimating changes in crop productivity. *Agriculture Ecosystems & Environment* 107:101-116. DOI: DOI 10.1016/j.agee.2004.12.003.
- Farre I., Robertson M.J., Walton G.H., Asseng S. (2002) Simulating phenology and yield response of canola to sowing date in Western Australia using the APSIM model. *Australian Journal of Agricultural Research* 53:1155-1164. DOI: Doi 10.1071/Ar02031.
- Farre I., Robertson M.J., Asseng S., French R.J., Dracup M. (2004) Simulating lupin development, growth, and yield in a Mediterranean environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 55:863-877. DOI: Doi 10.1071/Ar04027.
- Geisler G. (1988) *Pflanzenbau: Ein Lehrbuch; biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion*. 2. Aufl., Parey Verlag, Berlin.
- Ghaffari A., Cook H.F., Lee H.C. (2002) Climate change and winter wheat management: A modelling scenario for south-eastern England. *Climatic Change* 55:509-533. DOI: Doi 10.1023/A:1020784311916.

- Gocht A., Münch T. (2006) Farm Boss® ein Instrument zur strategischen Beratung landwirtschaftlicher Betriebe. Land- und Ernährungswirtschaft im Wandel - Aufgaben und Herausforderungen für die Agrar- und Umwelteinformatik - Referate der 26. GIL Jahrestagung in Potsdam 2006:189 - 192.
- Gocht R. (2011) Potenziale der Leguminosen, Schriftenreihe, Heft 20/2011. Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Freistaat Sachsen.
- Goddard T., Zebisch M.A., Gan Y. (2008) No-till farming systems, o. O.
- Hanff H., Neubert G., Brudel H. (2008) Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg: Ackerbau / Grünlandwirtschaft / Tierproduktion. Ausgabe 2008, Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV).
- Harris G.R., Sexton D.M.H., Booth B.B.B., Collins M., Murphy J.M. (2013) Probabilistic projections of transient climate change. *Climate Dynamics* 40:2937-2972. DOI: DOI 10.1007/s00382-012-1647-y.
- Häusling M. (2011) Europa braucht eine zukunftsfähige Eiweißstrategie!. Das Landgrabbing mit Messer und Gabel muss beendet werden. *Landwirtschaft ... , der kritische Agrarbericht* 2011:32-35.
- Helbling E.W., Carrillo P., Medina-Sanchez J.M., Duran C., Herrera G., Villar-Argaiz M., Villafane V.E. (2013) Interactive effects of vertical mixing, nutrients and ultraviolet radiation: in situ photosynthetic responses of phytoplankton from high mountain lakes in Southern Europe. *Biogeosciences* 10:1037-1050. DOI: DOI 10.5194/bg-10-1037-2013.
- Herold L., Wagner S. (2010) Ertrags- und Qualitätsaspekte der Getreideernte in Ökobetrieben Thüringens, TLL, Jena. pp. 32-37.
- Hewitt C.D. (2005) The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts. *Parliament Magazine*.
- Hillel D., Rosenzweig C. (2010) *Handbook of Climate Change and Agroecosystems - Impacts, Adaptation , and Mitigation* Imperial College Press, London.
- Hiller D.A. (2004) Bodenerosion durch Wasser: Ursachen, Bedeutung und Umgang in der landwirtschaftlichen Praxis von NRW. Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.
- Hopt K.J., Kumpan C., Merkt H., Roth M., Baumbach A. (2013) *Handelsgesetzbuch. Mit GmbH & Co., Handelsklauseln, Bank- und Börsenrecht, Transportrecht (ohne Seerecht)*. 36. Aufl. Beck, C H, München.
- Huth N.I., Henderson C., Peake A. (2009) Development and testing of a horticultural crop model within APSIM. 18th World Imacs Congress and Modsim09 International Congress on Modelling and Simulation:526-532.
- Huth N.I., Bristow K.L., Verburg K. (2012) Swim3: Model Use, Calibration, and Validation. *Transactions of the Asabe* 55:1303-1313.

- Hygnstrom S.E., VerCauteren K.C., Hines R.A., Mansfield C.W. (2000) Efficacy of in-furrow zinc phosphide pellets for controlling rodent damage in no-till corn. *International Biodeterioration & Biodegradation* 45:215-222. DOI: Doi 10.1016/S0964-8305(00)00069-X.
- Inman-Bamber N.G., McGlinchey M.G. (2003) Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term Bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research* 83:125-138. DOI: Doi 10.1016/S0378-4290(03)00069-8.
- Jones C.A., Kiniry J.R. (1986) *Ceres-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*, Texas A&M University Press. pp. Pages.
- Jones J.W., Keating B.A., Porter C.H. (2001) Approaches to modular model development. *Agricultural Systems* 70:421-443. DOI: Doi 10.1016/S0308-521x(01)00054-3.
- Keating B.A., Carberry P.S., Hammer G.L., Probert M.E., Robertson M.J., Holzworth D., Huth N.I., Hargreaves J.N.G., Meinke H., Hochman Z., McLean G., Verburg K., Snow V., Dimes J.P., Silburn M., Wang E., Brown S., Bristow K.L., Asseng S., Chapman S., McCown R.L., Freebairn D.M., Smith C.J. (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18:267-288.
- Keller R., Langer R., Schlott W. (2002) *Schätzerhandbuch - Landwirtschaftliche Kulturen: Ein Handbuch für die Hagelschätzer der Vereinigten Hagelversicherung VVaG, Gießen.*
- Kiniry J.R., Bean B., Xie Y., Chen P.Y., Xie Y. (2004) Maize yield potential: critical processes and simulation modeling in a high-yielding environment. *Agricultural Systems* 82:45-56. DOI: 10.1016/j.agsy.2003.11.006.
- Kiniry J.R., Jones C.A., Otoole J.C., Blanchet R., Cabelguenne M., Spanel D.A. (1989) Radiation-Use Efficiency in Biomass Accumulation Prior to Grain-Filling for 5 Grain-Crop Species. *Field Crops Research* 20:51-64.
- Klaaßen H., Freitag J. (2004) *Ackerunkräuter und Ackergräser - rechtzeitig erkennen.* BASF Aktiengesellschaft.
- Krentler J.-G. (2009) Einfluss von Gülle auf die Umwelt und gesetzliche Regelungen zur Güllerlagerung. *Bauen für die Landwirtschaft* 42:3-5.
- Kunreuther H., Heal G., Allen M., Edenhofer O., Field C.B., Yohe G. (2013) Risk management and climate change. *Nature Clim. Change* 3:447-450. DOI: 10.1038/nclimate1740.
- Lakner S., Holst C., Brümmer B., Cramon-Taubadel S.v., Theuvsen L., Mußhoff O., Tschardt T. (2013) Zahlungen für Landwirte an gesellschaftliche Leistungen koppeln!. Ein Kommentar zum aktuellen Stand der EU-Agrarreform, Diskussionspapiere / Department für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung = Discussion papers ; 1304, Georg-August-Univ., Dep. für Agrarökonomie und Rurale Entwicklung, Göttingen. Online-Ressource (11 S. + 1 S.).
- Lazar C., Lazar D.A. (2010) Simulation of Temperature Increase Influence on Winter Wheat Yields and Development in South - Eastern Romania. *Romanian Agricultural Research* 27:7-15.
- Lee J., De Gryze S., Six J. (2011) Effect of climate change on field crop production in California's Central Valley. *Climatic Change* 109:335-353. DOI: DOI 10.1007/s10584-011-0305-4.

- Lindquist J.L., Arkebauer T.J., Walters D.T., Cassman K.G., Dobermann A. (2005) Maize radiation use efficiency under optimal growth conditions. *Agronomy Journal* 97:72-78.
- Link W. (2009) Züchtungsforschung bei der Ackerbohne: Fakten und Potentiale. *Journal für Kulturpflanzen*, 61 (9).
- Littleboy M., Freebairn D.M., Silburn D.M., Woodruff D.R., Hammer G.L. (1999a) PERFECT Version 3.0 - A computer simulation model of Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques, Queensland Department of Natural Resources & Queensland Department of Primary Industries.
- Littleboy M., Freebairn D.M., Silburn D.M., Woodruff D.R., Hammer G.L. (1999b) PERFECT Version 3.0 - A computer simulation model of Productivity Erosion Runoff Functions to Evaluate Conservation Techniques, Queensland Department of Natural Resources und Queensland Department of Primary Industries.
- Liu Y.J., Tao F.L. (2012) Impacts and uncertainty analysis of elevated temperature and CO₂ concentration on wheat biomass. *Journal of Geographical Sciences* 22:1002-1012. DOI: DOI 10.1007/s11442-012-0979-1.
- Lopotz H., Nacke K. (2013) Erfahrungssätze für überbetriebliche Maschinenarbeiten 2013, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen und Rheinischer Landwirtschafts-Verband e.V., http://www.rlv.de/rlv_dll?pageID=169. Stand 18.06.2013.
- Ludwig F., Milroy S.P., Asseng S. (2009) Impacts of recent climate change on wheat production systems in Western Australia. *Climatic Change* 92:495-517. DOI: DOI 10.1007/s10584-008-9479-9.
- Lütke Entrup N., Oehmichen J. (2006) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 1: Grundlagen. 3. Aufl. AgroConcept, Bonn.
- Lüttger A., Dittmann B., Sourell H. (2005) Leitfaden zur Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau Teltow, Groß Kreutz, Güterfelde, Paulinenaue, Wünsdorf Reihe Landwirtschaft, Band 6 (2005) Heft VII.
- Mahidi M., Hanna M. (2008) Resources Conservation Practices: Consider the Strip-Tillage Alternative. Iowa State University Extension.
- Michel V. (2012) Stagniert der Züchtungsfortschritt beim Winterweizen?, Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern.
- Mohanty M., Reddy K.S., Probert M.E., Dalal R.C., Rao A.S., Menzies N.W. (2011) Modelling N mineralization from green manure and farmyard manure from a laboratory incubation study. *Ecological Modelling* 222:719-726. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2010.10.027.
- Möller C., Manschadi A.M., Meinke H., Pala M., Sauerborn J. (2004) Modelling soil water, carbon and nitrogen dynamics in wheat/chickpea rotations: parameterisation and evaluation of APSIM in a Mediterranean environment, Australian Agronomy Conference - 4th International Crop Science Congress, Brisbane, Australia.
- Monteith J.L. (1988) Does Transpiration Limit the Growth of Vegetation or Vice Versa. *Journal of Hydrology* 100:57-68. DOI: Doi 10.1016/0022-1694(88)90181-3.

