

Modellierung von Erträgen und Risikoanalyse im Marktfruchtbau unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels (KL/13/01)

**Bayerische Landesanstalt für
Landwirtschaft (LfL)**

Institut für Betriebswirtschaft und
Agrarstruktur (IBA)

Robert Schätzl
Thomas Felbermeir



Finanziert durch das Bayerische Staatsministerium
für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Vöttinger Straße 38

85354 Freising-Weihenstephan

Internet: <http://www.lfl.bayern.de>

Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur (IBA)

Menzinger Straße 54

80638 München

Internet: <http://www.lfl.bayern.de/iba>

Projektleitung:

Robert Schätzl

E-Mail: robert.schaetzl@lfl.bayern.de

Tel.: 089 / 17800 118

Projektbearbeitung:

Thomas Felbermeir

E-Mail: thomas.felbermeir@lfl.bayern.de

Tel.: 089 / 17800 210

Zusammenfassung

Vielfältige Wechselbeziehungen prägen das Verhältnis zwischen Landwirtschaft und Klimawandel. Einerseits trägt die Landwirtschaft zur Änderung des Klimas bei, andererseits kann sie aber auch einen Beitrag zur Minderung des Klimawandels leisten. Auswirkungen der Klimaänderung beeinflussen die Landwirtschaft sowohl auf positive als auch negative Weise.

Insbesondere der Pflanzenbau ist durch sein Wirtschaften unter freiem Himmel unmittelbar den Folgen des Klimawandels ausgesetzt. Aufgrund der Ortsgebundenheit der pflanzlichen Produktion stellen Klima und Boden die wichtigsten Einflussfaktoren bei der Bewirtschaftung eines Standortes dar. Eine Veränderung des Witterungsgeschehens im Zuge des prognostizierten Klimawandels wirkt sich auf die Wachstumsbedingungen und letztendlich auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen aus. In der Folge ist auch die Wirtschaftlichkeit der Produktion von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen.

Vor diesem Hintergrund besteht das **Ziel des Projektes** darin, mögliche Effekte der Klimaänderung an ausgewählten Standorten in Bayern aus ökonomischer Perspektive zu bewerten. Im Fokus der Arbeit stehen die *Veränderung pflanzenbaulich relevanter Klimaparameter* sowie die daraus resultierenden *Konsequenzen für die Höhe und Stabilität der Erträge* der untersuchten Marktfrüchte. Damit verbundene Effekte auf *Rentabilität und Risiko der Produktion* sind aus ökonomischer Sicht von besonderem Interesse. Zur *Anpassung an die Folgen des Klimawandels* werden zum einen die Durchführung einer Bewässerung sowie zum anderen der Abschluss einer Ertragsversicherung untersucht. Die Eignung der Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos sowie deren Folgen für die Wirtschaftlichkeit der Produktion stehen dabei im Vordergrund. Schließlich werden unter *Berücksichtigung individueller Risikoeinstellung* Handlungsempfehlungen zur Auswahl der geeigneten Anpassungsmaßnahme abgeleitet. Die *Bewertung ausgewählter Einflussfaktoren* auf das Ertragsgeschehen stellt einen weiteren Schwerpunkt der Arbeit dar.

Für bayerische Standortbedingungen wurden bislang nur wenige Studien zu ökonomischen Folgen der Klimaänderung durchgeführt. Die vorliegende Untersuchung erweitert die **Erkenntnislage**, indem *mehrere Standorte* (Almesbach, Arnstein, Bieswang, Günzburg, Reith, Straßmoos, Wolfsdorf) sowie ein *breites Spektrum an Kulturpflanzen* (Winterweizen, Körnermais, Silomais, Wintergerste, Sommergerste, Winterraps, Speisekartoffeln) analysiert werden. Zudem werden im Bereich der ökonomischen Bewertung *Preisrisiken* und *typische Anbauverhältnisse* in die Betrachtung mit einbezogen.

Die **Abschätzung möglicher Klimafolgen** beruht auf den *Ergebnissen aufeinander aufbauender Modelle*. Diese decken die für die Problemstellung relevanten Bereiche des Klimas, des Pflanzenwachstums sowie der ökonomischen Bewertung ab. Den Ausgangspunkt bildet ein Klimamodell, das die zukünftige Ausprägung pflanzenbaulich relevanter Klimaparameter an den Untersuchungsstandorten ermittelt. Diese Ergebnisse nutzt ein Pflanzenwachstumsmodell als Inputgröße zur Simulation von Naturalerträgen verschiedener Kulturpflanzen. Die durch das Pflanzenwachstumsmodell errechneten Erträge dienen schließlich im ökonomischen Modell als Bezugspunkt der Risikobewertung.

Der Effekt des Klimawandels kommt auf den einzelnen Modellebenen zum Ausdruck, indem die Ergebnisse unter gegenwärtigen und unter zukünftigen Klimabedingungen anhand zweier 30 Jahre umfassende Referenzzeiträume verglichen werden. Die Referenz für die Vergangenheit bilden die Jahre 1981 - 2010, als Bezug für die Zukunft dient die Zeitscheibe 2020 - 2049.

Um den mit Klimamodellierungen einhergehenden Unsicherheiten explizit Rechnung zu tragen, baut die vorliegende Arbeit auf **zwei verschiedenen Klimamodellansätzen** auf, die unabhängig voneinander den Ausgangspunkt der nachfolgenden Modelle bilden. Der **WETTREG-Ansatz** basiert auf dem *statistischen Regionalmodell WettReg* sowie dem *globalen Klimamodell ECHAM 5*. Der **ENSEMBLE-Ansatz** besteht aus einem *Ensemble verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle*. Beide Ansätze nutzen das *SRES-Emissionsszenario A1B* als gemeinsame Ausgangsbasis für die globalen Klimamodelle.

Der WETTREG-Ansatz dient der vorliegenden Untersuchung als Referenz, da statistische Modelle insbesondere für kurz- und mittelfristige Klimaprojektionen die zuverlässigeren Ergebnisse liefern als dynamische Regionalisierungsverfahren. Dagegen decken die Klimaprojektionen des ENSEMBLE-Ansatzes eine Bandbreite zukünftiger möglicher Entwicklungen ab.

Als **Pflanzenwachstumsmodell** zur Simulation der Naturalerträge kommt das biophysikalische Modell *HERMES* zur Anwendung. Dieses Modell berechnet simultan die im System Atmosphäre-Pflanze-Boden ablaufenden Prozesse des *Wasserhaushalts*, des *Stickstofftransports*, der *Mineralisation*, der *Denitrifikation* und des *Pflanzenwachstums*. Hierfür benötigt das Modell standortspezifische Parameter aus den Bereichen Klima, Boden und Bewirtschaftung als Inputgrößen. Die relevanten Klimadaten werden den Ergebnissen des jeweiligen Klimamodellansatzes entnommen. Zur Beschreibung der Bodenparameter sowie

der standortüblichen Bewirtschaftung der betrachteten Kultur finden die an den Untersuchungsstandorten im Rahmen des Sortenversuchswesens erhobenen Daten Anwendung. Als Outputgrößen errechnet das Pflanzenwachstumsmodell den *Naturalertrag* der betrachteten Kultur am Untersuchungsstandort.

Ziel des **ökonomischen Modells** ist es, die aus Ertrag (Mengenrisiko) und Preis (Marktrisiko) resultierenden Erlösschwankungen (*Produktionsrisiko*) durch geeignete Anpassungen zu reduzieren. Zu diesem Zweck werden die Durchführung von *Bewässerungsmaßnahmen* und der Abschluss einer *Ertragsversicherung* untersucht. Beide Instrumente dienen der Reduzierung des Mengenrisikos, in dem die Folgen des Klimawandels zum Ausdruck kommen. Neben ihrer Eignung zur Verringerung des Risikos gilt es aber auch, die Wirtschaftlichkeit der Anpassungsmaßnahmen zu beurteilen. Beide Fragestellungen lassen sich durch den Vergleich der *anpassungskostenfreien Leistung (akfL)* in den beiden Untersuchungszeitscheiben beantworten. Die Zielgröße der anpassungskostenfreien Leistung verdeutlicht die durch die Anpassungsmaßnahme bedingte Veränderung des Markterlöses. Ihre Berechnung basiert auf den Verteilungsinformationen, die den Erträgen, Preisen und Kosten zugrunde liegen.

Die **Darstellung und Interpretation der Ergebnisse** erfolgt auf den einzelnen Modellebenen. Um den *Effekt der Klimaänderung* zu verdeutlichen, werden die modellierten Ergebnisse aus Vergangenheit und Zukunft miteinander verglichen. Zur *Beurteilung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen* werden die Modellergebnisse unter zukünftigen Klimabedingungen mit und ohne Anpassung gegenübergestellt.

Die mit den Klimamodellierungen verbundenen *Unsicherheiten* zeigt der Vergleich der Ergebnisse zum einen ausgehend von den Klimadaten des WETTREG-Ansatzes und zum anderen ausgehend von den Klimadaten des ENSEMBLE-Ansatzes.

Die **Ergebnisse des Klimamodells** beschreiben die Veränderung pflanzenbaulich relevanter Klimaparameter an den Untersuchungsstandorten. Im WETTREG-Ansatz werden folgende Ergebnisse erzielt:

Die *Jahresdurchschnittstemperatur* nimmt über alle Untersuchungsstandorte hinweg zwischen 14 % bis 16 % zu. Als Konsequenz verändert sich die Häufigkeit der Tage mit typischen Temperaturkennwerten. Darüber hinaus führt der Anstieg der Durchschnittstemperatur zu einer Verlängerung der Vegetationsperiode um zwei bis drei Wochen.

Der *Jahresniederschlag* geht je nach Standort zwischen 1 % und 6 % zurück. An einzelnen Standorten lassen die Niederschläge insbesondere im Sommer nach, während sie dagegen im Winter ansteigen.

Der Parameter *Globalstrahlungssumme* bemisst das für die Photosynthese zur Verfügung stehende Energiepotential. Hier zeigt sich in Abhängigkeit des betrachteten Untersuchungsstandortes ein Anstieg in der Größenordnung von 4 % bis 5 %.

Werte für den *Kohlendioxidgehalt* der Atmosphäre gelten standortübergreifend. Im Vergleich der beiden Referenzzeitscheiben erhöht sich der Parameter um 28 %. Sowohl im WETTREG-Ansatz als auch im ENSEMBLE-Ansatz werden dieselben Werte für den Kohlendioxidgehalt zugrunde gelegt.

Die *Gegenüberstellung des WETTREG- und des ENSEMBLE-Ansatzes* weist auch beim Parameter Temperatur Ergebnisse in vergleichbarem Umfang aus. Bei den Parametern Niederschlag und Strahlung ergeben sich jedoch gegenläufige Entwicklungen, denn im WETTREG-Ansatz nimmt die jährliche Niederschlagssumme zwischen 2 % und 5 % zu, während die Globalstrahlungssumme geringfügig um 1 % sinkt.

Die **Ergebnisse im Pflanzenwachstumsmodell** beschreiben die Veränderung der Ertragshöhe und des Ertragsrisikos der an den jeweiligen Standorten untersuchten Kulturen. Im Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen sowie bei Durchführung von Bewässerungsmaßnahmen führt der WETTREG-Ansatz zu folgenden Ergebnissen:

Richtung und Ausmaß der *Änderung des Durchschnittsertrags* zwischen den beiden Referenzzeiträumen hängen von Standort und Kultur ab. Einheitliche Ertragszunahmen ergeben sich bei Wintergerste, Winterraps und Körnermais. Je nach betrachtetem Standort fallen die Zunahmen unterschiedlich hoch aus. Bei den übrigen Kulturen gehen die Erträge zurück bzw. zeigen sich keine Veränderungen.

Der Wert für das 10%-Quantil verdeutlicht die *Wahrscheinlichkeit niedriger Naturalerträge*. Eine Zunahme dieses Wertes bedeutet gleichsam eine Abnahme des Ertragsrisikos. Auch bei dieser Kennzahl zeigt sich der Einfluss von Kultur und Standort. Im Vergleich zum Mittelwert des Ertrages ändert sich das 10%-Quantil deutlicher. In der Mehrzahl der betrachteten Fälle nimmt das Ertragsrisiko zu, insbesondere bei den Sommerungen.

Der Einsatz der *Bewässerung* verbessert bei allen Kulturen und an allen Standorten sowohl die Durchschnittserträge als auch die Ertragssicherheit.

Die *Gegenüberstellung der Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes* bestätigt die im WETTREG-Ansatz ermittelten Tendenzen in den allermeisten Fällen. Während sich die Winterungen eher als Profiteure der Klimaänderung darstellen, weisen die Sommerungen eher nachteilige Ertragsentwicklungen auf. Insgesamt betrachtet, resultiert aus der Veränderung der Klimaparameter jedoch keine dramatische Verschlechterung des Ertragsgeschehens.

Die **Ergebnisse des ökonomischen Modells** beschreiben die Veränderung des Risikoprofils sowie des Sicherheitsäquivalents der anpassungskostenfreien Leistung der untersuchten Marktfrüchte. Für den WETTREG-Ansatz lassen sich folgende Ergebnisse festhalten:

Im *Vergleich der beiden Referenzzeiträume* zeigt sich, dass die Entwicklung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung im Wesentlichen der Vorgabe des Ertragsniveaus folgt. Eine Änderung des Naturalertrages bewirkt eine ähnlich große Änderung der anpassungskostenfreien Leistung. Auch das 10%-Quantil der anpassungskostenfreien Leistung folgt der im Pflanzenwachstumsmodell aufgezeigten Tendenz. Jedoch ist die Abhängigkeit nicht so eindeutig gegeben wie beim Mittelwert.

Beim *Vergleich der beiden Anpassungsmaßnahmen* erweist sich unter dem Gesichtspunkt der Risikoreduzierung die Ertragsversicherung als die vorteilhaftere Lösung. Sie trägt an allen Standorten und Kulturen zu einer Verringerung des Produktionsrisikos bei, während die Bewässerung in manchen Fällen das Produktionsrisiko sogar verstärkt. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit verschlechtern beide Anpassungsmaßnahmen die Rentabilität der Produktion. Nur bei der Bewässerung übersteigen in wenigen Fällen die erzielten Erlöszuwächse die Anpassungskosten, ohne jedoch die Streuung zu reduzieren. Die Versicherung ist insbesondere dazu in der Lage, die extrem negativen Abweichungen der ökonomischen Zielgröße zu verringern, ohne die positiven Abweichungen allzu sehr zu belasten.

Im Vergleich zu den Einzelkulturen weist das Risikoprofil des *Anbauverhältnisses* in allen Untersuchungsszenarien stets ein der standorttypischen Gewichtung der Kulturen entsprechendes ausgeglicheneres Niveau aus.

Beim Blick auf das *Sicherheitsäquivalent* zur Bestimmung der zu präferierenden Alternative stiftet bei mittlerer Risikoaversion die Versicherung den größten Nutzen. Der Vorteil gegenüber der Situation ohne Anpassungsmaßnahme fällt jedoch oft gering aus. Dagegen führt der Einsatz der Bewässerung in den allermeisten Fällen zu einem deutlich niedrigeren Sicherheitsäquivalent.

Die *Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes* bestätigen die Ergebnisse des WETTREG-Ansatzes in den allermeisten Fällen. Trotz teils unterschiedlicher Entwicklungen der Klimaparameter widersprechen sich die beiden Ansätze weder beim Risikoprofil noch beim Sicherheitsäquivalent der anpassungskostenfreien Leistung substantziell.

Die **Diskussion** der Ergebnisse zeigt, dass sich die ermittelten Resultate mit den Erkenntnissen anderer Studien decken. Aufgrund der verschiedenen Untersuchungsgrundlagen lassen sich die Studien jedoch nur bedingt miteinander vergleichen. Die vorliegende Arbeit erweitert die Erkenntnislage um weitere Standorte, mehrere Kulturen und bezieht bei der ökonomischen Bewertung der Klimaänderung sowie geeigneter Anpassungsmaßnahmen sowohl Preisrisiken als auch standorttypische Anbauverhältnisse mit ein. Zudem beruhen die Ergebnisse auf zwei unterschiedlichen Klimamodellansätzen.

Dennoch gilt es, die mit den Modellierungen einhergehenden Annahmen und Vereinfachungen zu bedenken. Im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten erscheint es deshalb angezeigt, neben dem bereits dargestellten Einfluss des Klimamodells auch die Relevanz verschiedener Pflanzenwachstumsmodelle für die Ergebnisse herauszuarbeiten. Außerdem könnten Erweiterungen in den Pflanzenwachstumsmodellen weitere Anpassungsmaßnahmen an die Klimaänderung abbilden. Als Beispiele sind Prognosen zum zukünftigen Auftreten von Schaderregern oder die Modellierung des züchterischen Fortschritts zu nennen. Darüber hinaus würde die Verwendung schwächerer Bodenprofile einen Eindruck vermitteln, wie sich das Ertragsgeschehen an weniger günstigen Standorten entwickeln könnte.

Im Bereich der ökonomischen Modellierung gilt es, die Bedeutung der Risikoeinstellung bei der Ermittlung der Ergebnisse zu hinterfragen. Weiterer Forschungsbedarf besteht außerdem bei der Abschätzung von Auswirkungen der Klimaänderung auf den Preis landwirtschaftlicher Produkte. Auf Seiten der Anpassungsmaßnahmen sollte ein Fokus weiterer Arbeiten auf die Modellierung des Basisrisikos von Versicherungen liegen. Auch die Wirkung diversifizierter Anbauverhältnisse auf Rentabilität und Risiko sollte vermehrte Aufmerksamkeit erfahren. Insbesondere sollte bei der zukünftigen Untersuchung von Anpassungsmaßnahmen auch deren möglicher Beitrag zur Minderung der Klimaänderung stärkere Beachtung finden.

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	I
INHALT	VII
ABBILDUNGEN	X
TABELLEN	XIV
ABKÜRZUNGEN	XVI
1 EINLEITUNG	18
1.1 Problemstellung	18
1.2 Zielsetzung	19
1.3 Aufbau der Arbeit	20
2 METHODIK	22
2.1 Untersuchungsgrundlage	24
2.2 Klimamodell	26
2.3 Pflanzenwachstumsmodell	30
2.4 Ökonomisches Modell	33
3 ERGEBNISSE	49
3.1 Vergleich verschiedener Klimamodellansätze	52
3.1.1 Klimamodell	53
3.1.1.1 Kohlendioxid	53
3.1.1.2 Temperatur	55
3.1.1.3 Niederschlag	56
3.1.1.4 Strahlung	58
3.1.1.5 Zwischenfazit	59
3.1.2 Pflanzenwachstumsmodell	60
3.1.2.1 Winterweizen	61
3.1.2.2 Mais	64

3.1.2.3	Wintergerste	67
3.1.2.4	Sommergerste	69
3.1.2.5	Winterraps	72
3.1.2.6	Kartoffel	75
3.1.2.7	Zwischenfazit	77
3.1.3	Ökonomisches Modell	84
3.1.3.1	Almesbach	85
3.1.3.2	Arnstein	88
3.1.3.3	Bieswang	91
3.1.3.4	Günzburg	95
3.1.3.5	Reith	98
3.1.3.6	Straßmoos	101
3.1.3.7	Wolfsdorf	105
3.1.3.8	Zwischenfazit	107
3.2	Bewertung ausgewählter Einflussfaktoren auf die Ertragsbildung	114
3.2.1	CO ₂ -Düngungseffekt	115
3.2.1.1	direkter und indirekter CO ₂ -Effekt	115
3.2.1.2	direkter CO ₂ -Effekt	116
3.2.1.3	kein CO ₂ -Effekt	118
3.2.2	Standortgüte	119
3.2.2.1	Fahlerde	120
3.2.2.2	Rendzina	121
3.2.3	Saatzeitpunkte	122
4	DISKUSSION	125
4.1	Klimamodell	126
4.2	Pflanzenwachstumsmodell	129

4.3	Ökonomisches Modell.....	133
4.4	Schlussfolgerungen.....	138
QUELLEN		141
ANHANG.....		151
Anhang I		151
Anhang II.....		158
Anhang III.....		164
Anhang IV		171
VERÖFFENTLICHUNGEN		175

Abbildungen

Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise im Projekt	22
Abbildung 2: räumliche Lage der Untersuchungsstandorte in den Boden-Klima-Räumen und Regierungsbezirken Bayerns	24
Abbildung 3: Struktur des Modells HERMES.....	31
Abbildung 4: Risikoanalyse im stochastischen Modell	36
Abbildung 5: Berechnung des Sicherheitsäquivalents.....	37
Abbildung 6: Veränderung des atmosphärischen CO ₂ -Gehaltes zwischen den beiden Referenzzeiträumen	54
Abbildung 7: Veränderung der Jahresdurchschnittstemperatur zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze	56
Abbildung 8: Veränderung der jährlichen Niederschlagssumme zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze	57
Abbildung 9: Veränderung der jährlichen Globalstrahlungssumme zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze	58
Abbildung 10: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Winterweizen im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	62
Abbildung 11: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Winterweizen im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	63
Abbildung 12: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Mais im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	65
Abbildung 13: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Mais im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	66
Abbildung 14: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Wintergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	68
Abbildung 15: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Wintergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	69

Abbildung 16: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Sommergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	71
Abbildung 17: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Sommergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	72
Abbildung 18: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Winterraps im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	73
Abbildung 19: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Winterraps im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	74
Abbildung 20: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus der Kartoffel im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	75
Abbildung 21: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages der Kartoffel im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	76
Abbildung 22: Prozentuale Veränderung der mittleren Erträge aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“	78
Abbildung 23: Prozentuale Veränderung der mittleren Erträge aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“	79
Abbildung 24: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils des Ertrages aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“	81
Abbildung 25: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils des Ertrages aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“	82
Abbildung 26: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Almesbach im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	86
Abbildung 27: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Almesbach im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien	87
Abbildung 28: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Almesbach im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	88

Abbildung 29: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Arnstein im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	89
Abbildung 30: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Arnstein im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	90
Abbildung 31: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Arnstein im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	91
Abbildung 32: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Bieswang im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	93
Abbildung 33: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Bieswang im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	94
Abbildung 34: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Bieswang im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	95
Abbildung 35: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Günzburg im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	96
Abbildung 36: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Günzburg im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	97
Abbildung 37: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Günzburg im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	98
Abbildung 38: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Reith im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	99
Abbildung 39: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Reith im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	100
Abbildung 40: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Reith im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	101
Abbildung 41: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Straßmoos im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	102
Abbildung 42: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Straßmoos im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	103
Abbildung 43: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Straßmoos im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	104

Abbildung 44: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	105
Abbildung 45: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien.....	106
Abbildung 46: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze	107
Abbildung 47: Prozentuale Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien	108
Abbildung 48: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien	108
Abbildung 49: Prozentuale Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien	109
Abbildung 50: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien	110
Abbildung 51: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO ₂ -Düngungseffekt.....	116
Abbildung 52: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO ₂ -Düngungseffekt.....	117
Abbildung 53: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO ₂ -Düngungseffekt.....	118
Abbildung 54: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein bei hoher Wasserspeicherkapazität.....	120
Abbildung 55: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein bei niedriger Wasserspeicherkapazität	121
Abbildung 56: Veränderung des Naturalertrages am Standort Arnstein aufgrund witterungsabhängiger Anpassung der Aussaattermine.....	123

Tabellen

Tabelle 1:	Übersicht über die an den Untersuchungsstandorten angebauten Kulturen	25
Tabelle 2:	Überblick über die verwendeten Klimamodelle	29
Tabelle 3:	Untersuchungsszenarien im ökonomischen Modell	39
Tabelle 4:	Marktpreise der untersuchten Kulturen.....	40
Tabelle 5:	Korrelationsmatrix der Produktpreise.....	42
Tabelle 6:	Bodenkapazitätswerte und Bewässerungsmenge an den Untersuchungsstandorten	43
Tabelle 7:	Beispielhafte Berechnung der Bewässerungskosten.....	44
Tabelle 8:	Jährliche Gesamtkosten der Bewässerung in Abhängigkeit von Anzahl und Höhe der Bewässerungsgaben	45
Tabelle 9:	Anbauverhältnisse an den Untersuchungsstandorten.....	49
Tabelle 10:	Jahresdurchschnittstemperatur in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten	55
Tabelle 11:	Niederschlagssumme in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten	57
Tabelle 12:	Globalstrahlungssumme in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten	58
Tabelle 13:	Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Winterweizen im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	61
Tabelle 14:	Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Mais im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	64
Tabelle 15:	Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Wintergerste im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	67

Tabelle 16: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Sommergerste im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	70
Tabelle 17: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Winterraps im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	73
Tabelle 18: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages der Kartoffel im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	75
Tabelle 19: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Almesbach im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	85
Tabelle 20: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Arnstein im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	89
Tabelle 21: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Bieswang im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	92
Tabelle 22: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Günzburg im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	96
Tabelle 23: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Reith im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	99
Tabelle 24: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Straßmoos im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze.....	102
Tabelle 25: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Wolfsdorf im Referenzszenario „Vergangenheit“ im Vergleich der Klimamodellansätze.....	105
Tabelle 26: Bodenprofil mit hoher Wasserspeicherkapazität	119
Tabelle 27: Bodenprofil mit niedriger Wasserspeicherkapazität	119

Abkürzungen

AK	Anpassungskosten
akfL	anpassungskostenfreie Leistung
BBK	Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe
BK	Bewässerungskosten
BM	Bewässerungsmenge
BÜK 1000	Bodenübersichtskarte im Maßstab 1 : 1 000 000
DWD	Deutscher Wetterdienst
DU	Deckungsumfang (95 %)
E	Ertrag
$\bar{E}$	Erwartungswert des Ertrages [dt / ha]
E_b	Ertrag bewässert
E_j	Ertrag im Jahr j [dt / ha]
ECHAM 5	European Center Hamburg, Version 5
FK	Feldkapazität
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KLIWAS	Forschungsprogramm „Klima Wasser Schifffahrt“
LSV	Landessortenversuch
λ	Risikoaversionskoeffizient (exponentielle Risikonutzenfunktion)
mL	monetäre Leistung
nFK	nutzbare Feldkapazität
P	Preis
P_j	Preis im Jahr j [€ / dt]
$\bar{S}$	Erwartungswert der Schadenersatzleistung [€ / ha]
SÄ	Sicherheitsäquivalent

SB	Selbstbehalt (8 %)
S _j	Schadenersatzleistung im Jahr j [€ / ha]
SREX	Special Report Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaption
THW	Bundesanstalt Technisches Hilfswerk
TW	Totwasser
UBA	Umweltbundesamt
U	Nutzen
VP	Versicherungsprämie [€ / ha]
Z	Zielgröße

1 Einleitung

Aufgrund ihres Wirtschaftens mit und in der Natur zeigen sich zwischen Landwirtschaft und Klimawandel vielfältige Wechselbeziehungen. Einerseits trägt die Landwirtschaft durch die Emission von Treibhausgasen zur Veränderung des Klimas bei (UBA 2014, S. 411 ff.). Andererseits kann sie aber auch einen Beitrag leisten, die Ursachen des Klimawandels zu mindern (HÜLSBERGEN und SCHMID 2013, S. 7 ff.). Schließlich ist sie selbst von den Folgen der Klimaänderung betroffen (WEIGEL 2011, S. 14 ff.). HEIBENHUBER und GANDORFER (2008, S. 382 ff.) weisen der Landwirtschaft in diesem Wirkungsgeflecht eine trivalente Rolle als Verursacherin, Beschützerin und Betroffene zu.

Vor allem der Pflanzenbau unter freiem Himmel sieht sich den Konsequenzen des Klimawandels unmittelbar ausgesetzt. Da hier die direkte Wirkung des Klimas kaum oder nur mit großem Aufwand beeinflusst werden kann, kommt potentiellen Folgen sowie geeigneten Anpassungsmaßnahmen besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund richtet sich der Fokus des vorliegenden Projektes auf Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten, die der Klimawandel für den Marktfruchtbau mit sich bringen könnte.

1.1 Problemstellung

Der Klimawandel hat weitreichende Folgen für die Landwirtschaft in Bayern. Insbesondere die pflanzliche Produktion ist von Änderungen im Witterungsgeschehen unmittelbar betroffen. Je nach Standort verändern sich die Wachstumsbedingungen mit entsprechenden Konsequenzen für die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Ackerkulturen.

Zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf Naturalerträge unter bayerischen Standortverhältnissen gibt es bisher nur wenige Untersuchungen. Im Rahmen eines im Jahr 2013 abgeschlossenen Projektes wurden am Institut für Agrarökonomie entsprechende Modellrechnungen für mehrere Kulturen durchgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass unter guten Standortbedingungen das Ertragsniveau gehalten werden kann, wobei die Schwankungsbreite der Erträge in einzelnen Jahren eher zunimmt. Für den Pflanzenbau lässt dies auf ein zukünftig steigendes Ertragsrisiko schließen. Allerdings sind die Modellergebnisse vor dem Hintergrund des betrachteten Standortes und der untersuchten Kultur zu interpretieren. Verallgemeinerungen für andere Kulturen oder Standortverhältnisse

sind daraus nicht ohne weiteres möglich. Wissensdefizite bestehen zudem hinsichtlich der zu erwartenden Ertragsentwicklung an weniger günstigen Standorten.

Auch die Wirkung extremer Witterungsbedingungen auf das Pflanzenwachstum wurde bisher kaum untersucht. Extremwirkungen wie Starkniederschläge oder Dürreperioden spiegeln sich nicht nur in der Erntemenge einzelner Jahre wider, sondern können für landwirtschaftliche Betriebe ein existenzielles ökonomisches Risiko mit sich bringen.

Letzteres hat im Umfeld volatiler Agrarmärkte in den vergangenen Jahren ohnehin bereits merklich zugenommen: seit dem Rückzug der Agrarpolitik aus der Marktordnung prägen Preisschwankungen das Geschehen auf den Märkten. Erhöhen die Ausprägungen des Klimawandels die Variabilität der global zu erwartenden Erntemengen, verstärkt dies Preisschwankungen zusätzlich. Das Preisrisiko für Landwirte nimmt in der Folge zu.

Für landwirtschaftliche Betriebe bedeutet der Klimawandel letztendlich sowohl ein (direktes) Ertragsrisiko als auch ein (indirektes) Preisrisiko. Maßnahmen im Risikomanagement gewinnen somit weiter an Bedeutung. Umfassende Studien zur Ableitung von Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Preis- und Mengenrisiken vor dem Hintergrund des Klimawandels fehlen für die landwirtschaftliche Praxis bislang jedoch.

1.2 Zielsetzung

Um die in der Problemstellung beschriebenen Wissensdefizite zu verringern, verfolgt das vorliegende Projekt mehrere Zielstellungen:

- Schaffung einer breiten Grundlage zur Abschätzung möglicher Folgen des Klimawandels für die Ertragsentwicklung im Ackerbau

Ausgehend von verschiedenen Klimamodellansätzen resultiert eine Bandbreite an Naturalerträgen, mit denen in der Zukunft gerechnet werden könnte.

- Bewertung ertragsrelevanter Einflussfaktoren sowie von Anpassungsmaßnahmen

Die Höhe der CO₂-Konzentration der Atmosphäre sowie die Verfügbarkeit von Wasser erweisen sich unter Klimawandelbedingungen als entscheidende ertragsbildende Faktoren. Mit Hilfe biophysikalischer Ertragssimulationen lässt sich die Bedeutung sowohl des direkten und indirekten CO₂-Düngungseffektes als auch der Standortgüte (Wasserspeicherkapazität) darstellen.

Eine flexible Anpassung von Saat- und Erntezeitpunkten an das Witterungsgeschehen ist dazu geeignet, vorteilhafte Entwicklungen der Klimaänderung (z.B. verlängerte Vegetationsperiode) zu nutzen und nachteilige Ereignisse (z.B. Trockenheit) abzumildern. Dabei fallen im Gegensatz zum Einsatz der Bewässerung oder dem Abschluss einer Versicherung keine Kosten bei der Durchführung der Anpassungsmaßnahme an.

- Darstellung des zu erwartenden Auftretens von extremen Witterungsereignissen, die Einfluss auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen nehmen

Die Folgen von Extremereignissen rufen im Kontext der Klimawandelproblematik die größte Betroffenheit hervor. Eine Abschätzung bezüglich des zu erwartenden Auftretens und der damit verbundenen Ertragsrückgänge bildet eine wesentliche Grundlage für die Entwicklung geeigneter Anpassungsmaßnahmen.

- Analyse von Maßnahmen zur Risikoreduzierung und Ableitung von Handlungsempfehlungen

Je nach Ursache des Risikos und seiner Auswirkung auf die Schwankung relevanter Zielgrößen ergeben sich geeignete Maßnahmen zur Reduzierung des ökonomischen Risikos mit entsprechenden Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Produktionsverfahrens.

Mit Blick auf die beschriebene Zielsetzung beschäftigt sich das vorliegende Projekt mit einer Klimafolgenabschätzung im Marktfruchtbau. Neben Ertrags- und Preisrisiken untersucht es außerdem geeignete Anpassungsmaßnahmen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Nach **Einordnung und Abgrenzung** der vorliegenden Arbeit im einleitenden *Kapitel 1* beschreibt *Kapitel 2* die in der Untersuchung **angewandte Methodik**. Um der beschriebenen Zielsetzung entsprechend die Auswirkungen des Klimawandels auf den Pflanzenbau in Bayern untersuchen zu können, werden bayernweit geeignete Untersuchungsstandorte ausgewählt. Die Analyse möglicher Folgen des Klimawandels an diesen Standorten beruht auf den Ergebnissen aufeinander aufbauender Modelle. Diese decken die für die Problemstellung relevanten Bereiche des Klimas, des Pflanzenwachstums und der ökonomischen Bewertung ab. Dabei baut das vorliegende Projekt inhaltlich und methodisch auf einem vorausgehenden Projekt auf.

Kapitel 3 befasst sich mit der **Darstellung und Interpretation der Ergebnisse**. Ausgehend von den Resultaten der einzelnen Modelle werden die in der Zielstellung beschriebenen Themenfelder behandelt. Bei der Darstellung der Ergebnisse werden verschiedene Untersuchungsszenarien betrachtet. Den Effekt der Klimaänderung verdeutlicht der Vergleich der modellierten Daten aus Vergangenheit und Zukunft. Zur Beurteilung der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen werden die Modellergebnisse unter zukünftigen Klimabedingungen mit und ohne Anpassung gegenübergestellt. Bei den Maßnahmen handelt es sich zum einen um eine Bewässerung und zum anderen um eine Versicherung. An besonders dafür geeigneten Standorten werden spezielle Einflüsse auf das Ertragsgeschehen wie der Einfluss der Bodengüte, die Wirkung des CO₂-Düngungseffektes oder die Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen beschrieben.

Die **Diskussion** in *Kapitel 4* schließt die Arbeit ab, indem sie Handlungsempfehlungen ableitet und auf weiteren Forschungsbedarf aufzeigt.

2 Methodik

Das vorliegende Projekt baut methodisch und inhaltlich auf den Ergebnissen des Projektes „Verfahrensökonomische Analysen zu möglichen Folgen des Klimawandels sowie der Klimateffizienz auf die Landbewirtschaftung“ (FELBERMEIR 2013) auf. Die im genannten Projekt geschaffene Grundlage stellt den Ausgangspunkt für die zu ermittelnde umfassende Klimafolgenabschätzung unter Risikogesichtspunkten dar. Dementsprechend bilden aufeinander aufbauende Modelle, die die für die Zielstellung relevanten Bereiche abdecken, die Grundlage des Projektes (vgl. Abbildung 1).

Zur Beschreibung des Klimawandels kommt ein Klimamodell zum Einsatz. Dessen Ergebnisse nutzt ein Pflanzenwachstumsmodell zur Berechnung des Ertrages verschiedener Kulturpflanzen. Schließlich erfolgt die Ermittlung betriebswirtschaftlicher Kennzahlen im Ökonomischen Modell unter Berücksichtigung von Risikoaspekten.

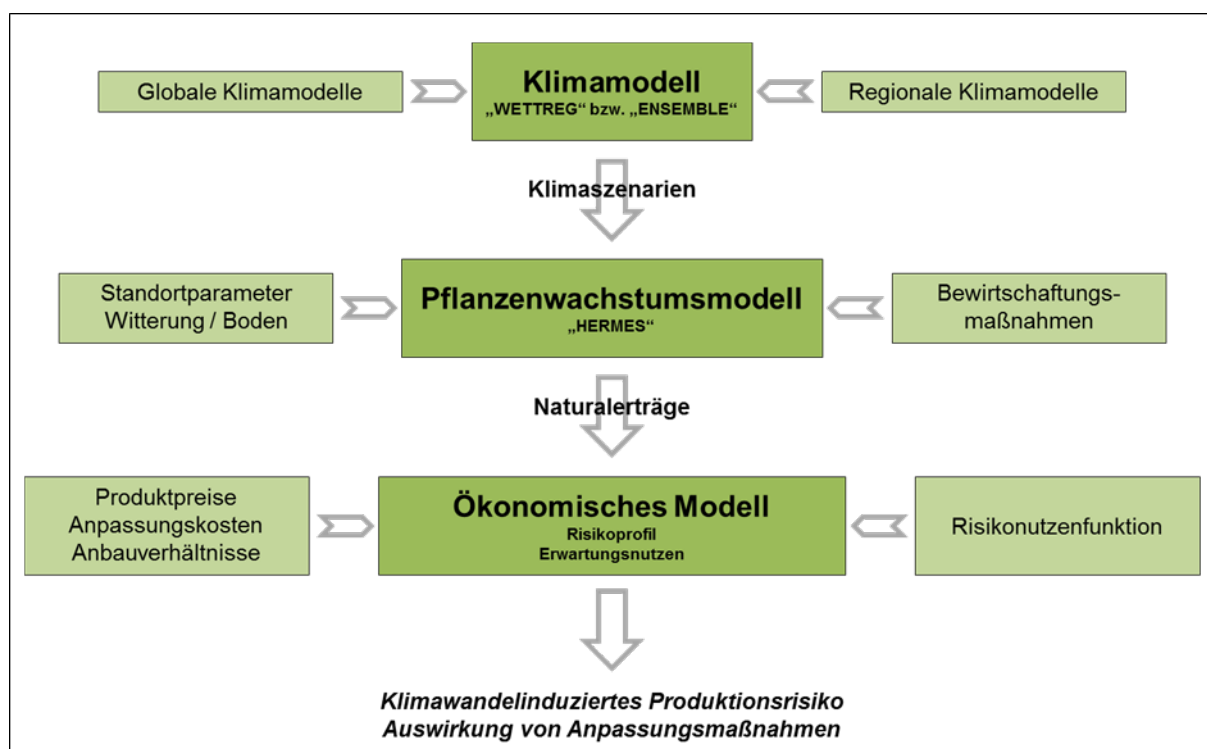


Abbildung 1: Methodische Vorgehensweise im Projekt

Durch die **Verwendung verschiedener Klimamodelle** ergibt sich eine breite Basis zur Einordnung und abschließenden ökonomischen Bewertung der Ergebnisse. Gleichzeitig trägt die Bandbreite der Ergebnisse den mit den Modellierungen einhergehenden Unsicherheiten Rechnung.

Zudem erfolgt die **Ertragsmodellierung sowohl an besseren als auch an tendenziell schwächeren Standorten**. Durch die Berücksichtigung unterschiedlicher Standortbedingungen (Klima und Boden) kann die mögliche Bandbreite des Naturalertrages zwischen guten und schlechten Standortverhältnissen unter zukünftigen Klimabedingungen skizziert werden.

Zur Darstellung von Extremereignissen werden aus den zur Verfügung stehenden Klimaszenarien diejenigen Jahre herausgegriffen, in denen bestimmte klimatische Grenzwerte bei Temperatur und Niederschlag unter- bzw. überschritten werden. Somit können in erster Linie die **Auswirkungen von Frost, Hitze und Trockenheit** untersucht werden.

Die Analyse des **ökonomischen Risikos** beruht zum einen auf den modellierten Erträgen an den Untersuchungsstandorten. Zum anderen werden Daten zu Produkt- und Betriebsmittelpreisen sowie regionalen Anbauverhältnissen herangezogen. Ausgehend von dieser Datengrundlage wird das ökonomische Risiko anhand geeigneter Kennzahlen, wie z. B. Quantilswerten dargestellt. Zur Ableitung von Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis werden unterschiedliche **Anpassungsmaßnahmen** (z. B. Bewässerung, Versicherung, Anpassung von Bewirtschaftungsterminen, Variation von Anbauverhältnissen) hinsichtlich ihrer risikoreduzierenden Wirkung diskutiert. Die hierfür notwendige Datengrundlage ergibt sich aus den Berechnungen der einzelnen Modelle. Bei der Ableitung von Entscheidungshilfen gilt es, die Risikoeinstellung der betroffenen Entscheidungsträger anhand geeigneter Nutzenfunktionen zu berücksichtigen.

Die folgenden Abschnitte geben einen kurzen Überblick über die Untersuchungsgrundlage (Abschnitt 2.1) sowie die verwendeten Modelle (Abschnitt 2.2 bis 2.4). Eine ausführliche Beschreibung findet sich im Abschlussbericht des Vorgängerprojektes „Verfahrens-ökonomische Analysen zu möglichen Folgen des Klimawandels sowie der Klimateffizienz auf die Landbewirtschaftung“ (KL/08/08).

2.1 Untersuchungsgrundlage

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewählten Standorte bilden den räumlichen Bezugspunkt für den Einsatz der Modelle. Direkt verbunden mit der Auswahl der Standorte ist die Frage nach den zu untersuchenden Feldkulturen. Sie stellen den Untersuchungsgegenstand dar. Für die Herausarbeitung der Folgen der Klimaänderung ist zudem die Bestimmung der zu untersuchenden Zeiträume von Bedeutung. Ein vergangener und ein zukünftiger Untersuchungszeitraum stecken den zeitlichen Bezugsrahmen ab. *Standort*, *Kultur* und *Zeitraum* definieren somit die Grundlage für die weitere Untersuchung.

Abbildung 2 verdeutlicht die räumliche Lage der Untersuchungsstandorte in Bayern. Bei den **Standorten** handelt es sich um Standorte der Landessortenversuche (LSV).

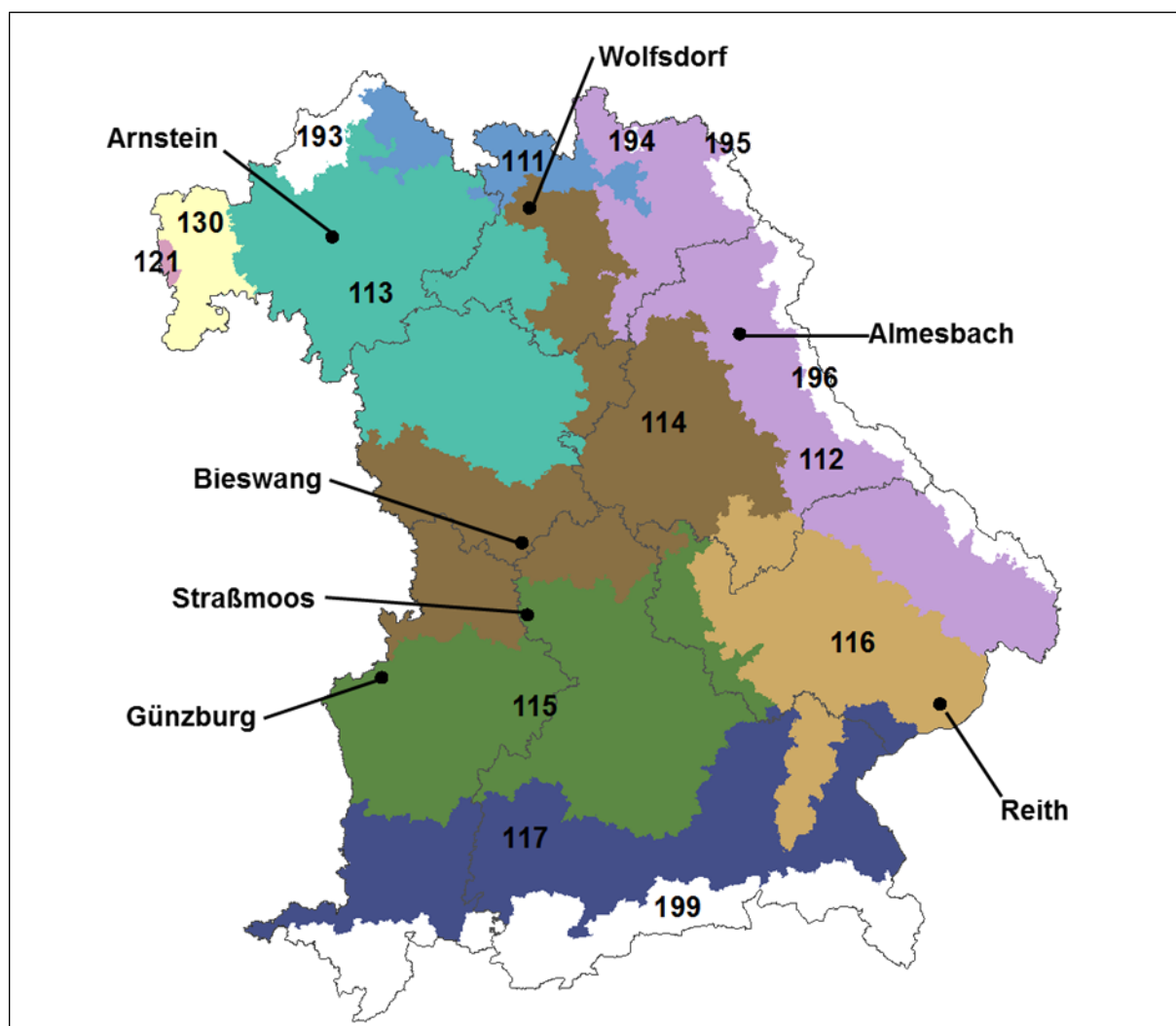


Abbildung 2: räumliche Lage der Untersuchungsstandorte in den Boden-Klima-Räumen und Regierungsbezirken Bayerns
(Kartenerstellung: HALAMA 2012 LfL-ILB 1b, auf Basis von: ROßBERG 2012 JKI; Geobasisdaten Bayerische Vermessungsverwaltung, verändert)

Kriterien bei der Auswahl der Standorte waren Zugehörigkeit zu den ackerbaulich bedeutsamsten Boden-Klima-Räumen Bayerns, homogene räumliche Verteilung sowie langjährig umfangreiche Datenaufzeichnungen.

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die **Kulturen**, die im Rahmen der Landessortenversuche an den jeweiligen Standorten angebaut werden. Die Ertragsmodellierung im Pflanzenwachstumsmodell kann nur für diejenige Kultur erfolgen, für die am Standort Daten zur Bewirtschaftung zur Verfügung stehen.

Tabelle 1: Übersicht über die an den Untersuchungsstandorten angebauten Kulturen
(Quelle: eigene Darstellung)

	Almesbach	Arnstein	Bieswang	Günzburg	Reith	Straßmoos	Wolfsdorf
Winterweizen		✓	✓	✓	✓		✓
Silo- / Körnermais	✓	✓		✓	✓	✓	
Wintergerste	✓	✓	✓	✓		✓	✓
Sommergerste	✓	✓	✓	✓		✓	
Winterraps		✓		✓	✓		✓
Kartoffeln						✓	

Die Auswahl gewährleistet, dass neben dem bislang sehr intensiv erforschten Weizen auch andere Kulturen im Zusammenhang des Klimawandels betrachtet werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung werden die **Zeiträume** 1981 - 2010 und 2020 - 2049 als jeweils 30-jährige Referenzperiode ausgewählt. Beide Zeiträume sind so gesetzt, dass sie möglichst nahe an die Gegenwart heranreichen. Die Jahre 1981 - 2010 bilden die Referenz für die Modellierung des Klimas in der Vergangenheit. Für die Wahl eines möglichst aktuellen Zukunftszeitraumes spricht, dass, je weiter der Betrachtungszeitraum in der Zukunft liegt:

- die mit der Klimamodellierung verbundenen *Unsicherheiten* umso größer werden (IPCC 2008, S. 8 ff.).

- die Einflüsse *extremer Ausprägungen* des Klimas zunehmen. Zudem können neue, bislang noch nicht abschätzbare Entwicklungen an Bedeutung gewinnen. Sie werden als sog. „*Kipppunkte*“ bezeichnet, da sie die Entwicklung des Klimas grundlegend verändern könnten (UBA 2008, S. 4 ff.).
- die *Relevanz* des Betrachtungszeitraumes für aktuelle Entscheidungssituationen landwirtschaftlicher Betriebe abnimmt.

Die Berechnungen des Klimamodells werden so angestellt, dass für beide Untersuchungszeiträume statistische Kennwerte miteinander verglichen werden können. Ein Vergleich realer Daten aus der Vergangenheit mit modellierten Daten aus der Zukunft ist nicht zulässig, da dies einen Vergleich zweier Datensätze unterschiedlichen (methodischen) Ursprungs bedeuten würde.

Die beiden Referenzzeiträume sind nicht nur für das Klimamodell von Bedeutung. Vielmehr bilden sie auf allen Untersuchungsebenen (Klima, Pflanzenwachstum, Ökonomie) den Bezugspunkt zur Darstellung möglicher Klimafolgen, indem die jeweiligen Modellergebnisse des vergangenen und zukünftigen Zeitraumes gegenübergestellt werden.

2.2 Klimamodell

Klimamodelle bilden den Ausgangspunkt zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Klimas. Die Prognose der Klimaveränderungen erfolgt auf der Basis von Modellberechnungen in Form komplexer interaktiver Gleichungssysteme. Diese Klimamodelle bilden die vielschichtigen Zusammenhänge des Klimas sowie die zu Grunde liegenden chemischen und physikalischen Gesetzmäßigkeiten in ihrer Gesamtheit vereinfacht ab (MAIER 2007, S.25 f).

Im Rahmen sog. „Klimaszenarien“ errechnen Klimamodelle die zu erwartende Ausprägung bestimmter Klimaparameter wie z. B. Temperatur und Niederschlag. Bei diesen Berechnungen stellt das Verhalten des Menschen einen wesentlichen Einflussfaktor dar. Diesem Aspekt wird in Form sog. „Emissionsszenarien“ Rechnung getragen. In Abhängigkeit des gewählten Emissionsszenarios ermitteln „globale Klimamodelle“ Ergebnisse auf großräumiger Ebene. Anhand verschiedener „Regionalisierungsverfahren“ können die Resultate der globalen Modelle auf die regionale Ebene herunter gebrochen werden, so dass

sie für die Einschätzung regionaler Klimafolgen genutzt werden können. (EITZINGER ET AL. 2009, S.24 ff)

Vor diesem Hintergrund umfasst der Begriff „Klimamodell“ im Kontext der vorliegenden Untersuchung die **Einheit aus Emissionsszenario, globalem Klimamodell und Regionalisierungsverfahren**.

Bedingt durch die Komplexität der Klimamodelle erfordert deren Berechnung enorme Rechenkapazitäten. Die Ergebnisse der Klimamodelle werden deshalb von zentralen Stellen zur Verfügung gestellt. Im vorliegenden Fall werden die Daten der gewählten Klimamodelle vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in Freising (Niederlassung Weihenstephan) bezogen.

Aufgrund der mit Klimamodellierungen einhergehenden Unsicherheiten baut die vorliegende Arbeit auf zwei Klimamodellansätzen auf, die unabhängig voneinander den Ausgangspunkt der nachfolgenden Modelle zum Pflanzenwachstum und zur Ökonomie bilden:

- der **WETTREG-Ansatz** basiert auf dem *statistischen Regionalmodell WettReg*
- der **ENSEMBLE-Ansatz** besteht aus einem *Ensemble verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle*

Um eine gemeinsame Ausgangsbasis der Ansätze zu gewährleisten, nutzen beide das SRES-Emissionsszenario A1B als Bezugspunkt für die globalen Klimamodelle.

Der statistische Klimamodellansatz *WETTREG* dient der vorliegenden Untersuchung als *Referenz*, da statistische Modelle insbesondere für kurz- und mittelfristige Klimaprojektionen die zuverlässigeren Ergebnisse liefern als dynamische Regionalisierungsverfahren. Dagegen beruhen die Klimaprojektionen des *ENSEMBLE-Ansatzes* auf verschiedenen globalen und regionalen Modellen, deren Ergebnisse eine *Bandbreite zukünftiger möglicher Entwicklungen* abdecken.

Der Vergleich der auf den beiden Ansätzen aufbauenden nachfolgenden Modeltergebnisse ermöglicht eine Einschätzung, welchen Einfluss das Klimamodell auf die nachfolgenden Ergebnisse nimmt.

WETTREG-Ansatz

Die Erstellung regionaler Klimaszenarien im Rahmen des WETTREG-Ansatzes beruht auf dem *Emissionsszenario A1B*, dem *globalen Klimamodell ECHAM 5* sowie dem *Regionalisierungsverfahren WettReg*.

Das **globale Klimamodell ECHAM 5** wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) in Hamburg entwickelt. Das ECHAM-Modell hat seinen Ursprung in der globalen Wettervorhersage. In der Zwischenzeit wurde das Modell für Zwecke der *Klimaforschung* modifiziert. ECHAM 5 stellt eine Weiterentwicklung des Modells ECHAM 4 dar bzw. die Vorgängerversion des aktuellen Modells ECHAM 6. Das Modell fokussiert auf chemische und physikalische Prozesse der Erdatmosphäre. Teilmodelle zur Chemie, zu Aerosolen und zur Vegetation erweitern das Atmosphärenmodell. Darüber hinaus kann das ECHAM-Modell mit einem Ozeanmodell gekoppelt werden. (MPI-M 2011)

Eine detaillierte Beschreibung des Modells ECHAM 5 findet sich bei ROECKNER ET AL. (2003).

Die **WettReg-Regionalisierungsmethode** besteht im Wesentlichen aus drei *Bestandteilen*:

- *Reanalysen* zur Erzeugung homogener Datenreihen für die Beschreibung des Klimas der Gegenwart
- Ergebnisse von *Modellrechnungen* eines globalen Klimamodells (ECHAM 5) als Ausgangspunkt für die Regionalisierung
- *Messdaten* von Klimastationen zur Herleitung statistischer Beziehungen zwischen atmosphärischen Mustern und lokalen meteorologischen Größen

Für die Gewinnung der Messdaten greift WettReg auf ein deutschlandweites Netz an Klima- und Niederschlagsstationen zurück. Die mit WettReg errechneten Klimadaten sind somit stationsgebundene Werte, die für die Standorte der Klima- und Niederschlagsstationen gelten. (KREIENKAMP ET AL. 2010a, S. 5 ff.)

WettReg benutzt ein Verfahren, bei dem anhand eines statistischen Wettergenerators stationsbezogene Zeitreihen meteorologischer Parameter erzeugt werden. Eine detaillierte Beschreibung des WettReg-Verfahrens findet sich bei SPEKAT ET AL. (2007). Die darin vorgestellten Grundlagen wurden im Zuge verschiedener Studien erweitert, um die Ergebnisse des Verfahrens zu verbessern. Auch der Problematik systematischer Abweichungen zwischen simulierten und beobachteten Größen (Bias) trägt der WettReg-Ansatz Rechnung. (KREIENKAMP ET AL. 2010b, S. 11 ff.)

ENSEMBLE-Ansatz

Die Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes beruhen auf verschiedenen regionalen und globalen Klimamodellen, die im Rahmen des KLIWAS-Projektes erstellt worden sind (vgl. IMBERY ET AL. 2013). Das KLIWAS-Forschungsprogramm [Klima Wasser Schifffahrt] beschäftigt sich mit Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland.

Tabelle 2 gibt einen Überblick über die Mitglieder des Ensembles. Die vorliegende Untersuchung nutzt nur Ergebnisse von den Modellen, die im Rahmen des KLIWAS-Projektes regionalisiert und Bias-korrigiert wurden.

Tabelle 2: Überblick über die verwendeten Klimamodelle
(Quelle: IMBERY ET AL. 2013, S. 93, verändert)

Emissionsszenario	globales Klimamodell	regionales Klimamodell
A1B	BCM2	RCA3
	ECHAM 5-r1	CLM
	ECHAM 5-r3	HIRHAM5
	ECHAM 5-r3	RACMO
	ECHAM 5-r3	REGCM
	ECHAM 5-r3	REMO
	HadCM3Q0	CLM
	HadCmQ0	HadRM3Q0

Wie die Tabelle zeigt, bauen alle acht Ensemble-Mitglieder auf dem Emissionsszenario A1B auf.

Die **verschiedenen globalen Klimamodelle** werden von Arbeitsgruppen in verschiedenen Ländern betreut und unterscheiden sich in der Ausgestaltung der einzelnen Modellkomponenten (Atmosphäre, Hydrosphäre, Biosphäre, Kryosphäre, Lithosphäre). Das Modell ECHAM 5 kommt sowohl mit Daten des ersten als auch mit Daten des dritten Modelllaufes zum Einsatz.

Bei den regionalen Klimamodellen handelt es sich ausschließlich um **dynamische Regionalisierungsverfahren**.

Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre

Der Parameter **CO₂-Gehalt der Atmosphäre** gilt auf globaler Ebene. Keiner der beiden regionalen Klimamodellansätze stellt hierfür geeignete Werte zur Verfügung. Als Datenquelle

wird deshalb das Projekt „ENSEMBLES – ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts“ (CNRM 2012a) herangezogen. Das genannte Projekt stellt für verschiedene chemische Klimaparameter deren Werte auf entsprechender räumlicher Basis zur Verfügung.

2.3 Pflanzenwachstumsmodell

Pflanzenwachstumsmodelle beschreiben auf vereinfachte Art und Weise das System „Atmosphäre-Pflanze-Boden“. Darüber hinaus berücksichtigen sie Wechselwirkungen des betrachteten Systems mit klimatischen Einflussgrößen und landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen. In diesem vielschichtigen Beziehungsgeflecht zwischen Pflanze, Boden, Atmosphäre und Bewirtschaftung fokussieren die Modelle auf die wesentlichsten Prozesse und Zustände, um die Systemrealität in Form mathematischer Gleichungen vereinfacht abbilden zu können. In Abhängigkeit der betrachteten räumlichen und zeitlichen Auflösung, der relevanten Inputgrößen sowie der modellierten Prozesse errechnen die Modelle schließlich die Ausprägung wichtiger Zustandsgrößen der Pflanzenentwicklung (z. B. Stickstoffgehalt, Naturalertrag) und davon betroffener Umweltbereiche (z. B. Stickstoffverlagerung im Boden). (BRISSON ET AL. 2006, S. 257 ff.)

Für die Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion stellen Pflanzenwachstumsmodelle somit ein geeignetes Instrument dar. Insbesondere lässt sich mit Hilfe dieser Modelle die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit des Klimas einschätzen. Modelle bieten dabei im Vergleich zu Experimenten den Vorteil, nicht nur ausgewählte einzelne Klimafaktoren, sondern auch die kombinierte Wirkung dieser Faktoren auf das Pflanzenwachstum untersuchen zu können (EITZINGER ET AL. 2009, S. 107 ff.).

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung kommt das biophysikalische Modellsystem **HERMES** für die Simulation des Pflanzenwachstums zur Anwendung. Bei diesem Modell handelt es sich um ein eindimensionales, in vertikaler Richtung orientiertes Modell, dem einfache und robuste Ansätze zugrunde liegen. (KERSEBAUM 2007, S. 40)

HERMES besteht aus verschiedenen Teilmodellen, die anhand von Stoff- und Informationsflüssen untereinander und mit verschiedenen Einflussgrößen in Verbindung stehen. Auf diese Weise bildet das Modell die wesentlichen im System Atmosphäre-Pflanze-Boden ablaufenden Prozesse des Wasserhaushalts, der Stickstoffdynamik sowie des Pflanzenwachstums ab. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Struktur des Modells. Die Lösung der den Wirkungszusammenhängen zugrunde liegenden Gleichungssysteme berechnet HERMES *simultan* und *für jeden Tag* der Modellsimulation. Detaillierte Beschreibungen des Modells finden sich bei KERSEBAUM (1989, 1995, 2007) sowie bei KERSEBAUM und BEBLIK (2001).

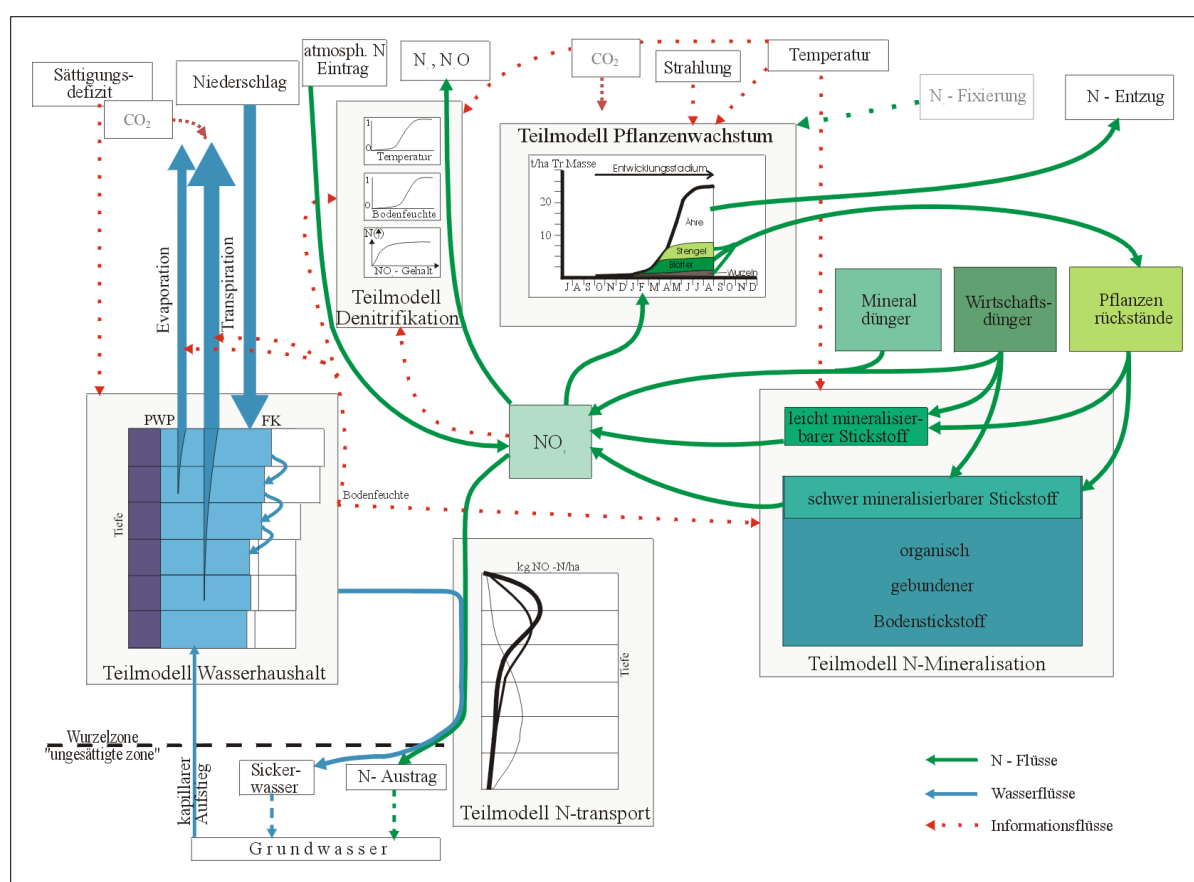


Abbildung 3: Struktur des Modells HERMES
(Quelle: KERSEBAUM 2012a, verändert)

Das Modell wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes mit Hilfe von Daten der Landessortenversuche kalibriert und validiert.

Der von HERMES ermittelte Ertrag resultiert aus der im *Teilmodell Pflanzenwachstum* gebildeten Trockenmasse. Die Grundlage zur Simulation der *Trockenmasseproduktion* bildet der von VAN KEULEN ET AL. (1982) entwickelte Modellansatz SUCROS [Simple and Universal Crop growth Simulator]. Demzufolge ergibt sich die vom Modell assimilierte

Trockenmasse aus der einfallenden *photosynthetisch aktiven Strahlung*, die in etwa 50 % der Globalstrahlung entspricht. Unter Berücksichtigung des Blattflächenindex ergibt sich die CO₂-Assimilation aus der berechneten Strahlung pro Blattfläche und einer Photosynthese-Belichtungskurve. Die aktuelle CO₂-Assimilation errechnet sich letztendlich aus der *maximalen Assimilationsrate* bei Lichtsättigung und optimaler Temperatur durch Multiplikation mit einem temperaturabhängigen Reduktionsfaktor.

Stresssituationen verringern die Photosyntheseleistung der Modellpflanze. Bei Wasserstress geschieht dies anhand eines Reduktionsfaktors, der dem Quotienten aus aktueller und potentieller Transpiration entspricht. Stickstoffmangel tritt im Modell auf, wenn der Stickstoffgehalt der oberirdischen Pflanzenorgane unter einen kritischen Wert abfällt. Der Umfang der damit verbundenen Wachstumseinschränkung bemisst sich am Grad der Unterschreitung des kritischen Stickstoffgehaltes.

Einen Teil des assimilierten Kohlenstoffs verbraucht die Pflanze bei der Atmung, um Energie zu gewinnen. Das Modell berücksichtigt *Atmungsverluste* in Form von temperaturabhängiger Erhaltungsatmung und in Form von Wachstumsatmung.

Schließlich verteilt das Modell die aus Photosynthese und Atmung resultierende *Netto-Trockenmasseproduktion* auf die einzelnen Pflanzenorgane (Wurzel, Stängel, Blätter, Fruchtkörper) in Abhängigkeit des temperatursummengesteuerten *Entwicklungsstadiums*. Unter Annahme eines konstanten Verhältnisses von Blattfläche zu Blattgewicht kann hieraus wiederum der zur Ermittlung der Photosynthese benötigte Blattflächenindex errechnet werden.

