

PIK Report

No. 112

DIE ERTRAGSFÄHIGKEIT OSTDEUTSCHER ACKERFLÄCHEN UNTER KLIMAWANDEL

Frank Wechsung, Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe,
Petra Lasch, Andrea Lüttger (Hrsg.)



POTSDAM INSTITUTE
FOR
CLIMATE IMPACT RESEARCH (PIK)

Die Studie wurde unterstützt durch die Bodenverwertungs- und -verwaltungs GmbH (BVVG) und gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) aus den Projekten "Wirkungen des globalen Wandels auf den Wasserkreislauf im Elbegebiet" (GLOWA-Elbe, Förderkennzeichen 01LW0603A2) und "Anpassung an den Klimawandel durch pflanzenzüchterische Maßnahmen in der Weizenproduktion in Deutschland" (Förderkennzeichen 01LS05122).



BVVG
Bodenverwertungs- und -verwaltungs GmbH
10437 Berlin, Schönhauser Allee 120 · Presse- und Öffentlichkeitsarbeit
Tel.: 030/ 44 32 - 10 51 · Fax: 030/ 44 32 - 1205 · Internet: <http://www.bvvg.de>



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Ansprechpartner:
Dr. Frank Wechsung
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.
PF 60 12 03, D-14412 Potsdam
Tel.: +49-331-288-2586
Fax: +49-331-288-2428
E-mail: Frank.Wechsung@pik-potsdam.de

Herausgeber:
Prof. Dr. F.-W. Gerstengarbe

Technische Ausführung:
U. Werner

POTSDAM-INSTITUT
FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG
Telegrafenberg
Postfach 60 12 03, 14412 Potsdam
GERMANY
Tel.: +49 (331) 288-2500
Fax: +49 (331) 288-2600
E-mail-Adresse: pik@pik-potsdam.de

ISSN 1436-0179
DOI 10.2312/PIK.b103-pik1129

POTSDAM, DEZEMBER 2008

Abstract

More than most other economic sectors agriculture depends on climatic conditions. This report presents an analysis of possible climate change effects on Eastern Germany's agriculture. It suggests that the risk of Eastern Germany's acreage losing in value is low. Negative regional impacts of climate change could be countered by appropriate adaptation measures, crop yields in many areas could even be raised and yield losses might be offset by counteracting price increases on the world market.

The projection is based on a regional climate scenario. Using the statistical scenario-model STAR II available large scale projections from climate change global circulation models for middle Europe were downscaled to the existing network of East-German weather stations. The available weather records for the period 1951 to 2003 were extended for the scenario period 2004-2055. For the extension, a general increase of the average annual temperature in Eastern Germany by up to 2.7 degrees Celsius (4.8 degrees Fahrenheit) was assumed until the middle of the 21st century. The increase in temperature was triggered by a rise in atmospheric CO₂ concentration from 386 at present to 542 ppm in 2055. The scenario model STAR II was used to derive the associated changes of the other major climate variables. Following the results the average annual rainfall is projected to decrease only marginally. However, shift of rainfall patterns is to be expected. Summertime rainfall will probably decrease while wintertime rainfall is likely to increase. This trend can already be monitored today and will continue as a tendency into the future. According to the projections this development will be interrupted infrequently, though, by relatively humid phases with comparatively high amounts of rainfall during the summer months.

Based on this scenario, the future crop yield potentials were evaluated for the summer crop maize and the winter crop wheat in Eastern Germany. The evaluation used statistical yield models relating yearly changes in major climate variables to those in crop yield at the county level. The models were calibrated for the period 1990 to 2006 and then used for simulating the climate dominated yield variability beginning in 1951 up to 2055.

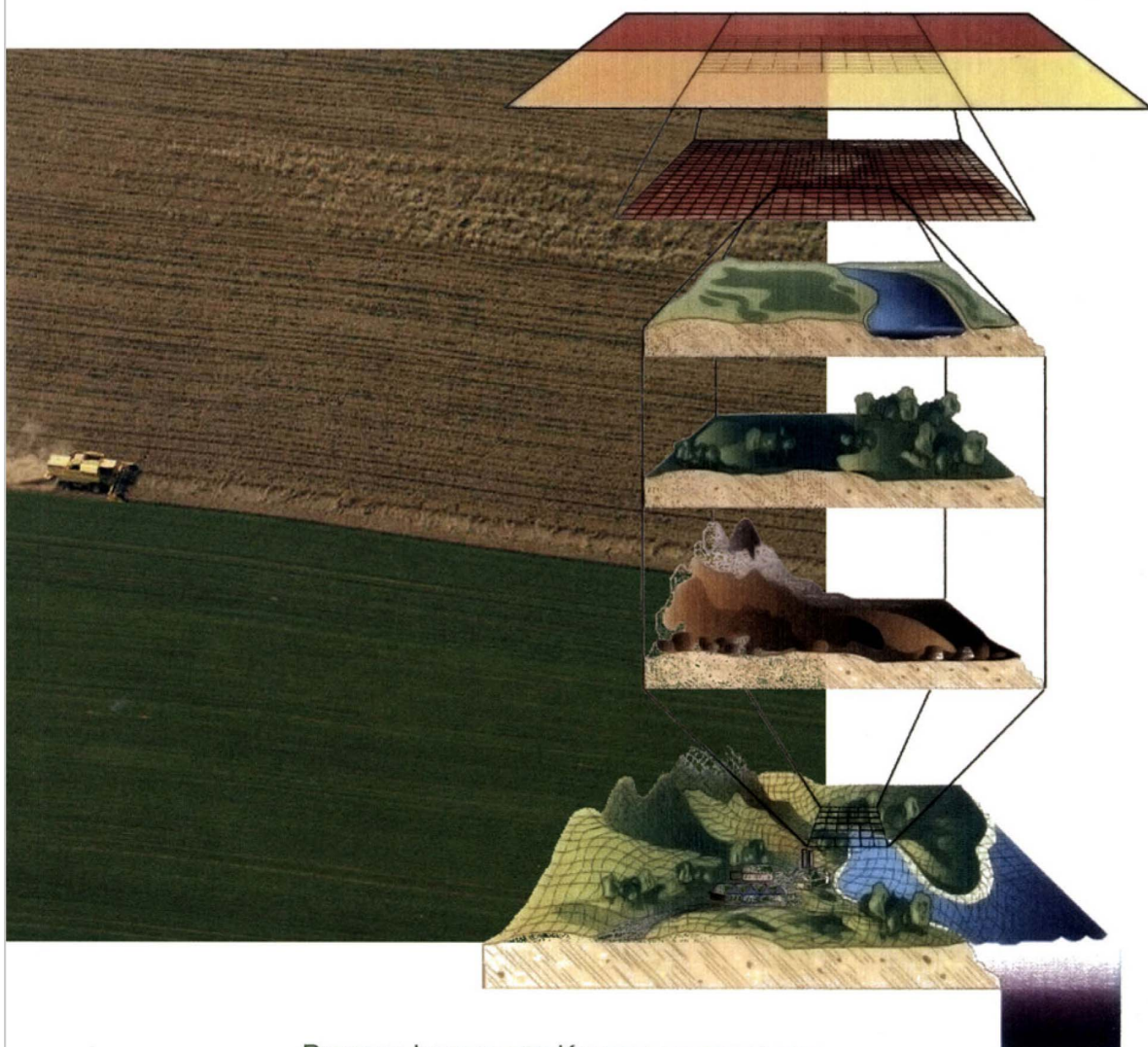
The results received after integration revealed that the climate-determined yield level will probably remain stable under the projected climatic conditions for the next 20 to 30 years. A significant yield loss is to be expected by the middle of the 21st century, especially at locations in the eastern sandy lowlands distant from coast and mountain regions. The losses will be greater in the cultivation of the summer crop maize than that of the winter crop wheat. However, the increase in atmospheric concentration of carbon dioxide (CO₂) might compensate part or all of these losses. Due to the fertilizing effect of this greenhouse gas, yields of wheat can even be expected to increase above current levels and yield losses of maize due to water stress will be mostly diminished. An optimum nitrogen provision is a necessary precondition for the CO₂ fertilization to come to its full effect, though.

In contrast to wheat and maize, yields of fast growing aspen in short rotation coppice plantation are expected to increase under the presumed changes of climate also on sandy soils with low water holding capacity even when neglecting the beneficial effect of higher CO₂. This is indicated by simulation results using the eco-physiological forest dynamics model 4C. The model was applied to those areas of East-Germany's arable land where cereal cropping is less productive than the current median level. Following these results, short rotation coppicing of aspen is a promising cultivation alternative for farmers to secure future incomes. Woody biomass generated in short rotation coppice plantations with aspen is particularly suitable for bio-energy production.

Taken the simulated effects of the projected climate change on crop and aspen yields and considering the global market prospects the conclusion can be drawn that the value of farmland for the production of biomass will at least remain stable in East-Germany for the next four decades. The global request for increased supply will continue to rise. Considering the given limitation for a simultaneous increase in production capacity the mean market prices will be most likely higher than those seen in the last decade. Thus, even if crop yields will decrease in some parts of Eastern Germany, monetary damages would probably be overcompensated by increases in farmers' incomes.

DIE ERTRAGSFÄHIGKEIT OSTDEUTSCHER ACKERFLÄCHEN UNTER KLIMAWANDEL

FRANK WECHSUNG, FRIEDRICH-WILHELM GERSTENGARBE,
PETRA LASCH, ANDREA LÜTTGER (HRSG.)



POTS DAM-INSTITUT FÜR KLIMAFOLGENFORSCHUNG

Deckblatt des Preprints (gestaltet von Friedemann Lembcke)

Autoren:

Kapitel 1:

Friedrich-Wilhelm Gerstengarbe, Peter C. Werner, Boris Orłowsky, Martin Wodinski
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Kapitel 2:

Frank Wechsung (und Kapitel 5), Andrea Lüttger, Fred F. Hattermann
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Kapitel 3:

Petra Lasch, Chris Kollas, Joachim Rock
Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V.