- Moore A.D., Holzworth D.P., Herrmann N.I., Huth N.I., Robertson M.J. (2007) The Common Modelling Protocol: A hierarchical framework for simulation of agricultural and environmental systems. *Agricultural Systems* 95:37-48. DOI: 10.1016/j.agry.2007.03.006.
- Münch T. (2002) Anpassungsstrategien für Marktfruchtunternehmen an zukünftige externe und interne Rahmenbedingungen am Beispiel der sächsischen Marktfruchtunternehmen, Halle.
- Niederau H., Jedrusiak T. (2005) Umsetzung der WRRL - Gewässerbelastung durch Stickstoffeinträge im Münsterland. Staatliches Umweltamt Münster.
- Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvag A.O., Seguin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J., Micale F. (2011) Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34:96-112. DOI: DOI 10.1016/j.eja.2010.11.003.
- Orlandini S., Nejedlik P., Eitzinger J., Alexandrov V., Toullios L., Calanca P., Trnka M., Olesen J.E. (2008) Impacts of Climate Change and Variability on European Agriculture Results of Inventory Analysis in COST 734 Countries. *Trends and Directions in Climate Research* 1146:338-353. DOI: DOI 10.1196/annals.1446.013.
- OrtizFerrara G., Mosaad M.G., Mahalakshmi V., Fischer R.A. (1995) Photoperiod and vernalization response of wheat under controlled environment and field conditions. *Plant Breeding* 114:505-509. DOI: DOI 10.1111/j.1439-0523.1995.tb00845.x.
- Paydar Z., Gaydon D., Chen Y. (2009) A methodology for up-scaling irrigation losses. *Irrigation Science* 27:347-356. DOI: DOI 10.1007/s00271-009-0151-6.
- Pembleton K.G., Rawnsley R.P., Jacobs J.L., Mickan F.J., O'Brien G.N., Cullen B.R., Ramilan T. (2013) Evaluating the accuracy of the Agricultural Production Systems Simulator (APSIM) simulating growth, development, and herbage nutritive characteristics of forage crops grown in the south-eastern dairy regions of Australia. *Crop & Pasture Science* 64:147-164. DOI: Doi 10.1071/Cp12372.
- Pringas C., Koch H.-J. (2004) Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf Ertrag und Qualität von Winterweizen nach unterschiedlichen Vorfrüchten – Ergebnisse einer Versuchsserie auf Großflächen. *Pflanzenbauwissenschaften*, 8 (1), S. 24–33.
- Probert M.E., Dimes J.P., Keating B.A., Dalal R.C., Strong W.M. (1998) APSIM's water and nitrogen modules and simulation of the dynamics of water and nitrogen in fallow systems. *Agricultural Systems* 56:1-28.
- Qiao Y.Z., Zhang H.Z., Dong B.D., Shi C.H., Li Y.X., Zhai H.M., Liu M.Y. (2010) Effects of elevated CO₂ concentration on growth and water use efficiency of winter wheat under two soil water regimes. *Agricultural Water Management* 97:1742-1748. DOI: DOI 10.1016/j.agwat.2010.06.007.
- Ramankutty P., Ryan M., Lawes R., Speijers J., Renton M. (2013) Statistical emulators of a plant growth simulation model. *Climate Research* 55:253-+. DOI: Doi 10.3354/Cr01138.
- Reich J., Degner J., Farack M., Götz R., Gullich P., Hochberg H., Paul R., Peyker W., Zorn W. (2006) Standpunkt zur Pfluglosen Bodenbewirtschaftung in Thüringen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.

- Reifen C., Toumi R. (2009) Climate projections: Past performance no guarantee of future skill? *Geophysical Research Letters* 36. DOI: Artn L13704, Doi 10.1029/2009gl038082.
- Reinhold G., Riedel R., Zorn W., König V. (2012) Merkblatt Eigenschaften von Biogasgülle. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Reyenga P.J., Howden S.M., Meinke H., McKeon G.M. (1999) Modelling global change impacts on wheat cropping in south-east Queensland, Australia. *Environmental Modelling & Software* 14:297-306. DOI: Doi 10.1016/S1364-8152(98)00081-4.
- Reynolds M.P. (2010) *Climate change and crop production*, Cabi, Wallingford. xvi + 292.
- Robertson M.J., Kirkegaard J.A. (2005) Water-use efficiency of dryland canola in an equi-seasonal rainfall environment. *Australian Journal of Agricultural Research* 56:1373-1386. DOI: Doi 10.1071/Ar05030.
- Robertson M.J., Carberry P.S., Huth N.I., Turpin J.E., Probert M.E., Poulton P.L., Bell M., Wright G.C., Yeates S.J., Brinsmead R.B. (2002a) Simulation of growth and development of diverse plant species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research* 53:643-651. DOI: Doi 10.1071/Ar01106.
- Robertson M.J., Carberry P.S., Huth N.I., Turpin J.E., Probert M.E., Poulton P.L., Bell M., Wright G.C., Yeates S.J., Brinsmead R.B. (2002b) Simulation of growth and development of diverse legume species in APSIM. *Australian Journal of Agricultural Research* 53:429-446. DOI: Doi 10.1071/Ar01106.
- Roth D., Günther R., Knoblauch S., Michel H. (2005) Wasserhaushaltsgrößen von Kulturpflanzen unter Feldbedingungen - Ergebnisse der TLL-Lysimeterstation. Schriftenreihe Landwirtschaft und Landschaftspflege in Thüringen. Schriftenreihe Heft 1 / 2005.
- Ruiz-Vera U.M., Siebers M., Gray S.B., Drag D.W., Rosenthal D.M., Kimball B.A., Ort D.R., Bernacchi C.J. (2013) Global Warming Can Negate the Expected CO₂ Stimulation in Photosynthesis and Productivity for Soybean Grown in the Midwestern United States(1[W][OA]). *Plant Physiology* 162:410-423. DOI: DOI 10.1104/pp.112.211938.
- Sauermann W. (2011) Abschlussbericht zum UFOP-Projekt 525/101: Erfolgreicher Anbau und Verwertung von Ackerbohnen - Beispiele von 5 Betrieben aus 2009 und 2010.
- Sauter J. (2010) Schleppschlauch- und Breitverteiler im Vergleich. Den Vorteilen des Schleppschlauchverteilers stehen höhere Kosten gegenüber ART, Ettenhausen.
- Schaap B.F., Blom-Zandstra M., Hermans C.M.L., Meerburg B.G., Verhagen J. (2011) Impact changes of climatic extremes on arable farming in the north of the Netherlands. *Regional Environmental Change* 11:731-741. DOI: DOI 10.1007/s10113-011-0205-1.
- Schäfer B.C. (2012) Fruchtfolgen als Managementmaßnahme zur Anpassung an den Klimawandel. In: *Management der Ressource Wasser*. KTBL-Tagung vom 21. bis 22. März 2012 in Hannover. KTBL-Schrift ; 492.
- Schindler M. (2011) Mit passender Gülletechnik die Kosten senken. Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