Letztlich leitet das Modell den **Naturalertrag** der Kulturpflanze **flächenbezogen** [dt / ha] zum Zeitpunkt der Ernte aus dem Gewicht des **Fruchtkörpers** ab. Somit ergibt sich der Ertrag aus der dynamischen Verteilung der **gebildeten Trockenmasse** unter Berücksichtigung der spezifischen Wachstumsbedingungen im Verlauf der Pflanzenentwicklung. (KERSEBAUM 2007, S. 41)

Zur besseren Vergleichbarkeit werden die Erträge deshalb auf handelsübliche Vergleichsmaßstäbe umgerechnet. Im Falle der Mähdruschfrüchte erfolgt eine Umrechnung auf trockene Ware. Hierfür wird beim Winterraps ein Feuchtegehalt von 9 % unterstellt, bei Weizen, Gerste und Körnermais von 14 %. Beim Silomais resultiert der Ertrag aus der Summe der oberirdischen Pflanzenorgane (Spross, Blätter, Kolben) unter Berücksichtigung eines Ernteverlustes von 10 %, der den auf dem Feld verbleibenden Ernterückständen entspricht. Der daraus errechnete Ertrag bezieht sich auf einen Trockensubstanzgehalt von

35 % (KERSEBAUM 2012b). Bei den Speisekartoffeln wird der Ertrag unter Annahme eines Trockensubstanzgehaltes von 22 % ermittelt (KELLERMANN 2012).

2.4 Ökonomisches Modell

Das ökonomische Modell beschäftigt sich mit den Konsequenzen des Klimawandels für das unternehmerische Risiko. Im Zentrum der Untersuchung steht das durch den Klimawandel induzierte Risiko im Marktfruchtbau. In diesem Zusammenhang bezeichnet der Begriff „**Risiko**“ die **Wahrscheinlichkeitsverteilung einer zielrelevanten Größe**. „Risiko“ bezieht sich folglich nicht ausschließlich auf negative Ereignisse, sondern beschreibt schlichtweg Ereignisse, die mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eintreten (MUBHOFF und HIRSCHAUER 2011, S. 327 f.).

Die Risikobetrachtung im Modell trägt dem Aspekt Rechnung, dass wichtige Einflussgrößen des betriebswirtschaftlichen Erfolges (Naturalertrag, Produktpreis, Betriebsmittelkosten) Zufallsvariablen sind, deren Werte unterschiedliche Ausprägungen einnehmen können. Dieser Gesichtspunkt ist für die vorliegende Arbeit von besonderer Bedeutung, da die Betrachtung des Klimawandels einen Blick in die Zukunft erfordert, der vielerlei Unsicherheiten mit sich bringt. Indem die Risikoanalyse die aus den Unsicherheiten resultierende Streuung der Ergebnisse in Wahrscheinlichkeiten übersetzt, macht sie die Unsicherheiten quantifizierbar.

Das vorliegende ökonomische Modell untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf das **Produktionsrisiko** verschiedener Marktfrüchte. Ursache dieser Risikoart sind die **Erträge** und die **Preise**, die bei der Produktion der Marktfrüchte erzielt werden. Da die Höhe der beiden Variablen zu Beginn der Produktion nicht mit Sicherheit bestimmt werden kann, besteht ein **Mengen- und Marktrisiko**. Beide Risiken sind dem Bereich der Geschäftsrisiken zuzuordnen. Das Mengenrisiko ist internen Ursprungs, während das Marktrisiko von außen auf den landwirtschaftlichen Betrieb wirkt.

Ziel des ökonomischen Modells ist es, die aus Menge und Preis resultierenden **Erlösschwankungen** durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren. Zu diesem Zweck werden die Durchführung von **Bewässerungsmaßnahmen** (innerbetriebliches Instrument zur Risikoverminderung) und der Abschluss einer **Ertragsversicherung** (außerbetriebliches

Instrument zur Risikoübertragung) untersucht. Auch die **terminliche Anpassung von Bewirtschaftungsmaßnahmen** sowie die **Gestaltung von Anbauverhältnissen** können dazu beitragen, das Mengenrisiko zu reduzieren. Die Maßnahmen zielen darauf ab, auf der Ertragsseite Verluste und daraus resultierende monetäre Einbußen beim Erlös zu kompensieren. Neben ihrer Eignung zur **Reduzierung des Produktionsrisikos** spielt aber auch die **Wirtschaftlichkeit** eine entscheidende Rolle.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kommt im Mengenrisiko die Wirkung des Klimawandels zum Ausdruck, während auf das Marktrisiko weitere Faktoren wirken, die im vorliegenden Zusammenhang nicht thematisiert werden. Preisschwankungen können das Produktionsrisiko jedoch verstärken, wenn niedrige Preise und schwache Erträge zusammentreffen. Um diesem Aspekt Rechnung zu tragen, wird das Marktrisiko in die Risikobetrachtung mit einbezogen.

Zielgröße

Als Zielgröße, deren Verteilung (Risikoprofil) zu ermitteln ist, wird die sogenannte „**anpassungskostenfreie Leistung**“ (**akfL**) definiert. Sie ergibt sich aus dem Erlös (monetäre Leistung) der Produktion abzüglich der Kosten der Anpassungsmaßnahme:

$$akfL = E \times P - AK \quad \text{(Gleichung 1)}$$

mit:

akfL = anpassungskostenfreie Leistung [€ / ha]

E = Ertrag (Naturalertrag der Marktfrucht) [dt / ha]

P = Preis (Produktpreis der Marktfrucht) [€ / dt]

AK = Anpassungskosten (Kosten der Maßnahme) [€ / ha]

Die anpassungskostenfreie Leistung verdeutlicht die durch die Anpassungsmaßnahme bedingte Veränderung des Markterlöses. Über die Anpassungskosten hinausgehende Kostenpositionen bleiben unberücksichtigt, da über ihre zukünftige Höhe nur gemutmaßt werden kann.

Zur Darstellung der direkten Folgen des Klimawandels werden im ersten Schritt noch keine Anpassungsmaßnahmen in Betracht gezogen. Dementsprechend fallen auch keine

Anpassungskosten an, sodass in diesem Fall als Zielgröße der Erlös (*monetäre Leistung*) der Produktion gilt:

$$mL = E \times P \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit:

mL = monetäre Leistung [€ / ha]

E = Ertrag (Naturalertrag der Marktfrucht) [dt / ha]

P = Preis (Produktpreis der Marktfrucht) [€ / dt]

Der Erlös der Produktion wird nur von den Variablen Naturalertrag und Produktpreis beeinflusst.

Risikoprofil

Risikoanalysen können sowohl auf *qualitativer* als auch *quantitativer* Ebene durchgeführt werden. Im vorliegenden Fall erfolgt die Ermittlung des Risikoprofils quantitativ auf der Basis *stochastischer Simulationsrechnungen*.

Hierfür werden den unbestimmten Eingaben (Zufallsvariablen) im Modell Bereiche möglicher Werte (Auftretenswahrscheinlichkeiten) zugeordnet. Anhand der Rechenvorschrift im Modell (siehe Gleichung 1) ergibt sich aus den disaggregierten Zufallsvariablen die aggregierte Zielgröße. Auf diese Weise resultiert aus der Vielzahl der Realisationen der Zufallsvariablen eine Vielzahl an Werten für die Zielgröße, die das Risikoprofil definieren. Abbildung 4 veranschaulicht die beschriebene Vorgehensweise des stochastischen Modells.

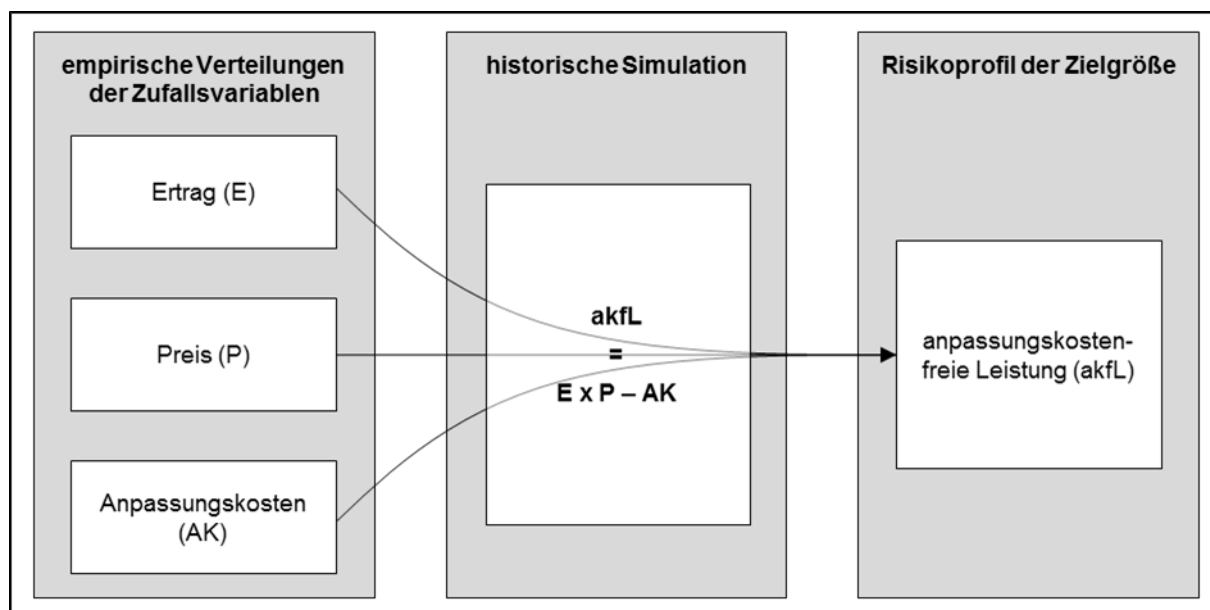


Abbildung 4: Risikoanalyse im stochastischen Modell

(Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an MUßHOFF und HIRSCHAUER 2011, S. 384)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellen die Erträge (E) und Preise (P) der Marktfrüchte sowie die Kosten der Anpassungsmaßnahmen (AK) die Zufallsvariablen dar, deren Auftretenswahrscheinlichkeiten zu bestimmen sind. Bei der Berechnung des Risikoprofils gilt es zudem, Korrelationen zwischen den Zufallsvariablen zu berücksichtigen.

Die Berechnung des Risikoprofils der Zielgröße im stochastischen Modell folgt dem Verfahren der **historischen Simulation** (MUßHOFF und HIRSCHAUER 2011, S. 396). Dabei ergibt sich das Risikoprofil aus den beobachteten (empirischen) Verteilungen der relevanten Zufallsvariablen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit bilden *die mit HERMES modellierten Erträge* die Verteilung der Zufallsvariable Ertrag ab. Werte für die Variable Preis ergeben sich aus den empirischen *Preisangaben zu den untersuchten Kulturen in den vergangenen Jahren*. Die jeweilige Höhe der *Anpassungskosten* ist *abhängig von der betrachteten Maßnahme und deren Umfang* im jeweiligen Jahr des Referenzzeitraumes.

Die Beschreibung des ermittelten Risikoprofils erfolgt anhand der Kennzahlen des Wertes für das arithmetische Mittel sowie des Wertes für das 10%-Quantil. Beide Kennzahlen dienen auch der Einschätzung von Wirtschaftlichkeit und Risikoreduzierung der getätigten Anpassungsmaßnahmen:

- *Mittelwert:* vergrößert sich das arithmetische Mittel der anpassungskostenfreien Leistung durch die Maßnahme, ist die Durchführung der Anpassung wirtschaftlich. Denn die anpassungskostenfreie Leistung kann nur zunehmen, wenn die durch die Maßnahme entstehenden Kosten kleiner sind als die erzielbaren Erlöszuwächse.

- *10%-Quantil*: erhöht sich der Wert für das 10%-Quantil der anpassungskostenfreien Leistung kommt darin ein Rückgang des Risikos zum Ausdruck, da die Wahrscheinlichkeit niedriger Werte der Zielgröße abnimmt.

Das Risikoprofil der Zielgröße bietet eine *Hilfestellung zur Ableitung von Handlungsempfehlungen*.

Sicherheitsäquivalent

Für die letztendliche Entscheidung, wie mit dem Risiko umzugehen ist, muss die *individuelle Risikoeinstellung des Entscheidungsträgers* in die Kalkulationen miteinbezogen werden. Dies geschieht anhand einer *Risikonutzenfunktion*, mit der sich das Sicherheitsäquivalent (SÄ) einer Handlungsalternative als Entscheidungskriterium bestimmen lässt. Das Sicherheitsäquivalent lässt sich interpretieren als monetär bewerteter Nutzen einer Handlungsalternative (MUBHOFF und HIRSCHAUER 2011, S. 411 ff.). Abbildung 5 verdeutlicht die Vorgehensweise zur Berechnung nach dem **Erwartungsnutzen-Prinzip** ausgehend vom Risikoprofil.

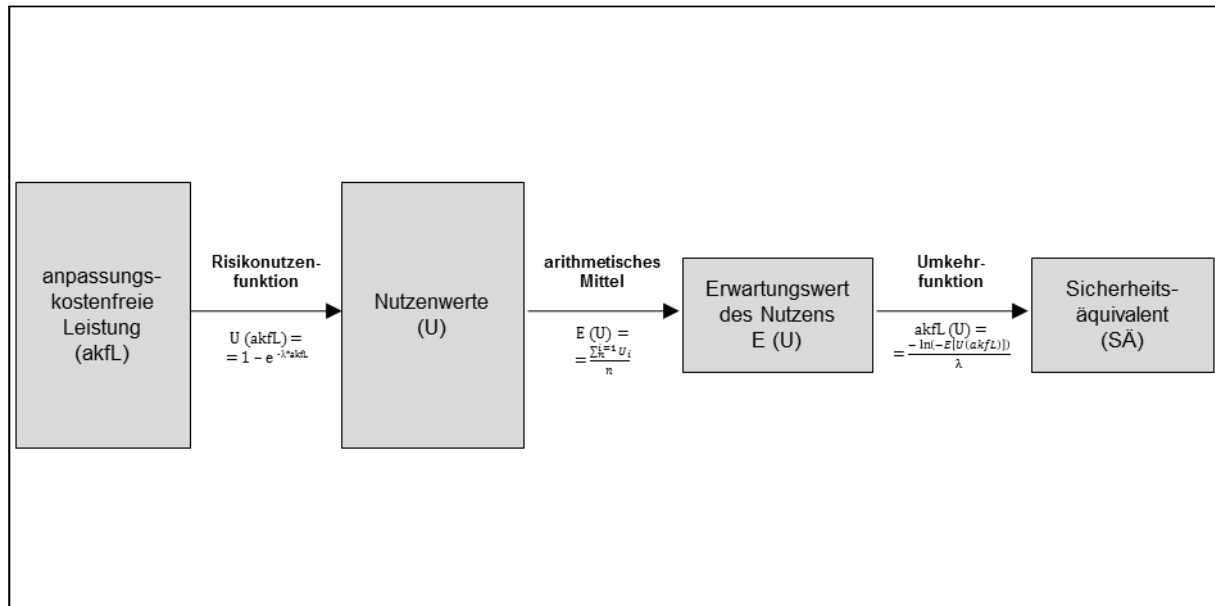


Abbildung 5: Berechnung des Sicherheitsäquivalents
(Quelle: eigene Darstellung)

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Berechnung des Sicherheitsäquivalents folgende exponentielle Risikonutzenfunktion verwendet (BERG 2002, S. 113):

$$U(Z) = 1 - e^{-\lambda \cdot Z} \quad (\text{Gleichung 2})$$

mit:

U = Nutzen

Z = Zielgröße (=akfL)

λ = Risikoaversionskoeffizient

Wie in Abbildung 5 dargestellt ergibt sich aus der Vielzahl der Einzelwerte für die anpassungskostenfreie Leistung mittels der Risikonutzenfunktion eine Vielzahl an Nutzenwerte. Das arithmetische Mittel dieser Nutzenwerte entspricht dem Erwartungswert des Nutzens. Dieser lässt sich anhand der Umkehrfunktion der Risikonutzenfunktion in das Sicherheitsäquivalent umwandeln.

In der Literatur finden sich verschiedene Quellen, die aufgrund empirischer Untersuchungen bzw. theoretischer Überlegungen **relative Risikoaversionskoeffizienten** im Bereich zwischen 0 und 4 verwenden. So schlagen beispielsweise ANDERSON und HARDAKER (2003, S. 177) in Anlehnung an ANDERSON und DILLON (1992, S. 55) eine Klassifizierung vor, die von $\lambda = 0,5$ (kaum risikoavers) bis $\lambda = 4$ (extrem risikoavers) reicht. Auch GANDORFER ET AL. (2011, S. 617) erachten Werte zwischen 0 und 4 als angemessen, das Risikoverhalten von Landwirten abzudecken. Dementsprechend wird in der vorliegenden Untersuchung ein Bereich von $\lambda = 0$ bis $\lambda = 4$ für den relativen Risikoaversionskoeffizienten ausgewählt, um die Einstellung unterschiedlich stark risikoaverser Entscheider abzubilden.

Der Wert für den absoluten Risikoaversionskoeffizienten ergibt sich unter Berücksichtigung des Erwartungswertes der anpassungskostenfreien Leistung. Als Referenz dienen die Ergebnisse der Zukunftszeitscheibe, da diese für die Bewertung der Anpassungsmaßnahmen die Ausgangssituation darstellt.

Modellaufbau

Den Berechnungen im ökonomischen Modell liegen *verschiedene Szenarien* zugrunde, in denen jeweils die Ermittlung des Risikoprofils und des Sicherheitsäquivalents erfolgt. Aus dem Vergleich der Szenarioergebnisse lassen sich die Folgen des Klimawandels sowie die Wirkung der Anpassungsmaßnahmen ableiten. Tabelle 3 gibt einen Überblick über den Inhalt der Szenarien. Im Wesentlichen unterscheiden sie sich in ihrem *zeitlichen* (Referenzzeitraum) und *inhaltlichen* (Anpassungsmaßnahme) Bezug.

Tabelle 3: Untersuchungsszenarien im ökonomischen Modell
(Quelle: eigene Darstellung)

Szenario		Referenzzeitraum	Anpassungsmaßnahme
Bezeichnung	Abkürzung		
Szenario – Vergangenheit	Sz-Ve	1981 – 2010	-
Szenario – Zukunft	Sz-Zu	2020 – 2049	-
Szenario – Bewässerung	Sz-ZB	2020 – 2049	Bewässerung
Szenario – Versicherung	Sz-ZV	2020 – 2049	Versicherung

Konsequenzen der Klimaänderung werden aus dem Vergleich zwischen „Szenario – Zukunft (Sz-Zu)“ und „Szenario – Vergangenheit (Sz-Ve)“ ersichtlich.

Die Wirkung der Bewässerungsmaßnahme ergibt sich aus der Gegenüberstellung von „Szenario – Bewässerung (Sz-ZB)“ und „Szenario – Zukunft (Sz-Zu)“.

Effekte, die aus dem Abschluss der Versicherung resultieren, veranschaulicht der Vergleich von „Szenario – Versicherung (Sz-ZV)“ und „Szenario – Zukunft (Sz-Zu)“.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Datengrundlage zur Berechnung der anpassungskostenfreien Leistung in den verschiedenen Szenarien. Insbesondere werden die Annahmen zu Erträgen und Preisen sowie die Ausgestaltung der Anpassungsmaßnahmen erläutert. Zudem wird die Zielgröße nicht nur für die einzelnen am jeweiligen Untersuchungsstandort angebauten Kulturen sondern auch für ein standortspezifisches Anbauverhältnis ermittelt.

Ertrag

Die für die Risikoanalyse verwendeten Erträge stammen aus dem Pflanzenwachstumsmodell *HERMES*.

Erträge des „Szenarios – Vergangenheit“ beziehen sich auf die Modellierungen im Referenzzeitraum 1981 – 2010. Für das „Szenario – Zukunft“ und das „Szenario – Versicherung“ gelten die Erträge des Referenzzeitraumes 2020 – 2049.

Auch die Erträge des „Szenarios – Bewässerung“ bauen auf dem Referenzzeitraum 2020 – 2049 auf. Allerdings werden die Erträge für dieses Szenario unter Berücksichtigung zusätzlicher Wassergaben errechnet. Dementsprechend basieren die Modellierungen auf den Klimawerten des Zeitraumes 2020 – 2049. Im Vergleich zu den anderen „Zukunftsszenarien“ wird jedoch als zusätzliche produktionstechnische Maßnahme eine Bewässerung modelliert.

Die Simulation der Naturalerträge bezieht sich auf den jeweils 30 Jahre umfassenden Referenzzeitraum. Da allerdings die beiden Klimamodellansätze mehrere Realisationen umfassen (vgl. Abschnitt 2.2, S. 26 ff.) ergeben sich im Pflanzenwachstumsmodell für jeden Referenzzeitraum im WETTREG-Ansatz 300 simulierte Ertragswerte und im ENSEMBLE-Ansatz 240. Diese bilden die Verteilungsgrundlage für das Verfahren der historischen Simulation.

Preis

Als Referenz für den Produktpreis der untersuchten Kulturen wird in allen Szenarien deren *Marktpreis* in den Erntejahren 2005 – 2014 herangezogen (LfL – IBA 2015a). Auf dieser Datengrundlage erfolgt die Bestimmung der Verteilungsannahmen zur Risikoanalyse.

Tabelle 4 listet die Preise der im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersuchten Kulturen im gewählten Betrachtungszeitraum auf.

Tabelle 4: Marktpreise der untersuchten Kulturen
(Quelle: LfL – IBA 2015a)

Kultur	Erntejahr									
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]	[€/dt]
Winterweizen	9,19	12,42	21,91	12,72	10,31	19,73	18,37	23,05	16,87	15,25
Gerste	9,08	11,09	19,96	11,87	9,11	14,93	18,18	20,36	16,49	14,08
Körnermais	10,26	13,81	20,92	11,72	11,40	19,71	18,08	22,91	17,50	13,67
Silomais	1,80	1,80	2,40	1,80	1,80	2,50	2,50	3,34	2,50	1,80
Winterraps	19,16	23,88	33,36	31,39	25,25	35,52	43,78	47,83	34,71	30,01
Speisekartoffeln	9,13	20,50	10,13	10,79	8,76	22,10	8,34	16,53	23,08	6,68

Folgendes gilt es bei den aufgeführten Preisen zu beachten:

- Bei den Angaben handelt es sich um *netto-Werte*.
- Sämtliche Preise beziehen sich auf *handelsübliche Ware*.
- Der Preis für Winterweizen entspricht der Bezahlung der *Qualitätskategorie B-Weizen*.
- Beim Preis für Gerste handelt es sich um den *Futtergerstenpreis*. Er gilt sowohl für Sommer- als auch für Wintergerste.
- Der *Preis für Silomais leitet sich aus dem Deckungsbeitrag für Körnermais ab*. Dabei liegt die Annahme zu Grunde, dass das Häckseln und der Verkauf von Silomais denselben

Deckungsbeitrag erzielen soll wie der Mähdrusch und Verkauf von Körnermais. Berechnungsgrundlage ist der Körnermaispreis, wie er sich zum Zeitpunkt der Silomaisernte abzeichnet.

Um das Verfahren der historischen Simulation anwenden zu können, wird zur Berechnung der anpassungskostenfreien Leistung für jeden Naturalertragswert einer Kultur auch eine Preisangabe benötigt. Zu diesem Zweck wird die Verteilung ermittelt, die den in Tabelle 4 aufgeführten Preisdaten zugrunde liegt. Aus der jeweiligen Verteilung werden dann Zufallszahlen gezogen, die als Realisation der Variable Preis zur Berechnung der anpassungskostenfreien Leistung verwendet werden.

Die **Bestimmung der den Preisangaben zugrunde liegenden Verteilung** sowie die **Ziehung der Zufallszahlen** geschieht mit Hilfe des EXCEL-Add-In „@RISK“ der Firma Palisade (PALISADE 2013).

Zur Ermittlung der am besten zu den Daten passenden Verteilung nutzt @RISK das Verfahren der *Maximum Likelihood Estimators* (MLEs), das heißt Schätzungenfunktionen größter Wahrscheinlichkeit, bzw. geringe Abänderungen der MLEs (PALISADE 2013, S. 845 ff.). Für die Auswahl der bestmöglichen Verteilung werden die von @risk zur Verfügung gestellten Diagramme, Statistiken und Berichte genutzt. Die Rangordnung der angepassten Verteilungen ergibt sich entsprechend der *AIC-Statistik* (Akaike Information Criterion) (PALISADE 2013, S. 854). Die AIC-Statistik stellt ein Informationskriterium für die Auswahl der am besten passenden Verteilung dar. Niedrige Werte der AIC-Statistik sind zu bevorzugen (MUN 2006, S. 280 ff.). Als am besten passende Verteilungsannahme erwies sich bei allen Kulturen die *Gleichverteilung*.

Bei der Ziehung der Zufallszahlen werden nicht nur die aus den Preisen gewonnen Verteilungsannahmen berücksichtigt, sondern auch *Korrelationen zwischen den Preisen* der einzelnen Kulturen. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass Preise, die in der Realität eine hohe Abhängigkeit aufweisen, auch im Modell mit der entsprechenden Korrelation auftreten. Tabelle 5 zeigt einen Überblick über die anhand Tabelle 4 errechnete *Korrelationsmatrix*.

Tabelle 5: Korrelationsmatrix der Produktpreise
(Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von LfL – IBA 2015a)

	Winterweizen	Gerste	Körnermais	Silomais	Winterraps	Speisekart.
Winterweizen	1	0,96	0,98	0,87	0,85	0,28
Gerste	0,96	1	0,93	0,84	0,87	0,16
Körnermais	0,98	0,93	1	0,91	0,83	0,40
Silomais	0,87	0,84	0,91	1	0,88	0,39
Winterraps	0,85	0,87	0,83	0,88	1	0,17
Speisekart.	0,28	0,16	0,40	0,39	0,17	1

Korrelationen zwischen Ertrag und Preis werden im Modell nicht berücksichtigt. Denn bei den Erträgen handelt es sich um die Ergebnisse, die sich in Abhängigkeit der Bedingungen am jeweiligen Anbauort ergeben. Dagegen sind die Preise das Ergebnis globaler Angebots- und Nachfragestrukturen. Die Ertragsleistung einzelner Anbauorte nimmt darauf keinen Einfluss. GANDORFER ET AL. (2011, S. 617) haben gezeigt, dass zwischen bayerischen Ertrags- und Preisdaten im Zeitraum 1997 bis 2008 allenfalls schwache Korrelationen bestehen.

Bewässerung

Die Modellierung der Bewässerung erfolgt einerseits im Pflanzenwachstumsmodell und andererseits im ökonomischen Modell. Im *Pflanzenwachstumsmodell* werden die Erträge ermittelt, die aus der Durchführung der Bewässerung resultieren. Darauf aufbauend werden im *ökonomischen Modell* die Kosten der Bewässerung in Ansatz gebracht.

Generell gelten für die **Durchführung der Bewässerung** unabhängig von der Kultur folgende Bedingungen, um Ertragseinbußen zu vermeiden (LfL 2008, S. 9 f.):

- die Bewässerung beginnt, wenn die Bodenfeuchte im Wurzelraum auf *unter 50 % der nutzbaren Feldkapazität (nFK)* absinkt. Dieser Grenzwert soll die Gefahr von Trockenstress für die Pflanzen verhindern.
- die Bewässerung endet, wenn der Wasservorrat im Boden auf *80 % nFK aufgefüllt* worden ist. Bei einer Bewässerung bis 100 % nFK könnten nachfolgende Regenfälle zu einem unproduktiven Versickern von Bodenwasser sowie Auswaschung von Nährstoffen und Luftmangel im Wurzelraum führen. Vermeidbare Kosten sowie mögliche Ertragsdepressionen wären die Konsequenz.
- die Bewässerungsmenge in mm hängt vom durchwurzelbaren Bodenprofil am Standort ab. Sie entspricht der *Differenz zwischen 80 % und 50 % nFK*. Die maximale

Höhe der Bewässerungsgabe wird auf 40 mm begrenzt, da umfangreichere Berechnungsmengen ebenso die Gefahr von Sickerwasserbildung, Auswaschungsverlusten und Sauerstoffmangel mit sich bringen können.

Unter Berücksichtigung dieser Bedingungen werden im Pflanzenwachstumsmodell diejenigen Tage ermittelt, an denen Bewässerungsmaßnahmen notwendig sind. Zu diesem Zweck werden die relevanten Kennwerte an den Untersuchungsstandorten bestimmt und hinsichtlich der beschriebenen Bewässerungsbedingungen geprüft:

Im *ersten Schritt* werden für jedes Bodenprofil im durchwurzelbaren Bodenraum die Kennwerte Feldkapazität (FK) und nutzbare Feldkapazität (nFK) sowie der Anteil des Totwassers (TW) errechnet. FK und nFK lassen sich anhand der Kenngrößen „Bodenart“ und „effektive Lagerungsdichte“ der einzelnen Bodenhorizonte unter Berücksichtigung deren Mächtigkeit ermitteln (AG BODEN 1994, S. 295 f.). Der Anteil des Totwassers ergibt sich aus der Differenz zwischen FK und nFK. Darüber hinaus wird für jedes Bodenprofil der Wert für 80 % und 50 % nFK sowie die Differenz dieser Grenzwerte berechnet. Die maximale Bewässerungsmenge (BM) pro Durchgang wird jedoch auf 40 mm begrenzt. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die relevanten Werte.

Tabelle 6: Bodenkapazitätswerte und Bewässerungsmenge an den Untersuchungsstandorten

(Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von AG BODEN 1994, S. 295 f.)

Bodentyp	Untersuchungsstandort	FK*	nFK*	TW*	80% nFK*	50% nFK*	BM*
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Braunerde	Almesbach	175	82	93	66	41	25
Fahlerde	Arnstein, Bieswang, Günzburg, Reith, Wolfsdorf	318	187	131	150	94	40
Parabraunerde	Straßmoos	323	132	191	106	66	40

*FK = Feldkapazität *nFK = nutzbare Feldkapazität *TW = Totwasser *BM = Bewässerungsmenge

Bei der Braunerde und bei der Parabraunerde entspricht die Bewässerungsmenge der Differenz zwischen 80 % und 50 % nFK. Im Falle der Fahlerde wird die Bewässerungsgabe jedoch auf die maximal vorgegebene Menge von 40 mm beschränkt.

Im *zweiten Schritt* werden in den Ergebnissen der Ertragssimulation des Pflanzenwachstumsmodells im Referenzzeitraum 2020 – 2049 diejenigen Tage bestimmt, an denen der Grenzwert von 50 % nFK unterschritten wird.

Die Modellergebnisse weisen als Kenngrößen für den Bodenwasserhaushalt den täglichen Wert des Wassergehaltes (FK) in den einzelnen Bodenschichten aus. Hieraus wird die nFK berechnet, indem vom Wassergehalt im Wurzelraum der Anteil des Totwassers abgezogen wird. Der Anteil des Totwassers wurde (im ersten Schritt) anhand des Bodenprofils errechnet.

An dem Tag, an dem die nFK im Wurzelraum zum ersten Mal unter 50 % absinkt, erfolgt die erste Bewässerungsgabe. Durch die Bewässerung wird dem Boden diejenige Menge an Wasser zugeführt, die zur Auffüllung auf 80 % nFK erforderlich ist, maximal jedoch 40 mm.

Wenn daraufhin im Laufe der Vegetation weitere Tage auftreten, an denen der Wert für 50 % nFK unterschritten wird, erfolgen an diesen Tagen abermals Bewässerungsgaben. Demzufolge fallen in Abhängigkeit von Witterung und Pflanzenwachstum in den einzelnen Jahren kein bis zu drei Bewässerungstermine an.

Die **Kosten der Bewässerung** werden auf der Grundlage von Angaben des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) zusammengestellt (KTBL 2009, S. 36 ff.). Hinsichtlich der technischen Umsetzung der Bewässerung beziehen sich die Modellkalkulationen auf eine mobile Beregnungsmaschine mit Einzelregner. Die weiteren Modellannahmen veranschaulicht Tabelle 7 am Beispiel von zwei Bewässerungsdurchgängen von je 25 mm Höhe.

Tabelle 7: Beispielhafte Berechnung der Bewässerungskosten
(Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von KTBL 2009, S. 36 ff.)

- Bewässerungsgaben: 2 x 25 mm - Schlaggröße: 5 ha, Fläche pro Brunnen: 6,7 ha		€ / ha und Jahr	
		fix	variabel
Brunnen: Flachbrunnen: 20 m Tiefe, Abschreibung: 30 Jahre		31,95	2,32
Pumpe: Druck: 12 bar, Leistung: 50 m ³ /h, Dieselmotor		66,65	54,50
Wasser:		0	
Betrieb: Auf- und Abbau, Überwachung		8,62	33,16
Maschinen: Rohrlänge: 350m, Beregnungsbreite: 54 m		36,14	8,00
GESAMTKOSTEN € / ha und Jahr		241,33	

Die *Gesamtkosten* der Bewässerung setzen sich zusammen aus den fixen und variablen Kosten pro Jahr für *Wasserbereitstellung* (Brunnen, Pumpe, Wasser) und *Bewässerung* (Betrieb, Maschinen). Wasser steht in der dargestellten Kalkulation kostenlos zur Verfügung. Bei der Kalkulation der Abschreibung wird eine Auslastung an der Auslastungsschwelle angesetzt (KTBL 2009, S. 38). Eine spürbare Kostendegression durch Bewässerung weiterer

Flächen findet somit nicht statt, da die übrigen fixen Kosten (z. B. Zinsansatz) im Vergleich zur Abschreibung weniger deutlich ins Gewicht fallen.

Je nachdem, *wie oft und in welcher Höhe pro Jahr bewässert* werden muss, unterscheiden sich die jährlichen Gesamtkosten. Tabelle 8 stellt die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung relevanten Fälle zusammen.

Tabelle 8: Jährliche Gesamtkosten der Bewässerung in Abhängigkeit von Anzahl und Höhe der Bewässerungsgaben

(Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von KTBL 2009, S. 36 ff.)

Bewässerungsgaben		Anzahl		
		1	2	3
Höhe	25 mm	171,12 € / ha	241,33 € / ha	311,54 € / ha
	40 mm	187,49 € / ha	274,07 € / ha	360,65 € / ha

Die jährlichen Gesamtkosten ermitteln sich anhand des in Tabelle 7 exemplarisch vorgestellten Rechenschemas. Die Höhe der einzelnen Bewässerungsgaben ist Tabelle 6 entnommen. In Abhängigkeit des Verlaufs von Witterung und Pflanzenwachstum fallen je nach Jahr eine unterschiedliche Anzahl an Bewässerungsterminen an. Dabei gilt es zu beachten, dass das Klimamodell als Datengrundlage für das Pflanzenwachstumsmodell mehrere Realisationen der Klimaparameter für die einzelnen Jahre im Referenzzeitraum zur Verfügung stellt (vgl. Abschnitt 2.2, S. 26 ff.). Im Falle des WETTREG-Ansatzes resultieren für den 30-jährigen Referenzzeitraum 300 Einzeljahre mit unterschiedlicher Anzahl an Bewässerungsterminen, im Falle des ENSEMBLE-Ansatzes handelt es sich um 240.

Im Rahmen der Risikoanalyse errechnet sich die *anpassungskostenfreie Leistung der Bewässerung* gemäß folgender Gleichung:

$$akfL = E_b \times P - BK \quad (\text{Gleichung 3})$$

mit:

akfL = anpassungskostenfreie Leistung [€ / ha]

E_b = Ertrag bewässert [dt / ha]

P = Preis [€ / dt]

BK = Bewässerungskosten [€ / ha]

Versicherung

Die Modellierung der Versicherung erfolgt ausschließlich im Rahmen des ökonomischen Modells. Bei der zu modellierenden Versicherungsvariante handelt es sich um eine **Ertragsversicherung**. Sie umfasst den vom Versicherungsgeber zu leistenden Schadenersatz und die vom Versicherungsnehmer zu zahlende Versicherungsprämie.

Verschiedene Versicherungsunternehmen bieten Ertragsversicherungen in Form von Mehrgefahrenversicherungsprodukten an. Als Beispiele sind die Versicherungskammer Bayern mit ihren „ErnteSchutz Vario“-Produkten (VERSICHERUNGSKAMMER BAYERN 2015) oder die Münchener und Magdeburger Agrarversicherung mit ihren „Hagel-Super“-Produkten (MÜNCHENER UND MAGDEBURGER AGRARVERSICHERUNG 2014) zu nennen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung lehnt sich die Modellierung der Schadenersatzleistung an die bestehenden Mehrgefahrenversicherungsprodukte („Secufarm“) der Vereinigten Hagel an. Dabei legt der Versicherungsnehmer einen Hektarwert fest, den er versichern möchte (VEREINIGTE HAGEL 2014a, S. 41). Im Modell wird als Referenz hierfür der durchschnittliche Erlös der vorausgegangenen fünf Jahre herangezogen. Auf diese Weise werden die Produktionsverhältnisse der vorausgehenden Jahre berücksichtigt. Im Falle eines Schadens wird vom versicherten Hektarwert ein Selbstbehalt in Höhe von 8 % einbehalten (VEREINIGTE HAGEL 2014b, S. 56).

Eine Schadenersatzleistung wird fällig, wenn der Ertrag eines Jahres unter das durchschnittliche Ertragsniveau fällt. Als Referenz gilt der Erwartungswert des Ertrages. Dieser wird jedoch nur bis zu einer Höchstgrenze von 95 % entschädigt, um Bagatellfälle zu vermeiden (VEREINIGTE HAGEL 2014b, S. 56).

Die *Schadenersatzleistung* berechnet sich gemäß folgender Gleichung:

$$S_j = \begin{cases} \left(\frac{\sum_{l=1}^5 (E_{j-l} \times P_{j-l})}{5} \right) \times (1 - SB), & \text{für } E_j < DU \times \bar{E} \\ 0, & \text{für } E_j \geq DU \times \bar{E} \end{cases} \quad (\text{Gleichung 4})$$

mit:

S_j = Schadenersatzleistung im Jahr j [€ / ha]

E_j = Ertrag im Jahr j [dt / ha]

$\bar{E}$ = Erwartungswert des Ertrages [dt / ha]

DU = Deckungsumfang (95 %)

P_j = Preis im Jahr j [€ / dt]

SB = Selbstbehalt (8 %)

Deckungsumfang und Selbstbehalt tragen dem Aspekt des moralischen Risikos Rechnung. Der Deckungsumfang wird mit 95 % angesetzt und begrenzt auf diese Weise den versicherten Durchschnittsertrag. Die Wahrscheinlichkeit einer Vernachlässigung der Bestandesführung nach Abschluss der Versicherung wird somit reduziert.

Eine Schadenersatzleistung entsprechend Gleichung 4 wird fällig, wenn der tatsächlich realisierte Ertrag kleiner ist als 95 % des durchschnittlich zu erwartenden Ertrages. Die Höhe der Schadenersatzleistung ergibt sich aus dem Durchschnittserlös der vorausgegangenen fünf Jahre abzüglich des Selbstbehalts. Übersteigt dagegen der tatsächlich realisierte Ertrag den zu 95 % versicherten Durchschnittsertrag wird kein Schadenersatz geleistet.

Bei Fälligkeit stellt die Schadenersatzleistung eine zusätzliche Komponente dar, die dem Erlös des Produktionsverfahrens hinzuzuaddieren ist. Gleichzeitig sind im Modell aber in jedem Jahr Anpassungskosten in Form der zu zahlenden Versicherungsprämie zu berücksichtigen.

Die *Versicherungsprämie*, die der Versicherte zu entrichten hat, orientiert sich an der sog. „fairen Prämie“. Diese entspricht dem Erwartungswert der Schadenersatzleistung. Darüber hinaus fallen beim Versicherungsgeber Personal- und Transaktionskosten, z. B. für Verwaltung des Personals und Überwachung der Versicherungsbedingungen an. Die entstehenden Kosten sowie eine Gewinnmarge werden auf die Prämie aufgeschlagen. Im vorliegenden Fall wird dieser Zuschlag mit 30 % der fairen Prämie veranschlagt (BERG 2002, S. 123). Die zu zahlende Versicherungsprämie errechnet sich demnach aus folgender Gleichung:

$$VP = \bar{S} \times 1,30 \quad (\text{Gleichung 5})$$

mit:

VP = Versicherungsprämie [€ / ha]

$\bar{S}$ = Erwartungswert der Schadenersatzleistung [€ / ha]

Das Problem der Negativauslese kommt in der vorliegenden Betrachtung nicht zum Tragen, da der Erwartungswert der Schadenersatzleistung stets nur von der konkreten untersuchten Kultur am Standort abhängt. Auch das Basisrisiko ist aufgrund des spezifischen Bezugs der Versicherung nicht von Bedeutung.

Im Rahmen der Risikoanalyse errechnet sich die *anpassungskostenfreie Leistung der Versicherung* gemäß folgender Gleichung:

$$akfL = E \times P + S_j - VP \quad (\text{Gleichung 6})$$

mit:

akfL = anpassungskostenfreie Leistung [€ / ha]

E = Ertrag [dt / ha]

P = Preis [€ / dt]

S_j = Schadenersatzleistung [€ / ha]

VP = Versicherungsprämie [€ / ha]

Anbauverhältnisse

Die Berücksichtigung von Anbauverhältnissen im ökonomischen Modell zielt auf den Aspekt ausgewogener Fruchtfolgen ab. Allerdings beziehen sich Fruchtfolgen auf die *zeitliche Abfolge* verschiedener Kulturen auf ein- und demselben Feldstück. Die von den einzelnen Kulturen ausgehenden Wirkungen auf die nachfolgenden Kulturen betreffen die Bodenfruchtbarkeit sowie bodenbürtige Krankheitserreger und die Unkrautflora (AIGNER 2014, S. 185). Diese Aspekte finden im Pflanzenwachstumsmodell jedoch keine Berücksichtigung.

Im Gegensatz dazu werden die unterschiedlichen Wirkungen der Klimaparameter auf verschiedene Kulturen, die im selben Jahr an einem Standort angebaut werden, im Modell sehr wohl ermittelt. Bestimmte (Wetter-)Konstellationen der Parameter können zur gleichen Zeit für die eine Kultur positive Ertragswirkungen zeitigen, während sie für eine andere Kultur negative Folgen nach sich ziehen. Hieraus kann ein gewisser Risikoausgleich resultieren, wenn verschiedene Kulturen im *räumlichen Nebeneinander* (Anbauverhältnis) kultiviert werden.

Als Bezugspunkt für die Ermittlung des Anbauverhältnisses an einem Untersuchungsstandort wurden die Anbauflächen des jeweiligen Landkreises in den Jahren 2010 bis 2014 zugrunde gelegt (LFL-IBA 2015b). In jedem Jahr wurde auf Landkreisebene der prozentuale Flächenanteil der am Standort angebauten Kulturen ermittelt. Dabei wurde als Bezugsfläche nur die Gesamtfläche jeweils dieser Kulturen herangezogen. Kulturen (wie z.B. Hafer), die in manchen Landkreisen zwar angebaut werden, nicht jedoch am Untersuchungsstandort,

wurden in die Bezugsfläche nicht miteinbezogen. Schließlich wurde aus den jährlich ermittelten Flächenanteilen das fünfjährige Mittel gebildet und auf 5 % Genauigkeit gerundet.

Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Anbauverhältnisse an den Untersuchungsstandorten. Die Werte in Klammern entsprechen dem errechneten fünfjährigen Mittel.

Tabelle 9: Anbauverhältnisse an den Untersuchungsstandorten
(Quelle: eigene Berechnungen auf Basis von LfL – IBA 2015b)

Almesbach	<i>Silomais</i> 40 % (44 %)		<i>Wintergerste</i> 30 % (28 %)		<i>Sommergerste</i> 30 % (28 %)
Arnstein	<i>Winterweizen</i> 40 % (37 %)	<i>Silomais</i> 10 % (8 %)	<i>Wintergerste</i> 10 % (11 %)	<i>Sommergerste</i> 20 % (22 %)	<i>Winterraps</i> 20 % (22 %)
Bieswang	<i>Winterweizen</i> 55 % (55 %)		<i>Wintergerste</i> 40 % (40 %)		<i>Sommergerste</i> 5 % (5 %)
Günzburg	<i>Winterweizen</i> 55 % (54 %)	<i>Körnermais</i> 10 % (11 %)	<i>Wintergerste</i> 20 % (21 %)	<i>Sommergerste</i> 5 % (4 %)	<i>Winterraps</i> 10 % (9 %)
Reith	<i>Winterweizen</i> 35 % (38 %)		<i>Körnermais</i> 60 % (58 %)		<i>Winterraps</i> 5 % (4 %)
Straßmoos	<i>Körnermais</i> 20 % (21 %)	<i>Wintergerste</i> 20 % (18 %)	<i>Sommergerste</i> 10 % (8 %)		<i>Speisekartoffeln</i> 50 % (53 %)
Wolfsdorf	<i>Winterweizen</i> 50 % (50 %)		<i>Wintergerste</i> 30 % (30 %)		<i>Winterraps</i> 20 % (20 %)

Die Berechnung der anpassungskostenfreien Leistung des Anbauverhältnisses an einem Standort geschieht, indem die anpassungskostenfreien Leistung der einzelnen Kulturen mit dem jeweiligen Anbauanteil multipliziert und aufsummiert werden. Die gleiche Vorgehensweise gilt für die Berechnung des Sicherheitsäquivalentes des Anbauverhältnisses.

3 Ergebnisse

Die im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelten Ergebnisse geben Aufschluss darüber, welche möglichen Konsequenzen sich für den Marktfruchtbau unter zukünftigen Klimabedingungen in Bayern einstellen können. Simulationsrechnungen auf der Grundlage verschiedener Modelle bilden das methodische Grundgerüst.

Die folgenden Abschnitte beschreiben die Modellergebnisse an den verschiedenen Untersuchungsstandorten. Aufgrund der methodischen Vorgehensweise ergeben sich insbesondere beim Pflanzenwachstumsmodell und im ökonomischen Modell mehrere (Teil-) Ergebnisse. Folgendes gilt es, zu beachten:

Ergebnisse des **Klimamodells** spiegeln die Änderungen zwischen den beiden Untersuchungszeiträumen 1981 – 2010 und 2020 – 2049 wider. Daraus ergibt sich an den Untersuchungsstandorten eine *Veränderung klimatischer Kenngrößen* (Temperatur, Niederschlag, Strahlung, Kohlendioxidgehalt), die für das Pflanzenwachstum von Bedeutung sind. Insbesondere die Auswirkungen der Temperaturänderung werden mit einem Blick auf Tage mit charakteristischen Temperaturkennwerten deutlich.

Ergebnisse des **Pflanzenwachstumsmodells** werden mit dem Modellsystem HERMES ermittelt ausgehend von den Parametern des Klimamodells. Darüber hinaus liegen die Gegebenheiten der Landessortenversuche am jeweiligen Standort zugrunde.

Die Ergebnisse des Pflanzenwachstumsmodells beschreiben die Veränderung des Naturalertrages der an den jeweiligen Standorten untersuchten Kulturen (vgl. Tabelle 1, S. 25). Ausgehend von den Realisationen des Klimamodells und den 30 Jahre umfassenden Referenzperioden ergeben sich pro Untersuchungsszenario eine Vielzahl an *Einzelwerten*. Diese Grundgesamtheit wird anhand der Kennzahlen *Maximum*, *75%-Quantil*, *(arithmetischer) Mittelwert*, *25%-Quantil*, *10%-Quantil* und *Minimum* beschrieben. Der Mittelwert entspricht dem durchschnittlichen Ertragsniveau der Kultur. Die weiteren Kennzahlen geben einen Hinweis auf das Ertragsrisiko, indem sie die Spannweite zwischen größtem und kleinstem Wert bzw. dem oberen und unteren Viertel der Werte verdeutlichen. Zusätzlich veranschaulicht das 10%-Quantil die Wahrscheinlichkeit, einen Ertrag zu erzielen, der in 90 % der Fälle überschritten wird. Beim Vergleich verschiedener Szenarien kann folglich demjenigen das geringste Risiko zugeschrieben werden, das für das 10%-Quantil den größten Wert ausweist.

Die Modellergebnisse decken zwei Teilbereiche der vorliegenden Untersuchung ab. Zum einen verdeutlichen sie die Veränderung des Naturalertrages aufgrund der Änderung des Klimas. Für diesen Zweck wird der *Naturalertrag der beiden Untersuchungszeiträume 1981 – 2010 (Szenario – Vergangenheit, Sz-Ve) und 2020 – 2049 (Szenario – Zukunft, Sz-Zu)* miteinander verglichen.

Zum anderen resultieren die Ergebnisse aus der Modellierung von Bewässerungsmaßnahmen als Anpassung an die Klimaänderung. Die dargestellten Ergebnisse stellen in diesen Fall den

Naturalertrag ohne Bewässerung (Szenario – Zukunft, Sz-Zu) und mit Bewässerung (Szenario – Bewässerung, Sz-ZB) gegenüber, jeweils für den Untersuchungszeitraum 2020 – 2049.

Ergebnisse des **ökonomischen Modells** bauen auf den Naturalerträgen des Pflanzenwachstumsmodells auf. Darüber hinaus bezieht das Modell Preise und Kosten, die für die ökonomische Bewertung relevant sind, sowie Verteilungsinformationen, die den Einflussfaktoren zugrunde liegen, in die Betrachtung mit ein. Die Ergebnisse des Modells beruhen auf historischen Simulationsrechnungen. Maßgeblich für die ökonomische Bewertung ist das auf diese Weise errechnete Risikoprofil der jeweiligen Zielgröße (vgl. Abschnitt 2.4, S.33 ff.).

Zur Darstellung der Auswirkungen des Klimawandels wird als Zielgröße die monetäre Leistung einer Kultur herangezogen. *Aus dem Vergleich der beiden Untersuchungszeiträume (Szenario Vergangenheit, Sz-Ve und Szenario Zukunft, Sz-Zu) wird der Klimawandeleffekt deutlich.*

Die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen verdeutlicht die Zielgröße der anpassungskostenfreien Leistung. Neben der im Pflanzenwachstumsmodell beschriebenen Bewässerungsmaßnahme (Szenario Bewässerung, Sz-ZB) wird im ökonomischen Modell eine Ertragsversicherung modelliert (Szenario Versicherung, Sz-ZV). *Aus dem Vergleich dieser beiden Anpassungsmöglichkeiten mit der Situation ohne Anpassung (Szenario Zukunft, Sz-Zu) zeigt sich die Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen sowie deren Eignung zur Reduzierung des Risikos.*

In Anlehnung an die Ergebnisdarstellung im Pflanzenwachstumsmodell beschreiben die Kennzahlen *Maximum*, *75%-Quantil*, *(arithmetischer) Mittelwert*, *25%-Quantil*, *10%-Quantil* und *Minimum* das Risikoprofil der Zielgröße. Aus diesen Kennzahlen lässt sich auch Wirtschaftlichkeit und Risiko der Untersuchungsszenarien ableiten:

- Je größer der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung, desto besser die Wirtschaftlichkeit des betrachteten Szenarios. Der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung kann nur zunehmen, wenn im Durchschnitt die durch die Maßnahme entstehenden Kosten kleiner sind als die erzielbaren Erlöszuwächse.
- Je größer der Wert für das 10%-Quantil der anpassungskostenfreien Leistung, desto geringer ist das Risiko des jeweiligen Szenarios, da die Wahrscheinlichkeit niedriger Werte der Zielgröße geringer ist.

Zur Ableitung von Handlungsempfehlungen im ökonomischen Modell dient das *Sicherheitsäquivalent* der verschiedenen Szenarien als Entscheidungskriterium. Das Szenario mit dem größten Wert stellt die zu präferierende Alternative dar.

Die Modellergebnisse bilden die Grundlage zur Beantwortung der in der Zielsetzung beschriebenen Themenfelder (vgl. Abschnitt 1.2, S. 19). Abschnitt 3.1 stellt die Ergebnisse ausgehend von zwei unterschiedlichen Klimamodellansätzen gegenüber. Abschnitt 3.2 verdeutlicht den Einfluss des CO₂-Düngungseffektes sowie der Wasserspeicherfähigkeit eines Standortes als entscheidende ertragsbildende Faktoren. Zudem wird der Nutzen der Anpassung von Saat- und Erntezeitpunkten mit den kostenintensiven Maßnahmen einer Bewässerung bzw. einer Versicherung verglichen. Abschnitt 3.2.2 beschreibt das Auftreten und die Auswirkungen von Extremereignissen auf die Ertragsleistung. Die Ableitung von Handlungsempfehlungen erfolgt im Rahmen der Diskussion (vgl. Kapitel 4).

3.1 Vergleich verschiedener Klimamodellansätze

Um den mit Klimamodellierungen verbundenen **Unsicherheiten Rechnung zu tragen**, werden die Ergebnisse nachfolgend auf Basis zweier Klimamodellansätze dargestellt. Der statistische Klimamodellansatz *WETTREG* dient für die vorliegende Untersuchung als *Referenz*. Um eine *Einordnung der Bandbreite zu erwartender Ergebnisse* zu ermöglichen, werden die verschiedenen Modellergebnisse auf Grundlage des dynamischen Klimamodellansatzes *ENSEMBLE* gegenübergestellt. Dieser Ansatz baut auf einem Ensemble verschiedener globaler und regionaler Klimamodelle auf (vgl. Abschnitt 2.2, S. 26 ff.).

Abschnitt 3.1.1 stellt die Ergebnisse der Klimamodellansätze gegenüber. Darauf aufbauend ermittelt das Pflanzenwachstumsmodell die Ertragsentwicklung der verschiedenen Kulturen (Abschnitt 3.1.2). Abschließend erfolgt in Abschnitt 3.1.3 die ökonomische Bewertung der sich aus der Klimaänderung ergebenden Konsequenzen an den Untersuchungsstandorten. Die Gegenüberstellung der Ergebnisse auf den einzelnen Modellebenen ermöglicht eine Einschätzung, inwieweit sich Unterschiede in den Ergebnissen der beiden Klimamodellansätze in den Ergebnissen der nachfolgenden Modelle in unterschiedlichen Entwicklungen niederschlagen.

Eine graphische Übersicht über die Ausprägung der ENSEMBLE-Ergebnisse der einzelnen Modelle findet sich in Anhang I (Klimamodell), Anhang II (Pflanzenwachstumsmodell) sowie Anhang III und Anhang IV (Ökonomisches Modell). Die Ergebnisse der einzelnen Modelle

auf Grundlage des WETTREG-Ansatzes können dem Abschlussbericht des Vorgängerprojektes (vgl. FELBERMEIR 2013) entnommen werden.

Insgesamt liegen den Ergebnissen des ENSEMBLE-Ansatzes *acht verschiedene Klimamodelle* zugrunde. Ausgehend von den *30 Jahre umfassenden Untersuchungszeiträumen* beziehen sich die Ergebnisse der einzelnen Modelle dementsprechend auf *240 Einzelwerte*. Der WETTREG-Ansatz umfasst *10 gleich wahrscheinliche Realisationen*, so dass sich als Datengrundlage *300 Einzelwerte* ergeben.

3.1.1 Klimamodell

Bei der Betrachtung der Klimaparameter nimmt der *Kohlendioxidgehalt* der Atmosphäre eine Sonderstellung ein (Abschnitt 3.1.1.1). Aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften gilt er auf überregionaler Ebene und unabhängig vom konkreten Untersuchungsstandort.

Für die übrigen Parameter *Temperatur* (Abschnitt 3.1.1.2), *Niederschlag* (Abschnitt 3.1.1.3) und *Strahlung* (Abschnitt 3.1.1.4) lassen sich aus dem ENSEMBLE-Ansatz standortspezifische Durchschnittswerte für die beiden Referenzzeiträume ermitteln. Darüber hinaus erfolgt eine Gegenüberstellung der Veränderung der Parameter ausgehend von den beiden Klimamodellansätzen. Die Entwicklung der Klimaparameter an den Standorten am Beispiel eines durchschnittlichen Jahres kann dem Anhang I entnommen werden (vgl. Abbildung A_I. 1, S. 151 bis Abbildung A_I. 7, S. 157).

Abschnitt 3.1.1.5 fasst schließlich die Ergebnisse des Klimamodells kurz zusammen.

3.1.1.1 Kohlendioxid

Weder der ENSEMBLE- noch der WETTREG-Ansatz ermitteln Werte für den Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre. Deshalb wird als Datenquelle für diesen Klimaparameter das Projekt „ENSEMBLES – ENSEMBLE-based Predictions of Climate Changes and their Impacts“ (CNRM 2012a) herangezogen. Beide Klimamodellansätze, die in der vorliegenden Studie verwendet werden, bauen demzufolge auf denselben Werten für den Kohlendioxidgehalt auf.

Abbildung 6 beschreibt die Veränderung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes zwischen den beiden Referenzzeiträumen. In der Zeitscheibe 1981-2010 wird ein Wert von 363 ppm und in der Zeitscheibe 2020-2049 ein Wert von 465 ppm zugrunde gelegt (CNRM 2012b).

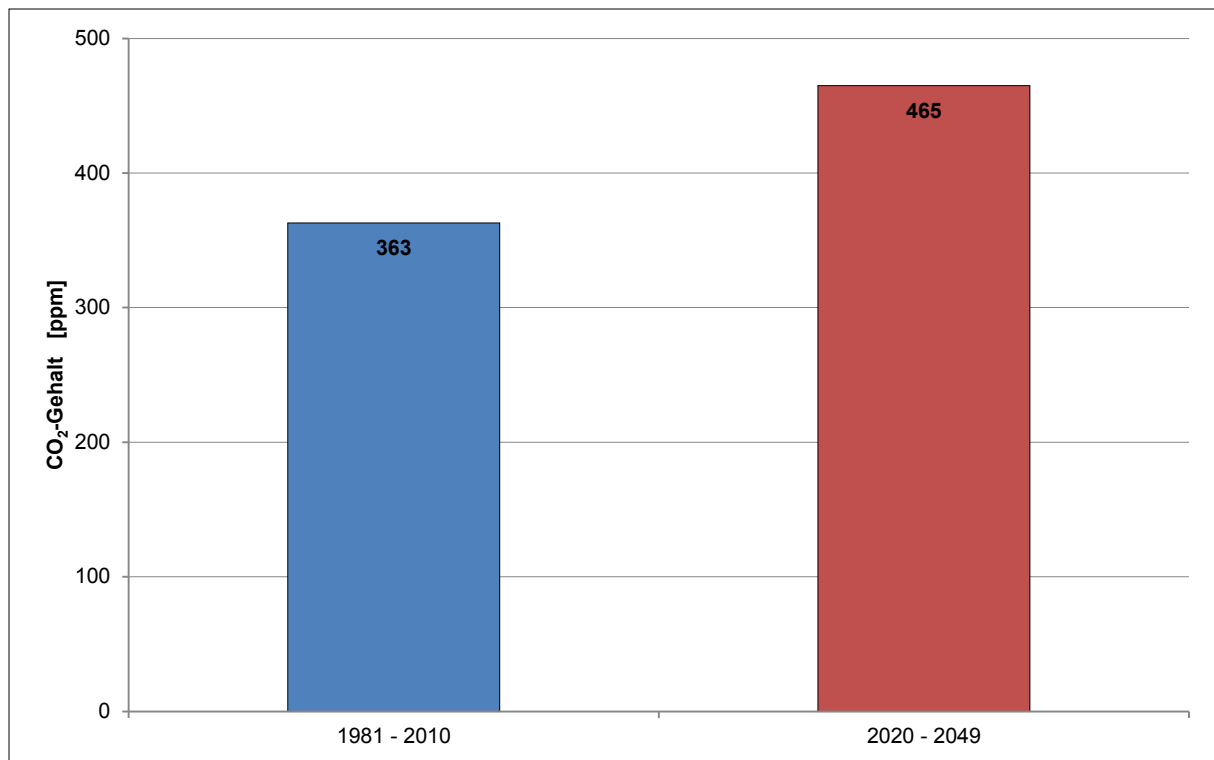


Abbildung 6: Veränderung des atmosphärischen CO₂-Gehaltes zwischen den beiden Referenzzeiträumen

(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von CNRM 2012b)

Die Zunahme des CO₂-Gehaltes um 102 ppm entspricht einem relativen Anstieg von 28 %. Dies gilt gleichermaßen für alle Untersuchungsstandorte.

3.1.1.2 Temperatur

Tabelle 10 enthält eine Übersicht über die Ergebnisse des Klimamodells für den Parameter Temperatur. Im Vergleich der beiden Referenzzeiträume nimmt die Jahresdurchschnittstemperatur über alle Standorte hinweg gleichmäßig um 0,9 °C bzw. 1,0 °C zu. Dies entspricht einer Veränderung zwischen 10 % und 13 %.

Tabelle 10: Jahresdurchschnittstemperatur in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten

(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

[°C]	Almesbach	Arnstein	Bieswang	Günzburg	Reith	Straßmoos	Wolfsdorf
1981 - 2010	7,5	8,6	7,7	8,2	8,4	8,2	7,9
2020 - 2049	8,5	9,5	8,7	9,2	9,4	9,2	8,8

Wie die Tabelle zeigt, ändert sich durch die Temperaturzunahme die Reihung der Standorte nicht, das heißt Arnstein bleibt der wärmste Standort und Almesbach der kühlsste. An allen Standorten erreicht der ENSEMBLE-Ansatz in den beiden Referenzzeiträumen niedrigere Werte als der WETTREG-Ansatz.

Ein Blick auf den Verlauf des Mittelwertes der Temperatur in einem durchschnittlichen Jahr (vgl. Abbildung A_I. 1, S. 151 bis Abbildung A_I. 7, S. 157) lässt erkennen, dass die stärksten Temperaturanstiege in den Winter- und Sommermonaten zu verzeichnen sind.

Abbildung 7 stellt die Änderung der Jahresdurchschnittstemperatur im Vergleich der beiden Klimamodellansätze gegenüber. Beide Ansätze führen zu steigenden Durchschnittstemperaturen im Vergleich der beiden Referenzzeiträume. Im WETTREG-Ansatz fallen die Zunahmen im Schnitt zwischen 2 % bis 4 % stärker aus als im ENSEMBLE-Ansatz.

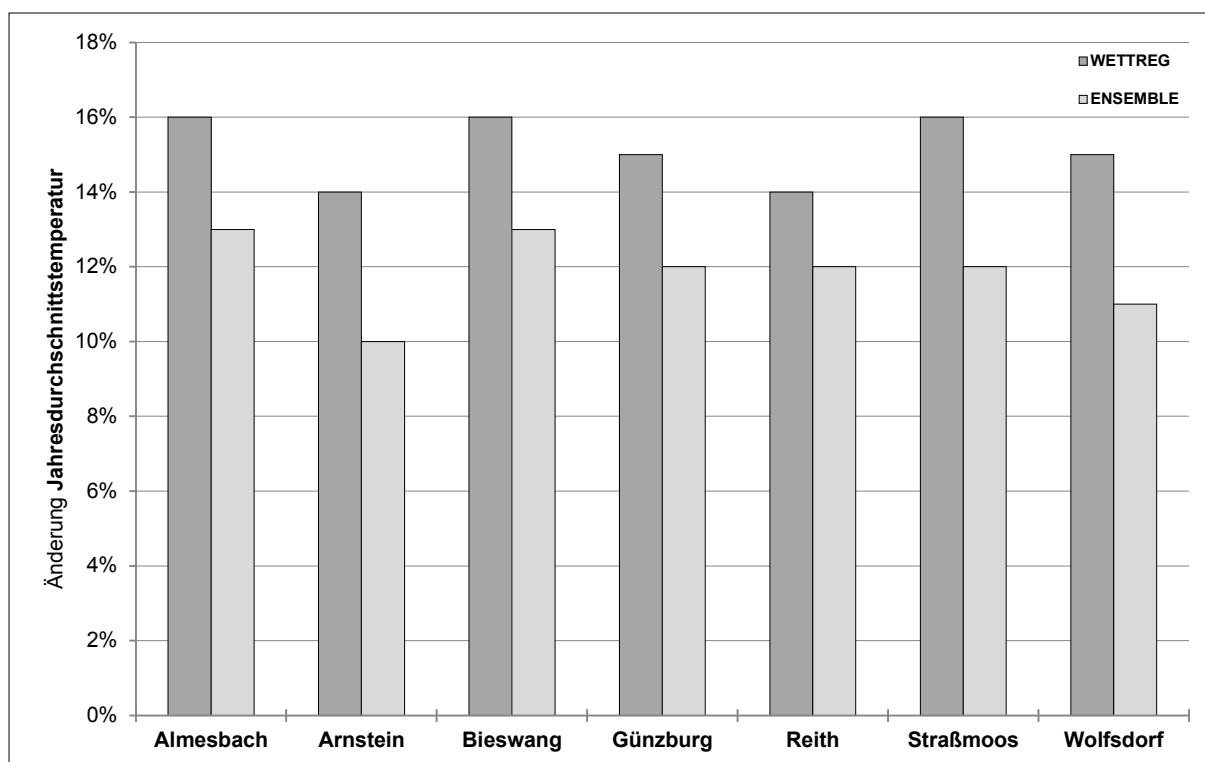


Abbildung 7: Veränderung der Jahresdurchschnittstemperatur zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Abbildung macht deutlich, dass sich Unterschiede bei der Temperatur zwischen den beiden Klimamodellansätzen nicht in der Richtung, sondern nur in der Höhe der Änderung ergeben.

3.1.1.3 Niederschlag

Die Ergebnisse des Klimamodells weisen beim Parameter Niederschlag über alle Standorte hinweg Zunahmen aus. Wie aus Tabelle 11 ersichtlich wird, nimmt die jährliche Niederschlagssumme im Vergleich der Referenzzeiträume zwischen 15 mm und 34 mm bzw. zwischen 2 % und 5 % zu. Am deutlichsten erhöht sich der Niederschlag am Standort Wolfsdorf, am geringsten an den niederschlagsreichsten Standorten Reith und Günzburg. Dabei gilt es zu beachten, dass im Referenzzeitraum 1981 - 2010 die Jahresniederschlagssumme an den Standorten Arnstein, Bieswang, Günzburg und Straßmoos im ENSEMBLE-Ansatz niedriger liegt wie im WETTREG-Ansatz. Im Zukunftszeitraum fällt an allen Standorten im ENSEMBLE-Ansatz mehr Niederschlag.

Tabelle 11: Niederschlagssumme in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten

(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

[mm]	Almesbach	Arnstein	Bieswang	Günzburg	Reith	Straßmoos	Wolfsdorf
1981 - 2010	729	629	779	795	888	731	751
2020 - 2049	755	650	800	810	906	751	785

Demgegenüber zeigt Abbildung 8, dass sich das Niederschlagsgeschehen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze gegenläufig verhält. Der WETTREG-Ansatz weist einen Rückgang des Niederschlages zwischen 3 % und 6 % aus, der ENSEMBLE-Ansatz Zunahmen zwischen 2 % und 5 %.