Kapitel 4:

Steffen Noleppa
agripol - network for policy advice
Dr. Hermann Lotze-Campen & Dr. Steffen Noleppa GbR
c/o Dr. Steffen Noleppa
Czarnikauer Str. 22
10439 Berlin, Germany

Phone: +49 (30) 24 72 44 03
Fax: +49 (30) 24 72 44 05
E-Mail: [contact\(at\)agripol.net](mailto:contact(at)agripol.net)

Vorwort von Prof. Hans Joachim Schellnhuber

Direktor des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung (PIK)

Das Klima in Ostdeutschland ändert sich. Es wird wärmer und während der Vegetationsperiode auch trockener. Dennoch bleiben die landwirtschaftlichen Erträge in Zukunft weitgehend stabil. Dies ist das zentrale Ergebnis der hier vorliegenden Studie. Für die Landwirtschaft hat der Klimawandel positive und negative Wirkungen zugleich. Einerseits steigt der Wasserstress der Pflanzen in den Sommermonaten, andererseits wirkt der Anstieg der Konzentration von Kohlendioxid (CO₂) in der Atmosphäre wie ein Düngemittel. Er stimuliert die Photosynthese und mindert die Folgen der Trockenheit.

Die hier dargestellten Projektionen erscheinen fern vom Alltag der landwirtschaftlichen Betriebe in Ostdeutschland. Und doch wirken sie sich unmittelbar darauf aus. Langfristige Ertragsaussichten sind wichtige Faktoren für Bodenpreise und Pachten. Gute Ertragsaussichten lassen die Ressource Boden an Wert gewinnen. Pächter können also nicht mit sinkenden Kosten rechnen. Die gute Nachricht für die ostdeutsche Landwirtschaft lautet aber, dass es sich weiterhin lohnt, hier zu investieren – und das auch unter den Bedingungen des Klimawandels. Selbst an niederschlagsarmen sandigen Standorten ist Anpassung an die veränderten Anbaubedingungen möglich.

Im Sinne des Klimaschutzes wäre es sehr zu begrüßen, wenn Gewinne mehr als bisher zur Stärkung der Agrarforschung genutzt würden. Denn die Landwirtschaft steht vor großen Herausforderungen. Ein Beispiel: Die Stickstoffdüngung trägt erheblich zum Treibhauseffekt bei. Das dabei frei werdende Lachgas ist ein rund 300mal wirksameres Treibhausgas als CO₂. Damit aber der Düngungseffekt durch die steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre voll ausgenutzt werden kann, ist eine optimale Versorgung der Pflanzen mit Stickstoff unerlässlich. Klimaanpassung und Klimaschutz sind hier zu verbinden. Landwirtschaft, Industrie und Forschung müssen gemeinsam Lösungsansätze finden, die Düngermengen zu verringern und ihre Wirksamkeit zu optimieren.

Das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) hat den Auftrag, die regionalen und globalen Folgen des Klimawandels zu quantifizieren. An die Objektivität des Herangehens stellt dies höchste Ansprüche. Es gilt, Chancen und Risiken gleichermaßen zu untersuchen und darzustellen. Ziel der vorliegenden Studie ist es, den Wert von Volksvermögen – denn darum handelt es sich bei den von der BVVG verwalteten Flächen – realistisch einzuschätzen. Diese Aufgabe entspricht dem Auftrag des PIK und die hier dargestellten Ergebnisse werden den Ansprüchen an die Herangehensweise in allen Belangen gerecht.



Hans Joachim Schellnhuber, September 2008

Vorwort von Dr. Wolfgang Horstmann

Sprecher der Geschäftsführung der Bodenverwertungs- und -verwaltungs- GmbH (BVVG)

Kaum ein Wirtschaftsbereich ist so unmittelbar und existenziell von Klimaveränderungen betroffen wie die Landwirtschaft. Langfristige Veränderungen der Durchschnittstemperatur, der Niederschläge und der Verteilung der Niederschläge auf Jahreszeiten bis hin zu einer Erhöhung der CO₂-Konzentration können in begünstigten Regionen zu einem Anstieg der Erträge führen, in anderen Teilen der Welt eine rentable Landbewirtschaftung aber auch dauerhaft unmöglich machen. Selbst abnehmende Naturalerträge haben zudem nicht zwangsläufig Einkommenseinbußen zur Folge: Eine durch Klimaveränderungen ausgelöste globale Verringerung der Anbaufläche lässt – zusammen mit einem Anstieg der Weltbevölkerung, veränderten Ernährungsgewohnheiten und zunehmendem Einsatz landwirtschaftlicher Rohstoffe für energetische Zwecke – die Erzeugerpreise steigen. Dieser Preisanstieg kann einen Ertragsrückgang deutlich überkompensieren und zu positiven Einkommenseffekten führen. Die per saldo zu erwartenden langfristigen Auswirkungen der Klimaveränderungen auf die wirtschaftliche Entwicklung landwirtschaftlicher Betriebe lassen sich deshalb nur schwer abschätzen.

Als vor einigen Jahren erste Versuche unternommen wurden, die längerfristigen wirtschaftlichen Auswirkungen auf die Betriebe zu prognostizieren, wurden die Risiken der Klimaveränderung für die Landwirtschaft in den ostdeutschen Bundesländern in den Vordergrund gestellt. Titelseiten in landwirtschaftlichen Fachblättern mit dürrebeschädigten Flächen schlugen auf die Stimmung. Unter anderem war diese sich breit machende pessimistische Einstellung Anlass für die BVVG, Kontakt mit dem Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung aufzunehmen und eine Studie zu den voraussichtlichen Auswirkungen der erwarteten Klimaveränderung auf die ostdeutsche Landwirtschaft in Auftrag zu geben.

Heute, fast 2 Jahre später, hat sich die Stimmungslage in der Landwirtschaft deutlich verbessert. Seinerzeit lediglich theoretisch abgeleitete Auswirkungen globaler Veränderungen auf die Erzeugerpreise sind zwischenzeitlich tatsächlich eingetreten. Vermutete Wirkungszusammenhänge und –richtungen wurden damit zunächst bestätigt. Langfristige Entwicklungen lassen sich aufgrund von Beobachtungen der letzten 1 ½ Jahre jedoch nicht zuverlässig voraus schätzen. An dieser Stelle setzt die vorliegende Studie an. Bis Mitte dieses Jahrhunderts zu erwartende Auswirkungen auf Erträge, Anpassungsreaktionen im Bereich der Züchtung, der Anbaumethoden, der Auswahl der Sorten können damit besser eingeschätzt werden. Besonders erfreulich ist das Resümee der Potsdamer Forscher, das bei Auftragsvergabe so noch nicht erwartet wurde: Die mit der Klimaveränderung verbundenen Chancen sind für die ostdeutsche Landwirtschaft höher einzuschätzen als deren Risiken.



Wolfgang Horstmann, September 2008

INHALTSANGABE

Inhaltsangabe	IX
Abbildungsverzeichnis	XII
Tabellenverzeichnis	XVI
Aufgabenstellung und Vorgehen	1
1 Klimaprojektion für Ostdeutschland	2
1.1 Fragestellung	2
1.2 Ergebnisse und Diskussion	3
1.2.1 Beobachtetes Klima und Klimawandel zwischen 1951-2003	3
1.2.1.1 Analyseergebnisse für einzelne Klimavariablen	3
1.2.1.1.1 Lufttemperatur	3
1.2.1.1.2 Niederschlag	5
1.2.1.1.3 Klimatische Wasserbilanz.....	7
1.2.1.2 Analysezusammenfassung.....	7
1.2.2 Transientes Klimaszenarium für den Zeitraum 2004-2055.....	7
1.2.2.1 Mittlere Verhältnisse, Ereignistage und Änderungen	7
1.2.2.2 Differenzen.....	15
1.2.3 Haupttendenzen	17
1.3 Zusammenfassung und Ausblick	17
2 Projektionen zur klimabedingten Änderung der Erträge von einjährigen Sommer- und Winterkulturen des Ackerlandes am Beispiel von Silomais und Winterweizen	18
2.1 Fragestellung	18
2.2 Ergebnisse und Diskussion	18
2.2.1 Ertragssteigerungsraten zwischen 1951 und 2006.....	18
2.2.2 Einfaktorielle Zusammenhänge zwischen Ertrags- und Klimavariabilität in der Vergangenheit	20
2.2.3 Ertragswirkungen des Klimawandels	23
2.2.3.1 Ertragsrelevante Klimatrends	23
2.2.3.2 Periodenvergleiche	24
2.2.3.3 Simulationsergebnisse	25
2.2.3.3.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung des CO ₂ -Düngungseffektes	25
2.2.3.3.2 Korrektur der Ergebnisse durch die Wirkung des CO ₂ -Düngungseffektes	30
2.3 Zusammenfassung und Ausblick	31

3	Ertragsprojektionen unter Klimawandel für den alternativen Anbau von Agrarholz auf Ackerflächen am Beispiel der Aspe.....	33
3.1	Fragestellung.....	33
3.2	Ergebnisse und Diskussion	33
3.2.1	Beurteilung des CO ₂ -Effektes	33
3.2.2	Simulation der Holzerträge für eine rezente Klimaperiode (1982-2003).....	34
3.2.3	Simulation der Holzerträge unter dem Klimaszenarium.....	37
3.2.3.1	Bundesländer.....	37
3.2.3.2	Landkreise.....	38
3.2.3.3	Gemeinden und Standorte.....	40
3.2.3.4	Erträge und Böden.....	43
3.3	Zusammenfassung.....	44
4	Klimaänderungen und weitere globale Entwicklungen: Langfristige Chancen und Risiken für die ostdeutsche Landwirtschaft	45
4.1	Fragestellung.....	45
4.2	Überblick über relevante regionale Klimaänderungen und ihre Wirkungen	45
4.3	Ausgewählte Nachfragefaktoren auf den Agrarmärkten.....	46
4.4	Bevölkerungswachstum	46
4.5	Wirtschaftswachstum und Urbanisierung.....	47
4.6	Bioenergie.....	50
4.7	Ausgewählte Angebotsfaktoren auf den Agrarmärkten.....	51
4.7.1	Wasser	51
4.7.2	Land.....	51
4.7.3	Erträge	52
4.8	Konsequenzen für die einheimischen Agrarmärkte.....	54
4.9	Zusammenfassung und Ausblick	55
5	Gesamteinschätzung zum Klimarisiko für die ostdeutschen Ackerstandorte	56
6	Material und Methoden.....	58
6.1	Klima	58
6.1.1	Temperaturprojektionen für Ostdeutschland.....	58
6.1.2	Klimareihen	58
6.1.3	Beschreibung des regionalen statistischen Klimamodells STAR II.....	58
6.1.3.1	Die Szenarienbildung für einzelne Stationen	59
6.1.3.2	Die Szenarienbildung für mehrere Stationen einer Region.....	61

