

## **INKLIM Baustein 2**

# Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf landwirtschaftliche Erträge

Abschlussbericht des Wissenschaftlichen Zentrums für  
Umweltsystemforschung (USF) – Universität Kassel

August 2005

INKLIM Baustein 2

Abschlussbericht des Wissenschaftlichen Zentrums für Umweltsystemforschung (USF) –  
Universität Kassel

Projekt: Klimawandel und Landwirtschaft in Hessen: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels  
auf landwirtschaftliche Erträge Laufzeit: Februar 2005 bis Juli 2005

Projektleitung: Prof. Dr. Joseph Alcamo, Dr. Jörg Priess

Mitarbeiter: Maik Heistermann, Dr. Janina Onigkeit, Matthias Mimler, Dr. Jörg Priess, Dr. Rüdiger  
Schaldach, Daniela Trinks

# Inhalt

1 Zusammenfassung.....	4
2. Einleitung.....	4
3. Material und Methoden.....	6
3.1. Datengrundlagen.....	6
3.1.1. Landwirtschaftlich genutzte Flächen.....	8
3.1.2. Bodendaten.....	9
3.1.3. Ertragsdaten des HDLGN.....	10
3.1.4. Wetterdaten 1980 - 2000 und 2001 – 2050.....	10
3.2. Das Simulationsmodell DAYCENT.....	10
3.3. Parametrisierung der Feldfrüchte.....	11
3.4. Kalibration der Feldfrüchte und des Grünlands.....	12
3.4.1. Feldfrüchte.....	12
3.4.2. Grünland.....	14
4. Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft.....	15
4.1 Zukünftige landwirtschaftliche Erträge in Hessen.....	15
4.2 Zukünftige landwirtschaftliche Erträge in den Teilregionen.....	17
5. Bewertung und mögliche Anpassungsmaßnahmen.....	20
6. Literatur.....	20

# Glossar

avail_water/PET	Verhältnis von pflanzenverfügbarem Wasser zu Evapotranspiration. Modellparameter zur Charakterisierung der Sensitivität einer Pflanze gegenüber Wasserstress.
DAYCENT Modell	Prozessmodell, welches Pflanzenwachstum und Ertragsbildung sowie Bodenprozesse berechnet.
dt	dezi Tonnen = 100 kg
DWD	Deutscher Wetterdienst
Harvest-Index	Anteil des Ernteguts an der oberirdischen Biomasse
HILLS Modell	Dynamisches Landnutzungsmodell, welches historische und zukünftige Landnutzungsänderungen in Hessen simuliert.
Nettoprimärproduktion (NPP)	Bezeichnet diejenige Kohlenstoffmenge, welche pro Zeiteinheit auf einer Fläche assimiliert wird (meist in g / m <sup>2</sup> / Jahr).
Production-Index (PRDX)	Fruchtspezifischer physiologischer Parameter, der die Effizienz der Umwandlung von Energie in Biomasse beschreibt.
USF	Wissenschaftliches Zentrum für Umweltsystemforschung der Universität Kassel

# 1. Zusammenfassung

In dieser Studie wurden für die kommenden fünf Dekaden die Auswirkungen des Klimawandels auf die wichtigsten in Hessen angebauten Feldfrüchte abgeschätzt. Basierend auf dem von der Firma Meteo-Research für Hessen regionalisierten IPCC-SRES B2-Klimaszenario wurden Futtermais, Wintergerste, Winterraps, Winterweizen, Zuckerrüben und Grünland untersucht. Dabei wurden sowohl Klimaauswirkungen auf die Ernteerträge als auch auf die Variabilität der Erträge, die Ertragssicherheit, analysiert.

Für diese Untersuchung wurde das ursprünglich an der Colorado State University (USA) und an der Universität Kassel modifizierte und weiter entwickelte Simulationsmodell DAYCENT verwendet. Die physiologischen Parameter der simulierten Feldfrüchte und des Grünlands wurden soweit erforderlich neu erhoben und für nord-, mittel- und südhessische Klima- und Anbaubedingungen und Ertragsniveaus angepasst.

Die im Mittel für Hessen zu erwartenden Klimaänderungen werden weder zeitlich noch räumlich homogen oder in einem kontinuierlichen Trend auftreten. Die auch in Zukunft zu erwartende hohe kleinräumige Klimavariabilität spiegelt sich in dieser Studie in den teils gegenläufigen Ertragstrends der hessischen Agrarregionen Nord – Mitte – Süd wider, was hier am Beispiel der Gerste verdeutlicht werden soll. In Nordhessen zählt Gerste mit 4% - 6% Ertragssteigerung zu den „Gewinnern“ des Klimawandels, während sie im Süden bei mittlerer Variabilität auf heutigem Niveau verbleibt, aber in Mittelhessen bei gleichzeitig hoher Variabilität um bis zu 10% Mindererträge zu erwarten sind. Die Erträge der anderen Feldfrüchte entwickeln sich zum Teil ebenfalls regional unterschiedlich, aber nicht notwendigerweise gleichsinnig mit den Gerstenerträgen. Unsere Ergebnisse belegen darüber hinaus, dass auch auf Landkreisebene mit unterschiedlichen Klimawandelfolgen für die Landwirtschaft zu rechnen ist.

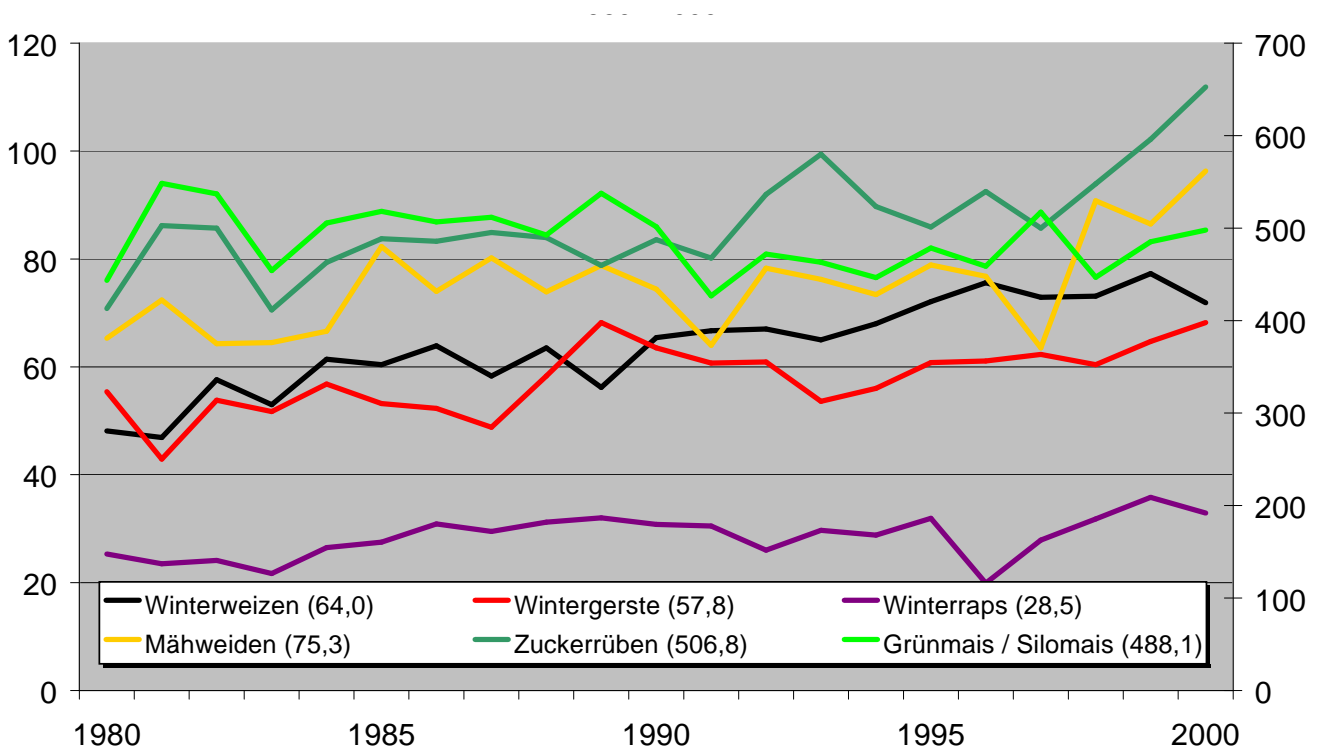
Abschließend kann festgestellt werden, dass die innerhalb der nächsten 50 Jahre zu erwartenden Ertragsänderungen von -40% bis +20% die Landwirtschaft vermutlich nicht vor unlösbare Probleme stellen, vorausgesetzt, dass die hier angenommenen sehr moderaten Klimaänderungen eintreten. Jedoch stellen die Auswirkungen des Klimawandels in jedem Fall neben den zu erwartenden sozioökonomischen Veränderungen durch EU-Erweiterung und veränderte nationale und europäische Agrarpolitik eine zusätzliche Belastung und Herausforderung an die Anpassungsfähigkeit der hessischen Landwirtschaft dar.

## 2. Einleitung

Es ist absehbar, dass der zu erwartende Klimawandel Auswirkungen auf viele gesellschaftliche und wirtschaftliche Bereiche haben wird. Die Landwirtschaft, als direkt vom Klima und Wetter abhängiger Sektor, ist in besonderer Weise betroffen, sowohl hinsichtlich ihrer Flächenausdehnung, als auch hinsichtlich des unter den gegebenen bzw. erwarteten Klimabedingungen erzielbaren Fruchtertrags. Klimawandel kann für die Landwirtschaft zusätzliche Chancen z.B. durch eine verlängerte Vegetationsperiode bedeuten, aber natürlich auch Risiken. Letztere liegen einerseits in der veränderten Häufigkeit und Stärke von Witterungsextremen, andererseits in langsameren Temperatur- und Niederschlagsveränderungen, auf welche Landwirte einfacher - weil längerfristig - mit Anpassungsmaßnahmen reagieren können.

Wie die Analysen der Klimadaten der letzten 100 Jahre zeigen (Schönwiese et al. 2005) sind klimatische Veränderungen für hessische Landwirte kein Novum. Vor allem die letzten Jahrzehnte waren durch eine Temperaturerhöhung von durchschnittlich 0,9°C und insgesamt eine Zunahme der Niederschläge gekennzeichnet, wobei allerdings die Sommer als ein für die Ertragsbildung wichtiger Teil der Wachstumsperiode eher trockener wurden.