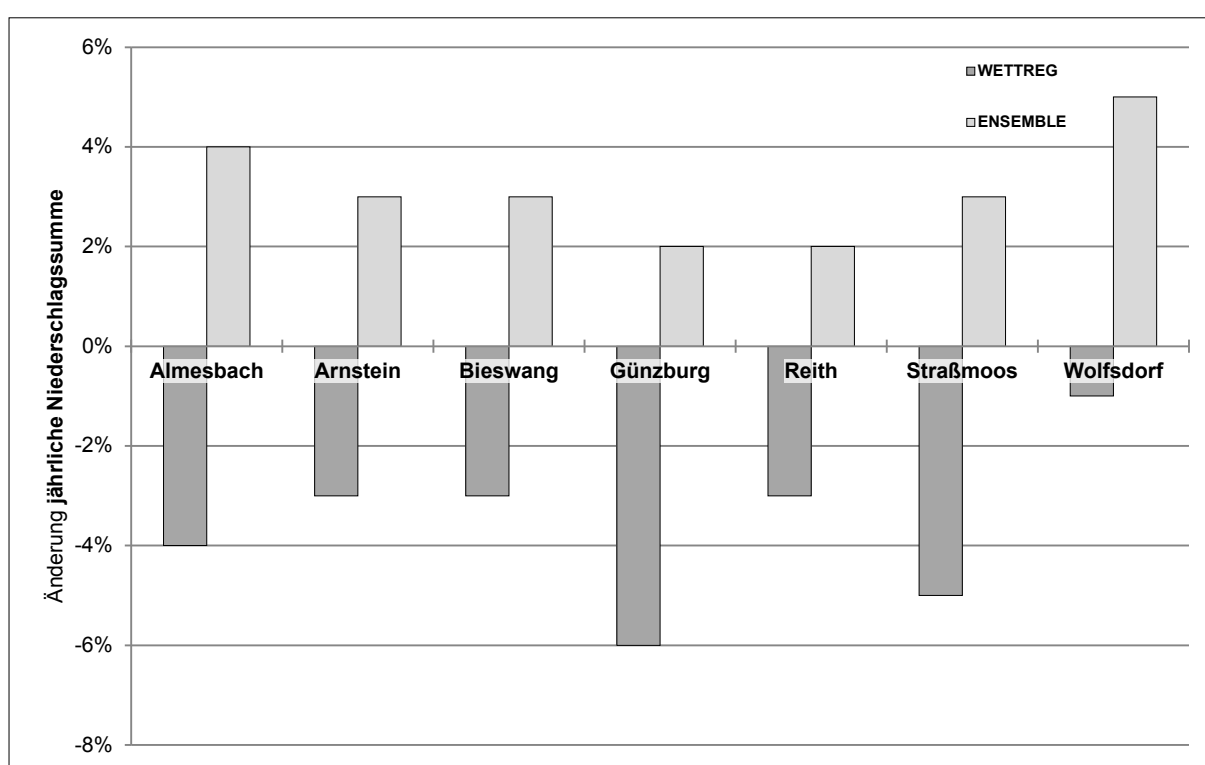


Abbildung 8: Veränderung der jährlichen Niederschlagssumme zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ein Blick auf den durchschnittlichen Verlauf eines Jahres im ENSEMBLE-Ansatz (vgl. Abbildung A_I. 1, S. 151 bis Abbildung A_I. 7, S. 157) zeigt, dass trotz des Anstieges der Jahressumme die Niederschläge in den Sommermonaten zurückgehen. Im Rest des Jahres steigen sie aber an, ganz besonders im Monat Dezember.

3.1.1.4 Strahlung

Beim Parameter Strahlung zeigen sich im Gegensatz zu Temperatur und Niederschlag an den meisten Standorten nur minimale Veränderungen (vgl. Tabelle 12). Im Vergleich der Zeiträume weist die jährliche Globalstrahlungssumme an allen Standorten einen Rückgang aus. Jedoch fällt dieser mit 1 % zwischen 6 kWh / m² bzw. 3 kWh / m² marginal aus.

Die Ausgangswerte liegen in der Zeitscheibe 1981 - 2010 im ENSEMBLE-Ansatz an allen Standorten über denen des WETTREG-Ansatzes. Im Zeitraum 2020 - 2049 ist dies nur noch an den Standorten Günzburg und Reith der Fall.

Tabelle 12: Globalstrahlungssumme in den beiden Referenzzeiträumen an den Untersuchungsstandorten
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

[kWh / m ²]	Almesbach	Arnstein	Bieswang	Günzburg	Reith	Straßmoos	Wolfsdorf
1981 - 2010	1104	1129	1148	1178	1185	1173	1100
2020 - 2049	1098	1125	1145	1174	1181	1169	1094

Abbildung 9 veranschaulicht auch bei diesem Parameter den Unterschied zum WETTREG-Ansatz. Während im WETTREG-Ansatz Zunahmen von 4 % bzw. 5 % zu verzeichnen sind, zeigt der ENSEMBLE-Ansatz Rückgänge, wenn auch in verschwindend geringem Umfang.

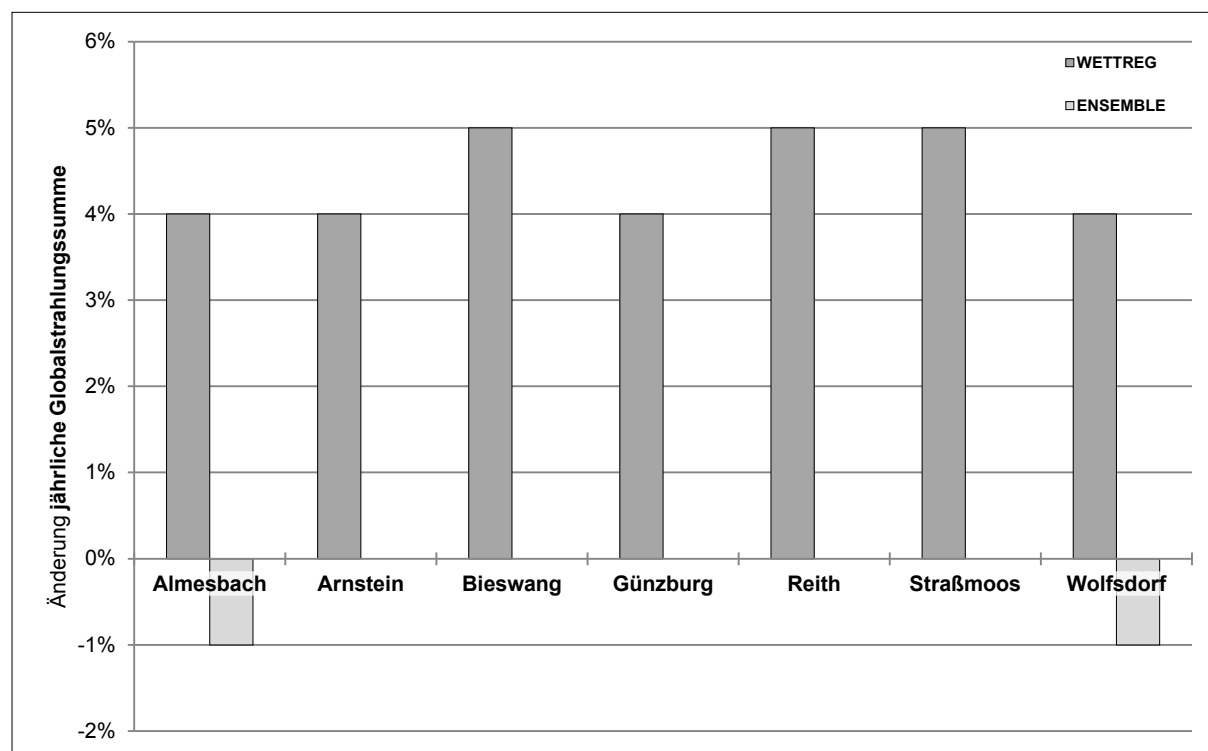


Abbildung 9: Veränderung der jährlichen Globalstrahlungssumme zwischen den beiden Referenzzeiträumen im Vergleich der beiden Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ein Blick auf den durchschnittlichen Verlauf eines Jahres (vgl. Abbildung A_I. 1, S. 151 bis Abbildung A_I. 7, S. 157) zeigt, dass die Strahlung an den meisten Standorten in allen Monaten außer Juli und August abnimmt.

3.1.1.5 Zwischenfazit

Für den **ENSEMBLE-Ansatz** lassen sich folgende Ergebnisse zusammenfassen:

- Der *Kohlendioxidgehalt* der Atmosphäre erhöht sich um 28 %. Diese Zunahme gilt in gleichem Umfang an allen Standorten.
- Je nach Standort steigt die *Jahresdurchschnittstemperatur* zwischen 10 % und 13 % an.
- Die jährliche *Niederschlagssumme* nimmt zwischen 2 % und 5 % zu. Gleichzeitig gehen jedoch die Niederschläge in den Sommermonaten zurück.
- Die jährliche *Globalstrahlungssumme* verringert sich marginal um 1 %.

Die Änderung der genannten Parameter hat auf die Reihung der Standorte bezüglich ihrer klimatischen Gegebenheiten in den beiden Referenzzeiträumen keinen Einfluss. *Arnstein bleibt der wärmste Standort, Reith der niederschlag- und strahlungsreichste. Auf der anderen Seite bleibt Almesbach der kühlsste Standort, Arnstein der trockenste und Wolfsdorf der strahlungsärmste.* Die deutlichste Differenzierung zwischen den Standorten ergibt sich beim Niederschlag. Am wenigsten Unterschiede zeigen sich, abgesehen vom Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, bei der Strahlung.

Im **Vergleich der Ergebnisse der beiden Klimamodellansätze** fallen die unterschiedlichen Entwicklungen bei *Niederschlag* und *Strahlung* ins Auge. Während beim WETTREG-Ansatz die Niederschläge abnehmen, steigen sie im ENSEMBLE-Ansatz an. Umgekehrt verhält es sich bei der Strahlung. Allerdings ändert sich in beiden Fällen der jeweilige Parameter generell nur in recht geringem Umfang, insbesondere bei der Strahlung. Demzufolge könnten unterschiedliche Ertragsentwicklungen im Vergleich des WETTREG- mit dem ENSEMBLE-Ansatz im Pflanzenwachstumsmodell begrenzt ausfallen.

Insgesamt betrachtet erreicht der WETTREG-Ansatz in der Zukunftszeitscheibe an allen Standorten die höheren *Temperaturrewerte*. Auch bei der *Strahlung* weist er mit Ausnahme der Standorte Günzburg und Reith die vorzüglicheren Werte aus. Nur beim *Niederschlag* erzielt der ENSEMBLE-Ansatz unter zukünftigen Klimabedingungen die besseren Ergebnisse.

Die Reihung der Standorte bezüglich ihrer klimatischen Gegebenheiten bleibt in den beiden Referenzzeiträumen zwischen den beiden Ansätzen erhalten.

3.1.2 Pflanzenwachstumsmodell

Ausgehend von den ENSEMBLE-Ergebnissen des Klimamodells beschreiben die folgenden Ausführungen die Ertragsentwicklung beim Winterweizen (Abschnitt 3.1.2.1), beim Mais (Abschnitt 3.1.2.2), bei Winter- (Abschnitt 3.1.2.3) und Sommergerste (Abschnitt 3.1.2.4), beim Winterraps (Abschnitt 3.1.2.5) sowie bei der Kartoffel (Abschnitt 3.1.2.6).

Die Kennzahlen arithmetischer Mittelwert und 10%-Quantil kennzeichnen die Höhe und Stabilität der Erträge in den verschiedenen Untersuchungsszenarien. Die Benennung der Szenarien bezüglich Auswirkungen der Klimaänderung sowie Wirkung von Anpassungsmaßnahmen kann Tabelle 3 (S. 39) entnommen werden.

Die nachfolgende Darstellung der Ergebnisse vergleicht die auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes modellierten Erträge mit denen des WETTREG-Ansatzes (vgl. FELBERMEIR 2013, S. 90 ff.). Im Fokus der Ausführungen steht deshalb nicht die spezifische Ertragsentwicklung im ENSEMBLE-Ansatz. Diese kann Anhang II entnommen werden (vgl. Abbildung A_II. 1, S. 158 bis Abbildung A_II. 6, S. 163). Vielmehr werden zunächst die Resultate der beiden Ansätze für Mittelwert und 10 %-Quantil im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) gegenübergestellt. Im nächsten Schritt wird die Veränderung der Kennzahlen in den Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätzen betrachtet. Hieraus ergibt sich zum einen die Entwicklung des Naturalertrages im ENSEMBLE-Ansatz. Zum anderen liegt ein Hauptaugenmerk auf Unterschieden bzw. Parallelen in den Ergebnissen der beiden Ansätze.

Abschließend fasst Abschnitt 3.1.2.7 die Resultate zusammen und interpretiert die ermittelten Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen dem WETTREG- und ENSEMBLE-Ansatz.

3.1.2.1 Winterweizen

Ein detaillierter Überblick über die Ertragsentwicklung des Winterweizens im ENSEMBLE-Ansatz findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_II. 1, S. 158). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE-Ansatz den entsprechenden Werten des WETTREG-Ansatzes gegenüber.

Tabelle 13 vergleicht Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Ansätze im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Beim durchschnittlichen Ertragsniveau weist der ENSEMBLE-Ansatz den kleinsten Wert für den Standort Arnstein aus. Dagegen erzielt der Standort Günzburg die besten Durchschnittserträge. Zudem erreicht nur der Standort Günzburg im ENSEMBLE-Ansatz einen höheren Wert als im WETTREG-Ansatz. In Bieswang und Reith gibt es kaum Unterschiede zwischen den beiden Ansätzen. An den Standorten Arnstein und Wolfsdorf erzielt der WETTREG-Ansatz die besseren Erträge.

Tabelle 13: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Winterweizen im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Arnstein		Bieswang		Günzburg		Reith		Wolfsdorf	
	<i>WETTREG</i>	<i>ENSEMBLE</i>	<i>WETTREG</i>	<i>ENSEMBLE</i>	<i>WETTREG</i>	<i>ENSEMBLE</i>	<i>WETTREG</i>	<i>ENSEMBLE</i>	<i>WETTREG</i>	<i>ENSEMBLE</i>
Mittelwert	66,9	62,7	81,5	81,4	79,4	84,0	78,1	77,0	74,9	72,9
10%-Quantil	38,4	34,5	67,8	48,4	71,8	59,1	62,3	50,6	50,3	48,8

Im Gegensatz zum Mittelwert zeigt der Wert für das 10%-Quantil eine eindeutigere Tendenz. Er befindet sich im ENSEMBLE-Ansatz stets unter dem Niveau des WETTREG-Ansatzes. Demzufolge liegt das Ertragsrisiko des Weizens im ENSEMBLE-Ansatz höher. Den niedrigsten Wert für das 10%-Quantil weist im ENSEMBLE-Ansatz der Standort Arnstein aus, den höchsten Günzburg.

Ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) beschreibt Abbildung 10 die Veränderung des Durchschnittsertrages in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

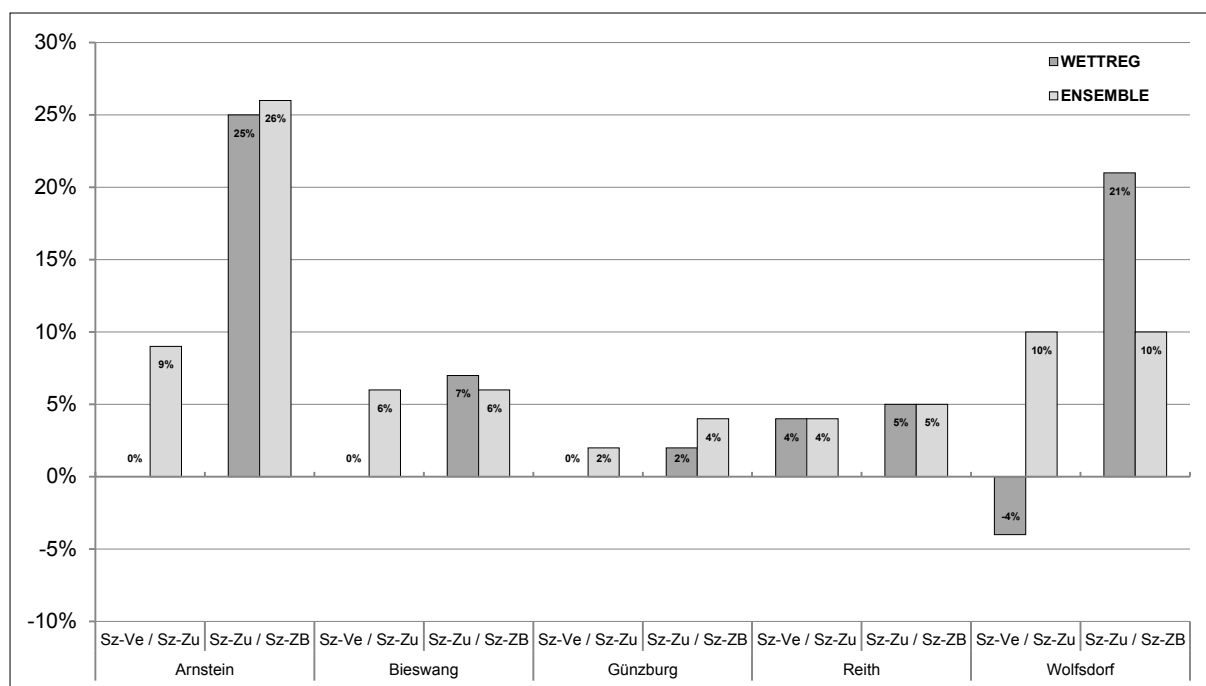


Abbildung 10: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Winterweizen im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Der Mittelwert nimmt im ENSEMBLE-Ansatz im Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) zwischen 2 % in Günzburg und 10 % in Wolfsdorf zu. Auch der Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) führt zu Ertragszunahmen im Bereich von 4 % in Günzburg und bemerkenswerten 26 % in Arnstein.

Abbildung 11 verdeutlicht die Veränderung des 10%-Quantils als Maßstab für das Ertragsrisiko an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze.

Diese Kennzahl vergrößert sich im ENSEMBLE-Ansatz im Vergleich der Referenzszenarien „*Vergangenheit*“ und „*Zukunft*“ (Sz-Ve / Sz-Zu) zwischen 6 % in Reith und 29 % in Bieswang. Mit der Durchführung der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) verringert sich das Ertragsrisiko nochmals in einem Umfang von 14 % in Günzburg und deutlichen 87 % in Arnstein.

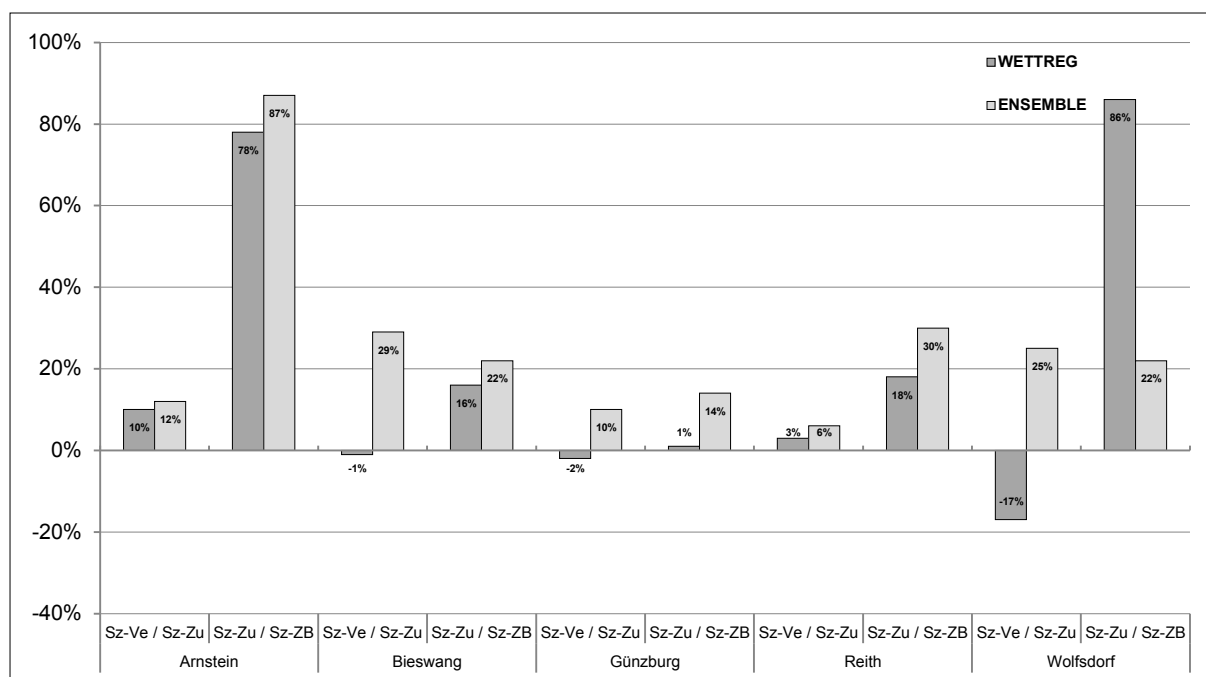


Abbildung 11: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Winterweizen im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Insgesamt ergeben sich im ENSEMBLE-Ansatz beim Winterweizen ausschließlich positive Entwicklungen, das heißt an allen Standorten verbessert sich sowohl die Höhe als auch die Stabilität der Erträge. Die Ertragszunahmen beim Wert für das 10%-Quantil fallen insgesamt kräftiger aus als beim Mittelwert.

Die **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** in Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigt, dass sich die Durchschnittserträge nur am Standort Wolfsdorf zwischen den *Referenzszenarien* (Sz-Ve / Sz-Zu) gegenläufig entwickeln: im WETTREG-Ansatz geht der Ertrag um 4 % zurück, im ENSEMBLE-Ansatz steigt er um 10 % an. In Arnstein, Bieswang und Günzburg (Sz-Ve / Sz-Zu) ändert sich der Ertrag im WETTREG-Szenario nicht, während er im ENSEMBLE-Ansatz zwischen 2 % und 9 % zulegt. Am Standort Reith verläuft die Ertragsentwicklung sowohl im Vergleich der Referenzszenarien (Sz-Ve / Sz-Zu) als auch im Vergleich mit und ohne *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) zwischen den beiden Ansätzen völlig identisch. Dagegen ergibt sich der deutlichste Unterschied im Umfang der Ertragsänderung am Standort Wolfsdorf (Sz-Zu / Sz-ZB).

Beim Wert für das 10%-Quantil weisen die Standorte Bieswang, Günzburg und Wolfsdorf beim Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) zwischen den Klimamodellansätzen gegenläufige Entwicklungen auf. Allerdings fallen die Abnahmen

im WETTREG-Ansatz mit 1 % bzw. 2 % in Bieswang bzw. Günzburg verhältnismäßig gering aus. Am auffälligsten sind die Unterschiede in Wolfsdorf. Darüber hinaus nimmt an diesem Standort beim Vergleich mit und ohne *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) das 10%-Quantil im WETTREG-Ansatz sehr viel stärker zu als im ENSEMBLE-Ansatz.

3.1.2.2 Mais

Bei der Ertragsentwicklung von Mais gilt es, zwischen **Silomais** (SM) an den Standorten Almesbach und Arnstein und **Körnermais** (KM) an den Standorten Günzburg, Reith und Straßmoos zu unterscheiden. Je nach Verwertungsform bezieht sich der dargestellte Ertrag auf einen anderen Bezugspunkt (vgl. Abschnitt 2.3, S. 30 ff.).

Ein Überblick über die Ertragsentwicklung beim Mais auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_II. 2, S. 159). Darauf Bezug nehmend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE- sowie im WETTREG-Ansatz gegenüber.

Tabelle 14 vergleicht Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Ansätze im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Beim Durchschnittsertrag ermittelt der ENSEMBLE-Ansatz für Silomais den höheren Wert am Standort Arnstein. Almesbach weist ein um 7 % geringeres Ertragsniveau aus. Körnermais erzielt den größten Wert in Reith. Dagegen erntet der Standort Straßmoos den niedrigsten Körnermaisertrag. Im Vergleich der beiden Ansätze liegt das durchschnittliche Ertragsniveau beim Silomais im ENSEMBLE-Ansatz um 8 % unter dem des WETTREG-Ansatzes. Beim Körnermais beläuft sich das Defizit im Schnitt auf 13 %.

Tabelle 14: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Mais im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Almesbach (SM)		Arnstein (SM)		Günzburg (KM)		Reith (KM)		Straßmoos (KM)	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	162,7	149,3	173,2	159,9	90,5	81,4	103,8	92,0	88,4	73,9
10%-Quantil	134,8	117,0	146,8	125,7	72,6	49,9	88,2	59,0	73,9	49,9

Auch beim Wert für das 10%-Quantil befindet sich der ENSEMBLE-Ansatz stets unter dem Niveau des WETTREG-Ansatzes. Beim Silomais beträgt der Unterschied im Schnitt 14 %, beim Körnermais beläuft er sich auf 32 %. Das höhere Ertragsrisiko resultiert folglich im ENSEMBLE-Ansatz.

Abbildung 12 verdeutlicht die Veränderung des Durchschnittsertrages in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

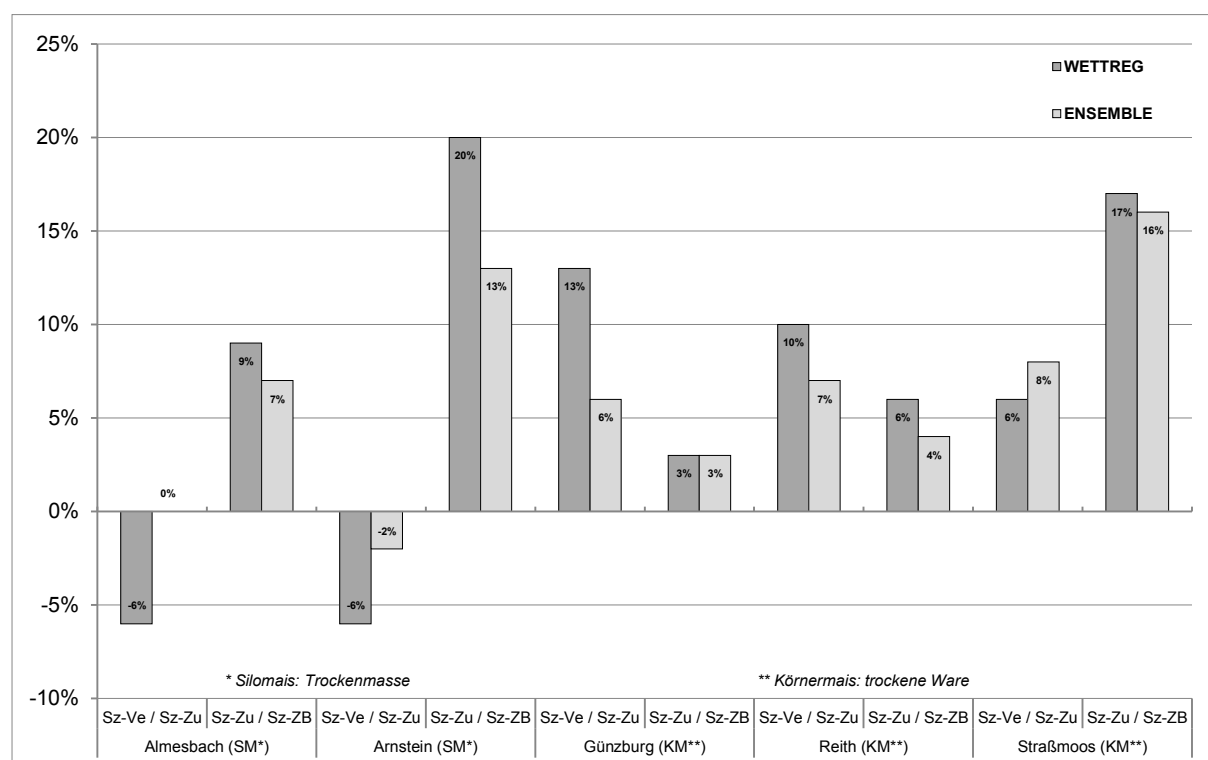


Abbildung 12: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Mais im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Der Durchschnittsertrag ändert sich im ENSEMBLE-Ansatz im Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) beim Silomais in Almesbach nicht, in Arnstein geht er um 2 % zurück. Dagegen ergeben sich beim Körnermais durchwegs zunehmende Erträge, die zwischen 6 % in Günzburg und 8 % in Straßmoos liegen (Sz-Ve / Sz-Zu). Mit Hilfe der *Bewässerung* steigen die Erträge sowohl bei Silo- als auch bei Körnermais an (Sz-Zu / Sz-ZB). Die Spannweite reicht von 3 % in Günzburg bis 16 % in Straßmoos.

Abbildung 13 beschreibt die Veränderung des Wertes für das 10%-Quantil im Vergleich der Klimamodellansätze und Untersuchungsszenarien.

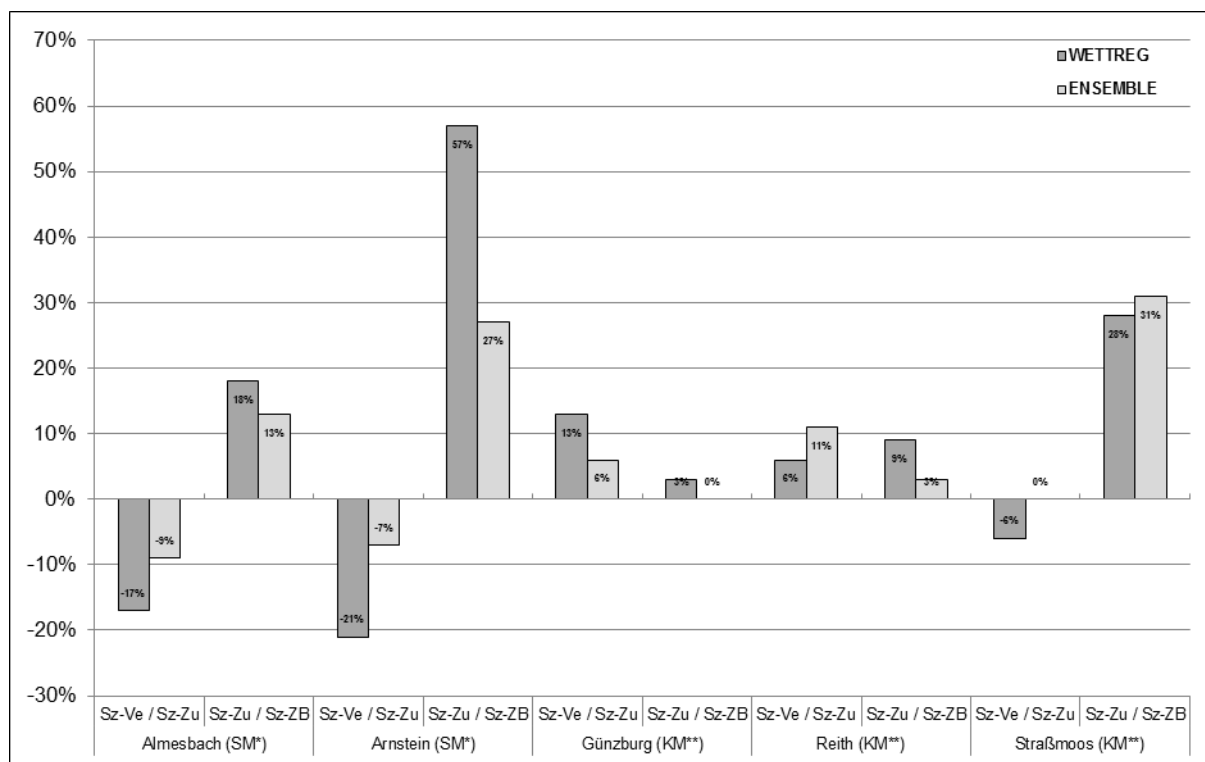


Abbildung 13: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Mais im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Das 10%-Quantil zeichnet im ENSEMBLE-Ansatz ein ähnliches Bild wie der Mittelwert. Beim Silomais kommt es beim Vergleich zwischen den Referenzszenarien „*Vergangenheit*“ und „*Zukunft*“ (Sz-Ve / Sz-Zu) zu Verschlechterungen. Dagegen verbessert sich beim Körnermais das Ertragsrisiko bzw. ändert es sich am Standort Straßmoos nicht. Die *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) verringert das Ertragsrisiko an allen Standorten außer Günzburg. Hier zeigt die Anpassungsmaßnahme keine Wirkung.

Bei der **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** (vgl. Abbildung 12 und Abbildung 13) ergeben sich bei den mittleren Erträgen keine gegenläufigen Entwicklungen. Am ehesten zeigt sich ein Unterschied beim Silomais in Almesbach: während im WETTREG-Ansatz der Durchschnittsertrag um 6 % abnimmt, verändert er sich im ENSEMBLE-Ansatz zwischen den *Referenzszenarien* (Sz-Ve / Sz-Zu) nicht. Insgesamt gehen die Erträge beim Silomais im WETTREG-Ansatz deutlicher zurück als im ENSEMBLE-Ansatz (Sz-Ve / Sz-Zu). Dagegen kann der Körnermais im WETTREG-Ansatz deutlicher zulegen, mit Ausnahme des Standortes Straßmoos. Auch die *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) zeigt im WETTREG-Ansatz die größeren Ertragszuwächse. Nur am Standort Günzburg resultieren in beiden Ansätzen gleich hohe Ertragszunahmen.

Die Situation beim 10%-Quantil ähnelt der beim Mittelwert: gegenläufige Entwicklungen ergeben sich nicht. Allerdings zeigt der ENSEMBLE-Ansatz beim Körnermais in Günzburg (Sz-Zu / Sz-ZB) bzw. in Straßmoos (Sz-Ve / Sz-Zu) keine Änderung, wohingegen der Quantilswert im WETTREG-Ansatz zunimmt bzw. zurückgeht.

3.1.2.3 Wintergerste

Die Entwicklung des Naturalertrages der Wintergerste gibt einen umfassenden Überblick über die Ertragsleistung der Kultur an den verschiedenen Untersuchungsstandorten auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes (vgl. Abbildung A_II. 3, S. 160). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im Vergleich zu den Ergebnissen des WETTREG-Ansatzes dar.

Tabelle 15 beschreibt Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Klimamodellansätze im *Referenzszenario „Vergangenheit“* (Sz-Ve).

Beim durchschnittlichen Ertragsniveau erzielt im ENSEMBLE-Ansatz der Standort Bieswang die höchsten Werte, während die geringsten Erträge in Almesbach geerntet werden. Dennoch weist an diesem Standort der ENSEMBLE-Ansatz einen höheren Wert aus als der WETTREG-Ansatz. An den übrigen Standorten ist das Gegenteil der Fall: die ENSEMBLE-Werte liegen im Schnitt um 5 % unter den Durchschnittserträgen des WETTREG-Ansatzes.

Die Situation beim Wert für das 10%-Quantil stellt sich genauso dar wie beim Mittelwert: im ENSEMBLE-Ansatz erzielt Bieswang den größten Wert, Arnstein den kleinsten. Wiederrum übertrifft jedoch nur der Standort Arnstein im ENSEMBLE-Ansatz das Resultat des WETTREG-Ansatzes. Die übrigen Standorte erreichen im Schnitt im ENSEMBLE-Ansatz 8 % niedrigere Werte, also ein höheres Ertragsrisiko, als der WETTREG-Ansatz.

Tabelle 15: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Wintergerste im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Almesbach		Arnstein		Bieswang		Günzburg		Straßmoos		Wolfsdorf	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	41,1	57,4	70,6	65,9	90,7	82,3	82,5	76,9	63,1	61,9	66,6	65,3
10%-Quantil	27,3	33,5	46,8	45,6	65,8	59,7	72,6	59,0	47,5	44,0	49,7	47,8

Ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) zeigt Abbildung 14 die Entwicklung des Durchschnittsertrages sowie Abbildung 15 die Veränderung des 10%-Quantils der Wintergerste im Vergleich der Klimamodellansätze und Untersuchungsszenarien.

Im ENSEMBLE-Ansatz kommt es beim Mittelwert im Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) zu Ertragszunahmen zwischen 9 % in Almesbach und 18 % in Bieswang. Der Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) bewirkt weitere Ertragsanstiege zwischen 8 % in Günzburg und 32 % in Arnstein.

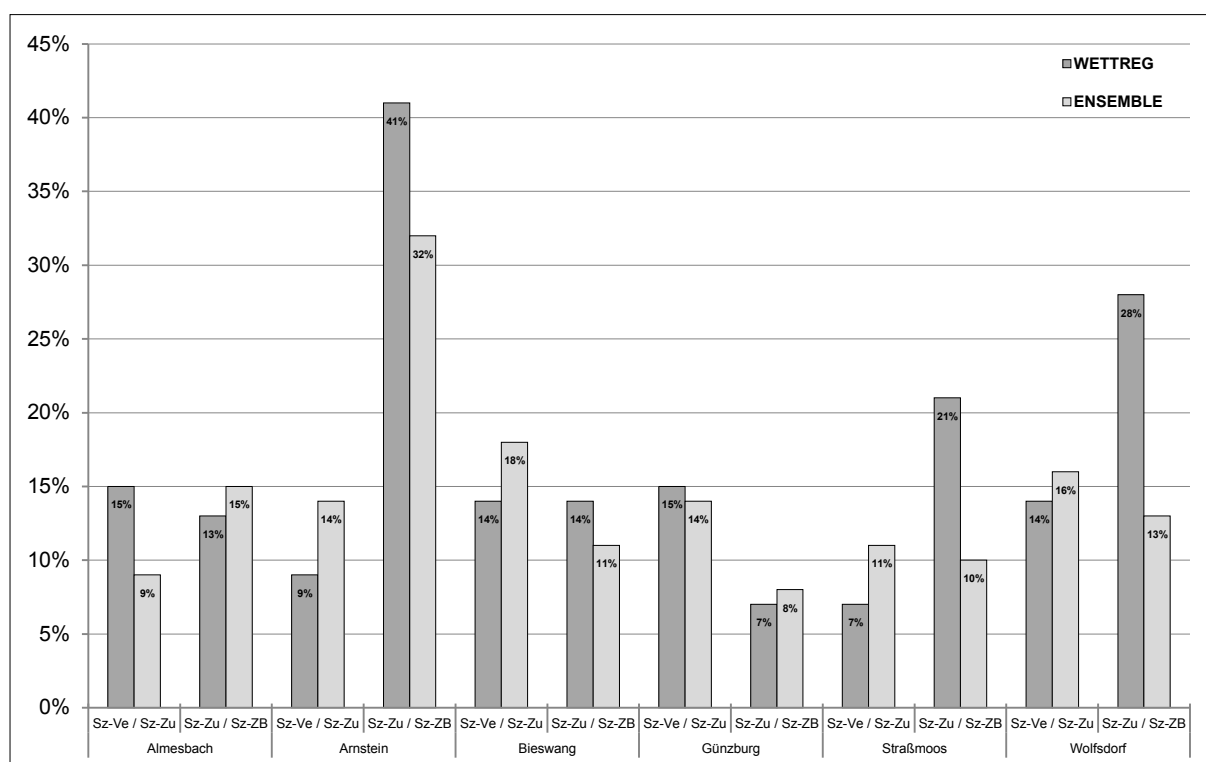


Abbildung 14: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Wintergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Beim Wert für das 10%-Quantil zeigt Abbildung 15 im ENSEMBLE-Ansatz im Vergleich der Referenzszenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ (Sz-Ve / Sz-Zu) Zunahmen im Bereich von 8 % in Straßmoos und 22 % in Wolfsdorf. Aus der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) resultieren Ertragssteigerungen zwischen 13 % in Wolfsdorf und 57 % in Arnstein.

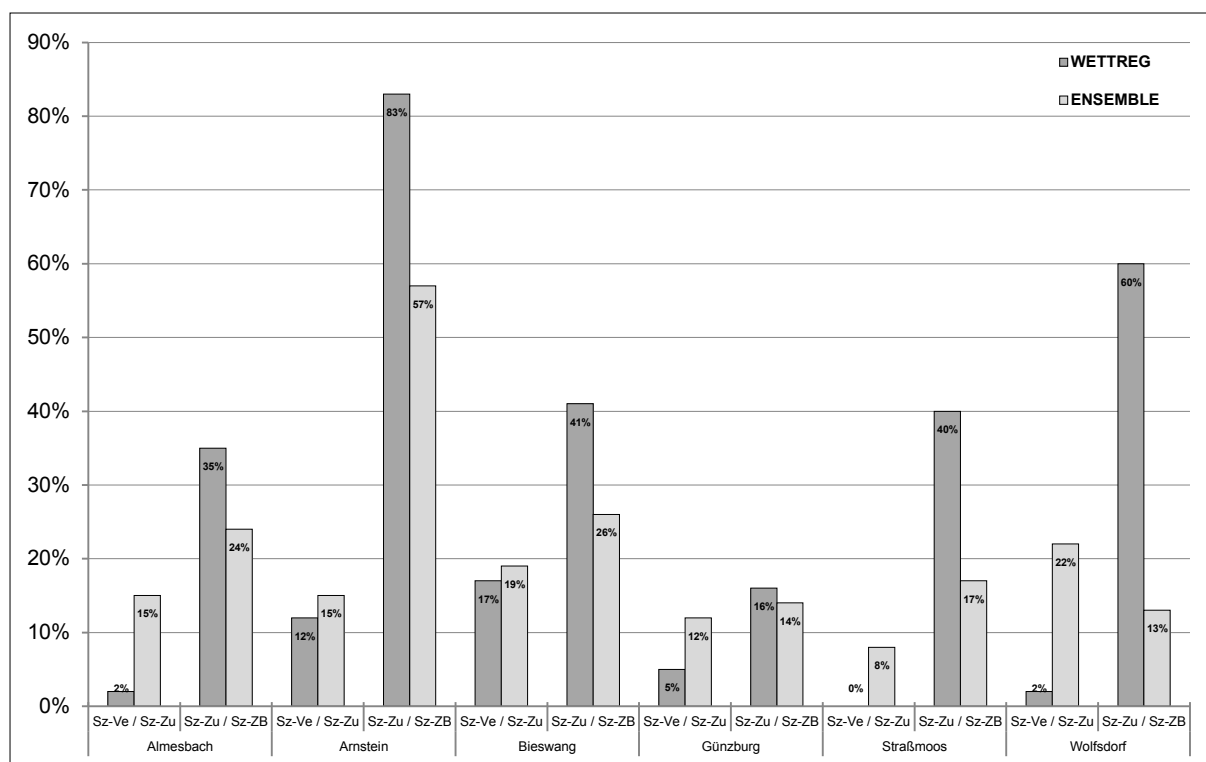


Abbildung 15: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Wintergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Die **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** (vgl. Abbildung 14 und Abbildung 15) zeichnet bei der Wintergerste für die Veränderung des Durchschnittsertrages ein relativ einheitliches Bild. Gegenläufige Entwicklungen gibt es keine. Dennoch fällt auf, dass an den Standorten je nach Untersuchungsszenario einmal der WETTREG-Ansatz und einmal der ENSEMBLE-Ansatz zum besseren Ergebnis führt. So weist in Almesbach und Günzburg beim Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen (Sz-Ve / Sz-Zu) der WETTREG-Ansatz die höheren Werte aus. Beim Einsatz der Bewässerung (Sz-Zu / Sz-ZB) erzielt der ENSEMBLE-Ansatz die besseren Resultate. An den übrigen Standorten verhält es sich genau umgekehrt.

Für das 10%-Quantil gilt das gleich wie beim Mittelwert: gegenläufige Entwicklungen ergeben sich nicht. Abermals weist jeweils am selben Standort im einen Untersuchungsszenario der WETTREG-Ansatz die höheren Werte aus und im anderen Szenario der ENSEMBLE-Ansatz.

3.1.2.4 Sommergerste

Ein detaillierter Überblick über die Ertragsentwicklung der Sommergerste im ENSEMBLE-Ansatz findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_II. 4, S. 161). Darauf aufbauend stellen die

nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE-Ansatz den entsprechenden Werten des WETTREG-Ansatzes gegenüber.

Tabelle 16 vergleicht Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Ansätze im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Beim durchschnittlichen Ertragsniveau weist der ENSEMBLE-Ansatz den größten Wert am Standort Arnstein aus. Dagegen wird der niedrigste Ertrag in Almesbach realisiert. Mit Ausnahme des Standortes Straßmoos übertreffen die Durchschnittserträge im ENSEMBLE-Ansatz die Ergebnisse des WETTREG-Ansatzes, wenngleich der Unterschied an den Standorten Almesbach und Arnstein gering ausfällt.

Tabelle 16: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Sommergerste im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Almesbach		Arnstein		Bieswang		Günzburg		Straßmoos	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	43,4	43,5	60,3	61,1	54,6	59,3	49,6	58,5	56,3	54,8
10%-Quantil	27,7	23,3	52,2	46,3	47,0	45,5	42,4	45,5	45,4	39,6

Der Wert für das 10%-Quantil liegt im ENSEMBLE-Ansatz an allen Standorten, außer in Günzburg, unter dem Niveau des WETTREG-Ansatzes. Den höchsten Wert für das 10%-Quantil erreicht im ENSEMBLE-Ansatz der Standort Arnstein. Der niedrigste Wert kommt in Almesbach zustande.

Ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) beschreibt Abbildung 16 die Veränderung des Durchschnittsertrages in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

Das durchschnittliche Ertragsniveau nimmt im ENSEMBLE-Ansatz im Vergleich *vergängerer und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) an den Standorten Bieswang (- 5 %) und Günzburg (- 7 %) ab. An den übrigen Standorten verändert er sich nicht. Der Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) führt in Almesbach (3 %), Arnstein (1 %) und Straßmoos (4 %) zu steigenden Erträgen. In Bieswang und Günzburg zeigt die Anpassungsmaßnahme keine Wirkung.

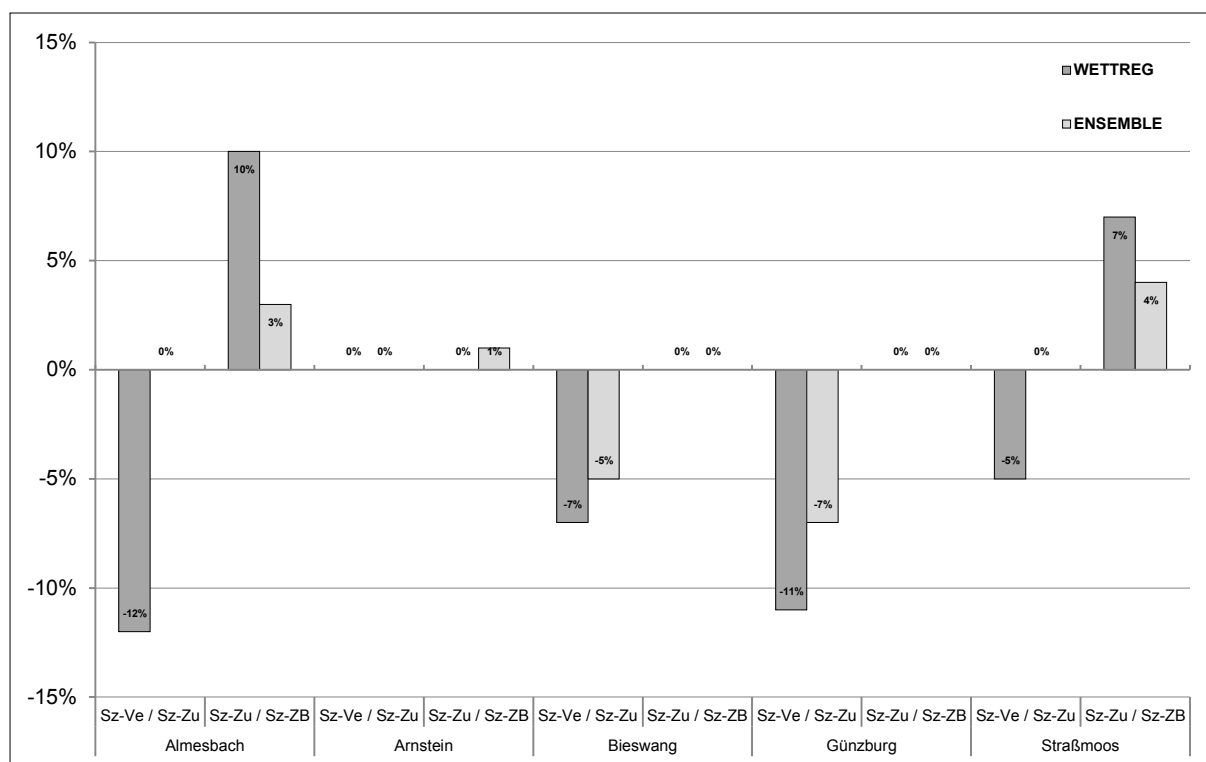


Abbildung 16: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Sommergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Abbildung 17 verdeutlicht die Veränderung des 10%-Quantils als Maßstab für das Ertragsrisiko an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze.

Im ENSEMBLE-Ansatz nimmt das 10%-Quantil zwischen den Referenzszenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ (Sz-Ve / Sz-Zu) an den Standorten Almesbach (11 %) und Arnstein (4 %) zu, das heißt das Risiko sinkt. Im Gegensatz dazu geht der Quantilswert an den übrigen Standorten zwischen 8 % und 18 % zurück.

Bewässerungsmaßnahmen (Sz-Zu / Sz-ZB) erhöhen das 10%-Quantil um 2 % in Almesbach und 4 % in Arnstein. Eine deutliche Zunahme resultiert am Standort Straßmoos in Höhe von 23 %. Dagegen zeigt die Bewässerung am Standort Bieswang und Günzburg keine Wirkung.

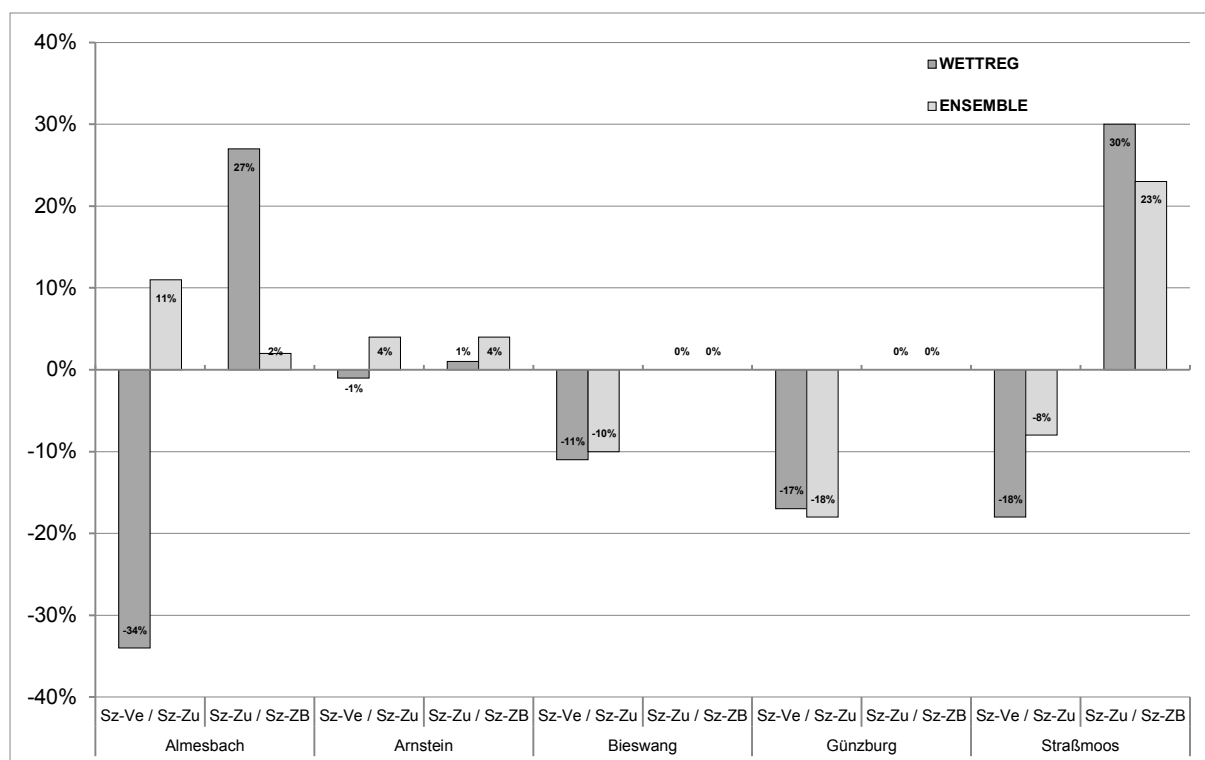


Abbildung 17: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Sommergerste im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Die **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** in Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigt bei den Durchschnittserträgen keine gegenläufigen Entwicklungen. Jedoch verändern sich im Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen (Sz-Ve / Sz-Zu) die Erträge im ENSEMBLE-Ansatz an den Standorten Almesbach und Straßmoos nicht, während sie dort im WETTREG-Ansatz zurückgehen.

Beim Wert für das 10%-Quantil fallen abermals im Vergleich der Referenzszenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ (Sz-Ve / Sz-Zu) gegenläufige Entwicklungen auf. In Almesbach und Arnstein nehmen die Werte im WETTREG-Ansatz ab, wohingegen sie im ENSEMBLE-Ansatz ansteigen.

3.1.2.5 Winterraps

Die Entwicklung des Naturalertrages von Winterraps gibt einen umfassenden Überblick über die Ertragsleistung der Kultur an den verschiedenen Untersuchungsstandorten auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes (vgl. Abbildung A_II. 5, S. 162). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im Vergleich zu den Ergebnissen des WETTREG-Ansatzes dar.

Tabelle 17 beschreibt Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Klimamodellansätze im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve). Beim durchschnittlichen Ertragsniveau erzielt im ENSEMBLE-Ansatz der Standort Günzburg die höchsten Werte, während die geringsten Erträge in Wolfsdorf realisiert werden. Insgesamt liegen die Werte des ENSEMBLE-Ansatzes im Mittel um 4 % unter den Werten des WETTREG-Ansatzes.

Tabelle 17: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages von Wintertraps im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Arnstein		Günzburg		Reith		Wolfsdorf	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	38,0	36,2	47,6	47,0	44,5	42,5	37,4	34,8
10%-Quantil	32,3	26,6	45,0	38,8	41,3	34,3	31,1	26,2

Auch beim Wert für das 10%-Quantil weist der ENSEMBLE-Ansatz im Schnitt um 16 % niedrigere Werte als der WETTREG-Ansatz aus. Den geringsten Quantilswert im ENSEMBLE-Ansatz erzielt der Standort Wolfsdorf, den größten der Standort Günzburg.

Mit Blick auf das Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) zeigt Abbildung 18 die Veränderung des durchschnittlichen Raps-ertrages im Vergleich der Klimamodellansätze und Untersuchungsszenarien.

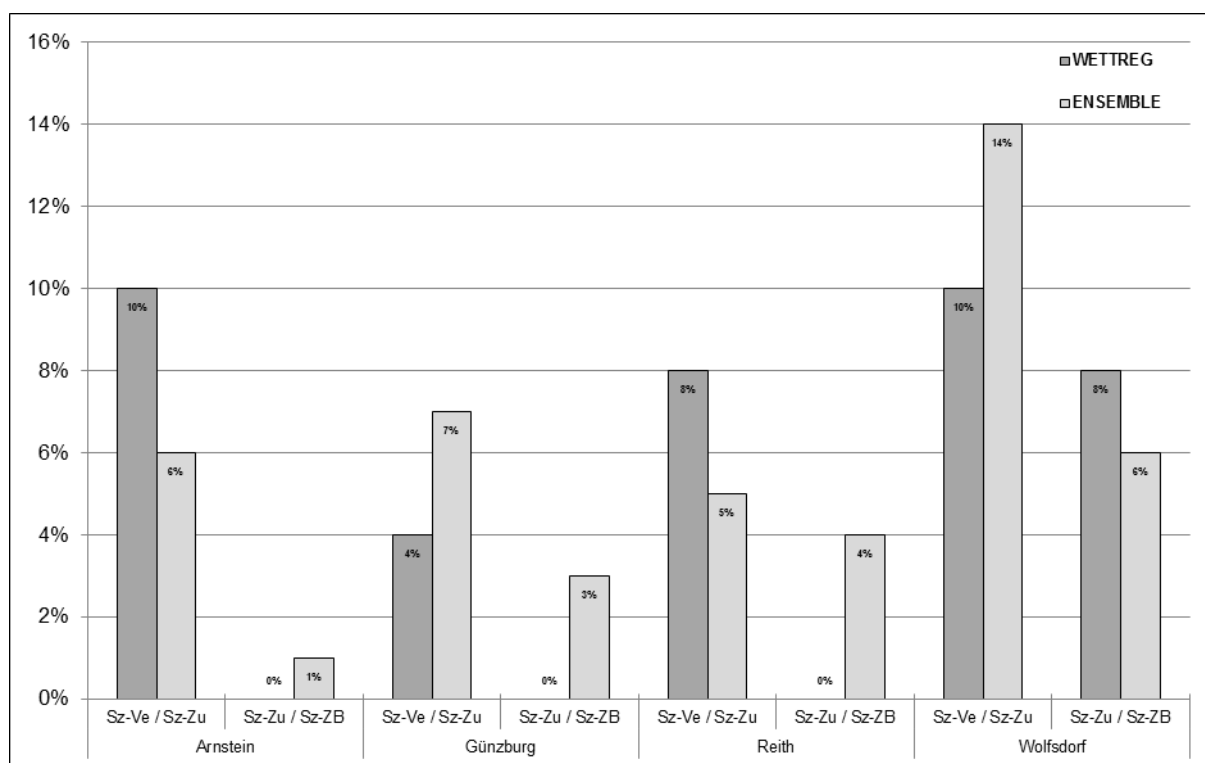


Abbildung 18: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus von Wintertraps im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Im ENSEMBLE-Ansatz kommt es beim Mittelwert im Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) zu Ertragszunahmen zwischen 5 % in Reith und 14 % in Wolfsdorf. Der Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) bewirkt weitere Ertragsanstiege zwischen 1 % in Arnstein und 6 % in Wolfsdorf.

Beim Wert für das 10%-Quantil zeigt Abbildung 19 im ENSEMBLE-Ansatz bei der Gegenüberstellung der Referenzszenarien „*Vergangenheit*“ und „*Zukunft*“ (Sz-Ve / Sz-Zu) Zunahmen im Bereich von 9 % in Reith und 26 % in Wolfsdorf. Aus der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) resultieren Ertragssteigerungen zwischen 3 % in Arnstein und 10 % in Wolfsdorf.

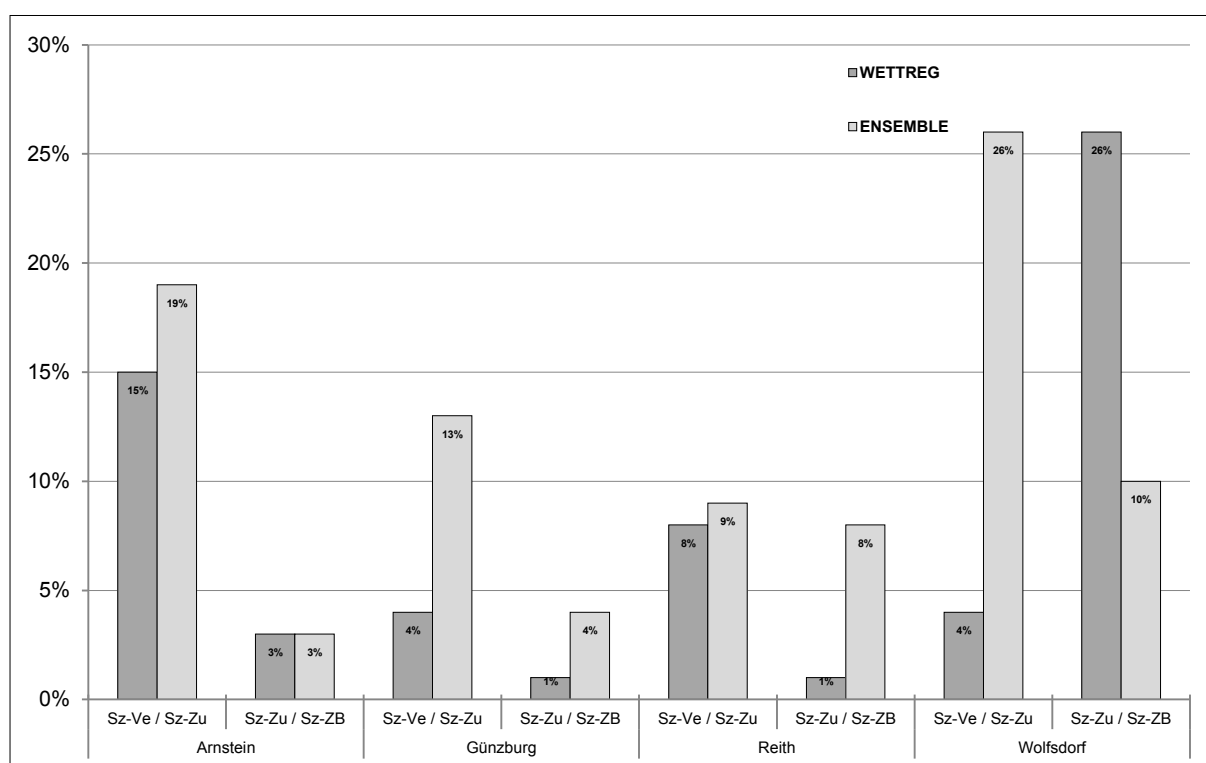


Abbildung 19: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages von Winterraps im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Die **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** zeigt bei Winterraps an allen Standorten die bessere Ausgangssituation im WETTREG-Ansatz (vgl. Tabelle 17). Sowohl beim Mittelwert (vgl. Abbildung 18) als auch beim Wert für das 10%-Quantil (vgl. Abbildung 19) ergeben sich zwischen den beiden Ansätzen keine gegenläufigen Entwicklungen. Jedoch führt die Bewässerung (Sz-Zu / Sz-ZB) im WETTREG-Ansatz beim Mittelwert nur in Wolfsdorf zu einer Verbesserung, während das im ENSEMBLE-Ansatz an allen Standorten der Fall ist. Beim Wert für das 10%-Quantil zeigen sich am Standort Wolfsdorf deutliche Unterschiede im Umfang der Zunahmen in den Untersuchungsszenarien.

3.1.2.6 Kartoffel

Die Ertragsentwicklung der Kartoffel am Standort Straßmoos auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes kann dem Anhang entnommen werden (vgl. Abbildung A_II. 6, S. 163).

Tabelle 18 stellt die Erträge im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve) für die beiden Klimamodellansätze gegenüber. Beim Mittelwert liegen die Werte des ENSEMBLE-Ansatzes um 8 %, beim 10 %-Quantil sogar um 22 % unter denen des WETTREG-Ansatzes.

Tabelle 18: Mittelwert und 10%-Quantil des Naturalertrages der Kartoffel im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Ertrag [dt / ha]	Straßmoos	
	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	145,5	133,7
10%-Quantil	106,8	83,6

Mit Blick auf den Durchschnittsertrag zeigt Abbildung 20 dessen Entwicklung im Vergleich der beiden Klimamodellansätze. Die *Veränderung der Klimaparameter* (Sz-Ve / Sz-Zu) führt im ENSEMBLE-Ansatz zu einem Ertragsanstieg von 3 %. Durch die *Berechnung* (Sz-Zu / Sz-ZB) kommen weitere 10 % hinzu.

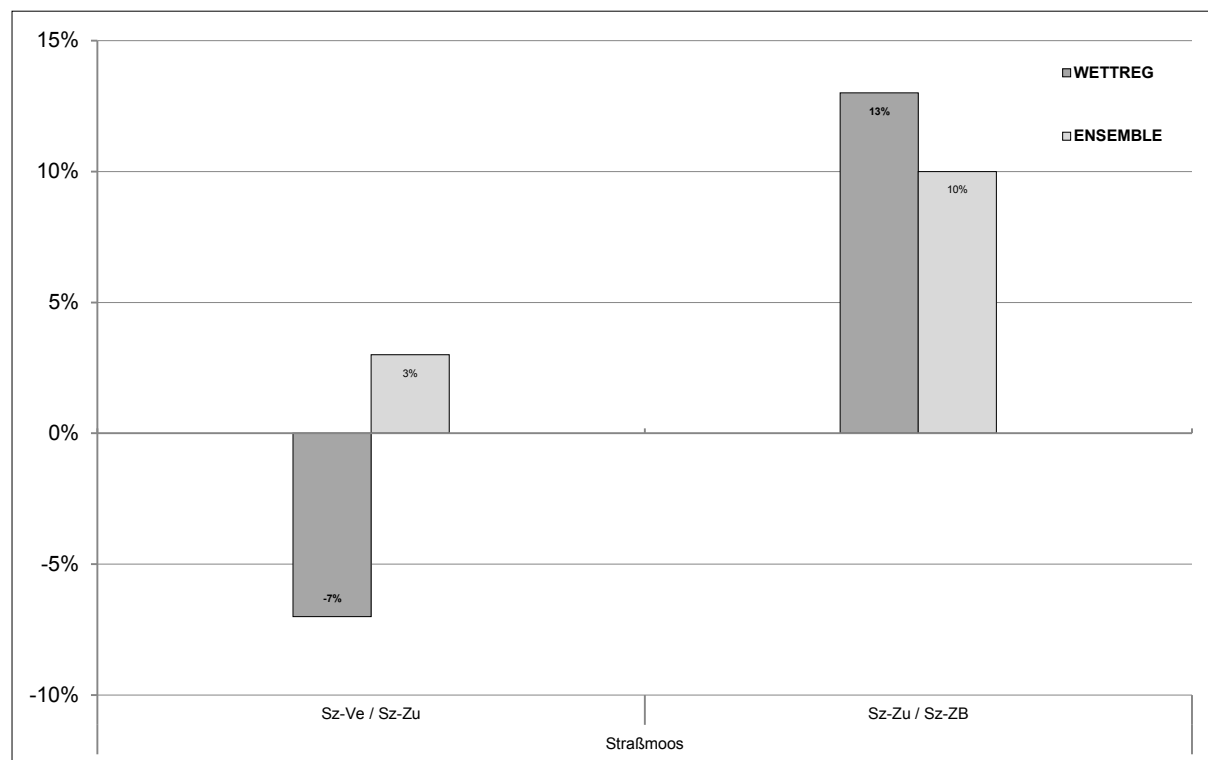


Abbildung 20: Veränderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus der Kartoffel im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Ein ähnliches Bild wie beim Mittelwert ergibt sich beim 10%-Quantil (vgl. Abbildung 21). Aus dem Vergleich der Referenzszenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ (Sz-Ve / Sz-Zu) resultiert im ENSEMBLE-Ansatz eine Zunahme von 6 %. Die *zusätzlichen Wassergaben* (Sz-Zu / Sz-ZB) bewirken eine Ertragssteigerung von 32 %.

