

Räumlich explizite Klimafolgenabschätzung für die Landwirtschaft in Hessen

Abschlussbericht des Center for Environmental Systems Research
(CESR) – Universität Kassel

März 2009

Projekträger:

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

Dr. Helmut Wolf

Dr. Cornelia Fooker

Rheingaustraße 186

65203 Wiesbaden

Abschlussbericht zum Projekt:

Räumlich explizite Klimafolgenabschätzung für die Landwirtschaft in Hessen

INKLIM 2012 II Plus

Abschlussbericht des Center for Environmental Systems Research (CESR) – Universität Kassel

Laufzeit: Juli 2007 bis September 2008

Projektleitung: Dr. Janina Onigkeit, Dr. Jörg Priess

Bearbeitung: Dr. Janina Onigkeit, Dr. Matthias Mimler, Karsten Kleine

Zusammenfassung

Der Klimawandel kann durch das Zusammenwirken höherer Temperaturen und veränderter Niederschlagsmuster sowohl zu verminderten als auch zu steigenden landwirtschaftlichen Erträgen führen. Um Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft planen zu können, ist es daher hilfreich, das Ausmaß dieser Veränderungen sowohl in seiner räumlichen als auch seiner zeitlichen Variabilität zu kennen. Da insbesondere die mittel- bis langfristige Abschätzung der zukünftigen Änderungen von Temperatur und Niederschlägen unsicher ist, lassen sich robuste Anpassungsmaßnahmen außerdem nur dann sinnvoll planen, wenn die Spanne der zukünftigen Klimaänderungen berücksichtigt wird.

Ziel dieses Projektes ist es daher, eine erste flächendeckende modellgestützte Analyse der Auswirkungen von zwei globalen Emissionsszenarien für Treibhausgase auf landwirtschaftliche Erträge in Hessen durchzuführen. Das sogenannte B1-Emissionsszenario repräsentiert hier ein niedriges und das A1B-Szenario ein hohes Emissionsniveau. Unter Verwendung der neuesten räumlich hoch aufgelösten Resultate des regionalen Klimamodells REMO wurden mit Hilfe eines prozessbasierten Ertragsmodells die klimabedingten Änderungen der potenziellen Erträge von fünf wichtigen hessischen Feldfrüchten (Winterweizen, Wintergerste, Silomais, Winterraps und Zuckerrüben) bis zur Mitte dieses Jahrhunderts berechnet, d.h. für den Zeitraum 2041-2070 relativ zu 1971-2000.

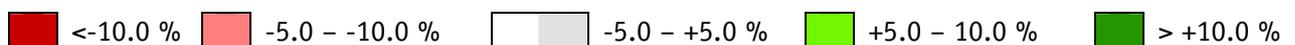
Die Auswirkungen steigender Temperaturen in Kombination mit zurückgehenden Sommerniederschlägen führen im hessischen Mittel für alle untersuchten Feldfrüchte zu einem leichten bis mittleren Rückgang der potenziellen Erträge. Wie in Tabelle Z1 zu sehen ist, variieren die Ergebnisse von Feldfrucht zu Feldfrucht, aber vor allem räumlich, d.h. zwischen den Landkreisen sehr stark. Die Variation reicht von Ertragseinbußen von -13 % für Winterraps im Landkreis Schwalm-Eder bis hin zu einem Ertragszuwachs von +10 % für Silomais im Landkreis Rheingau-Taunus. Allerdings hat unter beiden Szenarien die Mehrzahl der hessischen Landkreise mit Ertragseinbußen unterschiedlichen Ausmaßes zu rechnen. In Abbildung A1 (Anhang) sind die Ergebnisse in Kartenform dargestellt.

Angesichts limitierter (finanzieller) Ressourcen können räumlich umfassende und gleichzeitig differenzierte Studien der vorliegenden Art dazu dienen, in Bezug auf den Klimawandel besonders vulnerable Regionen in Hessen zu identifizieren, um dort gezielt Anpassungsmaßnahmen zu planen. Als mögliche Anpassungsmaßnahmen sind z.B. die Neuinstallation oder Ausdehnung existierender Bewässerungssysteme oder der Sortenwechsel von Feldfrüchten zu nennen, um mit dem unter beiden Emissionsszenarien zunehmenden Wasserdefizit in den Sommermonaten umzugehen. Eher mittel- bis langfristige Maßnahmen wie die Züchtung hitze- und/oder schädlingsresistenter Sorten sind in diesem Zusammenhang ebenso wichtig wie die Vermittlung von Wissen um die potenziellen Auswirkungen des Klimawandels in der landwirtschaftlichen Ausbildung.

Bevor mit konkreten Anpassungsmaßnahmen begonnen wird, ist es jedoch sinnvoll, einen systematischen Umgang mit den Unsicherheiten insbesondere der Klimamodelle zu finden. Die Unsicherheit bzw. Spanne der zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels ließe sich abschätzen, indem diejenige Kombination von globalen Emissionsszenarien, globalen Klimamodellen, regionalen Klimamodellen und letztlich auch Auswirkungsmodellen identifiziert wird, die eine möglichst große Unsicherheitsspanne im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels für die Landwirtschaft abdeckt. Anschließend können auf dieser konkretisierten Basis Anpassungsmaßnahmen geplant und umgesetzt werden.

Tabelle Z1: Änderung der potenziellen Erträge unter dem A1B- und dem B1-Emissionsszenario.

Landkreise	Ertragsänderung in % (Mittelwert 2041-2070 relativ zu 1971-2000)									
	Winterweizen		Gerste		Silomais		Winterraps		Zuckerrübe	
	B1	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1	A1B	B1	A1B
Werra-Meißner	-2.5	1.1	-2.5	-0.1	-1.1	-3.7	-7.5	-11.1	-1.6	-3.4
Waldeck-Frankenberg	-1.5	0.6	-2.2	1.4	2.3	-0.3	-8.1	-10.4	-1.0	-3.2
Schwalm-Eder	-2.7	-0.6	-2.7	-0.9	-1.2	-3.7	-7.7	-13.2	-1.0	-2.5
LK Kassel	-3.1	-0.6	-2.9	-0.2	-0.8	-3.0	-7.0	-10.2	-1.2	-2.5
Hersfeld-Rotenburg	-2.1	-0.6	-2.5	-1.1	-1.4	-4.5	-7.9	-12.9	-1.2	-3.3
Fulda	-4.5	-6.5	-4.4	-5.2	-1.6	-6.1	-6.3	-8.0	-1.5	-3.1
Kassel	-4.6	-0.6	-4.3	-0.8	-1.5	-3.2	-8.5	-12.9	-1.3	-2.6
Vogelsberg	-4.7	-8.6	-3.6	-8.0	-2.1	-7.4	-5.7	-8.5	-0.9	-4.3
Marburg-Biedenkopf	-4.4	-8.8	-4.4	-10.0	-2.8	-8.1	-6.0	-9.2	-1.4	-5.0
Limburg-Weilburg	-6.4	-10.2	-5.7	-11.1	-3.9	-7.8	-3.9	-7.8	-2.4	-3.3
Lahn-Dill	-5.7	-10.0	-5.4	-11.6	-4.2	-9.3	-3.4	-7.1	-3.1	-6.0
Gießen	-5.1	-9.8	-4.6	-10.6	-3.5	-7.9	-4.5	-9.2	-1.8	-3.5
Wetterau	-5.1	-9.3	-4.3	-9.9	-3.1	-7.8	-4.7	-10.5	-1.5	-3.6
Rheingau-Taunus	-1.2	3.5	-4.0	2.0	10.3	8.2	-1.6	-2.8	6.3	3.6
LK Offenbach	-1.0	-6.3	-1.0	2.9	1.1	-3.9	1.2	-6.2	-1.0	-3.9
Odenwald	-0.5	1.8	-2.2	5.1	1.4	-0.4	-3.9	-4.3	0.9	-1.1
Main-Taunus	-0.5	-2.0	-2.9	3.2	-0.6	-2.9	-4.7	-7.7	-1.3	-3.8
Main-Kinzig	-4.5	-7.9	-4.4	-8.2	-2.7	-7.2	-4.8	-9.3	-1.8	-3.7
Hochtaunus	0.3	4.6	-2.5	5.8	7.0	7.6	-1.1	-2.0	3.1	0.8
Groß-Gerau	0.7	-4.8	-2.2	1.2	-1.0	-4.0	-2.2	-6.3	-0.7	-3.3
Darmstadt-Dieburg	-0.3	-3.6	-2.6	2.4	7.3	4.7	-2.7	-6.4	-0.5	-3.0
Bergstraße	1.3	-3.1	-1.9	2.1	0.9	-1.9	1.5	-2.6	-0.7	-2.6
Wiesbaden	-0.4	-1.2	-4.3	1.9	4.2	-0.4	-4.2	-7.2	-1.4	-3.4
Offenbach am Main	1.3	-3.0	-1.1	3.1	1.0	-2.8	-3.0	-4.7	-0.3	-3.3
Frankfurt am Main	-0.7	-1.2	-4.3	2.4	2.7	1.0	-4.9	-7.3	-1.0	-3.1
Darmstadt	-1.2	-6.7	-1.8	1.8	1.1	-3.5	1.3	-5.3	-0.8	-3.6
Hessen	-3.0	-4.0	-3.4	-3.3	-0.5	-3.9	-5.4	-9.2	-1.0	-3.1



Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG.....	III
1. EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG.....	2
2. DATENGRUNDLAGEN UND METHODIK.....	3
2.1. KLIMASZENARIEN - WETTERINFORMATION	3
2.2. DATEN ZUR LANDBEDECKUNG/LANDNUTZUNG.....	7
2.3. BODENDATEN	7
2.4. DAS SIMULATIONSMODELL DAYCENT	7
2.4.1. <i>Modellbeschreibung</i>	7
2.4.2. <i>Modellkalibrierung</i>	8
2.5. ANNAHMEN ZU MANAGEMENT UND DÜNGUNG.....	9
3. AUSWIRKUNGEN DES KLIMAWANDELS AUF LANDWIRTSCHAFTLICHE ERTRÄGE	10
3.1. WINTERWEIZEN	10
3.2. WINTERRAPS	12
3.3. SILOMAIS	14
3.4. WINTERGERSTE.....	16
3.5. ZUCKERRÜBE.....	18
4. ERTRAGSSICHERHEIT AUSGEWÄHLTER ENERGIEPFLANZEN.....	21
4.1. ERTRAGSSICHERHEIT BEI SILOMAIS.....	21
4.2. ERTRAGSSICHERHEIT BEI WINTERRAPS.....	23
5. ZUSAMMENFASSENDER BEWERTUNG UND MÖGLICHE ANPASSUNGSMABNAHMEN...	25
6. LITERATUR.....	29
ANHANG.....	32

1. Einleitung und Zielsetzung

Landwirtschaftliche Erträge sind in hohem Maße abhängig von Klima und Witterung. Unter Bedingungen des Klimawandels kann daher das Zusammenspiel höherer Temperaturen und veränderter Niederschlagsmuster in Kombination mit naturräumlichen Faktoren wie z.B. den Bodeneigenschaften sowohl zu einer Verminderung als auch einem Anstieg der Erträge einer Feldfrucht führen. Um Anpassungsmaßnahmen planen zu können, ist es notwendig, das Ausmaß der Veränderungen sowohl in seiner räumlichen als auch seiner zeitlichen Variabilität abschätzen zu können. Da die zukünftigen Änderungen von Temperatur und Niederschlägen großen Unsicherheiten unterliegen, lassen sich robuste Anpassungsmaßnahmen allerdings nur dann planen, wenn die Spanne der zukünftigen Klimaänderungen möglichst plausibel erfasst wird.

Im Rahmen dieser Studie werden daher die klimabedingten Änderungen der potenziellen Erträge von fünf Feldfrüchten, die in der hessischen Landwirtschaft derzeit eine wichtige Rolle spielen, flächendeckend für zwei globale Emissionsszenarien abgeschätzt. Durch die Verfügbarkeit neuer hoch aufgelöster Klimaszenarien für Deutschland ist es zum ersten Mal möglich, für Klimaänderungen bis zur Mitte dieses Jahrhunderts eine räumlich explizite quantitative Abschätzung der Spanne der Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge der hessischen Landwirtschaft vorzunehmen. Diese Abschätzung basiert auf den Klimavariablen des dynamischen Klimamodells REMO (Jacob et al., 2008), die als Eingabegröße für Ertragsberechnungen mit dem prozessbasierten Modell DAYCENT (Parton et al., 1998) dienen. Unter vorgegebenen Bodeneigenschaften und definierten Annahmen für Managementmaßnahmen werden die Änderungen der potenziellen Erträge für den Zeitraum 2041-2070 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000 abgeschätzt.

Eine Beschreibung der Datengrundlagen, der getroffenen Annahmen und des DAYCENT-Modells erfolgt im folgenden Kapitel 2. Die Ergebnisse zu den klimabedingten Ertragsänderungen für die einzelnen Feldfrüchte werden in Kapitel 3 dargestellt. Kapitel 4 befasst sich mit Änderungen der Ertragssicherheit von Silomais und Winterrraps als derzeit relevante Feldfrüchte für die Erzeugung von Bioenergie. Abschließend werden in Kapitel 5 die Ergebnisse dieser Studie bewertet sowie mögliche Anpassungsmaßnahmen aufgeführt.

2. Datengrundlagen und Methodik

2.1. Klimaszenarien - Wetterinformation

Um eine plausible Spanne klimatischer Auswirkungen auf die Erträge in der hessischen Landwirtschaft abzuschätzen, wurden zwei globale Emissionsszenarien des IPCC ausgewählt, für die Simulationsläufe des regionalen Klimamodells REMO zur Verfügung standen. Basierend auf den Annahmen zu demografischer, wirtschaftlicher und technologischer Entwicklung decken diese Szenarien bis zur Mitte des Jahrhunderts eine große Spanne der Treibhausgasemissionen ab (Nakicenovich et al., 2000):

Das A1B-Szenario beschreibt eine zukünftige Welt, in der die Wirtschaft sehr schnell wächst und die Weltbevölkerung bis zur Mitte des Jahrhunderts ein Maximum erreicht und danach abnimmt. Diese Entwicklung geht einher mit einer schnellen Einführung neuer und effizienter Technologien, wobei ein ausgewogener Mix von fossilen als auch nicht-fossilen Energieträgern zum Einsatz kommt. Ein Hauptcharakteristikum dieses Szenarios ist die Annäherung der Weltregionen, die sich durch den Austausch von Wissen, soziale und kulturelle Interaktionen sowie eine erhebliche Abnahme der regionalen Unterschiede im Pro-Kopf-Einkommen ausdrückt. Aus diesen Annahmen resultieren globale Treibhausgasemissionen, die auf globaler Ebene bis zum Jahr 2100 zu einem Temperaturanstieg von 3.7°C relativ zur Klimanormalperiode 1961-90 führen (ECHAM5/MPI-OM, Jacob et al., 2008).