**Abbildung 1: Landwirtschaftliche Erträge in Hessen 1980 – 2000** (Erträge in dt / ha; rechte y-Achse: Silomais und Zuckerrüben; Durchschnittserträge 1980 – 2000 in Klammern)



Die Frage wie sich die Klimaveränderungen der letzten Jahrzehnte auf die Erträge hessischer Feldfrüchte ausgewirkt haben, ist schwer zu beantworten, da Ertragsstatistiken auf Landkreis- oder Landesebene natürlich über eine ganze Reihe von Einflussfaktoren integrieren und Wettereinflüsse oder Klimatrends teilweise maskiert oder durch andere Einflüsse überprägt werden (siehe Abbildung 1: Landwirtschaftliche Erträge in Hessen 1980 – 2000). Für alle Feldfrüchte mit Ausnahme des Silomais sind über die letzten 20 Jahre die Erträge leicht angestiegen. Diese Tatsache lässt vermuten, dass die hessischen Landwirte im Durchschnitt die klimatischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte „verkräftet“ haben, da sie im Zusammenwirken mit geeigneten Bewirtschaftungsmaßnahmen (z.B. Pflanzzeitpunkt) und Sortenwahl ihre Erträge steigern konnten.

Die erfolgreiche Bewältigung von historischen Veränderungen bietet jedoch keine Gewähr, dass die hessische Landwirtschaft auch in Zukunft in der Lage sein wird, Klimawandelauswirkungen zu kompensieren oder sogar zu ihrem Vorteil zu nutzen. Deswegen soll im Rahmen dieser Studie die Frage beantwortet werden, ob und wenn ja welchen Einfluss zukünftige Klimaveränderungen auf die Erträge wichtiger hessischer Feldfrüchte haben könnten.

### 3. Material und Methoden

#### 3.1. Datengrundlagen

Die in dieser Studie verwendeten Eingangsdaten lagen in sehr unterschiedlichen Formaten und räumlichen Auflösungen vor. Die räumlich höchst aufgelösten Daten Landnutzung und Bodeninformation standen beispielsweise als Rasterdaten mit 1km Auflösung zur Verfügung, wohingegen Informationen über landwirtschaftliche Düngepraxis nur hessen- bzw. bundesweit verfügbar waren. Die höchste räumliche Differenzierung der für diese Studie wichtigsten Zielgröße „landwirtschaftlicher Ertrag“ war die Landkreisebene. Um die klimatischen Nord-Süd Unterschiede in Hessen zu berücksichtigen, wurde zusätzlich die räumliche Ebene von Agrarregionen zwischen der Landes- und der Landkreisebene analysiert. Somit wurden die Ergebnisse dieser Simulationsstudie in drei räumlichen Auflösungen analysiert und präsentiert:

- Hessenweit
- Für 3 Agrarregionen
- Für 26 hessische Landkreise

Die hessischen Landkreise und ihre Zuordnung zu den 3 Agrarregionen sind aus Abbildung 2 und Tabelle 1 ersichtlich.

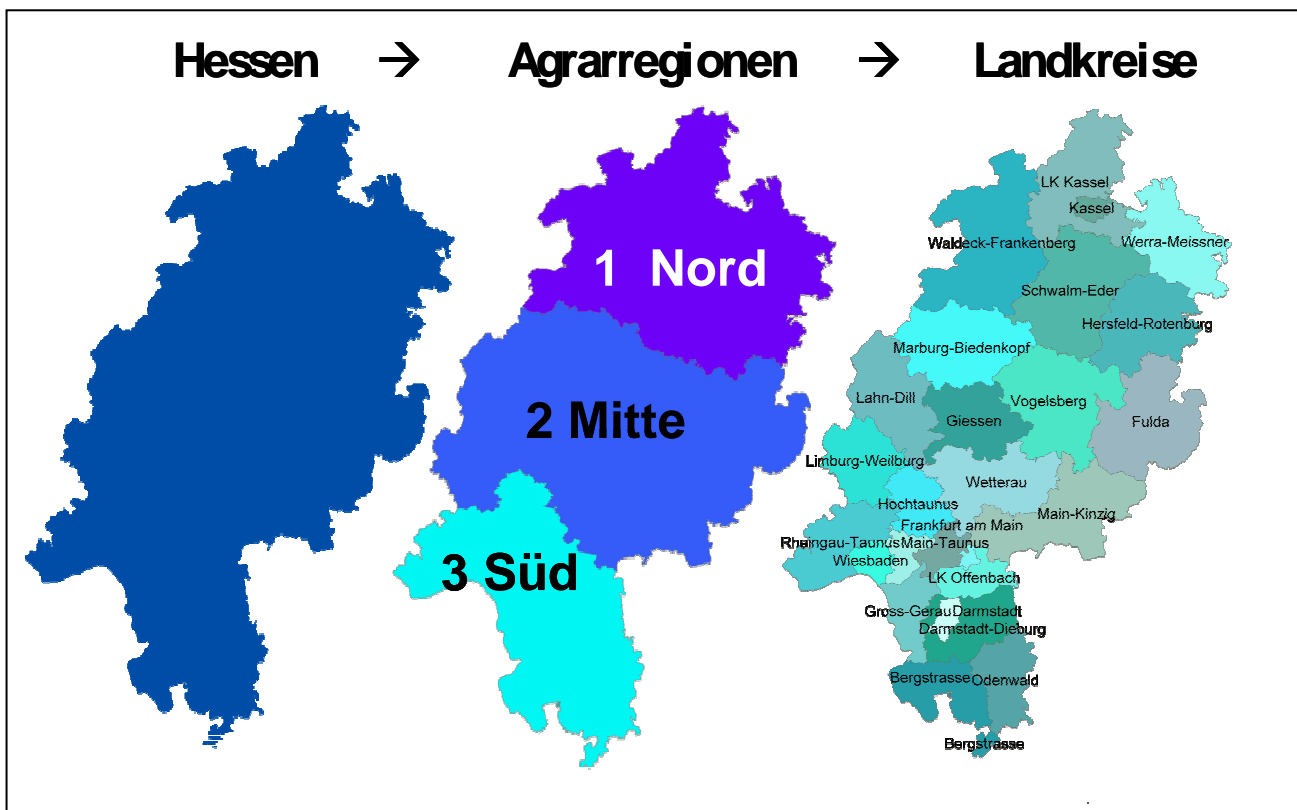


Abbildung 2: Räumliche Auflösung der Analysen und Ergebnispräsentation

<b>Landkreis Kennziffer</b>	<b>Landkreis</b>	<b>Ararregion</b>
411	Darmstadt	3
412	Frankfurt am Main	3
413	Offenbach am Main	3
414	Wiesbaden	3
431	Landkreis Bergstrasse	3
432	Landkreis Darmstadt-Dieburg	3
433	Landkreis Gross-Gerau	3
434	Hochtaunuskreis	3
435	Main-Kinzig-Kreis	2
436	Main-Taunus-Kreis	3
437	Odenwaldkreis	3
438	Landkreis Offenbach	3
439	Rheingau-Taunus-Kreis	3
440	Wetteraukreis	2
531	Landkreis Giessen	2
532	Lahn-Dill-Kreis	2
533	Landkreis Limburg-Weilburg	2
534	Landkreis Marburg-Biedenkopf	2
535	Vogelsbergkreis	2
611	Kassel	1
631	Landkreis Fulda	2
632	Landkreis Hersfeld-Rotenburg	1
633	Landkreis Kassel	1
634	Schwalm-Eder-Kreis	1
635	Landkreis Waldeck-Frankenberg	1
636	Werra-Meißener-Kreis	1

Die grau unterlegten Landkreise wurden zur Kalibration des Modells herangezogen

Nach der Analyse der räumlichen Verteilung der landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden aus den verfügbaren Klimastationen diejenigen ermittelt, die (i) in räumlicher Nähe, (ii) in möglichst derselben Höhenlage wie das Mittel der landwirtschaftlich genutzten Flächen liegen, jedoch maximal eine Station pro Landkreis (siehe Tabelle 2). Mit dieser Auswahl wurde erreicht, dass die für die Simulation des Pflanzenwachstums relevanten Parameter Temperatur und Niederschlag optimal repräsentiert sind.

<b>Stationsname</b> (nach DWD)	<b>Stationsnummer</b>	<b>X Koordinate</b>	<b>Y Koordinate</b>	<b>Agrarregion</b>
Hofgeismar- Beberbeck	1571	9.29	51.32	1
Witzenhausen	1574	9.51	51.21	1
Melsungen	1579	9.33	51.08	1
Geisenheim (AMBF)	2240	7.57	49.59	3
Gernsheim- Allmendfel	2504	8.32	49.46	3
Biedenkopf	2605	8.31	50.55	2
Giessen	2609	8.42	50.35	2
(Liebigsh.W)				
Gilserberg	2612	9.04	50.57	1
Fulda	2627	9.41	50.32	2
Schotten	2634	9.08	50.3	2
Frankfurt	2640	8.36	50.03	3
M.(Flugwe)				
Wiesbaden(Süd)	2653	8.16	50.04	3
Eschwege	3997	10.04	51.11	1

### 3.1.1. Landwirtschaftlich genutzte Flächen

Als Ausgangsjahr für die Simulationen wurde das Jahr 2000 gewählt. Die Landnutzungsverteilung 2000 basiert auf der digitalen Landbedeckungskarte CORINE Landcover CLC90 für das Jahr 1990 (Statistisches Bundesamt 1997), welche mit Hilfe des HILLS Modells für das Jahr 2000 geschätzt wurde (siehe Abbildung 3; nach Schaldach und Alcamo 2005). Auf dieser Grundlage konnte auch die Verteilung von Acker- und Grünlandflächen auf bestimmte Bodentypen ermittelt werden. Eine fruchtspezifische Verteilung wurde nicht vorgenommen.