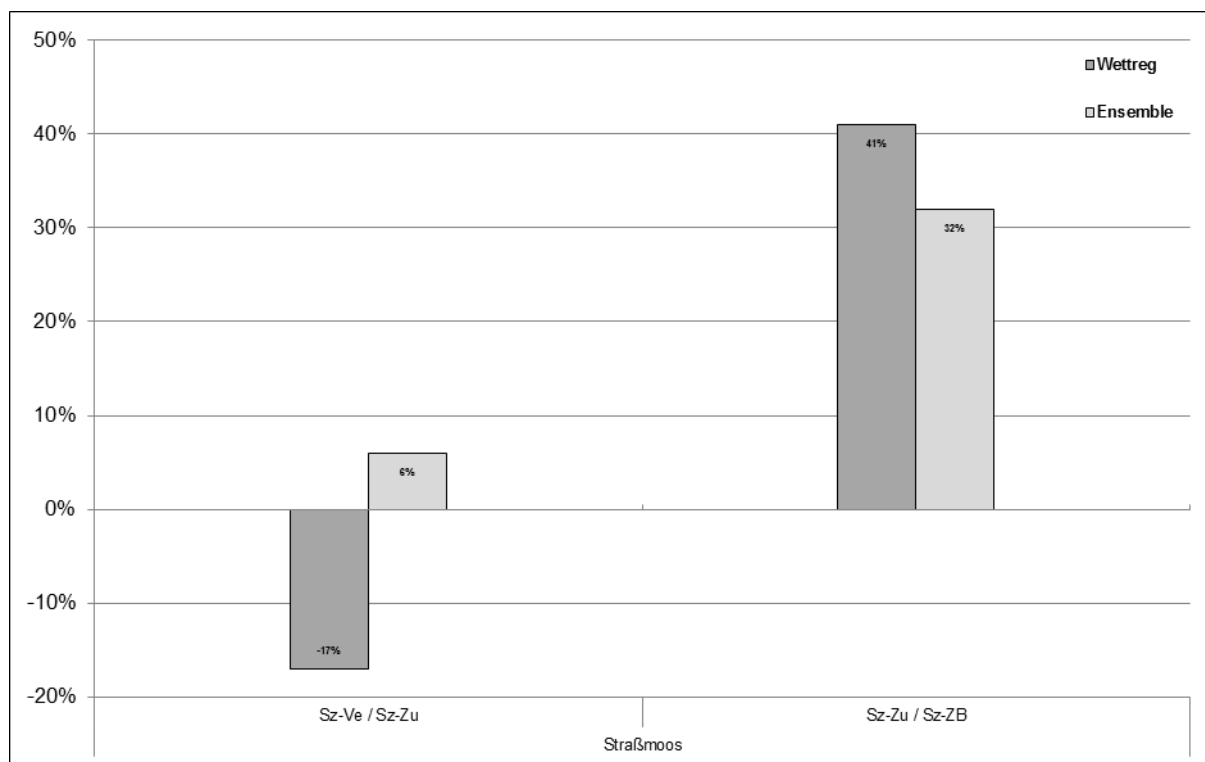


Abbildung 21: Veränderung des 10%-Quantils des Naturalertrages der Kartoffel im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigen Darstellung)

Die **Gegenüberstellung der beiden Klimamodellansätze** zeigt bei der Kartoffel am Standort Straßmoos im WETTREG-Ansatz die bessere Ausgangssituation (vgl. Tabelle 18). Eine gegenläufige Ertragsentwicklung zeichnet sich bei Betrachtung der Referenzszenarien (Sz-Ve / Sz-Zu) ab. Sowohl Mittelwert als auch 10%-Quantil nehmen im WETTREG-Ansatz ab und im ENSEMBLE-Ansatz zu. Dagegen verbessert die Bewässerung (Sz-Zu / Sz-ZB) in beiden Ansätzen Mittelwert und 10%-Quantil.

3.1.2.7 Zwischenfazit

Das Pflanzenwachstumsmodell HERMES errechnet die Ertragsleistung der untersuchten Kulturpflanzen in Abhängigkeit der relevanten Klimaparameter (Sz-Ve bzw. Sz-Zu) sowie unter Berücksichtigung von Bewässerungsmaßnahmen (Sz-ZB). Ziel des ENSEMBLE-Ansatzes ist es, den Einfluss des Klimamodells auf die nachfolgenden Ergebnisse darzustellen, indem die Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes denen des WETTREG-Ansatzes gegenübergestellt werden.

Vor diesem Hintergrund fassen Abbildung 22 und Abbildung 24 die Ergebnisse des WETTREG-Ansatzes (vgl. FELBERMEIR 2013, S.90 ff.) sowie Abbildung 23 und Abbildung 25 die Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes bezüglich Höhe und Stabilität der Erträge zusammen. Auch wenn sich die Ertragsentwicklung der einzelnen Kulturen zwischen den Ansätzen in manchen Fällen unterscheidet, so stimmen die Veränderungen jedoch standortbezogen in der Mehrzahl der Fälle überein. Mit Blick auf die Höhe und Stabilität der Erträge lässt sich für den Vergleich der Untersuchungsszenarien folgendes festhalten:

Ertragshöhe (arithmetischer Mittelwert)

Im Vergleich *vergänger und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) weist bei den Kulturen **Mais, Wintergerste, Sommergerste und Winterraps** bei beiden Ansätzen die Ertragsänderung in dieselbe Richtung. Auch die Spannweite der Änderungen deckt vergleichbare Wertebereiche ab, auch wenn es bei einzelnen Standorten zu gewissen Unterschieden im Umfang der Änderung kommt. Dies kann unterschiedlichen Ausgangswerten geschuldet sein.

Weniger eindeutig stellt sich die Situation beim **Winterweizen** dar. Insbesondere am Standort Wolfsdorf weisen die Ertragsänderungen der beiden Ansätze in entgegengesetzte Richtungen.

Die positive Ertragsentwicklung im ENSEMBLE-Ansatz könnte in der günstigen klimatischen Entwicklung des Standortes begründet liegen: die Temperaturen steigen auf ein gemäßigtes Niveau an, gleichzeitig erhöhen sich die Niederschläge. Im WETTREG-Ansatz liegen die Temperaturen nochmals um über 1 °C höher. Gleichzeitig fallen allerdings die Niederschläge deutlich geringer aus, vor allem in den Monaten April bis August.

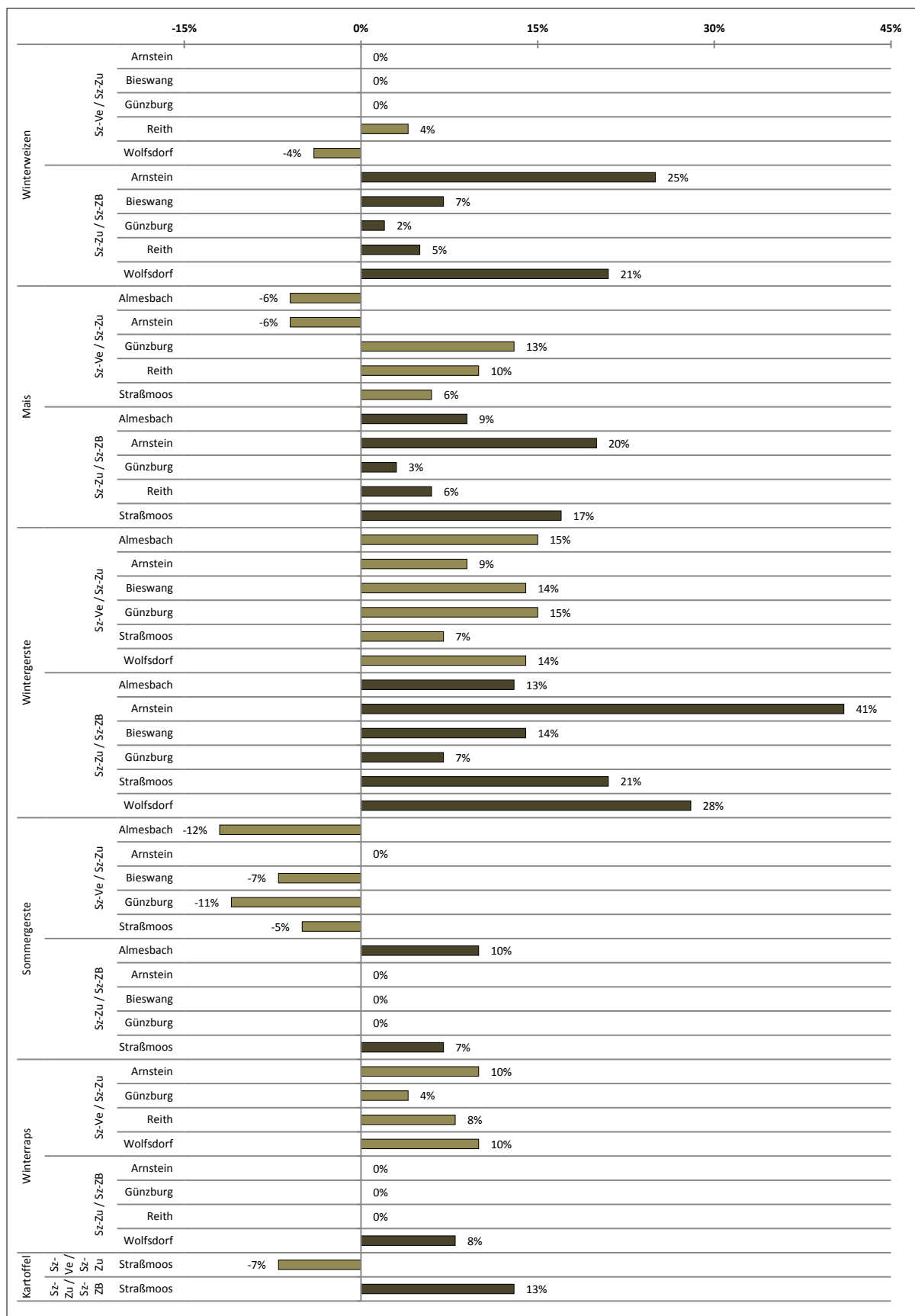


Abbildung 22: Prozentuale Veränderung der mittleren Erträge aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“
(Quelle: FELBERMEIR 2013, S. 90 ff, Datenbasis WETTREG)

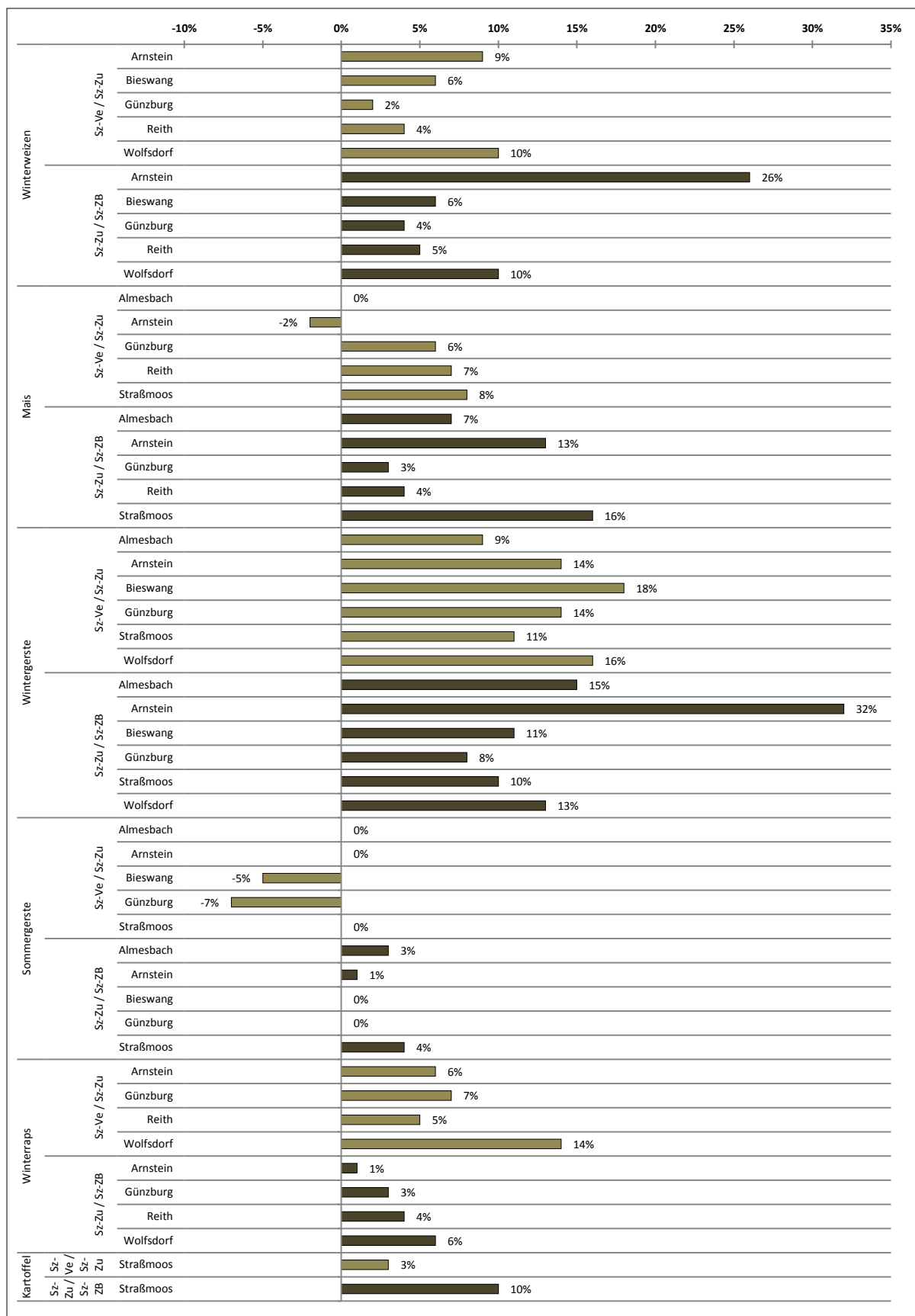


Abbildung 23: Prozentuale Veränderung der mittleren Erträge aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Eine gegenläufige Entwicklung zeigt sich bei der **Kartoffel**: ausgehend von unterschiedlichen Ertragsniveaus im Referenzszenario (Sz-Ve) nimmt der Ertrag im WETTREG-Ansatz ab, während er im ENSEMBLE-Ansatz ansteigt. Dies bewirkt, dass unter zukünftigen Klimabedingungen (Sz-Zu) in beiden Ansätzen das gleiche Ertragsniveau erreicht wird. Mit Ausnahme des Minimumwertes gleichen sich beide Ansätze im Ertragsgeschehen an. Im Szenario „Bewässerung“ (Sz-ZB) erzielen beide Ansätze schließlich fast identische Erträge.

Am Standort Straßmoos kommt im ENSEMBLE-Ansatz sicherlich die Zunahme des Niederschlages in den Monaten April bis Juni der Ertragsbildung der Kartoffel gelegen. Der weitere Ertragsanstieg in beiden Ansätzen im Zuge der Bewässerung unterstützt diese Vermutung. Zudem scheint die Bewässerung dazu beizutragen, das Ertragspotential der Kultur am Standort auszuschöpfen, da sich die Verteilung der Erträge in beiden Ansätzen beinahe deckungsgleich darstellt (Sz-Zu / Sz-ZB).

Generell führt der *Einsatz der Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) in beiden Ansätzen **bei allen Kulturen** zu Ertragszunahmen. Dabei ist in beiden Ansätzen auch der Umfang der Änderungen vergleichbar. An den Standorten Arnstein, Bieswang und Günzburg bewirkt die Bewässerung jedoch bei der **Sommergerste** keinen Ertragsanstieg. Dies gilt für beide Ansätze. An diesen Standorten scheinen keine höheren Erträge erzielbar zu sein, denn auch die Maximumwerte lassen sich durch die Bewässerungsmaßnahmen nicht steigern.

Winterraps dagegen zeigt nur im WETTREG-Ansatz in Arnstein, Günzburg und Reith keine positive Reaktion auf die zusätzlichen Wassergaben. Hier scheint das Ertragspotential der Kultur bereits ohne Bewässerung ausgereizt zu sein, denn die Erträge liegen bereits im Szenario ohne Bewässerung (Sz-Zu) höher als im ENSEMBLE-Ansatz mit Bewässerung.

Ertragsstabilität (10%-Quantil)

Im Vergleich der *Referenzszenarien* „Vergangenheit“ (Sz-Ve) und „Zukunft“ (Sz-Zu) stimmt die Richtung der Ertragsänderung bei **Mais**, **Wintergerste** und **Winterraps** zwischen den beiden Ansätzen überein. Der Umfang der Ertragsänderung bewegt sich in knapp der Hälfte der untersuchten Fälle auf vergleichbarem Niveau.

Beim **Weizen** ergeben sich an einzelnen Standorten gegenläufige Entwicklungen. Dies ist insbesondere in Wolfsdorf, aber auch in Bieswang und – weniger deutlich ausgeprägt – in Günzburg der Fall. Wie bereits beim Mittelwert beschrieben, können unterschiedliche Entwicklungen bei Temperatur und Niederschlag Ursache für die gegenläufigen Ertragsentwicklungen sein.

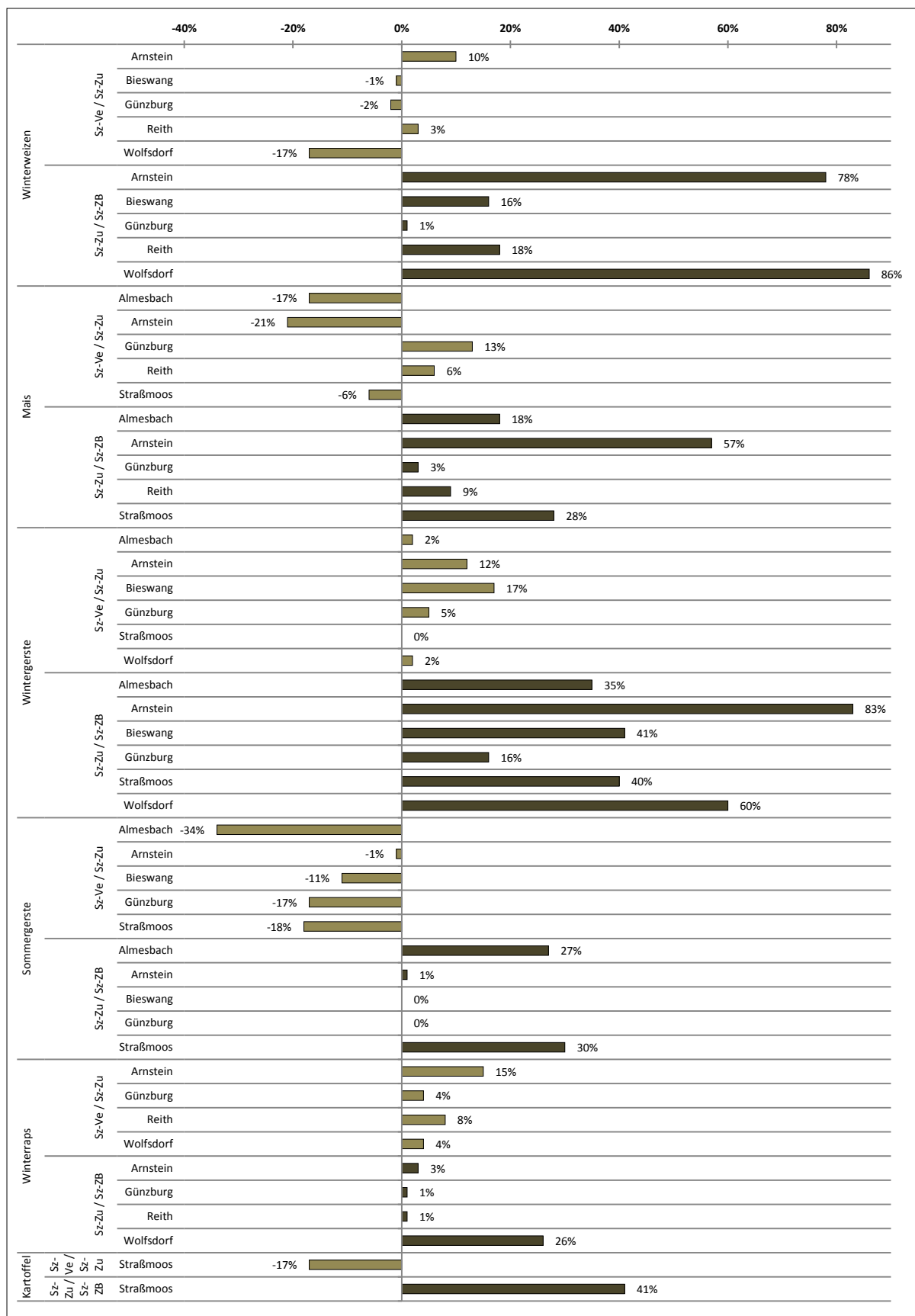


Abbildung 24: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils des Ertrages aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“
(Quelle: FELBERMEIR 2013, S. 90 ff., Datenbasis WETTREG)

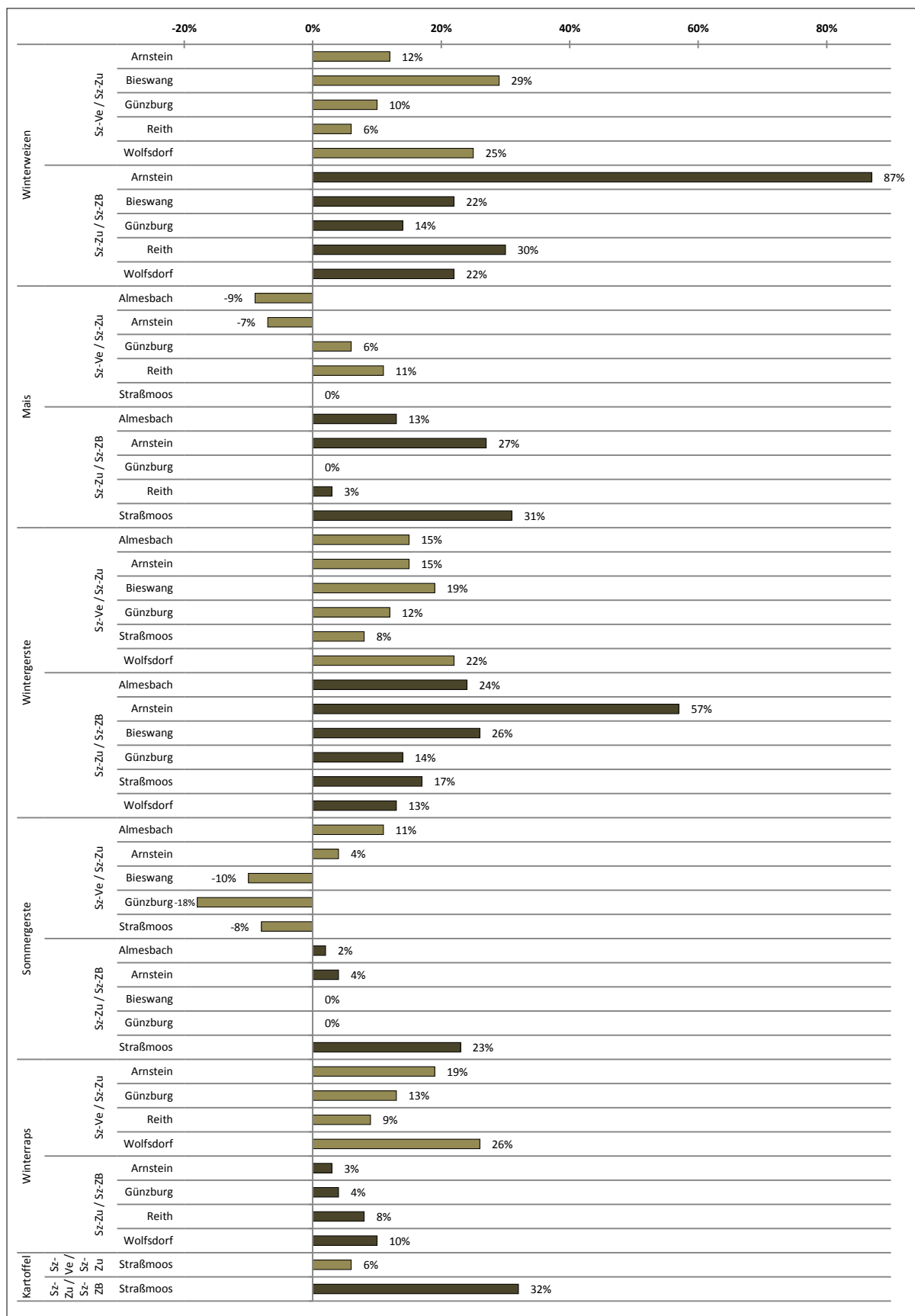


Abbildung 25: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils des Ertrages aller untersuchten Kulturen an den verschiedenen Standorten zwischen den Szenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ sowie „Zukunft“ und „Bewässerung“
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Die **Sommergerste** weist vor allem in Almesbach gegenläufige Entwicklungen auf, während dies in Arnstein weit weniger deutlich ausgeprägt ist. In Bieswang, Günzburg und Straßmoos stimmt die Ertragsveränderung in Richtung und Ausmaß überein.

Die *Durchführung der Bewässerung* (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZB) führt bei **allen Kulturen** und an allen Standorten zu einer Zunahme der Ertragsstabilität. In der Mehrzahl der untersuchten Fälle stimmt auch das Ausmaß der Änderungen überein.

Einerseits bestätigen die ENSEMBLE-Ergebnisse deutliche Ertragszuwächse beim 10%-Quantil, wie sie der WETTREG-Ansatz beispielsweise bei Winterweizen in Arnstein ermittelt hat. Andererseits ergeben sich aber auch sichtbare Unterschiede, wie z. B. bei Winterweizen in Wolfsdorf.

Darüber hinaus zeigen sich im ENSEMBLE-Ansatz die positivsten Ertragszunahmen an den Standorten Almesbach, Arnstein, Straßmoos und Wolfsdorf. Das Gleiche gilt auch im WETTREG-Ansatz.

Insgesamt betrachtet, bestätigen die Ertragsergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes die auf Basis des WETTREG-Ansatzes ermittelten Aussagen in wesentlichen Teilen:

- hinsichtlich des **durchschnittlichen Ertragsniveaus** erweisen sich vor allem Wintergerste, aber auch Winterraps und Körnermais als Profiteure der Klimaänderung. Auf Sommergerste und Silomais hingegen hat die Klimaänderung kaum positive Auswirkungen.

Die Bewässerung führt bei allen Kulturen zu einer Erhöhung des Durchschnittsertrages. Die geringsten Zunahmen ergeben sich bei Sommergerste und Winterraps.

- die **Stabilität der Erträge** ändert sich deutlicher als das durchschnittliche Ertragsniveau.

Insbesondere bei den Sommerungen Silomais und Sommergerste geht die Stabilität der Erträge zurück, während sie bei den Winterungen und der Kartoffel zunimmt.

Alles in allem fallen die Ertragsänderungen im ENSEMBLE-Ansatz weniger nachteilig aus als im WETTREG-Ansatz. Die Zunahme der Niederschläge im ENSEMBLE-Ansatz kann ein

Grund dafür sein. Dies zeigt sich auch daran, dass die Bewässerung im WETTREG-Ansatz die deutlicheren Effekte erzielt als im ENSEMBLE-Ansatz.

Dass die gegenläufige Entwicklung bei Niederschlag und Strahlung zwischen den beiden Ansätzen nicht zu deutlicheren Unterschieden in der Ertragsentwicklung führt, kann zum einen daran liegen, dass die Unterschiede in der Veränderung der Klimaparameter vergleichsweise gering ausfallen. Zum anderen scheinen Niederschlag und Strahlung auch unter zukünftigen Bedingungen in Bereichen zu liegen, die für das Pflanzenwachstum weiterhin günstig sind. Außerdem könnten die beiden anderen Klimaparameter (Temperatur und Kohlendioxidgehalt), die größere Wirkung auf das Ertragsgeschehen ausüben.

Letztlich zeigt die Gegenüberstellung der Ertragsergebnisse, dass aus dem ENSEMBLE-Ansatz im Wesentlichen keine anderen Konsequenzen für die Höhe und Stabilität der Erträge zu ziehen sind als im WETTREG-Ansatz.

3.1.3 Ökonomisches Modell

Die Ergebnisse im ökonomischen Modell beschreiben die Veränderung des Risikoprofils der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien (vgl. Abschnitt 2.4, S. 33 ff.).

Die folgenden Ausführungen stellen die Resultate des ENSEMBLE-Ansatzes denen des WETTREG-Ansatzes (vgl. FELBERMEIR 2013, S. 97 ff.) gegenüber. Im Blickpunkt der Betrachtung stehen zum einen gegenläufige Entwicklungen bei der Veränderung von Mittelwert und 10%-Quantil der Zielgröße. Zum anderen wird untersucht, wie sich die unterschiedlichen Klimamodellansätze letztendlich auf das Sicherheitsäquivalent der verschiedenen Szenarien und somit auf die auszuwählende Handlungsalternative auswirken. Zu diesem Zweck wird als Referenz das Sicherheitsäquivalent bei einer mittleren Risikoeinstellung von $\lambda = 2$ herangezogen.

Die Abschnitte 3.1.3.1 bis 3.1.3.7 beschreiben die Ergebnisse an den einzelnen Untersuchungsstandorten. Das auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes ermittelte Risikoprofil der Kulturen sowie des typischen Anbauverhältnisses am jeweiligen Standort kann dem Anhang III (S. 164 ff.) entnommen werden. Die zugehörige Ausprägung des Sicherheits-

äquivalents beinhaltet Anhang IV (S. 171 ff.). Schließlich fasst Abschnitt 3.1.3.8 die Ergebnisse in einem Zwischenfazit zusammen und interpretiert sie.

Die Benennung der in den nachfolgenden Abschnitten dargestellten Untersuchungsszenarien findet sich in Tabelle 3 (S. 39).

3.1.3.1 Almesbach

Ein detaillierter Überblick über die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Almesbach im ENSEMBLE-Ansatz findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 1, S. 164). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE-Ansatz den entsprechenden Werten des WETTREG-Ansatzes gegenüber.

Tabelle 19 vergleicht das Ausgangsniveau der anpassungskostenfreien Leistung am Standort in den beiden Klimamodellansätzen im *Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve)*.

Der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung liegt im ENSEMBLE-Ansatz vor allem bei der Wintergerste aber auch bei der Sommergerste sowie im Anbauverhältnis über dem des WETTREG-Ansatzes. Nur bei Silomais erzielt der WETTREG-Ansatz einen höheren Wert.

Tabelle 19: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Almesbach im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Silomais		Wintergerste		Sommergerste		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1194	1091	606	850	635	639	850	883
10%-Quantil	805	681	326	404	315	267	596	585

Im Gegensatz dazu zeigt die Tabelle beim 10%-Quantil die besseren Werte auf Seiten des WETTREG-Ansatzes. Nur bei der Wintergerste führt der ENSEMBLE-Ansatz zum geringeren Produktionsrisiko.

Vor diesem Hintergrund beschreibt Abbildung 26 die Veränderung des Mittelwertes zwischen den Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze. Eine gegenläufige Entwicklung zeigt die Wintergerste (*Vergleich Sz-Zu und Sz-ZB*) mit einer Zunahme des Mittelwertes um 5 % im WETTREG-Ansatz und einer Abnahme um 8 % im ENSEMBLE-Ansatz. Bei Silomais bzw. Sommergerste (*Vergleich Sz-Ve und Sz-Zu*) ändert sich der

Mittelwert im ENSEMBLE-Ansatz nicht, während er im WETTREG-Ansatz um 6 % bzw. 11 % abnimmt. Im Anbauverhältnis ergibt sich ebenfalls eine entgegengesetzte Entwicklung.

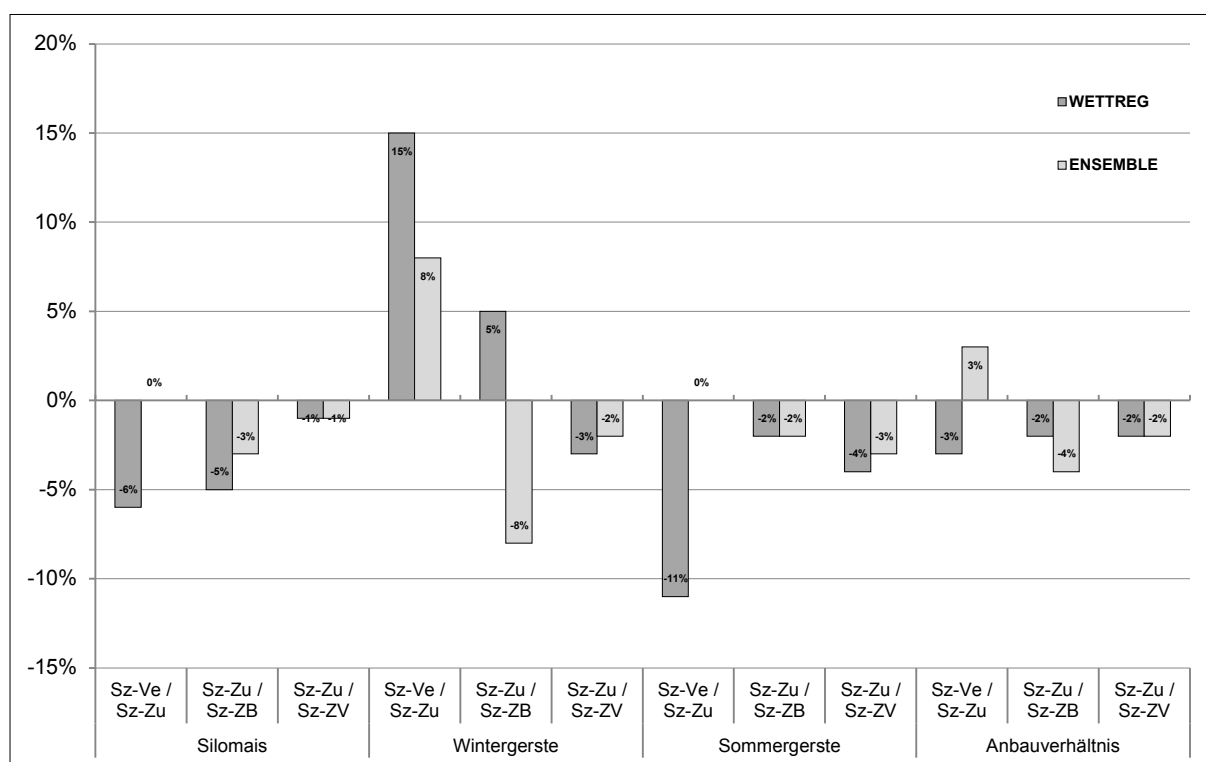


Abbildung 26: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Almesbach im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Im Vergleich der beiden Klimamodellansätze fällt auf, dass im Anbauverhältnis sowohl die Unterschiede als auch der Umfang der Veränderungen weniger ausgeprägt sind.

Bei der Veränderung des 10%-Quantils, wie sie Abbildung 27 zeigt, ergeben sich nur bei der Sommergerste (*Vergleich Sz-Ve und Sz-Zu*) gegenläufige Entwicklungen. Zudem unterscheidet sich bei dieser Kultur die Zunahme des Risikos im Vergleich *mit und ohne Versicherung* erheblich.

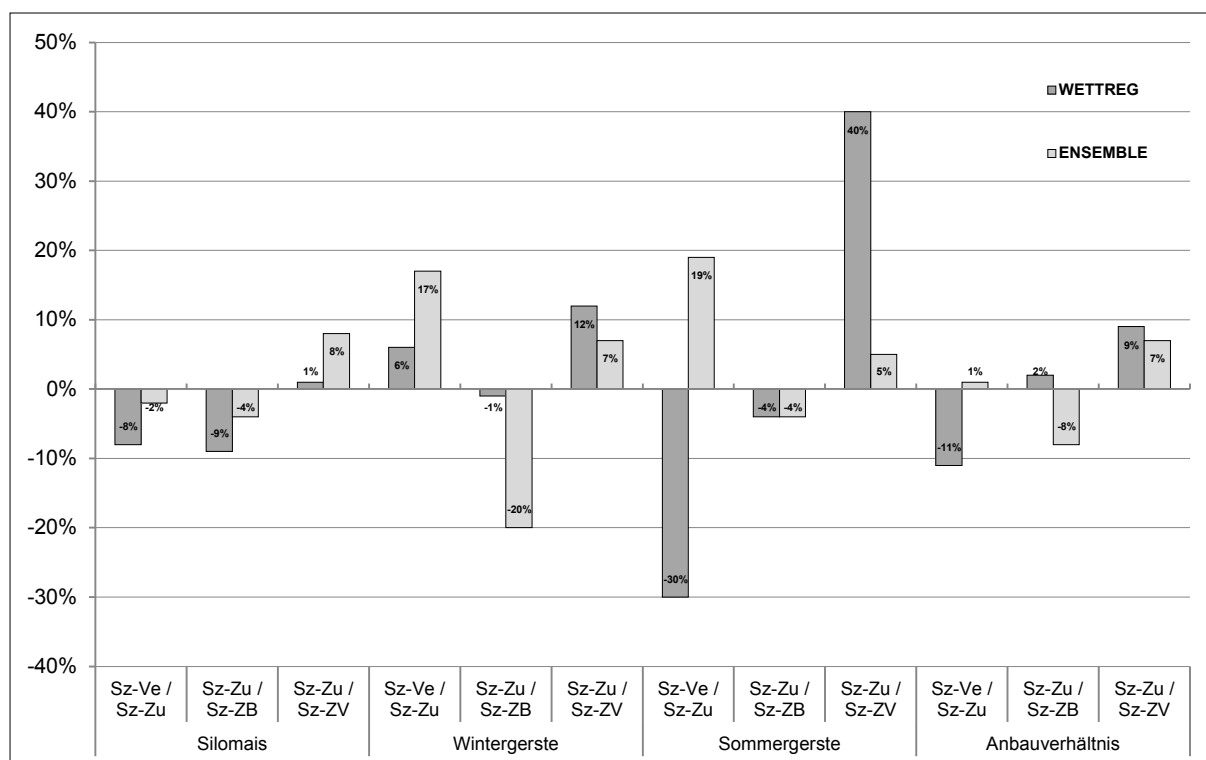


Abbildung 27: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Almesbach im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Wie auch beim Mittelwert fallen die Änderungen beim 10%-Quantil im Anbauverhältnis deutlich weniger stark aus wie bei den Einzelkulturen.

Die Frage, welche Alternative vor dem Hintergrund der modellierten Klimaänderung für einen Entscheider die geeignetste ist, beantwortet ein Blick auf das **Sicherheitsäquivalent**. Den Vergleich der beiden Klimamodellansätze bei einer mittleren Risikoeinstellung ($\lambda = 2$) zeigt Abbildung 28. Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 1.; S. 171).

Mit Ausnahme der Wintergerste bewegen sich die Sicherheitsäquivalente bei den Kulturen und im Anbauverhältnis auf ähnlichem Niveau. Bei der Wintergerste kommt im ENSEMBLE-Ansatz das deutlich höhere Ertragsniveau zum Tragen (vgl. Abschnitt 3.1.2.3, S. 67).

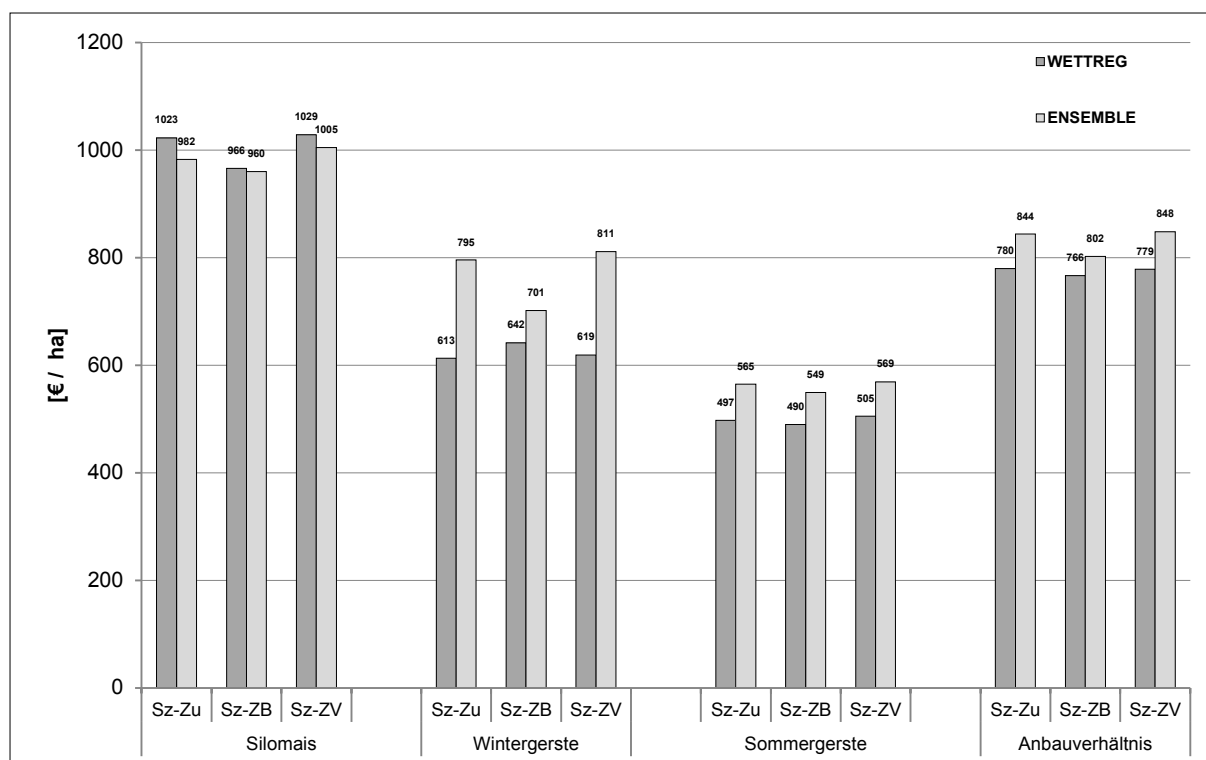


Abbildung 28: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Almesbach im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Bei Silomais und Sommergerste führt in beiden Ansätzen jeweils die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) zum größten Sicherheitsäquivalent. Auch im Anbauverhältnis stiftet die Versicherung den größten Nutzen, wobei im WETTREG-Ansatz das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu) einen minimal höheren Wert aufweist. Die Versicherungslösung ist zudem bei der Wintergerste im ENSEMBLE-Ansatz die beste Lösung, während im WETTREG-Ansatz die *Bewässerung* (Sz-ZB) die zu präferierende Alternative darstellt.

3.1.3.2 Arnstein

Ein Überblick über die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Arnstein auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 2, S. 165). Darauf Bezug nehmend stellen die nachfolgenden Übersichten das Ausgangsniveau sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE- sowie im WETTREG-Ansatz gegenüber.

Tabelle 20 beschreibt den Ausgangspunkt der beiden Ansätze am Standort im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Tabelle 20: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Arnstein im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Winterweizen		Silomais		Wintergerste		Sommergerste		Winterraps		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1086	1002	1273	1169	1036	970	886	898	1272	1191	1097	1033
10%-Quantil	503	386	863	739	555	551	524	512	710	609	762	655

Der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung liegt im ENSEMBLE-Ansatz bei fast allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis unter den Werten des WETTREG-Ansatzes. Nur bei Sommergerste erzielt der ENSEMBLE-Ansatz einen höheren Wert.

Dagegen ergibt sich beim 10%-Quantil ein eindeutiges Bild: in allen Fällen weist der ENSEMBLE-Ansatz die niedrigeren Werte aus.

Ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) beschreibt Abbildung 29 die Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

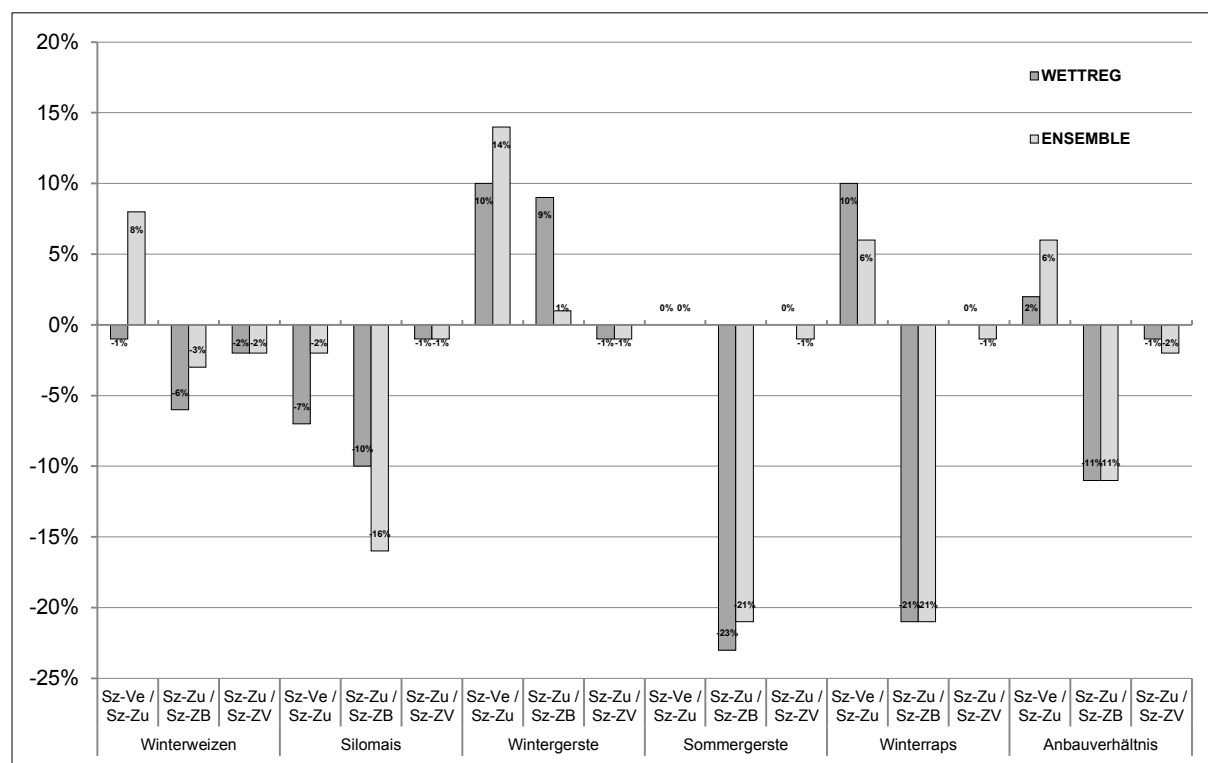


Abbildung 29: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Arnstein im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Eine gegenläufige Entwicklung zeigt sich nur beim Winterweizen im *Vergleich vergangener und zukünftiger (Sz-Ve / Sz-Zu) Klimabedingungen*. In den übrigen untersuchten Fällen zeigt die Veränderung des Mittelwertes in dieselbe Richtung bzw. ändert er sich nicht in bemerkenswerten Umfang.

Abbildung 30 verdeutlicht die Veränderung des 10%-Quantils als Maßstab für das Produktionsrisiko an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze.

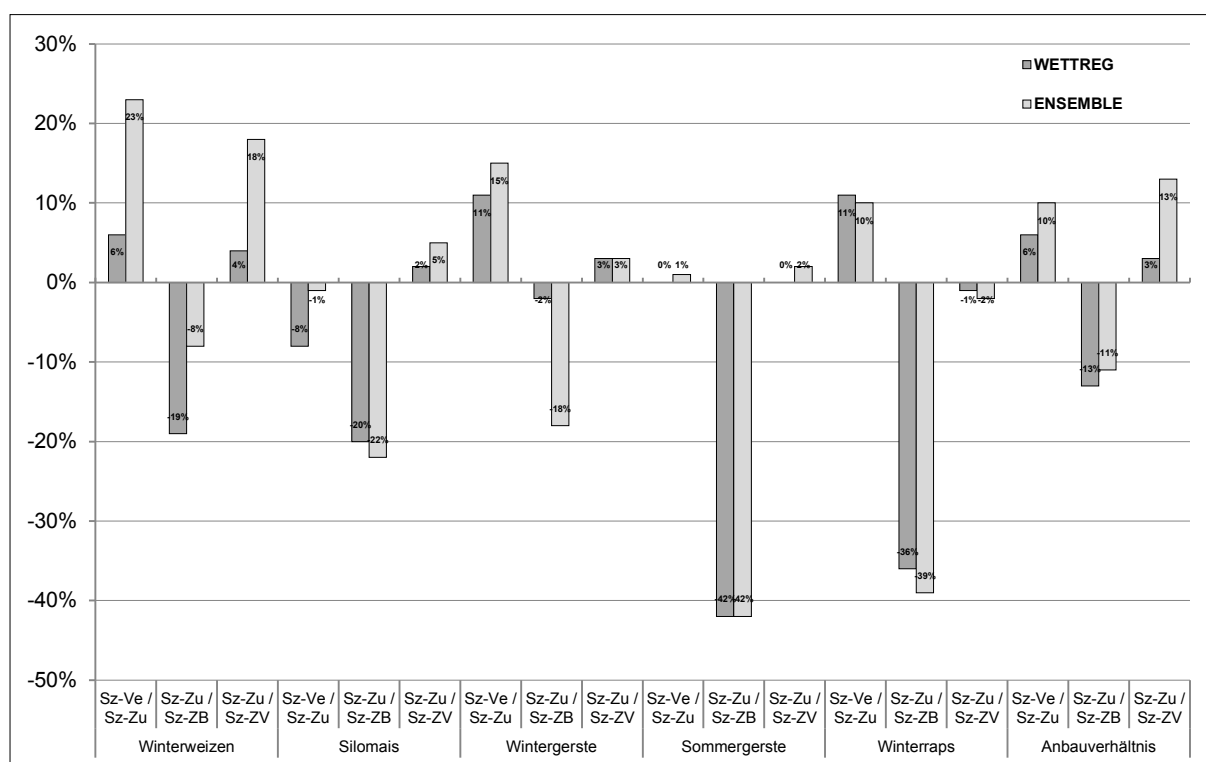


Abbildung 30: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Arnstein im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Die Veränderung des Produktionsrisikos zeichnet am Standort Arnstein ein noch eindeutigeres Bild wie die der Wirtschaftlichkeit. Weder bei den einzelnen Kulturen noch im Anbauverhältnis ergeben sich gegenläufige Entwicklungen.

Abbildung 31 vergleicht schließlich das **Sicherheitsäquivalent** der beiden Klimamodellansätze bei mittlerer Risikoaversion. Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 2, S. 171).

Die deutlichsten Unterschiede in der Höhe des Sicherheitsäquivalents zwischen den beiden Ansätzen zeigen sich beim Winterraps, die geringsten bei der Sommergerste.

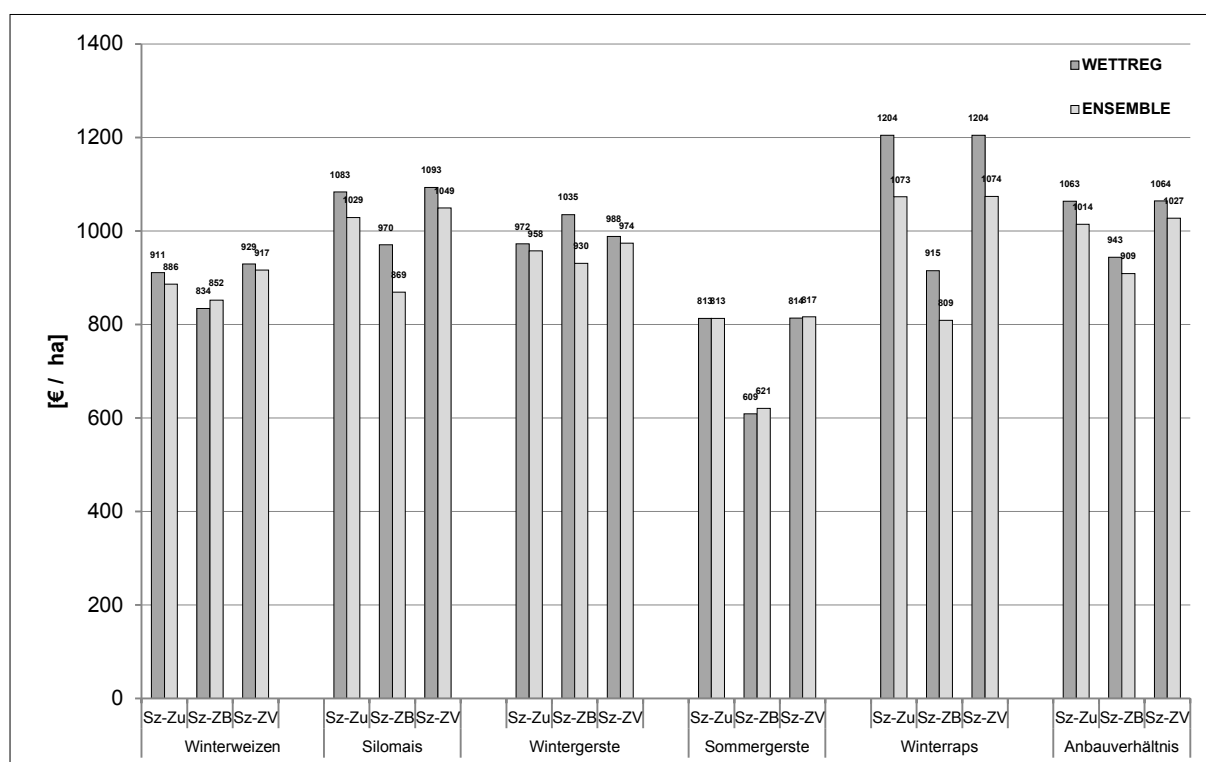


Abbildung 31: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Arnstein im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Im ENSEMBLE-Ansatz weist bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) das größte Sicherheitsäquivalent, und somit die zu präferierende Alternative, aus. Allerdings fällt die Vorzüglichkeit gegenüber dem *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu) gering aus, insbesondere bei Winterraps und im Anbauverhältnis.

Dasselbe gilt für die Sicherheitsäquivalente im WETTREG-Ansatz mit einer Ausnahme: bei der Wintergerste führt die *Bewässerung* (Sz-ZB) zu einem größeren Nutzen als die Versicherung (SZ-ZV).

3.1.3.3 Bieswang

Ein detaillierter Überblick über die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Bieswang im ENSEMBLE-Ansatz findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 3, S. 166). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation

sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE-Ansatz den entsprechenden Werten des WETTREG-Ansatzes gegenüber.

Tabelle 21 beinhaltet die Ausgangswerte der anpassungskostenfreien Leistung am Standort in den beiden Klimamodellansätzen im *Referenzszenario* „*Vergangenheit*“ (Sz-Ve).

Tabelle 21: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Bieswang im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Winterweizen		Wintergerste		Sommergerste		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1316	1289	1331	1208	803	872	1296	1236
10%-Quantil	714	643	782	674	478	494	848	750

Der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung liegt im ENSEMBLE-Ansatz nur bei der Sommergerste über den Werten des WETTREG-Ansatzes. Bei den übrigen Kulturen sowie im Anbauverhältnis erzielt der WETTREG-Ansatz die besseren Werte.

Auch beim 10%-Quantil führt der ENSEMBLE-Ansatz nur bei der Sommergerste zum besseren Ergebnis. In den übrigen Fällen weist der WETTREG-Ansatz die höheren Werte aus.

Abbildung 32 verdeutlicht die Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

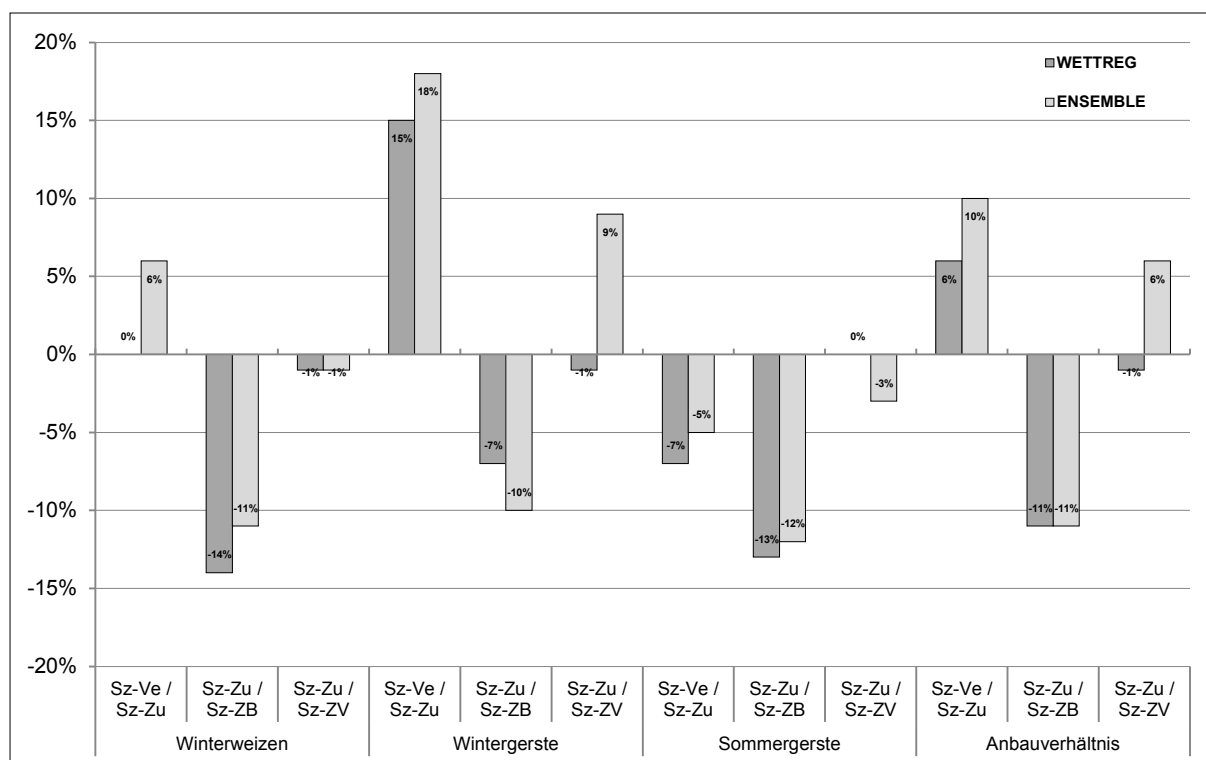


Abbildung 32: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Bieswang im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Gegenläufige Entwicklungen zeichnen sich am Standort Bieswang nur bei der Wintergerste sowie im Anbauverhältnis ab, jeweils bei der *Versicherungsvariante* (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZV). Bei der Versicherung der Sommergerste ändert sich im WETTREG-Ansatz der Mittelwert nicht, während er im ENSEMBLE-Ansatz um 3 % zurückgeht. Umgekehrt verhält es sich beim Winterweizen: im *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) bleibt der Mittelwert im WETTREG-Ansatz gleich, wohingegen er im ENSEMBLE-Ansatz um 6 % zunimmt.

Bei der Veränderung des 10%-Quantils, wie sie Abbildung 33 zeigt, ergeben sich gegenläufige Entwicklungen beim Winterweizen (Sz-Ve / Sz-Zu und Sz-Zu / Sz-ZV) sowie bei der Sommergerste (Sz-Zu / Sz-ZV).

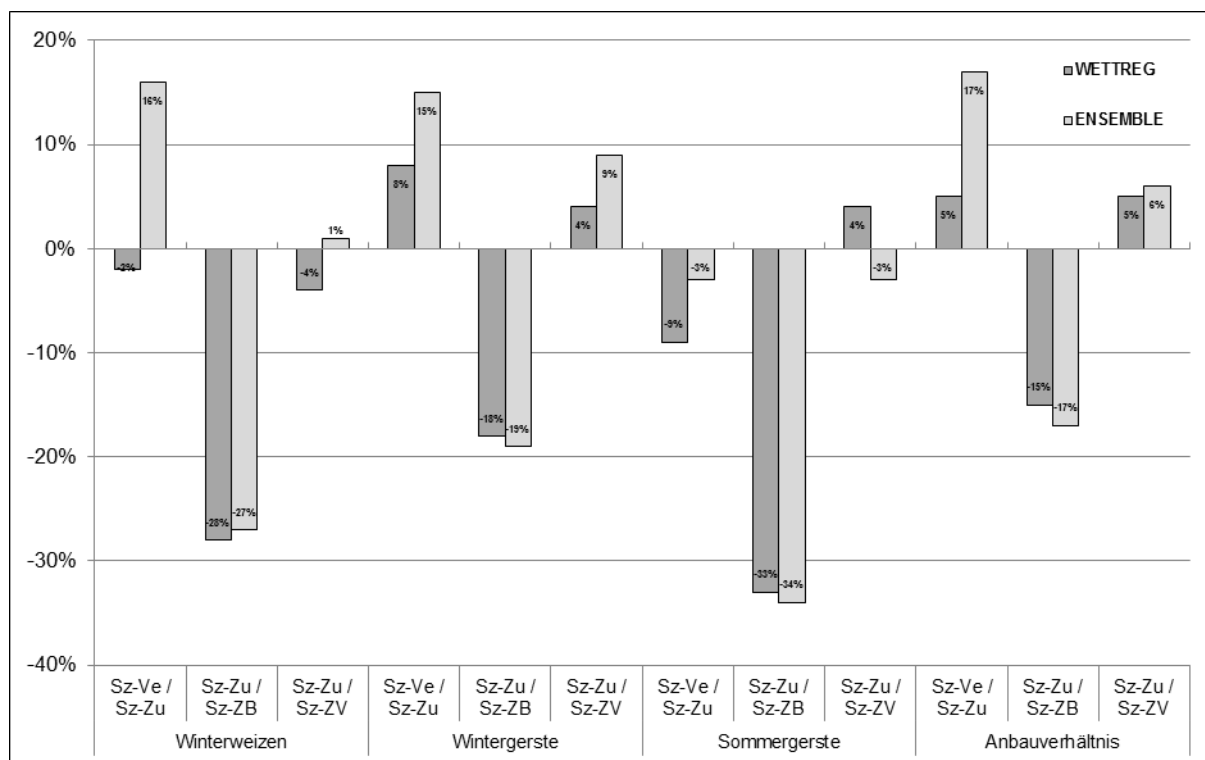


Abbildung 33: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Bieswang im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Zudem bestätigt sich beim 10%-Quantil das deutlich zunehmende Produktionsrisiko durch den Einsatz der Bewässerung (Sz-ZB) bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis.

Abbildung 34 stellt das **Sicherheitsäquivalent** in den beiden Klimamodellansätzen bei mittlerer Risikoaversion gegenüber. Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 4, S. 172).

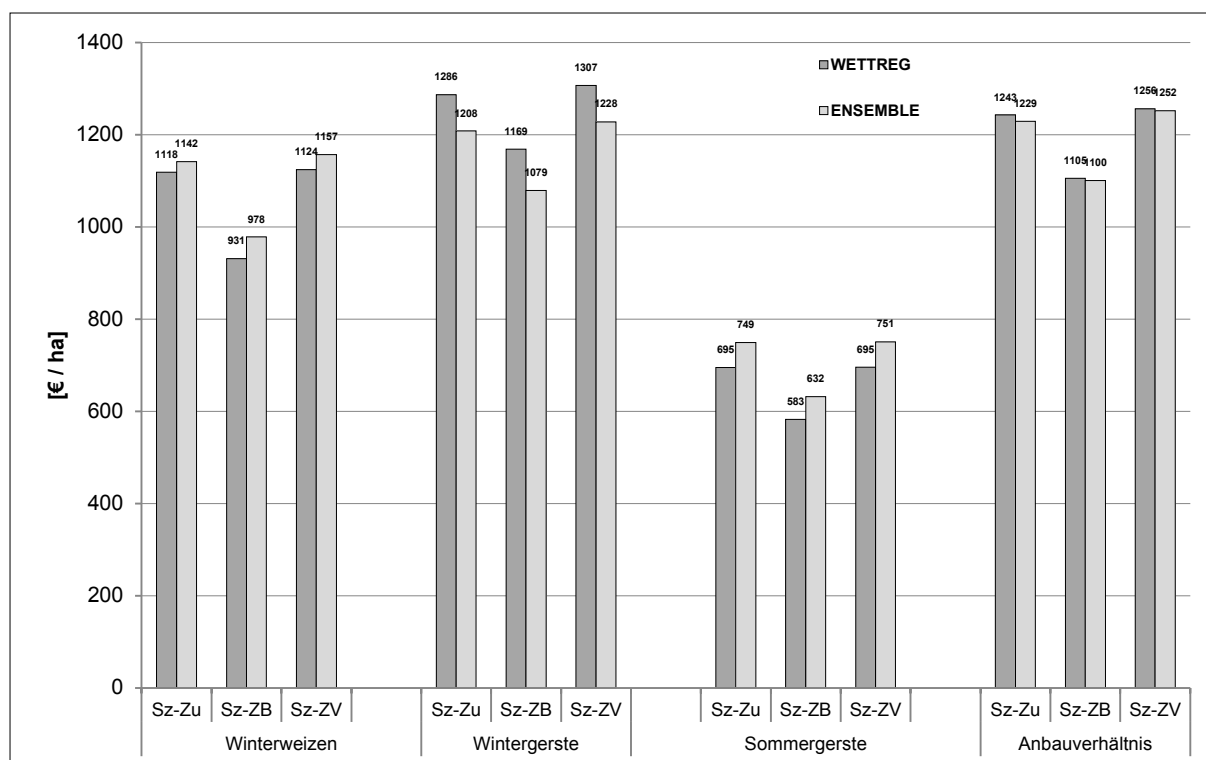


Abbildung 34: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Bieswang im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Am Standort Bieswang stiftet in beiden Ansätzen bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) den größten Nutzen. Vor allem bei der Sommergerste ist der Vorteil gegenüber dem Szenario ohne Anpassung (Sz-Zu) jedoch verschwindend gering. Darüber hinaus bewegt sich das Sicherheitsäquivalent bei der Sommergerste auf einem deutlich niedrigeren Niveau als bei den beiden anderen Kulturen.