Das B1-Szenario repräsentiert eine konvergierende Welt mit einer Bevölkerungszahl, die identisch ist mit der Bevölkerung des A1B-Szenarios. Im Unterschied zum A1B-Szenario findet in diesem Szenario ein rascher Umbau der ökonomischen Strukturen statt hin zu einer dienstleistungs- und informationsorientierten Wirtschaft. Damit einher geht eine Verminderung der Materialintensität sowie die Einführung sauberer und ressourceneffizienter Technologien. Das Hauptcharakteristikum dieses Szenarios liegt in globalen Lösungsansätzen zum Erreichen ökonomischer, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, die auch zunehmende Gerechtigkeit beinhaltet, aber keine zusätzlichen Klimaschutzinitiativen aufweist. Die aus diesen Annahmen resultierenden Treibhausgasemissionen führen zu einem globalen Temperaturanstieg von 2.5°C im Jahr 2100 relativ zur Klimanormalperiode (ECHAM5/MPI-OM, Jacob et al., 2008).

Die Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM für diese zwei Emissionsszenarien wurden als Randbedingungen bzw. Antrieb für das regionale Klimamodell REMO genutzt, um das zukünftige Klima in Deutschland und damit auch in Hessen in einer hohen räumlichen Auflösung zu berechnen. Der Vorteil der im REMO-Modell angewendeten dynamischen Berechnung der relevanten physikalischen Prozesse gegenüber dem statistischen Downscaling als Regionalisierungsmethode liegt darin, dass die Nichtlinearität

atmosphärischer Prozesse auf der betrachteten räumlichen Skala berücksichtigt wird. Allerdings ist bekannt, dass das REMO-Modell für das heutige Klima eine Überschätzung der Niederschläge im Luv und eine Unterschätzung im Lee von Gebirgen aufweist sowie die Temperatur um ca. 1°C überschätzt. Allerdings ist nicht sicher, inwiefern diese Abweichungen auch für das zukünftige Klima zutreffen.

Für den Einsatz des Ertragsmodells DAYCENT werden Minimum- und Maximumtemperatur sowie Niederschlagssummen auf Tagesbasis benötigt. Über das „REMO-UBA Experiment“ stehen entsprechend aufbereitete Temperatur- und Niederschlagswerte in einem flächendeckenden Raster mit einer räumlichen Auflösung von 0.1° sowie einer zeitlichen Auflösung von einem Tag zur Verfügung (Datenstrom 3). Für diese Studie werden Zeitreihen für den Referenzzeitraum 1971-2000 sowie für einen Zeitraum, der die Mitte des Jahrhunderts repräsentieren soll (2041-2070), genutzt (da die Bereitstellung der Klimadaten deutlich später als vorhersehbar erfolgte, konnte ein Zeitraum Ende des Jahrhunderts aus Zeitgründen nicht mehr berücksichtigt werden). Verfügbar sind die Klimadaten über das World Data Center for Climate (<http://cera-www.dkrz.de/CERA/index.html>).

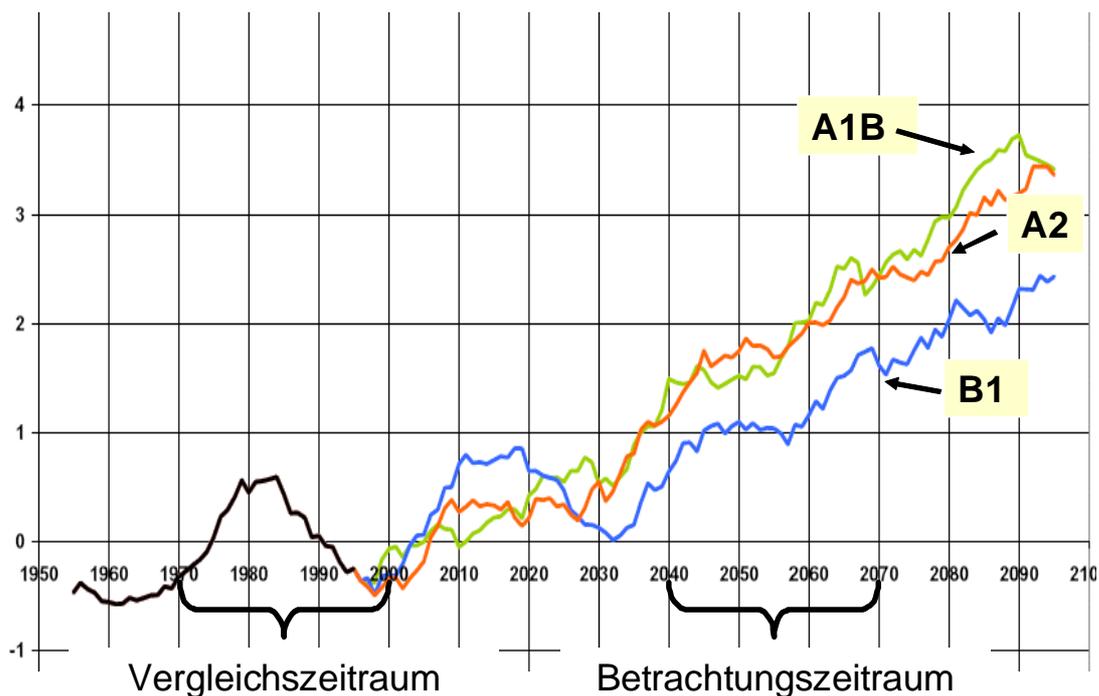


Abbildung 1: Mittlere Temperaturänderung in Deutschland unter dem A2-, A1B- und dem B1-Szenario relativ zum Zeitraum 1961-1990 (Quelle: Jacob et al., 2008, gleitendes 10-Jahresmittel). Eingezeichnet sind außerdem der im Rahmen dieses Projektes untersuchte Betrachtungszeitraum 2041-2070 und der Vergleichszeitraum 1971-2000.

Da eine detaillierte und systematische Auswertung der Rasterklimadaten des REMO-Modells über den Rahmen des Projekts hinausgehen würde, sind in Abbildung 1 die mittlere Temperaturänderung für Deutschland sowie in Tabelle 1 Werte aus Jacob et al. (2008) aufgeführt, die die hessenweite Spannweite für die Änderung von Temperatur und Niederschlag unter den drei globalen Emissionsszenarien A2, A1B und B1 wiedergeben.

Wie aus Abbildung 1 deutlich wird, weisen das A1B- und das A2-Szenario insbesondere im Betrachtungszeitraum 2041-2070 einen sehr ähnlichen Verlauf auf. Aus diesem Grund, und da die Szenariodaten für das A2-Szenario zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nicht verfügbar waren, wurden für die Berechnung der Ertragsänderungen nur die Szenarien A1B und B1 berücksichtigt.

Tabelle 1: Minimale und maximale Temperatur- bzw. Niederschlagsänderung der drei Szenarien B1, A1B und A2 in Hessen.

	Temperaturänderung in °C relativ zur Periode 1961-1990		Niederschlagsänderung relativ zur Periode 1961-1990	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Jahr	0.5 / 1.5	2.1 / 3.2	2 % / 10 %	1 % / 4 %
Frühjahr	-0.2 / 0.9	1.0 / 1.8	7 % / 9 %	8 % / 13 %
Sommer	0.6 / 1.7	2.4 / 3.6	-5 % / 8 %	-19 % / -16 %
Herbst	0.7 / 1.7	2.3 / 3.6	7 % / 16 %	2 % / 15 %
Winter	1.0 / 1.8	2.5 / 3.8	-2 % / 11 %	10 % / 20 %

Quelle: Jacob et al. (2008)

Die Ergebnisse der REMO-Simulationen in Tabelle 1 zeigen für das Bundesland Hessen, dass über das Jahr gemittelt, die Temperaturänderung mit einem Anstieg von 0.5 bis 1.5°C bis zur Mitte des Jahrhunderts sehr moderat ausfällt. Auch die jährliche Niederschlagsänderung ist mit einer Zunahme von 2 bis 10 % auf den ersten Blick positiv zu bewerten. Allerdings kann sich für die Erträge in der Landwirtschaft besonders die stärkere Zunahme der Temperatur im Sommer (+2.4/ +3.6°C) in Kombination mit Niederschlagsänderungen von -19 % bis -16 % am Ende dieses Jahrhunderts als problematisch erweisen. Mit Ausnahme von Silomais reagieren die hier berücksichtigten Pflanzen auf hohe Temperaturen im Sommer mit einer verkürzten Reifephase und damit geringeren Erträgen. Außerdem weisen alle Pflanzen bei höheren Temperaturen eine erhöhte Evapotranspiration und damit einen erhöhten Wasserbedarf auf. Die für die landwirtschaftliche Ertragsbildung ebenfalls wichtigen Klimabedingungen im Frühjahr zeigen mit einer geringen Temperaturzunahme von etwa 1°C kombiniert mit einer leichten Zunahme der Niederschläge eher positive Bedingungen für die Zukunft. Einschränkend muss angemerkt

werden, dass Ertragseinbußen durch das verstärkte Auftreten von Schaderregern, bedingt durch mildere und feuchtere Winter und Frühjahre, im Rahmen dieser Studie nicht berücksichtigt werden konnten. Auch für das ökologisch orientierte B1-Szenario ist mit einem nicht unerheblichen Temperatur- und Niederschlagseffekt zu rechnen. Der für diese Studie untersuchte Zeitraum von 2041-2070 liegt ungefähr zwischen den in Tabelle 1 aufgeführten Zeiträumen und liegt damit auch in der Ausprägung der Änderungen der Klimavariablen zwischen den angegebenen Werten.

Für die Interpretation der Simulationsergebnisse des Ertragsmodells ist auch die räumliche Ausprägung der klimatischen Veränderungen von Bedeutung.

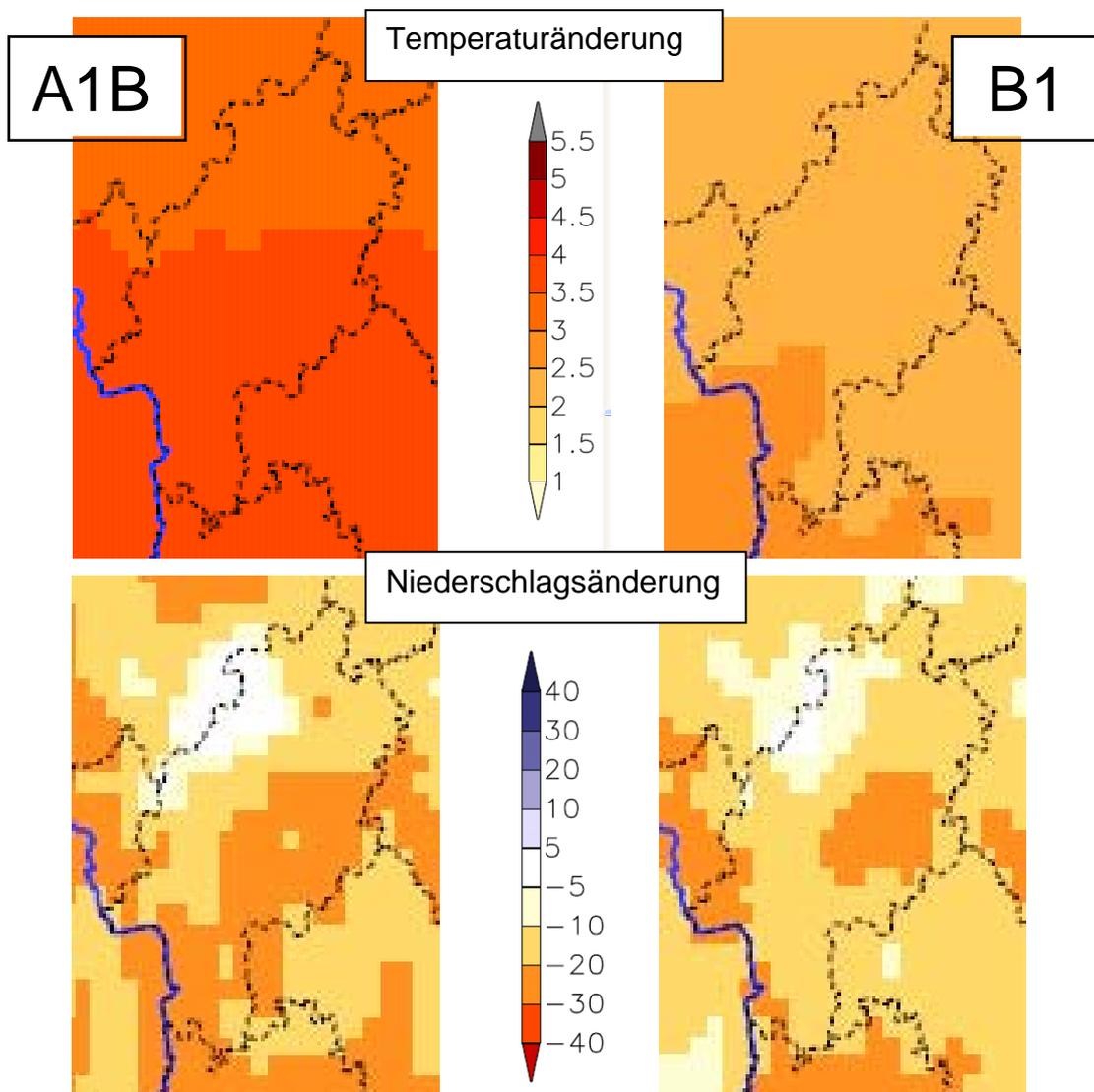


Abbildung 2: Räumliche Ausprägung der Änderungen für Temperatur in °C (oben) und Niederschläge in % (unten) in den Sommermonaten in Hessen unter dem A1B- und dem B1-Szenario (Mittelwert 2071-2100 relativ zu 1961-1990, Quelle: Jacob et al., 2008).

Wie aus Abbildung 2 deutlich wird, ermittelt das REMO-Modell unter beiden Szenarien für die Sommermonate einen stärkeren Temperaturanstieg für das südliche Hessen. Für die Niederschlagsänderungen liefert das Modell ein heterogeneres Bild: Hier sind unter dem A1B-Szenario das südliche und östliche Hessen mit den höchsten Rückgängen zwischen 20-30 % betroffen, während das nordwestliche Hessen keine bis sehr geringe Rückgänge zu erwarten hat. Unter dem B1-Szenario ist ebenfalls der Osten am stärksten und der Nordwesten am wenigsten von Niederschlagsrückgängen betroffen.