6.1.3.3	Die Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Realisierungen eines Szenariums	62
6.1.4	Modellvalidierung	62
6.1.4.1	Temperatur	64
6.1.4.1.1	Langjähriges Mittel	64
6.1.4.1.2	Standardabweichung der Tagesmittel	65
6.1.4.1.3	Standardabweichung der Jahresmittel	66
6.1.4.2	Niederschlag	67
6.1.4.2.1	Langjähriges Mittel	67
6.1.4.3	Jahresgänge von Temperatur und Niederschlag	68
6.1.4.4	Persistenz	69
6.1.4.5	Extreme	70
6.1.4.5.1	Anzahl von Starkniederschlagstagen	70
6.1.4.5.2	Anzahl von Sommer- und Frosttagen	71
6.1.5	Zusammenfassende Bewertung	72
6.2	Landwirtschaft.....	73
6.2.1	Basisdatensatz zur Ertragsänderung	73
6.2.2	Simulationsansätze	73
6.2.3	Statistisches Modell für die Fruchtarten Winterweizen und Mais	74
6.2.3.1	Modellansatz	74
6.2.3.1.1	Ertragsberechnung	75
6.2.3.2	Modellparametrisierung und Anpassungsgüte	75
6.2.4	Rezente Ertragssimulationen mit SWIM	78
6.2.5	Korrektur simulierter Ertragseffekte um die Wirkung des CO ₂ -Düngungseffektes	78
6.3	Agrarholz	80
6.3.1	Modell 4C	80
6.3.2	Verfügbare Daten	81
6.3.3	Bestandesbehandlung	82
6.3.4	Simulationen	83
6.3.5	Erträge und atmosphärische CO ₂ -Konzentration	83
7	Literatur	85
7.1	Klima	85
7.2	Landwirtschaft.....	85
7.3	Agrarholz	86
7.4	Ökonomie	87
8	Abkürzungsverzeichnis.....	89
9	Glossar	91

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1:	Jahresmittel der Lufttemperatur in Ostdeutschland a) Zeitraum 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend).....	4
Abbildung 2:	Jahressumme des Niederschlags in Ostdeutschland a) Zeitraum 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend).....	4
Abbildung 3:	Niederschlagssumme während des hydrologischen Sommers (Mai – Oktober) in Ostdeutschland a)1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)	6
Abbildung 4:	Niederschlagssumme während des hydrologischen Winters (November – April) in Ostdeutschland, a) 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)	6
Abbildung 5:	Jahresmitteltemperatur, a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2026 – 35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003	10
Abbildung 6:	Jahresmitteltemperatur, a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046 – 55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003	10
Abbildung 7:	Jahresniederschlagssumme, a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003	11
Abbildung 8:	Jahresniederschlagssumme, a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003	12
Abbildung 9:	Niederschlagssumme für den hydrologischen Sommer (Mai – Oktober), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003.....	12
Abbildung 10:	Niederschlagssumme für den hydrologischen Sommer (Mai – Oktober), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003.....	13
Abbildung 11:	Niederschlagssumme für den hydrologischen Winters (November – April), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003.....	14
Abbildung 12:	Niederschlagssumme für den hydrologischen Winter (November – April), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003.....	14
Abbildung 13:	Entwicklung des Ertrages (y, durchgezogene Linie) und der Ertragsänderungsrate (y', gestrichelte Linie) von a) Winterweizen und b) Silomais in Ostdeutschland im Zeitraum 1951-2006 mit dem vierjährigen gleitenden Durchschnitt für y (durchgezogene fette Linie) und dem 14jährigen gleitenden Durchschnitt für y' (gestrichelte fette Linie).	19
Abbildung 14:	Räumliche Verteilung der kreisweisen Korrelationen zwischen den Ertragsänderungsraten (y') von Silomais und den Änderungsraten ausgewählter Klimavariablen (NIED' MJJ-Niederschlagsänderung im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' MJJ-Änderung im Verdunstungsanspruch im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum	21
Abbildung 15:	Räumliche Verteilung der kreisweisen Korrelationen zwischen den Ertragsänderungsraten (y') von Winterweizen und den Änderungsraten ausgewählter Klimavariablen (NIED' MJJ-Niederschlagsänderung im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' MJJ-Änderung im Verdunstungsanspruch im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' Jahr -Änderung im Verdunstungsanspruch im Vergleich zum Vorjahr, Trockentage' MJJ-Änderung bei den Trockentagen im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum).....	22

Abbildung 16: Entwicklung a) der Jahresmitteltemperatur, b) der Jahresniederschlagssumme und der Niederschlagssumme in ausgesuchten Zeitabschnitten - c) November bis April und d) Mai bis Juli - von 1951–2055 anhand beobachteter (1951–2006) und mit STAR II simulierter Daten (2004–2055), gemittelt über alle meteorologischen Stationen in Ostdeutschland mit Darstellung linearer Periodentrends und der zugehörigen 95% Konfidenzintervalle	23
Abbildung 17: Häufigkeitsverteilungen und zugehörige Dichtefunktionen der kreisweise simulierten Klimawirkungen auf den Ertrag von Winterweizen (a, c, e) und Silomais (b, d, f) für die Perioden 1952-2005 und 2005-2054 (a, b), 1952-1975 und 1976-2005 (c, d), 2005-2035 und 2036-2054 (e, f) . Y_E ist die mittlere relative Abweichung des Ertrages in einer Periode vom Durchschnittsertrag des Zeitraumes 1990-2006 je Landkreis. Der CO_2 -Düngungseffekt wurde nicht berücksichtigt.....	26
Abbildung 18: Räumliche Verteilung der kreisweise simulierten relativen Ertragsänderungen, y_E von Winterweizen und Silomais für die Periodenvergleiche 2046-54 / 1952-2005 ohne Berücksichtigung des CO_2 -Düngungseffektes	29
Abbildung 19: Simulierte mittlere jährliche Holzerträge (y) von Aspen-Kurzumtriebsplantagen mit und ohne CO_2 -Effekt, gemittelt über die betrachteten Flächen und Perioden.....	34
Abbildung 20: Simulierte Holzerträge (y, t $TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$) der Aspen- Kurzumtriebsplantagen auf den betrachteten Flächen, gemittelt auf Gemeindeebene, für die Basisperiode 1982-2003	35
Abbildung 21: Leitbodentypen und ihre Flächenanteile an der Ackerfläche Ostdeutschlands	36
Abbildung 22: Simulierter mittlerer jährlicher Holzertrag (y, t $TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$) der Aspen in den 4 Perioden des Klimaszenariums nach Bundesländern unter Berücksichtigung des CO_2 -Düngungseffektes	37
Abbildung 23: Prozentuale Veränderung der simulierte Holzerträge (y_E) der Aspen-Kurzumtriebsplantagen in den 4 Perioden des Klimaszenarios im Vergleich zur Basisperiode (1982-2003) nach Bundesländern	38
Abbildung 24: Änderung des Holzertrages (%) in den einzelnen Szenarienzeiträumen gegenüber dem Basiszeitraum unter Berücksichtigung des CO_2 -Effektes auf Landkreisebene	39
Abbildung 25: Relative Änderungen des simulierten, mittleren jährlichen Holzertrages (y_E) von Aspen-Kurzumtriebsplantagen in den vier Perioden des Klimaszenariums gegenüber der Basisperiode 1982-2003, dargestellt auf Gemeindeebene	41
Abbildung 26: Dichtefunktionen zu den Häufigkeitsverteilungen der für die Basisperiode und vier Szenarienperioden simulierten, mittleren jährlichen Holzerträge der Aspen-Kurzumtriebsplantagen für Ostdeutschland unter Berücksichtigung des CO_2 -Düngeeffektes.....	42
Abbildung 27: Entwicklung der Weltbevölkerung zwischen 1950 und 2050, Quelle: Eigene Darstellung nach PRB (2007).....	46
Abbildung 28: Entwicklung des Bruttosozialprodukts in unterschiedlichen Weltregionen zwischen 1986 und 2030, Quelle: Eigene Darstellung nach Worldbank (2006).....	47
Abbildung 29: Entwicklung der Weltbevölkerung in urbanen und ländliche Gebieten zwischen 1980 und 2050, Quelle: Eigene Darstellung nach UN (2005).....	48
Abbildung 30: Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs an kcal zwischen 2000 und 2050, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006).....	48
Abbildung 31: Entwicklung des Konsums von Nahrungsmitteln zwischen 2000 und 2050, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006).....	49
Abbildung 32: Entwicklung der EU-Nachfrage nach pflanzlichen Produkten für die Produktion von Bioenergie zwischen 2000 und 2016, Quelle: Eigene Darstellung nach OECD (2006).....	50

Abbildung 33: Entwicklung des weltweiten Wasserverbrauchs zwischen 1995 und 2005, Quelle: Eigene Darstellung nach IFPRI und IWMI (2007).....	51
Abbildung 34: Theoretische und realistische Verfügbarkeit von Land für die globale Agrarproduktion, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006), Hofreither (2005) und IFPRI (2005).....	52
Abbildung 35: Entwicklung durchschnittlicher globaler Ertragszuwachsrate y' zwischen 1961 und 2030, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006).....	53
Abbildung 36: Realpreisentwicklung bei Weizen zwischen 1970 und der Gegenwart, Quelle: Eigene Darstellung nach USDA (verschiedene Jgg.).....	54
Abbildung 37: Illustration des Vorgehens: Gegeben ist (links) eine Beobachtungsreihe für eine dominante Klimavariablen (hier die Temperatur, schwarz) und eine Trendannahme zu deren Fortsetzung (rote Regressionsgerade) für den Simulationszeitraum. Gesucht wird (rechts) eine Neukombination der Klimareihe (rot), die der Vorgabe genügt und aus Abschnitten der Beobachtungsreihe zusammengesetzt ist (rechts). Die Punkte zeigen jeweils die Jahresmittel an, auf die sich die Regressionsvorgabe bezieht.	59
Abbildung 38: Zusammenfassende Gesamtdarstellung des Verfahrens STAR II für eine einzelne Station mit der Temperatur als dominanter Klimavariablen und Bezugsgröße	60
Abbildung 39: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Jahresmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes.....	64
Abbildung 40: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Standardabweichung der Tagessmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	65
Abbildung 41: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Standardabweichung der Jahresmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	66
Abbildung 42: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Jahresniederschlagssumme (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes.....	67
Abbildung 43: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Monatsmittel der Temperatur (1976-2000) für Grambeck (links) und Potsdam (rechts)	68
Abbildung 44: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Monatssummen des Niederschlags für Grambeck (links) und Potsdam (rechts).....	68
Abbildung 45: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Andauern von Sommertagen für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes.....	69
Abbildung 46: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Andauern von trockenen Tagen für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	70
Abbildung 47: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen ($RR > 10\text{mm}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	71
Abbildung 48: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Sommertage ($T_{\text{max}} \geq 25\text{ °C}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	71