3.1.3.4 Günzburg

Die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Günzburg auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes kann dem Anhang entnommen werden (vgl. Abbildung A_III. 4, S. 167). Darauf Bezug nehmend stellen die nachfolgenden Übersichten das Ausgangsniveau sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE- sowie im WETTREG-Ansatz gegenüber.

Tabelle 22 vergleicht Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Klimamodellansätze im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Beim Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung erreicht der ENSEMBLE-Ansatz bei Winterweizen und Sommergerste die besseren Ergebnisse. Bei den übrigen Kulturen befindet sich der WETTREG-Ansatz im Vorteil. Im Anbauverhältnis ergeben sich keine nennenswerten Unterschiede.

Tabelle 22: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Günzburg im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Winterweizen		Körnermais		Wintergerste		Sommergerste		Winterraps		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1278	1332	1505	1321	1217	1131	728	860	1593	1544	1293	1288
10%-Quantil	722	712	866	690	721	615	436	504	900	824	956	895

Anders verhält es sich beim 10%-Quantil. Der ENSEMBLE-Ansatz erzielt nur bei der Sommergerste einen höheren Wert. In den übrigen Fällen liegen die Werte des WETTREG-Ansatzes über denen ENSEMBLE-Ansatzes.

Ausgehend vom Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) beschreibt Abbildung 35 die Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung in den verschiedenen Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

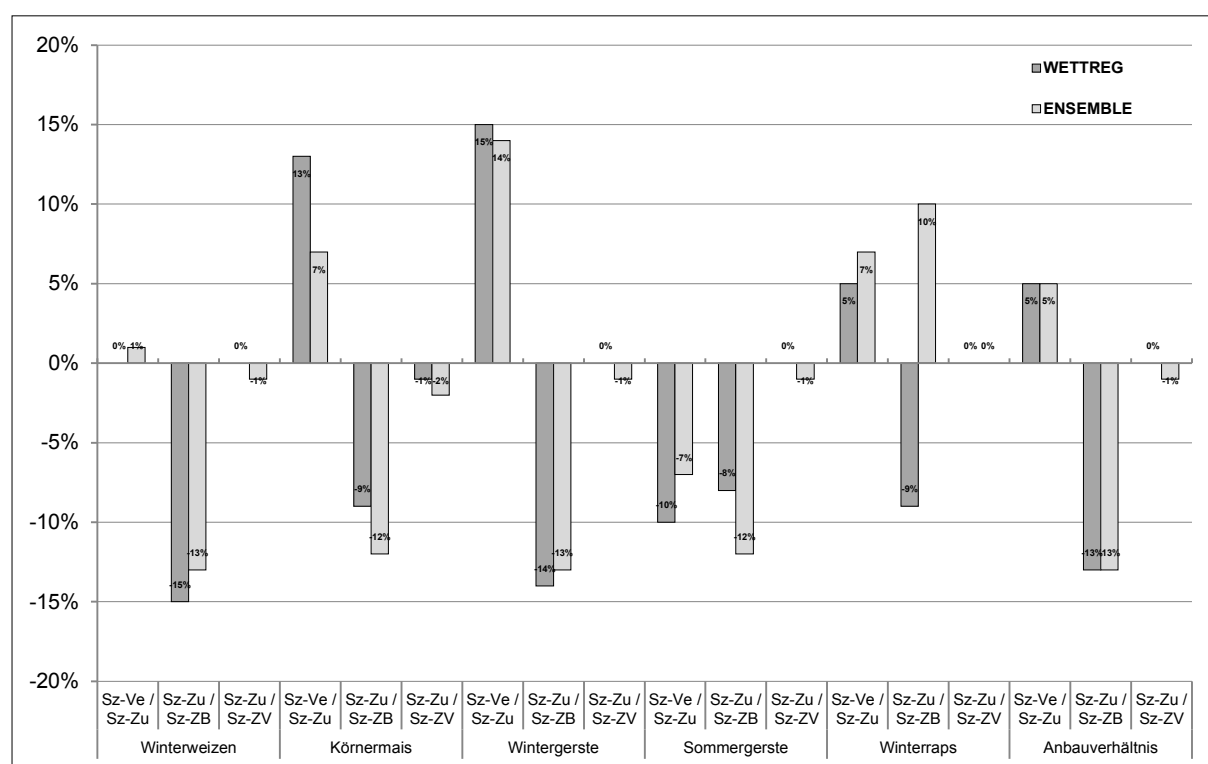


Abbildung 35: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Günzburg im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Eine entgegengesetzte Veränderung des Mittelwertes zwischen den beiden Ansätzen resultiert nur bei Winterraps im *Szenario Bewässerung* (Vergleich Sz-Zu /Sz-ZB). In den übrigen Fällen unterscheiden sich die beiden Ansätze kaum.

Abbildung 36 beschreibt die Veränderung des Wertes für das 10%-Quantil im Vergleich der Klimamodellansätze und Untersuchungsszenarien.

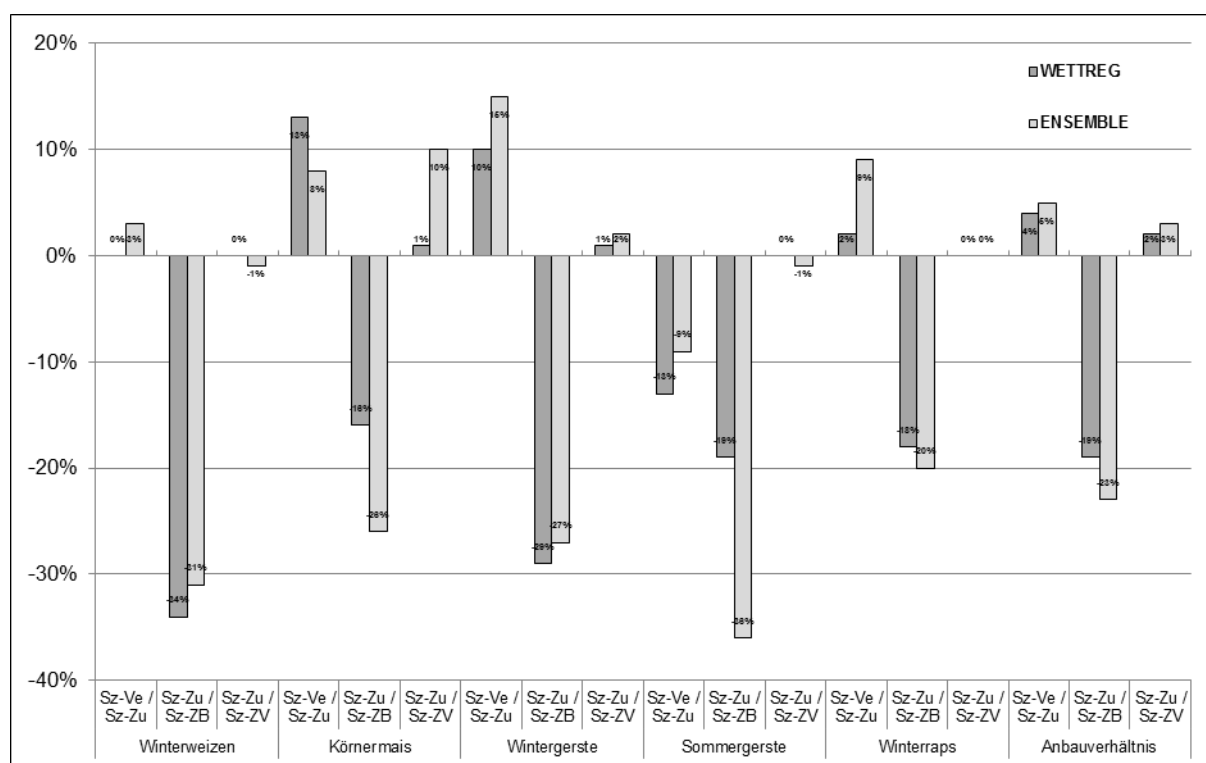


Abbildung 36: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Günzburg im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass sich bei der Veränderung des Produktionsrisikos keine gegenläufigen Entwicklungen ergeben. In manchen Fällen, wie z. B. bei der Bewässerung der Sommergerste (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZB), unterscheidet sich jedoch der Umfang der Veränderung zwischen den beiden Ansätzen deutlich.

Schließlich beschreibt Abbildung 37 das Sicherheitsäquivalent der beiden Ansätze am Standort unter der Annahme mittlerer Risikoabneigung. Ein Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents in Abhängigkeit der Risikoeinstellung findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 3, S. 172).

Zwischen den beiden Ansätzen zeigen sich die deutlichsten Unterschiede beim Körnermais. Dagegen liegen die Sicherheitsäquivalente beim Winterweizen nahe beieinander.

Im ENSEMBLE-Ansatz führt bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherung* (Sz-ZV) zum größten Nutzen. Allerdings fällt der Abstand zum *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu) besonders bei Sommergerste, Winterraps und im Anbauverhältnis gering aus.

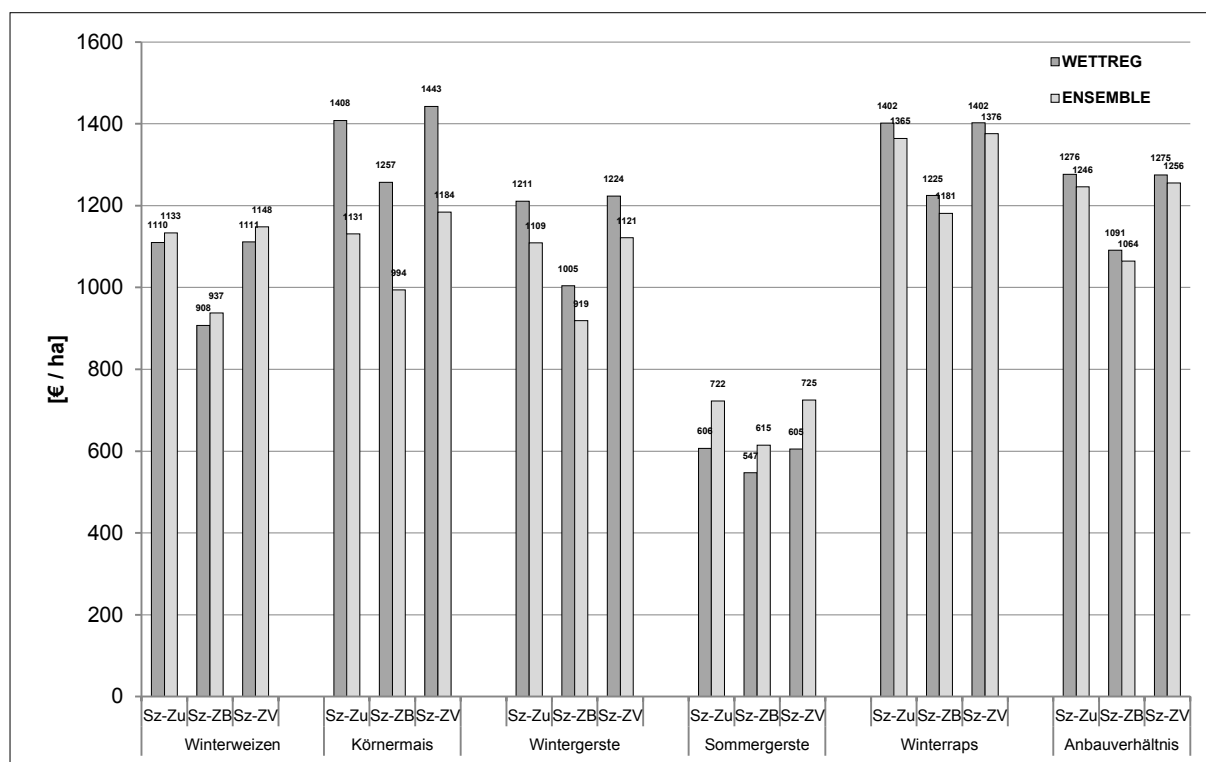


Abbildung 37: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Günzburg im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Im Gegensatz dazu ist im WETTREG-Ansatz nur bei Körnermais und Wintergerste ein Vorteil der *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) ersichtlich. Bei Winterweizen, Sommergerste, Winterraps und letztlich auch im Anbauverhältnis sind die Unterschiede zwischen der Versicherungslösung und dem *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu) verschwindend gering.

3.1.3.5 Reith

Ein detaillierter Überblick über die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Reith im ENSEMBLE-Ansatz findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 5, S. 168). Darauf aufbauend stellen die nachfolgenden Übersichten die Ausgangssituation sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE-Ansatz den entsprechenden Werten des WETTREG-Ansatzes gegenüber.

Tabelle 23 beschreibt das Ausgangsniveau der beiden Klimamodellansätze am Standort im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Sowohl der Mittelwert als auch das 10%-Quantil der anpassungskostenfreien Leistung liegen im ENSEMBLE-Ansatz bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis unter den Werten des WETTREG-Ansatzes. Die deutlichsten Unterschiede resultieren beim Körnermais.

Tabelle 23: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Reith im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Winterweizen		Körnermais		Winterraps		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1256	1225	1726	1495	1491	1398	1550	1396
10%-Quantil	683	639	1024	827	838	733	1063	904

Mit Blick auf das Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) zeigt Abbildung 38 die Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung im Vergleich der Klimamodellansätze und Untersuchungsszenarien.

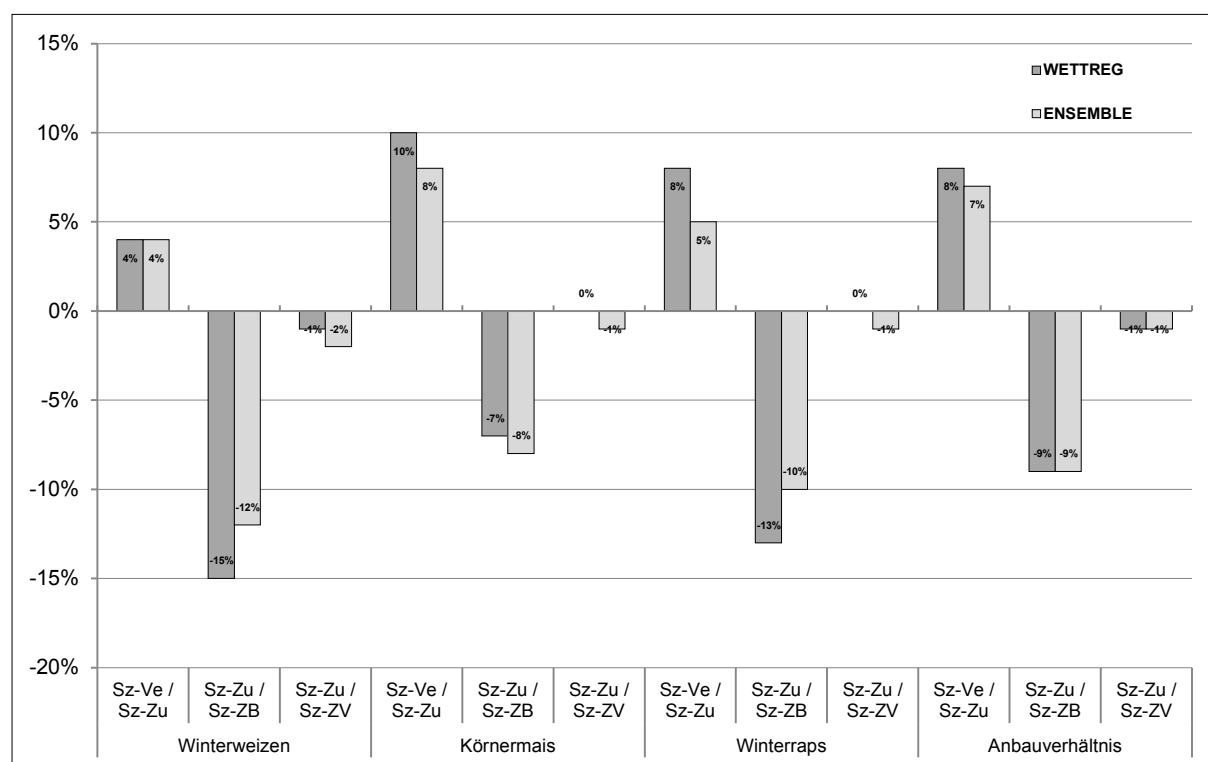


Abbildung 38: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Reith im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Am Standort Reith ergeben sich zwischen den beiden Ansätzen keine gegenläufigen Entwicklungen. Lediglich bei der Versicherungsvariante (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZV) ändert

sich bei Körnermais und Winterraps der Mittelwert im WETTREG-Ansatz nicht, während er im ENSEMBLE-Ansatz minimal abnimmt.

Beim Wert für das 10%-Quantil zeigt Abbildung 39 ein weniger eindeutiges Bild.

Die *Versicherungsvariante* (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZV) führt zu gegenläufigen Entwicklungen bei Winterweizen, Körnermais und Winterraps. Zudem nimmt beim Winterweizen das 10%-Quantil im WETTREG-Ansatz um 4 % zu, wohingegen der Wert im ENSEMBLE-Ansatz um 5 % zurückgeht.

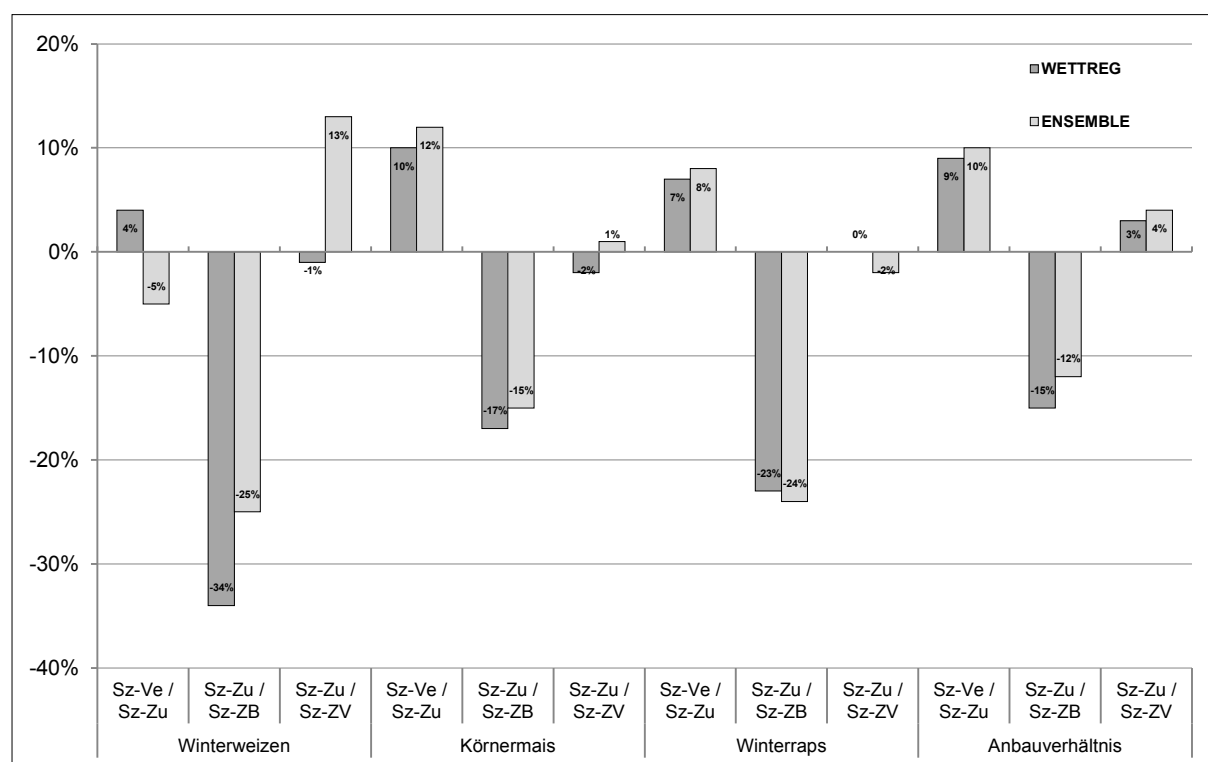


Abbildung 39: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Reith im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Abbildung 40 zeigt den Vergleich des **Sicherheitsäquivalents** der beiden Klimamodellansätze bei einer mittleren Risikoeinstellung ($\lambda = 2$). Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 5, S. 173).

Im ENSEMBLE-Ansatz stiftet bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) den größten Nutzen. Darauf folgt das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu), das vor allem bei Winterraps nur ein geringfügig kleineres

Sicherheitsäquivalent aufweist. Die Werte bei Durchführung der *Bewässerung* (Sz-ZB) fallen merklich niedriger aus.

Auch im WETTREG-Ansatz führt die *Versicherungslösung* (Sz-ZV) zum größten Sicherheitsäquivalent. Allerdings weisen der Winterraps und das Anbauverhältnis für das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu) gleich hohe Werte aus. Zudem liegt dieses Szenario (Sz-Zu) bei Winterweizen und Körnermais nur knapp hinter der Versicherungsvariante (Sz-ZV). Der geringste Nutzen resultiert in allen Fällen beim Einsatz der *Bewässerung* (Sz-ZB).

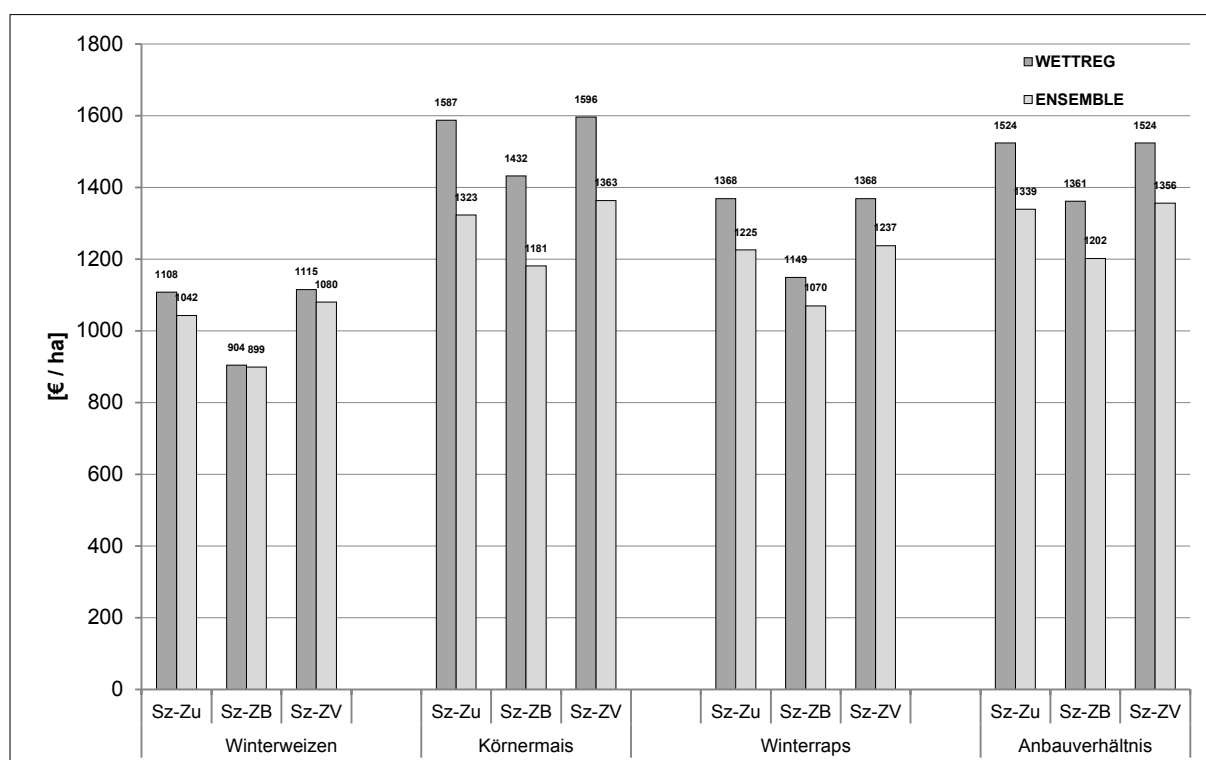


Abbildung 40: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Reith im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Insgesamt betrachtet unterscheiden sich die Sicherheitsäquivalente zwischen den beiden Ansätzen bei Körnermais, Winterraps sowie im Anbauverhältnis deutlich. Dagegen liegen sie beim Winterweizen vergleichsweise nahe beieinander.

3.1.3.6 Straßmoos

Ein Überblick über die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Straßmoos auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 6, S. 169). Darauf Bezug nehmend stellen die nachfolgenden Übersichten

das Ausgangsniveau sowie die Entwicklung von Mittelwert und 10%-Quantil im ENSEMBLE- sowie im WETTREG-Ansatz gegenüber.

Tabelle 24 vergleicht die Ausgangssituation der anpassungskostenfreien Leistung am Standort in den beiden Klimamodellansätzen im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve).

Der Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung liegt im ENSEMBLE-Ansatz bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis unter den Werten des WETTREG-Ansatzes. Dasselbe gilt für die Werte des 10%-Quantils. Am deutlichsten unterscheiden sich die beiden Ansätze beim Körnermais und der Kartoffel.

Tabelle 24: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Straßmoos im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Körnermais		Wintergerste		Sommergerste		Speisekartoffeln		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1464	1204	932	909	829	805	2210	2048	1667	1527
10%-Quantil	864	635	539	496	481	441	1113	898	1094	852

Mit Blick auf den Mittelwert der anpassungskostenfreien Leistung zeigt Abbildung 41 dessen Entwicklung im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

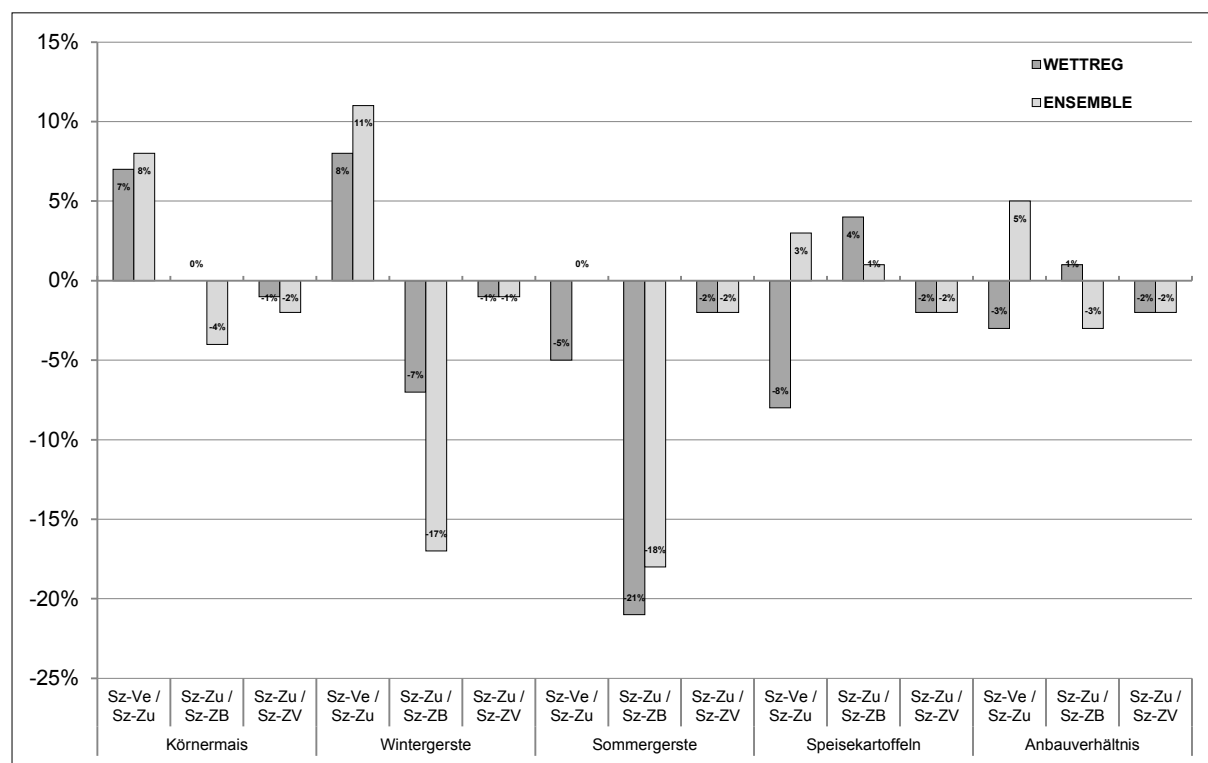


Abbildung 41: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Straßmoos im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Gegenläufige Entwicklungen zwischen den beiden Ansätzen finden sich beim Mittelwert im *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) bei der Kartoffel und im Anbauverhältnis. Zudem führt im standorttypischen Anbauverhältnis auch die *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) zu gegensätzlichen Entwicklungen. Ein deutlicher Unterschied im Umfang der Änderung ergibt sich bei der Wintergerste im Falle der Bewässerung.

Abbildung 42 verdeutlicht die Veränderung des 10%-Quantils als Maßstab für das Produktionsrisiko an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze. Im Gegensatz zum Mittelwert zeichnet diese Kennzahl ein differenzierteres Bild.

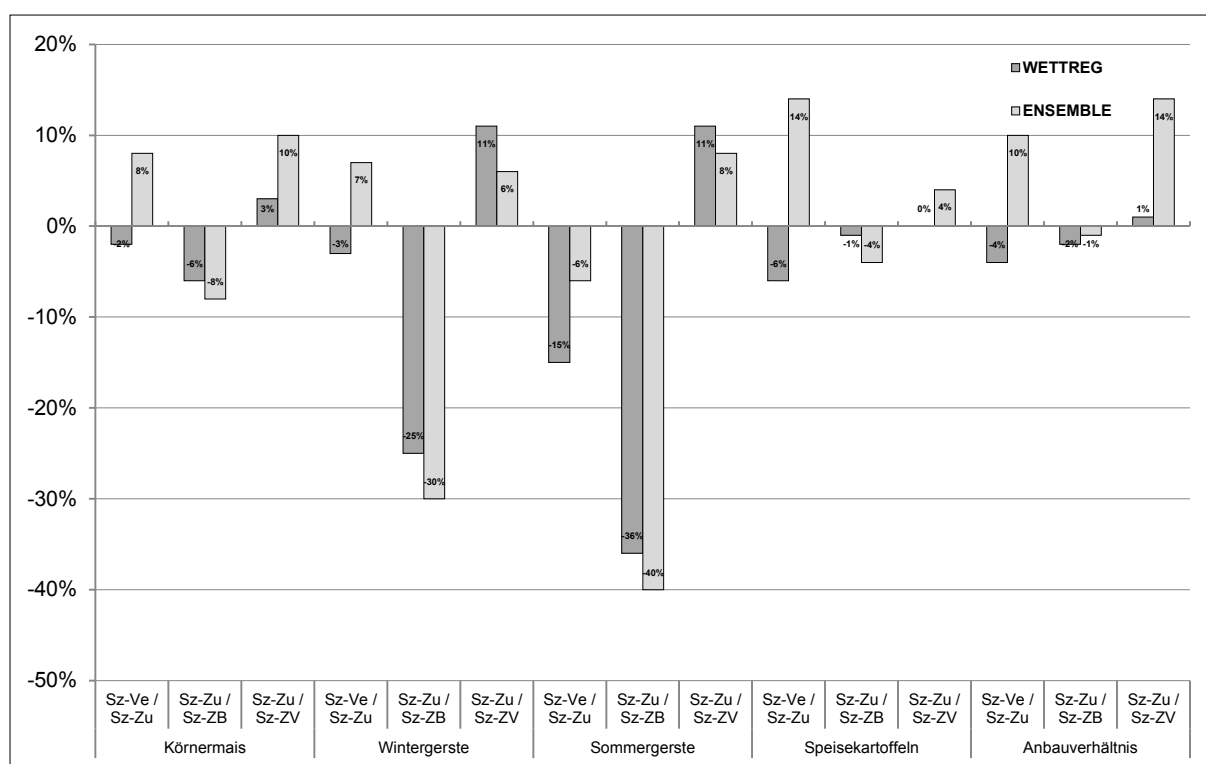


Abbildung 42: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Straßmoos im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Mit Ausnahme der Sommergerste bewirkt der *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) bei den übrigen Kulturen sowie im Anbauverhältnis eine gegenläufige Entwicklung des Quantilwertes. Am deutlichsten fallen die Unterschiede bei der Kartoffel und im Anbauverhältnis aus. Des Weiteren nimmt beim Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) in beiden Ansätzen sowohl bei Winter- als auch bei Sommergerste das Produktionsrisiko merklich zu.

Abbildung 43 vergleicht das **Sicherheitsäquivalent** der beiden Klimamodellansätze bei mittlerer Risikoaversion. Ein Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents in Abhängigkeit individueller Risikoeinstellung findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 6, S. 173).

In beiden Ansätzen erzielt bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) den größten Nutzen. Bei Körnermais, Wintergerste und Sommergerste folgt jeweils knapp darauf das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu). Die *Bewässerung* (Sz-ZB) führt sowohl bei Winter- als auch bei Sommergerste zu offensichtlich niedrigeren Sicherheitsäquivalenten. Dagegen stiftet die Bewässerung beim Körnermais (vor allem im WETTREG-Ansatz) und besonders bei der Kartoffel einen hohen Nutzen. Bei der Kartoffel schneidet die Bewässerung (Sz-ZB) in beiden Ansätzen sogar besser ab als das Szenario ohne Anpassung (Sz-Zu). In der Folge stiftet im WETTREG-Ansatz der Einsatz der Bewässerung (Sz-ZB) einen höheren Nutzen als das Szenario ohne Anpassung.

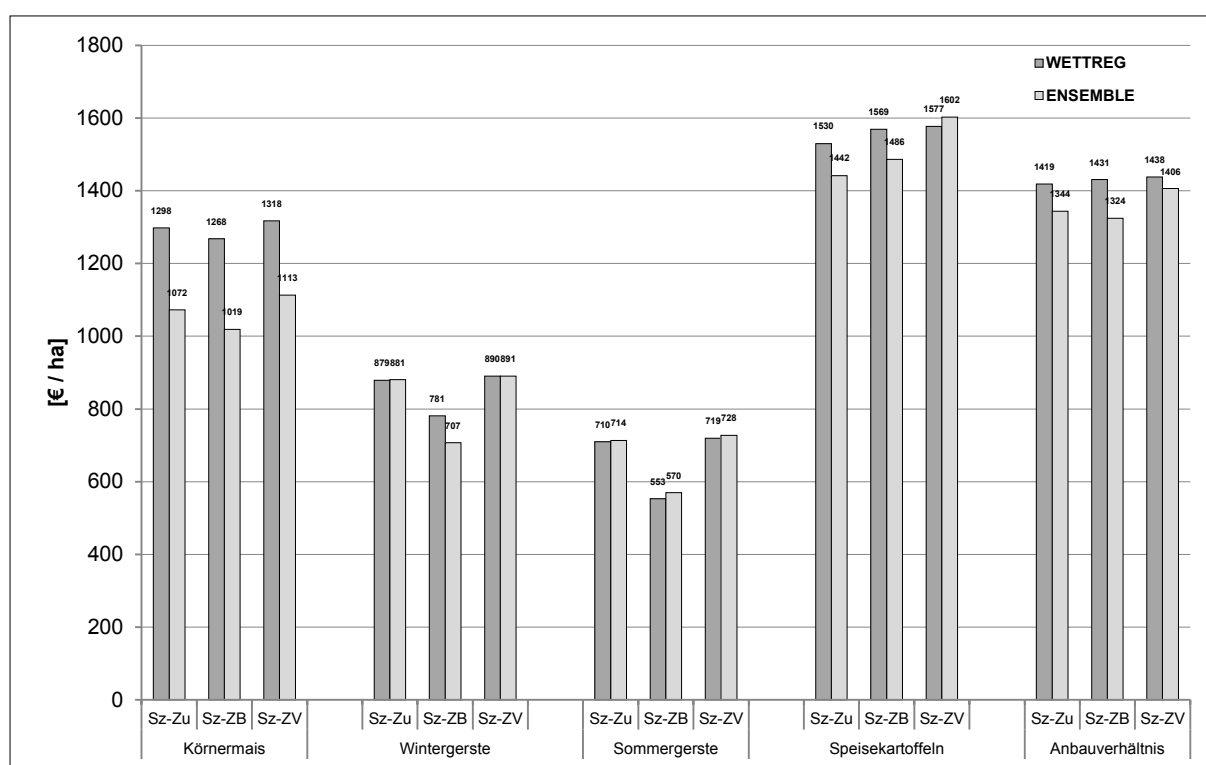


Abbildung 43: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Straßmoos im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Insgesamt betrachtet unterscheiden sich die Sicherheitsäquivalente zwischen den beiden Ansätzen vor allem bei Körnermais. Dagegen liegen sie bei Winter- und Sommergerste vergleichsweise nahe beieinander.

3.1.3.7 Wolfsdorf

Die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Wolfsdorf auf Basis des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_III. 7, S. 170).

Tabelle 25 stellt Mittelwert und 10%-Quantil der beiden Ansätze im *Referenzszenario* „Vergangenheit“ (Sz-Ve) am Standort gegenüber.

Sowohl der Mittelwert als auch das 10%-Quantil der anpassungskostenfreien Leistung liegen im ENSEMBLE-Ansatz bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis unter den Werten des WETTREG-Ansatzes. Die deutlichsten Unterschiede resultieren beim Winterraps.

Tabelle 25: Mittelwert und 10%-Quantil der akfL am Standort Wolfsdorf im Referenzszenario „Vergangenheit“ (Sz-Ve) im Vergleich der Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

akfL [€ / ha]	Winterweizen		Wintergerste		Winterraps		Anbauverhältnis	
	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE	WETTREG	ENSEMBLE
Mittelwert	1207	1156	980	960	1254	1147	1149	1095
10%-Quantil	639	605	564	537	707	584	756	734

Vor diesem Hintergrund beschreibt Abbildung 44 die Veränderung des Mittelwertes der akfL zwischen den Untersuchungsszenarien im Vergleich der beiden Klimamodellansätze.

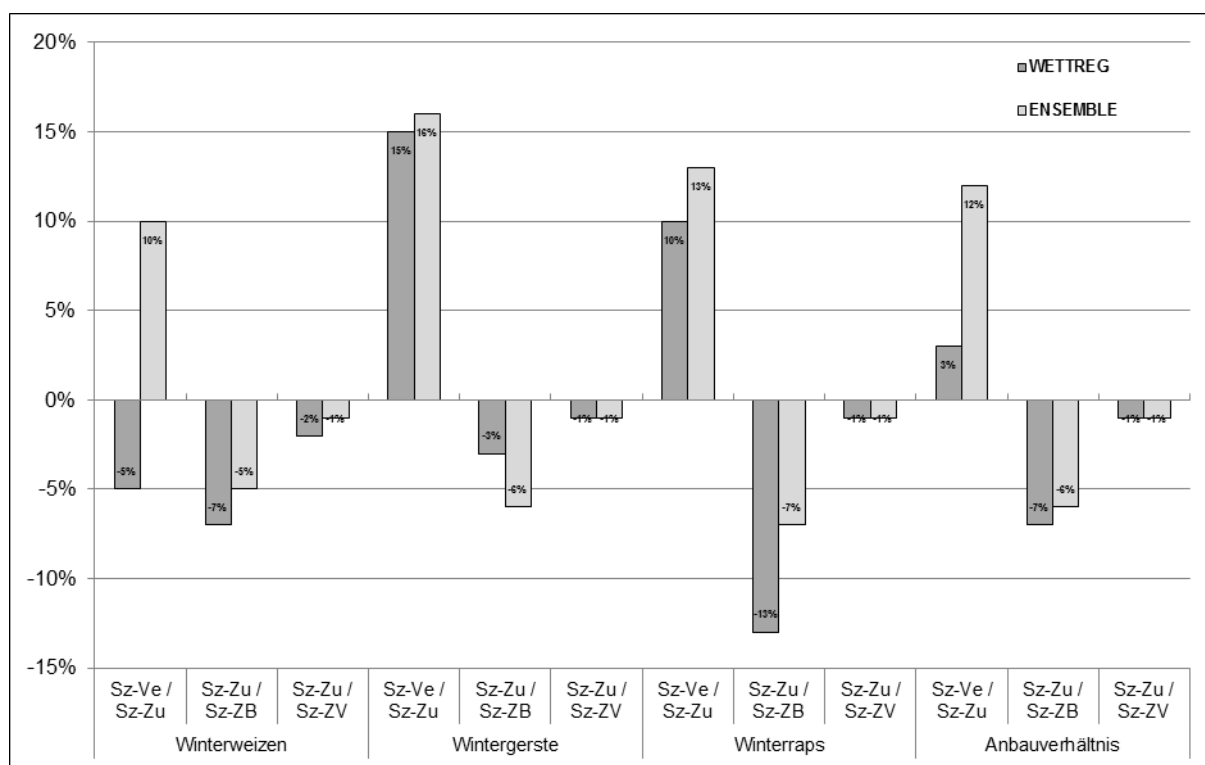


Abbildung 44: Veränderung des Mittelwertes der akfL am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Zwischen den beiden Ansätzen ergibt sich eine gegenläufige Entwicklung lediglich beim Winterweizen im *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu). Während im WETTREG-Ansatz der Mittelwert der akfL um 6 % zurückgeht, steigt er im ENSEMBLE-Ansatz um 10 % an.

Beim Wert für das 10%-Quantil zeigt Abbildung 45 im ENSEMBLE-Ansatz bei der Gegenüberstellung der Referenzszenarien „Vergangenheit“ und „Zukunft“ (Sz-Ve / Sz-Zu) gegenläufige Entwicklungen bei Winterweizen sowie im Anbauverhältnis. Zudem weist bei der *Versicherung* (Sz-Zu / Sz-ZV) der Quantilwert in entgegengesetzte Richtungen, wenn auch jeweils nur in geringem Umfang.

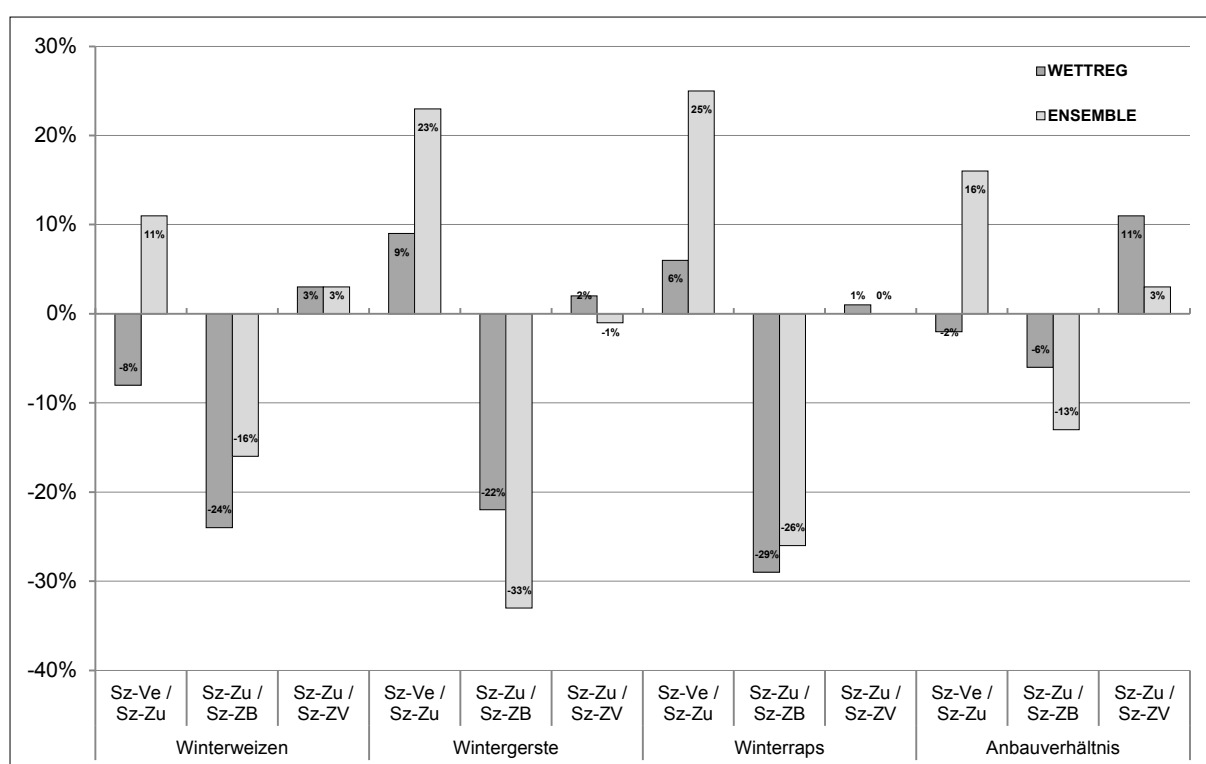


Abbildung 45: Veränderung des 10%-Quantils der akfL am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Klimamodellansätze sowie der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Darstellung)

Schließlich stellt Abbildung 46 das **Sicherheitsäquivalent** in den beiden Klimamodellansätzen bei mittlerer Risikoaversion gegenüber. Ein umfassender Überblick über die Entwicklung des Sicherheitsäquivalents auf Grundlage des ENSEMBLE-Ansatzes findet sich im Anhang (vgl. Abbildung A_IV. 7, S. 174).

In beiden Klimamodellansätzen stellt sich bei allen Kulturen sowie im Anbauverhältnis die *Versicherungsvariante* (Sz-ZV) als vorzüglichste Handlungsalternative heraus. Darauf folgt

das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu), das höhere Werte für das Sicherheitsäquivalent aufweist als die Durchführung von *Bewässerungsmaßnahmen* (Sz-ZB).

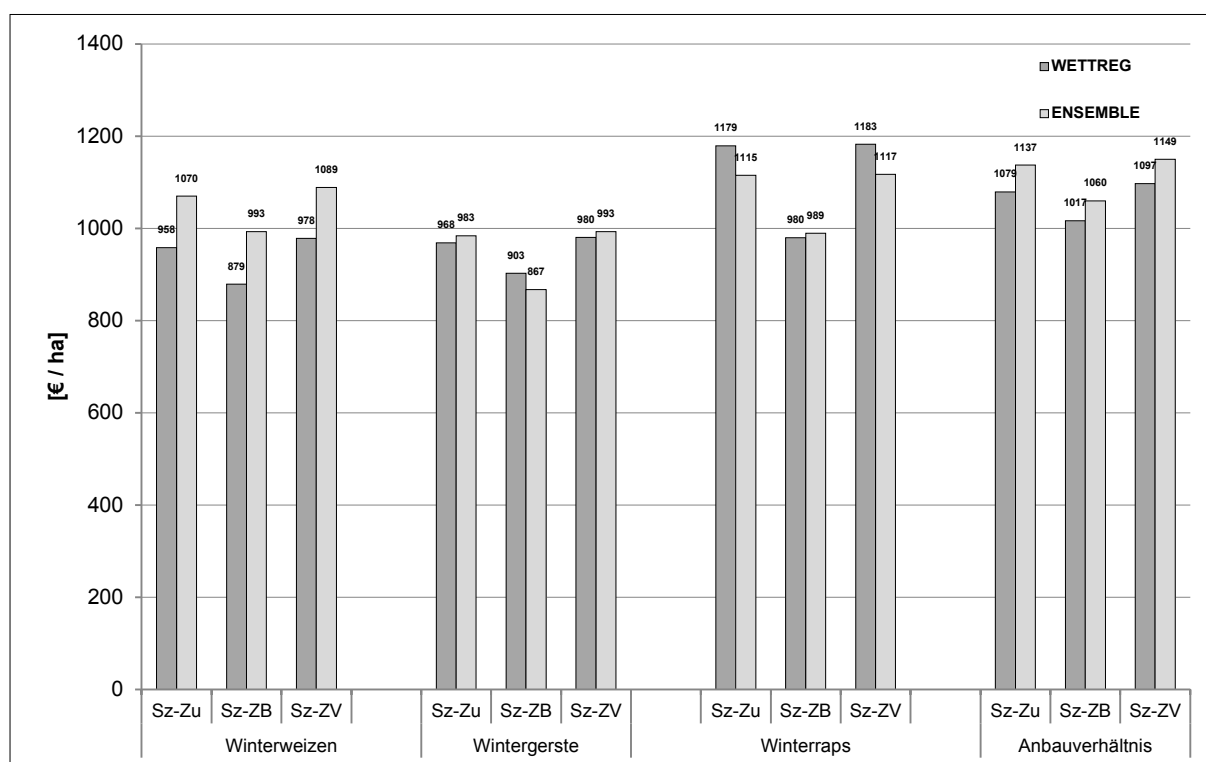


Abbildung 46: Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoeinstellung am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Untersuchungsszenarien und Klimamodellansätze
(Quelle: eigene Darstellung)

Insgesamt betrachtet fällt der Unterschied in der Höhe des Sicherheitsäquivalents zwischen den beiden Ansätzen bei Winterweizen am deutlichsten aus. Im Gegensatz dazu liegen die Werte bei der Wintergerste vergleichsweise nahe beieinander.

3.1.3.8 Zwischenfazit

Die nachfolgende Zusammenfassung und Interpretation zielt darauf ab, **Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den ökonomischen Ergebnissen ausgehend von den beiden Klimamodellansätzen** aufzuzeigen. Im Blickpunkt stehen **Risikoprofil und Sicherheitsäquivalent** der anpassungskostenfreien Leistung in den verschiedenen Untersuchungsszenarien.

Insbesondere wird überprüft, inwieweit die im WETTREG-Ansatz (vgl. FELBERMEIR 2013, S. 97 ff.) ermittelten Schlussfolgerungen auch im ENSEMBLE-Ansatz ihre Gültigkeit behalten. Diese Vorgehensweise trägt den mit Klimamodellierungen einhergehenden Unsicherheiten Rechnung, indem sie erkennen lässt, welchen Einfluss die Klimamodelle auf die Ergebnisse der nachfolgenden Modelle ausüben.

Risikoprofil

Abbildung 47 und Abbildung 48 **fassen** die Entwicklung der anpassungskostenfreien Leistung im ENSEMBLE-Ansatz **zusammen**.

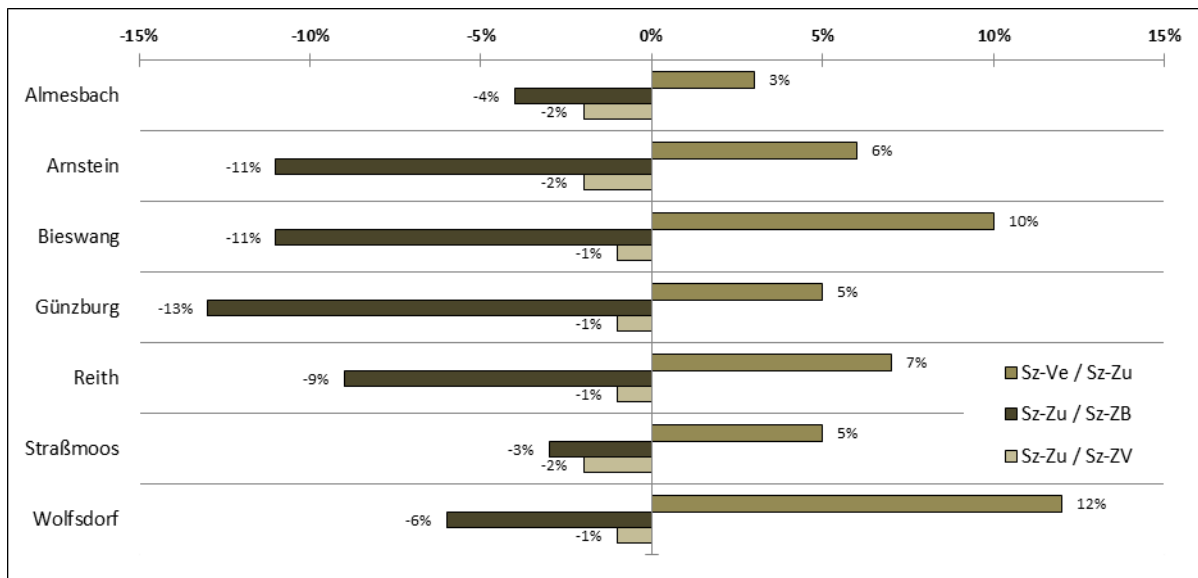


Abbildung 47: Prozentuale Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Als Kennzahl für die Beurteilung der Wirtschaftlichkeit dient der arithmetische Mittelwert. Das Produktionsrisiko veranschaulicht der Wert des 10%-Quantils. Um einen prägnanten Überblick zu erhalten, dient jeweils das standorttypische Anbauverhältnis als Referenz.

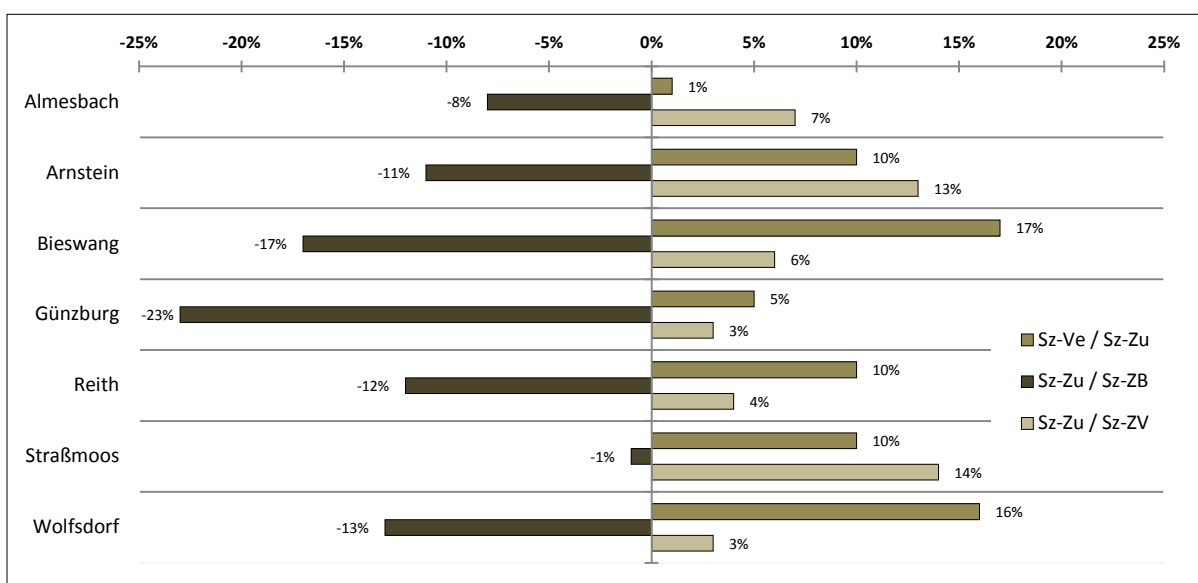


Abbildung 48: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Im ENSEMBLE-Ansatz verbessern sich sowohl die Rentabilität als auch das Risiko der Produktion durch die *Veränderung der Klimaparameter* (Vergleich Sz-Ve und Sz-Zu). Die beiden Anpassungsmaßnahmen dagegen verringern die Wirtschaftlichkeit der Produktion, wobei der Rückgang des arithmetischen Mittelwertes bei der *Bewässerung* (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZB) deutlicher ausfällt als bei der *Versicherung* (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZV). Gleichzeitig reduziert die Versicherung das Produktionsrisiko während es die Bewässerung sogar noch verstärkt.

Zur **Interpretation** werden die in Abbildung 49 und Abbildung 50 zusammengefassten Ergebnisse des WETTREG-Ansatzes denen des ENSEMBLE-Ansatzes (Abbildung 47 und Abbildung 48) gegenübergestellt.

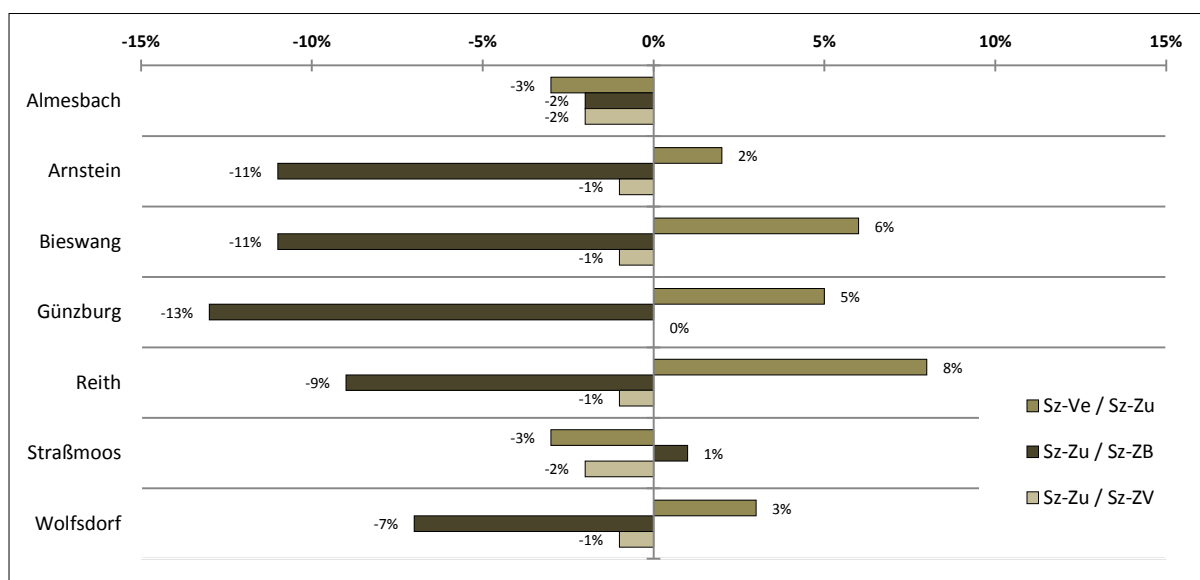


Abbildung 49: Prozentuale Veränderung des Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: FÉLBERMEIR 2013, S. 97 ff., Datenbasis WETTREG)

Abbildung 49 zeigt, dass sich die Wirtschaftlichkeit der Produktion mit Ausnahme der Standorte Almesbach und Straßmoos im *Vergleich vergangener (Sz-Ve) und zukünftiger (Sz-Zu) Klimabedingungen* verbessert. Dagegen verschlechtert die *Bewässerung* (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZB) an allen Standorten die Rentabilität der Produktion außer in Straßmoos. Hier bleibt der Mittelwert fast unverändert. Geringfügig besser schneidet die *Versicherung* ab (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZV). Sie schmälert den wirtschaftlichen Erfolg in Almesbach und Straßmoos. An den übrigen Standorten hat sie nur geringen Einfluss.

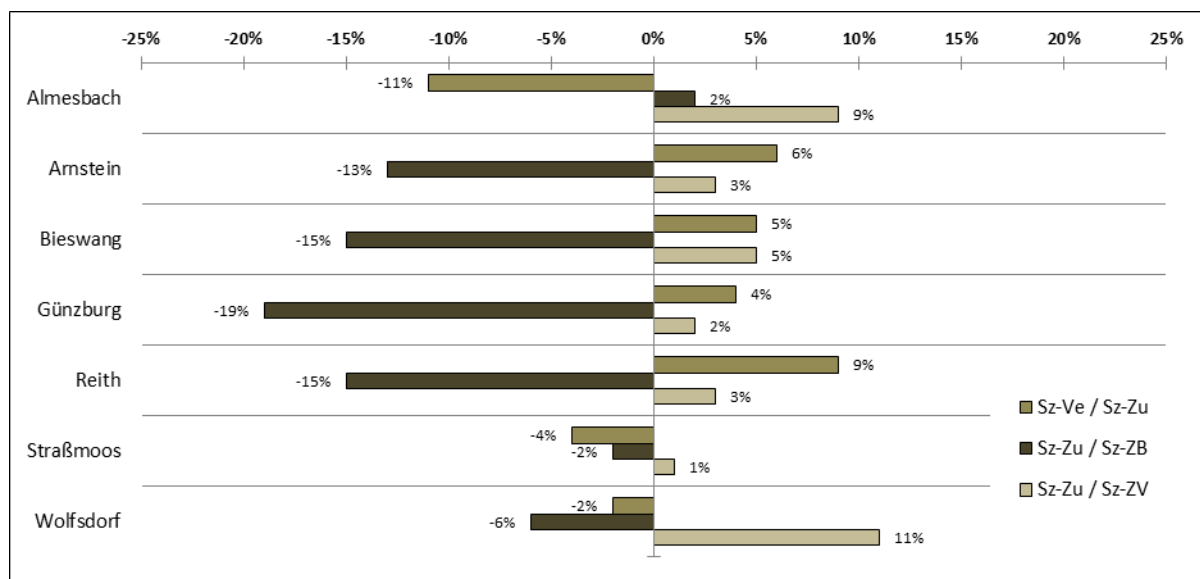


Abbildung 50: Prozentuale Veränderung des 10%-Quantils der anpassungskostenfreien Leistung an den Standorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: FELBERMEIR 2013, S. 97 ff., Datenbasis WETTREG)

Die Veränderung des Produktionsrisikos in Abbildung 50 zeigt ein differenziertes Bild. Im Vergleich der Szenarien *Vergangenheit (Sz-Ve)* und *Zukunft (Sz-Zu)* nimmt das Risiko an den Standorten Almesbach, Straßmoos und Wolfsdorf zu, an den Standorten Arnstein, Bieswang, Günzburg und Reith nimmt es ab. Die *Bewässerung* (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZB) verstärkt das Produktionsrisiko an allen Standorten mit Ausnahme von Almesbach. Im Gegensatz dazu trägt die *Versicherung* (Vergleich Sz-Zu und Sz-ZV) an allen Standorten zu einer Reduzierung des Risikos bei. Nur in Straßmoos führt sie nicht zu einer deutlichen Verbesserung.

Beim Vergleich der Entwicklungen in den beiden Ansätzen gilt es zu beachten, dass sich die anpassungskostenfreie Leistung der einzelnen Kulturen am Standort jeweils unterscheiden kann, auch wenn sich zwischen den Anbauverhältnissen keine Unterschiede ergeben. Dennoch spiegeln sich im Anbauverhältnis letztlich die Ergebnisse der verschiedenen Kulturen gemäß ihrer standorttypischen Gewichtung wider.

Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit und das Produktionsrisiko lässt sich für den Vergleich der Untersuchungsszenarien folgendes festhalten:

Die Entwicklung des arithmetischen Mittelwertes der anpassungskostenfreien Leistung zeigt im *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu) an den Standorten Almesbach und Straßmoos in entgegengesetzte Richtungen. Während an diesen Standorten im WETTREG-Ansatz die Werte zurückgehen, nehmen sie im ENSEMBLE-Ansatz im vergleichbaren Umfang zu.

Das *Szenario „Bewässerung“* (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZB) führt wiederum am Standort Straßmoos zu gegenläufigen Entwicklungen. Im WETTREG-Ansatz steigt die anpassungskostenfreie Leistung des Anbauverhältnisses um 1 %, dagegen sinkt sie im ENSEMBLE-Ansatz um 3 %.

Die *Versicherungsvariante* (Vergleich Sz-Zu / Sz-ZV) führt in beiden Ansätzen außer in Arnstein und Günzburg zu fast identischen Veränderungen.

Bei der Entwicklung des Wertes für das 10%-Quantil ergeben sich die meisten Unterschiede beim *Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen* (Sz-Ve / Sz-Zu). Wie auch bereits beim Mittelwert verschlechtern sich die Ergebnisse im WETTREG-Ansatz, wohingegen sie sich im ENSEMBLE-Ansatz verbessern. Betroffen von dieser gegenläufigen Entwicklung sind die Standorte Almesbach, Straßmoos und Wolfsdorf.

Der Einsatz der *Bewässerung* (Sz-Zu / Sz-ZB) führt an den Standorten Almesbach und Straßmoos zu gegenläufigen Entwicklungen. Jedoch fällt der Unterschied in Straßmoos verschwindend gering aus.

Abermals die geringsten Abweichungen zwischen den beiden Klimamodellansätzen weist die *Versicherung* (Sz-Zu / Sz-ZV) auf. Nur am Standort Straßmoos verändert sich der Wert im WETTREG-Ansatz kaum, während er im ENSEMBLE-Ansatz deutlich ansteigt.

Insgesamt betrachtet ergeben sich beim Risikoprofil der Zielgröße sowohl bei den einzelnen Kulturen als auch im Anbauverhältnis *in der Mehrzahl der untersuchten Fälle zwischen den beiden Klimamodellansätzen keine gegenläufigen Entwicklungen*. Am ehesten unterscheiden sich die Standorte Almesbach und Straßmoos in den Ergebnissen der beiden Ansätze, insbesondere bei der Entwicklung des 10%-Quantils. Ausschlaggebend hierfür ist die Ertragsentwicklung der Kulturen und deren standorttypische Gewichtung bei der Berechnung der anpassungskostenfreien Leistung im Anbauverhältnis.

Darüber hinaus zeigt der ENSEMBLE-Ansatz auch bei den Einzelkulturen Ergebnisse, die deutliche Veränderungen aufweisen, wie sie bereits der WETTREG-Ansatz gezeigt hat. Daneben treten aber auch weniger identische Entwicklungen zu Tage, die einen Hinweis auf die modellbedingte Bandbreite der Ergebnisse geben.