2.2. Daten zur Landbedeckung/Landnutzung

Für die Berechnung der Ertragsänderung der ausgewählten Feldfrüchte wurden alle 1 km x 1 km Rasterzellen berücksichtigt, die im Jahr 2000 überwiegend landwirtschaftlich genutzt werden. Die Zuordnung dieser Zellen basiert auf dem CORINE Land Cover (CLC) Datensatz (Keil et al., 2005), der für das Jahr 2000 in Hessen insgesamt 6134 Rasterzellen als vorwiegend landwirtschaftlich genutzt ausweist (CLC code 211 = „Nicht bewässertes Ackerland“).

2.3. Bodendaten

Neben dem Klima sind Bodeneigenschaften, wie z.B. die Wasserspeicherfähigkeit eines Standortes, ein wesentlicher Faktor für die Ertragsbildung unter zukünftigen Klimabedingungen. In dieser Studie diente die digitale Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2001) als Datengrundlage. Sie stellt für alle Leitbodentypen diejenigen bodenchemischen und bodenphysikalischen Parameter bereit, die für die Simulation des Pflanzenwachstums benötigt werden. Alle Bodenparameter wurden nach Umwandlung in die benötigten Einheiten mit einer räumlichen Auflösung von 1 km x 1 km in eine Datenbank eingepflegt und von dort in das Ökosystemmodell DAYCENT eingelesen. Eine Korrektur des pH-Wertes erfolgte in der Form, dass angenommen wurde, dass alle Ackerflächen mindestens einen pH-Wert von 6 aufweisen.

2.4. Das Simulationsmodell DAYCENT

2.4.1. Modellbeschreibung

Das DAYCENT-Modell ist ein prozessbasiertes Ökosystemmodell und Nachfolger des CENTURY-Modells, welches in den achtziger Jahren an der Colorado State University von Parton et al. entwickelt wurde (siehe z. B. Kelly und Parton, 2000). Das Modell wird seit

2002 im CESR betrieben, weiter entwickelt und für unterschiedliche regionale und globale Studien genutzt (siehe Schaldach und Alcamo, 2006; Stehfest et al., 2007). Prozessmodelle wie EPIC oder das hier verwendete DAYCENT-Modell werden allgemein in der Klimafolgenforschung empirischen Modellen vorgezogen, da sie im Gegensatz zu den letztgenannten in der Lage sind, das Pflanzenwachstum auch unter wechselnden (klimatischen) Bedingungen zu simulieren (Brown und Rosenberg 1997; Gerstengarbe et al. 2003; Stehfest et al. 2007).

In DAYCENT werden das Pflanzenwachstum und die beteiligten Bodenprozesse in Abhängigkeit von Temperatur sowie Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit berechnet (siehe Abbildung 3). Gängige Bewirtschaftungsmaßnahmen (Aussaat, Pflügen, Düngung) und ihr Einfluss auf Feldfruchterträge werden explizit simuliert, nicht jedoch Schädlingsbefall bzw. Pestizideinsatz. Auch der sogenannte CO₂-Düngeeffekt wird nicht berücksichtigt. Die genaue Funktionsweise des Modells ist ausführlich an verschiedenen Stellen dokumentiert (z.B. Parton et al., 2001, oder Kelly und Parton, 2000), weshalb an dieser Stelle nicht im Detail darauf eingegangen wird.

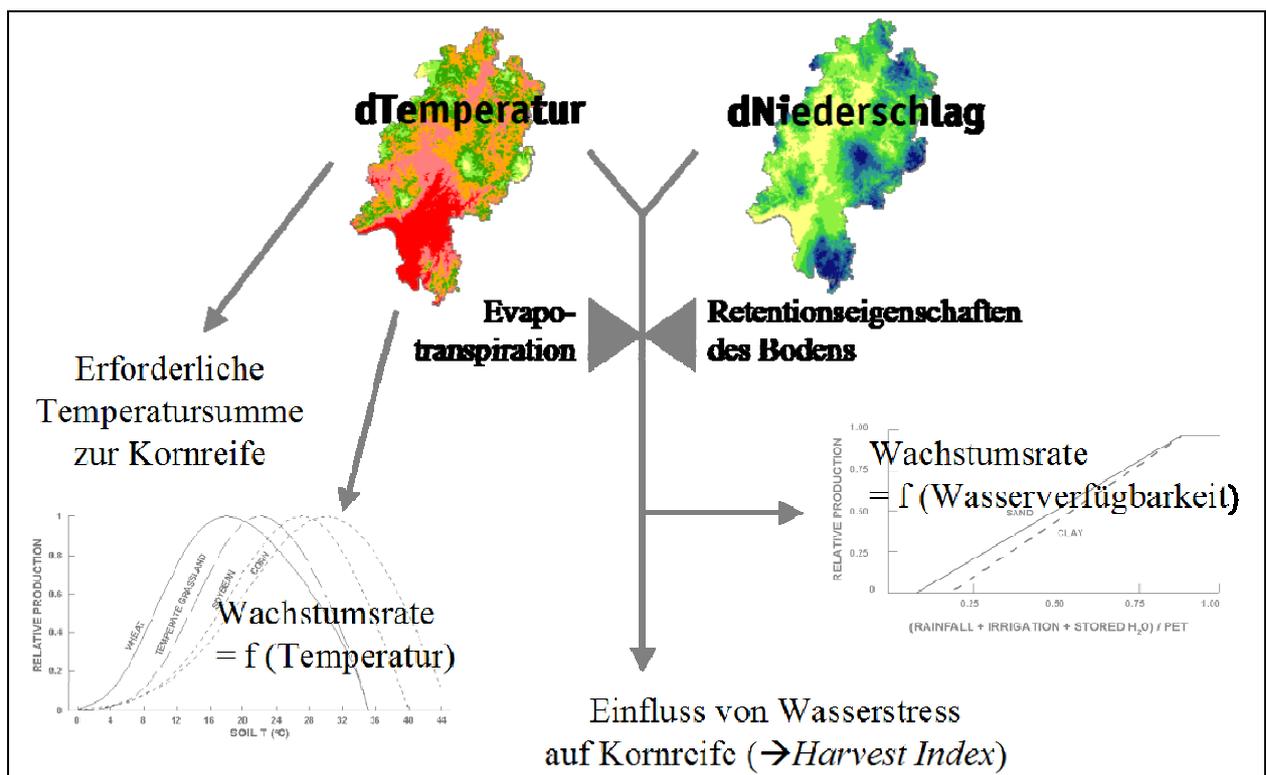


Abbildung 3: Schematisierte Funktionsweise des DAYCENT-Modells.

2.4.2. Modellkalibrierung

Jede in DAYCENT simulierte Pflanze lässt sich durch ihre spezifischen physiologischen Eigenschaften und Wuchsleistungen charakterisieren. Wichtige Kenngrößen sind in die-

sem Zusammenhang die Abhängigkeit des Wachstums von Temperatur und Wasserverfügbarkeit, aber auch für die jeweiligen Wachstumsphasen charakteristische Stickstoffgehalte beziehungsweise Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnisse in den jeweiligen Pflanzen. Diese Zusammenhänge werden im Modell über Parameter festgelegt, die für jede Pflanze bestimmt werden müssen. Für diese Studie wurden Parametersätze eingesetzt, die bereits in INKLIM 2012 Baustein II ermittelt wurden (siehe Priess et al., 2005). Die Parametrisierung der simulierten Feldfrüchte erfolgte in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurde auf der Grundlage einer Literaturstudie ein Parametersatz für jede Feldfrucht generiert beziehungsweise bereits existierende Parametersätze (z.B. aus anderen Klimazonen) angepasst. Im zweiten Schritt erfolgte nach der Grundparametrisierung für jede Feldfrucht die Kalibrierung der Parametersätze auf der Basis der aktuellsten verfügbaren hessenspezifischer Ertrags- und Bewirtschaftungsdaten für den Zeitraum 1980 bis 2000, die vom HDLGN (jetzt LLH) bereit gestellt wurden. Zum Zweck der Kalibrierung wurde Hessen in drei Agrarregionen (Nord, Mitte, Süd) unterteilt, für die jeweils ein pflanzenspezifischer Parametersatz erstellt wurde. Die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Kalibrierung sind im Detail in Priess et al. (2005) beschrieben.

2.5. Annahmen zu Management und Düngung

Für Management und Düngung wurde auf die Annahmen zurückgegriffen, die im Vorgängerprojekt INKLIM 2012, Baustein II getroffen wurden und auf deren Basis die Kalibrierung des DAYCENT-Modells erfolgte. Als Grundlage der Informationen über empfohlene Stickstoff-Düngemengen und Düngehäufigkeit dienten KTBL (2004) sowie uismedia (1999). Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die potenziellen Feldfruchterträge isoliert zu erfassen, wurde angenommen, dass Managementmaßnahmen, wie z.B. der Aussaatzeitpunkt über die Simulationsperiode, konstant bleiben. Außerdem gehen wir von reinem Regenfeldbau aus, d.h. es wurden weder bestehende noch zukünftige Bewässerungsmaßnahmen berücksichtigt.

3. Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge

Im Folgenden werden die klimatischen Ansprüche sowie die klimabedingten Änderungen der potenziellen Erträge der fünf simulierten Feldfrüchte für die 30-Jahresperiode 2041-2070 relativ zur Periode 1971-2000 präsentiert.

3.1. Winterweizen

Winterweizen braucht, um hohe Erträge zu erzielen, ein wintermildes und sommerwarmes Klima (Schaller und Weigel, 2007). Kühle Frühjahrstemperaturen sind dabei für die Bestockung vorteilhaft. Während der Phase der Kornreifung hat Hitze nachteilige Auswirkungen auf Kornzahl und Kornausbildung. Winterweizen hat aufgrund seiner relativ späten Biomassenentwicklung einen hohen spezifischen Wasserbedarf von bis zu 500 l/kg Trockenmasse. Dabei ist in Bezug auf die Wasserversorgung der Frühling, d.h. die Zeit des Schossens bis zur Blüte besonders kritisch, aber auch während der Reifephase führt Wassermangel zu geringeren Erträgen.

Unter den zukünftigen Klimabedingungen der REMO-Szenarien und den im DAYCENT-Modell implementierten Annahmen gehen die potenziellen Erträge für Winterweizen im hessischen 30-jährigen Mittel zwischen 3.0 % unter dem B1-Szenario und 4.0 % unter dem A1B-Szenario zurück. Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, sind die Ertragsänderungen heterogen verteilt: Auf mehr als 50 % der Ackerfläche in Nord- und Südhessen finden unter beiden Szenarien nur sehr geringe Ertragsänderungen von weniger als +/- 5 % statt. Der Unterschied zwischen den beiden untersuchten Szenarien liegt im Auftreten größerer Ertragsrückgänge von mehr als 10 % auf ca. 10 % der mittelhessischen Ackerfläche unter dem A1B-Szenario. Diese starken Ertragsrückgänge simuliert das DAYCENT-Modell unter dem B1-Szenario nur für 0.3 % der Ackerfläche.

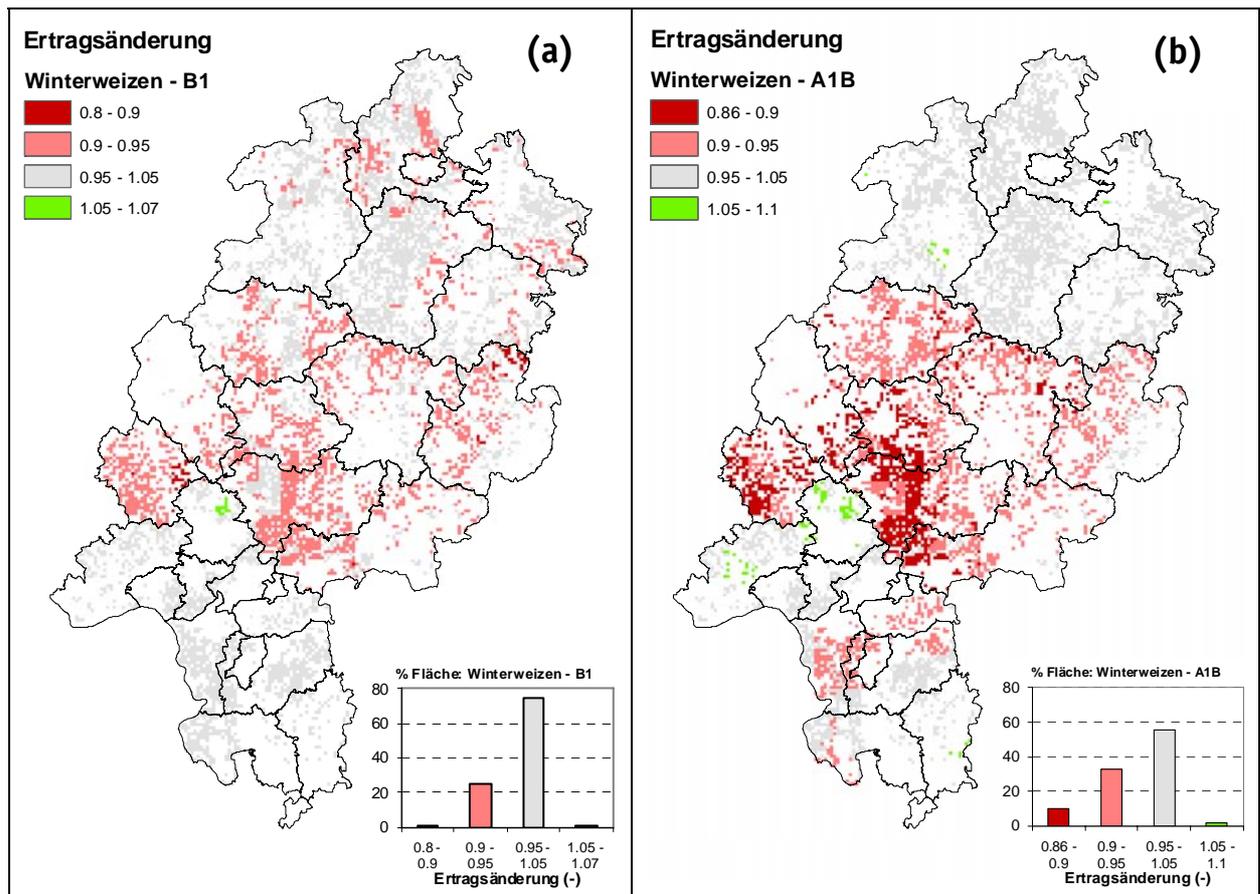


Abbildung 4: Ertragsänderungen für Winterweizen unter den Szenarien B1 (a) und A1B (b) (1.0 = keine Änderung).