- Schleicher (2011) Gülle- und Gärresttransport (Teil 2) Verfahrensalternativen. Nr. II – 16/2011, Biogas Forum Bayern, Arbeitsgruppe 2 (Substratbereitstellung).
- Schmidt W. (2006) Aspekte der Züchtung von Energiepflanzen am Beispiel Mais. Landwirtschaftlicher Hochschultag der Universität Hohenheim am 26. Juni 2006. Landinfo 5/06, .
- Schneider M. (2009) Fruchtfolgegestaltung und konservierende Bodenbearbeitung, Direktsaat. Eine pflanzenbaulich-ökonomische Analyse. Online-Ressource.
- Schönberger H. (2011) Ackerbau unter Wasserknappheit. Was können wir von anderen Gebieten Europas lernen?, Pflanzenbauliche Vortragstagung Baden-Württemberg, Sindelfingen.
- Schukat M. (2010) Güllemarkt. Preisfindung von Gülle in der Praxis. Sonderdr. RKL, Rendsburg.
- Schwerin M. (2012) Climate change as a challenge for future livestock farming in Germany and Central Europe. Zuchtungskunde 84:103-128.
- Siddique K.H.M., Johansen C., Turner N.C., Jeuffroy M.H., Hashem A., Sakar D., Gan Y.T., Alghamdi S.S. (2012) Innovations in agronomy for food legumes. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32:45-64. DOI: DOI 10.1007/s13593-011-0021-5.
- Sinclair T.R., Tanner C.B., Bennett J.M. (1984) Water-Use Efficiency in Crop Production. *Bioscience* 34:36-40.
- Snow V., Huth N. (2004) The APSIM-Micromet Module, Internal Report No. 2004/12848, HortResearch, Auckland, New Zealand.
- Solomon S., Quin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L. (2007) Climate change 2007. The physical science basis; contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1st published UNEP, New York.
- Sponagel H., W.; G., Hartmann K.-J., Hartwich R., Janetzko P., Joisten H., Kühn D., Sabel K.-J., Traidl R. (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung Bundesanstalt für Geowissenschaften, Hannover.
- Steinmann H.-H. (2013) Glyphosat. Ein Herbizid in der Diskussion und die Suche nach dem „Notwendigen Maß“. *Gesunde Pflanzen* 65:47-56.
- Taube F., Herrmann A. (2009) Relative Vorzüglichkeit von Mais und Gras unter Berücksichtigung von Klimawandel. In: *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 331*.
- Teixeira E.I., Fischer G., van Velthuisen H., Walter C., Ewert F. (2013) Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change. *Agricultural and Forest Meteorology* 170:206-215. DOI: DOI 10.1016/j.agrformet.2011.09.002.
- Therond O., Turpin N., Janssen S., Athanasiadis I.N., Knapen M.J.R., Bockstaller C., Olsson J.A., Ewert F., Bezlepkina I. (2009) From models to indicators: ontology as a knowledge representation system Wageningen University and Research Centre, Wageningen.

- Therond O., Hengsdijk H., Casellas E., Wallach D., Adam M., Belhouchette H., Oomen R., Russell G., Ewert F., Bergez J.E., Janssen S., Wery J., Ittersum M.K.v., van Ittersum M.K. (2011) Using a cropping system model at regional scale: low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 142:85-94. DOI: 10.1016/j.agee.2010.05.007.
- Thierfelder C., Mwila M., Rusinamhodzi L. (2013) Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia: Long-term effects on soil quality and maize productivity. *Soil & Tillage Research* 126:246-258. DOI: DOI 10.1016/j.still.2012.09.002.
- Toews T. (2009) Biomassetransport - was kostet die Logistik von Gülle & Co?, *Biogas in der Landwirtschaft - Stand und Perspektiven*, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe, Gülzow. pp. 63-75.
- Toews T., Kuhlmann F. (2009) Ökonomische Bewertung des Anbaus und der Nutzung von Energiepflanzen, Gießen.
- Turner N.C., Molyneux N., Yang S., Xiong Y.C., Siddique K.H.M. (2011) Climate change in south-west Australia and north-west China: challenges and opportunities for crop production. *Crop & Pasture Science* 62:445-456. DOI: Doi 10.1071/Cp10372.
- Turpin J.E., Robertson M.J., Haire C., Bellotti W.D., Moore A.D., Rose I. (2003) Simulating fababean development, growth, and yield in Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 54:39-52. DOI: Doi 10.1071/Ar02064.
- Vizy E.K., Cook K.H., Cretat J., Neupane N. (2013) Projections of a Wetter Sahel in the Twenty-First Century from Global and Regional Models. *Journal of Climate* 26:4664-4687. DOI: Doi 10.1175/Jcli-D-12-00533.1.
- Vogt-Kaute W., Zwingel W., Finckh M. (2008) Der Stand der Züchtung von Körnerleguminosen in Bayern, Deutschland und angrenzenden Ländern.
- Voßhenrich H.-H., Brunotte J. (2011) *Landtechnik der Zukunft. Beiträge der Landtechnik zur zukünftigen Gestaltung des Pflanzenbaus zu Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenschutz Rationalisierungs-Kuratorium für Landwirtschaft, Rendsburg.*
- Wang D., Menz C., Simon T., Simmer C., Ohlwein C. (2013) Regional dynamical downscaling with CCLM over East Asia. *Meteorology and Atmospheric Physics* 121:39-53. DOI: DOI 10.1007/s00703-013-0250-z.
- Wang E.L., Engel T. (1998) Simulation of phenological development of wheat crops. *Agricultural Systems* 58:1-24.
- Wang E.L., Smith C.J., Bond W.J., Verburg K. (2004) Estimations of vapour pressure deficit and crop water demand in APSIM and their implications for prediction of crop yield, water use, and deep drainage. *Australian Journal of Agricultural Research* 55:1227-1240. DOI: Doi 10.1071/Ar03216.
- Wang S., Wang E.L., Wang F., Tang L. (2012) Phenological development and grain yield of canola as affected by sowing date and climate variation in the Yangtze River Basin of China. *Crop & Pasture Science* 63:478-488. DOI: Doi 10.1071/Cp11332.
- Wechsung F., Gerstengarbe F.W., Lasch P., Lüttger A. (2008) Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel, PIK Report ; 112

- Weigel H.J. (2009) Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: *Landbauforschung – vTI Agriculture and Forestry Research, Sonderheft 331*.
- Weigel H.J., Manderscheid R. (2012) Crop growth responses to free air CO₂ enrichment and nitrogen fertilization: Rotating barley, ryegrass, sugar beet and wheat. *European Journal of Agronomy* 43:97-107. DOI: DOI 10.1016/j.eja.2012.05.011.
- Weiss A., Hays C.J., Won J. (2003) Assessing winter wheat responses to climate change scenarios: A simulation study in the US Great Plains. *Climatic Change* 58:119-147. DOI: Doi 10.1023/A:1023499612729.
- Wendland M., Diepolder M., Capriel P. (2011) Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland, Gelbes Heft, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- White J.W. (2003) Modelling Temperature Response in Wheat an Maize: Proceedings of a Workshop, CIMMYT, El Batán, Mexico, 23-25 April 2001.
- White J.W., Herndl M., Hunt L.A., Payne T.S., Hoogenboom G. (2008) Simulation-based analysis of effects of and loci on flowering in wheat. *Crop Science* 48:678-687. DOI: 10.2135/cropsci2007.06.0318.
- Wienforth B. (2008) Standortgerechte Wahl von Energiepflanzen für die Biogasproduktion: Modellgestützte Analyse des Trockenstresseinflusses auf das Ertragspotenzial von Silomais. In: Kage et al. (2009): Modellierung des Systems Nutzpflanze-Boden – Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, Kiel.
- Wilks D.S. (2006) Comparison of ensemble-MOS methods in the Lorenz '96 setting. *Meteorological Applications* 13:243-256. DOI: Doi 10.1017/S1350482706002192.
- Wilson D.R., Muchow R.C., Murgatroyd C.J. (1995) Model analysis of temperature and solar radiation limitations to maize potential productivity in a cool climate. *Field Crops Research* 43:1-18. DOI: Doi 10.1016/0378-4290(95)00037-Q.
- Ye L.M., Xiong W., Li Z.G., Yang P., Wu W.B., Yang G.X., Fu Y.J., Zou J.Q., Chen Z.X., Van Ranst E., Tang H.J. (2013) Climate change impact on China food security in 2050. *Agronomy for Sustainable Development* 33:363-374. DOI: DOI 10.1007/s13593-012-0102-0.
- Yu G.R., Wang Q.F., Zhuang J. (2004) Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology* 161:303-318.
- Zere T.B., van Huyssteen C.W., Hensley M. (2007) Quantification of long-term precipitation use efficiencies of different maize production practices on a semi-arid ecotope in the Free State Province. *Water Sa* 33:61-66.
- Zhang D.F., Shi Y. (2012) Numerical simulation of climate changes over North China by the RegCM3 model. *Chinese Journal of Geophysics-Chinese Edition* 55:2854-2866. DOI: DOI 10.6038/j.issn.0001-5733.2012.09.005.
- Zimmer Y., Nehring K. (2008) Wirtschaftlichkeit der Bodenbearbeitung, Schonende Bodenbearbeitung, DLG-Verl., Frankfurt am Main. pp. 93-121.