Sicherheitsäquivalent

Für das Sicherheitsäquivalent bei mittlerer Risikoaversion lässt sich bei den Ergebnissen des ENSEMBLE-Ansatzes an den Untersuchungsstandorten folgendes **zusammenfassend** festhalten:

- Die *Versicherung* (Sz-ZV) führt sowohl bei den Kulturen als auch im Anbauverhältnis in allen untersuchten Fällen zum größten Nutzen.
- Als zweitbeste Variante erweist sich das *Szenario ohne Anpassung* (Sz-Zu). Der Unterschied zur Versicherungslösung fällt in manchen Fällen unwesentlich aus.
- Die *Bewässerung* (Sz-ZB) stiftet in allen Fällen den geringsten Nutzen.

Unabhängig von Untersuchungsszenario und Standort liegt das Sicherheitsäquivalent des Anbauverhältnisses stets auf einem günstigeren Niveau als das der Einzelkulturen.

Zur **Interpretation** werden die Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes denen des WETTREG-Ansatzes gegenübergestellt.

Dabei zeigt der Überblick über alle Standorte, dass der WETTREG-Ansatz im Vergleich zum ENSEMBLE-Ansatz in der Mehrzahl der untersuchten Fälle größere Sicherheitsäquivalente erreicht. Zwar ergibt sich insgesamt betrachtet im ENSEMBLE-Ansatz eine günstigere Entwicklung als im WETTREG-Ansatz. Jedoch weist der WETTREG-Ansatz die besseren Ausgangswerte auf, die sich letztlich im Risikoprofil und somit auch im Sicherheitsäquivalent der verschiedenen Szenarien niederschlagen.

In beiden Ansätzen stiftet die Versicherungsvariante (Sz-ZV) den meisten Nutzen. Eine Ausnahme stellt die Bewässerung (Sz-ZB) der Wintergerste im WETTREG-Ansatz dar. Denn an den Standorten Almesbach und Arnstein realisiert der Einsatz der Bewässerung größere Sicherheitsäquivalente als die Versicherung. Insbesondere am Standort Arnstein zeichnet hierfür die enorme Verbesserung der Ertragsleistung verantwortlich, vor allem im Bereich der niedrigen Werte.

Zudem lässt sich am Standort Arnstein nachverfolgen, wie sich unterschiedliche Werte der Klimaparameter letztlich bis hin zum Sicherheitsäquivalent auswirken. So führt im WETTREG-Ansatz (= weniger Niederschlag im Zeitraum 2020 - 2049) die Bewässerung der Wintergerste zum größten Sicherheitsäquivalent. Dagegen stiftet im ENSEMBLE-Ansatz (= mehr Niederschlag im Zeitraum 2020 - 2049) die Versicherung den größeren Nutzen.

Alles in allem bestätigen auch beim Sicherheitsäquivalent in den meisten Fällen die Ergebnisse im ENSEMBLE-Ansatz die bereits im WETTREG-Ansatz ermittelten Resultate.

Schlussendlich zeigt der Vergleich der beiden Ansätze, dass modellbedingt unterschiedliche Ausgangswerte und Veränderungen bei den Klimaparametern resultieren können. Diese führen jedoch in den Ergebnissen nachfolgender Modelle nicht zwangsläufig zu Widersprüchen. Dass die Resultate im WETTREG- und ENSEMBLE-Ansatz vergleichsweise nahe beieinander liegen, stärkt vielmehr deren Verlässlichkeit.

3.2 Bewertung ausgewählter Einflussfaktoren auf die Ertragsbildung

Während des Pflanzenwachstums nehmen sowohl biotische und abiotische Faktoren als auch Kulturmaßnahmen Einfluss auf die Ertragsbildung. Anhand ausgewählter Beispiele verdeutlichen die folgenden Abschnitte deren Bedeutung für die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung.

Zum einen kristallisiert sich im Rahmen der Klimawandeldiskussion die Wirkung des **CO₂-Dünungseffektes** als entscheidender Parameter für die zukünftige Höhe der Erträge heraus. Dessen Auswirkungen auf ausgewählte Kulturen beschreibt Abschnitt 3.2.1.

Zum anderen stellt die Verfügbarkeit von Wasser den zweiten wichtigen Einflussfaktor auf die Ertragsleistung dar. An dieser Stelle kommt der Standort und somit die durch das Bodenprofil definierte nutzbare Feldkapazität zum Tragen. Vor diesem Hintergrund thematisiert Abschnitt 3.2.2 den Einfluss der **Standortgüte** unter dem Aspekt der Wasserspeicherfähigkeit.

Schließlich beschäftigt sich Abschnitt 3.2.3 mit der flexiblen **Terminierung** der Aussaatzeitpunkte. Im Vergleich zu starren Bewirtschaftungsmustern stellen sie eine praxisnahe und kostengünstige Anpassung an den Klimawandel dar. Im Gegensatz zu den realen Gegebenheiten im landwirtschaftlichen Alltag steht im Pflanzenwachstumsmodell für die Durchführung der Aussaat jedoch die modellierte Witterung des Klimamodells als im Vorhinein sicher bekannte Bestimmungsgröße zur Verfügung.

Als Referenz für die Darstellung der beschriebenen Einflussfaktoren dient der **Untersuchungsstandort Arnstein** in Unterfranken. Im Vergleich zu den anderen Standorten handelt es sich dabei um den wärmsten (vgl. Abschnitt 3.1.1.2, S. 55 f.). Dementsprechend lassen sich dort die deutlichsten Ertragseffekte erwarten. Darüber hinaus deckt der Standort ein breites Spektrum verschiedener Kulturarten ab (vgl. Tabelle 1, S. 25). Beim Klimamodell dient der WETTREG-Ansatz als Ausgangspunkt der Modellierungen.

Die Beschreibung der Ergebnisse stellt die Situation der vergangenen und der zukünftigen Referenzzeitscheibe gegenüber (vgl. Tabelle 3, S. 39). Da die genannten Einflussfaktoren keine zusätzlichen Kosten verursachen, beschränken sich die Ergebnisse auf die Zielgröße des Naturalertrages. In diesem Fall schlägt sich eine Veränderung des Naturalertrages im selben Umfang in der anpassungskostenfreien Leistung nieder.

3.2.1 CO₂-Düngungseffekt

Verschiedene Studien zeigen, dass die Wirkung des CO₂-Düngungseffektes einen entscheidenden Einfluss darauf nimmt, ob in Zukunft mit eher zunehmenden oder eher abnehmenden Erträgen zu rechnen ist (EITZINGER ET AL. 2009, S. 159 ff.).

Ursache für diesen Effekt sind steigende Kohlendioxidgehalte in der Atmosphäre. Zum einen verbessert sich dadurch die Kohlenstoffversorgung der Pflanzen (*direkte Wirkung*). Hiervon profitieren in erster Linie C₃-Pflanzen, wie z.B. Getreide. Zum anderen können Pflanzen bei erhöhter Kohlendioxidkonzentration das zur Verfügung stehende Wasser effizienter zum Biomasseaufbau nutzen (*indirekte Wirkung*).

Sowohl die direkte als auch die indirekte Wirkung werden im Pflanzenwachstumsmodell HERMES berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.3, S. 30 ff.). Gleichzeitig bietet das Modell die Möglichkeit, die Effekte unabhängig voneinander zu betrachten. Im ersten Schritt beschreibt Abschnitt 3.2.1.1 die Ertragsergebnisse unter Berücksichtigung beider Effekte. Darauf aufbauend stellt Abschnitt 0 die Resultate dar, wenn nur die direkte Wirkung des CO₂-Effektes in die Ertragssimulation integriert wird. Abschließend zeigt Abschnitt 0 die Ergebnisse unter der Annahme, dass weder der direkte noch der indirekte CO₂-Effekt Einfluss auf die Ertragsbildung ausüben.

3.2.1.1 direkter und indirekter CO₂-Effekt

Abbildung 51 beschreibt die Veränderung des Naturalertrages zwischen den beiden Referenzzeitscheiben am Standort Arnstein, wenn sowohl der direkte als auch der indirekte CO₂-Effekt berücksichtigt werden.

Beim *durchschnittlichen Ertragsniveau* ergeben sich bei Winterweizen und Sommergerste kaum Veränderungen, während beim Silomais Rückgänge und bei Wintergerste und Winterraps Zunahmen zu verzeichnen sind.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Blick auf das *10%-Quantil als Maßstab für das Ertragsrisiko*: beim Silomais verschlechtert sich die Situation, bei der Sommergerste ändert sich kaum etwas, bei Winterraps, Wintergerste und Winterweizen verringert sich das Ertragsrisiko.

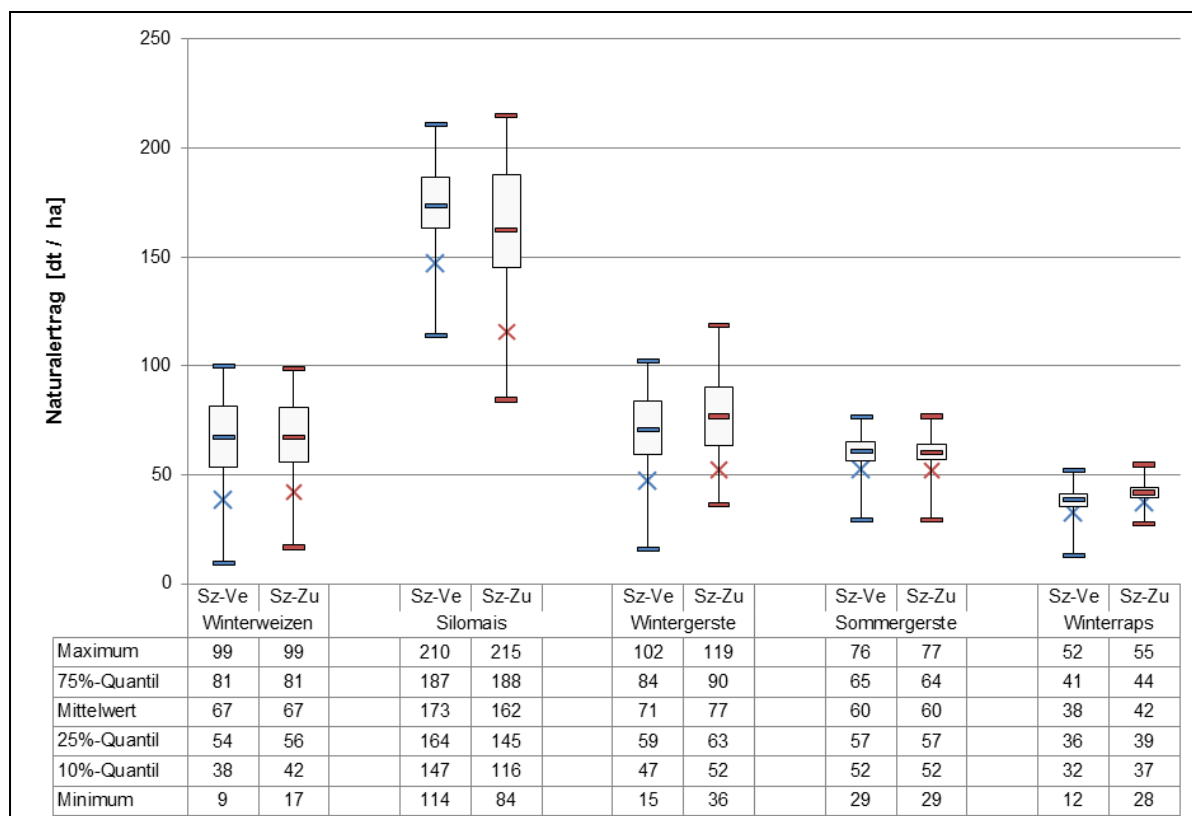


Abbildung 51: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO₂-Düngungseffekt
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Kommt unter zukünftigen Bedingungen der CO₂-Düngungseffekt voll zum Tragen, erweisen sich besonders Wintergerste und Winterraps als Gewinner der Klimaänderung, während die C₄-Pflanze Mais eher als Verlierer gesehen werden kann.

3.2.1.2 direkter CO₂-Effekt

Abbildung 52 zeigt die Ergebnisse der Ertragssimulation, wenn der indirekte CO₂-Effekt, also die Verbesserung der Wassernutzungseffizienz im Pflanzenwachstumsmodell nicht berücksichtigt wird.

Im Vergleich der beiden Referenzzeiträume resultieren *beim durchschnittlichen Ertragsniveau* Rückgänge bei Weizen, Mais und Sommergerste. Bei Raps und Wintergerste nehmen die Erträge zu, wenn auch nicht so deutlich wie bei Berücksichtigung beider CO₂-Effekte.

Dieselben Tendenzen kommen auch beim *Ertragsrisiko* zum Vorschein. Im Vergleich zum Mittelwert fallen die Änderungen jedoch deutlicher aus. Als Ausnahme verbessert sich die Risikosituation beim Winterweizen, obwohl der Durchschnittsertrag abnimmt.

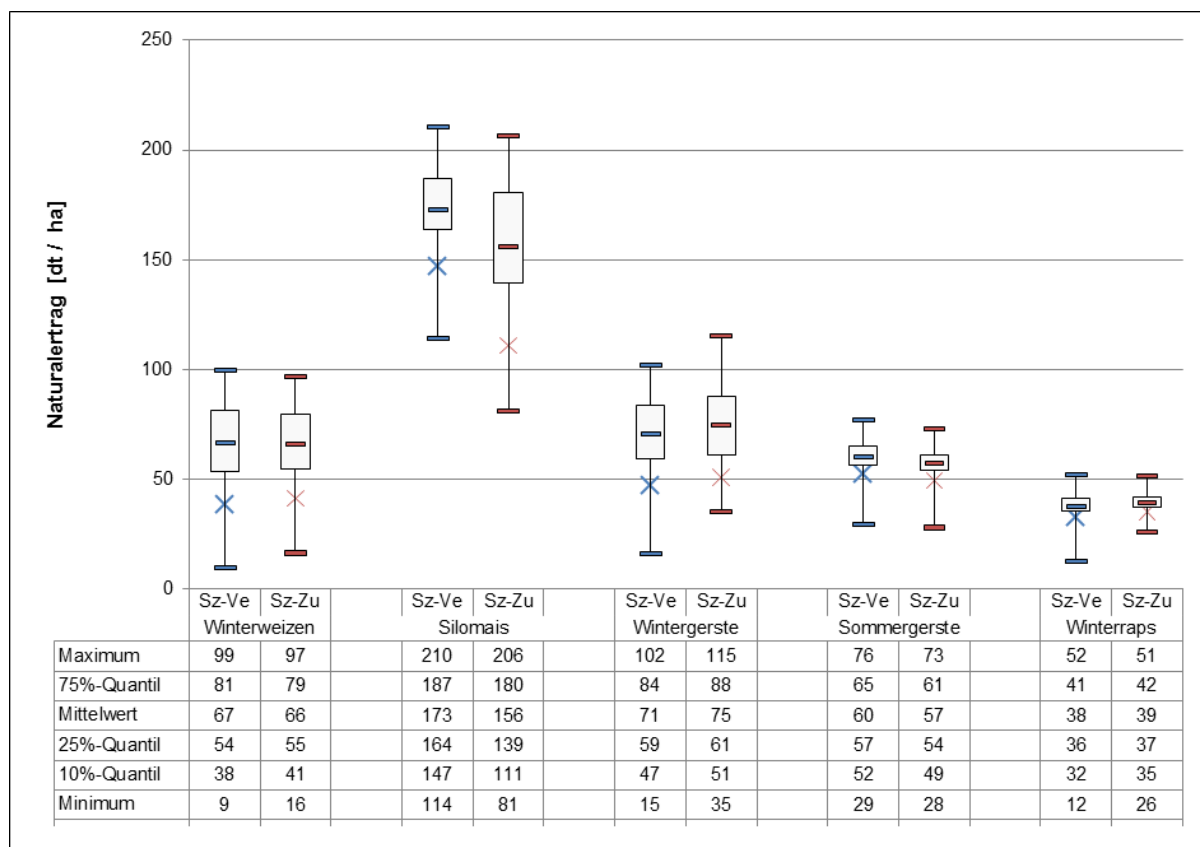


Abbildung 52: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO₂-Düngungseffekt
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Wenn man nur den direkten CO₂-Düngungseffekt bei der Modellierung berücksichtigt, verschlechtert sich die Situation im Vergleich zur Wirkung beider Düngungseffekte. Ertragszunahmen fallen weniger deutlich aus, Ertragsrückgänge dagegen umso stärker.

3.2.1.3 kein CO₂-Effekt

Abbildung 53 verdeutlicht die Ertragsergebnisse, wenn das Vorhandensein von Kohlendioxid unter zukünftigen Bedingungen keinen Einfluss auf die Ertragsbildung nimmt. Als Konsequenz ergeben sich sowohl beim *Mittelwert* als auch beim *Wert für das 10%-Quantil* bei allen Kulturen Rückgänge im Vergleich der beiden Referenzzeitscheiben. Dabei schneiden Silomais und Sommergerste am schlechtesten ab, wohingegen sich bei der Wintergerste nur geringe Abnahmen abzeichnen.

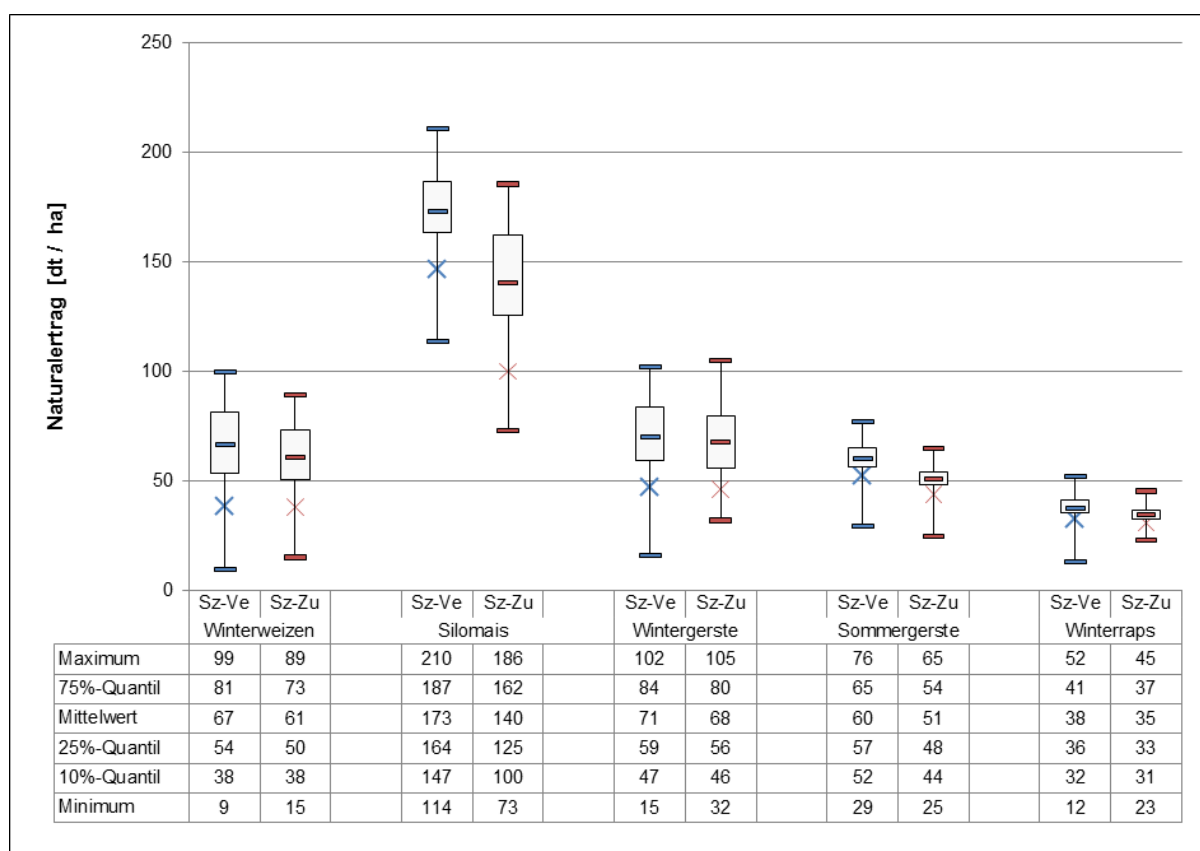


Abbildung 53: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein unter Berücksichtigung von direktem und indirektem CO₂-Düngungseffekt
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Sollte unter zukünftigen Klimabedingungen der CO₂-Effekt nicht zum Tragen kommen, nehmen die durchschnittlichen Erträge ab und das das Ertragsrisiko zu.

3.2.2 Standortgüte

Um den Einfluss der Standortgüte auf die Ertragsergebnisse einschätzen zu können, werden nachfolgend zwei unterschiedliche Bodenprofile am Standort Arnstein gegenübergestellt. Tabelle 26 beschreibt am Beispiel einer Fahlerde aus Löß ein Bodenprofil mit hoher Wasserspeicherfähigkeit, während Tabelle 27 am Beispiel einer Rendzina aus Verwitterungsprodukten ein Bodenprofil mit niedriger Wasserspeicherfähigkeit darstellt. Informationen zu den Werten der einzelnen Bodenkenngrößen wurden der BÜK 1000 entnommen (BGR 1997). Die in den Tabellen ermittelte nutzbare Feldkapazität bemisst die Wasserspeicherkapazität am Standort. Sie bezieht sich auf die maximale effektive Durchwurzelungstiefe des Bodenprofils.

Tabelle 26: Bodenprofil mit hoher Wasserspeicherkapazität

(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von BGR 1997, Hartwich et al. 1995, S. 29 ff. und AG Boden 1994)

Arnstein - Fahlerde aus Löß							
Horizont	untere Horizont-grenze [dm]	Humusgehalt [Masse-%]	C/N-Verhältnis [%]	Bodenart (gemäß KA)	Lagerungsdichte (gemäß KA)	nutzbare Feldkapazität mm ges	Steingehalt [Volumen-%]
1	2.5	2.5	15	Ut3	2	66.3	2
2	4	1.5	-1	Ut4	3	31.5	2
3	12	0	-1	Ut4	4	126	2
4	20	0	-1	Ut4	3	-	2
maximale effektive Durchwurzelungstiefe [dm]: 11							

Die Fahlerde entspricht dem am Standort des Landessortenversuchs in Arnstein vorherrschenden Bodenprofil und bildet die Grundlage der bislang am Standort ermittelten Ertragsergebnisse.

Tabelle 27: Bodenprofil mit niedriger Wasserspeicherkapazität

(Quelle: eigene Darstellung auf Basis von BGR 1997, Hartwich et al. 1995, S. 29 ff. und AG Boden 1994)

Arnstein - Rendzina aus Verwitterungsprodukten von Kalk-, Mergel- und Dolomitgesteinen							
Horizont	untere Horizont-grenze [dm]	Humusgehalt [Masse-%]	C/N-Verhältnis [%]	Bodenart (gemäß KA)	Lagerungsdichte (gemäß KA)	nutzbare Feldkapazität mm ges	Steingehalt [Volumen-%]
1	1	15	15	Ls2	2	28	2
2	2.5	10	10	Tl	4	12.6	50
3	7.5	0	-1	Tl	5	3.3	75
4	-	-	-	-	-	-	-
maximale effektive Durchwurzelungstiefe [dm]: 4							

Die Rendzina in Tabelle 27 beschreibt das dem Untersuchungsstandort am nächsten gelegene Bodenprofil mit deutlich geringerer Wasserspeicherkapazität im Vergleich zur Fahlerde. Die räumliche Nähe der beiden Bodenprofile ermöglicht es, für die Ertragssimulation dieselben Inputdaten für das Pflanzenwachstumsmodell zu verwenden.

3.2.2.1 Fahlerde

Abbildung 54 beschreibt die Veränderung des Naturalertrages zwischen den beiden Referenzzeitscheiben am Standort Arnstein für das Bodenprofil der Fahlerde mit hoher Wasserspeicherkapazität.

Beim *durchschnittlichen Ertragsniveau* ergeben sich bei Winterweizen und Sommergerste kaum Veränderungen, während beim Silomais Rückgänge (- 6 %) und bei Wintergerste (9 %) und Winterraps (10 %) Zunahmen zu verzeichnen sind.

Ein ähnliches Bild zeigt sich beim Blick auf das *10%-Quantil als Maßstab für das Ertragsrisiko*: beim Silomais verschlechtert sich die Situation, bei der Sommergerste ändert sich kaum etwas, bei Winterraps, Wintergerste und Winterweizen verringert sich das Ertragsrisiko.

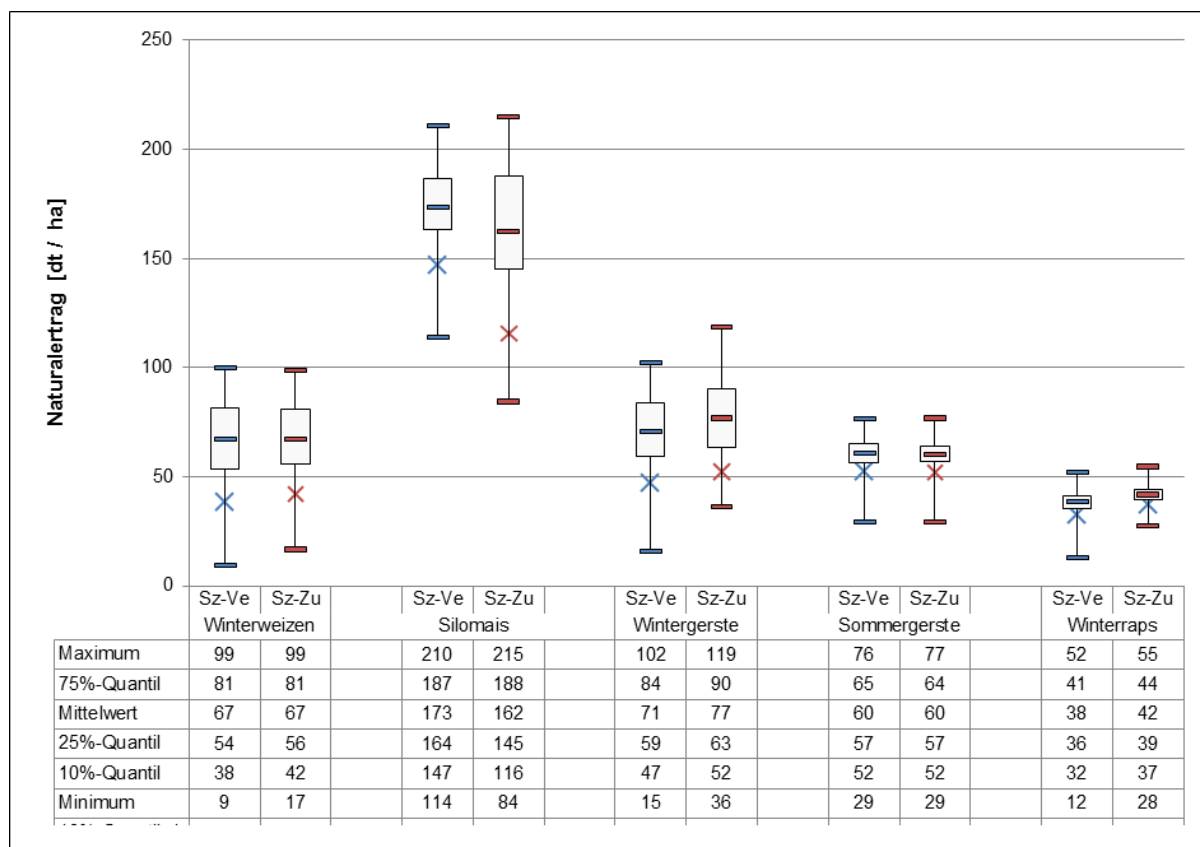


Abbildung 54: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein bei hoher Wasserspeicherkapazität
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Vor allem die Winterungen Gerste und Raps profitieren von den Bedingungen am Standort. Die Sommerungen Mais und Gerste dagegen schneiden unter zukünftigen Bedingungen schlechter ab.

3.2.2.2 Rendzina

Die Veränderung des Naturalertrages zwischen den beiden Referenzzeitscheiben am Standort Arnstein für das Bodenprofil der Rendzina mit niedriger Wasserspeicherkapazität verdeutlicht Abbildung 55.

Beim *durchschnittlichen Ertragsniveau* resultieren bei Weizen, Silomais und Sommergerste Ertragsrückgänge zwischen 4 % und 9 %. Bei Wintergerste und Raps nehmen die Erträge um 2 % bzw. 3 % zu.

Beim Wert für das *10%-Quantil als Risikomaßstab* zeigt sich ein differenzierteres Bild. Während sich die Situation bei Mais und Sommergerste verschlechtert, geht das Risiko bei Wintergerste und Raps zurück. Beim Weizen kommt es zu keiner ersichtlichen Veränderung.

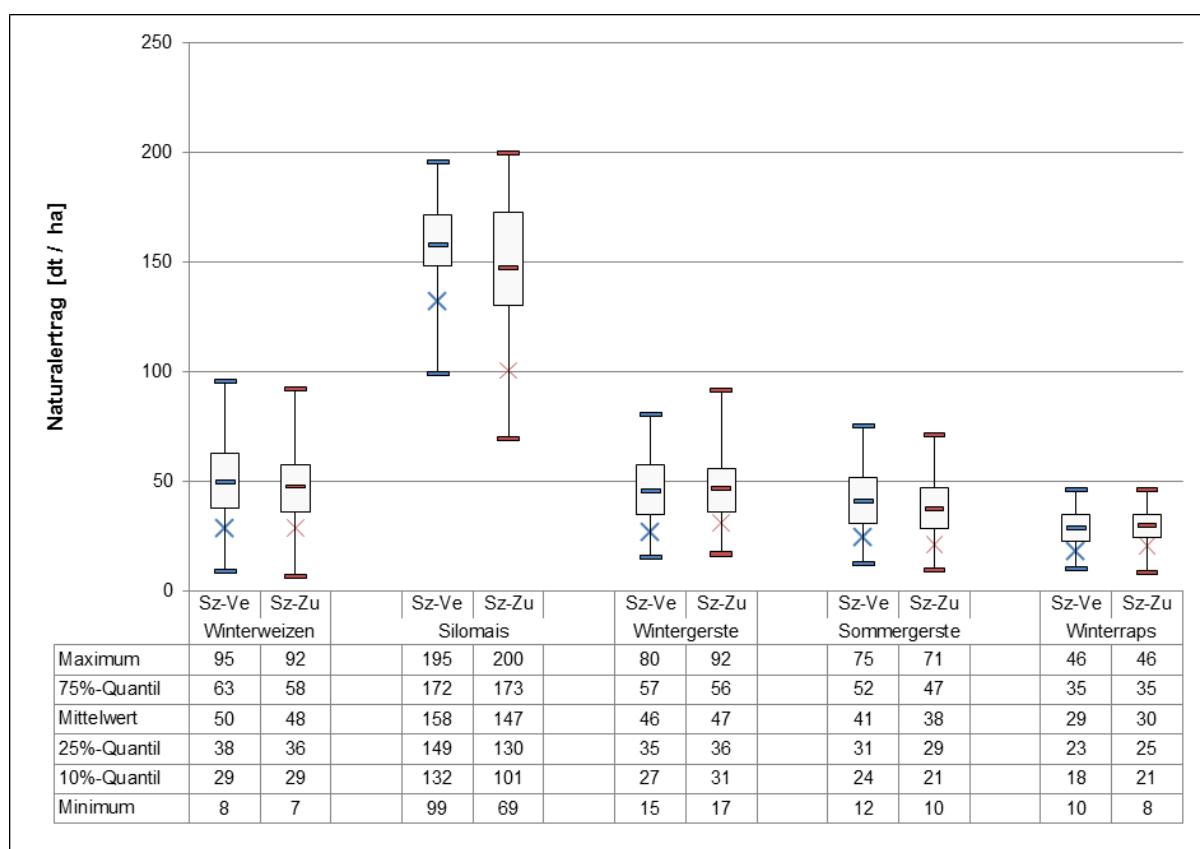


Abbildung 55: Veränderung des Naturalertrages am Untersuchungsstandort Arnstein bei niedriger Wasserspeicherkapazität
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Im Vergleich der beiden Bodenprofile zeigt sich, dass die Durchschnittserträge bei niedrigerer nutzbarer Feldkapazität im Fall der Rendzina zwischen 26 % (beim Winterraps) und 37 % (bei der Sommergerste) geringer ausfallen als bei hoher Wasserspeicherkapazität im Falle der

Fahlerde. Noch deutlicher fallen die Werte des 10%-Quantils ab. Die Rendzina mit geringer nutzbarer Feldkapazität führt zu einem deutlich höheren Ertragsrisiko.

Von der geringeren Verfügbarkeit von Wasser sind vor allem die Sommerungen betroffen. Dagegen können die Winterungen im Verlauf ihrer Kulturzeit auf dem Feld von Niederschlägen profitieren, die im Winter und Frühjahr fallen, bei geringer Wasserspeicherkapazität den Sommerungen jedoch nicht mehr ertragswirksam zur Verfügung stehen.

3.2.3 Saatzeitpunkte

Die Anpassung der Saatzeitpunkte zielt darauf ab, die potentielle Vegetationsperiode eines Jahres möglichst optimal für das Pflanzenwachstum und somit für die Ertragsbildung auszunutzen. Im Rahmen der bislang durchgeführten Ertragssimulationen wurden im Modellzeitraum fixe Aussaattermine unterstellt, die sich kulturartspezifisch am Erwartungswert des Aussaatdatums der Landessortenversuche orientierten.

Um die Aussaattermine im Modell jahresspezifisch flexibel zu gestalten wurden folgende Annahmen getroffen:

Als **Vegetationstage** gelten Tage, an den die Tagesdurchschnittstemperatur mindestens 5°C beträgt ($T_{\theta} \geq 5^{\circ}\text{C}$).

Dementsprechend beginnt die Vegetation, wenn die Tagesdurchschnittstemperatur an mindestens drei aufeinander folgenden Tagen über 5°C ansteigt. Der dritte Tag stellt für Sommergerste den Tag der Aussaat dar. Im Fall von Mais erfolgt die Aussaat frühestens ab Mitte April, wenn die Bodentemperatur an drei aufeinanderfolgenden Tagen einen Wert von 8°C überschreitet.

Für die Bestimmung der Aussaattermine der Winterungen ist das Ende der Vegetationsperiode von Bedeutung. Die Vegetation im Modell endet, wenn die Tagesdurchschnittstemperatur an mindestens drei aufeinander folgenden Tagen unter 5°C fällt. Folgen daraufhin zu einem späteren Zeitpunkt nochmals Tage mit höheren Temperaturen, dann verlängern sie die Vegetationsperiode nur unter der Bedingung, dass die 5°C -Grenze mindestens an drei aufeinander folgenden Tagen überschritten wird. Zudem muss der relevante Zeitraum spätestens am 30.11. beginnen.

Anhand der realen Daten der Landessortenversuche wurde die **Temperatursumme** bestimmt, die bei den Winterungen zwischen dem Datum der Aussaat und dem Datum des Vegetationsendes in den Jahren 1997 bis 2010 jeweils verstrichen ist. Für die Modellierungen wird angenommen, dass der Mittelwert der Temperatursumme dieser 14 Jahre auch in Zukunft zwischen Aussaat und Vegetationsende liegen muss.

In der Realität kann das **Vegetationsende** jedoch erst im Nachhinein mit Gewissheit bestimmt werden. Deshalb wird unterstellt, dass im Zuge der Aussaatplanung der Mittelwert der vergangenen drei Jahre als Referenz für das im konkreten Jahr zu erwartende Vegetationsende herangezogen wird. Drei Jahre stellen in diesem Zusammenhang eine Zeitspanne dar, die kurzfristige Verschiebungen des Vegetationsendes nach vorne bzw. hinten zwar berücksichtigt, jedoch nicht überbewertet.

Abbildung 56 beschreibt die Veränderung des Naturalertrages der Kulturen am Standort Arnstein, wenn die Aussaatzeitpunkte unter Berücksichtigung obiger Annahmen flexibel an den Witterungsverlauf angepasst werden.

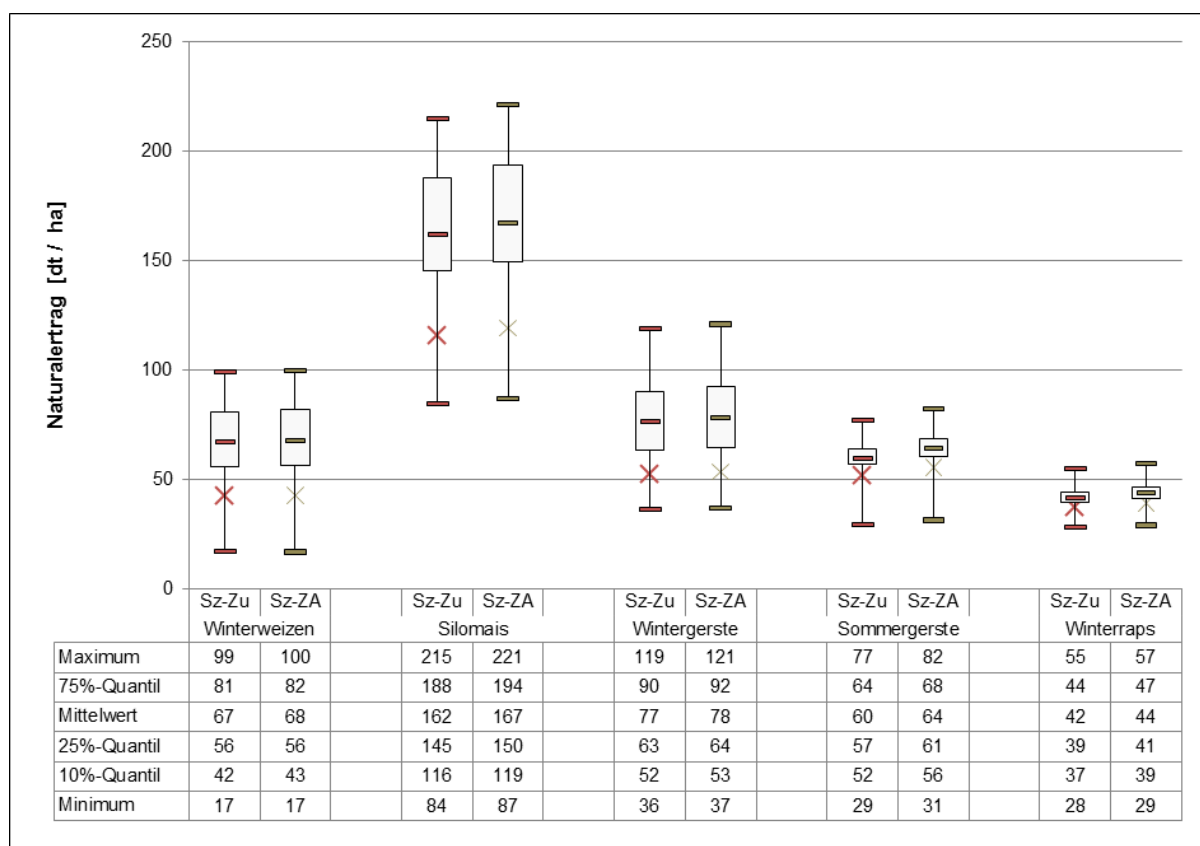


Abbildung 56: Veränderung des Naturalertrages am Standort Arnstein aufgrund witterungsabhängiger Anpassung der Aussaattermine
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis WETTREG)

Insgesamt betrachtet verbessert sich das Ertragsgeschehen bei allen Kulturen sowohl mit Blick auf das *durchschnittliche Ertragsniveau* als auch mit Blick auf das *Ertragsrisiko*. Die Sommerungen profitieren spürbarer von der nach-vorne-Verlagerung der Aussaattermine als die Winterungen. Mit rund 7 % steigt das Ertragsniveau bei der Sommergerste am deutlichsten an.

Abschließend lässt sich bei der Bewertung der ausgewählten Einflussfaktoren für den Untersuchungsstandort Arnstein folgendes festhalten:

- den deutlichsten Effekt auf das Ertragsgeschehen übt die Wasserspeicherkapazität des Standortes aus. Eine höhere nutzbare Feldkapazität führt zu einem höheren Ertragsniveau.
- die untersuchten Sommerungen reagieren sowohl auf die Standortgüte als auch auf die Anpassung der Saatzeitpunkte deutlicher als die Winterungen. Eine bessere Wasserspeicherkapazität und eine Vorverlegung der Aussaattermine schlagen sich in höheren Erträgen nieder.
- sollte unter zukünftigen Klimabedingungen der CO₂-Effekt nicht zur Wirkung kommen, würde sich das Ertragsgeschehen insgesamt verschlechtern. Auch bei Winterungen wäre in der Folge mit abnehmenden Erträgen und zunehmenden Ertragsrisiken zu rechnen.

4 Diskussion

Klimafolgenabschätzungen sind mit vielschichtigen Unsicherheiten verbunden. Nicht nur die Aussagen zur Klimaänderung an sich sind davon betroffen, sondern auch die Ermittlung und die Beurteilung möglicher Auswirkungen.

Vor diesem Hintergrund besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit darin, mögliche Folgen des klimawandelbedingten Ertragsrisikos im Marktfruchtbau an ausgewählten Standorten in Bayern aus ökonomischer Perspektive zu bewerten. Zu diesem Zweck werden das Risiko der Produktion einzelner Marktfrüchte sowie standortspezifischer Anbauverhältnisse im Vergleich vergangener und zukünftiger Klimabedingungen unter Berücksichtigung von Preisschwankungen untersucht.

Aus methodischer Sicht liegt der Schwerpunkt zum einen auf der Verknüpfung biophysikalischer und ökonomischer Modelle. Zum anderen bildet der Umgang mit den angesprochenen Unsicherheiten ein prägendes Merkmal der Arbeit.

Die Verwendung zweier Klimamodellansätze trägt diesem Aspekt Rechnung. Darauf aufbauend ermöglichen es risikoanalytische Methoden, der Bandbreite der unsicheren Ergebnisse Wahrscheinlichkeiten zuzuordnen. Diese Vorgehensweise bildet die Grundlage zur Berechnung von Entscheidungskalkülen, die die Ableitung von Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Durchführung von Anpassungsmaßnahmen unter Berücksichtigung individueller Risikoeinstellung erlauben.

Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren sowohl die verwendeten Modelle als auch die damit gewonnen Erkenntnisse. Einen wesentlichen Aspekt bildet die Gegenüberstellung der der beiden Klimamodellansätze.

Ergebnisse vergleichbarer Studien dienen der Ableitung relevanter Schlussfolgerungen. Hierfür eignen sich besonders die Arbeiten von GANDORFER und KERSEBAUM (2009) sowie von GRÖBMAIER (2012), weil sie ebenfalls Auswirkungen des Klimawandels für den Marktfruchtbau in Bayern analysieren.

4.1 Klimamodell

Den Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit bilden einerseits das statistische Regionalisierungsverfahren WETTREG sowie andererseits ein ENSEMBLE-Ansatz verschiedener globaler und dynamischer regionaler Klimamodelle. Der statistische Klimamodellansatz WETTREG dient der vorliegenden Untersuchung als Referenz, da statistische Modelle insbesondere für kurz- und mittelfristige Klimaprojektionen die zuverlässigeren Ergebnisse liefern als dynamische Regionalisierungsverfahren (WALKENHORST und STOCK 2009, S. 7).

Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren wesentliche Aspekte zu Aufbau, Methodik und Ergebnissen der Klimamodellierung.

Aus methodischer Sicht basieren beide Klimamodellansätze auf dem **SRES-Emissionsszenario A1B** als Grundlage zur Abschätzung des menschlichen Verhaltens in der Zukunft. Im Zuge des fünften IPCC-Sachstandsberichtes wurden die SRES-Szenarien durch die RCP-Szenarien ersetzt. Dennoch erscheint die Verwendung des A1B-Szenarios in der vorliegenden Arbeit als sinnvoll. Denn trotz methodischer Unterschiede zu den RCP-Szenarien hat das A1B-Szenario nicht an Aktualität eingebüßt.

Die im Rahmen des vierten IPCC-Sachstandsberichtes erstellten *Studien zur Klimafolgenabschätzungen bauen in der Mehrzahl auf dem A1B-Szenario* auf (PAETH 2007, S. 49). Dementsprechend beziehen sich auch aktuelle Strategien zur Anpassung an die Klimaänderung auf das A1B-Szenario (vgl. BMUB 2008, STMUG 2009). Darüber hinaus nutzen ebenso speziell die bislang erstellten *Studien zur regionalen Klimafolgenabschätzung in Bayern* das A1B-Szenario als Ausgangspunkt (GANDORFER und KERSEBAUM 2008, S. 163; GRÖBMAIER 2012, S. 77). Somit ermöglicht die Verwendung des A1B-Szenarios in der vorliegenden Arbeit eine Gegenüberstellung der Ergebnisse.

Im Vergleich zu den RCP-Szenarien bewegt sich das A1B-Szenario bezogen auf den Strahlungsantrieb in etwa zwischen den RCP-Szenarien 6.0 und 8.5. Generell liegen im Jahr 2050 die verschiedenen Szenarien noch deutlich näher beieinander als es für das Jahr 2100 erwartet wird (LFU 2013). Während das RCP 8.5-Szenario eine Welt ohne Klimaschutzmaßnahmen abbildet, geht das RCP 6.0-Szenario von moderaten und ressourcenschonenden Entwicklungen aus. In etwa entspricht das RCP 6.0-Szenario dem SRES-A1B-Szenario (DWD 2015).

Neben dem Emissionsszenario bildet das Regionalisierungsverfahren ein wesentliches Element des Klimamodells. Beide Ansätze tragen dem Aspekt der **Bias-Korrektur** Rechnung (KREIENKAMP ET AL. 2010b, S. 11 ff. bzw. IMBERY ET AL. 2013, S. 91 f.). Denn systematische Verzerrungen im Klimamodell würden in der Folge auch entsprechende Abweichungen in den Wirkmodellen nach sich ziehen. Die verwendeten Klimamodellansätze gewährleisten, dass nach aktuellem Stand des Wissens systematische Abweichungen in den Ergebnissen, die durch das Klimamodell bedingt sein könnten, vermieden werden.

Eine weitere Besonderheit besteht bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse der beiden Klimamodellansätze. Da es sich beim WETTREG-Ansatz um ein statistisches Regionalisierungsverfahren und beim ENSEMBLE-Ansatz um ein dynamisches Verfahren handelt, beruhen die ermittelten Ergebnisse auf **unterschiedlichem methodischen Ursprung**. Deshalb erfolgt die Darstellung der Ergebnisse auf Basis des Klimaänderungssignals, also der Veränderung der Klimaparameter zwischen den beiden Untersuchungszeitscheiben. Diese Vorgehensweise wird auch bei der Darstellung der Ergebnisse im Pflanzenwachstumsmodell und im ökonomischen Modell beibehalten.

Bei der Diskussion der Ergebnisse der beiden Klimamodellansätze gilt es zu bedenken, dass sich die **Darstellungen auf gemittelte Werte** des jeweils 30 Jahre umfassenden Untersuchungszeitraumes beziehen. Zudem liegen im Falle des WETTREG-Ansatzes die zehn Realisationen des Modells zu Grunde und beim ENSEMBLE-Ansatz die Ergebnisse der acht Modellmitglieder.

Extreme Ausprägungen einzelner Werte kommen somit nicht zum Ausdruck. Doch auch einzelne Jahre, die in ihrer spezifischen Ausprägung vom dargestellten Durchschnittsjahr abweichen, werden nicht deutlich. Dementsprechend gemäßigt stellt sich die Veränderung der Klimaparameter in den Ergebnissen dar.

Die aus den Klimamodellierungen resultierenden **Unsicherheiten** für die Ergebnisse werden in der Literatur an vielen Stellen thematisiert (z. B. STOLL ET AL. 2010, S. 3 ff.). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit spiegelt sich dieser Gesichtspunkt in gegenläufigen Entwicklungen bei den Klimaparametern *Niederschlag* und *Strahlung* wider. Bei der *Temperatur* ergeben

sich keine gegenläufigen Entwicklungen, wenngleich sich die Werte an den Standorten zwischen den beiden Ansätzen unterscheiden.

Bei der Diskussion der genannten Parameter gilt es zudem zu bedenken, dass sich Temperaturwerte mit höherer Sicherheit vorhersagen lassen wie andere Klimaparameter. Gleiches gilt für die Modellierung von Mittelwerten im Vergleich zu Extremwerten (WALKENHORST und STOCK 2009, S. 13).

Beim Parameter *Kohlendioxidgehalt* unterscheiden sich die beiden Klimamodellansätze nicht, da der entsprechende Wert in beiden Fällen aus derselben Datenquelle stammt (CNRM 2012a).

Trotz Verwendung der gleichen Klimamodellkomponenten (SRES-Emissionsszenario A1B, Globalmodell ECHAM 5, Regionalmodell WETTREG) erschweren verschiedene methodische Unterschiede (z. B. Abgrenzung räumlicher und zeitlicher Referenzrahmen, Bildung von Untersuchungsszenarien) einen exakten **Vergleich der im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Klimaparameter mit den Ergebnissen anderer Studien**. Dennoch deutet die Gegenüberstellung der Studienergebnisse darauf hin, dass sich die Klimaänderungssignale in ähnlichen Größendimensionen bewegen.

So kommen GANDORFER und KERSEBAUM (2009, S. 52) im Durchschnitt der betrachteten Szenarien für die Standorte Hof, Metten und Weißenstephan beim Parameter Temperatur zu Zunahmen zwischen 0,6 °C und 1,0 °C sowie beim Niederschlag zu Abnahmen im Bereich von 26 mm und 47 mm. GRÖBMAIER (2012, S. 79 ff.) errechnet für den Landkreis Freising eine Temperaturerhöhung von 0,9 °C und einen Rückgang des Niederschlages um 39 mm.

In der vorliegenden Arbeit erreicht die Temperaturzunahme im WETTREG-Ansatz über alle Standorte hinweg Werte zwischen 1,2 °C und 1,4 °C. Der Parameter Niederschlag geht zwischen 6 mm und 45 mm zurück.

4.2 Pflanzenwachstumsmodell

Das biophysikalische Modellsystem HERMES dient im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Modellierung von Naturalerträgen verschiedener landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Abhängigkeit der durch das Klimamodell ermittelten Parameter. Dabei erfolgt die Ertragsmodellierung zum einen auf Grundlage der Klimaparameter des WETTREG-Ansatzes und zum anderen auf Grundlage der Ergebnisse des ENSEMBLE-Ansatzes. Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren wichtige Aspekte zu Methodik und Ergebnissen der Ertragsmodellierung.

Ein Hauptkritikpunkt an Pflanzenwachstumsmodellen besteht in den **Einschränkungen**, denen die Modelle unterliegen. CHRISTEN (2007) weist in diesem Zusammenhang auf das begrenzte Kulturartenspektrum, auf mangelnde Reaktion hinsichtlich kurzfristiger Temperaturextreme, auf das Fehlen des Einflusses von Krankheiten, Schädlingen und Unkräutern sowie auf mangelnde Aussagen zu veränderten Anbausystemen hin. Mit Blick auf den Einsatz von Pflanzenwachstumsmodellen zur Klimafolgenabschätzung stellen EITZINGER ET AL. (2009, S. 164) zudem fest, dass die Modelle auf dem bislang vorherrschenden Sortenspektrum aufbauen, so dass zukünftig zu erwartender technischer Fortschritt keine Berücksichtigung findet.

Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere zwei der genannten Kritikpunkte von Relevanz. Zum einen bezieht HERMES *ertragsreduzierende Einflüsse* durch Krankheiten, Schädlinge und Unkräutern bzw. –gräser nicht in die Ertragssimulation mit ein. Um dieses Defizit zu beheben, müssten jedoch zum einen verlässliche Modellsysteme zur Simulation der Schaderregerdynamik zur Verfügung stehen. Zum anderen müssten diese Modelle auch ihre Tauglichkeit zur Prognose unter zukünftig veränderten Klimabedingungen beweisen. In diesem Zusammenhang spielt auch die Verschiebung des bestehenden Schaderregerspektrums unter zukünftigen Klimabedingungen sowohl durch veränderte Wachstumsbedingungen als auch durch das Auftreten von Neophyten und Neozoen eine entscheidende Rolle. Welche Arten in welchem Umfang an Bedeutung gewinnen könnten, ist bislang nur zu vermuten (LFL 2007, S. 59 ff.).

Als zweiter Kritikpunkt ist zu nennen, dass HERMES *züchterisch-technischen Fortschritt* vernachlässigt. Eine Möglichkeit, dieses Defizit zu beheben, besteht darin, die Parametrisierung der verschiedenen Kulturen im Modell entsprechend anzupassen.

Beispielsweise könnte eine Verbesserung der Ertragsleistung durch eine Anhebung der maximalen Assimilationsrate erreicht werden. Die Trockenstressresistenz des Modells könnte durch Veränderung des Quotienten aus aktueller und potentieller Verdunstung erhöht werden. Dabei stellt sich allerdings die Frage, in welchem Umfang die Anpassung des Modells erfolgen soll, da auch über den zu erwartenden züchterischen Fortschritt nur gemutmaßt werden kann. Darüber hinaus würde die Validierung des Modells ihre Gültigkeit verlieren, wenn die Modellstrukturen verändert werden.

Da weder für das zukünftige Auftreten von Schaderregern noch für den möglichen züchterischen Fortschritt belastbare Modellstrukturen zur Verfügung stehen, verzichtet die vorliegende Arbeit auf die Integration dieser Aspekte in die Ertragsmodellierung. Vielmehr konzentriert sich die Arbeit auf diejenigen ertragsrelevanten Parameter, die ausschließlich vom Klima beeinflusst werden.

Bei der Darstellung der Ergebnisse fällt in erster Linie die **ungünstige Ertragsentwicklung der Sommerungen im Vergleich zu den Winterungen** ins Auge. Wie bei der Interpretation der Ergebnisse bereits angedeutet, könnten weitere Modellierungen offenlegen, inwieweit eine *Anpassung von Saat-, Ernte- und Düngungsterminen* diesen Kulturen unter zukünftigen Klimabedingungen entgegen kommen könnte. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit modellierte Bewirtschaftung erfolgt standort- und kulturspezifisch in Abhängigkeit der gegenwärtigen Bewirtschaftung durch die Landessortenversuche. Eine Anpassung der Bestandesführung an zukünftige Klimabedingungen ist deshalb nicht erfolgt, um im Ertragsgeschehen ausschließlich die Auswirkung der veränderten Klimaparameter deutlich werden zu lassen.

Biophysikalische Modellierungen von AURBACHER ET AL. (2013, S. 50 ff.) deuten für Winterweizen und Silomais auf der schwäbischen Alb eine Verfrühung der Erntezeitpunkte an. Während sich der Saatzeitpunkt beim Mais nach vorne verschiebt, wird Winterweizen tendenziell später gesät. Der Ertrag beim Winterweizen steigt an, wohingegen er beim Silomais zurückgeht.

Der **Vergleich der Naturalerträge ausgehend von den beiden Klimamodellansätzen** zeigt vor allem bei den Kulturen (Silo- und Körner-) *Mais*, (Sommer- und Winter-) *Gerste* und *Raps* Ergebnisse, die in Richtung und Umfang der Änderungen übereinstimmen.

Dementsprechend kann der Ertragsentwicklung dieser Kulturen im Rahmen der Modellierungen eine vergleichsweise hohe Sicherheit beigemessen werden.

Weniger eindeutig stellt sich die Entwicklung beim *Winterweizen* dar. Diese Kultur scheint besonders bei zunehmenden Temperaturen und abnehmenden Niederschlägen negativ zu reagieren (siehe Abschnitt 3.1.2.7, S. 77 f.). Die Ergebnisse von GANDORFER und KERSEBAUM (2009, S. 53) deuten in eine ähnliche Richtung. Auch bei der *Kartoffel* zeigen sich gegenläufige Ertragstendenzen. Allerdings fehlt für diese Kultur eine Vergleichsmöglichkeit an verschiedenen Standorten.

Über alle Standorte hinweg treten jedoch bei fast allen Kulturen Entwicklungen auf, die nicht in das Bild der übrigen Ertragsverläufe passen. An diesen Fällen wird deutlich, dass die Veränderung der Klimaparameter auch sehr standort- und kulturartspezifische Auswirkungen mit sich bringt.

Dass die klimawandelbedingten Ertragsänderungen allgemein betrachtet nicht negativer ausfallen, kann auch an der **Güte der Untersuchungsstandorte** liegen. Da es sich dabei um Landessortenversuchsstandorte handelt, weisen die Bodenprofile für den Pflanzenbau eher günstige Merkmale auf. Insbesondere die *Wasserspeicherfähigkeit* der Böden kann dazu beitragen, längere Phasen ohne nennenswerten Niederschlag zu kompensieren (vgl. Tabelle 6, S. 43).

Trotz der Güte der Untersuchungsstandorte führt der **Einsatz der Bewässerung** zu einer Verbesserung des Ertragsgeschehens, sowohl bei der Höhe als auch bei der Stabilität der Erträge. Lediglich bei den maximalen Ertragswerten werden nicht immer Verbesserungen erzielt. Dies deutet darauf hin, dass auch unter den Bedingungen des zukünftigen Klimas in einzelnen Jahren das Ertragspotential der Kulturen ausgeschöpft werden kann, ohne zusätzliche Wassergaben zu verabreichen. Um jedoch die besonders schlechten Jahre abzumildern, ist die Bewässerung vonnöten. Insgesamt betrachtet *verliert die natürliche Vorzüglichkeit einzelner Standorte an Vorteilhaftigkeit*, da sich das Ertragsniveau der „schlechteren“ Standorte deutlich an das Niveau der „besseren“ annähert.

Für die **Einordnung** der im Rahmen der vorliegenden Studie ermittelten Erträge eignet sich besonders die Untersuchung von GANDORFER und KERSEBAUM (2009), weil sie zur Ertragssimulation ebenfalls auf dem Modellsystem HERMES aufbaut. Allerdings beschränkt

sich die Untersuchung auf den Winterweizen. Zudem unterscheiden sich die Bezugsperioden sowie die Untersuchungsszenarien von denen der vorliegenden Arbeit.

In der Ausgangssituation ermitteln GANDORFER und KERSEBAUM (2009, S. 53) je nach Standort Durchschnittserträge des Winterweizens zwischen 66 dt / ha und 84 dt / ha. Unter veränderten Klimabedingungen liegen die mittleren Erträge zwischen 65 dt / ha und 85 dt / ha. Durch den Einsatz einer Bewässerung steigen die Erträge schließlich auf Werte zwischen 81 dt / ha und 89 dt / ha an. Damit decken die Ergebnisse des Winterweizens einen vergleichbaren Bereich wie in der vorliegenden Untersuchung ab.

GRÖBMAIER (2012, S. 90) ermittelt zukünftige Erträge von Winterweizen, Wintergerste, Körnermais und Winterraps unter zukünftigen Klimabedingungen ausgehend von Experteninterviews unter Zuhilfenahme der Monte-Carlo-Simulation. Dabei zeigen sich für den Standort Freising beim Durchschnittsertrag keine nennenswerten Änderungen. Die Ertragsvariabilität, gemessen am Variationskoeffizienten, erhöht sich geringfügig. Allerdings gilt es beim Vergleich mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit zu bedenken, dass die Ergebnisse nicht auf der Grundlage biophysikalischer Modellierungen errechnet wurden.

4.3 Ökonomisches Modell

Die Kalkulationen im ökonomischen Modell zielen zum einen darauf ab, Wirtschaftlichkeit und Produktionsrisiko der verschiedenen Untersuchungsszenarien zu beurteilen. Zum anderen wird die bei gegebener Risikoeinstellung zu präferierende Handlungsalternative ermittelt. Die Berechnungen bauen entsprechend der Vorgehensweise im Pflanzenwachstumsmodell sowohl auf dem WETTREG-Ansatz als auch auf dem ENSEMBLE-Ansatz auf. Die nachfolgenden Abschnitte diskutieren wesentliche Gesichtspunkte zu Methodik und Ergebnissen des ökonomischen Modells. Diese beziehen sich vor allem auf Annahmen zum Produktpreis, zur Ausgestaltung der Anpassungsmaßnahmen, zum Einfluss der Risikoeinstellung sowie auf die Einordnung der Ergebnisse.

Als Zielgröße des ökonomischen Modells dient die anpassungskostenfreie Leistung. Während Angaben zum Ertrag den Ergebnissen des Pflanzenwachstumsmodells entnommen werden, unterliegen die **Angaben zum Preis verschiedenen Annahmen**.

Beide Referenzzeiträume gehen von derselben (Gleich-)Verteilung der Produktpreise aus. Somit *unterscheiden sich die Werte der Produktpreise der beiden Zeiträume nicht*. Diese Annahme liegt darin begründet, dass über die zukünftige Entwicklung der Produktpreise nur gemutmaßt werden kann. Auch wenn ein Anstieg der Preise als wahrscheinlich angesehen wird, ist dessen Umfang nicht abzusehen. Zudem wären bei einer Anpassung der Produktpreise auch die Betriebsmittelpreise zu modifizieren, wenn davon ausgegangen wird, dass bislang geltende Gesetzmäßigkeiten auch in der Zukunft Bestand haben (STOCKINGER 2010, S. 11).

Die vorliegende Arbeit bezieht *Korrelationen zwischen den Produktpreisen* bei der Ermittlung der Zufallsvariablen für den Preis auf der Basis vergangener Angaben mit ein. Die entsprechenden Korrelationskoeffizienten bewegen sich mit Ausnahme der Kartoffel zwischen 0,83 und 0,98 (vgl. Tabelle 5, S. 42). *Korrelationen zwischen Produktpreis und Ertrag* bleiben dagegen unberücksichtigt. GANDORFER ET AL. (2011, S. 617) haben gezeigt, dass zwischen bayerischen Ertrags- und Preisdaten im Zeitraum 1997 bis 2008 nur schwache Korrelation im Bereich von $-0,35$ bis $0,20$ bestehen. Zudem weist der WISSENSCHAFTLICHE BEIRAT (2011, S. 5) darauf hin, dass der stabilisierende Effekt einer Negativkorrelation zwischen Ertrags- und Preisschwankungen zurückgeht, je mehr Geschehnisse am Weltmarkt an Bedeutung für nationale Märkte gewinnen.

Verschiedene Studien untersuchen die *Änderung der Nahrungsmittelpreise in Abhängigkeit zukünftiger Durchschnittstemperaturen* (SCHMIDHUBER 2011). Bis zu einer Temperaturzunahme von 2,5 °C ist eher mit gleichbleibenden bzw. abnehmenden Preisen zu rechnen. Erst ab circa 3,5 °C Temperaturerhöhung weist die Mehrzahl der Studien Preisanstiege aus. Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit Werte im Bereich von 0,9 °C bis 1,4 °C Temperaturzunahme errechnet werden, erscheint eine Erhöhung des Preisniveaus in der Zukunftszeitscheibe als nicht notwendig.

Generell würde der Preisansatz im zukünftigen Referenzzeitraum einen Ansatzpunkt darstellen, um möglichen *Entwicklungen, die nicht unmittelbar von der Ertragswirkung des Klimawandels beeinflusst werden*, Rechnung zu tragen. Beispielsweise könnten steigende Energiepreise oder veränderter (Nahrungsmittel-) Konsum eine Wirkung auf landwirtschaftliche Erzeugerpreise ausüben, die die Folgen der Ertragswirkung des Klimawandels überlagern könnten. Da der Fokus der vorliegenden Arbeit auf dem klimawandelbedingten Ertragsrisiko besteht, bleiben solche Faktoren unberücksichtigt, über die weitestgehend nur Vermutungen angestellt werden können.

Auf Seiten der Anpassungsmaßnahmen gilt es bei der **Versicherung** zu bedenken, dass eine Schadenersatzleistung bei jeglicher *Unterschreitung des Durchschnittsertrages* erfolgt unabhängig vom tatsächlichen Witterungsverlauf. Im Rahmen der Pflanzenwachstumsmodellierung wirkt neben den Klimaparametern nur Stickstoffmangel ertragsreduzierend. Ein akuter Stickstoffmangel erscheint jedoch als ausgeschlossen, da sich die Modellierung der Bewirtschaftung an den Gegebenheiten der Landessortenversuche orientiert, die ein hohes Niveau der Bestandesführung gewährleisten. Weitere ertragsmindernde Faktoren wie Krankheiten und Schädlinge treten im Modell nicht auf, so dass für die Zahlung von Schadenersatzleistungen ausschließlich die Klimaparameter relevant sind.

Wie bereits bei der Interpretation der Ergebnisse dargelegt handelt es sich bei der modellierten Versicherungslösung um eine idealisierte Form (Berg 2002, S. 118). Zwar wird bei der Berechnung der zu zahlenden Prämie ein Aufschlag auf die faire Prämie vorgenommen, das *Basisrisiko* spielt dagegen keine Rolle. Eine Möglichkeit zur Berücksichtigung des Basisrisikos im Modell könnte darin bestehen, für den versicherten Naturalertrag einen regionalen Durchschnittsertrag heranzuziehen. Hierfür fehlen jedoch geeignete Referenzen, insbesondere, wenn es sich um die Erträge des zukünftigen Zeitraumes handelt.

PETERSEN und WEIGEL (2015, S. 66 f.) stellen fest, dass sich *Anpassungsmaßnahmen in der Regel auf technische Lösungen* beziehen. Für den ackerbaulichen Bereich in Deutschland liegen dagegen kaum gesicherte Erkenntnisse zur Rolle diversifizierter Anbauverhältnisse gegenüber dem Klimawandel vor. Dennoch zeigt sich im Rahmen einer Befragung von RÜHLING (2014, S. 23), dass niedersächsische Landwirte Fruchtfolgegestaltung und Bodenschutz nach der Beregnung als zweithäufigste mögliche Anpassungsmaßnahme an den Klimawandel nennen.

Die Berücksichtigung von **Anbauverhältnissen** im Rahmen der vorliegenden Arbeit zielt auf einen Ausgleich des *Mengenrisikos* ab, indem verschiedene Kulturen mit unterschiedlichen Ansprüchen an das Klima im räumlichen Nebeneinander kultiviert werden.

Darüber hinaus weist EBMEYER (2008, S. 97 f.) darauf hin, dass sich das *Preisrisiko* reduziert, wenn Kulturen angebaut werden, bei denen die Produktpreise nur schwach miteinander korreliert sind. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist dies allerdings nur bei der Kartoffel der Fall (siehe Tabelle 5). Demzufolge scheint eine Erklärung für die risikoreduzierende Wirkung des Anbauverhältnisses auf die Zielgröße eher im Ausgleich des Mengenrisikos zu suchen zu sein.