Abbildung 49: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Frosttage ($T_{\min} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes	72
Abbildung 50: Vergleich der simulierten mit den beobachteten Ertragsänderungsraten (y') für Winterweizen und Silomais auf Länderebene	77
Abbildung 51: Schematische Darstellung des Waldwachstumsmodells 4C.....	81
Abbildung 52: Landwirtschaftliche Flächen mit Ackerzahlen < 50	82

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Meteorologische Größen auf Tageswertbasis.....	3
Tabelle 2:	Gebietsmittel ausgewählter meteorologischer Variablen für den Referenzzeitraum (1951-2003), zwei Szenarienzeiträume (2026-2035, 2046-2055) und die Mittelwertdifferenzen je Szenariozeitraum zur Referenzperiode.....	9
Tabelle 3:	Gebietsmittel ausgewählter meteorologischer Parameter für die Zeiträume 2024-45 und 2034-55 im Vergleich zum Zeitraum 1982-2003, Szenarienzeiträume und die Differenzen zwischen Szenarien- und Referenzzeitraum.....	16
Tabelle 4:	Ertragszuwachsrate(n) (%) von Sommer- und Winterkulturen in Ostdeutschland für den Zeitraum 1952–2006	20
Tabelle 5:	Periodenvergleiche mit Referenz- und Vergleichsperioden	24
Tabelle 6:	Relative Änderungen von Klimavariablen zwischen der Szenarienperiode 2046-54 und dem Beobachtungszeitraum 1952-2005 und simulierte Folgen für den Ertrag von Winterweizen und Silomais ohne Berücksichtigung des CO ₂ -Düngeeffektes.....	27
Tabelle 7:	Relative Änderungen von Klimavariablen zwischen der Szenarienperiode 2024-45 und dem Beobachtungszeitraum 1983-2003 und simulierte Folgen für den Ertrag von Winterweizen und Silomais ohne Berücksichtigung des CO ₂ -Düngeeffektes.....	30
Tabelle 8:	Länderweise Ertragswirkungen von Klimaänderungen auf Weizen und Silomais gemäß den Periodenvergleichen 2046-54 / 1952-2005 und 2024-45 / 1982-2003 unter Berücksichtigung des CO ₂ -Düngungseffektes	31
Tabelle 9:	Anteil der untersuchten Flächen an der Ackerfläche Ostdeutschlands (in %) und simulierte Durchschnittserträge (t TM ha ⁻¹ a ⁻¹) je Leitbodentyp in der Basisperiode.....	36
Tabelle 10:	Durchschnittliche Biomasserträge (t TM ha ⁻¹ a ⁻¹) nach Leitbodentypen und Zeiträumen.....	43
Tabelle 11:	Vorgaben für Validierungsparameter	63
Tabelle 12:	Liste der in den statistischen Fruchtartenmodellen berücksichtigten Klimavariablen und der genutzten Abkürzungen (WW: Winterweizen, Mais: Silomais).....	74
Tabelle 13:	Bestimmtheitsmaße der kreisbezogen geschätzten Ertragsmodelle für Winterweizen und Silomais nach Perzentilen für die beiden Perioden 1951-1989 und 1990-2006.....	76
Tabelle 14:	Bestimmtheitsmasse für das Modellsystem SWIM.....	78
Tabelle 15:	Vergleichszeiträume bei der Ermittlung von Klimawirkungen für Aspen-KUP in Ostdeutschland.....	83

AUFGABENSTELLUNG UND VORGEHEN

F. Wechsung

Die Arbeit gliedert sich in vier Teile. Zunächst wird ein Klimaszenarium für Ostdeutschland entwickelt, dem das Emissionsszenarium A1B zugrunde liegt. Es beschreibt die Entwicklung der zukünftigen CO₂-Emissionen in einer Welt mit einem globalen Markt, sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung, rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien und dem Mix des Einsatzes fossiler und erneuerbarer Energieträger. Der abgeleitete, gegenwärtige Temperaturtrend wird bis ins Jahr 2055 extrapoliert. Dies geschieht für ein dichtes Netz von Klima- und Niederschlagsstationen Ostdeutschlands. Die Temperaturextrapolation bildet die Grundlage für die stationsweise Entwicklung kompletter Klimaszenarien für den Standardsatz meteorologischer Größen. Die Klimaszenarien umfassen Tagesdaten für den Zeitraum 2004-2055. Die Überlagerung von Klimatrend und Klimavariabilität ist zufällig, liegt aber innerhalb der beobachteten Bandbreite. Die für einzelne Jahre angegebenen Witterungsverläufe stellen Stichproben aus einer Vielzahl gleichwahrscheinlicher Möglichkeiten dar und sind nicht mit Prognosen zu verwechseln.

Die Ertragsfähigkeit landwirtschaftlicher Flächen ist stark klimabestimmt mit Folgewirkungen für die Nutzungsmöglichkeiten und damit für die Bodenbewertung. Die Abschätzung der Folgen eines möglichen Klimawandels auf das klimatische Ertragspotenzial landwirtschaftlicher Flächen in Ostdeutschland (Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen) ist Gegenstand der folgenden Studie, die durch die Bodenverwertungs- und -verwaltungs GmbH (BVVG) angeregt und auch finanziell unterstützt wurde. Die Studie wurde zudem aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Anknüpfend an dem Klimaszenarium für Ostdeutschland werden Modelle zur Simulation land- und forstwirtschaftlicher Erträge genutzt, um die Folgen für die Standortproduktivität abzuschätzen. Zunächst geschieht dies in Teil 2 für die Kulturen Silomais und Winterweizen und dann im Teil 3 für Kurzumtriebsplantagen mit Aspen (*Populus tremula* L.). Mais und Weizen stellen die global bedeutsamsten Marktfrüchte dar. Mit Einschränkungen lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf das Spektrum der einjährigen Ackerkulturen zu. Ausgehend vom Mais kann auf andere Sommerkulturen (Zuckerrüben, Kartoffeln) geschlossen werden und Bezug nehmend auf Winterweizen sind Rückschlüsse auf die Ertragswirkungen bei den Winterkulturen (Wintergetreide, Raps) möglich.

Eine Einkommensalternative für Landwirte stellt die Erzeugung von Holzbiomasse durch Kurzumtriebsplantagen mit Aspen dar. Insbesondere auf den leichten Standorten kommt diese Alternativnutzung in Betracht, wenn einjährige Kulturen aufgrund möglicherweise zu erwartender, längerer Trockenperioden nur unzureichende Erträge versprechen.

Abschließend wird eine Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der aktuellen und den sich abzeichnenden Entwicklungen an den Weltagrarmärkten vorgenommen. Insbesondere wird diskutiert, welche Spielräume sich aus der langfristig absehbaren Preisentwicklung bei wichtigen Agrarrohstoffen für die Anpassung landwirtschaftlicher Flächennutzung an eine möglicherweise verminderte Flächenproduktivität ergeben.

1 KLIMAPROJEKTION FÜR OSTDEUTSCHLAND

F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner, B. Orlowsky und M. Wodinski

1.1 FRAGESTELLUNG

Für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die Produktivität ostdeutscher Ackerflächen ist zunächst eine Klimaprojektion erforderlich, welche die Klimaentwicklung der Vergangenheit in die Zukunft fortschreibt. Die räumliche und zeitliche Auflösung sollte an die Stationsdichte und Messhäufigkeit der Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Beobachtungsgebiet anknüpfen. Klimaprojektionen dieses Typs werden gewöhnlich in einem zweistufigen Prozess erstellt. Zunächst wird mit einem globalen Zirkulationsmodell (GCM) das Klimaänderungssignal für die Gesamtregion bzw. größere Teilregionen ermittelt. Im nächsten Schritt wird dieses Klimaänderungssignal mit Hilfe von regionalen Zirkulationsmodellen oder statistischen Methoden räumlich feiner aufgelöst. Am PIK wurde mit dem Szenarienmodell STAR II eine Methodik entwickelt, die Witterungsreihen von einzelnen Klimastationen, die für die Vergangenheit vorliegen, unter Bezug auf die von GCM-Modellen simulierten grobskaligen Temperaturtrends fortschreibt. Das Verfahren ist nicht auf die Nutzung der Temperatur als makroskalig vorgegebene Größe beschränkt. Auf die Übernahme anderer Trends aus GCM-Modellen, z.B. Niederschlagsentwicklung, wurde jedoch verzichtet, da sie vergleichsweise unsicher sind.

Das grobskalige Klimaänderungssignal für die Temperatur, auf welches STAR II Bezug nimmt, hängt von der unterstellten Entwicklung der Treibhausgasemissionen ab. Bis 2055 unterscheiden sich die verschiedenen Emissionsszenarien nur geringfügig. Die Szenarienfamilie A1 beschreibt die zukünftige Welt mit sehr raschem Wirtschaftswachstum, einer Mitte des 21. Jahrhunderts kulminierenden und danach rückläufigen Weltbevölkerung und rascher Einführung neuer und effizienterer Technologien. Für A1B wird zusätzlich eine ausgewogene Nutzung aller Energiequellen angenommen. Nach dem Szenarium A1B wäre nach Modellabschätzungen (Nakicenovic und Swart, 2000) eine CO₂-Konzentration von 542 ppm im Jahr 2055 erreicht. Auf dieses Emissionsszenarium soll im Folgenden Bezug genommen werden.

Das den STAR-Simulationen für Ostdeutschland hier konkret vorgegebene Temperaturänderungssignal beruht auf einem Simulationslauf des GCM ECHAM5/OM für das SRES-Emissionsszenarium A1B. Die daraus abgeleitete STAR II Klimaprojektion beginnt im Jahr 2004 und reicht bis ins Jahr 2055. Das ist eine Extrapolationsweite, die für die hier verfolgte Aufgabenstellung als ausreichend angesehen wird.

Das Szenarienmodell STAR II wird im Abschnitt Klima des Kapitels Material und Methoden beschrieben. Dabei wird neben der Darstellung der methodischen Grundlagen besonders auf die Qualitätsprüfung des Modells eingegangen. Im Folgenden wird eine Analyse des gegenwärtigen Klimas durchgeführt. Diese Analyse beinhaltet die Beschreibung der räumlichen Struktur und zeitlichen Entwicklung der ausgewählten meteorologischen Größen. Ab Kapitel 1.2.3 werden die Ergebnisse der Szenarienrechnungen diskutiert.