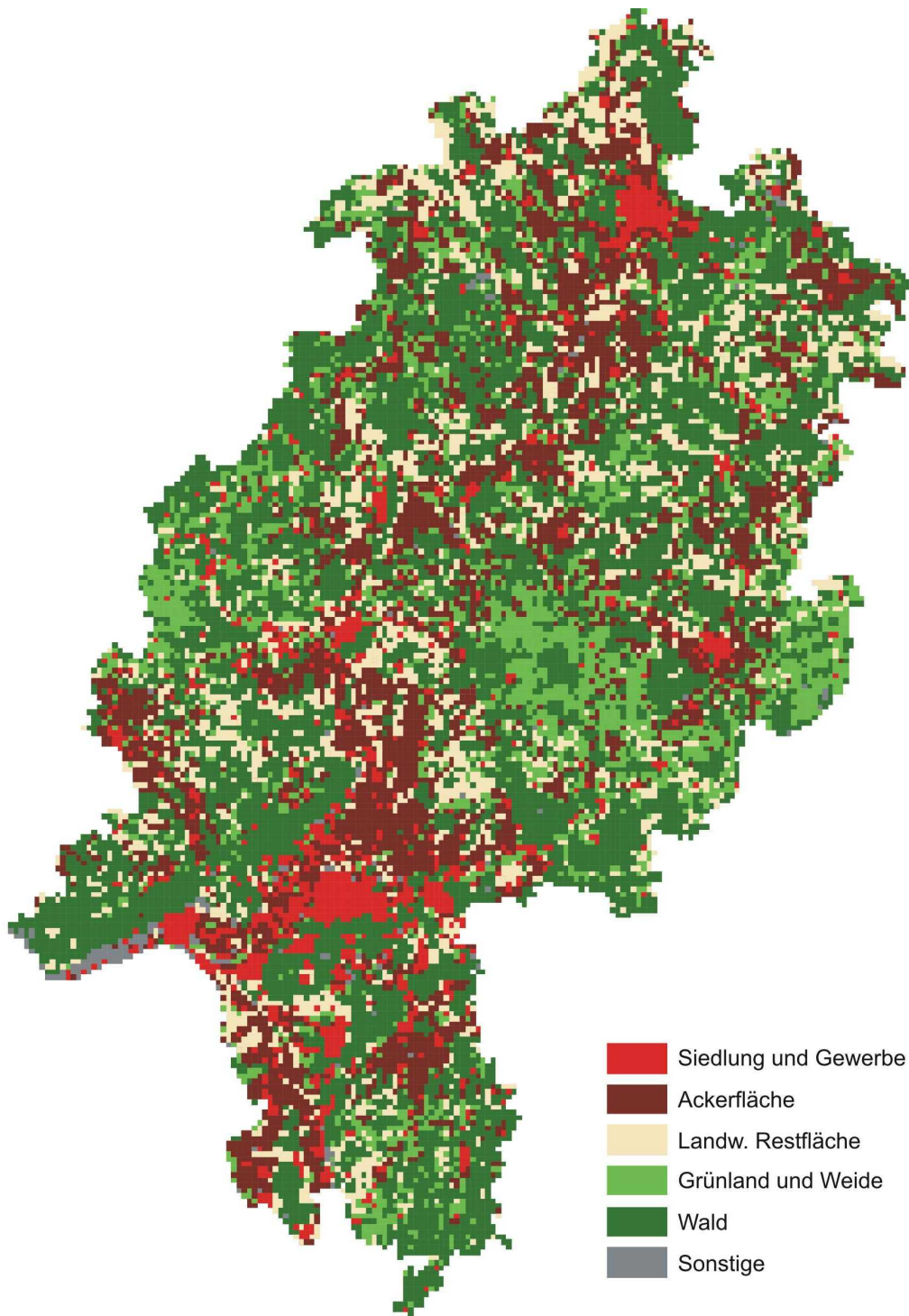


Abbildung 3: Simulierte Landnutzung in Hessen im Jahr 2000



### 3.1.2. Bodendaten

Datengrundlage ist die digitale Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1:1.000.000 (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2001), die für alle beschriebenen Leitbodentypen auch bodenchemische und bodenphysikalische Parameter bereitstellt, die für die Simulation des Pflanzenwachstums benötigt werden. Alle Bodenparameter wurden nach Umwandlung in die benötigten Einheiten direkt in das Ökosystemmodell DAYCENT übernommen, mit Ausnahme des pH-Wertes, von welchem angenommen wurde, dass alle Ackerflächen mindestens einen pH-Wert von 6 aufweisen (siehe Tabelle 4).

Die räumliche Analyse ergab, dass in Hessen die landwirtschaftliche Nutzung zum überwiegenden Teil (> 71%) auf sechs von 28 Leitbodentypen stattfindet, alle anderen weisen Flächenanteile von < 5% auf. Um die Simulationen auf relevante Bodeneinheiten zu begrenzen, wurden daraufhin die 22 Leitbodentypen mit Flächenanteilen < 5% in die dominierenden Bodentypen integriert. Nicht repräsentierte Bodentypen ≤ 5% wurden stets durch den flächenmäßig dominierenden ersetzt. Auf der Ebene der Landkreise wurde Acker- bzw. Grünlandnutzung auf den jeweils auftretenden 1 – 6 unterschiedlichen Leitbodentypen ermittelt und getrennt simuliert (siehe Tabelle 3).

**Tabelle 3: Leitbodentypen unter Acker- und Grünland in Hessen**

Leitbodentyp ID	Acker & Grünland (km <sup>2</sup> )	Acker & Grünland (%)	Acker & Grünland (% Summe)
42	1782	22%	23%
61	1269	16%	39%
8	799	10%	49%
40	607	7%	57%
53	596	7%	65%
60	492	6%	71%
51	400	5%	76%
47	389	5%	81%
49	253	3%	84%
59	197	3%	87%
16	180	2%	89%
55	145	2%	91%
48	129	2%	93%
15	108	1%	94%
35	90	1%	95%
11	71	1%	96%
65	71	1%	97%
52	68	1%	98%
6	50	1%	98%
63	41	1%	99%
10	39	1%	99%
67	15	0.2%	99.5%
62	12	0.2%	99.7%
70	8	0.1%	99.8%
7	6	0.1%	99.8%
9	5	0.1%	99.9%
54	4	0.1%	100.0%
66	3	0.0%	100.0%

Die grau unterlegten Bodentypen wurden beibehalten.

**Tabelle 4: Ausgewählte Merkmale der wichtigsten hessischen Ackerböden**

Leitboden typ ID	Leitbodentyp	HorBez	utief	schluff	sand	ct
8	Auenboden (Auengley-Vega) aus lehmig-tonigen Auensedimenten	aAh	15	75	10	3.1
40	Tschernosem-Parabraunerde aus Löss	Ap	30	75	10	0.9
42	Fahlerde aus Löss	Ap	25	75	10	1.5
53	Braunerde aus basischen und intermediären magmatischen Gesteinen	Ah	5	45	40	1.7
60	Podsol-Braunerde aus Verwitterungsmaterial von harten Ton- und Schluffschiefern	Aeh	10	20	74	4.6
61	Braunerde aus quarzitischen Sandsteinen und Konglomeraten	Ah	5	45	45	5.8

HorBez: Bezeichnung des Bodenhorizonts; utief: Untergrenze der Horizonts (cm); schluff: Schluffanteil (%); sand: Sandanteil (%); ct: Kohlenstoffgehalt des Bodens (Gewichts-%).

### 3.1.3. Ertragsdaten des HDLGN

Ertragsdaten wurden von Herrn Dr. Schaumberg vom HDLGN (jetzt Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen, LLH) digital zur Verfügung gestellt. Die Zielgröße „landwirtschaftlicher Ertrag“ lag für die zu bearbeitenden Feldfrüchte für alle hessischen Landkreise sowie für das Land Hessen insgesamt für den Zeitraum 1980 – 2000 vor, wobei einige Landkreise bis in die 1990er Datenlücken aufwiesen. Für die Kalibration der simulierten Ertragsniveaus wurde für jede Agrarregion ein vollständiger Datensatz 1980 – 2000 herangezogen.

Um zu ermitteln, ob eine Auswertung auf Landkreisebene einen zusätzlichen Erkenntnisgewinn bringen würde, wurden die vorliegenden Ertragsdaten einer statistischen Analyse unterzogen (SPSS V12.0: einfaktorielle ANOVA; post hoc Test nach Waller-Duncan). Die Analysen erbrachten, dass die historischen Ertragsniveaus in vielen hessischen Landkreisen signifikante Unterschiede aufweisen (in 26 Landkreisen bis zu 14 unterschiedliche Ertragsniveaus;  $p < 0,05$ ). Deswegen wurden zusätzliche Analysen der Simulationsergebnisse auf Landkreisebene durchgeführt.

### 3.1.4. Wetterdaten 1980 - 2000 und 2001 – 2050

In dieser Studie wurden für den Zeitraum 1980 – 2000 tägliche Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet, die für die hessischen Wetterstationen als Tagesdaten zur Verfügung standen und über das HLOG im Rahmen des INKLIM Projektes digital bereit gestellt wurden. Für den Zeitraum 2000 – 2050 wurden die auf Basis des IPCC Szenarios B2 von der Firma Meteo-Research mittels eines statistischen Downscaling-Verfahrens erzeugten Wetterdaten für die fünf Dekaden 2001 – 10, 2011 – 20, 2021 – 30, 2031 – 2040 und 2041 – 50 verwendet (Meteo-Research 2003/2004). Sowohl die Wetterdaten für den Zeitraum 1980 – 2000 als auch die regionalen Klimaszenarien für den Zeitraum 2001-2050 mussten für die Nutzung mit DAYCENT umformatiert und umstrukturiert werden. Für den Simulationszeitraum 2001-2050 wurden alle zur Verfügung stehenden Realisationen der die fünf kommenden Dekaden repräsentierenden Zeitscheiben berechnet und zur Auswertung auf Landes- und Agrarregion-Ebene herangezogen.

## 3.2. Das Simulationsmodell DAYCENT

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 USF betrieben,

weiter entwickelt und für unterschiedliche regionale und globale Studien genutzt (siehe Schaldach und Alcamo 2005; Stehfest et al. 2005). 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) Randbedingungen zu simulieren (Brown und Rosenberg 1997; Gerstengarbe et al. 2003; Stehfest et al. 2005).

In DAYCENT werden Bodenprozesse und das Pflanzenwachstum in Abhängigkeit von Temperatur sowie Wasser und Nährstoffverfügbarkeit berechnet (siehe Abbildung 4). Gängige Bewirtschaftungsmaßnahmen (Aussaat, Pflügen, Düngung) können explizit simuliert werden, nicht jedoch Schädlingsbefall bzw. Pestizideinsatz. Die genaue Funktionsweise ist ausführlich an verschiedenen Stellen dokumentiert (z.B. Kelly und Parton 2000; Handbuch auf der Daten-CD), weshalb an dieser Stelle nicht im Detail darauf eingegangen wird.