In diesem Zusammenhang belegen BREUSTEDT ET AL. (2010, S. 104 f.) anhand von Preis- und Ertragssimulationen, dass die Gewinne in einem Marktfruchtbaubetrieb mit drei Kulturen weniger breit streuen und im schlechten Fall höher ausfallen als bei reduzierten Produktionsprogrammen. Als Ursache nennen die Autoren, dass sich *sowohl Ertrags- als auch Preisschwankungen* beim Anbau verschiedener Kulturen gegenseitig ausgleichen. Bereits WEISENSEL und SCHONEY (1989, S. 293 f.) haben gezeigt, dass der Variationskoeffizient des Gewinns beim Übergang von einer theoretischen Monokultur hin zu einer Fruchtfolge aus zwei bzw. drei Kulturen deutlich zurückgeht.

Für die Berechnung des **Sicherheitsäquivalents** haben die Annahmen zur Risikoeinstellung eine entscheidende Bedeutung. Wie bereits bei den methodischen Grundlagen dargelegt, unterstellt eine exponentielle *Risikonutzenfunktion* eine konstante absolute und eine zunehmende relative Risikoaversion. Realistischer wäre hingegen eine mit steigendem Einkommen abnehmende Risikoaversion, wie sie eine Potenz-Risikonutzenfunktion unterstellt. Jedoch benötigt eine solche Risikonutzenfunktion Angaben über die Höhe des Vermögens des Entscheiders. Diese Größe wiederum nimmt deutlichen Einfluss auf die Modellergebnisse (BERG 2002, S. 113 ff.). Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit für

betriebsspezifische Angaben wie das Vermögen an den Untersuchungsstandorten keine sinnvollen Annahmen getroffen werden können, wird eine exponentielle Risikonutzenfunktion verwendet. Dieses Vorgehen bringt zudem die technische Vereinfachung mit sich, dass das Niveau des Gesamtvermögens bei der Bewertung des Nutzens keine Rolle spielt.

Der Blick auf die **Ergebnisse** der vorliegenden Untersuchung zeigt, dass weder die Veränderung der Klimaparameter noch die Durchführung der Anpassungsmaßnahmen gravierende Auswirkungen beim Risikoprofil der Zielgröße mit sich bringt. Am ehesten ergeben sich Unterschiede in den Minimumwerten. Auch beim Sicherheitsäquivalent unterscheiden sich besonders die Szenarien ohne Anpassung und mit Versicherung kaum. Nur das Szenario mit Bewässerung schneidet in der Regel deutlich schlechter ab. Die anhand des Sicherheitsäquivalents ermittelten Handlungsempfehlungen deuten sich bereits im Risikoprofil der verschiedenen Szenarien an. Somit zeigt sich, dass bereits geeignete Risikokennzahlen wie die Quantilswerte zur Charakterisierung einer Verteilung die Entscheidungsfindung erleichtern. Dennoch stellt die Berechnung des Sicherheitsäquivalents im Rahmen des *Konzepts des Erwartungsnutzens* eine Entscheidungsunterstützung dar, die modellendogen zu eindeutig unterscheidbaren Ergebnissen führt. Denn die Berechnung des Sicherheitsäquivalents berücksichtigt nicht nur bestimmte Quantilswerte, sondern sämtliche Werte der Verteilung.

In diesem Zusammenhang weisen PANNELL ET AL. (2000, S. 71 ff.) darauf hin, dass der *Zusatznutzen aus der Berücksichtigung von Risikoaspekten* in ökonomischen Modellen oftmals gering ausfällt. Deshalb schlagen die Autoren vor, das Hauptaugenmerk bioökonomischer Modellierungen anstatt auf die Berücksichtigung der Risikoeinstellung eher auf die Abbildung von Zusammenhängen im operativen und taktischen Bereich des Betriebsgeschehens zu legen. Als Ansatzpunkt im Rahmen der vorliegenden Arbeit wäre beispielsweise die bereits erwähnte Anpassung der Termine zur Bestandesführung im Pflanzenwachstumsmodell denkbar.

In einer weiteren Studie zeigen PANNEL ET AL. (2007, S. 8 ff.), dass Absicherungsinstrumente nur für extrem risikoaverse Entscheider einen Nutzen stiften, der den Aufwand der Risikoabsicherung rechtfertigt. Da *außergewöhnlich stark ausgeprägte Risikoaversion* in der Landwirtschaft nur äußerst selten auftritt, werden Maßnahmen mit der Absicht der Risikoreduzierung nur in geringem Ausmaß realisiert.

ANTLE und CAPALBO (2010, S. 402 f.) schlagen vor, bei der Abschätzung möglicher Klimafolgen nicht nur die Ergebnisse in Vergangenheit und Zukunft miteinander zu vergleichen. Vielmehr sollte auch der *Übergang zwischen den beiden Zeiträumen* in die Betrachtung aufgenommen werden. Kosten, die in diesem Zeitraum für Investitionen in Anpassungsmaßnahmen anfallen, würden andernfalls unterschätzt werden.

Insgesamt betrachtet, geben die genannten Studien Hinweise auf mögliche Untersuchungsschwerpunkte, die im Rahmen zukünftiger Forschung Bearbeitung finden sollten.

Zur **Einordnung** der ermittelten Ergebnisse vor dem Hintergrund der untersuchten Anpassungsmaßnahmen können abermals die Arbeiten von GANDORFER und KERSEBAUM (2011) sowie von GRÖBMAIER (2012) herangezogen werden.

GANDORFER und KERSEBAUM (2011, S. 53 ff.) untersuchen die risikoreduzierende Wirkung von *Bewässerungsmaßnahmen* an drei bayerischen Standorten vor dem Hintergrund unterschiedlich trockener Klimaszenarien. Dabei zeigt sich anhand der kumulierten Wahrscheinlichkeit der verschiedenen Szenarien, dass die Bewässerung in allen Fällen varianzreduzierend auf die Zielgröße des Deckungsbeitrages wirkt. Jedoch ist die Maßnahme aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten nur im Falle eines sehr trockenen Szenarios wirtschaftlich.

GRÖBMAIER (2012, S. 110 ff.) bewertet den wirtschaftlichen Nutzen einer *Ertragsversicherung* in Abhängigkeit verschiedener Subventionsstufen am Standort Freising für eine Fruchtfolge bestehend aus Winterweizen, Wintergerste, Winterraps und Körnermais. Im Fall ohne Prämiensubvention führt die Versicherung dazu, dass im Vergleich zur Ausgangssituation einerseits Erwartungswert, Maximum und Variationskoeffizient abnehmen, andererseits das Minimum des Erlöses zunimmt. Die risikoreduzierende Wirkung der Versicherung deckt sich demzufolge mit den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit. Bei der Ermittlung der Sicherheitsäquivalente zeigt sich kein gravierender Unterschied zwischen den Szenarien ohne Versicherung und nicht subventionierter Versicherung, wobei die Variante ohne Versicherung stets einen höheren Nutzen stiftet.

Sowohl die Ergebnisse von GANDORFER und KERSEBAUM (2011) zur Bewässerung als auch die Arbeit von GRÖBMAIER (2012) zur Ertragsversicherung unterstützen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung in weiten Teilen: Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel reduzieren zwar das Risiko der Produktion, gleichzeitig verschlechtern sie jedoch die Rentabilität. In der Regel ist der Nutzen der Maßnahmen nur bei ausgeprägter Risikoaversion größer als ohne Anpassung.

4.4 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Arbeit bewertet das klimawandelbedingte Produktionsrisiko im Marktfruchtbau aus ökonomischer Perspektive. Dabei berücksichtigt sie regionale Anbauverhältnisse, spezifische Anpassungsmaßnahmen und individuelle Risikoeinstellung an ausgewählten Standorten in Bayern.

Die mit Klimafolgenabschätzungen stets einhergehenden Unsicherheiten zeichnen sich bereits bei den Klimamodellierungen ab. Beide im Rahmen der Untersuchung verwendeten Ansätze führen bei den Parametern Niederschlag und Strahlung zu gegenläufigen Klimaänderungssignalen. Die übrigen pflanzenbaulich relevanten Klimaparameter Temperatur und Kohlendioxidgehalt weisen dagegen gleichlaufende Entwicklungen auf.

Dennoch zeigen die im Pflanzenwachstumsmodell ermittelten Erträge in den meisten Fällen in beiden Ansätzen vergleichbare Tendenzen auf. Mit Blick auf die Höhe und Stabilität der Erträge profitieren in der Tendenz die Winterungen, während sich für Sommerungen die Situation eher verschlechtert. Die Durchführung einer Bewässerung verbessert sowohl die Durchschnittserträge als auch die Ertragsstabilität.

Aus ökonomischer Sicht dagegen schmälert die Bewässerung die Rentabilität der Produktion. Ein ähnliches Bild zeigt der Abschluss einer Ertragsversicherung. Zwar verringert sich das Produktionsrisiko, jedoch leidet auch die wirtschaftliche Effizienz des Verfahrens. Da die Kosten der Versicherung niedriger ausfallen als die der Bewässerung, stiftet sie einen größeren Nutzen. Besonders für extrem risikoscheue Entscheider stellt die Versicherung ein geeignetes Instrument dar. In diesem Zusammenhang gilt es zu bedenken, dass bereits die Betrachtung standorttypischer Anbauverhältnisse oftmals einen höheren Nutzen aufweist wie die Betrachtung einzelner Kulturen.

Ergebnisse vergleichbarer Studien stützen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit gesammelten Erkenntnisse. Die vorliegende Arbeit ergänzt deren Resultate, indem sie das Untersuchungsspektrum auf der Basis aktueller klimatologischer Referenzperioden auf verschiedene Standorte und Kulturen in Bayern ausdehnt. Zudem werden im Bereich der ökonomischen Bewertung Preisrisiken und typische Anbauverhältnisse in die Betrachtung mit einbezogen. Ein besonderes Merkmal besteht in der Verwendung zweier Modellansätze, die den mit Klimamodellierungen verbundenen Unsicherheiten explizit Rechnung tragen.

Insgesamt betrachtet fällt ein Vergleich mit den Ergebnissen anderer Studien jedoch schwer, da sich räumliche und zeitliche Bezüge sowie die verwendeten Modelle unterscheiden. Deshalb wäre eine Abstimmung der Untersuchungsgrundlagen und des methodischen Vorgehens im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten erstrebenswert, um eine noch intensivere Vergleichbarkeit und Diskussion der Ergebnisse zu ermöglichen.

Trotz Verwendung zweier Klimamodellansätze mit unterschiedlicher Ausprägung der relevanten Parameter widersprechen sich die jeweils resultierenden ökonomischen Endergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht. Dies zeigt, dass trotz erheblicher Unsicherheiten im Bereich der Klimafolgenabschätzung Aussagen zu potentiellen Auswirkungen möglich sind. Obgleich Modelle stets nur vereinfachte Abbildungen der Realität darstellen, bilden sie komplexe Zusammenhänge und Wechselwirkungen in ihrer Vielschichtigkeit ab, so dass Entwicklungstendenzen und Konsequenzen aufgezeigt werden können.

Dennoch birgt auch das Pflanzenwachstumsmodell sowie die ökonomischen Kalkulationen die Gefahr modellbedingter Unsicherheiten. Denn die Verwendung eines bestimmten Modelles prägt letztendlichen die Ergebnisse. Um diesen Effekt einschätzen zu können, sollte im Rahmen zukünftiger Studien der Einsatz weiterer Pflanzenwachstumsmodelle in Betracht gezogen werden. Aus der Verwendung verschiedener Klima- und Pflanzenwachstumsmodelle ergibt sich zudem eine Vielzahl an Ergebnissen, die eine Bandbreite zukünftig möglicher Ergebnisse verdeutlichen. Lassen sich daraus eindeutige Handlungsempfehlungen ableiten, stärkt dies die Aussagekraft der Ergebnisse.

Darüber hinaus sollten weitere Forschungsarbeiten im Bereich des Pflanzenwachstumsmodells Erweiterungen einbeziehen, beispielsweise zur Anpassung von Terminen der Bestandsführung, zur Berücksichtigung ertragsreduzierender Wirkung von Krankheiten oder zur Auswirkung züchterisch-technischen Fortschritts. Des Weiteren sollten auch ertragsschwächere Standorte in weitere Modellierungen aufgenommen werden, um zu untersuchen, inwiefern die Güte eines Standortes negative Auswirkungen der Klimaänderung kompensieren kann.

Im Bereich der ökonomischen Modellierung stellt die Risikoeinstellung einen entscheidenden Einflussfaktor auf die Ergebnisse dar. Bei der Ermittlung realitätsnaher Risikonutzenfunktionen besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf.

Zukünftige Studien sollten bei der Modellierung von Versicherungslösungen ein Hauptaugenmerk auf die Abbildung des Basisrisikos legen, um die Wirkung der Versicherung noch realitätsnaher abschätzen zu können. Auch die Wirtschaftlichkeit und risikoreduzierende Wirkung von Fruchtfolgen sollte Bestandteil weiterer Forschungsarbeiten sein.

Dass die Auswirkungen des Klimawandels aus ökonomischer Sicht vergleichsweise moderat ausfallen, kann neben der Ertragsentwicklung auch an der Abbildung des Preisrisikos liegen. Der Preis bietet in Rahmen zukünftiger Arbeiten die Möglichkeit, die Wirkung indirekter Effekte der Klimaänderung, die sich eher im Preis- als im Ertragsgeschehen niederschlagen, zu berücksichtigen. In diesem Zusammenhang könnte auch eine eingehende Untersuchung von Extremereignissen ein wichtiger Untersuchungsgegenstand sein, sofern aus klimatologischer Sicht hierfür geeignete Datengrundlagen vorliegen. Die durchschnittliche Veränderung der Klimaparameter scheint den Ergebnissen der vorliegenden Studie zu Folge kein großes Problem zu sein.

Letztendlich scheinen die im Rahmen der vorliegenden Arbeit ermittelten Veränderungen durch den Klimawandel mit Blick auf das Produktionsrisiko im Marktfruchtbau keine nicht zu bewältigenden Konsequenzen mit sich zu bringen. Als vergleichsweise gering stellt sich der Nutzen bei der Durchführung von Anpassungsmaßnahmen gegenüber der Situation ohne Anpassung dar. Umso wichtiger erscheint es im Umkehrschluss, bei der Untersuchung weiterer Anpassungsmaßnahmen besonders solche in Betracht zu ziehen, die auch aus Sicht der Verringerung des Klimawandels sich als sinnvoll erweisen.

In diesem Zusammenhang stellen CAMPBELL ET AL. (2014, S. 41) Maßnahmen zur nachhaltigen Intensivierung als wichtigen Eckpfeiler des Konzepts des „climate smart farming“ dar. „Climate smart farming“ zielt darauf ab, durch eine Verbesserung der Ressourcennutzungseffizienz sowohl zur Anpassung als auch zur Minderung der Folgen der Klimaänderung beizutragen.

Vor diesem Hintergrund erscheint es angebracht, die Maßnahmen zur Anpassung auch auf ihre Klimawirksamkeit hin zu untersuchen. Hier liegt der Schluss nahe, dass sich die Versicherung abermals als vorzüglichere Variante herausstellt, da die Bewässerung im Vergleich dazu ein energieintensives Verfahren darstellt.

Quellen

- AG BODEN [AD-HOC-ARBEITSGRUPPE BODEN] (1994): Bodenkundliche Kartieranleitung. Hrsg.: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und Geologische Landesämter der Bundesrepublik Deutschland, Hannover. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 4. Auflage, 392 S.
- ANTLE, J.M.; CAPALBO, S.M. (2010): Adaption of Agricultural and Food Systems to Climate Change: An Economic and Policy Perspective. *Applied Economic Perspectives and Policy* 32 / 3, S. 386 – 416.
- AIGNER, A. (2014): Fruchtfolgegestaltung. In: BLV (Hrsg.): Die Landwirtschaft – Landwirtschaftlicher Pflanzenbau. München, S. 185 – 194.
- ALEXANDER, L.V.; ZHANG, X.; PETERSON, T.C.; CAESAR, J.; GLEASON, B.; KLEIN TANK, A.M.G.; HAYLOCK, M.; COLLINS, D.; TREWIN, B.; RAHIMZADEH, F.; TAGIPOUR, A.; RUPA KUMAR, K.; REVADEKAR, J.; GRIFFITHS, G.; VINCENT, L.; STEPHENSON, D.B.; BURN, J.; AGUILAR, E.; BRUNET, M.; TAYLOR, M.; NEW, M.; ZHAI, P.; RUSTICUCCI, M.; VAZQUEZ-AGUIRRE, J.L. (2006): Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D05109, DOI: 10.1029/2005JD006290.
- ANDERSON, J.R.; DILLON, J.L. (1992): Risk analysis in dryland farming systems. FAO [Food and agricultural organization of the United Nations], Rom, 109 S.
- ANDERSON, J.R.; HARDAKER, B. (2003): Risk aversion in economic decision making: pragmatic guides for consistent choice by natural resource managers. In: WESSELER, J.; WEIKARD, H.P.; WEAVER, R.D. (Hrsg.) (2003): Risk and uncertainty in environmental and natural resource economics. Edward Elgar Publishing, Northampton, 300 S.
- AURBACHER, J.; PARKER, P.S.; SÁNCHEZ, G.A.C.; STEINBACH, J.; REINMUTH, E.; INGWERSEN, J.; DABBERT, S. (2013): Influence of climate change on short term management of field crops – A modelling approach. *Agricultural Systems* 119, S. 44 – 57.
- BERG, E. (2002): Das System der Ernte- und Einkommensversicherungen in den USA – ein Modell für Europa? In: *Berichte über Landwirtschaft* 80 (1), S. 94 – 133.

- BGR [BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE] (Hrsg.) (1997):
Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000).
Hannover.
http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Boden/Projekte/Informationsgrundlagen-abgeschlossen/BUEK1000_und_Ableitungen/BUEK1000_und_Ableitungen.html?nn=1958174 (05.04.2011).
- BMUB [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT] (Hrsg.) (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel.
www.bmub.bund.de/N42783/ (16.04.2012)
- BMUB [BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, BAU UND REAKTORSICHERHEIT] (2016): Kernaussagen des IPCC-Sonderberichtes.
<http://www.bmub.bund.de/themen/klima-energie/klimaschutz/internationale-klima-politik/ipcc/kernaussagen-des-ipcc-sonderberichtes/> (15.03.2016).
- BREUSTEDT, G.; DREPPER, C.; LATACZ-LOHMANN, U. (2010): Wie können Marktfrucht- und Veredelungsbetriebe auf zunehmende Ertrags- und Preisrisiken reagieren? In: Landwirtschaftliche Rentenbank (Hrsg.): Auswirkungen der Finanzkrise und volatiler Märkte auf die Agrarwirtschaft. Schriftenreihe der Rentenbank, Band 26, Frankfurt am Main, S. 89 – 119.
- BRISSON, N.; WERY, J.; BOOTE, K. (2006): Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J.W.; [Hrsg.]: Working with Dynamic Crop Models – Evaluation, Analysis, Parameterization, and Applications. ELSEVIER, Amsterdam, S. 257 – 281.
- CAMPBELL, B.M.; THORNTON, P.; ZOUGMORÉ, R.; VAN ASTEN, P.; LIPPER, L. (2014): Sustainable intensification: what is its role in climate smart agriculture? Current Opinion in Environmental Sustainability, 8 / 2014, S. 39 – 43.
- CHRISTEN, O. (2007): Klimawandel – Herausforderungen für den Pflanzenbau. Vortrag auf der DLG-Pflanzenbautagung [Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft], Bernburg.
- CNRM [CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES MÉTÉOROLOGIQUES] (2012a): About the project.
<http://ensembles-eu.metooffice.com/about.html> (03.07.2012).
- CNRM [CENTRE NATIONAL DE RECHERCHES MÉTÉOROLOGIQUES] (2012b): Ensembles RT2A Results.
<http://www.cnrm.meteo.fr/ensembles/public/results/results.html> (03.07.2012).

- DEUTSCHLÄNDER, T.; DALELANE, C. (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen für Deutschland hinsichtlich der Änderung des Extremverhaltens von Temperatur, Niederschlag und Windgeschwindigkeit – Ein Forschungsvorhaben der ressortübergreifenden Behördenallianz Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt Technisches Hilfswerk, Deutscher Wetterdienst, Umweltbundesamt. Abschlussbericht Oktober 2012, Offenbach am Main.
http://www.dwd.de/bvbw/generator/DWDWWW/Content/Presse/Pressekonferenzen/2012/PK__30__10__12/Studie__20121030,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/Studie__20121030.pdf (19.05.2014).
- DWD [DEUTSCHER WETTERDIENST] (Hrsg.) (2015): Klimaszenarien (Zukunft).
http://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimaszenarien/klimaszenarien_no_de.html (14.10.2015).
- EBMEYER, C.D. (2008): Crop portfolio composition under shifting output price relations – Analyzed für selcted locations in Canada and Germany. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 323, 303 S.
- EITZINGER, J.; KERSEBAUM, K.C.; FORMAYER, H. (2009): Landwirtschaft im Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsstrategien für die Land- und Forstwirtschaft in Mitteleuropa. Agrimedia, Clenze. 376 S.
- FELBERMEIR, T. (2013): Verfahrensökonomische Analysen zu möglichen Folgen des Klimawandels sowie der Klimaeffizienz auf die Landbewirtschaftung. Endbericht zum Projekt, unveröffentlichtes Material.
- FRICH, P.; ALEXANDER, L.V.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A.M.G.; PETERSON, T. (2002): Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19, 193-212.
- GANDORFER, M.; KERSEBAUM, K.C. (2009): Einfluss des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion unter Berücksichtigung des CO₂-Effekts sowie von Beregnung. In: PEYERL, H. (Hrsg.): *Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie* 18/3. Facultas Verlag, Wien. S. 47 – 56.
- GANDORFER, M.; PANNELL, D.; MEYER-AURICH, A. (2011): Analyzing the effects of risk and uncertainty on optimal tillage and nitrogen fertilizer intensity for field crops in Germany. *Agricultural Systems* 104, S. 616 – 622.

- GÖMANN, H.; BENDER, A.; BOLTE, A.; DIRKSMEYER, W.; ENGLERT, H.; FEIL, J.-H.; FRÜHAUF, C.; HAUSCHILD, M.; KRENGEL, S.; LILIENTHAL, H.; LÖPMEIER, F.-J.; MÜLLER, J.; MÜBHOFF, O.; NATKHIN, M.; OFFERMANN, F.; SEIDEL, P.; SCHMIDT, M.; SEINTSCH, B.; STEIDL, J.; STROHM, K.; ZIMMER, Y. (2015): Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen – Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL); Abschlussbericht: Stand 3.6.2015. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 312 S., Thünen-Report 30, doi:10.3220/REP1434012425000.
- GRÖBMAIER, J. (2012): Ökonomische Auswirkungen des Klimawandels auf den Marktfruchtbau und Bewertung von Anpassungsoptionen am Beispiel von Ernteversicherungen. Dissertation, Technische Universität München, 199 S. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1107831/1107831.pdf> (11.02.2014).
- HARTWICH, R.; BEHRENS, J.; ECKELMANN, W.; HAASE, G.; RICHTER, A.; ROESCHMANN, G.; SCHMIDT, R. (1995): Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1 : 1 000 000 – Erläuterungen, Textlegende und Leitprofile. Begleitheft zur Bodenübersichtskarte 1 : 1.000.000, Hannover, 46 S.
- HEIBENHUBER, A.; GANDORFER, M. (2008): Klimawandel und Landbewirtschaftung: die trivalente Rolle der Landwirtschaft als Verursacher, Betroffener und Beschützer. Mitteilungsblatt des Deutschen Verein für Vermessungswesen (DVW), 3/2008, S. 381 – 390.
- HÜLSBERGEN, K.J.; SCHMID, H. (2013): Energie- und Treibhausgasbilanzierung in ökologischen und konventionellen Betriebssystemen. In: Klimawirkungen und Nachhaltigkeit ökologischer und konventioneller Pilotbetriebe in Deutschland, S. 4 – 10. Wissenschaftliche Tagung am Thünen-Institut, Braunschweig. http://www.pilotbetriebe.de/download/Tagung_2013/Tagungsband_Pilotbetriebe_2013.pdf (24.09.2014).
- IMBERY, F.; PLAGEMANN, S.; NAMYSLO, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS. In: Advances in Science and Research, 10/2013, S. 91 – 98.
- IPCC [INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE] – DEUTSCHE KOORDINIERUNGSSTELLE [Hrsg.] (2008): Klimaänderung 2007 – Synthesebericht. http://www.de-ipcc.de/_media/IPCC-SynRepComplete_final.pdf (04.01.2011).

- IPCC [INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE] (2012): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Management des Risikos von Extremereignissen und Katastrophen zur Förderung der Anpassung an den Klimawandel. Ein Sonderbericht der Arbeitsgruppen I und II des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen. Weltorganisation für Meteorologie, Genf, Schweiz, 24 Seiten. Deutsche Übersetzung durch die Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn, 2015.
- JONAS, M.; STAEGE, T.; SCHÖNWIESE, C.D. (2005): Climate Change 07/05: Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland –. ISSN 1611-8855, Umweltbundesamt, Dessau.
- KELLERMANN, A. (2012): Trockensubstanzgehalt von Speisekartoffeln. Mündliche Mitteilung, März 2012.
- KERSEBAUM, K.C. (1989): Die Simulation der Stickstoff-Dynamik von Ackerböden. Dissertation, Universität Hannover, 141 S.
- KERSEBAUM, K.C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological Modelling* 81, S. 145 – 156.
- KERSEBAUM, K.C. (2007): Modelling nitrogen dynamics in soil-crop systems with HERMES. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 77/1, S. 39 – 52.
- KERSEBAUM, K.C. (2012a): Struktur des Modells HERMES. Schriftliche Mitteilung, in Anlehnung an: WILLMS, M.; EULENSTEIN, F.; MÜLLER, L.; SCHINDLER, U.; MIRSCHEL, W.; FISCHER, A. (2005): Mögliche Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die Komponenten der klimatischen Wasserhaushaltsbilanz von landwirtschaftlich genutzten Flächen einer brandenburgischen Agrarlandschaft. In: WIGGERING, H.; EULENSTEIN, F.; AUGUSTIN, J. (Hrsg.): Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg: Handlungsfeld Landwirtschaft (DS 3/6821-B). ZALF [Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung], Müncheberg. http://z2.zalf.de/oa/1776_index.htm (02.01.2012).
- KERSEBAUM, K.C. (2012b): Trockenmasseertrag Silomais. Mündliche Mitteilung, Februar 2012.
- KERSEBAUM, K.C.; BEBLIK, A.J. (2001): Performance of a Nitrogen Dynamics Model Applied to Evaluate Agricultural Management Practices. In: SHAFFER, M.J.; MA, L.; HANSEN,

- S. (Hrsg.): Modeling Carbon and Nitrogen Dynamics for Soil Management. Lewis Publishers, Boca Raton. S. 549 – 569.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010a): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Climate & Environment Consulting, Potsdam. 60 S.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010b): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Climate & Environment Consulting, Potsdam. 69 S.
- KTBL [KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT] (2009): KTBL-Datensammlung Feldbewässerung – Betriebs- und arbeitswirtschaftliche Kalkulationen. 1. Auflage 2009, Darmstadt. 100 S.
- LfL [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT] (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. LfL-Schriftenreihe 13/2007, 140 S.
- LfL [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT] (Hrsg.) (2008): Bewässerung im Ackerbau und in gärtnerischen Freilandkulturen. LfL-Information 11/2008, 24 S.
- LfL – IBA [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT – INSTITUT FÜR BETRIEBSWIRTSCHAFT UND AGRARSTRUKTUR] (Hrsg.) (2015a): Erzeugerpreise wichtiger Marktfrüchte – Entwicklung von 1978 bis heute in Bayern, unveröffentlichtes Material.
- LfL – IBA [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT – INSTITUT FÜR BETRIEBSWIRTSCHAFT UND AGRARSTRUKTUR] (Hrsg.) (2015b): Datensammlungen Agrarstrukturentwicklung – Tabellen zur Agrarstrukturentwicklung in Bayern, unveröffentlichtes Material.
- LfU [BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT] (Hrsg.) (2013): Globale Klimaprojektionen im Vergleich – Ensemble-Betrachtung von SRES- und RCP-Emissionsszenarien. Kongress „Klimaforschung Bayern“, 24.-25.06.2013, München, Poster-Beitrag. https://www.stmuv.bayern.de/umwelt/klimaschutz/forschung/kongress_klimaforschung_bayern/doc/poster_lfu_vergleich_gobale_klimaprojektionen.pdf (21.01.2014).
- LUPIKASZA, E.; HÄNSEL, S.; MATSCHULLAT, J. (2011): Regional and seasonal variability of extreme precipitation trends in southern Poland and central-eastern Germany 1951-2006. International Journal of Climatology, 31, 2249-2271, DOI: 10.1002/joc.2229.

- MAIER, H. (2007): Klimaprognose 2050. In: LfL [BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT] (Hrsg.) (2007): Klimaänderung und Landwirtschaft – Bestandsaufnahme und Handlungsstrategien für Bayern. LfL-Schriftenreihe. Tagungsband zum 6. Kulturlandschaftstag am 19.11.2007 in Freising-Weihenstephan, S. 17 – 38.
- MPI-M [MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR METEOROLOGIE] (Hrsg.) (2011): ECHAM.
<http://www.mpimet.mpg.de/en/wissenschaft/modelle/echam.html> (13.01.2011).
- MÜNCHENER UND MAGDEBURGER AGRARVERSICHERUNG (Hrsg.) (2014): Kundeninformation Pflanzenversicherung.
http://agrarversicherung.com/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=2:hagelun... (29.01.2015).
- MUBHOFF, O.; HIRSCHAUER, N. (2011): Modernes Agrarmanagement – Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren. 2. Auflage, Verlag Franz Vahlen, München. 571 S.
- PAETH, H. (2007): Klimamodellsimulationen. In: ENDLICHER, W., GERSTENGARBE, F.W. (Hrsg.) (2007): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. o.V., Berlin und Potsdam. S. 44 – 55.
- PALISADE (Hrsg.) (2013): Benutzerhandbuch @risk – Risikoanalysen- und Simulations-Add-In für Microsoft Excel. Version 6.
<http://www.palisade.com/support/manuals.asp> (04.03.2013).
- PANNELL, D.J.; HAILU, G.; WEERSINK, A.; BURT, A. (2007): More Reasons Why Farmers Have So Little Interest in Futures Markets. Working Paper 0702, School of Agricultural and Resource Economics, University of Western Australia, Crawley, 14 S.
- PANNELL, D.J.; MALCOLM, B.; KINGWELL, R.S. (2000): Are we risking too much? Perspectives on risk in farming modelling. *Agricultural Economics* 23, S. 69 – 78.
- PETERSEN, U.; WEIGEL, H.J. (2015): Klimaresilienz durch Agrobiodiversität? Literaturstudie zum Zusammenhang zwischen Elementen der Agrobiodiversität und der Empfindlichkeit von landwirtschaftlichen Produktionssystemen gegenüber dem Klimawandel. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, Thünen Report 25, 132 S.
- ROECKNER, E.; BÄUML, G.; BONAVENTURA, L.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KIRCHNER, I.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; RHODIN, A.; SCHLESE, U.;

- SCHULZWEIDA, U.; TOMPKINS, A. (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM 5 – Part 1: Model description. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg. Report No. 349, 127 S.
- ROßBERG, D.; MICHEL, V.; GRAF, R.; NEUKAMPF, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst, 59 (7), S. 155 – 161.
- RÜHLING, I. (2014): Anpassung an den Klimawandel: inwieweit sind die Landwirte Niedersachsens informiert? In: KORN, H.; BROCKMÜHL, K.; SCHLIEP, R. (Hrsg.): Biodiversität und Klima - Vernetzung der Akteure in Deutschland X - Ergebnisse und Dokumentation des 10. Workshops. BfN-Skripten 357 [Bundesamt für Naturschutz], Bonn, S. 21 – 25.
- SCHMIDHUBER, J. (2011): Sicherung einer nachhaltigen Welternährung aus Sicht der FAO. Vortrag an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 17.11.2011.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Publikationen des Umweltbundesamtes, o.V., 2007, 149 S.
- STMUG [BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND GESUNDHEIT] (Hrsg.) (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS).
http://www.bestellen.bayern.de/application/stmug_app000014?SID=1520707017&ACTIONxSESSxSHOWPIC%28BILDxKEY:stmug_klima_00002,BILDxCLASS:Artikel,BILDxTYPE:PDF%29 (16.04.2012).
- STOCKINGER, C. (2010): Landwirtschaftliche Unternehmensführung bei volatilen Märkten und unsicherer Entscheidungsfindung. Jahresbericht 2009 des Instituts für Ländliche Strukturentwicklung, Betriebswirtschaft und Agrarinformatik der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, S. 10 – 13.
- STOLL, P.T.; MAUSER, W.; SCHULZ, M.; HÖLL, B. (Hrsg.) (2010): Regionale Klimamodelle – Potentiale, Grenzen und Perspektiven. Nationales Komitee für Global Change Forschung, Kiel, 30 S.
http://www.dkn-future-earth.org/data/mediapool/regionale_klimamodelle_low.pdf

- UBA [UMWELTBUNDESAMT] (Hrsg.) (2008): Kipp-Punkte im Klimasystem – Welche Gefahren drohen? Hintergrundpapier Umweltbundesamt, Berlin.
<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3283.pdf> (02.02.2011).
- UBA [UMWELTBUNDESAMT] (2014): Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2014 – Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2012. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/berichterstattung-unter-der-klimarahmenkonvention> (02.10.2014).
- VAN KEULEN, H.; PENNING DE VRIES, F.W.T.; DREES, E.M. (1982): A summary model for crop growth. In: PENNING DE VRIES, F.W.T.; VAN LAAR, H.H. (Hrsg.): Simulation of plant growth and crop production. Simulation Monographs, Pudoc [Centre of agricultural publishing and documentation], Wageningen, S. 87 – 94.
- VERSICHERUNGSKAMMER BAYERN (Hrsg.) (2015): ErnteSchutz Vario.
<https://www.vkb.de/content/versicherungen/landwirte/ernteversicherung-ernteschutz/> (12.06.2015).
- VEREINIGTE HAGEL (Hrsg.) 2014a: Secufarm Pflanzenversicherung – Allgemeine Versicherungs-Bedingungen.
http://www.vereinigte-hagel.net/benutzerhinweise.html?&no_cache=1 (07.04.2014).
- VEREINIGTE HAGEL (Hrsg.) 2014b: Secufarm Pflanzenversicherung – Besondere Versicherungs-Bedingungen.
http://www.vereinigte-hagel.net/benutzerhinweise.html?&no_cache=1 (07.04.2014).
- WALKENHORST, O.; STOCK, M. (2009): Regionale Klimaszenarien für Deutschland – Eine Leseanleitung. E-Paper der Akademie für Raumforschung und Landesplanung, Nr. 6.
<http://arl-net.org/pdf/publik/e-paper-der-arl-nr6.pdf> (24.06.2010).
- WEIGEL, H.J. (2011): Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: RAHMANN, G.; SCHUMACHER, U. (Hrsg.): Praxis trifft Forschung. Landbauforschung Völkenrode, Braunschweig, Sonderheft 354, S. 9 – 28.
- WEISENSEL, W.P.; SCHONEY, R.A. (1989): An analysis of the yield-price risk associated with specialty crops. Western Journal of Agricultural Economics 14 / 2, S. 293 – 299.
- WISSENSCHAFTLICHER BEIRAT FÜR AGRARPOLITIK BEIM BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ [BMELV] (2011):

Risiko- und Krisenmanagement in der Landwirtschaft – zur Rolle des Staates beim Umgang mit Ertrags- und Preisrisiken – Stellungnahme.

[http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/StellungnahmeRisiko-Krisenmanagement.pdf;jsessionid=00002FC6F8FBAB1D26B0195A9DF2911B.2_cid376?__blob=publicationFile](http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Ministerium/Beiraete/Agrarpolitik/StellungnahmeRisiko-Krisenmanagement.pdf?jsessionid=00002FC6F8FBAB1D26B0195A9DF2911B.2_cid376?__blob=publicationFile) (05.07.2012).

ZOLINA, O.; SIMMER, C.; BELYAEV, K.; KAPALA, A.; GULEV, S. (2009): Improvin estimates of heavy and extreme precipitation using daily records from European rein gauges. *Journal of Hydrometeorology*, 10, 701-716, DOI: 10.1175/2008JHM1055.1.

Anhang

Anhang I

Veränderung pflanzenbaulich relevanter Klimaparameter an den Untersuchungsstandorten im Jahresverlauf (ENSEMBLE-Ansatz)

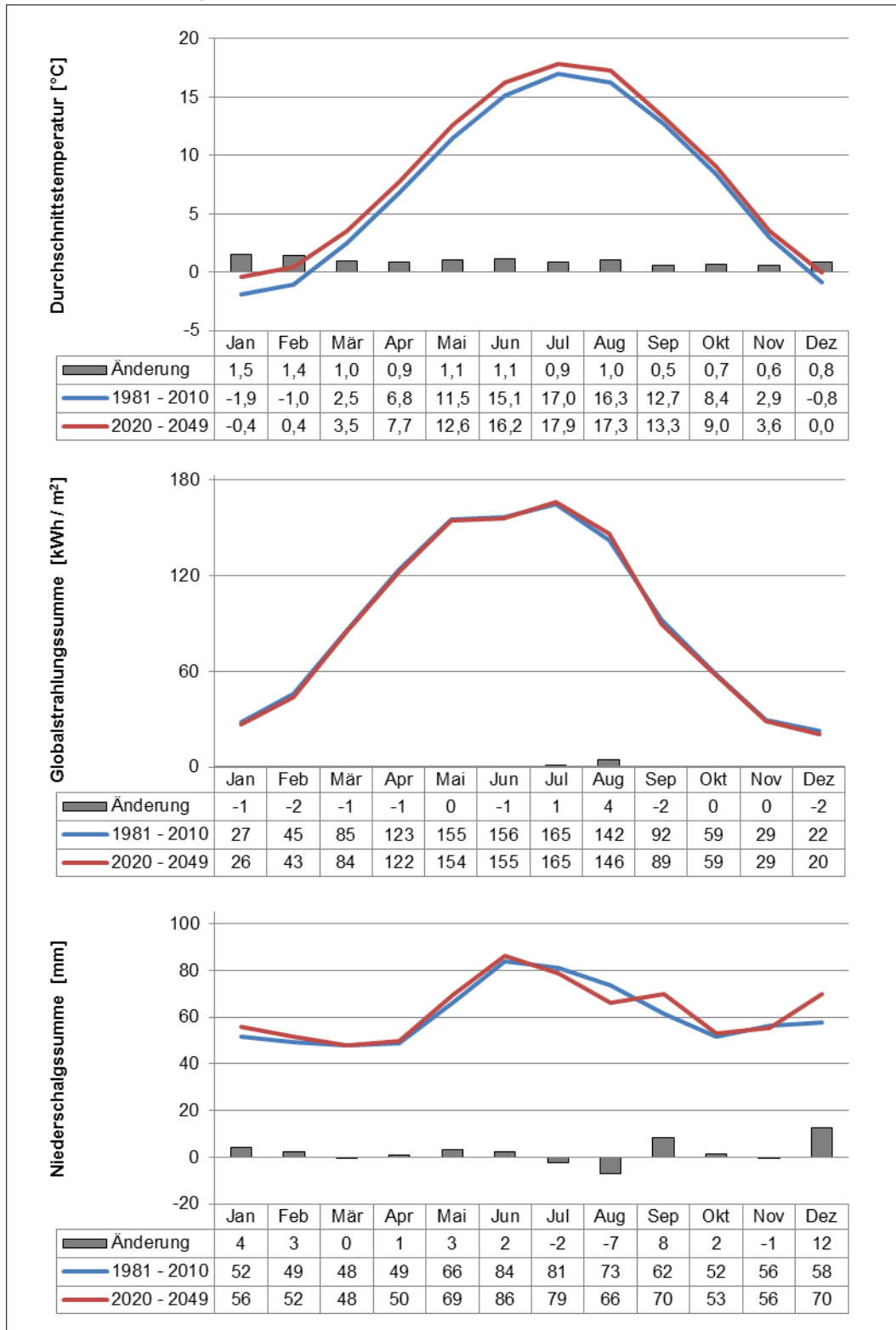


Abbildung A_I. 1: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Almesbach zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

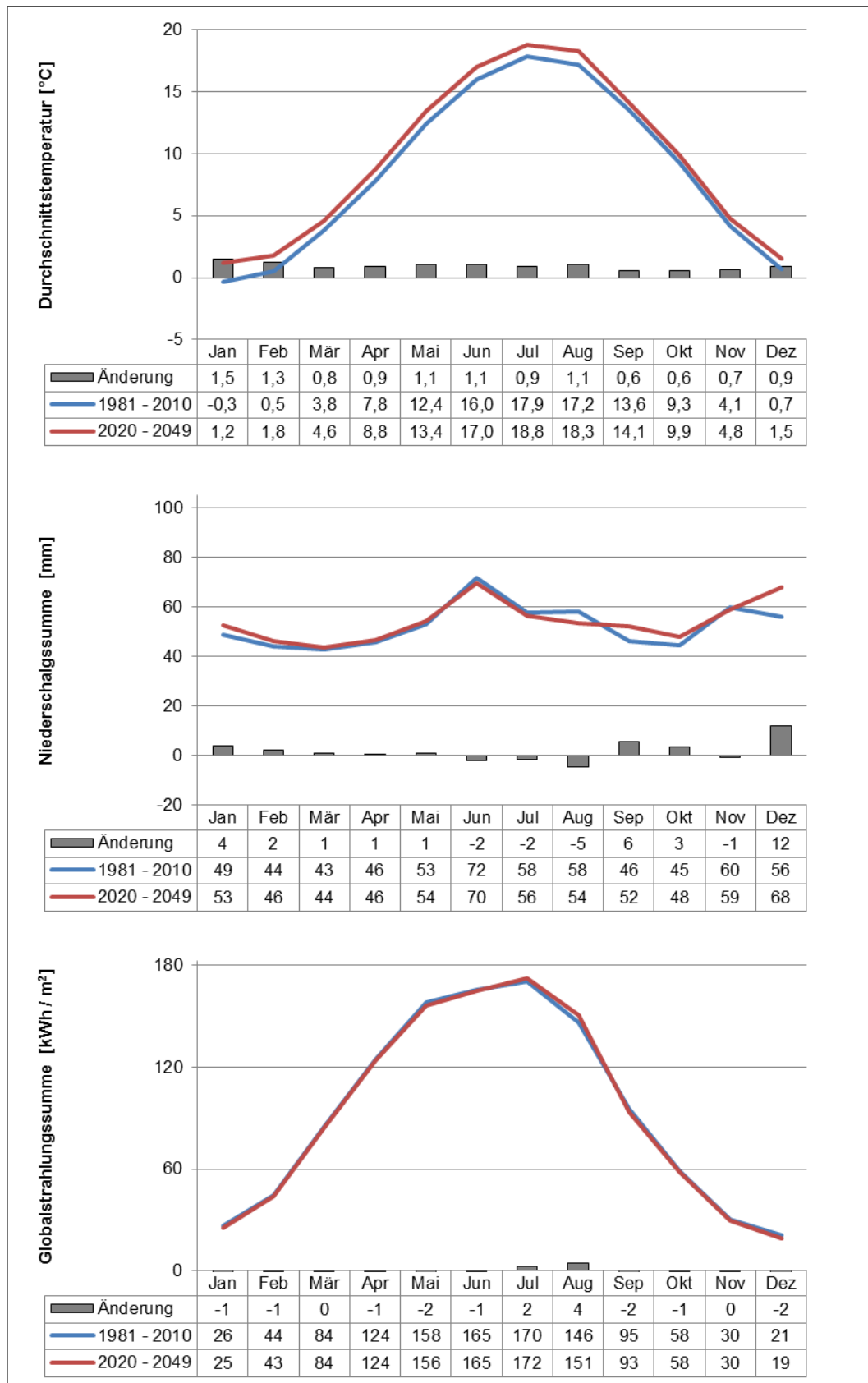


Abbildung A_I. 2: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Arnstein zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

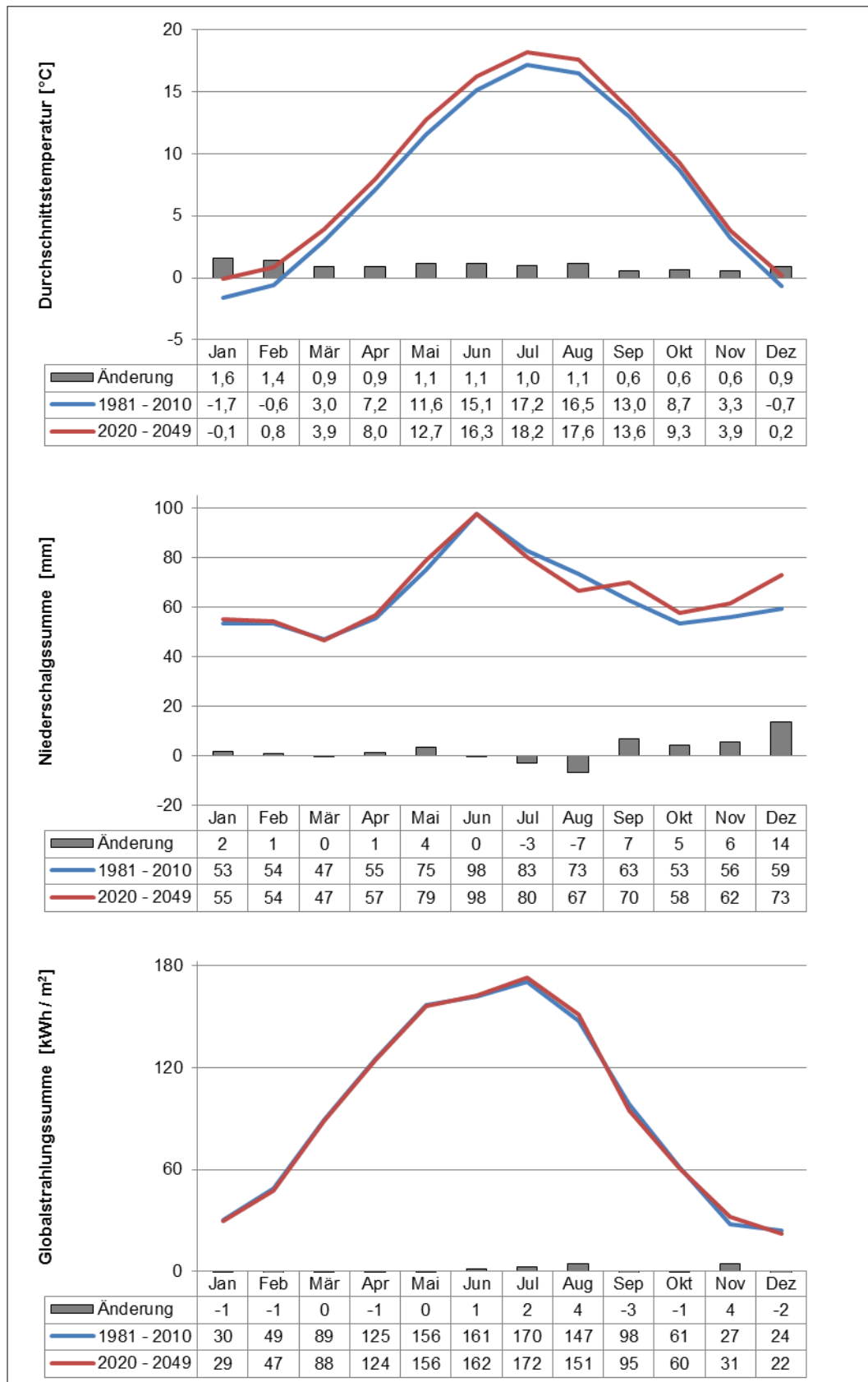


Abbildung A_I. 3: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Bieswang zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

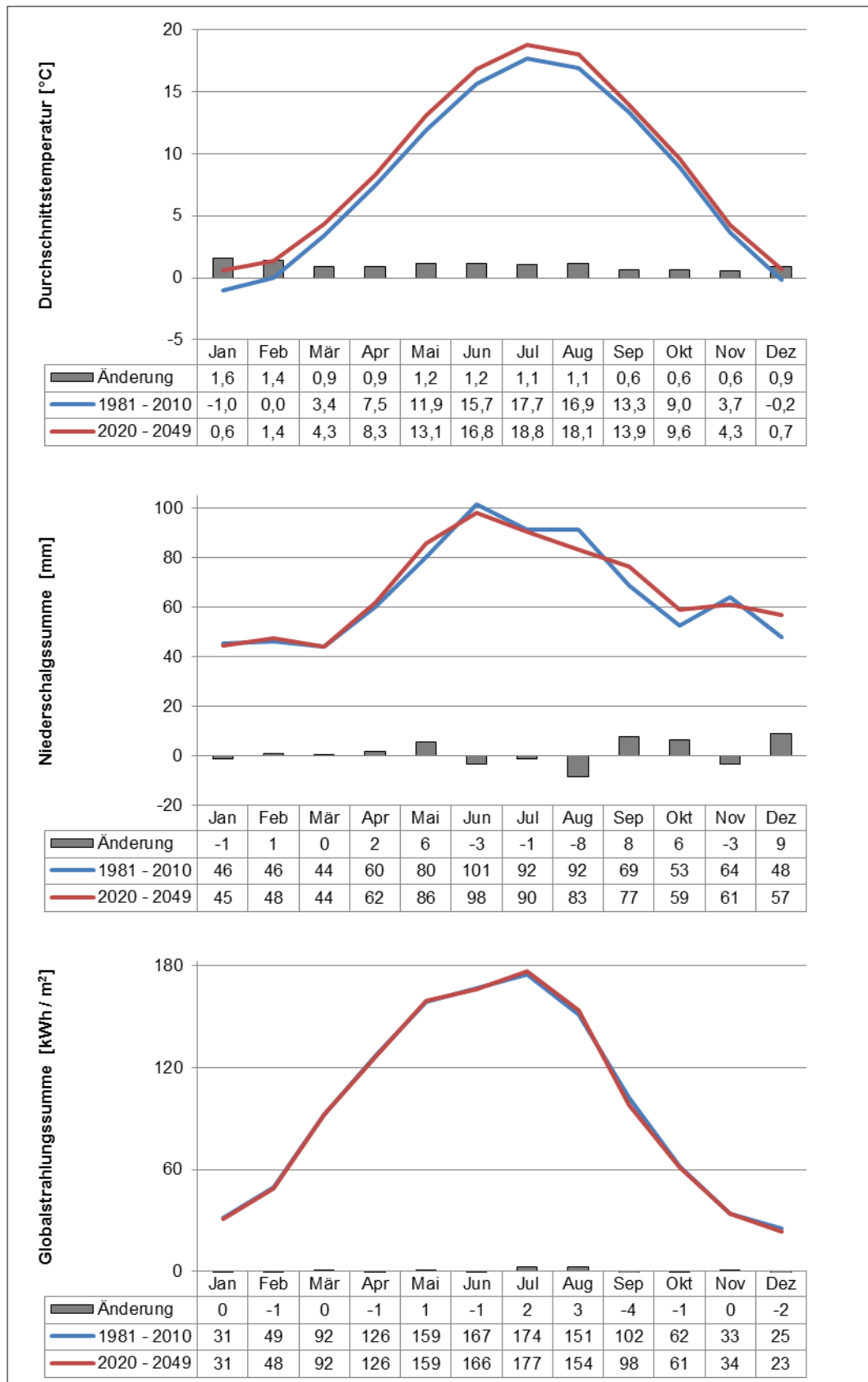


Abbildung A_I. 4: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Günzburg zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

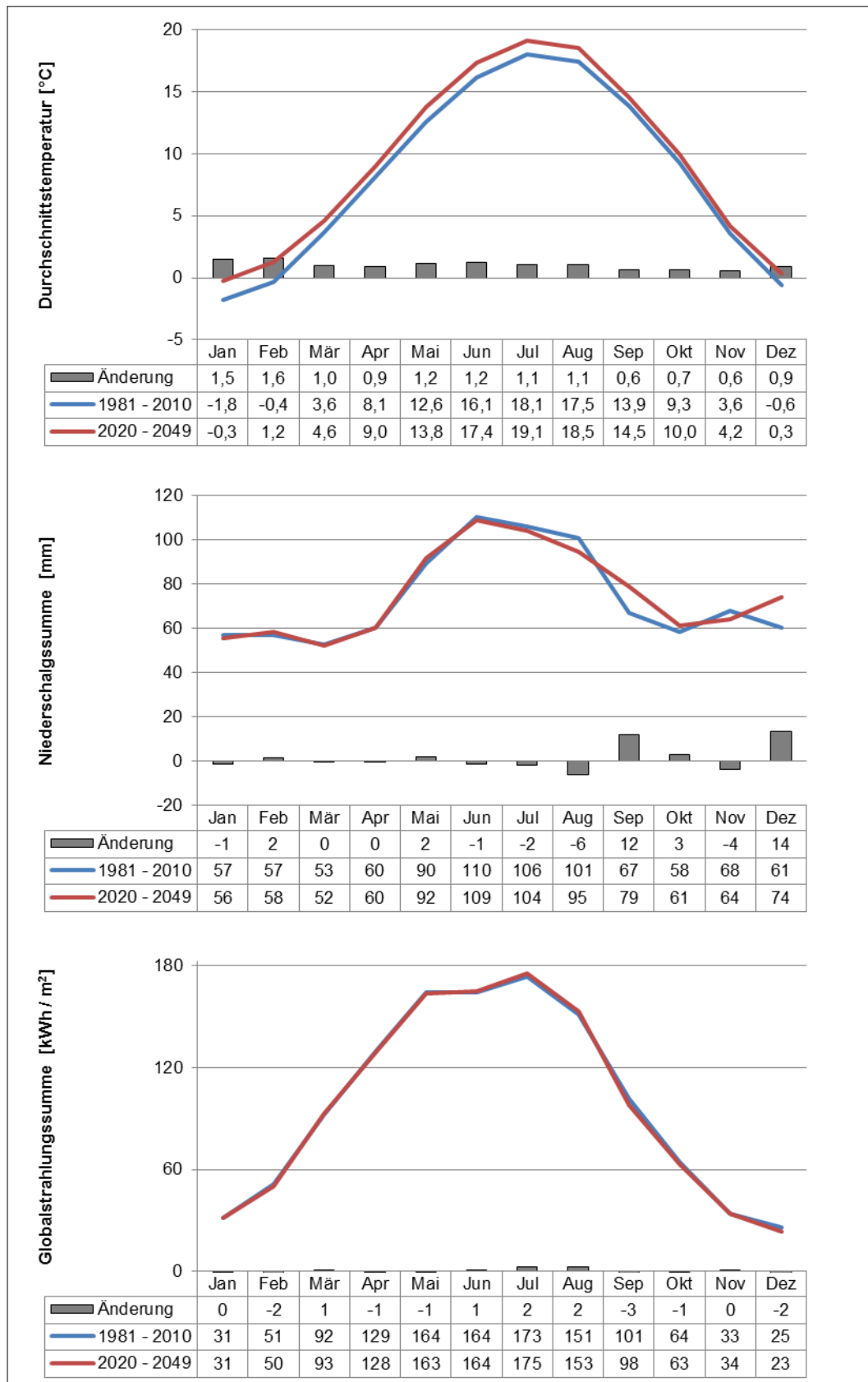


Abbildung A_I. 5: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Reith zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

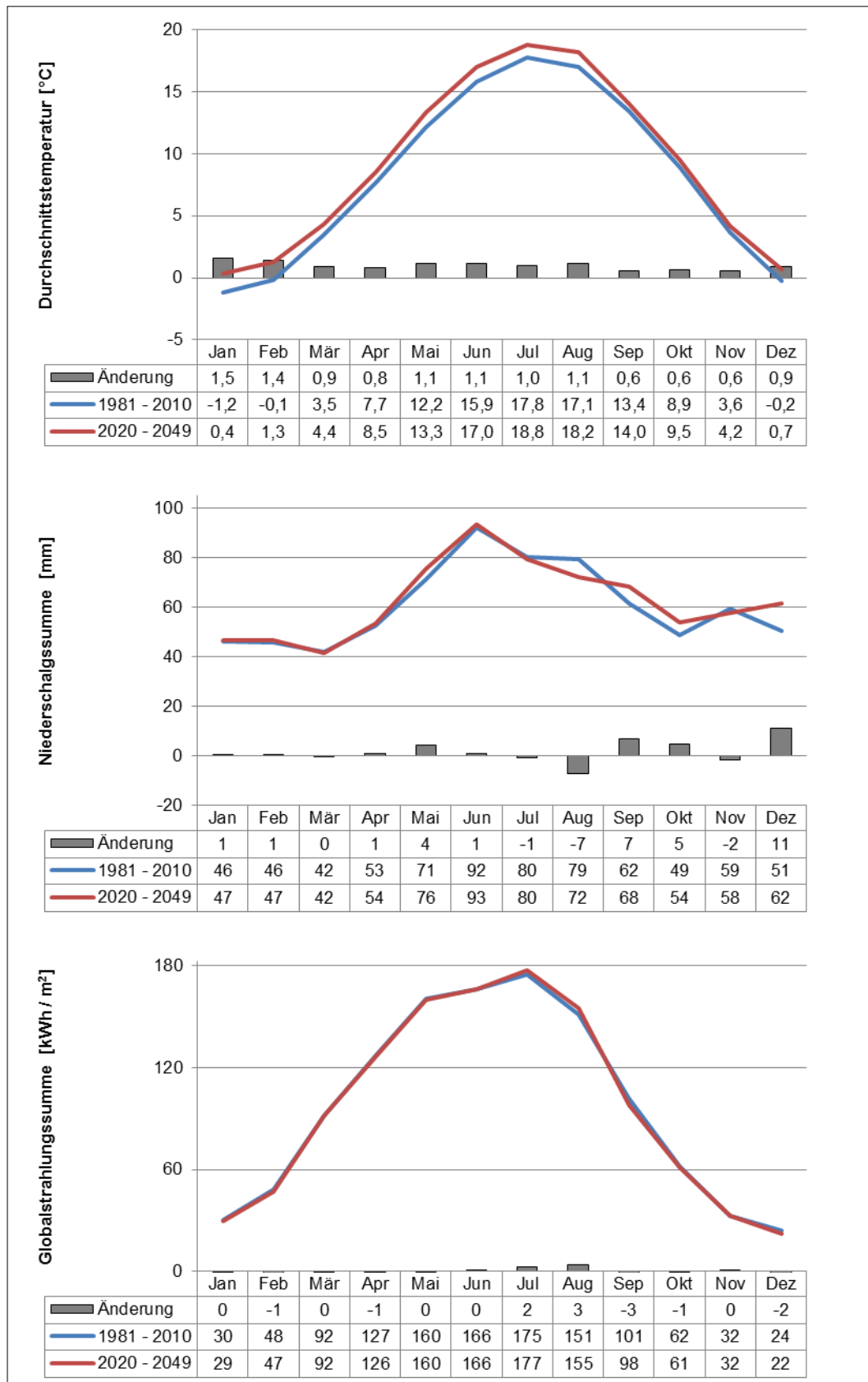


Abbildung A_I. 6: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Straßmoos zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

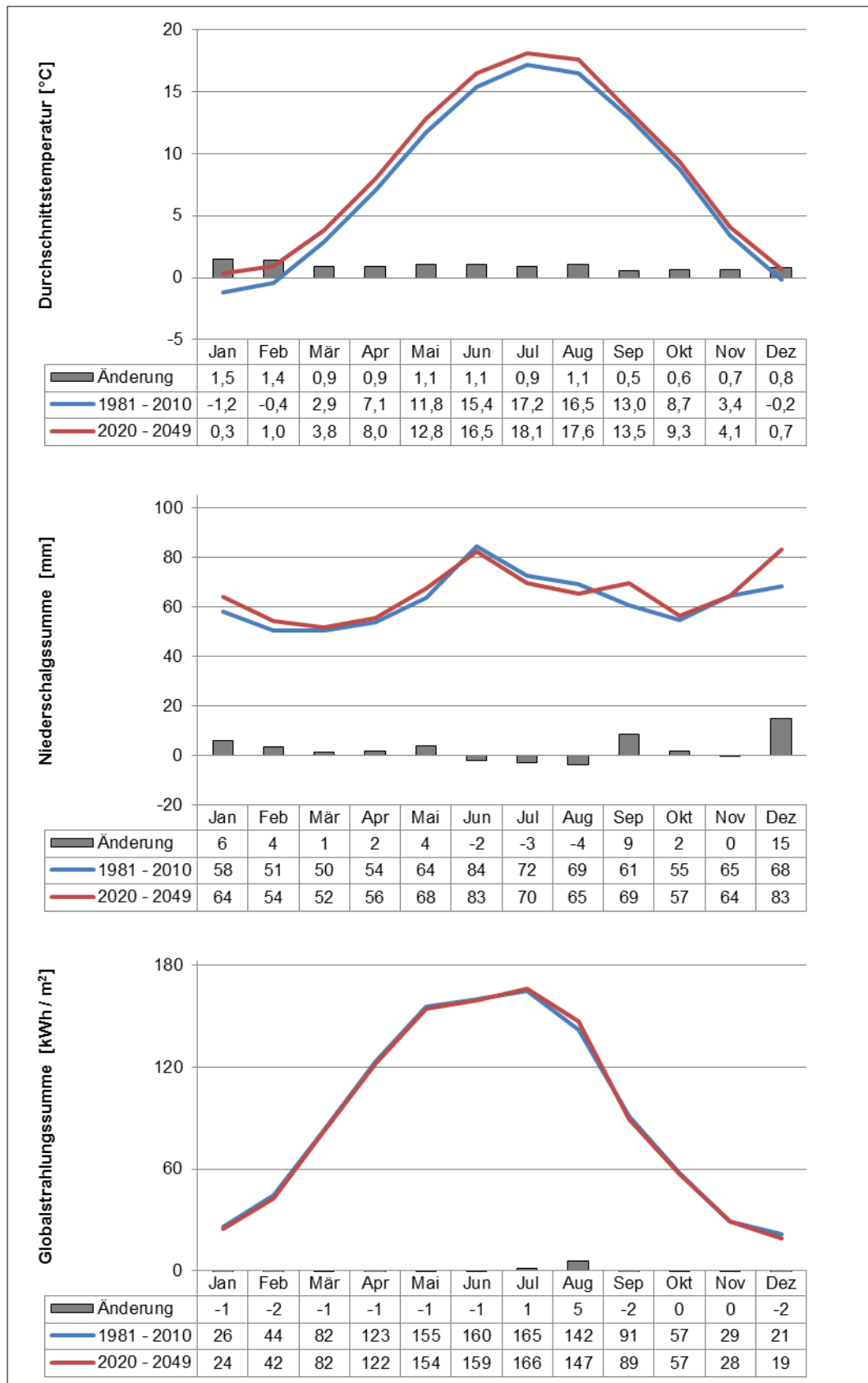


Abbildung A_I. 7: Veränderung von Temperatur, Niederschlag und Strahlung am Standort Wolfsdorf zwischen den beiden Referenzzeiträumen
(Quelle: eigene Darstellung, Datenbasis ENSEMBLE)

Anhang II

Veränderung des Naturalertrages der an den Untersuchungsstandorten angebauten Kulturen (ENSEMBLE-Ansatz)

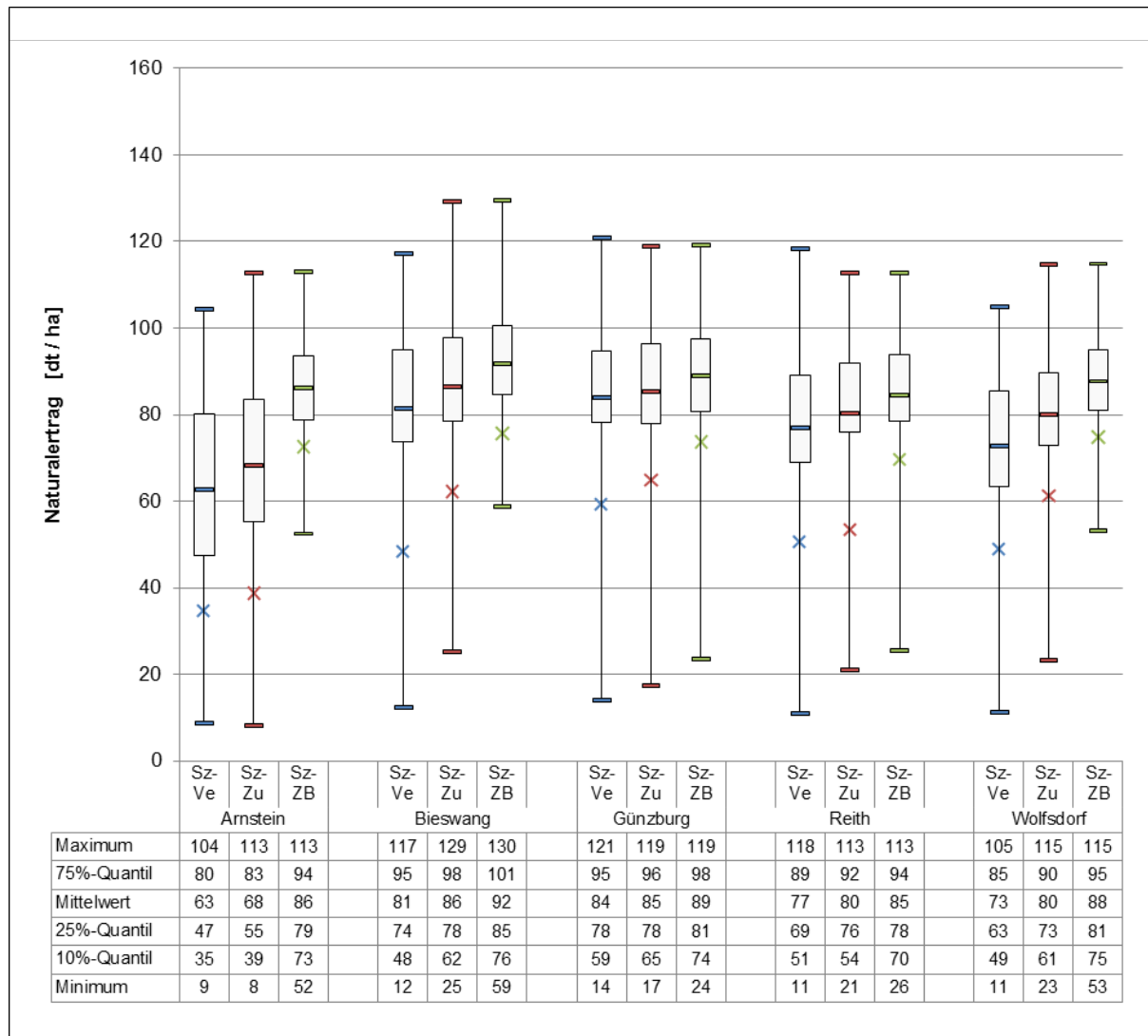


Abbildung A_II. 1: Veränderung des Naturalertrages von Winterweizen an den Untersuchungsstandorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