1.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

1.2.1 Beobachtetes Klima und Klimawandel zwischen 1951-2003

Zur Auswertung der Analyserechnungen wurde das Geographische Informationssystem (GIS) ArcView eingesetzt. Als Parameter für die Grafiken und Karten wurden die Jahresmittel bzw. die mittleren Jahres-, Sommer- und Wintersummen des Niederschlags ausgewählt, wobei der meteorologische Sommer die Monate Juni-August und der meteorologische Winter die Monate Dezember-Januar beinhaltet. Außerdem wurden noch verbale Einschätzungen zur Entwicklung weiterer meteorologischer Größen und Ereignistage vorgenommen. In Tabelle 1 sind die verwendeten Größen gelistet.

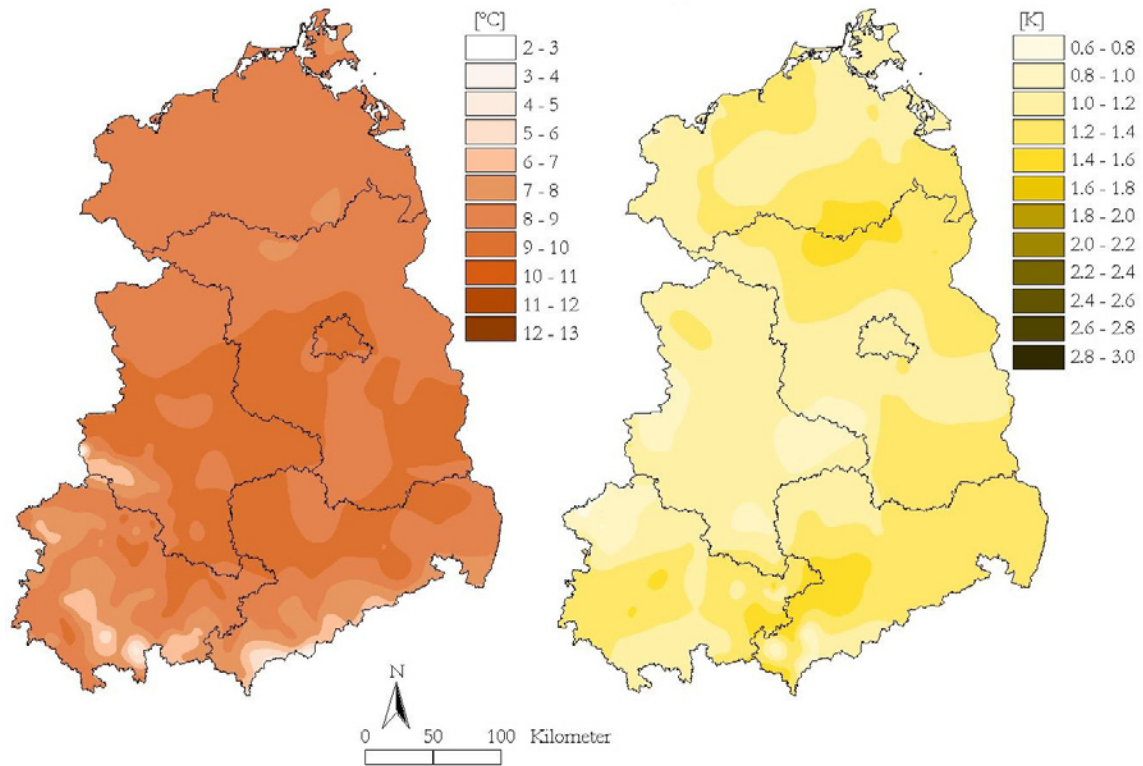
Tabelle 1: Meteorologische Größen auf Tageswertbasis

Messwert	Einheit	Abkürzung
Lufttemperatur (Tagesmaximum, -mittel, -minimum)	°C	Tmax, Tmit, Tmin
Niederschlag	mm	Nied
Relative Luftfeuchte	%	Relf
Luftdruck	hPa	Ludr
Wasserdampfdruck	hPa	Dadr
Sonnenscheindauer	h	Sonn
Bedeckungsgrad	1/8	Bewo
Globalstrahlung	J/cm ²	Gstr
Windgeschwindigkeit	m/s	Wind
Klimatologische Wasserbilanz	mm	Wabi

1.2.1.1 Analyseergebnisse für einzelne Klimavariablen

1.2.1.1.1 Lufttemperatur

In der Abbildung 1a ist die mittlere räumliche Struktur der Temperaturverteilung angegeben. Man erkennt eine Dreiteilung in den Temperaturwerten. Die Küste und das sich anschließende Binnentiefland bis auf eine Linie nördlich Berlins weist ein langjähriges Mittel von ca. 8–9 °C auf. Die sich danach bis zu den Mittelgebirgsrändern erstreckende Region ist um etwa 1 K wärmer. Die Temperaturverteilung in den Mittelgebirgen hängt von der jeweiligen Höhenlage ab. Im Beobachtungszeitraum nimmt im gesamten Gebiet die Temperatur zu. Der Anstieg liegt je nach Region zwischen 0.7 und 1.5 K (s. Abb. 1b) wobei im nördlichen Brandenburg und in Westsachsen die größte und im Harz und im Eichsfeld die geringste Erwärmung auftrat. Bemerkenswert ist allerdings, dass die Temperaturzunahme im Winter etwa doppelt so groß ist wie im Sommer (hier nicht dargestellt).

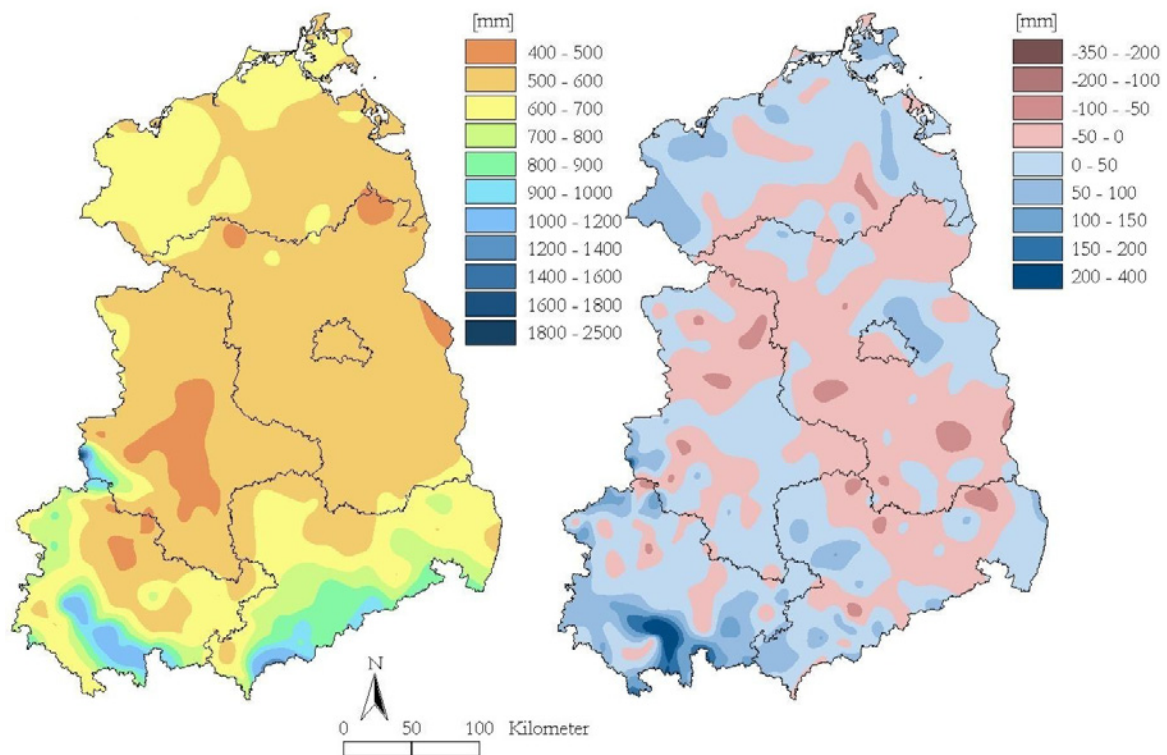


a) PERIODENMITTEL

b) PERIODENÄNDERUNG

Abbildung 1: Jahresmittel der Lufttemperatur in Ostdeutschland

a) Zeitraum 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)



a) PERIODENMITTEL

b) PERIODENÄNDERUNG

Abbildung 2: Jahressumme des Niederschlags in Ostdeutschland

a) Zeitraum 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)

Bemerkenswert sind auch die Änderungen in den Häufigkeiten der temperaturbezogenen Ereignistage. Im Mittel beträgt die Anzahl der Sommertage pro Jahr ($T_{\max} \geq 25^{\circ}\text{C}$) 27 bei einem Anstieg um 50% über den Gesamtzeitraum. Bei den heißen Tagen ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) liegt das Mittel bei 4 und der Anstieg bei 100%.

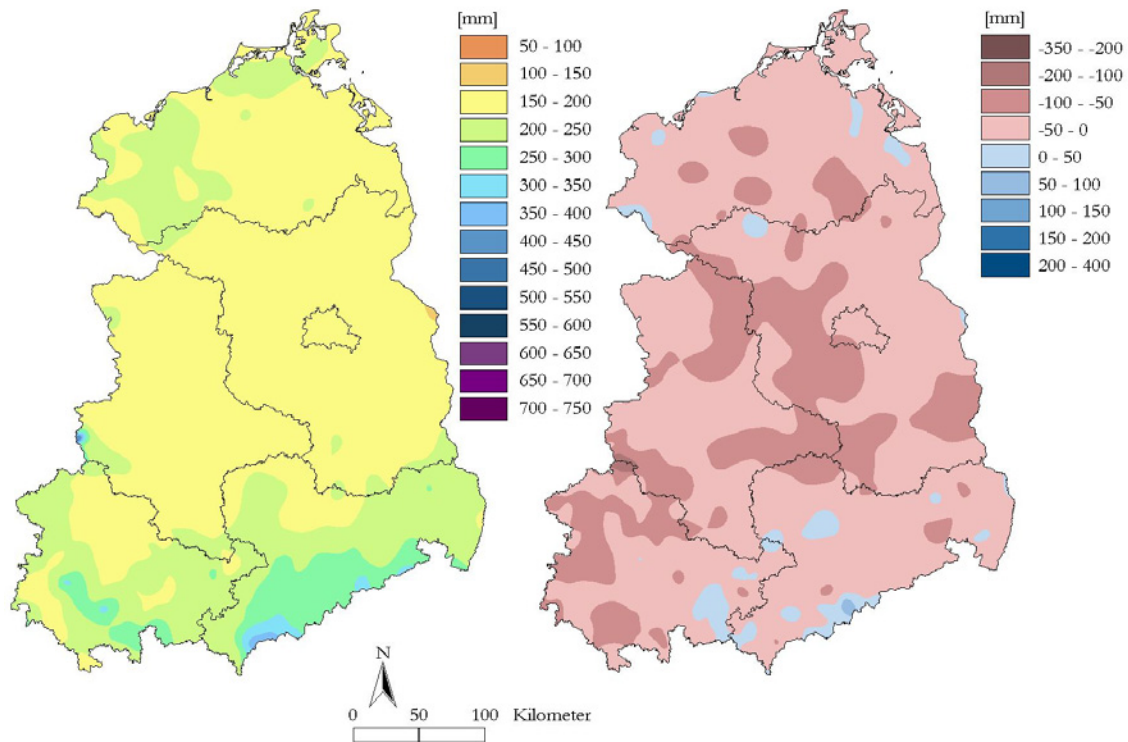
Dagegen haben die Eistage ($T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$) um 9 Tage abgenommen bei einem Mittelwert von 25. Ein analoges Verhalten ist bei den Frosttagen ($T_{\min} \leq 0^{\circ}\text{C}$) zu beobachten. Sie treten im Mittel 88-mal auf und haben im Beobachtungszeitraum einen Rückgang um 22 Tage zu verzeichnen.