Über die hessischen Landkreise gemittelt, gibt es unter dem A1B-Szenario Rückgänge der potenziellen Erträge für Winterweizen bis zu 10 % in den mittelhessischen Landkreisen Limburg-Weilburg, Lahn-Dill und Gießen (Abbildung 5). Dem stehen mittlere Ertragszunahmen von 3.5 % bzw. 4.6 % in den Landkreisen Rheingau-Taunus bzw. Hochtaunus gegenüber. Hier profitieren offenbar höher gelegene landwirtschaftliche Standorte besonders von einer stärkeren Erhöhung der Temperatur unter dem A1B-Szenario. Unter dem B1-Szenario werden geringere Änderungen der potenziellen Erträge simuliert: Die größten Ertragsverminderungen liegen bei 5 % in Limburg-Weilburg und Lahn-Dill, aber auch in Kassel und Fulda. Ertragszuwächse fallen mit bis zu 1.3 % an der Bergstraße und im Landkreis Offenbach am Main geringer aus als unter dem A1B-Szenario.

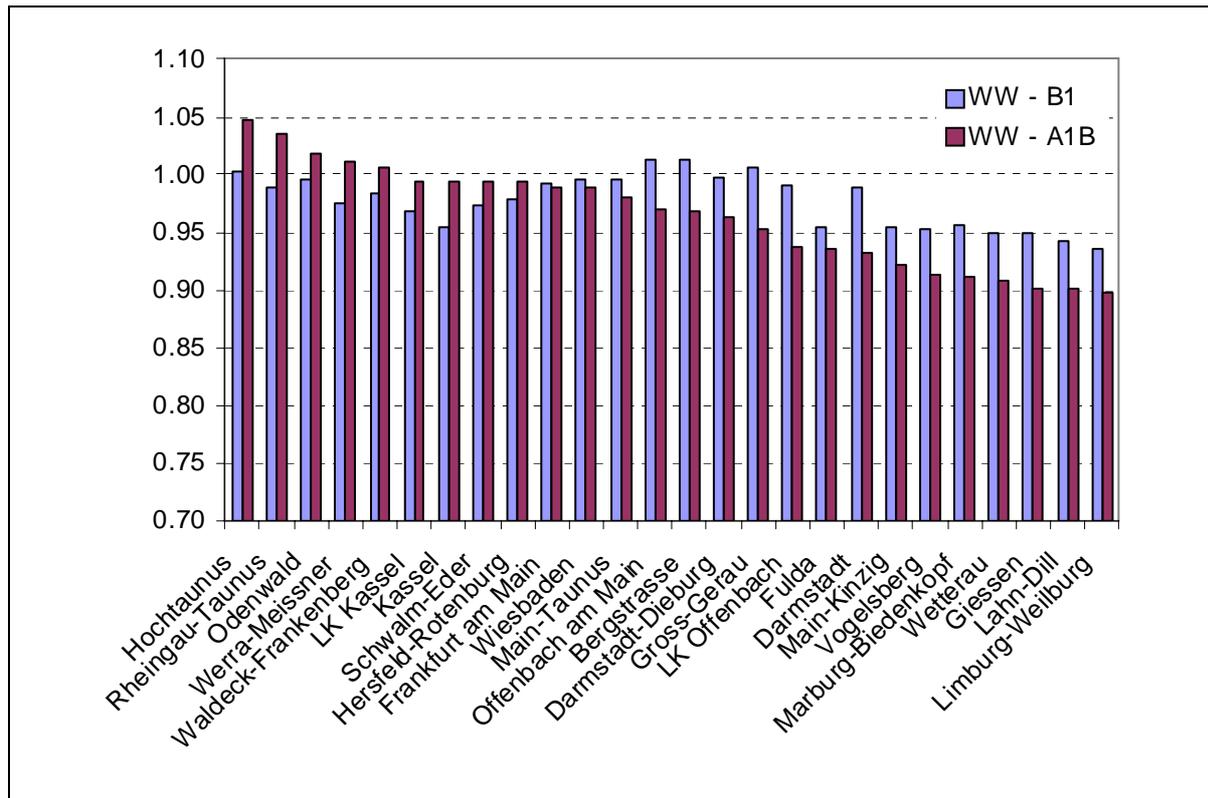


Abbildung 5: Änderungen der potenziellen Erträge für Winterweizen in den hessischen Landkreisen (1.0 = keine Änderung).

Die ermittelten leichten hessenweiten Ertragsrückgänge für Winterweizen liegen im Bereich der von der EEA (2008) angegebenen Spanne von Ertragsänderungen für lokale mittlere Temperaturänderungen von +1.5 bis +3°C, wie sie vom REMO-Modell als Jahresmittel der Temperaturänderung für Hessen berechnet werden.

3.2. Winterraps

Beim Anbau von Winterraps wirken sich kühle Sommertemperaturen und eine hohe relative Luftfeuchtigkeit aufgrund der Schonung des Wasserhaushalts günstig auf die Ertragsbildung aus. Außerdem ist durch geeignete Wahl der Fruchtfolge eine ausreichende Jugendentwicklung im Herbst zu gewährleisten, um eine Abhärtung für die Wintermonate zu garantieren, da Raps eine geringe Winterfestigkeit besitzt.

Unter den Klimabedingungen des REMO-Modells beträgt der Rückgang der potenziellen Erträge für Winterraps im hessischen Mittel zwischen 5.4 % (B1-Szenario) und 9.2 % (A1B-Szenario). Die stärksten nahezu flächendeckenden Ertragsrückgänge werden für Mittel- und Nordhessen unter dem A1B-Szenario berechnet (siehe Abbildung 6b). Für 39 % der Ackerfläche werden unter diesem Szenario Ertragsminderungen von >10 % berechnet.

Unter dem B1-Szenario simuliert das Modell dagegen nur auf ca. 5 % der Ackerfläche Ertragsminderungen >10 %.

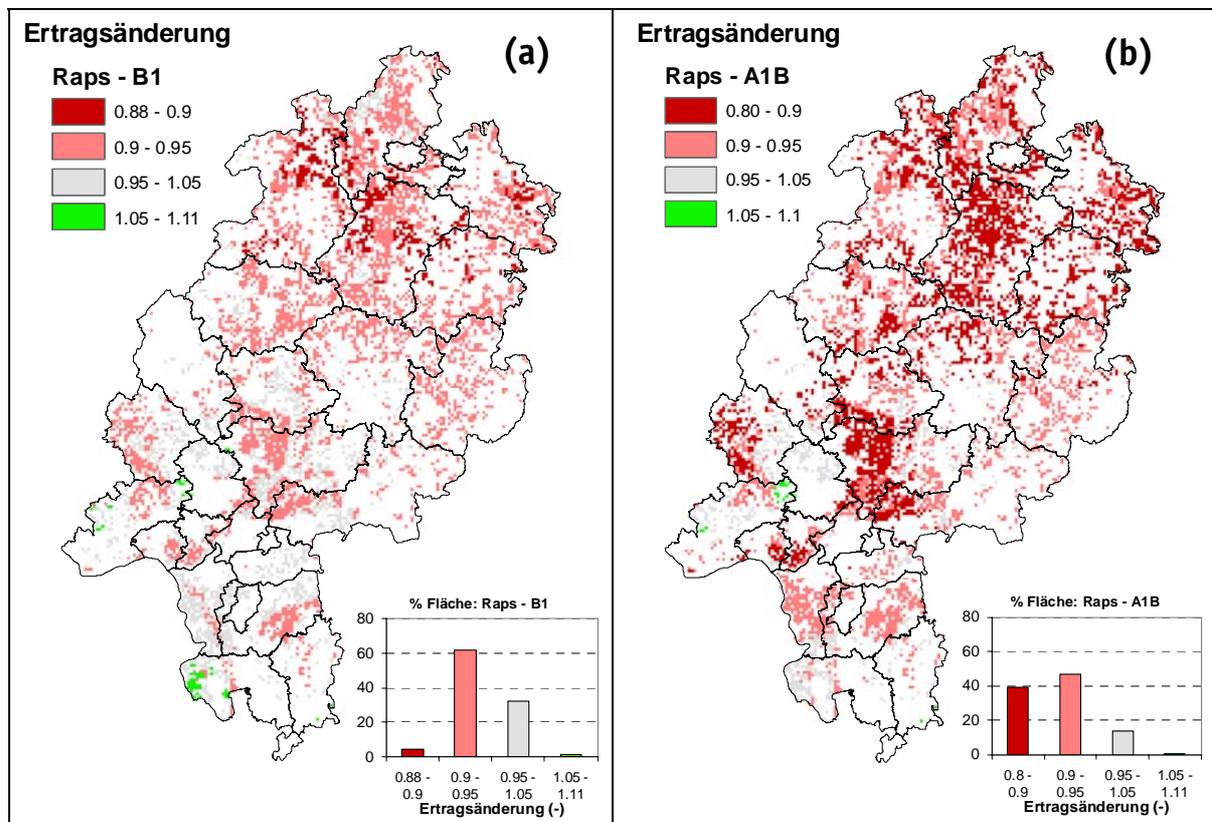


Abbildung 6: Ertragsänderungen für Winterraps unter den Szenarien B1 (a) und A1B (b) (1.0 = keine Änderung).

Auf Landkreisebene werden für Winterraps unter beiden Szenarien, von geringfügigen Ausnahmen in drei Landkreisen abgesehen, für alle Landkreise Rückgänge der potenziellen Erträge simuliert (siehe Abbildung 7). Diese Rückgänge fallen mit >10 % unter dem A1B-Szenario in den nordhessischen Landkreisen Schwalm-Eder, Kassel und Hersfeld-Rotenburg besonders stark aus. Unter dem B1-Szenario überschreiten die Ertragsminderungen nicht die 10 % -Grenze, aber auch hier sind die nordhessischen Landkreise mit Ertragsrückgängen zwischen 7 % und 8 % am stärksten betroffen. Geringe Ertragszuwächse für Winterraps werden vor allem für die Bergstraße sowie für Offenbach und Darmstadt unter dem B1-Szenario berechnet (+ 1.5 %). Allerdings werden hier sowohl Flächen mit Ertragszuwächsen als auch Flächen mit Ertragsrückgängen ausgewiesen (siehe Abbildung 6a).

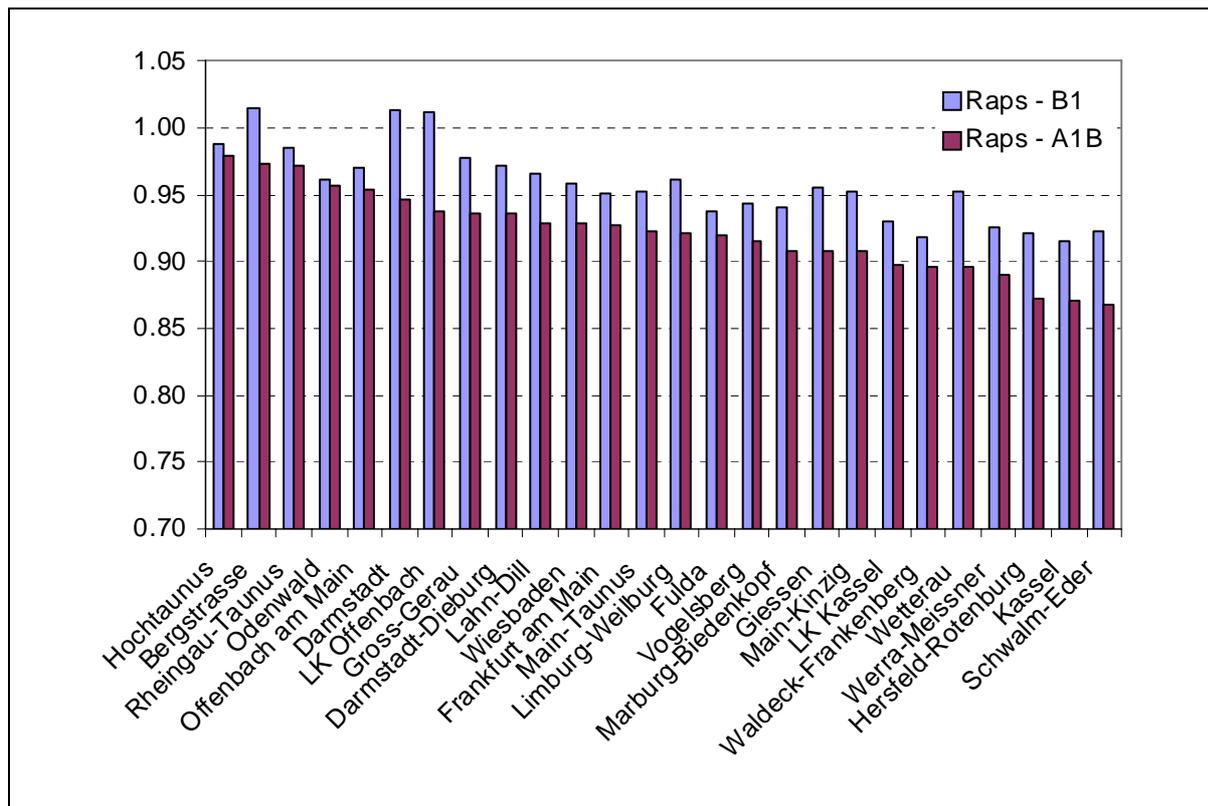


Abbildung 7: Änderungen der potenziellen Erträge für Winterraps in den hessischen Landkreisen (1.0 = keine Änderung).

3.3. Silomais

Mais hat als wärmeliebende und frostempfindliche C4-Pflanze relativ hohe klimatische Ansprüche. Die Wärmeansprüche in Form der Temperatursumme von Silomais fallen dabei etwas geringer aus als die von Körnermais. Es findet nur Wachstum zwischen 6°C und 30°C statt. Der Wasserbedarf ist bei Mais als C4-Pflanze mit 200 l/kg Trockenmasse geringer als beispielsweise für Winterweizen mit 500 l/kg. Dennoch kann Wassermangel im Juli und August vor allem auf leichten Böden zu Ertragseinbußen führen.

Die Ertragsänderungen für Silomais liegen für das A1B-Szenario im hessischen Durchschnitt bei -3.9 %, während unter dem B1-Szenario nur 0.5 % Ertragsverminderung simuliert werden. Unter dem A1B-Szenario ist dabei auf 40 % der simulierten Fläche, die sich vor allem in den mittelhessischen Landkreisen befindet, eine Verminderung der potenziellen Maiserträge zwischen 5 und 10 % möglich (siehe Abbildung 8). Unter beiden Szenarien sind allerdings auch weite Flächen mit Ertragszunahmen möglich, nämlich 5 % der

simulierten Fläche unter dem A1B-Szenario und ca. 6 % der Fläche unter dem B1-Szenario¹.