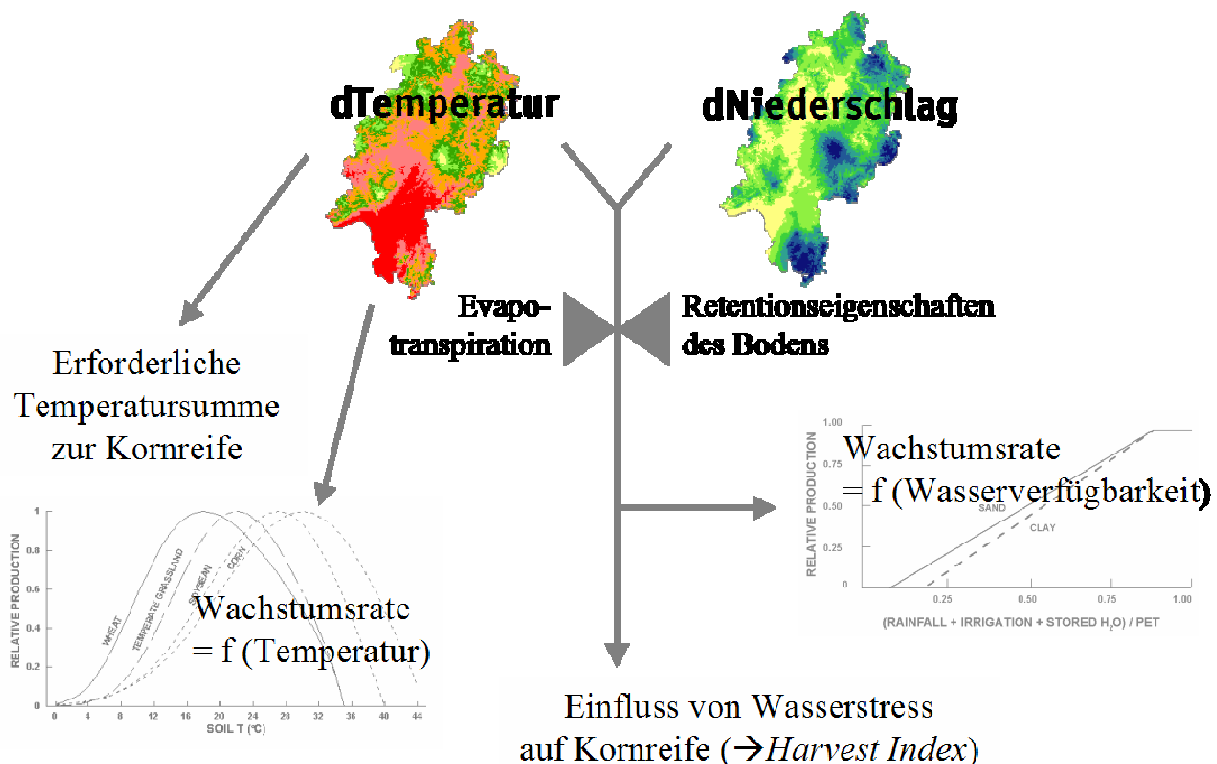


Abbildung 4: Schematisierte Funktionsweise des DAYCENT Modells

### 3.3. Parametrisierung der Feldfrüchte

Jede in DAYCENT simulierte Pflanze wird durch ihre spezifischen physiologischen Eigenschaften und Wuchsleistungen charakterisiert. Wichtige Kenngrößen sind in diesem 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. Die Parametrisierung der in dieser Studie simulierten Feldfrüchte und des Grünlandes 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. Zuckerrübe, Winterraps und Wintergerste wurden im Rahmen dieser Studie erstmalig mit DAYCENT simuliert, so dass für diese Feldfrüchte komplett neue Parametersätze erstellt werden mussten, wohingegen für Winterweizen, Futtermais und Grünland Parametersätze aus anderen Studien vorlagen.

Im zweiten Schritt erfolgte nach der Grundparametrisierung für jede Feldfrucht die in Abschnitt 3.4 beschriebene Kalibration der Parametersätze auf der Basis hessenspezifischer Ertrags- und Bewirtschaftungsdaten.

### **3.4. Kalibration der Feldfrüchte und des Grünlands**

Vor den Kalibrationen wurden jeweils Gleichgewichtsläufe von 200 Jahren durchgeführt, um die Bodenpools von Kohlenstoff und Stickstoff annähernd ins Gleichgewicht mit den Anfangsbedingungen 1980 – 2000 zu bringen. Die Details der zu Grunde liegenden Modellierungskonzepte finden sich im CENTURY Manual, welches auch für das hier verwendete zeitlich höher auflösende Modell DAYCENT gültig ist.

Sowohl die Erträge der fünf simulierten Feldfrüchte als auch jene der simulierten mehrschürigen Mähwiesen wurden jeweils an die Erträge der hessischen Agrarregionen Nord, Mitte und Süd angepasst. Dafür wurden Wetterdaten einer Klimastation und die Ertragsdaten aus dem jeweiligen Landkreis herangezogen. Die Kalibrationen erfolgten auf dem jeweils wichtigsten Bodentyp des Landkreises.

#### **3.4.1. Feldfrüchte**

##### **Vorgehensweise Kalibrierung:**

Die Kalibrierung erfolgt anhand von Ertragsdaten (1980-2000) von drei Kreisen (3 Klimastationen) aus den drei Anbauregionen:

Anbauregion 1 Nord:	Kreis Kassel
Anbauregion 2 Mitte:	Lahn-Dill-Kreis
Anbauregion 3 Süd:	Kreis Groß-Gerau

Da sich eine jährliche Reproduzierung der statistischen Ertragsdaten durch das Modell wegen der vielen (nicht dokumentierten) Einflussfaktoren zum Teil als undurchführbar erwiesen hatte, wurde das dreijährige Fließmittel der Ertragsverläufe nachgebildet. Darüber hinaus weisen die statistischen Ertragsdaten teils deutliche Trends auf (meist zunehmend), die vermutlich durch fortschreitende Verbesserung der angebauten Sorten sowie Veränderungen in der Bewirtschaftung zustande kommen (z.B. Pflanzenschutz, Düngung etc.). Die neben dem jeweiligen Klima oben genannten vermuteten Einflussfaktoren sind in der Agrarstatistik (oder anderen Quellen) nicht dokumentiert. Die generelle Problematik multipler Einflussfaktoren ist aus der Literatur bekannt, auf Grund der Datenlage konnten jedoch keine weitergehenden statistischen Verfahren zur Quantifikation nichtklimatischer Einflüsse auf die Erträge eingesetzt werden. Es war daher nur teilweise möglich, die angestrebte Anpassung an die statistischen Ertragsdaten für den Gesamtzeitraum von 1980 bis 2000 zu erzielen. Beim Vorliegen starker Trends wurde daher die Kalibration auf eine Zeitperiode von 10 Jahren (bevorzugt 1990 bis 2000) beschränkt.

##### **Parametrisierung der Bodeneigenschaften für die Kalibrierung:**

Die Kalibrierung der Erträge der jeweiligen Feldfrüchte erfolgte anhand des dominanten landwirtschaftlich genutzten Bodens im jeweiligen Kreis.

##### **1. Kalibrations-Schritt: Anpassung der Wachstumsdauer**

Die Wachstumsdauer einer Feldfrucht (sowohl in der Realität wie auch im Modell) ist abhängig von der bis zur Reife benötigten Temperatursumme. Auf Basis von Daten zu Aussaat- und Erntezeitpunkten in Nord-, Mittel- und Südhessen (Quelle: Agrarstatistiken des HDLGN) wurden

Temperatursummen und Basistemperaturen der zu simulierenden Feldfrüchte an hessische Verhältnisse angepasst (siehe Tabelle 5).

<b>Tabelle 5 : Regional- und fruchtspezifische Anpassung der Temperaturverhältnisse</b>				
<b>Agrarregion</b>	<b>Feldfrucht</b>	<b>Basis Temp.</b>	<b>TempSumme</b>	<b>Aussaat</b>
Nord	Gerste	2	1750	280
	Mais	5	1400	111
	Raps	4	1600	233
	Weizen	3.5	1600	282
	Zuckerrübe	3	1750	91
Mitte	Gerste	2	1650	263
	Mais	5	1420	111
	Raps	4	1635	233
	Weizen	3	1600	282
	Zuckerrübe	3	1790	91
Süd	Gerste	3	1800	263
	Mais	5	1900	111
	Raps	5	1900	233
	Weizen	3	1700	282
	Zuckerrübe	4	2050	91

Einheiten: Basis Temp. (°C), TempSumme (°C\*d), Aussaat (Tag des Jahres)

### 2. Kalibrations-Schritt: Anpassung des allgemeinen Ertragsniveaus

Auf Basis der Informationen über empfohlene Stickstoff-Düngemengen (Quelle: KTBL, 2004; uismedia, 1999) und der in Hessen erzielten Erträge zwischen 1980 und 2000 (Quelle: HDLGN) wurde die Modellparametrisierung zunächst an das „allgemeine Ertragsniveau“ angepasst. Dazu wurde in diesem Schritt das vollständige Fehlen von Wasserstress angenommen und der sog. „Production-Index“ (PRDX) und der maximale Harvest-Index (HIMAX) angepasst sowie Parameter, welche die Form der sog. „Temperatur-Effekt“-Kurve beschreiben (Daycent-Parameter: PPDF(1) - PPDF(4)). Darüber hinaus wurden in diesem Schritt Anpassungen an die Terminierung von Düngegaben vorgenommen, um zu vermeiden, dass die Terminierung von Düngegaben im Modell zu einer Beschränkung der Pflanzenproduktivität führt (Indikator: Absinken des mineralischen N-Gehalts im Boden unter einen Schwellenwert).

### 3. Kalibrations-Schritt: Anpassung der Sensitivität der Feldfrüchte gegenüber Wasserstress

Nach Anpassung der temperaturbezogenen Parameter wurden anschließend weitere Ertragsschwankungen durch Anpassung der Sensitivität der Biomasse-Produktion ggb. Wasserstress nachgebildet. Diese Sensitivität wird durch die Modell-Parameter PPRPTS(1) und PPRPTS(3) quantifiziert. Darüber hinaus kann sich Wasserstress im letzten simulierten Wachstumsmonat auf den Harvest-Index auswirken (Parameter HIWSF). In den Fällen, in welchen über die Anpassung von PPRPTS(1) und PPRPTS(3) kein hinreichend spezifisches Ertragssignal erzielt werden konnte, wurde zusätzlich der Parameter HIWSF angepasst.