Es kann festgestellt werden, dass es im Zeitraum 1951-2003 zu einer Temperaturerhöhung gekommen ist, die zum Teil deutlich über dem mittleren globalen Temperaturanstieg liegt. Damit geht einher, dass die Winter milder und die Sommer wärmer geworden sind, wobei die wintertypischen Ereignistage abgenommen, die sommertypischen zugenommen haben.

1.2.1.1.2 Niederschlag

Abbildung 2a zeigt die räumliche Verteilung des Jahresniederschlags im Untersuchungsgebiet. Die höchsten Niederschläge fallen in den Gipfellagen der Mittelgebirge. Ansonsten ist das gesamte Gebiet wenig strukturiert mit mittleren Niederschlagssummen zwischen 500 mm und 700 mm bis auf die Leelage des Harzes mit weniger als 500 mm.

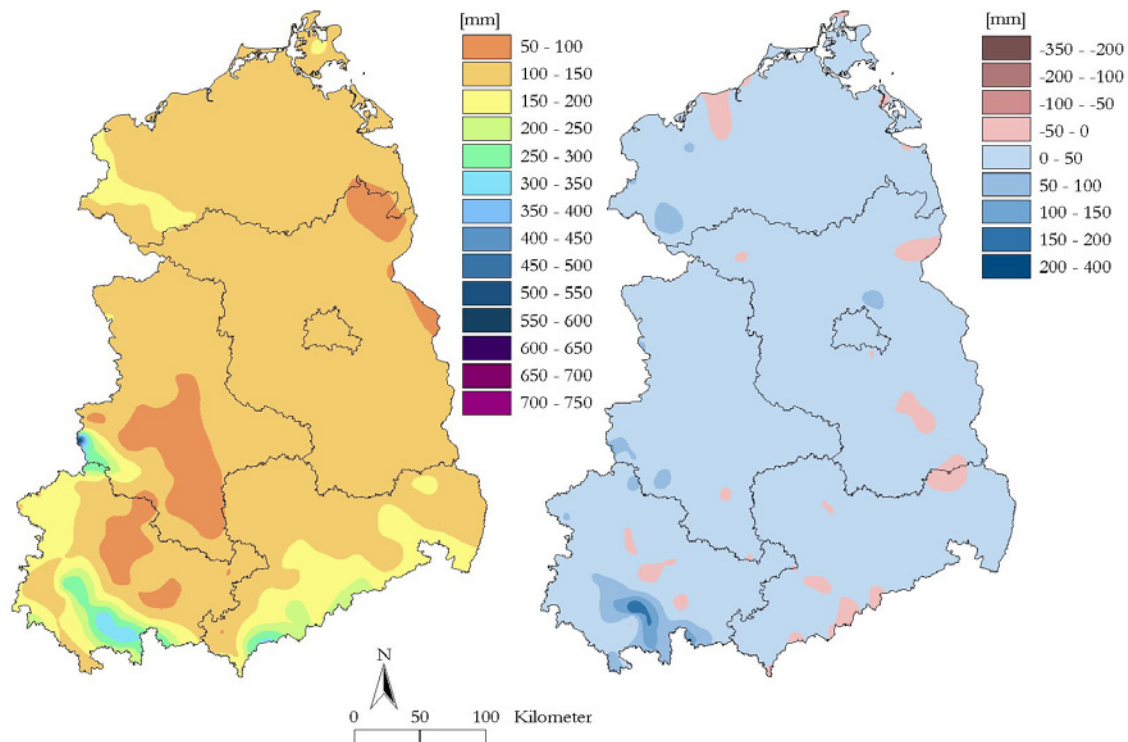
Das Gesamtgebiet zeichnet sich dadurch aus, dass es Regionen mit leicht positivem bzw. leicht negativem Trend gibt, der in keinem Fall statistisch zu sichern ist (Abb. 2b). Eine Ausnahme bilden die Hochlagen des Thüringer Waldes mit ihren stark positiven Trends. Die uneinheitliche Tendenz spiegelt sich auch in den Trends der Häufigkeit der Tage ohne Niederschlag und der der Starkniederschlagstage wider, deren Vorzeichen von Teilgebiet zu Teilgebiet unterschiedlich ist und die meistens statistisch nicht zu sichern sind.



a) PERIODENMITTEL

b) PERIODENÄNDERUNG

Abbildung 3: Niederschlagssumme während des hydrologischen Sommers (Mai – Oktober) in Ostdeutschland a) 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)



a) PERIODENMITTEL

b) PERIODENÄNDERUNG

Abbildung 4: Niederschlagssumme während des hydrologischen Winters (November – April) in Ostdeutschland, a) 1951–2003, b) Änderung in der Gesamtperiode (linearer Trend)

Diese über das Jahr relativ ausgeglichene Bilanz ändert ihren Charakter, wenn man Sommer und Winter getrennt betrachtet. Im Sommer ist dann, bis auf geringe Ausnahmen, ein Rückgang des Niederschlags zu verzeichnen, im Winter dagegen eine Zunahme (Abb. 3a, b und 4a, b), wobei die Zunahme meist geringer ausfällt (außer in den höheren Lagen des Thüringer Waldes) als betragsmäßig der Rückgang im Sommer.

1.2.1.1.3 Klimatische Wasserbilanz

Unter der klimatischen Wasserbilanz versteht man die Differenz zwischen gefallenem Niederschlag und der potentiellen Verdunstung. Sie ist ein Indikator für die Wasserverfügbarkeit einer Region. Im Referenzzeitraum ist die Wasserbilanz mit einem Wert von 125.9 mm insgesamt positiv. Dabei weist der meteorologische Sommer (Juni-August) eine negative Bilanz mit einem Wert von -84.3 mm bei gleichzeitig überwiegend negativem Trend auf. Der meteorologische Winter (Dezember-Februar) besitzt sowohl eine positive Bilanz mit 138.0 mm als auch einen überwiegend positiven Trend.

1.2.1.2 Analysezusammenfassung

Ostdeutschland weist *zwischen 1951 und 2003* deutliche Klimaänderungen auf. Die relevantesten Änderungen aus der Klimafolgen Perspektive sind:

- Temperaturanstieg im Jahresmittel je nach Region bis zu 1.5 K,
- Rückgang der Frosttage/Eistage im Mittel bis zu 22/25 Tagen bezogen auf das Jahr,
- Zunahme der Sommertage/heiße Tage im Mittel bis zu 27/4 Tagen bezogen auf das Jahr,
- uneinheitliche Entwicklung der Jahressummen des Niederschlags und Umverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter ,
- Rückgang der Wasserbilanz im Sommer und im Jahr.

1.2.2 Transientes Klimaszenarium für den Zeitraum 2004-2055

Unter einem transienten Szenarium versteht man die klimatische Entwicklung über einen definierten Zeitraum (hier 2004–2055). Entsprechend der Modellphilosophie wurde die zukünftige Temperaturentwicklung aus den Ergebnisdaten des globalen Klimamodells ECHAM5 abgeleitet. Die gitterbezogenen Temperaturänderungen wurden auf 5 für Ostdeutschland repräsentative Klimastationen (Schwerin, Potsdam, Waren, Grebenhain und Seesen) übertragen. Bei der Übertragung wurden der Trendwert der Gitterzelle, in der sich die jeweilige Station befindet, und zusätzlich die Trendwerte aller neun umgebenden Gitterzellen berücksichtigt. Die Abmaße der Gitterzellen sind $1.8^\circ \times 1.8^\circ$, was ca. einem rechteckigen Flächenstück mit 200 km (Nord-Süd) x 180 km (Ost-West) Seitenlänge entspricht.

Nach diesem Szenarium beträgt die Temperaturänderung bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts 2.0 und 2.2 K je nach Teilregion. Mit diesen Werten als Leitgröße wurde die Szenarienberechnung mit dem regionalen statistischen Klimamodell STAR II durchgeführt (siehe Abschnitt Klima im Kapitel Material und Methoden).