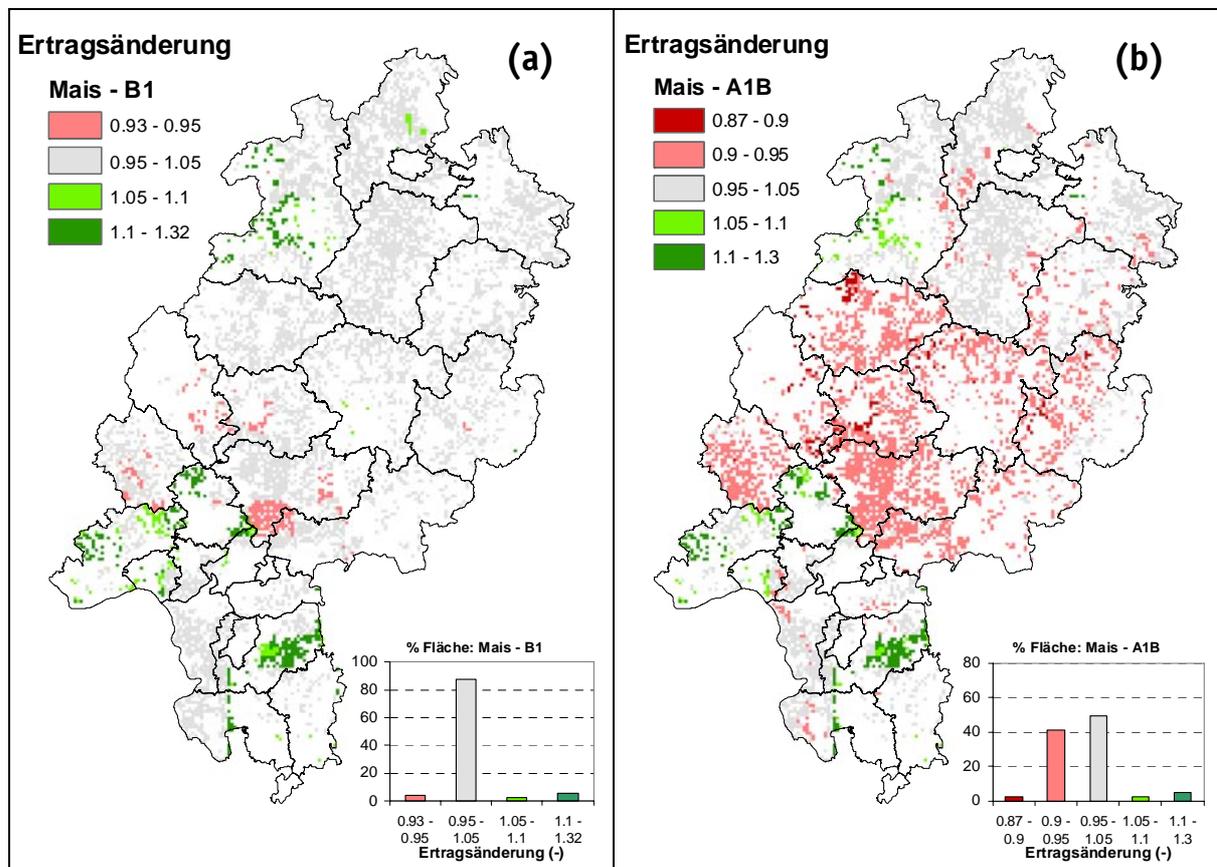


Abbildung 8: : Ertragsänderungen für Silomais unter den Szenarien B1 (a) und A1B (b) (1.0 = keine Änderung).

Auf Landkreisebene variieren die Ertragsänderungen für Silomais unter dem A1B-Szenario zwischen -9.3 % (Lahn-Dill) und +8.2 % (Rheingau-Taunus). Für das B1-Szenario sind die Ertragsänderungen eher zu den Ertragszuwächsen hin verschoben: Die Spanne liegt zwischen -4.2 % (Lahn-Dill) und +10.3 % (Rheingau-Taunus) Ertragsänderung (vgl. Abbildung 9). Außerdem weisen unter diesem Szenario 11 der 26 Landkreise im Mittel Ertragszuwächse auf, im Vergleich zu 4 Landkreisen unter dem A1B-Szenario.

Die hessenweiten Ertragsrückgänge für Mais liegen im Bereich der von der EEA (2008) angegebenen Spanne von Ertragsänderungen für lokale mittlere Temperaturänderungen von +1.5 bis +3°C, wie sie vom REMO-Modell als Jahresmittel der Temperaturänderung für Hessen berechnet werden.

¹ Die unterschiedliche räumliche Auflösung von Landbedeckungsdaten und Klimadaten, d.h. das Auftreten der Kanten von Klimarasterzellen am Rand der Ackerbaufläche zum Odenwald hin führt zu den sehr konzentriert auftretenden Ertragszunahmen mit Nord-Süd-Ausrichtung im Landkreis Bergstraße.

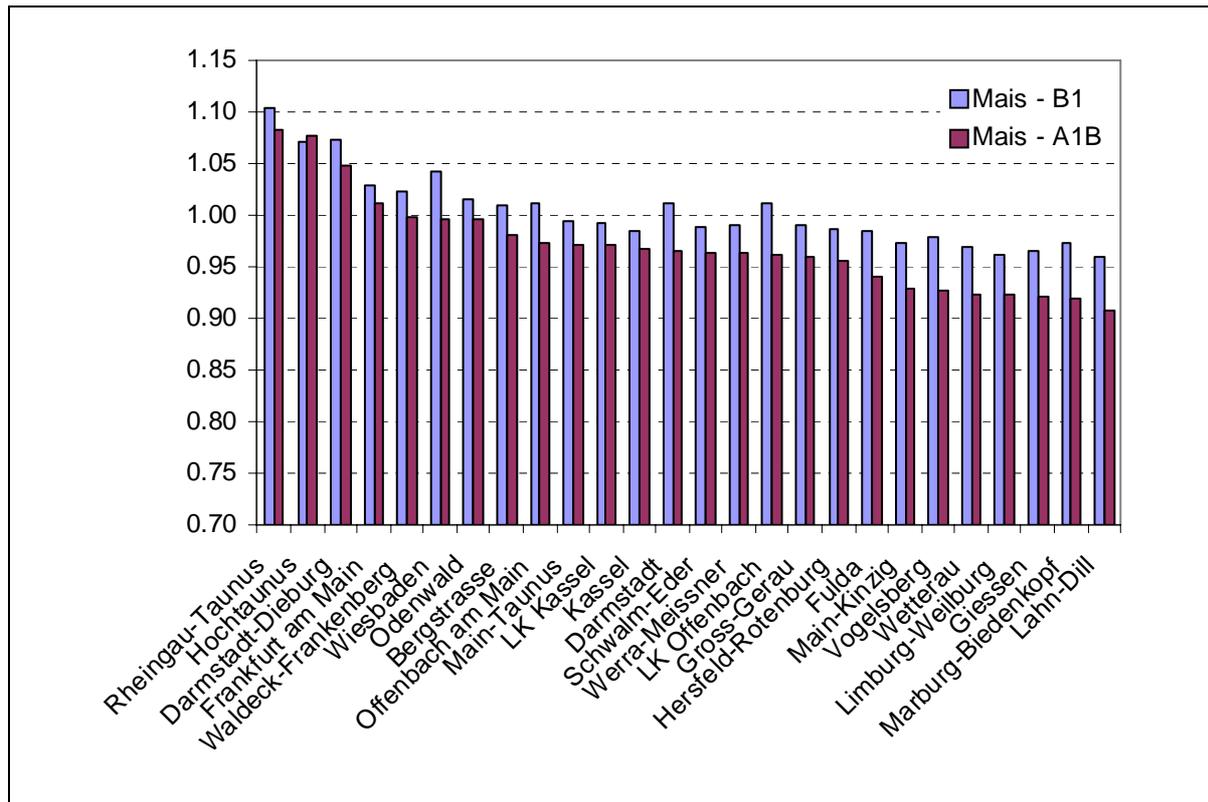


Abbildung 9: Änderungen der potenziellen Erträge für Silomais in den hessischen Landkreisen (1.0 = keine Änderung).

3.4. Wintergerste

Für gute Erträge bei Wintergerste, dem zweitwichtigsten Getreide in Hessen, sind ein feucht-kühler Witterungsverlauf im Frühling sowie mäßige Temperaturen und ausreichende Wasserversorgung während der Kornfüllungsphase entscheidend. Wintergerste ist dabei aufgrund der kühlenden Wirkung seiner Begrannung weniger hitzeempfindlich als Winterweizen. Auch der spezifische Wasserverbrauch ist geringer als beim Winterweizen, da ein größerer Teil der vegetativen Entwicklung bereits im Herbst und Winter stattfindet (Schönberger und Kropf, 2000 zitiert in Schaller und Weigel, 2007).

Für Wintergerste ergaben die Simulationen unter beiden Szenarien ein sehr ähnliches Ergebnis für die mittleren hessischen Ertragsänderungen: Eine Verminderung um 3.4 % unter dem B1-Szenario und um 3.3 % unter dem A1B-Szenario. Diese Ähnlichkeit in den gemittelten Ergebnissen darf aber nicht darüber hinweg täuschen, dass die räumliche Variabilität der Ergebnisse für das A1B-Szenario sehr viel größer ist (siehe Abbildung 10): Auf 17 % der simulierten Flächen werden Verminderungen der potenziellen Erträge um 10 % bis 33 % ermittelt. Dem gegenüber stehen ca. 4 % Ackerfläche mit Ertragssteigerungen um 5 % bis 12 %. Unter dem B1-Szenario liegen dagegen auf 86 % der Flächen

nur geringe Ertragsänderungen um +/- 5 % vor. Flächenanteile mit starken mittleren Verminderungen um >10 % sind dagegen mit 0.3 % vernachlässigbar klein, Ertragszuwächse >5 % wurden gar nicht berechnet. Im Vergleich zum Winterweizen (siehe Abbildung 4) führt die stärkere Erwärmung in Südhessen bei der Wintergerste vor allem unter dem A1B-Szenario zu weniger starken Ertragsrückgängen.

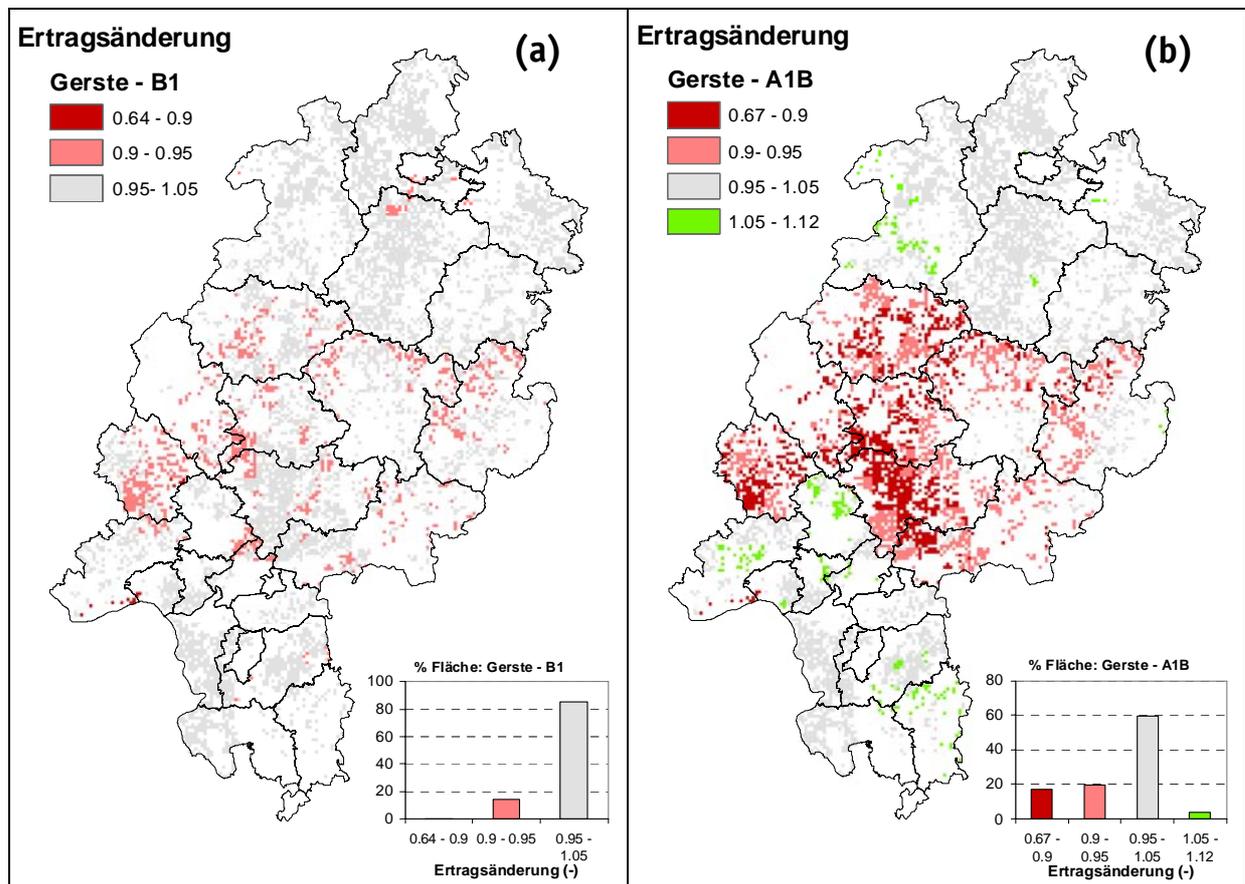


Abbildung 10: Ertragsänderungen für Wintergerste unter den Szenarien B1 (a) und A1B (b) (1.0 = keine Änderung).

Auf Ebene der Landkreise werden für das A1B-Szenario Ertragsänderungen für Wintergerste zwischen -11.6 % (Lahn-Dill) und +5.8 % (Hochtaunus) berechnet (siehe Abbildung 11). Von 26 Landkreisen weisen unter diesem Szenario 13 Landkreise Ertragszuwächse auf. Unter dem B1-Szenario ist die Spanne der Ertragsänderungen geringer, es wurden allerdings auch für alle Landkreise Ertragsminderungen ermittelt: -1 % im Landkreis Offenbach bis -5.7 % im Landkreis Limburg-Weilburg.