9. Anhang

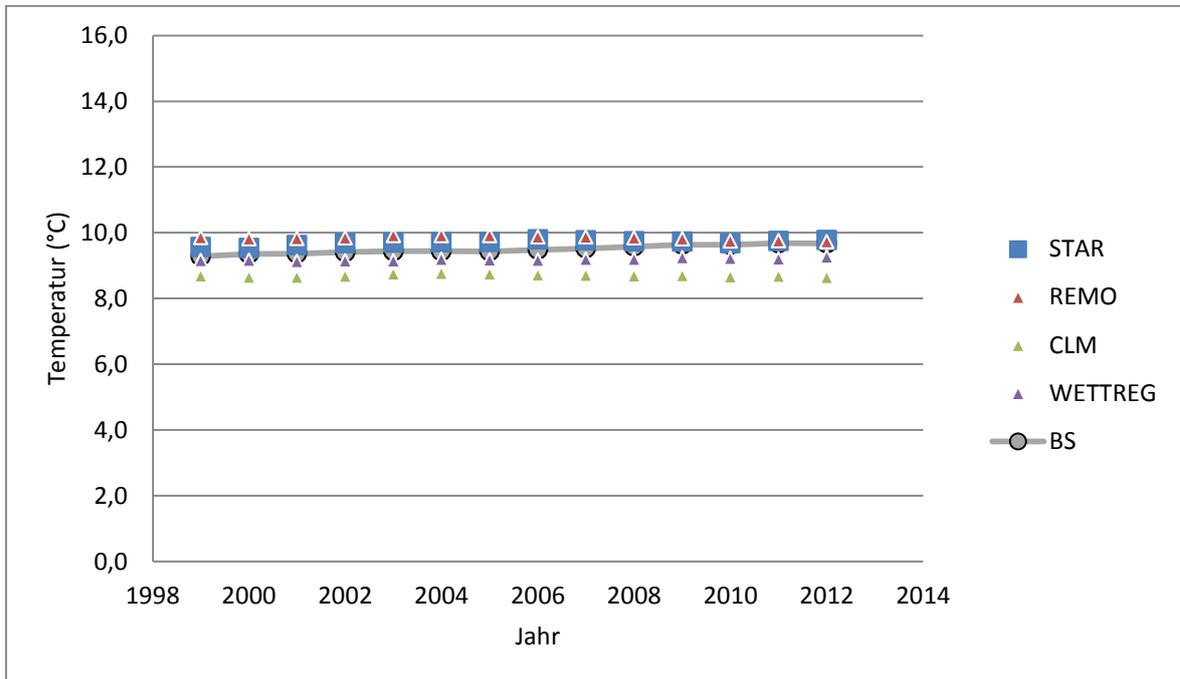


Abb. 48: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Temperatur Standort Braunschweig (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

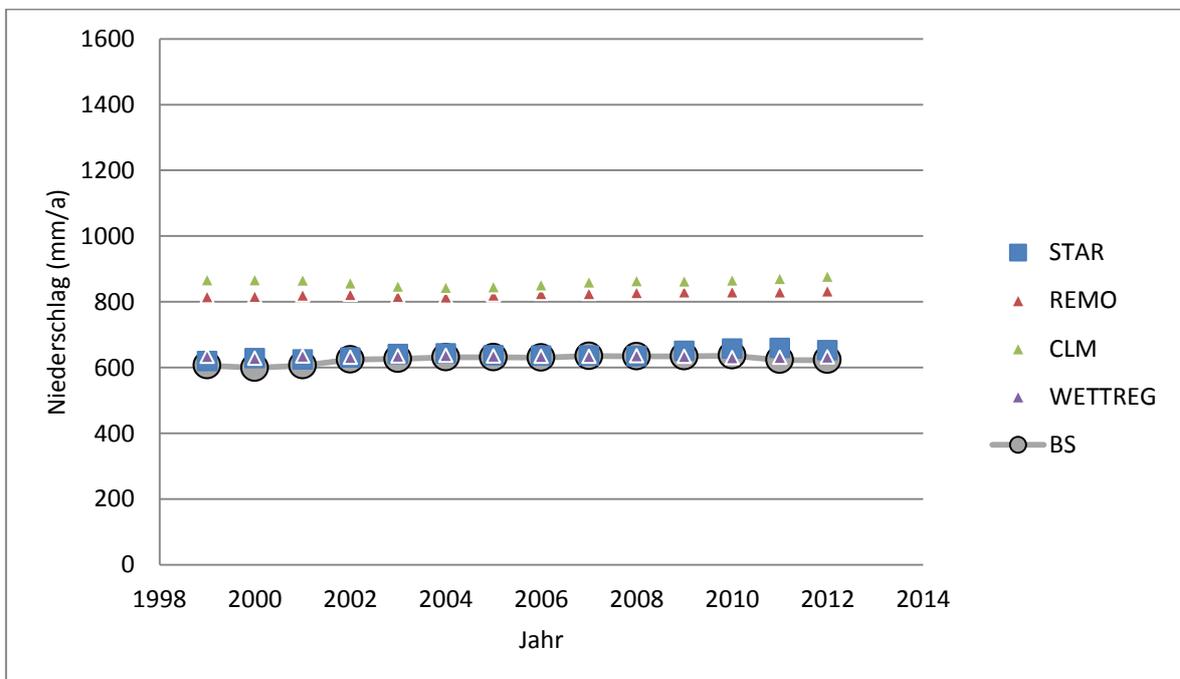


Abb. 49: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Niederschlag Standort Braunschweig (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

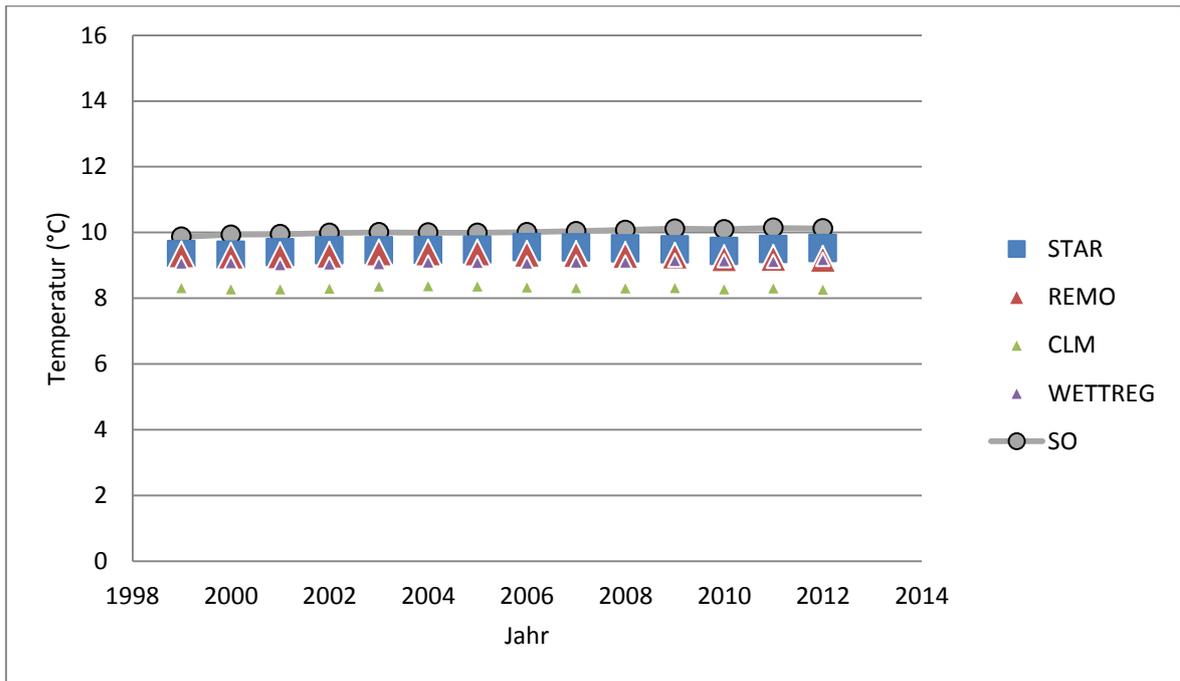


Abb. 50: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Temperatur Standort Soest (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