Die Ergebnisse der Kalibrationsschritte 1 – 3 sind beispielhaft anhand der Parametrisierung der Feldfrüchte für den Landkreis Kassel in Tabelle 6 dargestellt.

**Tabelle 6: Parametrisierung der Feldfrüchte und des Grünlands für den Kreis Kassel**

	Winterweizen	Wintergerste	Futtermais	Winterraps	Zuckerrübe	Grünland
PRDX	0.7	0.9	0.75	0.45	0.7	0.5
HIMAX	0.45	0.45	0.99	0.3	0.98	n.r.
T_opt	15	17	21	18.5	22	15
T_max	35	35	40	39	35	32
ETS_harv	1600	1750	1400	1600	1750	n.r.
Base_Temp	3.5	2	5	4	3	0.25
HIWSF	0.45	0	0.05	0	0	n.r.
PPRPTS(1)	0	0.01	0	0.1	0	0
PPRPTS(3)	0.2	0.05	0.01	0.19	0.1	0.2

PRDX:	Energie-Biomasse Konversionsfaktor (siehe production-index)
HIMAX:	maximaler harvest index
T_opt:	Optimum-Temperatur
T_max:	Temperatur, oberhalb welcher die Biomasse-Produktion Null wird
ETS_harv:	zur Reife benötigte Temperatursumme
Base_Temp:	Basistemperatur ab der die Pflanze zu wachsen beginnt
HIWSF:	Einfluss von Wasserstress auf Harvest-Index
PPRPTS(1):	avail_water/PET-ratio, ab welchem Biomasse-Produktion Null wird
PPRPTS(3):	avail_water/PET-ratio, ab welchem Wasserstress die Biomasse-Produktion reduziert

### 3.4.2. Grünland

Simuliert wird bei Grünland die oberirdische Nettoprimärproduktion (NPP; im DayCent Modell der Parameter „agcacc“). Die simulierte Bewirtschaftungsform sind mehrschürige Mähwiesen. Eine Beweidung wurde auf Grund der sehr unterschiedlichen Angaben über Viehbesatzdichten nicht simuliert.

Es wurde angenommen, dass die geerntete Menge  $0.8 \cdot NPP$  entspricht und der Kohlenstoffgehalt der Biomasse 45% beträgt. Die Ernteerträge der Mahden wurden für jeweils ein Jahr aufsummiert.

#### Management

Die Mahden erfolgen in allen Jahren jeweils zu denselben Terminen:

- Mahd 1: 30. Mai
- Mahd 2: 29. Juni
- Mahd 3: 29. Juli

Ebenso wurden die Stickstoffdüngegaben (Gesamt N-Menge: 129,6 kg N/ha) jeweils an festgelegten Terminen simuliert.

- Düngung 1: 30. April (54 kg N/ha)
- Düngung 2: 30. Mai (54 kg N/ha)
- Düngung 3: 29. Juni (21.6 kg N/ha)

Analog der Vorgehensweise bei den simulierten Feldfrüchten wurden bei Grünland ebenfalls 200-jährige sogenannte Gleichgewichtsläufe durchgeführt, um die im Modell simulierten Boden-Pools hinsichtlich Größe, sowie Kohlenstoff- und Stickstoffverhältnisse mit den für Hessen typischen Düngemengen ins Gleichgewicht zu bringen. Die Kalibrierung des Modells erfolgte anschließend an die Gleichgewichtsläufe für den Zeitraum 1980 – 2000, für den - wie auch während der gesamten Simulationen der Klimaszenarien - die Art der Bewirtschaftung konstant gehalten wurde.

Wir möchten an dieser Stelle darauf hinweisen, dass uns für diese Studie viele Informationen nur in sehr allgemeiner Form vorlagen (z.B. keine regionalspezifischen Informationen über die Zusammensetzung des Grünlands). Aus diesem Grund konnten beispielsweise verwendete Düngemengen, Mahd-Termine oder die Empfindlichkeit gegenüber Wasserstress nur grob eingestellt werden. Die simulierten Änderungen der Produktivität von Grünland sollten deshalb als vorläufige Schätzungen betrachtet werden, die sich in Folgestudien mit zusätzlichen Eingangsdaten weiter präzisieren lassen.

## **4. Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft**

Die für die Pflanzenproduktion wichtigsten Klimaveränderungen sind wie in den vergangenen Jahrzehnten eine zunehmende Durchschnittstemperatur sowie im Winter und Frühjahr zunehmende, aber im Sommer eher abnehmende Niederschläge. Weiterhin ist zu erwarten, dass die Dauer der Vegetationsperiode weiter zunimmt, ebenso wie die Häufigkeit der trockenen und warmen Jahre (Meteo Research, 2003/2004; Grünhage et al., 2005). Die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration sowie andere Klimaveränderungen wie die Veränderung der Niederschlagsintensität, Häufigkeit von Hagelereignissen oder Sturm werden in dieser Studie nicht berücksichtigt.

Im Folgenden werden die Auswirkungen der auf Basis des B2 Szenarios berechneten Klimaveränderungen in Hessen zuerst landesweit und anschließend für die drei Agrarregionen und die Landkreise vorgestellt und diskutiert.

### **4.1 Zukünftige landwirtschaftliche Erträge in Hessen**

Hessenweit zeigen die Erträge von Gerste, Raps und Weizen über die nächsten fünf Dekaden eine ungleichförmige, aber leicht abnehmende Tendenz. Dagegen nehmen die Erträge von Mais und Zuckerrübe bereits in der aktuellen Dekade leicht ab und stabilisieren sich auf diesem Niveau. Im hessenweiten Durchschnitt ist die stärkste Abnahme mit bis zu -14% bei Raps zu erwarten, gefolgt von Weizen mit bis zu -10%, während Gerstenerträge nach anfänglichen leichten Ertragsteigerungen in den Folgedekaden weitgehend das Niveau des Referenzzeitraums halten. Im hessischen Durchschnitt fallen somit die zu erwartenden Ertragsänderungen von +4% bis -14% eher moderat aus (Abbildung 5). Einen wesentlichen Beitrag zu den leicht abnehmenden Erträgen liefert (i) die Temperaturerhöhung, vor allem in Form der zunehmenden Häufigkeit von warmen und heißen Sommern, was bei den meisten Feldfrüchten durch frühzeitiges Erreichen der benötigten Temperatursummen zu einer vorzeitigen Abreife führt und somit die Verlängerung der Vegetationsperiode mit den an heutige Verhältnisse angepassten Sorten nicht genutzt werden kann. Gleichzeitig mit höheren Temperaturen und damit auch erhöhter Evapotranspiration sind (ii) ebenfalls im Sommer reduzierte Niederschläge und somit reduziertes Pflanzenwachstum zu erwarten, die nur teilweise z.B. auf schwereren Böden mit höherer Speicherkapazität durch die höheren Frühjahrsniederschläge kompensiert werden können.

Im Gegensatz zu den meisten Feldfrüchterträgen steigt die Biomasseproduktion von Grünland in den kommenden Dekaden durchschnittlich um etwa 10% an. Dies ist im Wesentlichen darauf zurückzuführen, dass Grünland als einzige simulierte Dauerkultur von den verlängerten Vegetationsperioden profitiert.

Neben dem Einfluss auf das durchschnittliche Ertragsniveau ist vor allem der Einfluss der Variabilität des zu erwartenden Klimas auf die Ertragssicherheit von entscheidender Bedeutung für die Landwirtschaft. Einen Anhaltspunkt dafür bieten die hier betrachteten Häufigkeitsverteilungen der in den kommenden Dekaden zu erwartenden Erträge (Tabelle 7 und Anhang 7.4) und die berechneten Spannweiten der 25-75% Perzentile, welche die mittleren 50% der Stichproben umfassen, sowie die Spannweiten der 5-95% Perzentile, die 90% der Erträge repräsentieren. Die relative Veränderung der Spannweiten (Tabelle 7) wurde berechnet aus den mittleren Spannweiten der fünf Dekaden 2001 – 2050 im Verhältnis zu den Spannweiten der Referenzperiode. Der

Einfluss des Klimawandels auf die Variabilität der Erträge ist für die simulierten Feldfrüchte sehr unterschiedlich. Während für Mais und Weizen erträge die zu erwartenden Ertragsschwankungen mit denen der Referenzperiode vergleichbar sind, vergrößern sich die Spannweiten für die restlichen Feldfrüchte und für Grünland. Die stärksten Einflüsse sind bei den mittleren 50% der Erträge zu erwarten (5% - 58%), von denen insbesondere Grünland und Zuckerrüben betroffen sind. Die Spannweiten der extrem hohen bzw. niedrigen Erträge erhöhen sich zwar ebenfalls, aber nicht im selben Umfang (6% - 37%). Insgesamt steigt für die meisten Feldfrüchte die klimabedingte Ertragsvariabilität und somit sinkt die Ertragsicherheit für die Landwirte.