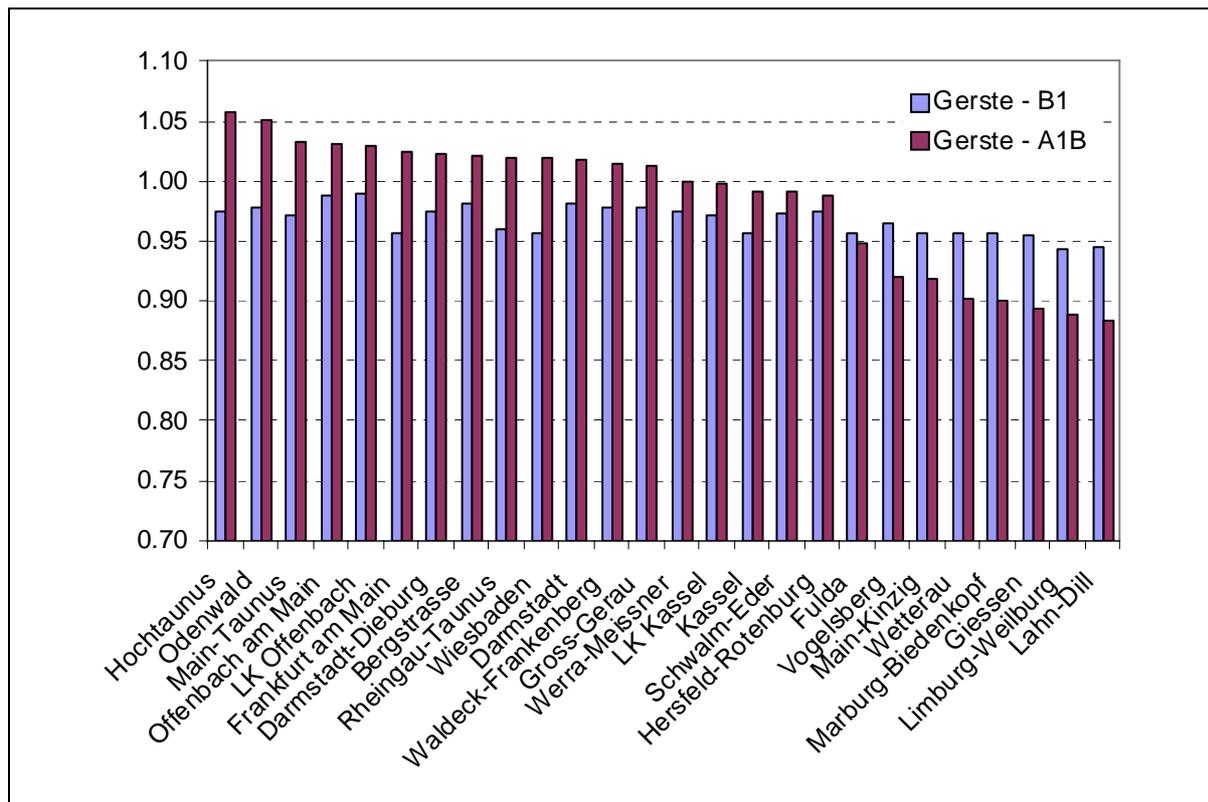


Abbildung 11: Änderungen der potenziellen Erträge für Wintergerste in den hessischen Landkreisen (1.0 = keine Änderung).

3.5. Zuckerrübe

Die Zuckerrübe stellt höhere Wärmeansprüche als der Mais. Während der Hauptwachstumsperioden sind Temperaturen um 25°C optimal, für die Ausbildung des Zuckergehaltes allerdings nur 20-23°C. Die Temperatur beeinflusst den Zuckergehalt besonders in den letzten Vegetationswochen: Bei niedrigen Nachttemperaturen steigt der Zuckergehalt an, da die Veratmung gebremst wird. Der Wasserbedarf ist bei der Zuckerrübe trotz eines geringen spezifischen Wasserbedarfs von ca. 200 l/kg Trockenmasse aufgrund der hohen Biomasseerzeugung recht hoch. Fehlende Niederschläge können somit zum limitierenden Faktor für den Ertrag werden, wenn nicht bewässert wird.

Für die Zuckerrübe führen die simulierten höheren Sommertemperaturen in Kombination mit zurückgehenden Niederschlägen im hessischen Mittel zu Ertragsverminderungen um 1.0 % unter dem B1-Szenario und um 3.1 % unter dem A1B-Szenario. Dabei liegen für das B1-Szenario die Ertragsänderungen auf knapp 98 % der Fläche im Bereich +/- 5 %, während auf etwa 2 % der Fläche Ertragszuwächse > 5 % berechnet werden (siehe Abbildung 12). Der wesentliche Unterschied zum A1B-Szenario liegt darin, dass unter

letzterem auf 13 % der Fläche Verminderungen der potenziellen Erträge um 5 % bis 10 % berechnet werden.

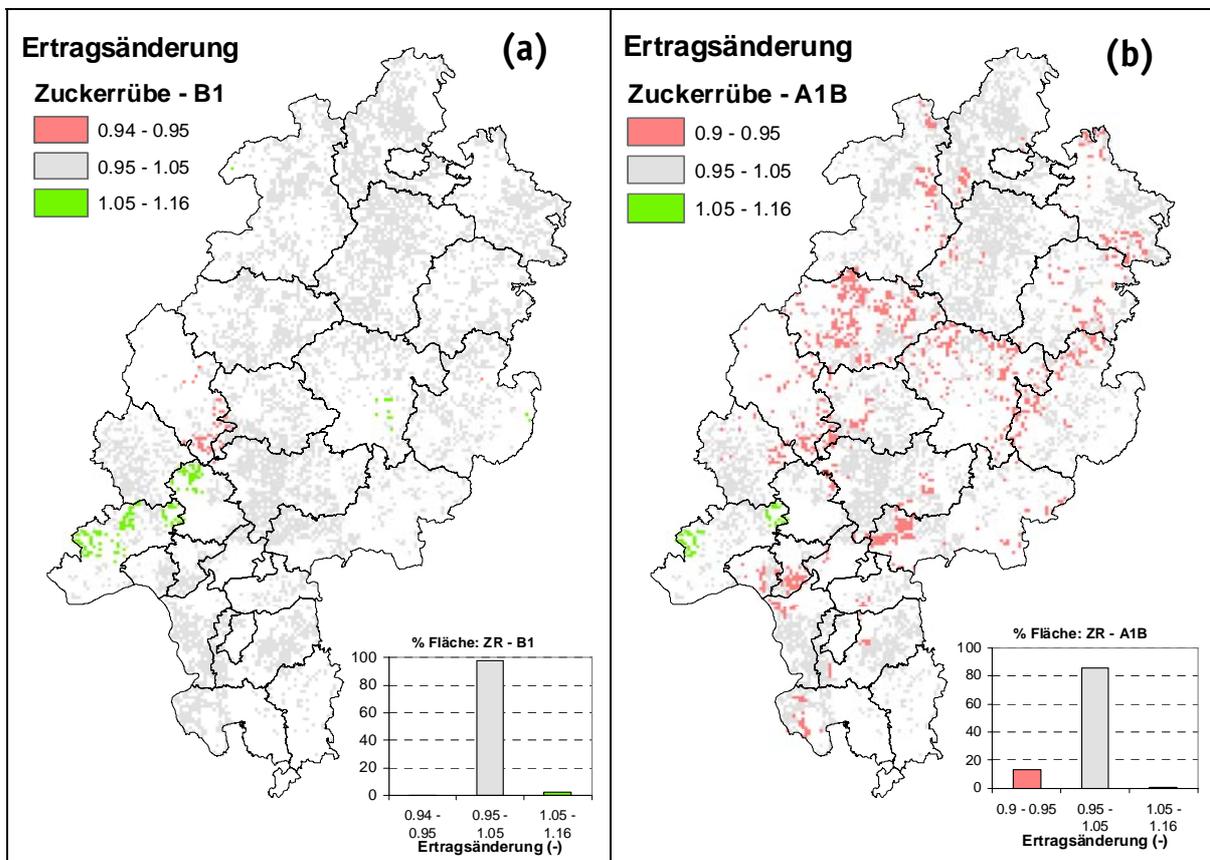


Abbildung 12: Ertragsänderungen für Zuckerrüben unter den Szenarien B1 (a) und A1B (b) (1.0 = keine Änderung).

Auf Ebene der Landkreise fallen die Änderungen der potenziellen Erträge für Zuckerrüben eher gering aus (siehe Abbildung 13): Unter dem A1B-Szenario wurden maximale Ertragsminderungen von 6.0 % im Landkreis Lahn-Dill ermittelt. Dem stehen Ertragszuwächse von +3.6 % im Landkreis Rheingau-Taunus gegenüber. Unter dem B1-Szenario fallen die maximalen Ertragseinbußen mit 3.1 % (Lahn-Dill) geringer aus, die Ertragszuwächse dagegen mit +6.3 % im Landkreis Rheingau-Taunus höher als unter dem A1B-Szenario. Das Gesamtbild zeigt Ertragsminderungen in 24 bzw. 23 von 26 Landkreisen unter dem A1B- bzw. B1-Szenario.

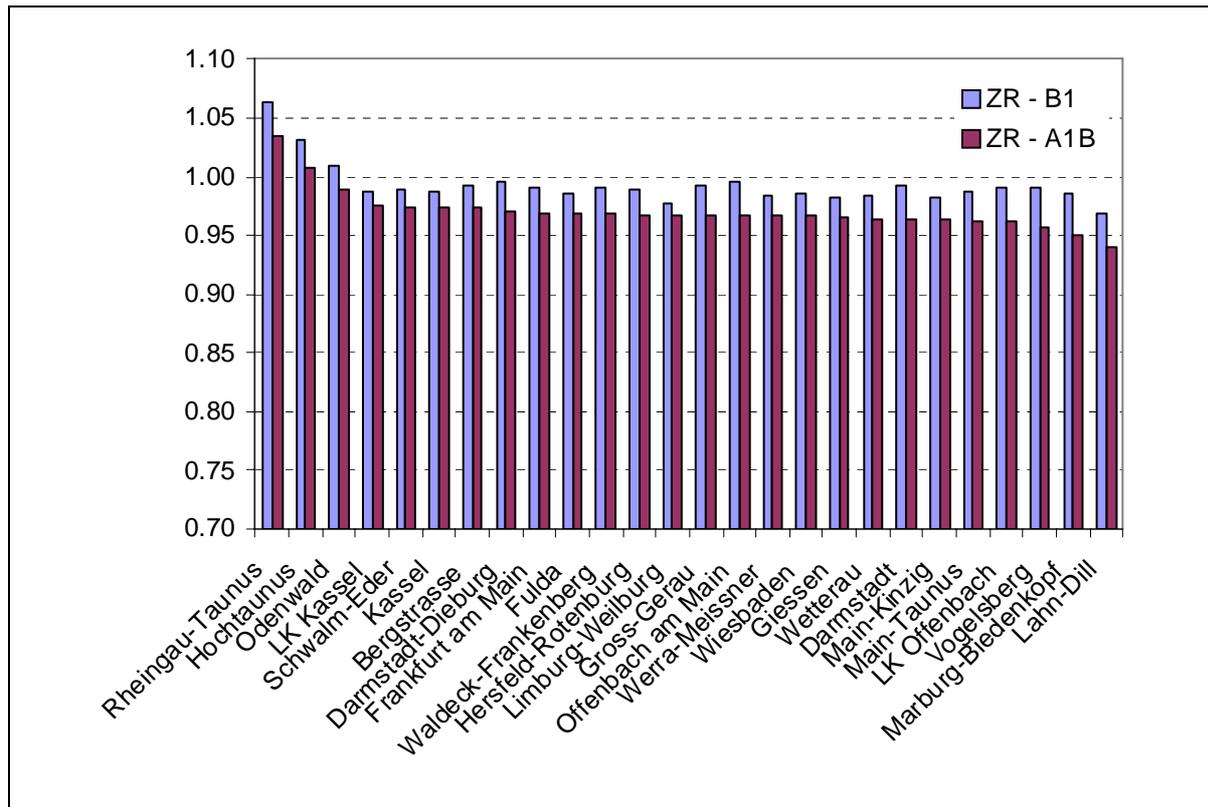


Abbildung 13: Änderungen der potenziellen Erträge für Zuckerrüben in den hessischen Landkreisen (1.0 = keine Änderung).

Die hier berechneten mittleren hessischen Ertragsrückgänge liegen im Bereich der von Jones et al (2003) simulierten Ertragsänderungen für Zuckerrüben in Mitteleuropa, die zwischen 0 % und -6 % betragen.

4. Ertragssicherheit ausgewählter Energiepflanzen

Neben der beschriebenen Änderung des durchschnittlichen Ertragsniveaus können häufigere Klimaextreme zu einer verminderten Ertragssicherheit, d.h. einem vermehrten Auftreten starker Ertragseinbrüche führen. Ein Beispiel für ein Jahr mit teilweise extremen klimabedingten Ertragseinbußen in Europa ist das Jahr 2003 mit großer Trockenheit im Frühling und einer Kombination von extremer Trockenheit und Hitze während der Sommermonate. Szenariorechnungen von Schär et al. (2004) legen nahe, dass gegen Ende des Jahrhunderts in jedem zweiten Jahr vergleichbar warme und trockene oder sogar wärmere und trockenere Wetterbedingungen als die im Jahr 2003 beobachteten auftreten können. Angelehnt an die deutschlandweiten Ertragsänderungen für dieses Jahr wurden für zwei in Hessen wichtige Energiepflanzen die Simulationsergebnisse hinsichtlich der Änderung der Häufigkeit von Ertragseinbußen von mehr als 15 % bzw. mehr als 30 % ausgewertet. Genauer, es wurde für Silomais und Winterraps berechnet, wie häufig pro Dekade die genannten klimatisch bedingten Einbußen der potenziellen Erträge im Zeitraum 1971-2000 und wie häufig in der Zukunft, d.h. im Zeitraum 2041-2070 unter dem Szenario B1 bzw. A1B auftreten. Ein Ertragsrückgang von 15 % liegt in der gleichen Größenordnung wie die deutschlandweit gemittelten Rückgänge für Silomais und Winterraps im Jahr 2003 relativ zur Periode 2000-2005 (genauer -16 % für Winterraps und -13 % für Silomais, Statistisches Bundesamt 2002, 2005 und 2006 wie zitiert in Schaller & Weigel, 2007). Die maximalen Ertragsrückgänge auf Bundeslandebene betragen für beide Feldfrüchte 32 % (Brandenburg und Sachsen-Anhalt). Auch wenn die Ertragsrückgänge für Hessen mit 5 % für Silomais und 14 % für Winterraps niedriger ausfielen, werden Ertragsrückgänge von 15 % und 30 % im Folgenden als Schwellenwerte für die Abschätzung der klimabedingten Veränderung der Ertragssicherheit verwendet. Diese spiegeln dann jeweils eine entsprechende prozentuale Änderung der potenziellen Energieausbeute pro ha wider. Die verminderte Energieausbeute entspräche beispielsweise bei der Umwandlung von Rapsöl in Biodiesel (Rapsölmethylester) und einer Ertragseinbuße von 15 % einer Minderproduktion von umgerechnet 260 l Dieseltreibstoff pro ha (Annahme: mittlerer hessischer Ertrag von 30.2 dt/ha und 511 l RME/t Raps, Kennzahlen aus: Biomasse Info-Zentrum, 2002). Bei der Produktion von Biogas aus Silagemais würde bei einem mittleren hessischen Ertrag von 474 dt/ha und bei 92 l Heizöläquivalente/t Biomasse eine Ertragseinbuße von 15 % zu einer Minderproduktion von umgerechnet 653 l Heizöl pro ha führen (Kennzahlen aus: Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR), 2008).