1.2.2.1 Mittlere Verhältnisse, Ereignistage und Änderungen

In der Tabelle 2 sind für verschiedene meteorologischen Größen und Ereignistage die Gebietsmittelwerte des Referenzzeitraums 1951-2003 und der Szenarienzeiträume 2026-2035 und 2046-2055 sowie die Differenzen der Mittelwerte zwischen den Szenarienzeiträumen und

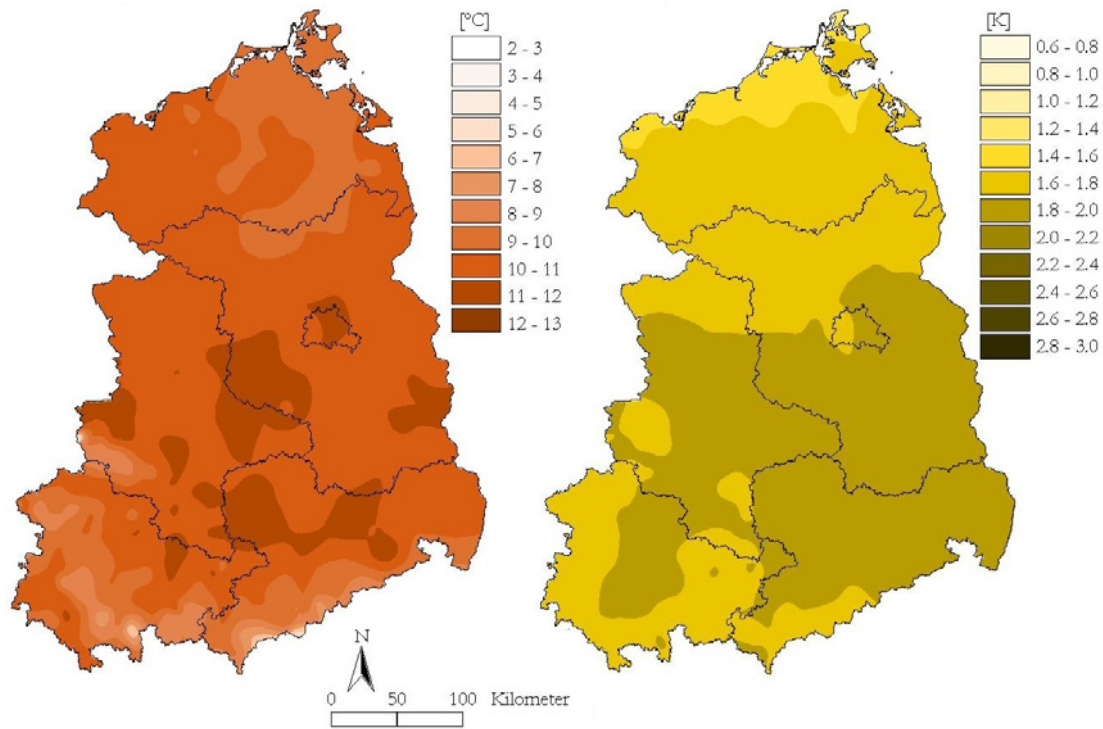
dem Referenzzeitraum angegeben. Folgende wesentliche Entwicklungstendenzen sind der Tabelle 2 zu entnehmen: Die Temperatur nimmt um 2 bis 3 K zu, wobei die Änderung beim Tagesmaximum stärker ausfällt als beim Tagesminimum. Die Jahressumme des Niederschlags verringert sich bis zum Zeitraum 2026-2035 nur unbedeutend. Gegen Ende des Betrachtungszeitraumes (2046-2055) dagegen geht der Niederschlag leicht zurück. Die schon im Zeitraum 1951–2003 beobachtete jahreszeitliche Differenzierung, d.h. Abnahme des Niederschlags im Sommer und Zunahme im Winter, bleibt erhalten. Damit verschlechtert sich die klimatische Wasserbilanz im Sommer und im Jahr deutlich, da neben dem Niederschlagsrückgang noch die Faktoren beschleunigte Erwärmung und Zunahme der Sonnenscheindauer bzw. der Globalstrahlung hinzukommen.

Ebenfalls beibehalten wird, wie nicht anders zu erwarten, der Trend zur Zunahme der heißen und der Sommertage sowie einer Abnahme der Frost- und Eistage. Die Tage ohne Niederschlag nehmen um ca. 6 bzw. 7% zu, während die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag in etwa gleich bleibt.

Betrachtet man die räumlichen Strukturen der mittleren Verhältnisse und ihrer Änderungen ergeben sich zum Teil erhebliche Unterschiede zum Gebietsmittel. Für die kartenmäßige Darstellung wurden nur die wichtigsten Größen Temperatur und Niederschlag ausgewählt.

Tabelle 2: Gebietsmittel ausgewählter meteorologischer Variablen für den Referenzzeitraum (1951-2003), zwei Szenarienzeiträume (2026-2035, 2046-2055) und die Mittelwertdifferenzen je Szenariozeitraum zur Referenzperiode

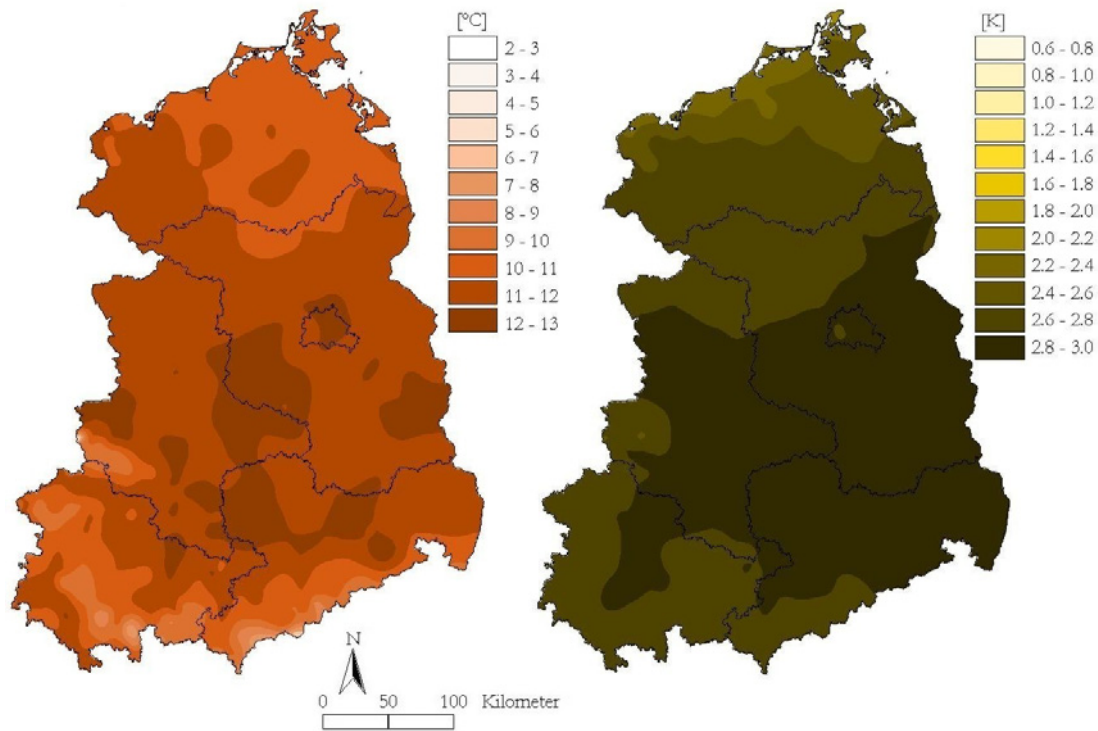
Variable	Mittelwerte* und Mittelwertdifferenzen**				
	1951-2003*	2026-2035*	2026-35 / 1951-03**	2046-2055*	2046-55 / 1951-03**
T _{max}	12.4	14.5	2.1	15.5	3.1
T _{mit}	8.4	10.1	1.7	11.1	2.7
T _{min}	4.6	6.1	1.5	6.9	2.3
Nied _{Jahr}	708.2	708.0	-0.2	697.6	-10.6
Nied _{Sommer}	217.2	199.8	-17.4	174.2	-43.0
Nied _{Winter}	164.4	202.0	37.6	204.7	40.3
Wabi _{Jahr}	125.9	38.6	-87.3	-19.2	-145.1
Wabi _{Sommer}	-84.2	-131.5	-47.3	-173.1	-88.9
Wabi _{Winter}	138.0	168.9	30.9	171.5	33.5
Relf	79.5	77.4	-2.1	77.4	-2.1
Ludr	991.9	992.0	0.1	992.5	0.6
Dadr	9.4	10.0	0.6	10.6	1.2
Sonn	4.3	4.8	0.5	5.0	0.7
Bewo	5.4	5.2	-0.2	5.2	-0.2
Gstr	981.5	1065.9	84.4	1107.0	125.5
Wind	2.6	2.6	0.0	2.6	0.0
HTg	4.2	9.2	5.0	11.3	7.1
STg	26.7	44.1	17.4	55.6	28.9
FTg	87.9	56.7	-31.2	44.6	-43.3
Etg	25.1	9.7	-15.4	5.9	-19.2
Tg _{ON}	184.9	196.1	11.2	197.9	13.0
Tg _{SN}	17.7	17.9	0.2	17.5	-0.2



a) MITTELWERT 2026-35

b) DIFFERENZ 2026-35 / 1951-2003

Abbildung 5: Jahresmitteltemperatur, a) Periodenmittel für die Szenariensperiode 2026 – 35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003



a) MITTELWERT 2046-55

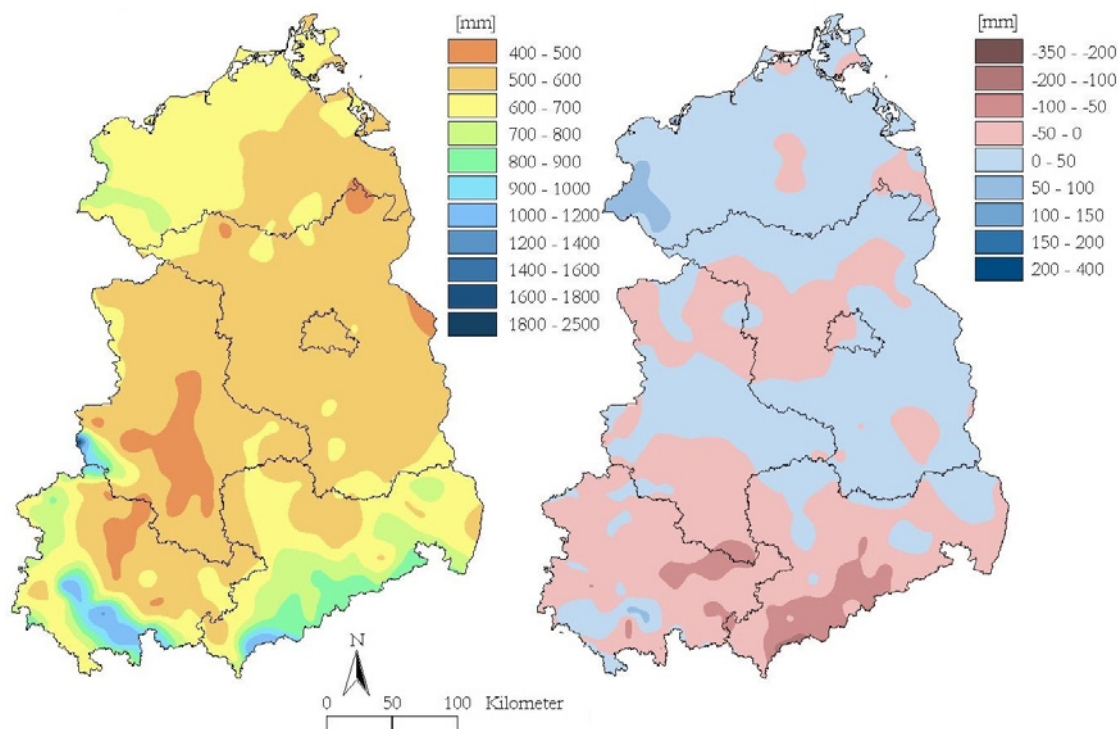
b) DIFFERENZ 2046-55 / 1951-2003

Abbildung 6: Jahresmitteltemperatur, a) Periodenmittel für die Szenariensperiode 2046 – 55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003

Die räumliche Verteilung der Temperaturmittel für den Zeitraum 2026–2035 ist der Abbildung 5a zu entnehmen. Die zentralen Regionen Ostdeutschlands, die schon für den Zeitraum 1951-2003 als die wärmsten ausgewiesen sind, weisen den stärksten Temperaturanstieg auf. Dies wird auch anhand der Differenzenkarte (Abb. 5b) deutlich.