**Tabelle 7: Einfluss des Klimawandels auf die Variabilität der Erträge (Erträge in dt / ha)**

Feldfrucht	Statistische Größe	Ertrag 01-10	Ertrag 11-20	Ertrag 21-30	Ertrag 31-40	Ertrag 41-50	Ertrag 1980-00	Relative Veränderung der Spannweiten
Grünland	Median	78	75	78	78	79	69	
	Quartil 25%	66	63	67	67	67	62	
	Quartil 75%	90	88	90	90	90	77	
	Quantil 5%	56	8	56	56	55	50	
	Quantil 95%	106	106	105	107	108	94.05	
	Diff 75%-25%	24.0	25.0	23.0	23.0	23.0	15.0	<b>1.57</b>
	Diff 95%-5%	50.0	98.0	49.0	51.0	53.0	44.1	<b>1.37</b>
Zuckerrübe	Median	451.2	456.8	447.7	461.9	454.1	495.6	
	Quartil 25%	414.7	415.0	407.4	421.4	411.1	459.9	
	Quartil 75%	504.1	516.0	507.7	522.5	515.3	522.8	
	Quantil 5%	363.7	356.2	355.5	369.6	358.8	387.0	
	Quantil 95%	598.7	605.0	588.4	603.9	599.2	616.4	
	Diff 75%-25%	89.4	101.0	100.2	101.0	104.3	62.9	<b>1.58</b>
	Diff 95%-5%	235.0	248.7	232.9	234.4	240.5	229.4	<b>1.04</b>
Gerste	Median	64.0	61.4	58.3	60.5	58.3	59.6	
	Quartil 25%	51.2	48.7	45.0	47.5	44.8	49.8	
	Quartil 75%	70.1	69.9	67.9	69.6	68.5	67.2	
	Quantil 5%	33.1	32.0	29.1	31.6	29.0	33.0	
	Quantil 95%	76.2	75.6	74.5	75.6	75.0	75.0	
	Diff 75%-25%	18.9	21.2	23.0	22.1	23.7	17.4	<b>1.25</b>
	Diff 95%-5%	43.1	43.6	45.4	44.0	46.0	42.0	<b>1.06</b>
Mais	Median	403.8	394.2	384.8	398.4	392.4	415.2	
	Quartil 25%	350.4	340.5	328.4	345.8	330.3	355.7	
	Quartil 75%	465.5	456.4	450.0	459.7	459.7	476.9	
	Quantil 5%	284.6	264.0	256.1	277.3	259.6	269.4	
	Quantil 95%	546.3	537.6	532.4	542.7	536.5	558.6	
	Diff 75%-25%	115.1	115.9	121.5	114.0	129.4	121.3	<b>0.98</b>
	Diff 95%-5%	261.6	273.6	276.3	265.4	276.9	289.2	<b>0.94</b>
Weizen	Median	61.5	59.4	55.9	59.0	55.6	60.5	
	Quartil 25%	49.1	47.2	43.2	47.4	44.0	49.8	
	Quartil 75%	72.8	70.8	67.1	70.7	67.4	72.2	
	Quantil 5%	30.8	30.1	26.5	29.7	26.8	30.9	
	Quantil 95%	85.4	83.0	79.3	83.5	79.9	86.0	
	Diff 75%-25%	23.7	23.6	23.9	23.3	23.4	22.4	<b>1.05</b>
	Diff 95%-5%	54.6	52.9	52.8	53.8	53.1	55.1	<b>0.97</b>
Raps	Median	28.0	26.9	24.5	26.0	24.7	28.7	
	Quartil 25%	24.8	23.6	21.5	22.8	21.6	26.0	
	Quartil 75%	30.9	30.0	27.5	29.1	27.5	31.5	
	Quantil 5%	19.5	18.7	16.8	18.1	16.9	19.7	
	Quantil 95%	36.3	35.2	32.2	34.4	32.4	35.9	
	Diff 75%-25%	6.1	6.4	6.1	6.3	5.9	5.5	<b>1.12</b>
	Diff 95%-5%	16.8	16.5	15.4	16.3	15.5	16.2	<b>0.99</b>



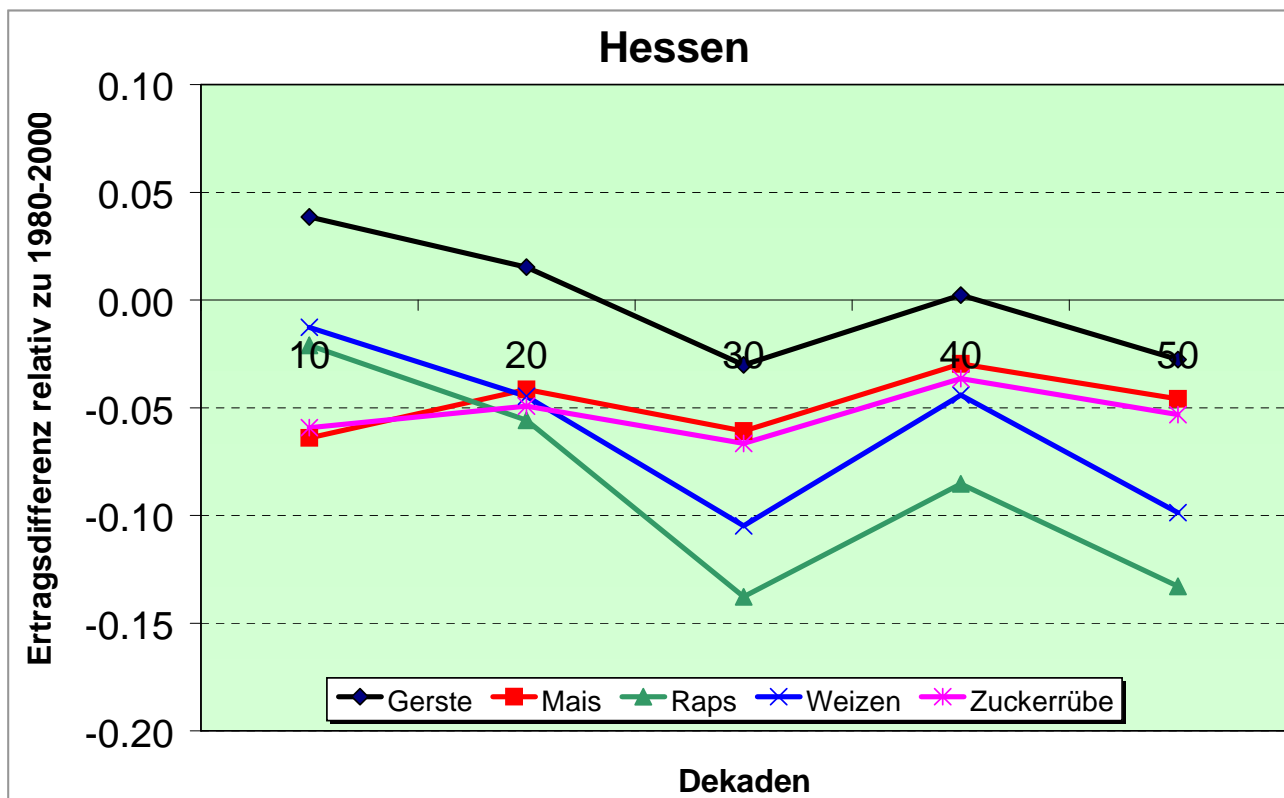


Abbildung 5: Veränderung landwirtschaftlicher Erträge in Hessen relativ zu 1980 – 2000; abgebildet sind Dekaden-Mittelwerte

Der Einfluss des Klimawandels auf die hessische Landwirtschaft führt im landesweiten Durchschnitt somit zu leicht abnehmenden Erträgen. Die ca. 10% simulierte Ertragssteigerung bei Grünland könnte sich auf Grund einer eventuell nur teilweise erfassten Sensitivität gegenüber Trockenstress reduzieren. Zusätzliche Untersuchungen mit genaueren standortspezifischen Eingangsdaten könnten hierüber Aufschluss bringen.

Die Simulationsergebnisse stehen in Übereinstimmung mit Felduntersuchungen und anderen Simulationsstudien, die ebenfalls bei Temperaturerhöhung von Ertragsreduktion bei Getreide und anderen Feldfrüchten berichten (Brown und Rosenberg 1997; Chen et al. 2004; Weigel 2005). Die Ertragsreduktion beruht einerseits auf dem verfrühten Abreifen von Getreide, andererseits auf dem negativen Temperatureinfluss auf Blütenbildung und Fruchtausatz (Ferris et al. 1998). Der konkrete Einfluss der CO<sub>2</sub>-Konzentration bleibt trotz umfangreicher Studien (z.B. Übersicht von Fangmeier und Jäger 2001) diffus, vor allem da Gegenspieler wie bodennahes Ozon (Hertstein et al. 1995) oder zunehmende Temperaturen (Weigel 2005) meist nicht gleichzeitig untersucht werden.

Die durchschnittlichen Klimaauswirkungen in Hessen sind in der Größenordnung durchaus vergleichbar mit den Auswirkungen, die für andere Bundesländer erwartet werden. So werden von Gerstengarbe et al. (2003) für die Erträge der kommenden Dekaden in Brandenburg sowohl leichte Steigerungen (+2% Mais) als auch Verluste (-17% bei Winterweizen) erwartet, gleichfalls ohne Berücksichtigung eines CO<sub>2</sub>-Effekts. In Sachsen werden vor allem auf sandigen Böden bei zunehmender Sommertrockenheit und gleichzeitig gestiegener Evapotranspiration Mindererträge erwartet, die auf Böden mit größerer Wasserspeicherkapazität geringer ausfallen sollen (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2005).

#### 4.2 Zukünftige landwirtschaftliche Erträge in den Teilregionen

Die aggregierte Betrachtung auf Landesebene verdeckt die erheblichen, regional unterschiedlichen Klima- und Wetterveränderungen und deren Auswirkungen auf landwirtschaftliche Erträge, die im Folgenden für die drei Agrarregionen Hessens diskutiert werden.

Wie in der Vergangenheit wird das simulierte zukünftige Klima ebenfalls in erheblichem Maß kleinräumig variieren. Diese regionalen Klimaunterschiede wirken einerseits auf das durchschnittliche Ertragsniveau einer Feldfrucht, zum anderen aber auch auf die Streubreite der Erträge und somit auf die Ertragssicherheit. Auf Grund der unterschiedlichen Entwicklungsdauer sowie Feuchte- und Temperaturansprüchen sind die in der hessischen Landwirtschaft dominierenden Feldfrüchte nicht gleichförmig vom Klimawandel betroffen.

#### Agrarregionen:

Während sich in Nord- und Südhessen mit Ausnahme von Raps (abnehmend) keine zeitlichen Trends abzeichnen, nehmen in Mittelhessen die Erträge von Dekade 2001-10 bis zur Dekade 2041-50 um 10 bis 13% ab bezogen auf den Zeitraum 1980-2000. Deutliche Unterschiede finden sich auch in der Variabilität, die in Anbauregion 2 - Mittelhessen am stärksten ausgeprägt ist. Dies führt zwar einerseits dazu, dass Ertragsgewinne von 20% erreicht werden können, jedoch vor allem bei Raps und Weizen häufiger mit Mindererträgen von 30 – 40% gerechnet werden muss. Diese hohen Mindererträge zeichnen sich in Nord- und Südhessen nicht im selben Umfang ab (Abbildung 6).