4.1. Ertragssicherheit bei Silomais

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wurden im dreißigjährigen Mittel für Silomais in Hessen nur geringe klimabedingte Ertragsrückgänge zwischen 0.5 % (B1-Szenario) und 3.9 %

(A1B-Szenario) berechnet. Die klimatisch bedingte Ertragssicherheit für Silomais nimmt, wie Tabelle 2 zu entnehmen ist, ebenfalls leicht ab. So können hessenweit potenzielle Ertragsrückgänge von >15 % unter dem A1B-Szenario dreimal so häufig auftreten wie heute, während für das B1-Szenario nur eine doppelt so hohe Auftrittshäufigkeit ermittelt wurde. Hessenweite potenzielle Ertragsrückgänge von mehr als 30 % sind dagegen für Silomais auch unter den gegebenen zukünftigen Klimaszenarien nicht zu erwarten.

Tabelle 2: Häufigkeit von Ertragseinbußen von >15 % bzw. >30 % für Silomais in Hessen und den hessischen Landkreisen für die Perioden 1971–2000 sowie 2041-2070 unter den Szenarien B1 und A1B (pro Dekade).

Landkreis	Anzahl Jahre pro Dekade mit >15% Ertragsrückgang *			Anzahl Jahre pro Dekade mit >30% Ertragsrückgang *		
	1971-2000	B1	A1B	1971-2000	B1	A1B
Werra-Meißner	0.3	0.7	0.3	0.0	0.0	0.0
Waldeck-Frankenberg	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Schwalm-Eder	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0
LK Kassel	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Hersfeld-Rotenburg	0.3	0.3	0.7	0.0	0.0	0.0
Fulda	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Kassel	0.3	0.7	2.3	0.0	0.3	0.0
Vogelsberg	1.0	0.7	2.7	0.0	0.0	0.0
Marburg-Biedenkopf	0.3	0.7	3.3	0.0	0.0	0.3
Limburg-Weilburg	1.0	1.7	2.0	0.0	0.0	0.3
Lahn-Dill	1.3	1.7	3.3	0.0	0.3	1.0
Gießen	1.0	1.7	2.3	0.0	0.0	0.3
Wetterau	1.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0
Rheingau-Taunus	1.0	1.0	2.0	0.0	0.0	0.3
LK Offenbach	1.3	0.3	0.0	0.7	0.3	0.0
Odenwald	0.7	0.7	1.7	0.0	0.0	0.0
Main-Taunus	0.3	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0
Main-Kinzig	0.0	0.3	0.3	0.0	0.0	0.0
Hochtaunus	1.3	0.3	0.0	0.7	0.3	0.0
Groß-Gerau	0.7	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0
Darmstadt-Dieburg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Bergstraße	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Wiesbaden	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Offenbach am Main	0.3	0.0	1.3	0.0	0.0	0.0
Frankfurt am Main	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0
Darmstadt	0.7	1.0	2.0	0.0	0.0	0.0
Hessen	0.3	0.7	1.0	0.0	0.0	0.0

*Änderung der potenziellen Erträge jeweils relativ zum mittleren potenziellen Ertrag für die Periode 1971-2000.

Auf Landkreisebene weisen die Landkreise mit den stärksten mittleren Ertragsrückgängen für Silomais, nämlich die Landkreise Lahn-Dill und Marburg-Biedenkopf, erwartungsgemäß auch die häufigsten Überschreitungen der Schwellenwerte auf (vgl. Abbildung 9 und Tabelle 2). Dies trifft sowohl für den Schwellenwert 15 % als auch 30 % zu. Eine Verbesserung der Situation kann für Landkreise mit Landwirtschaft in höheren Lagen auftreten: Für den Landkreis Hochtaunus nimmt die Häufigkeit starker Ertragseinbußen unter beiden Szenarien und beiden Schwellenwerten ab. Es sind allerdings auch andere Trends möglich: Für den Landkreis Rheingau-Taunus, für den ein mittlerer Ertragszuwachs für Silomais berechnet wurde (vgl. Abbildung 9), nimmt die Häufigkeit starker Ertragseinbußen unter beiden Szenarien zu. Das heißt, mittlere Ertragszuwächse können diesen ersten Berechnungen nach sowohl mit einer größeren als auch mit einer geringeren Ertragssicherheit einhergehen.

4.2. Ertragssicherheit bei Winterraps

Für Winterraps wurden im langjährigen Mittel für Hessen stärkere Ertragsrückgänge zwischen 5.4 % unter dem B1-Szenario und 9.2 % unter dem A1B-Szenario berechnet (siehe Kapitel 3.2). Wie in Tabelle 3 zu sehen ist, treten auch Jahre mit stärkeren Ertragseinbrüchen entsprechend häufiger auf: Für den Schwellenwert 15 % verdoppelt sich die Anzahl der Jahre unter dem B1-Szenario im Vergleich zur jetzigen Häufigkeit. Unter dem A1B-Szenario sind sogar jedes 3. Jahr Erträge zu erwarten, die 15 % unter dem heute gewohnten Durchschnittsertrag liegen. Legt man der Analyse einen strikteren Schwellenwert von 30 % Rückgang relativ zum heutigen Durchschnittsertrag zugrunde, so ist in Zukunft hessenweit eine geringe Auftrittshäufigkeit von maximal 1 mal in 30 Jahren unter dem A1B-Szenario und keine Auftrittswahrscheinlichkeit unter dem B1-Szenario zu erwarten.

Auf Landkreisebene nimmt für den Schwellenwert 15 % die Auftrittshäufigkeit unter dem A1B-Szenario in den meisten Landkreisen zu. Lediglich der Landkreis Hochtaunus weist, vermutlich aufgrund zunehmender Niederschläge im Frühjahr und nur moderater Niederschlagsrückgänge im Sommer (vgl. Abbildung 2), eine geringere Häufigkeit von Ertragsrückgängen >15 % auf. Dies trifft ebenso zu für den Schwellenwert von 30 % im Landkreis Hochtaunus. Auffällig ist, dass unter dem B1-Szenario in vielen südhessischen Landkreisen die Häufigkeit der Überschreitung des Schwellenwertes von 15 % im Vergleich zu heute abnimmt, obwohl der mittlere Ertrag in diesen Landkreisen zurückgeht. Der Schwellenwert von 30 % Ertragsrückgang wird im Wesentlichen nur unter dem A1B-Szenario häufiger überschritten als unter den heutigen Klimabedingungen. Unter dem B1-Szenario bleibt die Häufigkeit von Ertragseinbußen >30 % gleich oder verringert sich sogar.

Tabelle 3: Häufigkeit von Ertragseinbußen von >15 % bzw. >30 % für Winterraps in Hessen und den hessischen Landkreisen für die Perioden 1971–2000 sowie 2041-2070 unter den Szenarien B1 und A1B (pro Dekade).

Landkreis	Anzahl Jahre pro Dekade mit >15% Ertragsrückgang *			Anzahl Jahre pro Dekade mit >30% Ertragsrückgang *		
	1971-2000	B1	A1B	1971-2000	B1	A1B
Werra-Meißner	0.3	2.3	3.3	0.3	0.0	0.7
Waldeck-Frankenberg	0.7	3.0	3.3	0.3	0.0	0.3
Schwalm-Eder	0.7	2.3	5.7	0.0	0.0	0.7
LK Kassel	1.0	2.3	3.7	0.0	0.0	0.3
Hersfeld-Rotenburg	0.3	3.0	5.3	0.3	0.0	0.7
Fulda	1.0	2.0	4.7	0.0	0.0	0.7
Kassel	0.3	2.0	2.7	0.3	0.0	0.3
Vogelsberg	1.0	1.3	3.0	0.3	0.0	0.3
Marburg-Biedenkopf	0.7	1.7	3.7	0.3	0.0	0.3
Limburg-Weilburg	0.7	0.3	3.3	0.0	0.0	0.3
Lahn-Dill	0.7	1.0	2.7	0.0	0.0	0.3
Gießen	0.3	0.3	3.7	0.0	0.0	0.3
Wetterau	0.7	1.3	3.7	0.0	0.0	0.7
Rheingau-Taunus	0.7	1.3	3.7	0.0	0.0	0.7
LK Offenbach	1.3	1.0	1.7	1.0	0.7	0.3
Odenwald	0.3	0.0	1.7	0.0	0.0	0.3
Main-Taunus	2.0	1.7	2.0	0.3	0.0	1.0
Main-Kinzig	1.0	0.3	3.3	0.0	0.0	0.3
Hochtaunus	2.3	1.0	2.0	1.0	0.3	0.3
Groß-Gerau	1.0	0.3	2.3	0.0	0.0	0.3
Darmstadt-Dieburg	0.7	0.3	2.3	0.0	0.0	0.3
Bergstraße	0.3	0.0	1.7	0.0	0.0	0.3
Wiesbaden	0.7	0.7	2.3	0.0	0.0	0.3
Offenbach am Main	1.0	1.0	2.3	0.3	0.0	0.3
Frankfurt am Main	1.0	1.0	3.0	0.3	0.0	0.3
Darmstadt	1.0	0.3	2.3	0.0	0.0	0.3
Hessen	0.3	0.7	3.3	0.0	0.0	0.3

*Änderung der potenziellen Erträge jeweils relativ zum mittleren potenziellen Ertrag für die Periode 1971-2000.

5. Zusammenfassende Bewertung und mögliche Anpassungsmaßnahmen

Das Ziel dieser Studie war eine Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragssituation in der hessischen Landwirtschaft, wobei die Berechnungen zum einen die gesamte hessische landwirtschaftliche Fläche abdecken und zum anderen durch Verwendung von zwei globalen Emissionsszenarien eine gewisse Spanne des zu erwartenden Klimawandels berücksichtigt wird. Es konnte gezeigt werden, dass beide Aspekte einen Einfluss auf die Ergebnisse haben:

- Die Unterschiede zwischen den zugrundeliegenden Emissionsszenarien A1B und B1 sind bei Zuckerrüben, Mais und Raps mit einer Verdopplung bis Verdreifachung des Auswirkungsniveaus auf gesamthessischer Ebene recht ausgeprägt. So wurde z.B. für die Zuckerrübenenerträge eine Verminderung von 1 % unter dem B1-Szenario ermittelt, während die Ertragsminderung unter dem A1B-Szenario mit 3.1 % dreimal so hoch ausfällt. Aber auch bei den unter beiden Szenarien im hessischen Mittel ähnlichen Ertragsrückgängen für Winterweizen und Wintergerste verbergen sich bei Betrachtung auf Landkreisebene große Unterschiede zwischen den Szenarien. Die stärksten Ertragsminderungen auf Landkreisebene sind für alle Feldfrüchte unter dem A1B-Szenario zu erwarten. Allerdings treten bei Winterweizen und Wintergerste auch stärkere, wenn auch geringe Ertragszuwächse unter dem A1B-Szenario bei Landkreisen mit Ackerbau in höheren Lagen auf.
- Die Unterschiede auf räumlicher Ebene variieren zwischen Ertragsrückgängen und Ertragszuwächsen, d.h. unter demselben Szenario sind zwischen den Landkreisen, zum Teil aber auch innerhalb eines Landkreises, sowohl Ertragszuwächse als auch Ertragsrückgänge berechnet worden.

Die Änderungen der Ertragsicherheit für den Energiepflanzenanbau unter Bedingungen des Klimawandels fallen sehr heterogen aus. Die Häufigkeit stärkerer Ertragseinbußen nimmt tendenziell unter dem A1B-Szenario stärker zu als unter dem B1-Szenario. Unter dem B1-Szenario könnte in einigen südhessischen Landkreisen sogar eine Verbesserung der Situation erwartet werden. Die Resultate hinsichtlich einer tendenziellen Zunahme der Ertragsvariabilität stimmen mit den von Priess et al. (2005) ermittelten Ergebnissen für das B2-Szenario (WETTREG/ECHAM4) überein.

Unter der Annahme, dass die Kosten und der energetische Aufwand für die Biomassebereitstellung pro Hektar (Aussaat, Düngung, Ernte, usw.) gleich bleiben, besteht die Gefahr, dass insbesondere Betriebe, die nur knapp im wirtschaftlich kostendeckenden Bereich arbeiten, durch häufigere Klimaextreme und damit einhergehende Ertragseinbußen aus dem Bereich der Wirtschaftlichkeit herausfallen. Auch der Energieertrag, d.h. das Verhältnis von für die Produktion aufgewendeter Energie zu der pro t Biomasse erzeugten

Energie, fällt im Falle klimatisch bedingter Ertragseinbußen ungünstiger aus. Dies trifft aufgrund der zu erwartenden höheren Ertragsrückgänge insbesondere auf den Anbau von Winterraps für die Biodieselproduktion zu. Im Fall Silomais und Biogaserzeugung könnten Landkreise mit einer klimabedingten Zunahme von Erträgen, d.h. z.B. mit landwirtschaftlichen Flächen in höheren Lagen, die auch räumlich bedingt für Maisanbau und -ernte geeignet sind, mittelfristig durchaus vom Klimawandel profitieren.

Die beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf das landwirtschaftliche Ertragsniveau in Hessen beruhen auf einer Abfolge von Modellsimulationen und sind entsprechend mit Unsicherheiten behaftet. Diese Unsicherheit beginnt bei der Spanne der globalen Emissionsszenarien für Treibhausgase, die im Rahmen dieser Studie weitgehend berücksichtigt wird. Der nächste Unsicherheitsfaktor in der Modellkette besteht in den Ergebnissen des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM, die als Antrieb für das regionale Klimamodell REMO dienen und damit die räumlich hoch aufgelösten Ergebnisse dieses Modells maßgeblich mit prägen. Abgesehen von den Ergebnissen des globalen Klimamodells trägt aber auch das regionale Klimamodell REMO zur Unsicherheit vor allem der Niederschlagsmuster und damit der räumlichen Verteilung der Ertragsänderungen bei. Schließlich trägt auch das Ertragsmodell DAYCENT durch Vereinfachungen in der Abbildung der Wachstumsprozesse, aber auch durch die begrenzte Datenlage zur Kalibrierung des Modells oder fehlende Informationen zur aktuellen Bewirtschaftung (z.B. die Bewässerungslandwirtschaft im hessischen Ried) zur Unsicherheit der Ergebnisse bei.