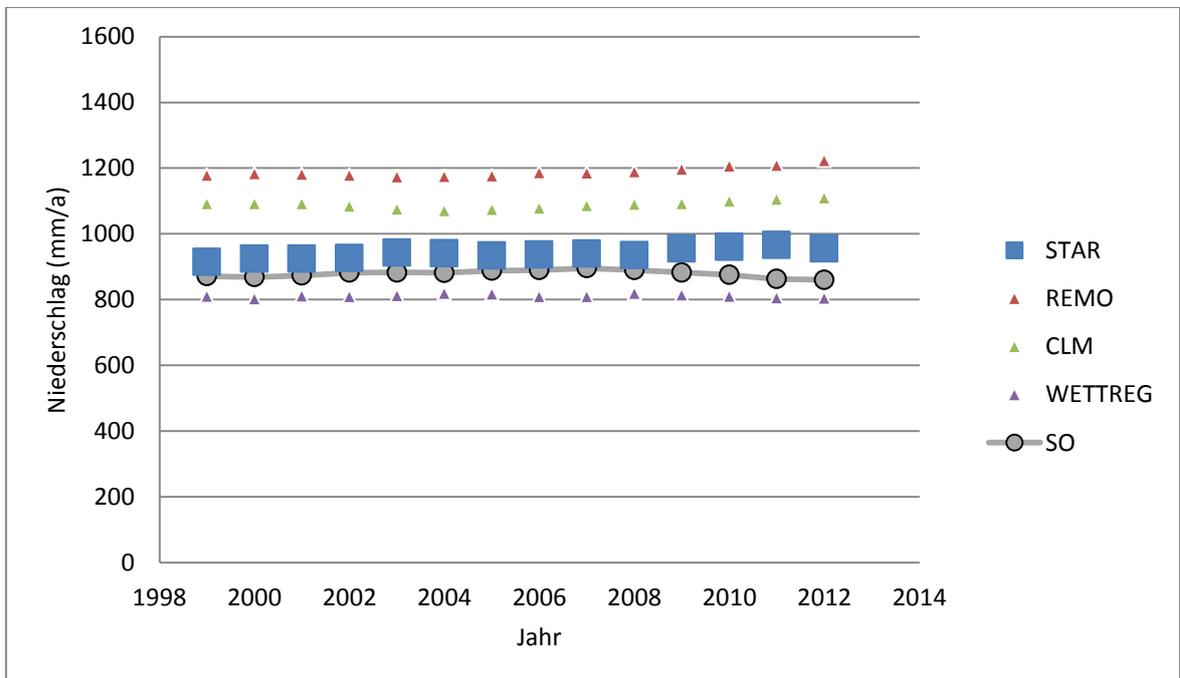


Abb. 51: Vergleich des gleitenden Durchschnitts (30-jährig) realer Wetterdaten mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien für Deutschland – Niederschlag Standort Soest (Eigene Darstellung nach Daten des DWD)

Tab. 41: Berechnung der RUE angebaute Kulturen aus dem Projekt „Optimierter Klimabetrieb“

Wdh.	Kultur	Biomasse (dt/ha TM)	Hauptvegetationszeit (T _w)	Globalstrahlung in T _w (MJ/m ²)	PAR (MJ/m ²)	RUE (g/MJ PAR)
1	WW	146	01.03. - 10.07.	2094	943	1,55
2	WW	135	01.03. - 10.07.	2094	943	1,43
3	WW	145	01.03. - 10.07.	2094	943	1,54
4	WW	139	01.03. - 10.07.	2094	943	1,47
5	WW	158	01.03. - 10.07.	2171	977	1,62
6	WW	150	01.03. - 10.07.	2171	977	1,54
7	WW	155	01.03. - 10.07.	2171	977	1,58
8	WW	154	01.03. - 10.07.	2171	977	1,58
9	WW	160	01.03. - 10.07.	2171	977	1,64
10	WW	161	01.03. - 10.07.	2409	1084	1,49
11	WW	164	01.03. - 10.07.	2409	1084	1,51
12	WW	163	01.03. - 10.07.	2409	1084	1,51
13	WW	160	01.03. - 10.07.	2409	1084	1,48
14	WW	184	01.03. - 10.07.	2220	999	1,84
15	WW	177	01.03. - 10.07.	2220	999	1,77
16	WW	175	01.03. - 10.07.	2220	999	1,75
17	WW	183	01.03. - 10.07.	2220	999	1,83
18	WW	174	01.03. - 10.07.	2220	999	1,74
MW	WW	160		2221	999	1,60
1	WG	106	01.03. - 25.06.	1841	829	1,28
2	WG	96	01.03. - 25.06.	1841	829	1,16
3	WG	97	01.03. - 25.06.	1841	829	1,17
4	WG	130	01.03. - 25.06.	1537	692	1,88
5	WG	142	01.03. - 25.06.	1537	692	2,05
6	WG	159	01.03. - 25.06.	1955	880	1,81
7	WG	126	01.03. - 25.06.	1955	880	1,43
8	WG	133	01.03. - 25.06.	1955	880	1,51
9	WG	133	01.03. - 25.06.	1699	765	1,74
10	WG	163	01.03. - 25.06.	1699	765	2,13
MW	WG	128		1786	804	1,62
1	WR	124	01.03. - 31.05.	1361	612	2,03
2	WR	107	01.03. - 31.05.	1180	531	2,01
3	WR	105	01.03. - 31.05.	1180	531	1,98
4	WR	122	01.03. - 31.05.	1245	560	2,18
5	WR	145	01.03. - 31.05.	1245	560	2,59
MW	WR	121		1242	559	2,16
1	AB	144	10.04. - 31.08.	2339	1053	1,36
2	AB	167	10.04. - 31.08.	2303	1036	1,61
3	AB	125	10.04. - 31.08.	2267	1020	1,22
4	AB	129	10.04. - 31.08.	2267	1020	1,27
MW	AB	141		2294	1032	1,37

Wdh.	Kultur	Biomasse (dt/ha TM)	Hauptvegetationszeit (T _w)	Globalstrahlung in T _w (MJ/m ²)	PAR (MJ/m ²)	RUE (g/MJ PAR)
1	SM	182	15.06. - 31.08.	1150	518	3,51
2	SM	178	15.06. - 31.08.	1150	518	3,44
3	SM	178	15.06. - 31.08.	1150	518	3,44
4	SM	180	15.06. - 31.08.	1150	518	3,48
5	SM	161	15.06. - 31.08.	1252	563	2,85
6	SM	224	15.06. - 31.08.	1292	581	3,85
7	SM	223	15.06. - 31.08.	1292	581	3,83
8	SM	216	15.06. - 31.08.	1292	581	3,72
9	SM	254	15.06. - 31.08.	1339	602	4,21
MW	SM	199		1230	553	3,59

PAR = Photosynthetisch aktive Strahlung; RUE = Radiation Use Efficiency; MW = Mittelwert

Tab. 42: Kulturspezifisch angepasste Parameter in APSIM

Kultur	Parameter in APSIM	Beschreibung	Einheit	Wert
WW	potential_grain_filling_rate	Max. Kornfüllungsrate in BBCH 71-79	g/Tag	0.00175
WW	potential_grain_growth_rate	Max. Kornfüllungsrate in BBCH 61-79	g/Tag	0.00080
WG	potential_grain_filling_rate	Max. Kornfüllungsrate in BBCH 71-79	g/Tag	0.00160
WG	potential_grain_growth_rate	Max. Kornfüllungsrate in BBCH 61-79	g/Tag	0.00080
WW, WG	vern_sens	P1V, Koeffizient für Sensitivität der Vernalisation	-	6,5
WW	photop_sens	P1D, Koeffizient für Sensitivität der Photoperiode	-	3,5
WR	x_hi_max_pot_stress	Funktion zur Beschreibung prozentualer Einbußen bei der Biomassebildung in Abhängigkeit von Stressfaktoren	-	0.50 bis 1.00
WR	y_hi_max_pot		-	0.40 bis 0.30
AB	x_hi_max_pot_stress		-	0.50 bis 1.00
AB	y_hi_max_pot		-	0.35 bis 0.35
SM	x_temp_senescence	Minimaltemperatur, ab der es zum Absterben des Bestandes kommt	°C	-10 bis 2
SM	y_senescence_fac	Prozentualer Anteil, der ab X°C täglich abstirbt		1 bis 0

Tab. 43: Ermittelte Temperatursummen für APSIM

Stadium in APSIM	Parameter in APSIM	Einheit	Wert
Winterweizen			
TT bis Ende Bestockung	tt_end_of_juvenile	°Cd	650
TT bis Beginn Blüte	tt_floral_initiation	°Cd	400
TT bis Ende Blüte	tt_flowering	°Cd	100
TT bis Ende Kornfüllung	tt_start_grain_fill	°Cd	450
TT bis Erntereife	tt_maturity	°Cd	200
Wintergerste			
TT bis Ende Bestockung	tt_end_of_juvenile	°Cd	600
TT bis Beginn Blüte	tt_floral_initiation	°Cd	280
TT bis Ende Blüte	tt_flowering	°Cd	250
TT bis Ende Kornfüllung	tt_start_grain_fill	°Cd	400
TT bis Erntereife	tt_maturity	°Cd	10
Winterraps			
TT bis Auflaufen	tt_emergence	°Cd	500
TT bis Ende Bestockung	tt_end_of_juvenile	°Cd	900
TT bis Beginn Blüte	tt_floral_initiation	°Cd	200
TT bis Ende Blüte	tt_flowering	°Cd	200
TT bis Ende Kornfüllung	tt_start_grain_fill	°Cd	700
TT bis Erntereife	tt_maturity	°Cd	10
Ackerbohne			
TT bis Auflaufen	tt_emergence	°Cd	200
TT bis Ende Bestockung	tt_end_of_juvenile	°Cd	400
TT bis Beginn Blüte	tt_floral_initiation	°Cd	130
TT bis Ende Blüte	tt_flowering	°Cd	500
TT bis Ende Kornfüllung	tt_start_grain_fill	°Cd	700
TT bis Erntereife	tt_maturity	°Cd	10
Silomais			
TT bis Ende Bestockung	tt_emerg_to_endjuv	°Cd	200
TT Rispschieben bis Blühbeginn	tt_flag_to_flower	°Cd	20
TT Blüte bis Kornfüllung	tt_flower_to_start_grain	°Cd	120
TT Blüte bis Erntereife	tt_flower_to_maturity	°Cd	500