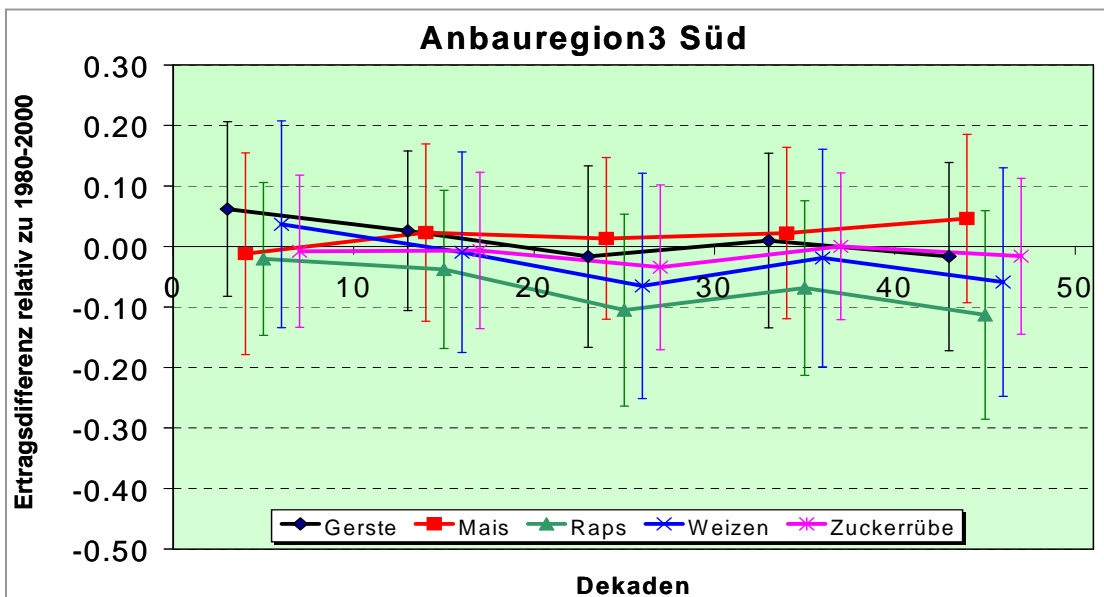
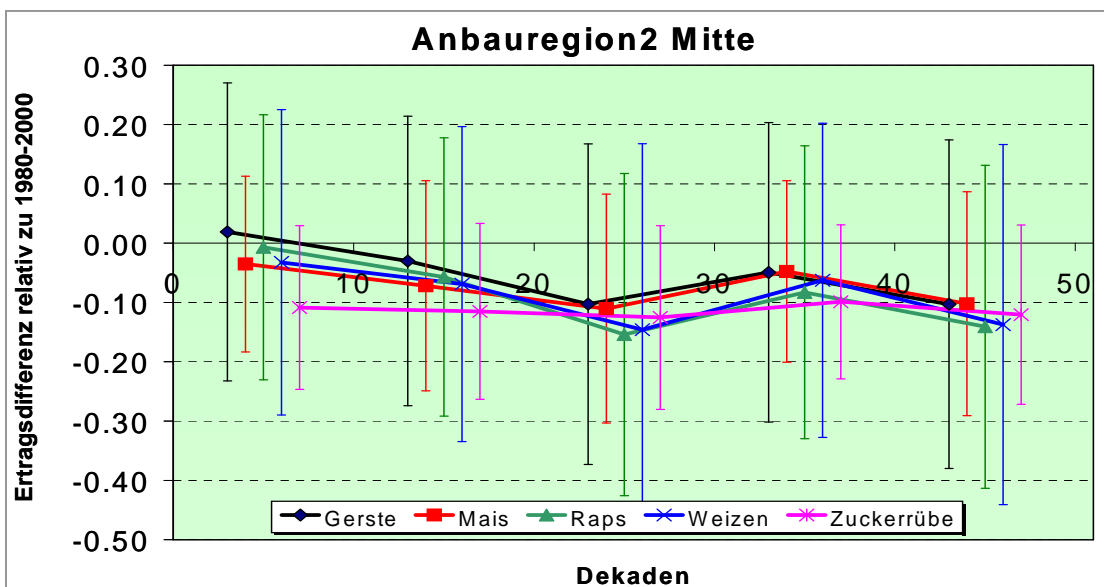
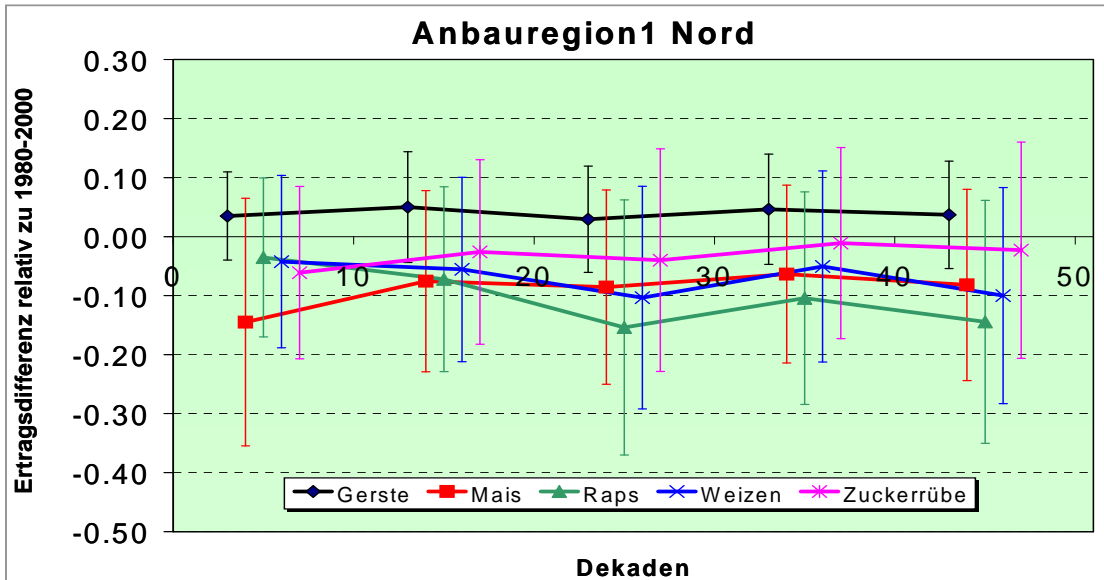
#### Feldfrüchte:

Während die dominierende Folge des Klimawandels in Hessen eine moderate Ertragsabnahme ist, sind doch bei einzelnen Feldfrüchten auch positive Effekte zu verzeichnen. In Nordhessen liegen die Gerstenerträge aller simulierten Dekaden 4 – 6% über den heutigen Erträgen, während in Südhessen die Erträge weitgehend konstant bleiben und nur in Mittelhessen leichte Verluste auftreten. In Südhessen profitieren die Maiserträge zwar in geringem, aber zunehmendem Umfang vom Klimawandel und legen gegenüber dem Vergleichszeitraum um bis zu 5% zu. In der Mitte und im Norden gehört Mais nicht zu den Gewinnern, sondern liegt mit leichten Verlusten im Mittelfeld. Im Gegensatz zu Mais vermindern sich Rapsenerträge deutlich um 4 – 15% in allen Teilregionen zunehmend, bei gleichzeitig hoher Variabilität. Die Erträge von Zuckerrüben zeigen sich in Nord- und Südhessen relativ indifferent, weisen aber in Mittelhessen durchgehend 10% Verlust auf, bei in allen Teilregionen relativ geringer Variabilität (Abbildung 6).

#### Landkreise und Leitbodentypen:

Aus Abbildung 7 wird deutlich, dass die sowohl von Schönwiese et al. (2005) als auch von MeteorResearch (2003/2004) beschriebene kleinräumige Klimavariabilität deutlichen Niederschlag in den Ertragsniveaus der simulierten Feldfrüchte findet. Nur Grünland- und Rapsenerträge zeigen in der Dekade 2041 – 2050 eine weitgehend einheitliche, wenn auch gegenläufige Reaktion, während alle anderen Feldfrüchte deutlich stärker von den kleinräumigen Klimaunterschieden betroffen sind. Die anfangs erwarteten deutlichen Nord-Süd-Unterschiede wurden nach Auswertung der Simulationen nur zum Teil bestätigt.

Gerade diese für viele Feldfrüchte so entscheidende kleinräumige Variabilität ist aber in der Klimamodellierung mit großen Unsicherheiten behaftet und limitiert damit die Möglichkeit, Klimafolgen für die Landwirtschaft präzise abzuschätzen (z.B. Jones et al. 2003; The Royal Society 2005). Im Anhang Abschnitt 7.3 (Seite 3 – 8) sind zusätzlich für die Dekade 2041 – 2050 die Erträge aller Feldfrüchte sowie die Biomasseproduktion des Grünlands für alle Landkreise und für alle vorkommenden Leitbodentypen abgebildet. Im Allgemeinen überwiegen die Einflüsse der Klimavariabilität (Unterschiede zwischen den Landkreisen) deutlich gegenüber den Bodeneinflüssen (Streuung innerhalb der Landkreise). Der Einfluss der Leitbodentypen auf die Erträge der simulierten Feldfrüchte ist vielfach signifikant, aber wie erwartet uneinheitlich, da für verschiedene Feldfrüchte, Standorte und Wetterbedingungen jeweils andere Bodeneigenschaften limitierend bzw. fördernd auf das Pflanzenwachstum wirken können. Die in anderen Studien geäußerten Vermutungen über die Wirkung bestimmter Bodentypen auf das Ertragsniveau (Klimawandel in Sachsen; 2005) trifft bei der hohen räumlichen Auflösung dieser Studie nicht generell zu, sondern erfordert eine differenzierte Betrachtung der Standortbedingungen und der kleinräumigen Klimaveränderungen und ihrer Auswirkungen.