Der Einfluss der globalen Klimamodelle wird deutlich, wenn man die Ergebnisse dieser Studie mit den Ergebnissen der Vorgängerstudie für das B2-Emissionsszenario vergleicht (Priess et al., 2005). Die Ergebnisse der Vorgängerstudie basieren auf den Klimavariablen des regionalen Modells WETTREG angetrieben vom globalen Klimamodell ECHAM4 (B2-WETTREG/ECHAM4). Wie in Tabelle 4 zu sehen ist, sind die Ertragseinbußen unter diesem Szenario, mit Ausnahme der Wintergerste, höher als in der vorliegenden Studie, obwohl die globalen Treibhausgasemissionen des B2-Szenarios niedriger als die des A1B-Szenarios liegen. Diese Unterschiede zwischen den Szenarioergebnissen sind darauf zurückzuführen, dass die Klimavariablen für das B2-Szenario auf dem globalen Klimamodell ECHAM4 (B1- und A1B-Szenario: ECHAM5) basieren. Von den Ergebnissen des ECHAM4-Modells ist bekannt, dass die Temperaturerhöhung aufgrund einer unzureichenden Abbildung des kühlenden Einflusses von Aerosolen generell höher ausfällt als bei Simulationsläufen mit dem ECHAM5-Modell. Der starke Einfluss des globalen Modells wird deutlich, wenn man die Temperaturerhöhung im Raum Gießen zur Jahrhundertmitte betrachtet, die bei Verwendung des regionalen Modells WETTREG unter dem B2-Szenario (ECHAM4) um ca. 0.5 °C höher ausfällt als für das höchste globale Emissionsszenario A2 (ECHAM5) (Streitfert & Grünhage, 2009). Dies ist ein Hinweis für den großen Einfluss, den das jeweils verwendete globale Klimamodell auf die regionale Klimasimulation haben kann.

Tabelle 4: Mittlere landwirtschaftliche Ertragsänderungen in Hessen für den Zeitraum 2041-2070 relativ zu 1971-2000 (bzw. für B2 2041-50 relativ zu 1980-2000) unter dem B1- und A1B-Szenario (REMO-ECHAM5) und B2-Szenario (WETTREG-ECHAM4) (Ergebnisse für das B2-Szenario aus Priess et al., 2005).

	Ertragsänderung in %		
	B1	A1B	B2
Winterweizen	-3.0	-4.0	-10.0
Wintergerste	-3.4	-3.3	-3.0
Silomais	-0.5	-3.9	-5.0
Winterraps	-5.4	-9.2	-13.0
Zuckerrübe	-1.0	-3.1	-5.0

Unter Berücksichtigung der genannten Unsicherheiten kann die vorliegende Studie dazu dienen, einen ersten gesamthessischen Überblick über mögliche klimabedingte Änderungen in der landwirtschaftlichen Ertragsituation zu geben und potenziell vom Klimawandel besonders gefährdete Fruchtarten und Regionen zu identifizieren. Wie aus Tabelle Z1 sowie Abbildung A1 im Anhang hervorgeht, kann insbesondere der Winterraps in den nordhessischen Landkreisen von klimabedingten Ertragsrückgängen betroffen sein. Außerdem zeigen die Berechnungen eine besondere Sensitivität der Ertragsniveaus in den westlichen mittelhessischen Landkreisen: So wurden für den Landkreis Lahn-Dill unter dem A1B-Szenario für alle Feldfrüchte Ertragsrückgänge von >5 % berechnet. Auch in den umliegenden Landkreisen Limburg-Weilburg sowie Gießen und Wetterau ist bei vier von fünf Feldfrüchten mit potenziellen Ertragseinbußen >5 % zu rechnen. Dies deutet unter den gegebenen Klimaszenarien auf eine besondere, wenn auch moderate Empfindlichkeit der für diese Landkreise berücksichtigten Feldfrüchte hin. Einschränkend muss hier aber darauf hingewiesen werden, dass sich bei der Klimasimulation im Lahn-Einzugsgebiet mit dem REMO-Modell erhebliche Abweichungen zwischen den für die Gegenwart berechneten Niederschlägen und den tatsächlich beobachteten Niederschlagswerten ergeben haben (siehe Brahmer et al., 2008).

Trotz der Unwägbarkeiten in der zu erwartenden Ausprägung des Klimawandels lassen sich bereits mögliche Anpassungsmaßnahmen für den landwirtschaftlichen Ackerbau benennen. Vor einer konkreten Planung von Anpassungsmaßnahmen wird vor allem die Berücksichtigung der Ergebnisse weiterer globaler Klimamodelle empfohlen.

Anpassungsmaßnahmen im landwirtschaftlichen Ackerbau lassen sich in vier Gruppen einordnen (siehe z.B. Zebisch et al., 2005):

- 1. Veränderung im Management:** Hier ist z.B. die Anpassung von Aussaatzeitpunkten zu nennen, um verlängerte Vegetationsperioden zu nutzen. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass Spätfröste den Pflanzen u.U. gefährlicher werden könnten. Außerdem ist durch die sogenannte konservierende (pfluglose) Bodenbearbeitung sowie Mulchen eine Verminderung der Wasserverdunstung (Wassereinsparung) sowie des klimabedingten beschleunigten Abbaus der organischen Bodensubstanz (Schutz der Bodenfruchtbarkeit) zu erreichen. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass durch die Beschleunigung der Wachstumsphasen und damit einhergehender früherer Erntetermine längeres Brachliegen von Ackerland ebenfalls nachteilige Auswirkungen haben kann, wie z.B. eine verstärkte Stickstoffauswaschung (siehe auch EEA, 2008). Ein weiterer wichtiger Aspekt ist das vermehrte Auftreten von Schaderregern durch mildere und feuchtere Winter sowie die Einwanderung neuer Schaderreger. Hier ist ein Monitoring wünschenswert sowie die frühzeitige Entwicklung von Gegenmaßnahmen notwendig. Auch die Anpassung von Be- und Entwässerungsmaßnahmen an trockenere Sommer sowie extreme Niederschlagsereignisse wäre vorzunehmen.
- 2. Anbau angepasster Sorten:** Hier sind die Züchtung und der Anbau neuer Sorten zu nennen, die eine höhere Toleranz gegen Trockenstress haben und/oder eine geringere Anfälligkeit gegen Schädlingsbefall aufweisen.
- 3. Anbau neuer Fruchtarten und Diversifizierung des Fruchtartenspektrums:** Um auch die Chancen des Klimawandels zu nutzen, ist es überlegenswert neue wärmeliebende Fruchtarten anzubauen, die gleichzeitig eine hohe Wassernutzungseffizienz aufweisen. Daneben ist angesichts zunehmender Extremereignisse eine Vorbeugung gegen starke Ertragseinbrüche bzw. Totalausfälle durch Diversifizierung des Fruchtartenspektrums auch auf Betriebsebene empfehlenswert.
- 4. Übergreifende Maßnahmen:** Um die Auswirkungen einer verzögerten Anpassung an den Klimawandel abzufangen, ist es unter Umständen sinnvoll, Versicherungen und/oder Rücklagen gegen extreme witterungsbedingte Schäden und Ertragseinbußen einzuführen. Schließlich sollte das Thema Klimawandel und seine Auswirkungen auf den Ackerbau auch in der landwirtschaftlichen Aus- und Fortbildung eine zunehmende Rolle spielen.

Eine geeignete Auswahl dieser Maßnahmen sollten je nach spezifischer Betroffenheit eines Standortes und wirtschaftlicher Situation einer landwirtschaftlichen Region geplant und umgesetzt, aber auch auf potenzielle Nebenwirkungen hin untersucht werden.

6. Literatur

Biomasse Info-Zentrum (2002): Basisdaten Bioenergie Deutschland (<http://www.bio-energie.de>).

Brahmer, G., Richter, K.-G., Iber, C. (2008): Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserscheitelabflüsse und Abflussverhalten im Lahnggebiet und im hessischen Maingebiet (http://www.hlug.de/klimawandel/inklim_plus/dokumente/berichte/abfluss.pdf).

Brown, R.A., Rosenberg, N.J. (1997): Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO₂ concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agric and For Meteor*, 83, S. 171-203.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2001): Digitale Bodenübersichtskarten der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000).

EEA (2008): Impacts of Europe's changing climate — 2008 indicator-based assessment. European Environmental Agency, Stockholm (www.eea.europa.eu), 246 S.

Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) (2008): Biogas, Basisdaten Deutschland, Stand: Oktober 2008 (http://fnr.webseiten.cc/ftp/pdf/literatur/pdf_185-pdf_185-basisdaten_biogas_oktober2008.pdf).

Gerstengarbe, F.W., Badeck, F., Hattermann, F., Krysanova, V., Lahmer, W., Lasch, P., Stock, M., Suckow, F., Wechsung, F., Werner, P.C. (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft, sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report 83, Potsdam, 77 S.

Jacob, D., Göttel, H., Kotlarski, S. Lorenz, P., Sieck, K. (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland (www.umweltbundesamt.de), 154 S.

Jones, P.D., Lister, H.D., Jaggard, K.W. , Pidgeon, J. D. (2003): Future Climate Impact on the Productivity of Sugar Beet (*Beta Vulgaris L.*) in Europe. *Climatic Change*, 58, S. 93–108.

Keil, M., Kiefl, R., Strunz, G. (2005): CORINE Land Cover 2000 – Europaweit harmonisierte Aktualisierung der Landnutzungsdaten für Deutschland. Abschlussbericht zum F+E Vorhaben UBA FKZ 201 12 209, 93 S. (im Oktober 2008 verfügbar unter www.corine.dfd.dlr.de).

Kelly, R.H., Parton, W.J., et al. (2000): Intra-annual and interannual variability of ecosystem processes in shortgrass steppe. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105, S. 20093-20100.

KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. 2004. Betriebsplanung Landwirtschaft, 2004/2005. Darmstadt, 573 S.

Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z. (2000): IPCC Special Report on Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Parton, W.J., Harmann, M., Ojima, D., Schimel, D. (1998): DAYCENT and its land surface sub-model: description and testing. *Global Planetary Change*, 19: S. 35–48.

Parton, B., Ojima, D., Del Grosso, S., Keough, C. (2001): CENTURY Tutorial - Supplement to CENTURY User's Manual (im Oktober 2008 verfügbar unter www.nrel.colostate.edu/projects/century/century_tutorial.pdf).

Priess, J.A., Heistermann M., Schaldach R., Onigkeit J., Mimler M., Trinks D., Alcamo J. (2005): Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge. Abschlussbericht des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung (USF) Universität Kassel für INKLIM Baustein 2. Hessisches Ministerium für Umwelt, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz.

Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C. Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427, S. 332-336.

Schaldach, R., Alcamo, J. (2006): Coupled simulation of regional land use change and soil carbon sequestration: A case study for the state of Hesse in Germany. *Environmental Modelling and Software* 21, S. 1430-1446

Schaller, M., Weigel, H.-J. (2007): Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Land-

bauforschung Völkenrode – FAL Agricultural Research, Sonderheft 316, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig, 247 S..

Schönberger, H., Kropf, U. (2000): Winter- und Sommergerste (*Hordeum vulgare*). In: Oehmichen, J., Lütke Entrup, N. (Hrsg.) Lehrbuch des Pflanzenbaues. Band 2, Kulturpflanzen, S. 325-361.

Stehfest E, M. Heistermann, J.A. Priess, D. Ojima, J. Alcamo (2007): Simulation of global crop yields with the Ecosystem model DayCent. *Ecological Modelling*, 209, 2-4, S. 203-219.

Streitfert, A., Grünhage, L. (2009): Klimawandel und Pflanzenphänologie in Hessen. Endbericht INKLIM 2012 Baustein II plus, ([http://www.hlug.de/klimawandel/inklím_plus/dokumente/berichte/phaenologie.pdf](http://www.hlug.de/klimawandel/inklিম_plus/dokumente/berichte/phaenologie.pdf)).

uismedia, (1999): CropData - Kennwerte und ökologische Ansprüche der Ackerkulturen, CD-ROM. Freising.

Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005): Klimawandel in Deutschland: Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Umweltbundesamt (www.umweltbundesamt.de), 205 S.

Anhang

Winterraps – B1



Winterraps – A1B



Winterweizen – B1



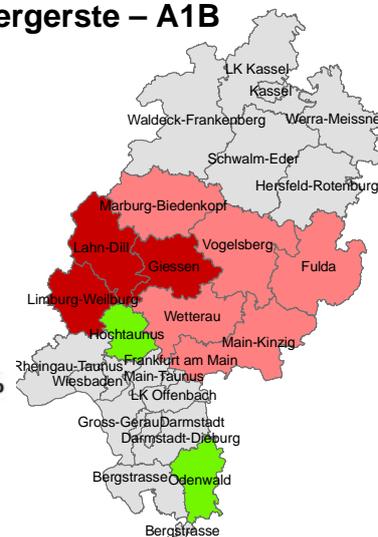
Winterweizen – A1B



Wintergerste – B1



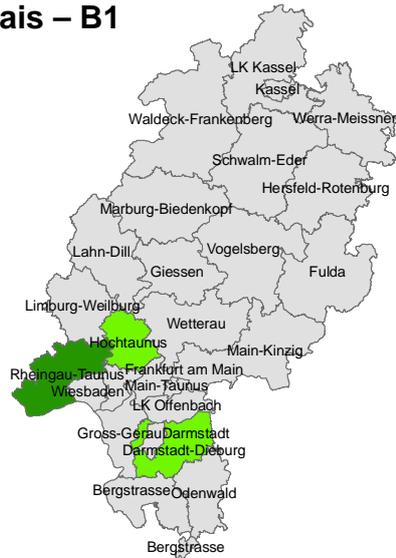
Wintergerste – A1B



Ertragsänderung in %



Silomais – B1



Silomais – A1B



Zuckerrübe – B1



Zuckerrübe – A1B



Ertragsänderung in %



Abbildung A1: Änderung der mittleren potenziellen Erträge auf Landkreisebene für den Zeitraum 2041-2070 relativ zu 1971-2000 unter den Emissionsszenarien B1 und A1B.