TT = Thermal Time (Temperatursumme)

Tab. 44: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig im Zeitraum 1981 bis 2010

Jahr	WW	WG	WR	AB	SM
1981	105,5	80,9	43,3	56,8	147,2
1982	93,3	77,6	39,8	45,1	223,4
1983	94,6	84,2	40,0	61,2	164,6
1984	90,9	77,3	40,4	47,7	223,8
1985	84,0	86,3	41,2	64,1	220,9
1986	92,3	77,8	39,9	61,9	206,0
1987	92,9	93,0	39,4	57,0	161,3
1988	79,7	77,6	42,6	54,0	225,7
1989	90,2	85,3	42,6	62,3	214,7
1990	92,6	73,9	37,6	55,5	160,4
1991	96,0	85,3	39,8	58,0	189,6
1992	86,3	70,0	39,8	59,2	227,3
1993	85,7	87,2	43,1	62,4	212,7
1994	85,9	84,0	39,6	60,4	225,3
1995	86,2	81,4	42,2	65,9	233,6
1996	87,7	78,9	41,6	61,5	223,7
1997	112,4	92,1	43,4	59,1	186,3
1998	84,3	77,9	44,9	49,4	232,7
1999	96,6	78,2	44,8	63,3	192,5
2000	83,6	81,9	39,4	55,5	222,3
2001	88,8	75,5	41,5	61,9	218,6
2002	89,7	83,0	41,3	55,1	151,6
2003	88,0	76,5	40,2	53,9	197,9
2004	82,7	98,3	42,7	58,6	221,7
2005	90,1	84,3	39,8	59,2	218,3
2006	86,8	77,4	41,1	59,8	201,9
2007	74,2	74,8	37,5	56,9	207,3
2008	94,7	84,4	43,2	56,3	190,1
2009	80,1	87,9	41,8	52,4	207,6
2010	88,4	76,9	40,0	62,0	209,9

Tab. 45: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Braunschweig im Zeitraum 2021 bis 2050

Jahr	WW	WG	WR	AB	SM
2021	95,4	85,8	40,9	50,6	175,3
2022	89,2	91,8	40,7	50,8	166,0
2023	80,8	91,9	42,8	52,5	203,4
2024	94,1	88,4	43,0	62,9	152,5
2025	98,6	87,6	42,2	43,9	192,3
2026	90,7	79,3	42,6	53,6	165,4
2027	82,1	91,4	41,6	50,5	190,2
2028	91,3	82,1	44,1	57,8	164,9
2029	84,6	94,8	41,6	49,1	202,3
2030	97,4	76,9	42,0	56,9	127,6
2031	84,8	90,4	43,3	46,4	154,9
2032	87,0	88,4	42,5	48,2	174,3
2033	94,4	88,0	38,0	54,6	173,0
2034	103,3	92,3	41,8	53,5	146,0
2035	82,9	81,2	42,9	48,1	193,2
2036	94,5	83,8	33,4	55,0	153,0
2037	92,6	87,0	36,5	49,7	171,0
2038	94,9	88,0	30,9	52,5	178,4
2039	96,0	87,1	40,1	53,7	131,5
2040	89,9	88,0	43,7	48,6	202,3
2041	82,6	77,5	34,4	57,9	200,8
2042	97,0	74,9	39,4	57,4	150,4
2043	84,6	72,6	34,8	50,1	191,1
2044	92,9	82,6	37,9	63,3	131,0
2045	84,7	82,0	40,4	45,6	144,8
2046	96,3	83,6	41,0	49,5	108,0
2047	86,4	80,4	39,8	38,2	140,6
2048	95,4	79,7	41,8	51,3	137,3
2049	84,9	77,3	43,8	47,3	161,9
2050	79,7	81,1	41,7	49,2	177,9

Tab. 46: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest im Zeitraum 1981 bis 2010

Jahr	WW	WG	WR	AB	SM
1981	105,4	87,8	48,4	58,9	175,4
1982	93,8	81,8	43,5	46,3	245,2
1983	91,7	80,4	42,7	56,5	203,6
1984	83,2	74,0	42,0	53,3	229,5
1985	82,7	73,8	42,3	55,9	248,6
1986	90,1	81,2	42,8	58,9	232,1
1987	90,3	90,3	40,0	56,9	208,1
1988	88,6	75,5	43,3	57,2	251,7
1989	95,9	79,4	42,8	64,0	250,6
1990	90,1	71,6	40,0	56,8	184,3
1991	95,2	91,0	39,9	51,6	223,1
1992	77,6	71,9	42,1	60,8	237,8
1993	87,7	87,3	45,0	55,2	222,3
1994	83,2	81,5	42,0	56,9	238,6
1995	87,6	93,8	45,1	60,6	257,8
1996	89,6	78,2	41,4	63,0	252,1
1997	106,8	88,9	48,1	60,6	228,4
1998	95,4	80,2	44,1	55,2	255,5
1999	101,5	84,6	46,2	64,2	214,0
2000	83,5	78,6	43,1	59,1	213,0
2001	87,3	71,3	43,5	55,7	242,0
2002	98,1	82,9	43,9	55,9	175,5
2003	88,1	79,1	40,5	55,3	232,6
2004	86,9	95,9	39,6	61,8	246,3
2005	89,2	82,2	42,5	58,0	241,0
2006	90,6	82,9	45,0	61,4	246,2
2007	80,0	77,4	40,3	56,7	231,1
2008	98,0	81,3	49,3	57,2	210,7
2009	83,5	86,3	41,8	52,2	246,6
2010	89,3	80,7	41,6	61,0	237,9

Tab. 47: Jährliche Erträge (dt TM/ha) ausgewählter Kulturen aus der Modellierung im Klimaszenario „STAR-A1B“ für den Standort Soest im Zeitraum 2021 bis 2050

Jahr	WW	WG	WR	AB	SM
2021	99,7	83,1	46,1	58,7	214,7
2022	88,1	87,8	41,9	56,7	187,4
2023	91,3	92,1	44,1	56,3	247,4
2024	94,2	87,6	45,4	63,1	181,2
2025	104,3	85,5	45,7	50,0	232,4
2026	93,9	80,9	46,1	56,2	184,4
2027	84,7	94,4	45,4	47,5	221,6
2028	95,4	83,9	46,5	64,0	207,1
2029	87,7	97,1	44,5	53,5	240,1
2030	106,0	84,1	44,5	62,9	135,6
2031	88,7	89,2	44,4	42,2	174,5
2032	94,4	87,3	45,5	48,6	194,9
2033	95,6	101,9	44,4	57,2	190,9
2034	95,9	88,5	44,0	59,6	164,2
2035	84,0	76,5	44,3	48,0	236,3
2036	101,7	87,3	40,5	61,0	182,8
2037	109,7	87,8	44,4	54,1	210,8
2038	94,4	85,2	41,5	60,0	200,8
2039	88,8	80,9	43,8	54,0	146,6
2040	89,5	78,8	45,3	44,7	226,9
2041	86,3	74,9	41,3	56,3	212,7
2042	95,8	73,7	45,0	55,8	166,5
2043	87,1	70,3	42,7	49,4	186,5
2044	93,3	85,2	42,0	52,7	139,0
2045	92,8	81,8	44,5	43,0	164,1
2046	98,3	88,9	45,6	53,7	127,6
2047	82,5	76,9	42,0	37,8	134,4
2048	96,8	82,1	46,3	48,9	161,5
2049	85,9	76,3	44,8	49,5	187,8
2050	78,8	77,6	43,6	52,3	189,6

Tab. 48: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Hochpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)
Marktfrucht HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	1468	350	55
	WW (WW, Pflug)	1430	350	0
	WR (WW, Pflug)	1412	350	0
Marktfrucht HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	1483	350	55
	WW (WW, Pflug)	1445	350	0
	WR (WW, Pflug)	1376	350	0
Futterbau konventionell HP 1981-2010	WW (SM, pfluglos)	1468	350	55
	WG (WW, Pflug)	1217	350	0
	SM (WG, pfluglos)	909	350	55
Futterbau konventionell HP 2021-2050	WW (SM, pfluglos)	1483	350	55
	WG (WW, Pflug)	1272	350	0
	SM (WG, pfluglos)	637	350	55
Futterbau diversifiziert HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	1443	350	130
	WW (SM, pfluglos)	1445	350	130
	WG (AB, pfluglos)	1209	350	130
	WR (WW, pfluglos)	1406	350	130
	AB (SM, pfluglos)	825	350	130
	SM (Getreide, pfluglos)	902	350	130
Futterbau diversifiziert HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	1458	350	130
	WW (SM, pfluglos)	1460	350	130
	WG (AB, pfluglos)	1264	350	130
	WR (WW, pfluglos)	1370	350	130
	AB (SM, pfluglos)	687	350	130
	SM (Getreide, pfluglos)	630	350	130