**Abbildung 6: Veränderung landwirtschaftlicher Erträge in den Agrarregionen relativ zu 1980 – 2000; abgebildet sind Dekaden-Mittelwerte + 1 Standardabweichung**  
 (Verschiebung auf der Zeitachse nur zur besseren Darstellung der Standardabweichungen)

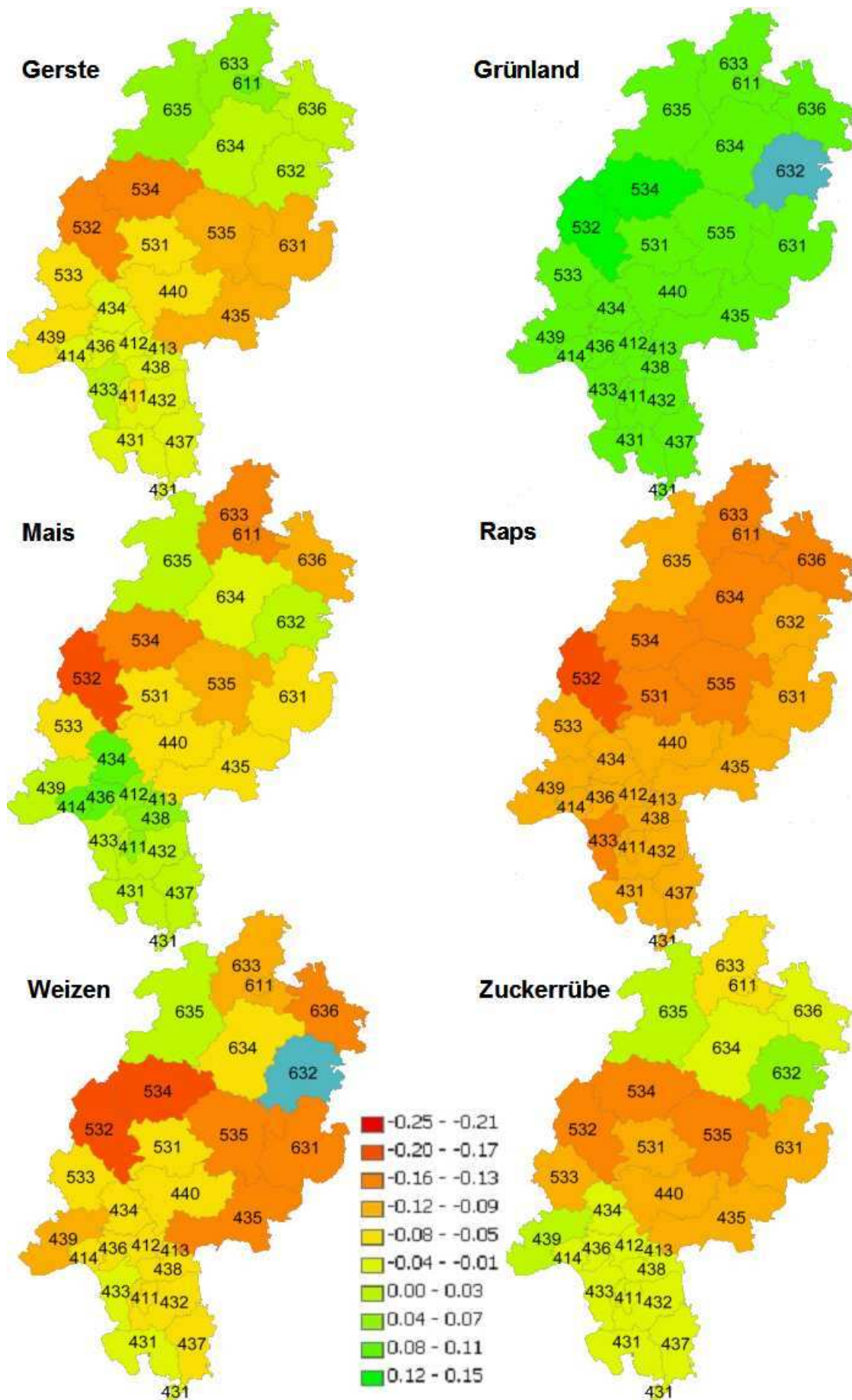


Abbildung 7: Ertragsänderungen in hessischen Landkreisen 2041 – 50, relativ zur Referenzperiode 1980 – 2000 (blaue LKs: kein Anbau 1980-2000 oder 2041-50)

## 5. Bewertung und mögliche Anpassungsmaßnahmen

Die negativen Klimawirkungen auf die Erträge in Hessen angebaute Feldfrüchte können durch den Anbau geeigneter Sorten, welche an die höheren Temperaturen und trockeneren Sommer angepasst sind, kompensiert oder sogar für Mehrerträge genutzt werden. Sowohl Neuzüchtungen als auch die Verwendung von Sorten aus wärmeren Klimazonen sind in diesem Kontext denkbar. Ob der Einsatz von Bewässerungsmaßnahmen zur Kompensation von Ertragsverlusten ökonomisch (und ökologisch) sinnvoll ist, kann nur standortspezifisch beurteilt werden. Weitere Anpassungsstrategien sollten darauf zielen, die durch die Zunahme der Klimavariabilität verursachten Risiken zu minimieren. Da - wie in dieser Studie gezeigt - die Klimawirkungen auf die hessischen Feldfrüchte unterschiedlich ausfällt, könnte Diversifizierung im Anbau eine geeignete Maßnahme zur Kompensation eventueller Mindererträge sein.

Anpassungsmaßnahmen an den zu erwartenden Klimawandel sollten nach Möglichkeit neben neuen Risiken auch neue Chancen für die hessische Landwirtschaft berücksichtigen. Der frühere Vegetationsbeginn im Frühjahr kann zur Vorverlegung zukünftiger Aussattermine und damit zu einer besseren Ausnutzung der gesamten Vegetationszeit verwendet werden. Darüber hinaus sollte untersucht werden, ob sich durch den Klimawandel in Hessen neue Möglichkeiten für die Einführung von Feldfrüchten oder anderer Kulturen bieten und damit neue Chancen für eine in vielen Teilregionen Hessens durch Flächenstilllegung und Extensivierung gekennzeichnete Landwirtschaft.

Die Kosten für Anpassungsmaßnahmen sind im einfachsten Fall bei Verwendung bereits existierender Sorten und Agrartechnologie vernachlässigbar. Kosten für Neuzüchtungen sind zwar nur teilweise klimabedingt, entstehen aber im Rahmen einer gezielten Weiterentwicklung von Sorten hinsichtlich eines höheren Temperaturoptimums und einer höheren Trockentoleranz. Nennenswerte Kosten entstehen ebenfalls bei der möglichen Neuinstallation bzw. Erweiterung von Bewässerungsanlagen sowie bei Neueinführung von Kulturen während der Etablierung und für die benötigte Agrartechnologie.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die innerhalb der nächsten 50 Jahre zu erwartenden Ertragsänderungen von -40% bis +20% die Landwirtschaft vermutlich nicht vor unlösbare Probleme stellen, vorausgesetzt, dass die hier angenommenen sehr moderaten Klimaänderungen eintreten. Jedoch stellen die Auswirkungen des Klimawandels in jedem Fall neben den zu erwartenden sozioökonomischen Veränderungen durch EU-Erweiterung und veränderte nationale und europäische Agrarpolitik eine zusätzliche Belastung und Herausforderung an die Anpassungsfähigkeit der hessischen Landwirtschaft dar.

Um in einem nächsten Schritt konkrete Handlungsempfehlungen für die Landwirte vor Ort zu erarbeiten, sind weitere Studien erforderlich, welche die in dieser Arbeit belegten Auswirkungen der kleinräumigen Klimavariabilität auf landwirtschaftliche Erträge näher untersuchen. Für die hessische Landwirtschaft wird vor allem die Beantwortung der Frage entscheidend sein, in welcher Spannbreite mit Klimaveränderungen zu rechnen ist, eine Frage, die nur unter Einbeziehung weiterer Klimaszenarien zu beantworten sein wird.

## 6. Literatur

- Brown RA und Rosenberg NJ 1997. Sensitivity of crop yield and water use to change in a range of climatic factors and CO<sub>2</sub> concentrations: a simulation study applying EPIC to the central USA. *Agric and For Meteor* 83, 171-203.
- Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe 2001. Digitale Bodenübersichtskarten der Bundesrepublik Deutschland im Maßstab 1:1.000.000 (BÜK 1000)
- Chen CC, McCarl BA, Schimmelpfennig DE 2004. Yield variability as influenced by climate: a statistical investigation. *Climatic Change* 66, 239-261.

- Fangmeier A und Jäger HJ 2001. In: Guderian R (Hrsg.) Handbuch der Umweltveränderungen und Ökotoxikologie Band 2a Terrestrische Ökosysteme. Springer, Berlin.
- Ferris R, Ellis RH, Wheeler TR, Hadley P 1998. Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Annals of Botany* 82, 631-639
- Gerstengarbe FW, Badeck F, Hattermann F, Krysanova V, Lahmer W, Lasch P, Stock M, Suckow F, Wechsung F, Werner PC 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.
- Grünhage 2005. Abschlusskolloquium INKLIM Baustein 2.  
URL: : [http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein\\_II.htm](http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein_II.htm)
- Hertstein U, Grünhage L, Jäger HJ 1995. Assessment of past, present, and future impacts of ozone and carbon dioxide on crop yields. *Atmospheric Environment* 29, 2031-2039.
- Jones PD, Lister HD, Jaggard KW, Pidgeon JD 2003. Future climate impact on the productivity of sugar beet (*beta vulgaris* L.) in Europe. *Climatic Change* 58, 93-108.
- Kelly, RH, WJ Parton, et al. (2000). Intra-annual and interannual variability of ecosystem processes in shortgrass steppe. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* 105, 20093-20100.
- KTBL Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. 2004. Betriebsplanung Landwirtschaft, 2004/2005. Darmstadt, 573 S.
- Meteo-Research 2003/2004. Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM4 OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2100 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen. URL: [http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein\\_II.htm](http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein_II.htm)
- Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie 2005: Klimawandel in Sachsen. Sachstand und Ausblick. Dresden, 109 S.
- Schaldach, R., Alcamo, J. 2005. Coupled simulation of regional land use change and soil carbon sequestration: A case study for the state of Hesse in Germany. *Environ. Model. and Software* (in press).
- Schönwiese C. et al. 2005. Klimaveränderungen im Zeitraum 1901-2003. URL: [http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein\\_II.htm](http://www.hlug.de/medien/luft/inklim/projektteilnehmer/baustein_II.htm)
- Stehfest E, M. Heistermann, J.A. Priess, D. Ojima, J. Alcamo 2005. Simulation of global crop yields with the Ecosystem model DayCent. (submitted to *Global Biogeochemical Cycles*)
- The Royal Society 2005. Food crops in a changing climate. Report of a Royal Society discussion meeting held in April 2005. ISBN 0854036156, 15 S.
- uismedia, 1999. CropData - Kennwerte und ökologische Ansprüche der Ackerkulturen, CD-ROM. Freising.
- Weigel HJ 2005. Gesunde Pflanzen unter zukünftigem Klima. Wie beeinflusst der Klimawandel die Pflanzenproduktion? *Gesunde Pflanzen* 57, 6-17.