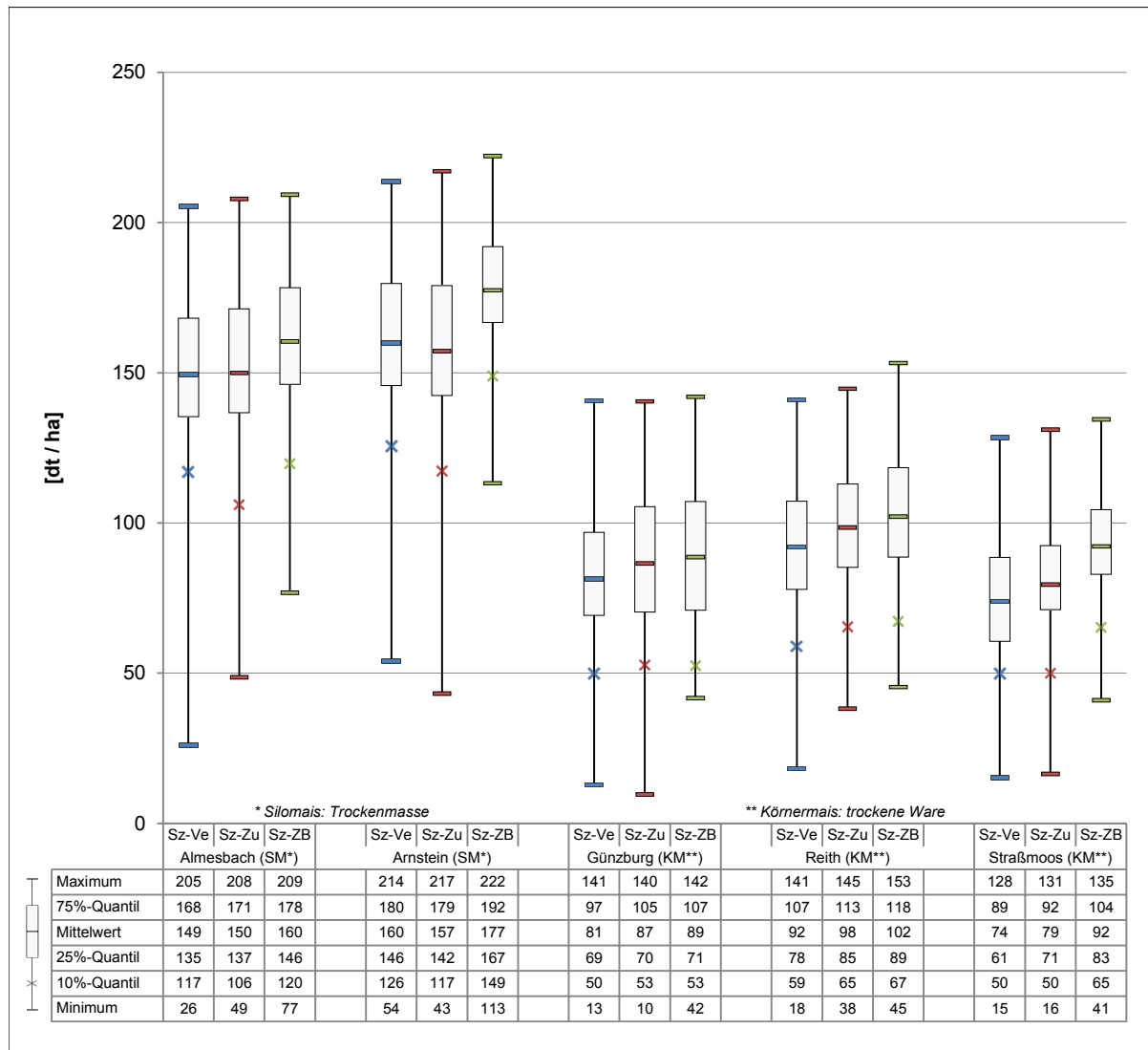


Abbildung A_II. 2: Veränderung des Naturalertrages von Mais an den Untersuchungsstandorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

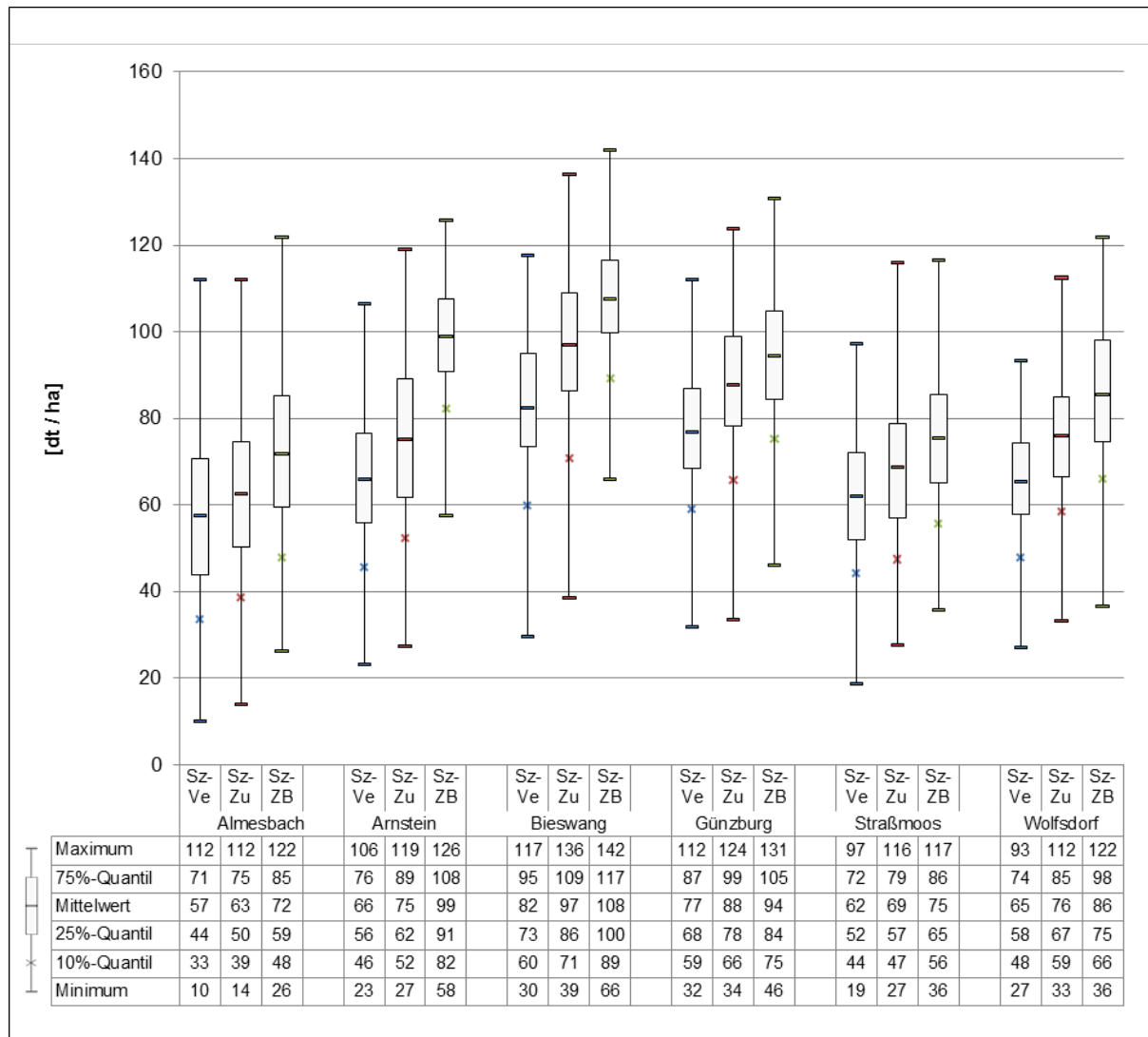


Abbildung A_II. 3: Veränderung des Naturalertrages von Wintergerste an den Untersuchungsstandorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

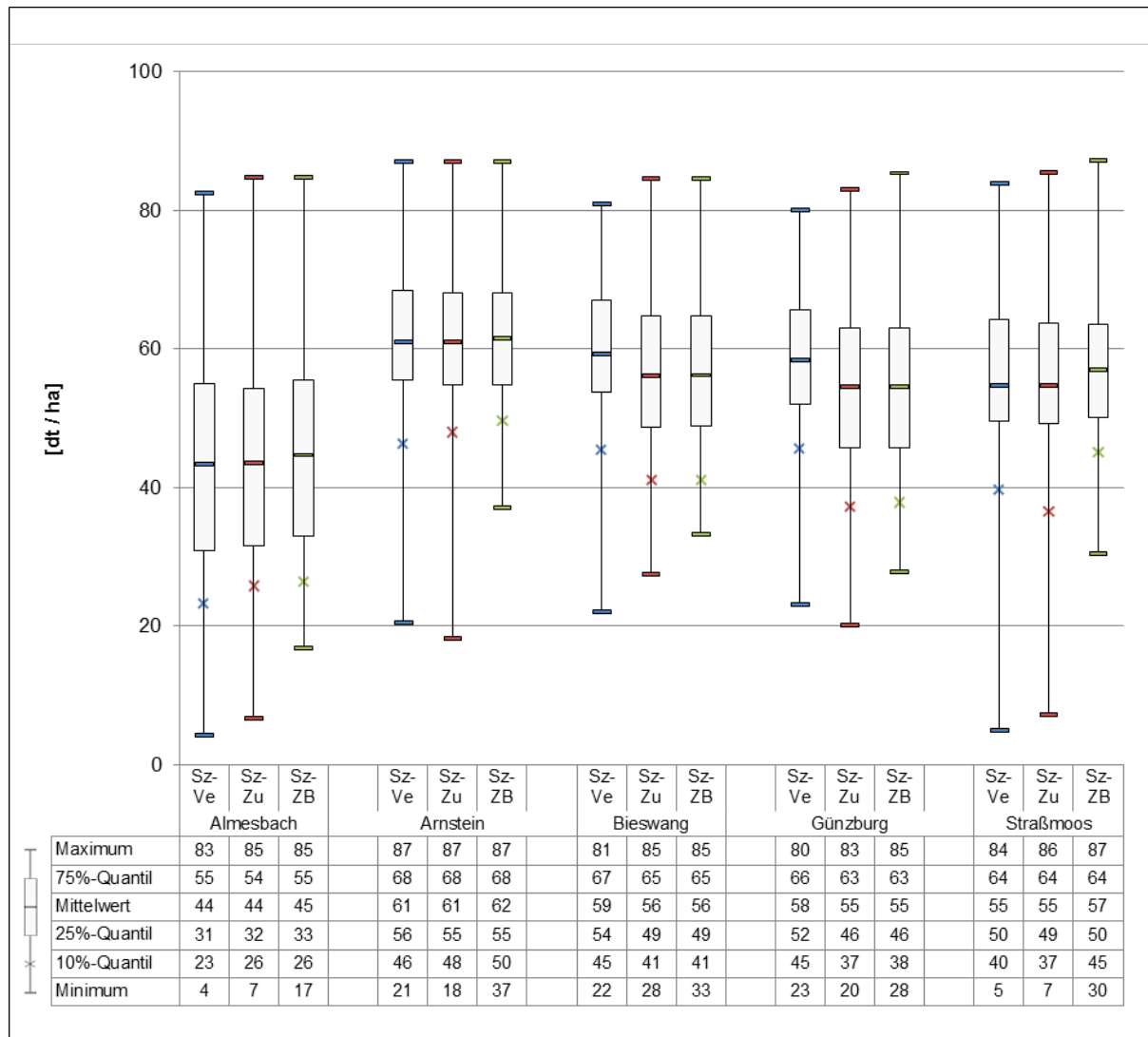


Abbildung A_II. 4: Veränderung des Naturalertrages von Sommergerste an den Untersuchungsstandorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

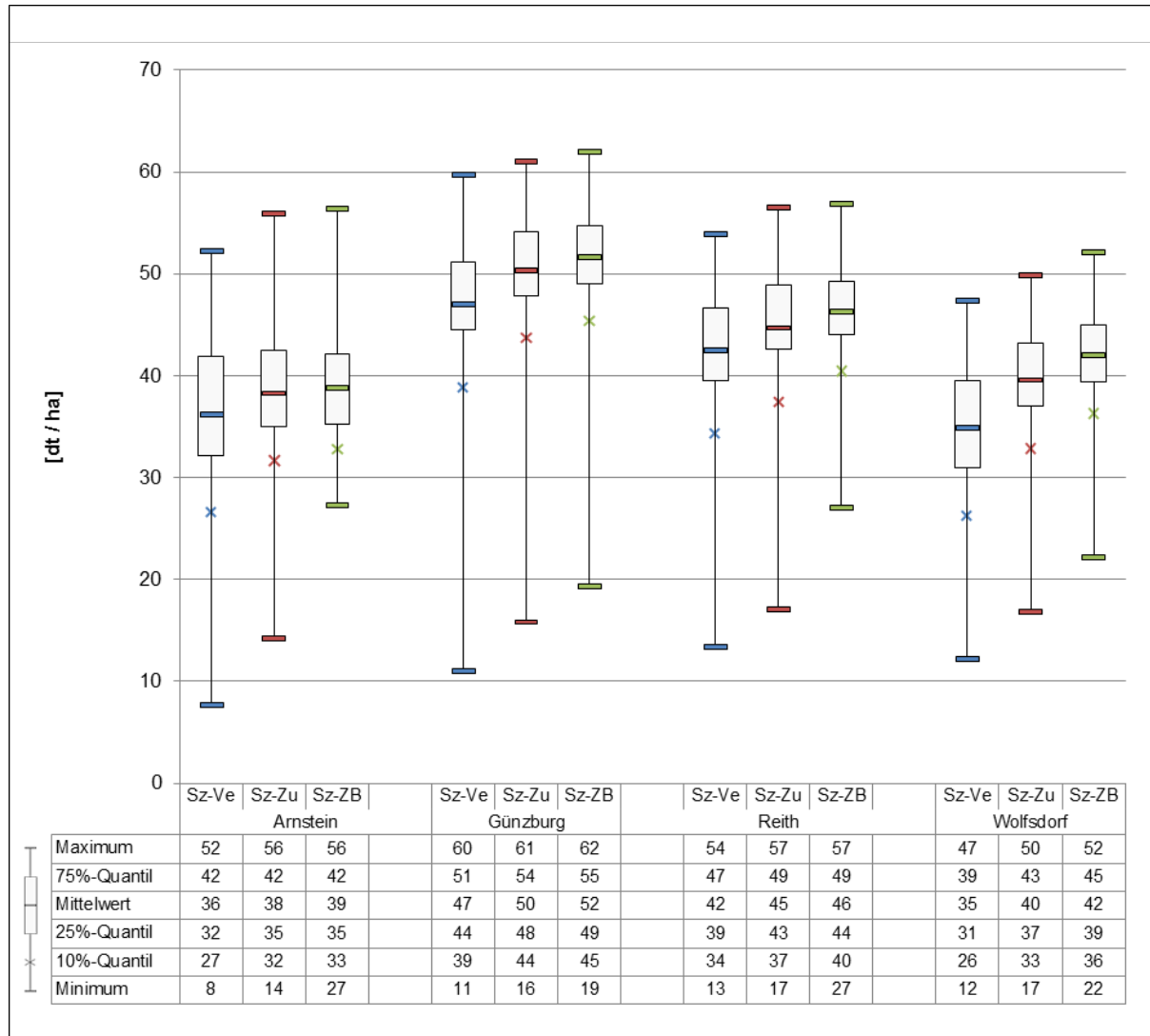


Abbildung A_II. 5: Veränderung des Naturalertrages von Winterraps an den Untersuchungsstandorten im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

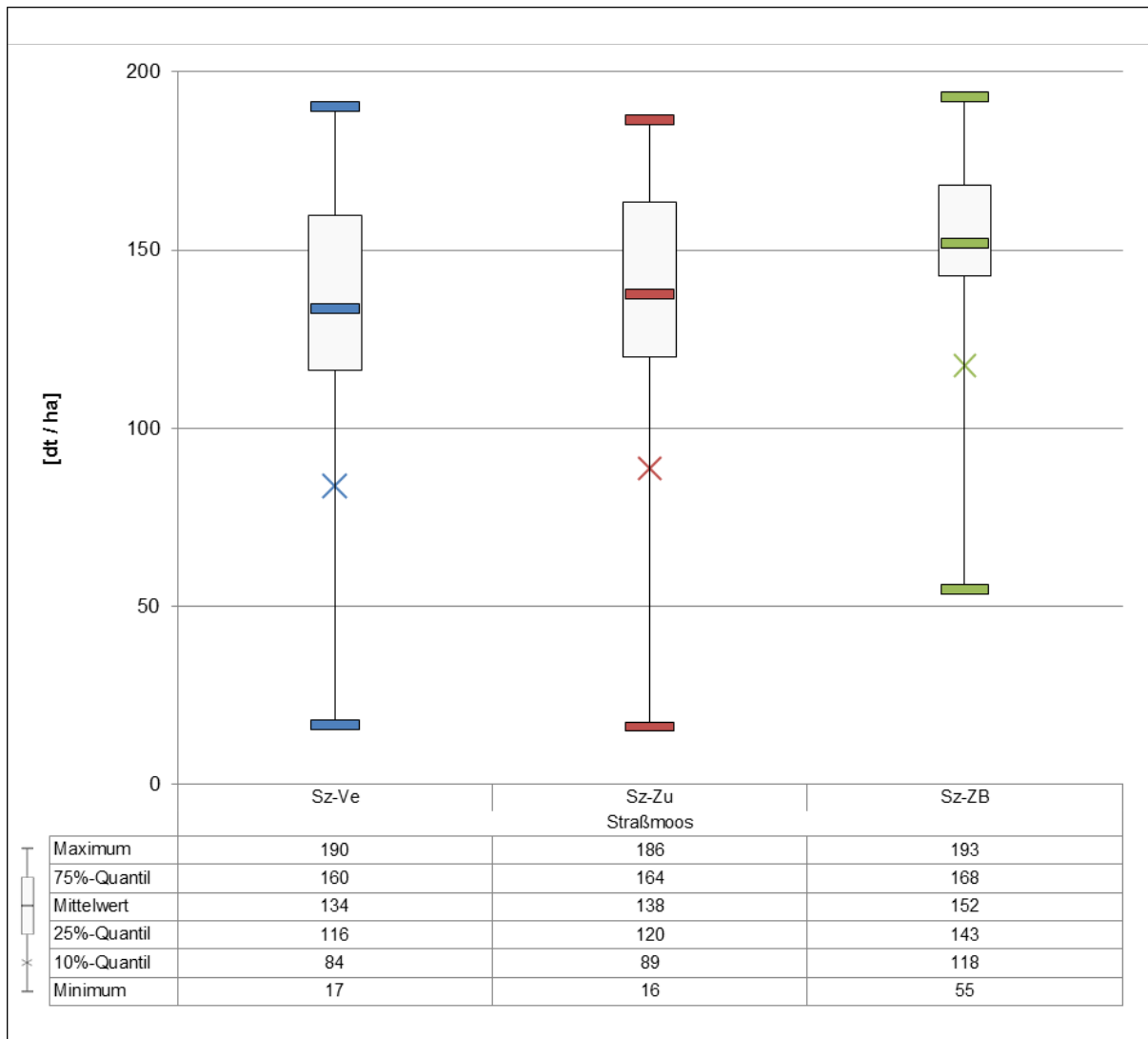


Abbildung A_II. 6: Veränderung des Naturalertrages von Kartoffeln am Standort Straßmoos im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Anhang III

Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung der an den Untersuchungsstandorten angebauten Kulturen (ENSEMBLE-Ansatz)

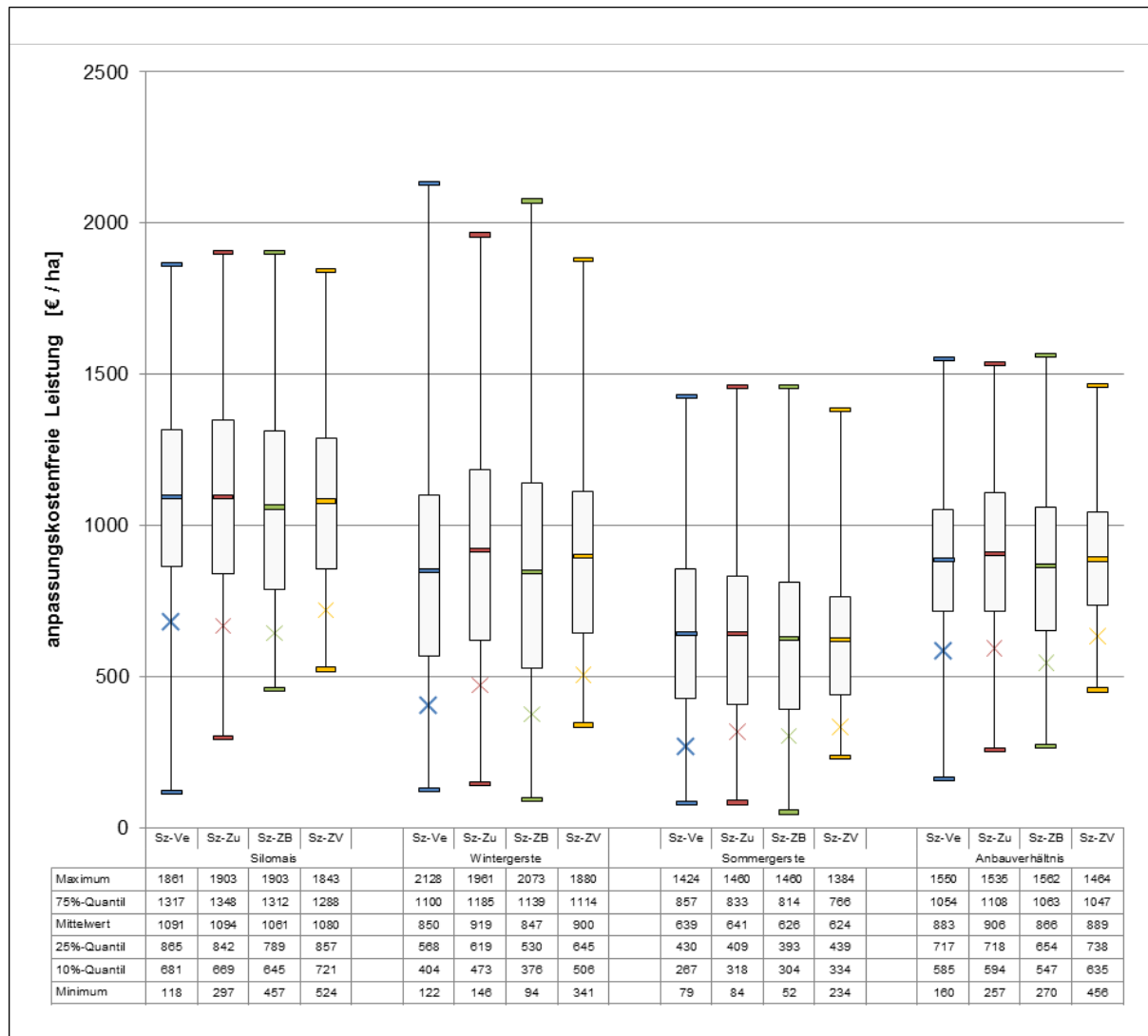


Abbildung A_III. 1: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Almesbach im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

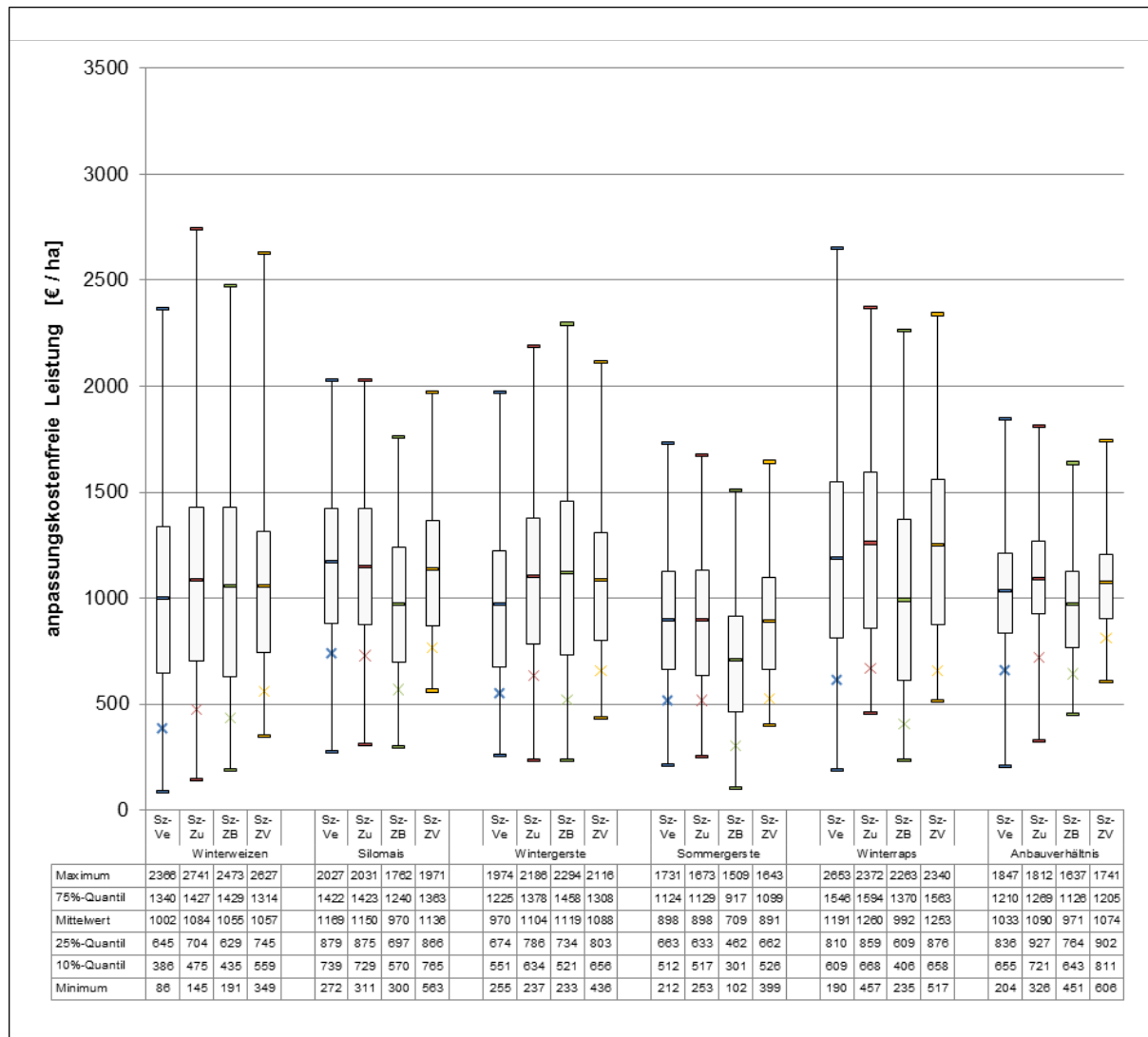


Abbildung A_III. 2: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Arnstein im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

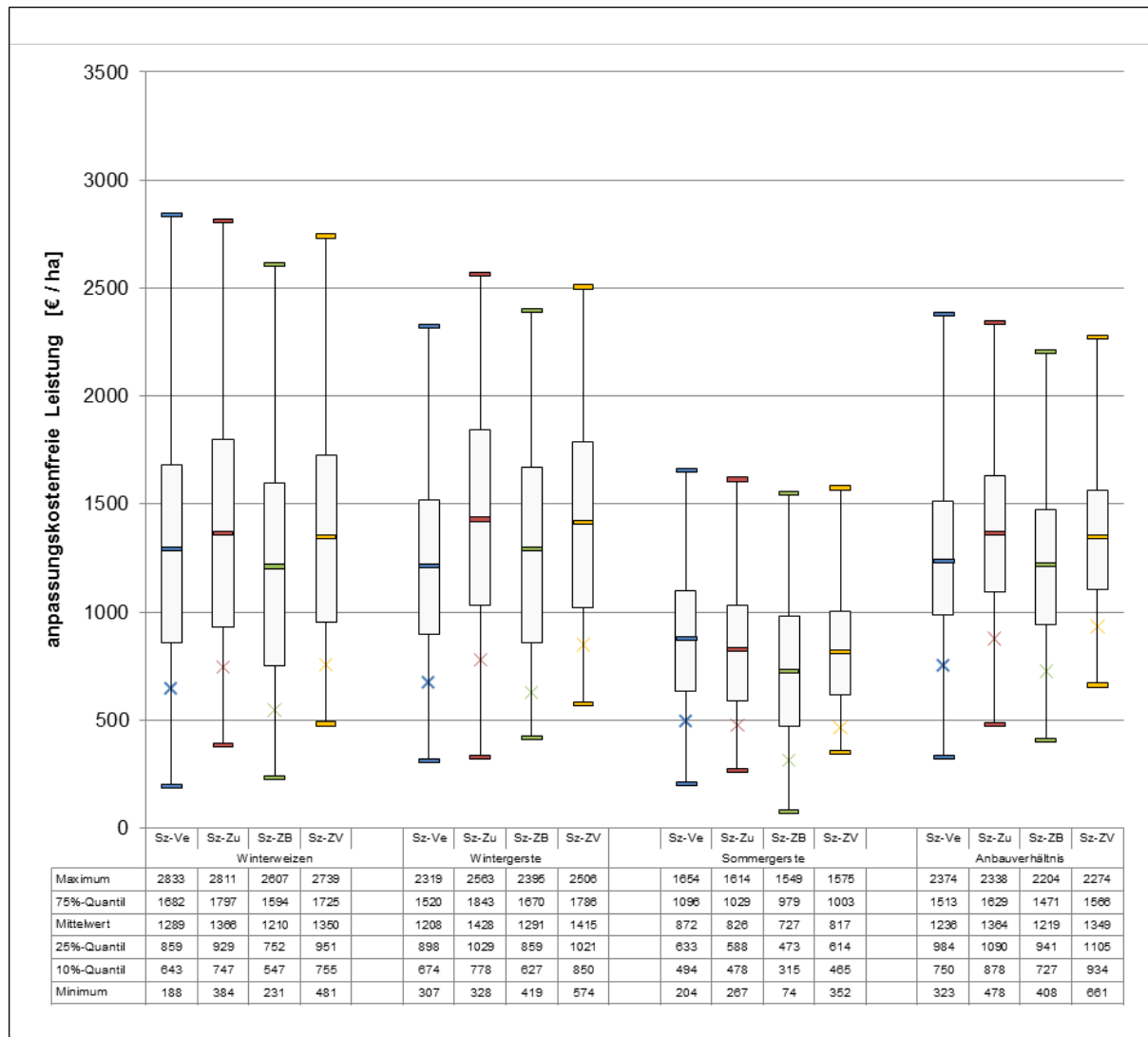


Abbildung A_III. 3: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Bieswang im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

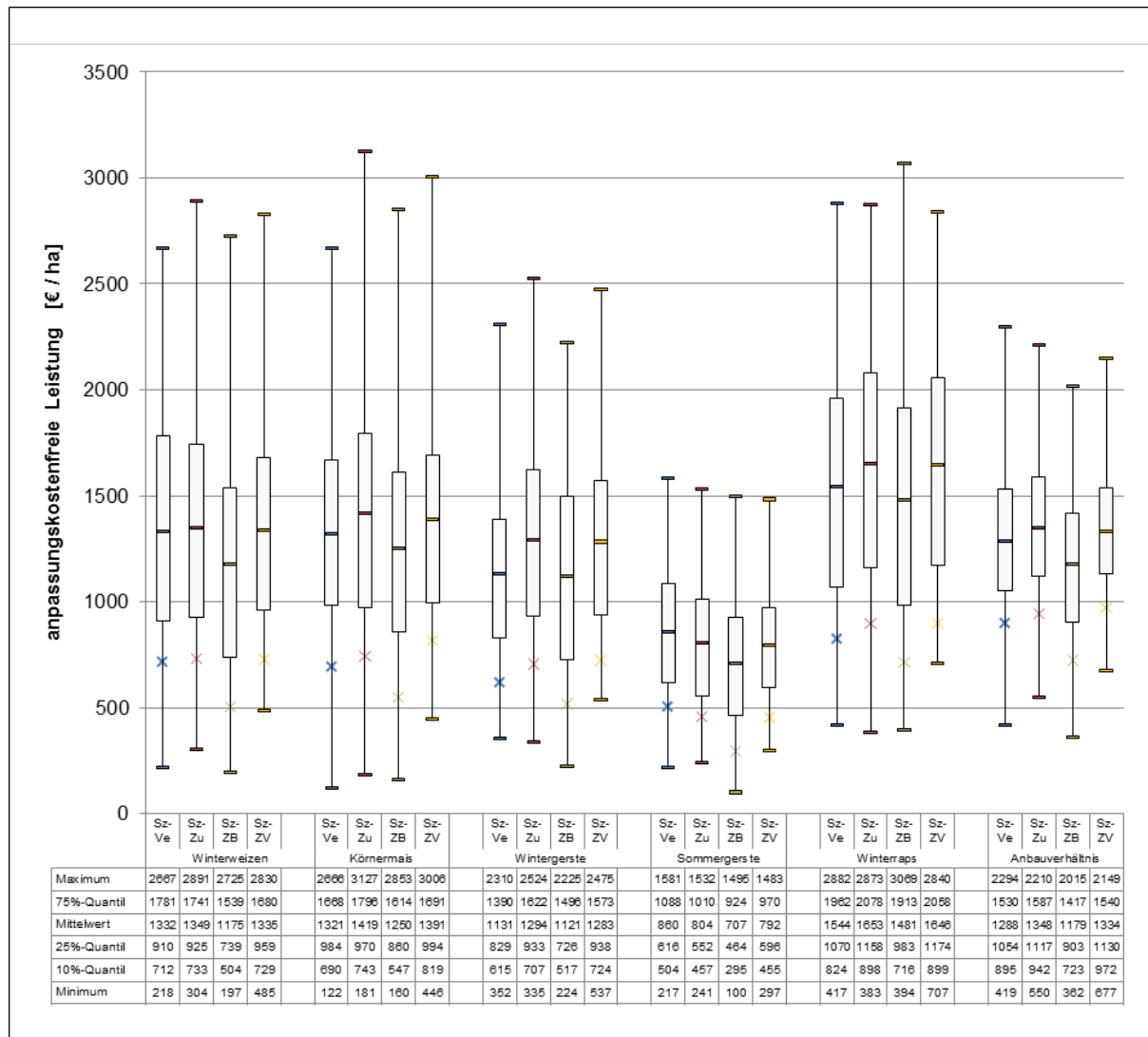


Abbildung A_III. 4: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Günzburg im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

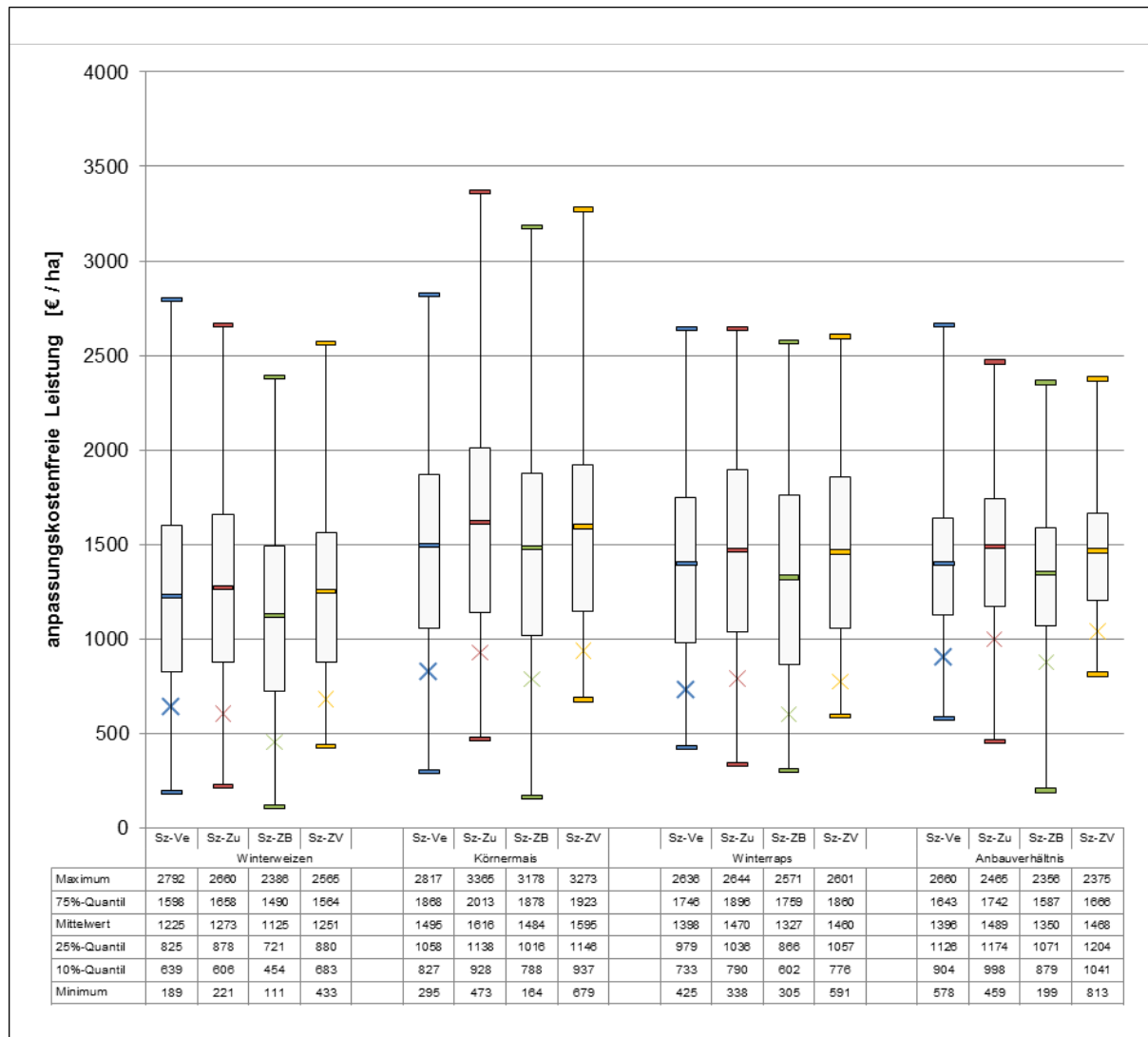


Abbildung A_III. 5: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Reith im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

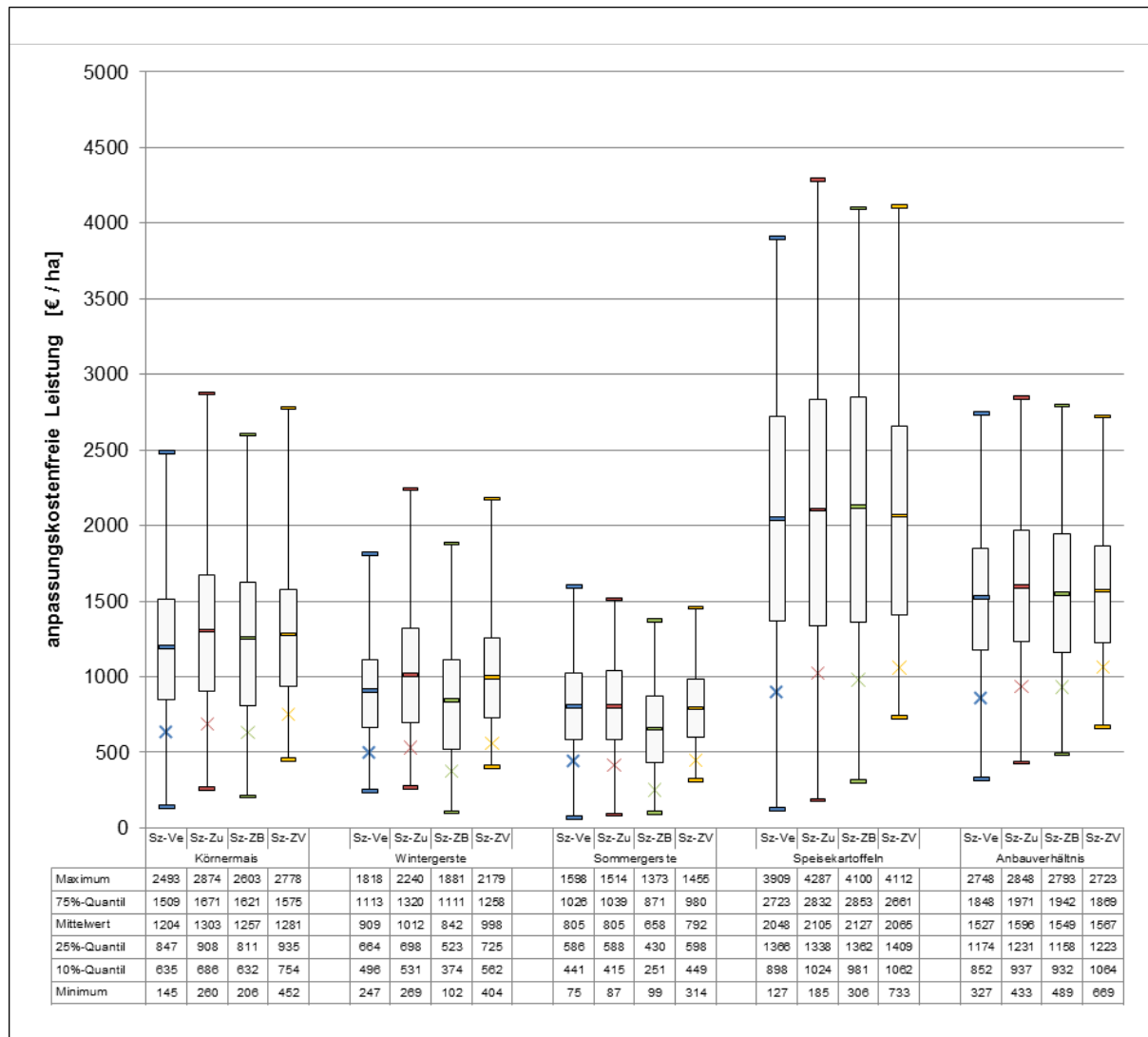


Abbildung A_III. 6: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Straßmoos im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

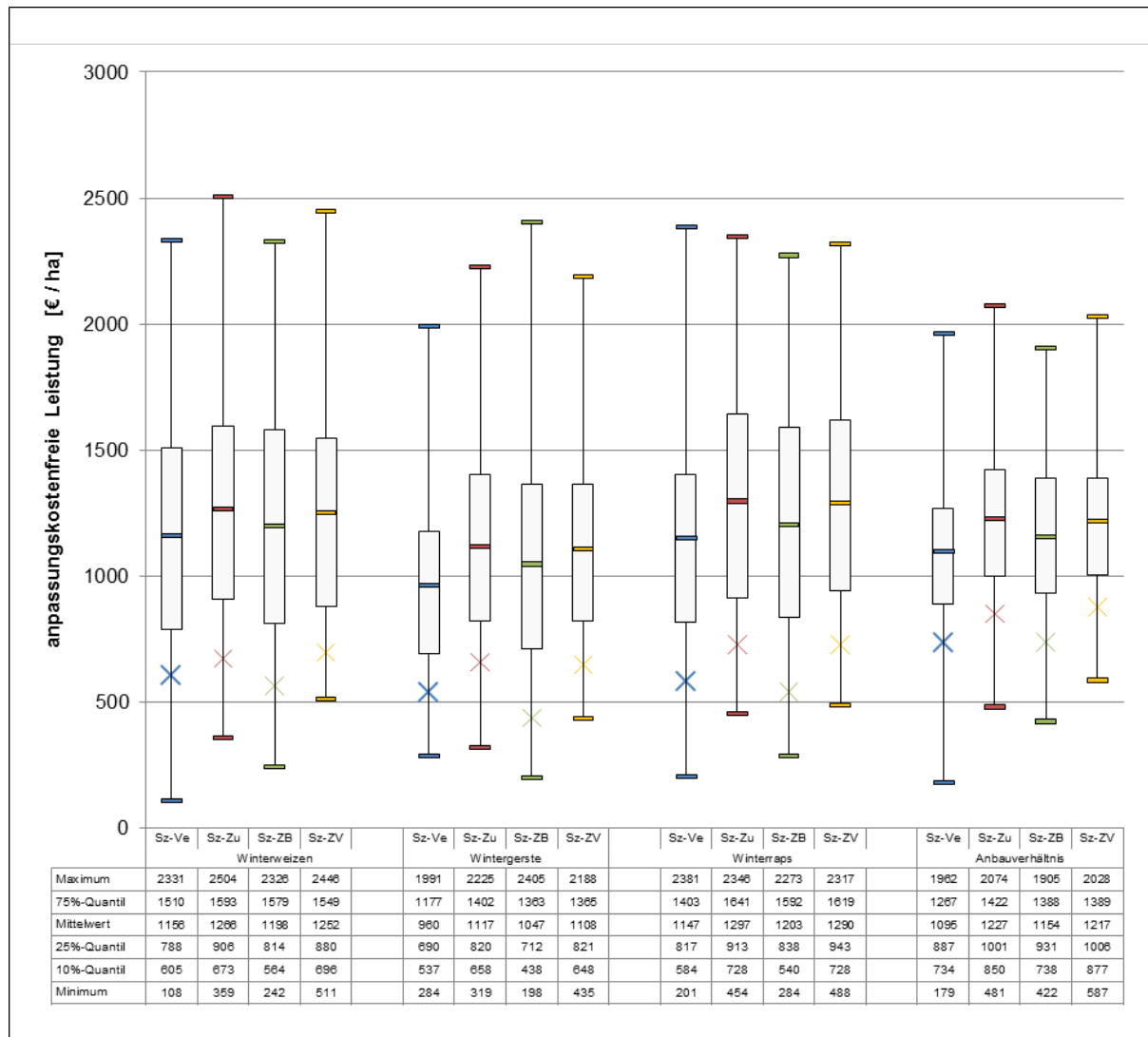


Abbildung A_III. 7: Veränderung der anpassungskostenfreien Leistung am Standort Wolfsdorf im Vergleich der Untersuchungsszenarien
(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Anhang IV

Veränderung des Sicherheitsäquivalentes der an den Untersuchungsstandorten angebauten Kulturen (ENSEMBLE-Ansatz)

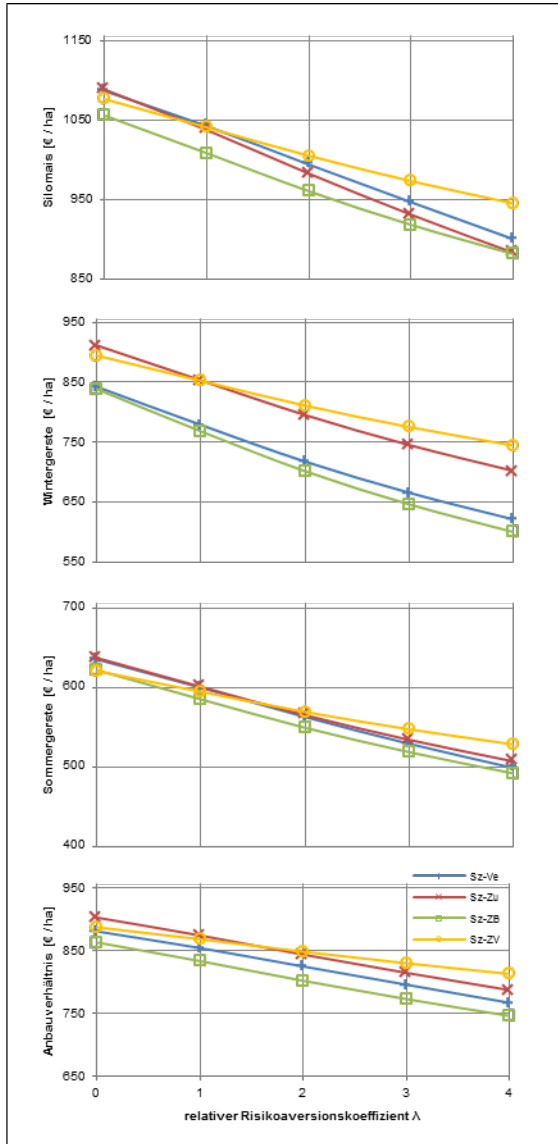


Abbildung A_IV. 1:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Almesbach im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

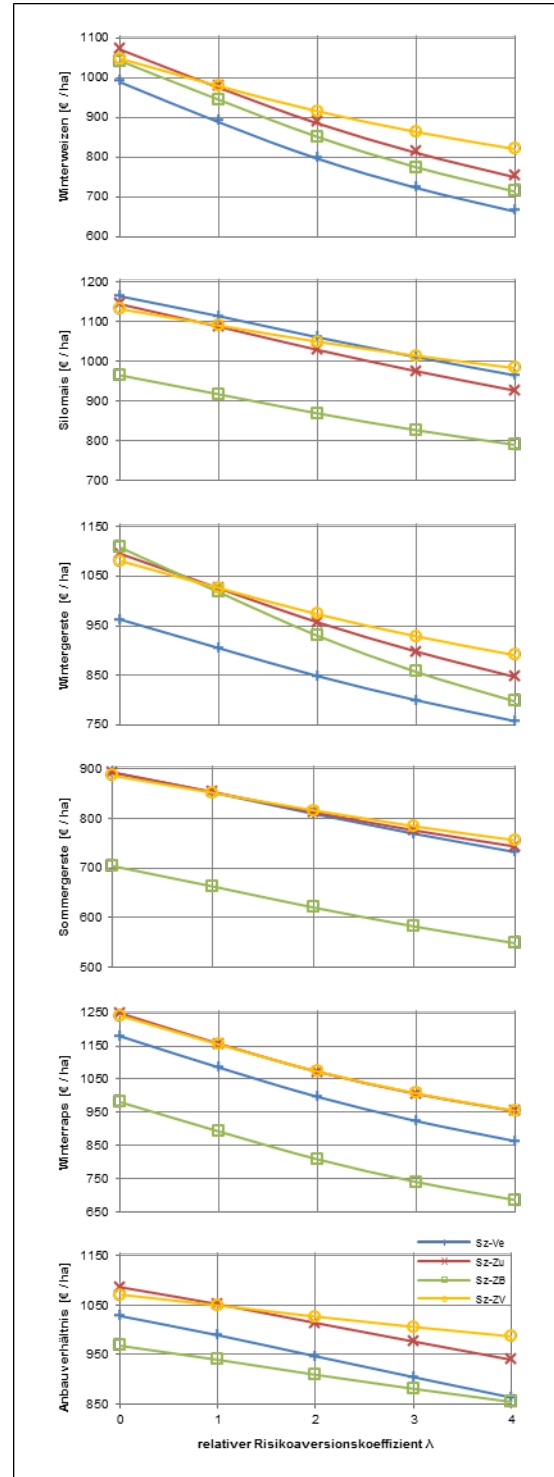


Abbildung A_IV. 2:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Arnstein im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

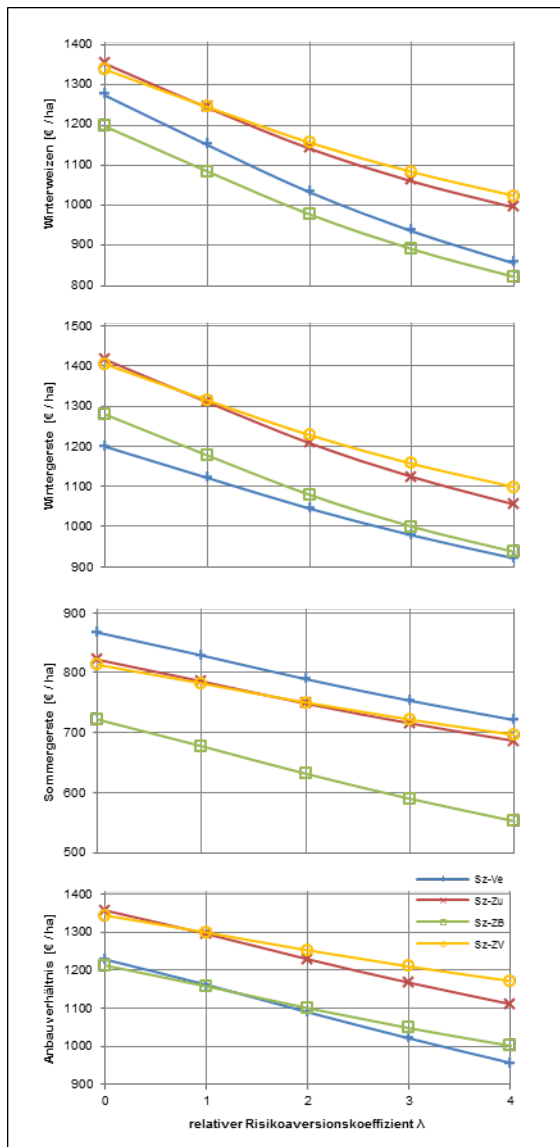


Abbildung A_IV. 4:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Bieswang im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

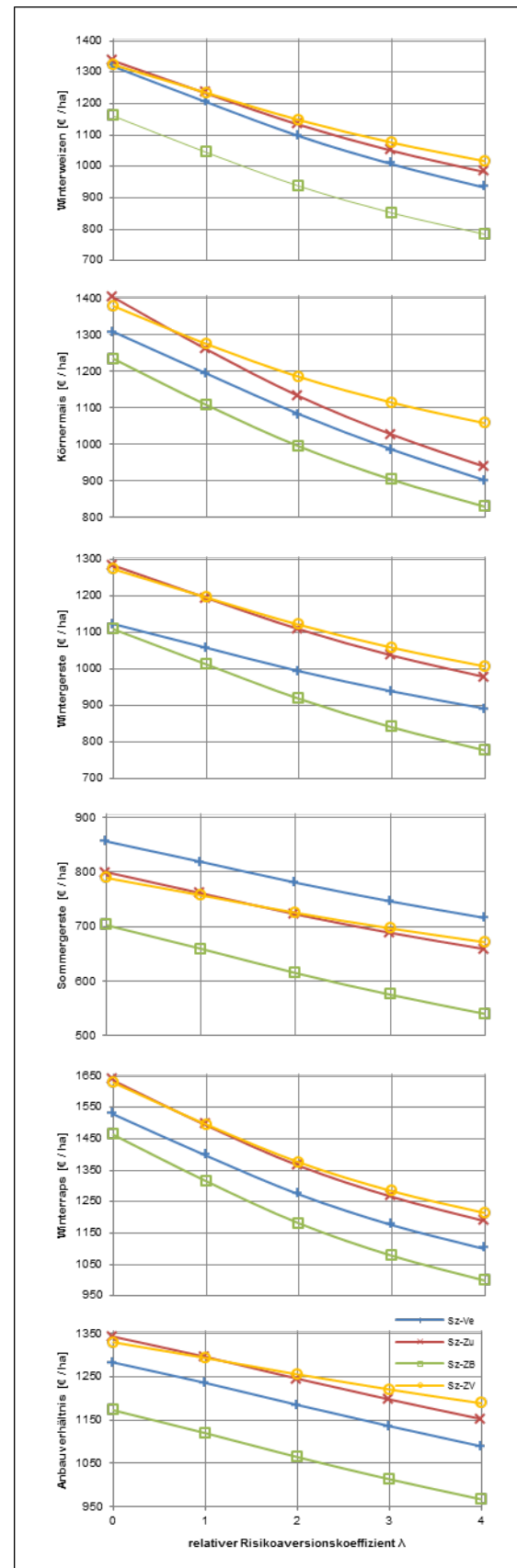


Abbildung A_IV. 3:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Günzburg im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

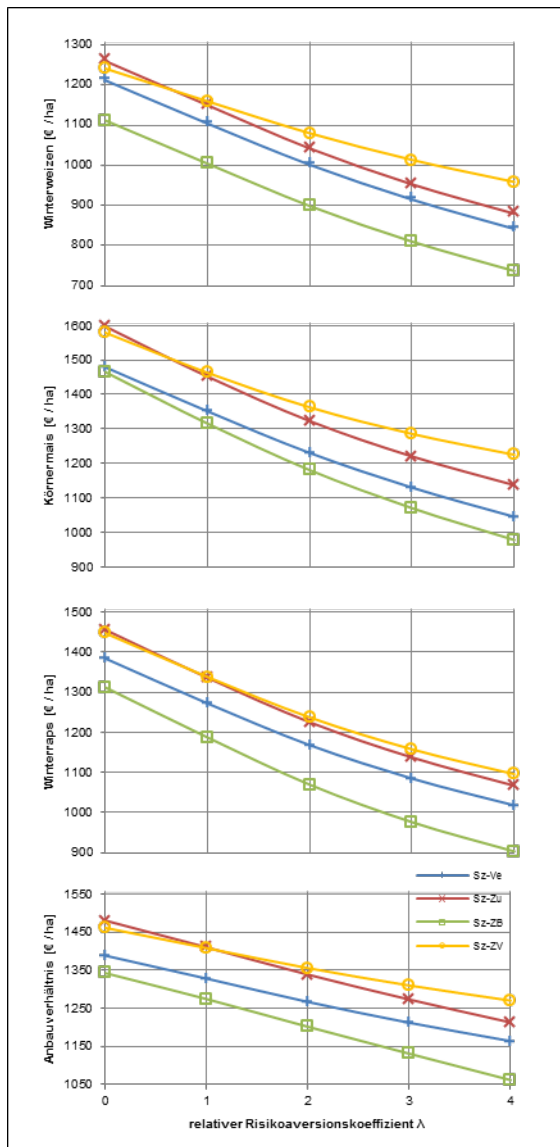


Abbildung A_IV. 5:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Reith im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

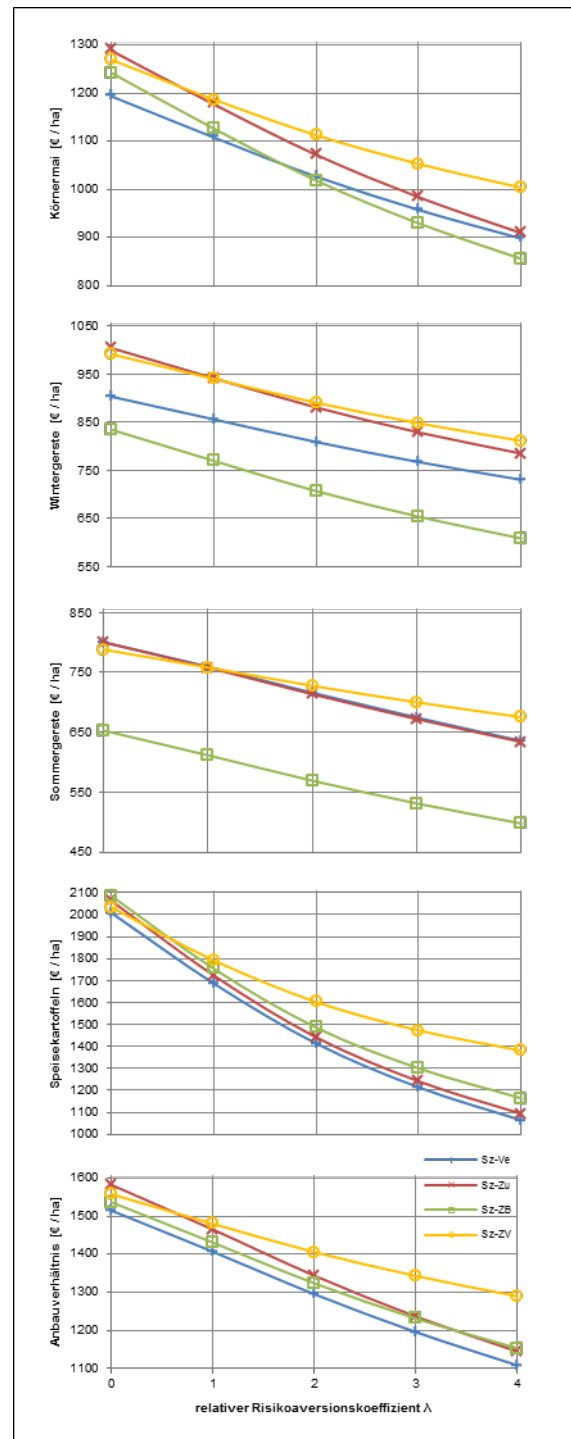


Abbildung A_IV. 6:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Straßmoos im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

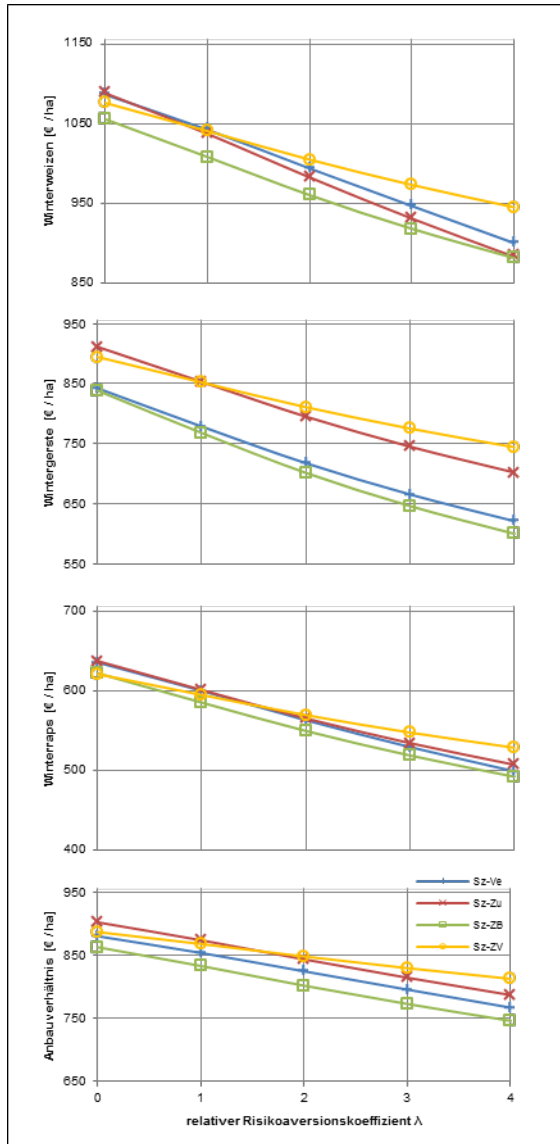


Abbildung A_IV. 7:
Veränderung des Sicherheitsäquivalents am
Standort Wolfsdorf im Vergleich der
Untersuchungsszenarien

(Quelle: eigene Berechnungen, Datenbasis ENSEMBLE)

Veröffentlichungen

FELBERMEIR, T (2014): Und die Erde erwärmt sich doch. Schule und Beratung – Fachinformationen aus der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern, 8 - 9 / 2014, S. 31 – 33.

FELBERMEIR, T (2014): Modellierung klimawandelbedingter Erträge und Analyse des Produktionsrisikos im Marktfruchtbau. Poster-Beitrag im Rahmen der LfL-Jahrestagung 2014, Schweinfurt.

FELBERMEIR, T; MAIER, H. (2014): Klimawandelbedingtes Ertragsrisiko und Anpassungsmaßnahmen im Marktfruchtbau. In: GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. (Hrsg.): 8. BIOMET – Tagung „Mensch-Pflanze-Atmosphäre im 21. Jahrhundert“ – Tagungsband. Tharandter Klimaprotokolle, Band 20, Dresden, S. 64 – 65.

FELBERMEIR, T (2014): Ökonomische Bewertung verschiedener Alternativen zur Anpassung an das klimawandelbedingte Produktionsrisiko im Marktfruchtbau. In: GOLDBERG, V.; BERNHOFER, C. (Hrsg.): 8. BIOMET – Tagung „Mensch-Pflanze-Atmosphäre im 21. Jahrhundert“ – Tagungsband. Tharandter Klimaprotokolle, Band 20, Dresden, S. 83 – 84.

FELBERMEIR, T. (2015): Landwirtschaft – Zusammenfassung. In: BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR UMWELT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (STMUV) (Hrsg.): Klima-Report Bayern 2015 – Klimawandel, Auswirkungen, Anpassungs- und Forschungsaktivitäten, S. 79.

FELBERMEIR, T.; SCHÄTZL, R. (2016): Ertragsmodellierung und Risikoanalyse zur Klimafolgenabschätzung In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LfL) (Hrsg.): Jahresbericht 2015 Institut für Betriebswirtschaft und Agrarstruktur, S. 45 – 47.

FELBERMEIR, T. (2016): Ertragsmodellierung und Risikoanalyse zur Klimafolgenabschätzung
In: BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (LFL) (Hrsg.): Jahresbericht 2015
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, S. 73 – 74.

FELBERMEIR, T (2016): Ökonomische Bewertung verschiedener Alternativen zur Anpassung
an das klimawandelbedingte Produktionsrisiko im Marktfruchtbau. Poster-Beitrag im Rahmen
des Klimakongress des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und
Forsten (StMELF), Würzburg.

in Vorbereitung:

FELBERMEIR, T. (2016): Klimawandel im Marktfruchtbau: Chance und Risiko. Schule und
Beratung – Fachinformationen aus der Landwirtschaftsverwaltung in Bayern.

in Vorbereitung:

FELBERMEIR, T. (2016): Klimawandel im Marktfruchtbau: (k)ein Problem!?. DLG-
Mitteilungen.