Tab. 49: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Hochpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem und Klimperiode	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht 1981-2010	1437	350	18	1805
Marktfrucht 2021-2050	1434	350	18	1803
Futterbau konventionell 1981-2010	1198	350	37	1585
Futterbau konventionell 2021-2050	1131	350	37	1517
Futterbau diversifiziert 1981-2010	1162	350	130	1642
Futterbau diversifiziert 2021-2050	1071	350	130	1551

Tab. 50: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Tiefpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht TP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	660	350	55	1065
	WW (WW, Pflug)	623	350	0	973
	WR (WW, Pflug)	810	350	0	1160
0Marktfrucht TP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	668	350	55	1073
	WW (WW, Pflug)	631	350	0	981
	WR (WW, Pflug)	786	350	0	1136
Futterbau konventionell TP 1981-2010	WW (SM, pfluglos)	660	350	55	1065
	WG (WW, Pflug)	480	350	0	830
	SM (WG, pfluglos)	216	350	55	621
Futterbau konventionell TP 2021-2050	WW (SM, pfluglos)	668	350	55	1073
	WG (WW, Pflug)	509	350	0	859
	SM (WG, pfluglos)	76	350	55	481

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Futterbau diversifiziert TP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	635	350	130	1115
	WW (SM, pfluglos)	637	350	130	1117
	WG (AB, pfluglos)	472	350	130	952
	WR (WW, pfluglos)	804	350	130	1284
	AB (SM, pfluglos)	302	350	130	782
	SM (Getreide, pfluglos)	209	350	130	689
Futterbau diversifiziert TP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	643	350	130	1123
	WW (SM, pfluglos)	645	350	130	1125
	WG (AB, pfluglos)	501	350	130	981
	WR (WW, pfluglos)	780	350	130	1260
	AB (SM, pfluglos)	220	350	130	700
	SM (Getreide, pfluglos)	69	350	130	549

Tab. 51: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Tiefpreisszenario am Standort Braunschweig für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem und Klimaperiode	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht 1981-2010	698	350	18	1066
Marktfrucht 2021-2050	695	350	18	1063
Futterbau konventionell 1981-2010	452	350	37	839
Futterbau konventionell 2021-2050	418	350	37	805
Futterbau diversifiziert 1981-2010	467	350	130	947
Futterbau diversifiziert 2021-2050	418	350	130	898

Tab. 52: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Hochpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	1485	350	55	1890
	WW (WW, Pflug)	1447	350	0	1797
	WR (WW, Pflug)	1493	350	0	1843
Marktfrucht HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	1539	350	55	1944
	WW (WW, Pflug)	1500	350	0	1850
	WR (WW, Pflug)	1547	350	0	1897
Futterbau konventionell HP 1981-2010	WW (SM, pfluglos)	1485	350	55	1890
	WG (WW, Pflug)	1217	350	0	1567
	SM (WG, pfluglos)	1089	350	55	1494
Futterbau konventionell HP 2021-2050	WW (SM, pfluglos)	1539	350	55	1944
	WG (WW, Pflug)	1268	350	0	1618
	SM (WG, pfluglos)	801	350	55	1206
Futterbau diversifiziert HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	1467	350	130	1947
	WW (SM, pfluglos)	1467	350	130	1947
	WG (AB, pfluglos)	1216	350	130	1696
	WR (WW, pfluglos)	1492	350	130	1972
	AB (SM, pfluglos)	827	350	130	1307
	SM (Getreide, pfluglos)	1094	350	130	1574
Futterbau diversifiziert HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	1520	350	130	2000
	WW (SM, pfluglos)	1520	350	130	2000
	WG (AB, pfluglos)	1267	350	130	1747
	WR (WW, pfluglos)	1546	350	130	2026
	AB (SM, pfluglos)	731	350	130	1211
	SM (Getreide, pfluglos)	806	350	130	1286

Tab. 53: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Hochpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem und Klimaperiode	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht 1981-2010	1475	350	18	1844
Marktfrucht 2021-2050	1528	350	18	1897
Futterbau konventionell 1981-2010	1264	350	37	1650
Futterbau konventionell 2021-2050	1202	350	37	1589
Futterbau diversifiziert 1981-2010	1237	350	130	1717
Futterbau diversifiziert 2021-2050	1171	350	130	1651

Tab. 54: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Einzelkulturen im Tiefpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	670	350	55	1075
	WW (WW, Pflug)	632	350	0	982
	WR (WW, Pflug)	864	350	0	1214
Marktfrucht HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	700	350	55	1105
	WW (WW, Pflug)	661	350	0	1011
	WR (WW, Pflug)	900	350	0	1250
Futterbau konventionell HP 1981-2010	WW (SM, pfluglos)	670	350	55	1075
	WG (WW, Pflug)	479	350	0	829
	SM (WG, pfluglos)	310	350	55	715
Futterbau konventionell HP 2021-2050	WW (SM, pfluglos)	700	350	55	1105
	WG (WW, Pflug)	507	350	0	857
	SM (WG, pfluglos)	161	350	55	566

Anbausystem, Preisszenario, Klimaperiode	Kultur, Vorfrucht, Bodenbearbeitung	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Futterbau diversifiziert HP 1981-2010	WW (WR, pfluglos)	651	350	130	1131
	WW (SM, pfluglos)	651	350	130	1131
	WG (AB, pfluglos)	478	350	130	958
	WR (WW, pfluglos)	863	350	130	1343
	AB (SM, pfluglos)	307	350	130	787
	SM (Getreide, pfluglos)	315	350	130	795
Futterbau diversifiziert HP 2021-2050	WW (WR, pfluglos)	682	350	130	1162
	WW (SM, pfluglos)	682	350	130	1162
	WG (AB, pfluglos)	506	350	130	986
	WR (WW, pfluglos)	899	350	130	1379
	AB (SM, pfluglos)	250	350	130	730
	SM (Getreide, pfluglos)	166	350	130	646

Tab. 55: Deckungsbeiträge und Prämienzahlungen der Anbausysteme im Tiefpreisszenario am Standort Soest für die Anbauperioden 1981 bis 2010 und 2021 bis 2050

Anbausystem und Klimaperiode	DB ohne Prämien (€/ha)	Flächenprämie (€/ha)	Agrarumweltmaßnahmen (€/ha)	DB mit Prämien (€/ha)
Marktfrucht 1981-2010	722	350	18	1090
Marktfrucht 2021-2050	754	350	18	1122
Futterbau konventionell 1981-2010	486	350	37	873
Futterbau konventionell 2021-2050	456	350	37	843
Futterbau diversifiziert 1981-2010	512	350	130	992
Futterbau diversifiziert 2021-2050	479	350	130	959

Tab. 56: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Hochpreisszenario (HP))

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Marktleistung	€/ha	2.190	2.074	2.005
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	2.559	2.461	2.485
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	258	358	321
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	32	29
Hagelversicherung	€/ha	15	15	14
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	15
Summe Direktkosten	€/ha	577	673	682
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.982	1.788	1.804
Personalaufwand	€/ha	26	13	7
Lohnansatz	€/ha	128	122	99
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	107	145	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	35	31	18
Treibstoffe	€/ha	62	52	31
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	7	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	490	487	415
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	1.492	1.302	1.389

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Pacht, Pachtansatz	€/ha	500	500	500
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	515	515	515
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.678	1.770	1.708
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	881	690	777

Tab. 57: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario (HP))

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Marktleistung	€/ha	2.188	1.973	1.882
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	2.557	2.360	2.362
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	258	325	288
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	33	29
Hagelversicherung	€/ha	15	14	13
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	15	14
Summe Direktkosten	€/ha	577	639	648
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.980	1.721	1.714

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Personalaufwand	€/ha	26	13	7
Lohnansatz	€/ha	128	122	99
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	107	145	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	35	31	18
Treibstoffe	€/ha	62	52	31
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	7	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeitserledigungskosten	€/ha	490	487	415
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	1.489	1.234	1.299
Pacht, Pachtansatz	€/ha	500	500	500
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	515	515	515
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.678	1.737	1.674
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	878	623	688

Tab. 58: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Tiefpreisszenario (TP))

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Marktleistung	€/ha	1.446	1.323	1.306
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	1.815	1.709	1.786
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	258	358	321
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	32	29
Hagelversicherung	€/ha	10	9	9
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	14
Summe Direktkosten	€/ha	571	667	677
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.243	1.042	1.109
Personalaufwand	€/ha	26	13	7
Lohnansatz	€/ha	128	122	99
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	107	145	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	35	31	18
Treibstoffe	€/ha	62	52	31
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	7	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	490	487	415
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	753	556	694

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Pacht, Pachtansatz	€/ha	500	500	500
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	515	515	515
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.673	1.765	1.703
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	142	-56	83

Tab. 59: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Braunschweig in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario (TP))

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Marktleistung	€/ha	1.444	1.256	1.224
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	1.812	1.642	1.704
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	258	325	288
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	33	29
Hagelversicherung	€/ha	10	9	9
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	15	14
Summe Direktkosten	€/ha	572	633	643
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.241	1.009	1.061

Standort	Einheit	BS	BS	BS
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Personalaufwand	€/ha	26	13	7
Lohnansatz	€/ha	128	122	99
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	107	145	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	35	31	18
Treibstoffe	€/ha	62	52	31
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	7	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	490	487	415
Direkt- und arbeiterledigungskostenfreie Leistung	€/ha	750	522	646
Pacht, Pachtansatz	€/ha	500	500	500
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	515	515	515
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.673	1.732	1.669
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	139	-89	35

Tab. 60: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Hochpreisszenario (HP))

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Marktleistung	€/ha	2.237	2.165	2.097
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	2.605	2.552	2.577
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	264	384	344
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	33	29
Hagelversicherung	€/ha	16	15	15
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	15
Summe Direktkosten	€/ha	584	699	706
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	2.021	1.853	1.871
Personalaufwand	€/ha	38	20	0
Lohnansatz	€/ha	116	115	87
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	106	144	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	36	31	16
Treibstoffe	€/ha	62	52	24
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	8	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	491	486	387
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	1.530	1.367	1.484

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Pacht, Pachtansatz	€/ha	700	700	700
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	715	715	715
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.886	1.997	1.904
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	719	556	673

Tab. 61: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Hochpreisszenario (HP))

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Marktleistung	€/ha	2.300	2.071	2.000
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	2.668	2.458	2.480
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	272	350	314
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	44	34	30
Hagelversicherung	€/ha	16	15	14
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	14
Summe Direktkosten	€/ha	594	665	675
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	2.074	1.792	1.805

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Hochpreis	Hochpreis	Hochpreis
Personalaufwand	€/ha	38	20	0
Lohnansatz	€/ha	116	115	88
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	106	144	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	36	31	16
Treibstoffe	€/ha	63	52	24
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	8	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	492	487	387
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	1.583	1.306	1.418
Pacht, Pachtansatz	€/ha	700	700	700
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	715	715	715
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.897	1.963	1.873
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	771	495	607

Tab. 62: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 1981 bis 2010 (Tiefpreisszenario (TP))

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Marktleistung	€/ha	1.478	1.383	1.366
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	1.846	1.769	1.846
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	264	384	344
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	42	33	29
Hagelversicherung	€/ha	10	10	10
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	15
Summe Direktkosten	€/ha	578	693	701
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.268	1.076	1.146
Personalaufwand	€/ha	38	20	0
Lohnansatz	€/ha	116	115	87
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	106	144	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	36	31	16
Treibstoffe	€/ha	62	52	24
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	8	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeiterledigungskosten	€/ha	491	486	387
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	777	589	759

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		1981-2010	1981-2010	1981-2010
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Pacht, Pachtansatz	€/ha	700	700	700
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	715	715	715
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.881	1.991	1.899
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	-34	-222	-52

Tab. 63: Durchschnittliche kalkulatorische Betriebszweigergebnisse des Betriebszweigs Ackerbau der einzelnen Anbausysteme am Standort Soest in der Klimaperiode 2021 bis 2050 (Tiefpreisszenario (TP))

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Marktleistung	€/ha	1.520	1.319	1.303
Innenumsatz	€/ha	0	0	0
Öffentliche Direktzahlungen	€/ha	368	387	480
Sonstiges, Entschädigungen	€/ha	0	0	0
Summe Leistungen	€/ha	1.888	1.706	1.783
Saat-, Pflanzgut	€/ha	75	112	108
Dünger (eigen)	€/ha	0	0	0
Dünger (Zukauf)	€/ha	272	350	314
Pflanzenschutz	€/ha	170	139	195
Trocknung, Lagerung, Vermarktung	€/ha	44	34	30
Hagelversicherung	€/ha	11	9	9
Sonstige Direktkosten	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Feldinventar	€/ha	17	16	14
Summe Direktkosten	€/ha	588	660	670
Direktkostenfreie Leistung	€/ha	1.300	1.046	1.113

Standort	Einheit	SO	SO	SO
Ackerbausystem		MB	FB1	FB2
Periode		2021-2050	2021-2050	2021-2050
Preisszenario		Tiefpreis	Tiefpreis	Tiefpreis
Personalaufwand	€/ha	38	20	0
Lohnansatz	€/ha	116	115	88
Berufsgenossenschaft	€/ha	30	30	30
Lohnunternehmer	€/ha	106	144	139
Maschinenmiete	€/ha	0	0	0
Maschinenunterhaltung	€/ha	36	31	16
Treibstoffe	€/ha	63	52	24
Abschreibung Maschinen u. Betriebsvorräte	€/ha	58	47	45
Unterh./Absch./Steuer PKW	€/ha	0	0	0
Heizmaterial, Strom, Wasser	€/ha	8	7	3
Maschinenversicherung	€/ha	0	0	0
Zinsansatz Maschinenkapital	€/ha	37	40	43
Summe Arbeitserledigungskosten	€/ha	492	487	387
Direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung	€/ha	808	559	726
Pacht, Pachtansatz	€/ha	700	700	700
Grundsteuer	€/ha	15	15	15
Grundabgaben, Wasserlasten, Flurbereinigung	€/ha	0	0	0
Drainage/Bodenverbesserungen	€/ha	0	0	0
Summe Flächenkosten	€/ha	715	715	715
Beiträge und Gebühren	€/ha	5	5	5
Sonst. Versicherungen	€/ha	34	34	34
Buchführung und Beratung	€/ha	30	30	30
Büro, Verwaltung, Sonstiges	€/ha	27	27	27
Sonstige Kosten gesamt	€/ha	96	96	96
Summe Kosten	€/ha	1.891	1.958	1.868
Kalk. Betriebszweigergebnis	€/ha	-3	-252	-85

Danksagung

Am Ende dieser Arbeit möchte ich mich nochmals bei allen Beteiligten für die tatkräftige Unterstützung der vergangenen Jahre bedanken.

Besonders hervorzuheben sind:

Herr Prof. Dr. Jörg Michael Greef (Julius Kühn-Institut Braunschweig) für sein Vertrauen in meine Arbeit, die Bereitstellung meines Arbeitsplatzes sowie die wissenschaftliche und fachliche Betreuung des Promotionsverfahrens.

Herr Prof. Dr. Ludwig Theuvsen (Georg-August-Universität Göttingen) für die Unterstützung und Betreuung meiner Promotion bei allen ökonomischen Fragestellungen.

Herr Prof. Dr. Bernhard Carl Schäfer (Fachhochschule Südwestfalen) für Projektkoordination und die Unterstützung meiner Promotion im Bereich Pflanzenbau.

Herr PD Dr. habil. Joachim Brunotte für die stets unkomplizierten und tatkräftigen Hilfestellungen in allen Bereichen der täglichen Projektarbeit.

Frau Dr. Viola Richter für die Leitung meiner Arbeitsgruppe und die engagierte Unterstützung beim Verfassen meiner Dissertationsschrift.

Das Team des Versuchsgutes in Sickte unter der Leitung von Herrn Hermann Scheb-Wetzel (†) und Herrn Hans-Henning Langenohl für die vorbildliche Bewirtschaftung unserer Versuchsflächen.

Alle weiteren Kollegen für die Unterstützung bei der Ernte, bei Bonituren im Feld, bei Laboranalysen des Erntegutes, etc.

Die Geldgeber des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung und des Ministeriums für Klimaschutz, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen für die finanzielle Förderung des Projektes.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Martin Heckmann

Geburtsdatum: 20.07.1984

Geburtsort: Rotenburg a. d. Fulda

Ausbildung

1991 - 1995 Blumensteinschule in Wildeck-Obersuhl

1995 - 2004 Werratalsschule in Heringen mit Abschluss der allgemeinen Hochschulreife

2004 – 2007 Bachelor Studium an der JLU Gießen mit Abschluss B. Sc. Agr.

2007 – 2009 Master Studium „Agrarökonomie“ an der JLU Gießen mit Abschluss M. Sc. Agr.

Praktika

3 monatiges Praktikum in landwirtschaftlichem Familienbetrieb (2200 Mastschweine und 200 ha Ackerbau)

3 monatiges Praktikum in landwirtschaftlicher Betriebsgemeinschaft (GbR mit 750 Sauen, 5000 Mastschweine, 600 ha Ackerbau)

3 monatiges Praktikum im John Deere Vertrieb Bruchsal

Langjährige Erfahrung im Bereich Ackerbau, Schweinemast und Milchkuhhaltung durch elterlichen Betrieb (1700 Mastschweine, 170 ha)

Berufstätigkeit

2009 – 2013 Freier Mitarbeiter im Vertrieb bei der Fa. Grasdorf Wennkamp

2010 – 2013 Doktorand im Projekt „Optimierter Klimabetrieb“ (Thema: Ertragsmodellierung und Risikominimierung) mit Dienstsitz am Julius Kühn-Institut in Braunschweig