Diese Entwicklung verstärkt sich noch, betrachtet man den Zeitraum 2046–2055 im Vergleich zum Referenzzeitraum (Abb. 6a und 6b).

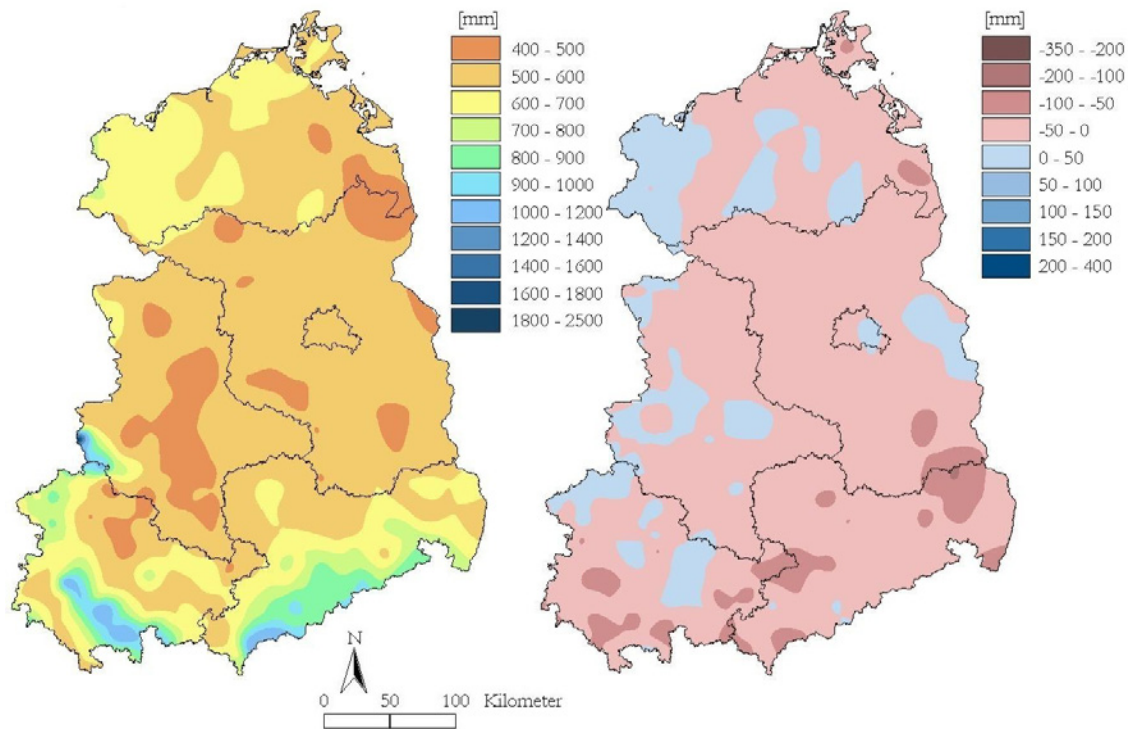
Für die Niederschlagsentwicklung ergibt sich ein deutlich differenzierteres Bild. Dabei bleibt die Grundstruktur der mittleren räumlichen Niederschlagsverteilung für den gesamten Zeitraum von 1951 bis 2055 im Wesentlichen erhalten. Dies gilt allerdings nicht mehr, wenn man die tendenzielle Entwicklung des Niederschlags betrachtet. Beobachtet man für den Referenzzeitraum im zentralen Teil Ostdeutschlands einen schwachen Rückgang des Niederschlags und in den anderen Regionen eine schwache Zunahme, so weist der Zeitraum 2026-35 für nahezu das gesamte Binnentiefland eine leichte Zunahme des Niederschlags auf und im Mittelgebirgsvorland und den Mittelgebirgen selbst einen teilweise deutlichen Rückgang (Abb. 7 a, b).



a) MITTELWERT 2026-35

b) DIFFERENZ 2026-35 / 1951-2003

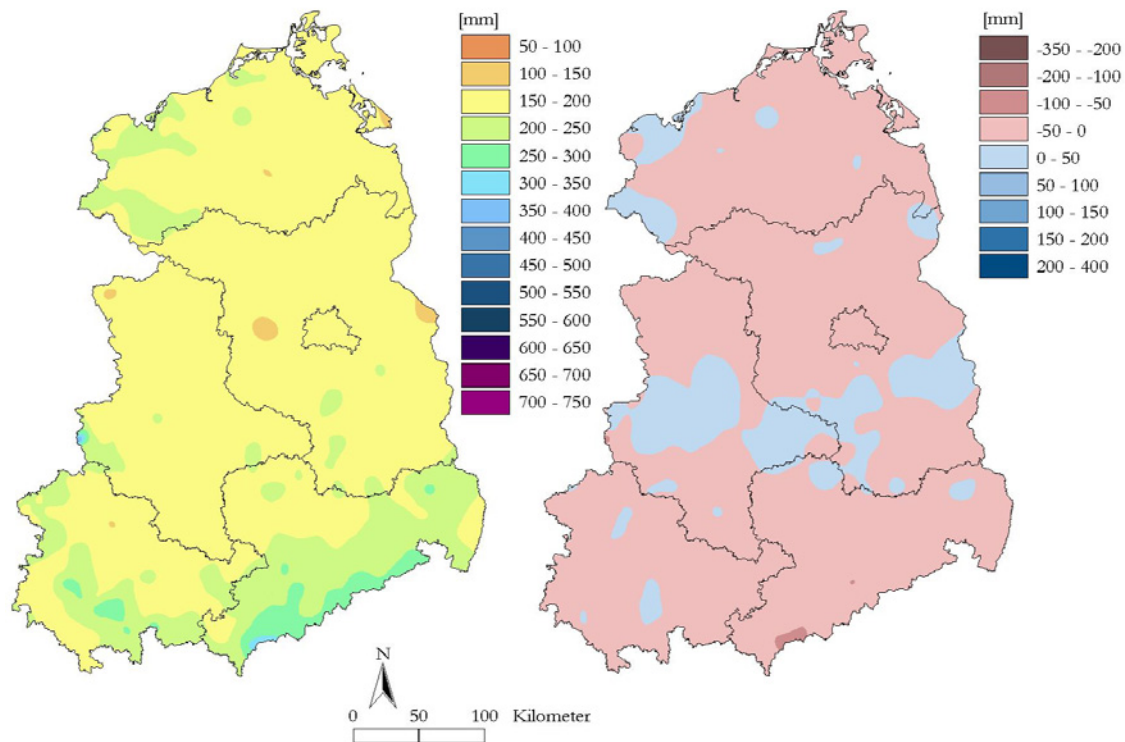
Abbildung 7: Jahresniederschlagssumme, a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003



a) MITTELWERT 2046-55

b) DIFFERENZ 2046-55 / 1951-2003

Abbildung 8: Jahresniederschlagssumme, a) Periodenmittel für die Szenariensperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003



a) MITTELWERT 2026-35

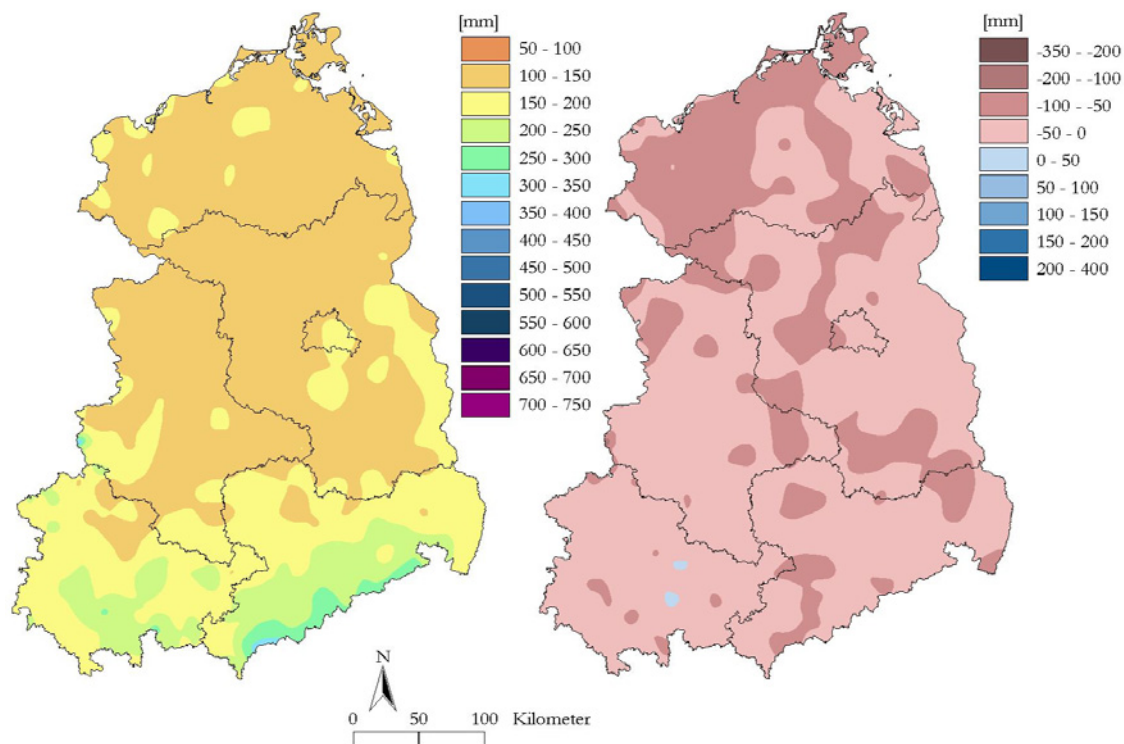
b) DIFFERENZ 2026-35 / 1951-2003

Abbildung 9: Niederschlagssumme für den hydrologischen Sommer (Mai – Oktober), a) Periodenmittel für die Szenariensperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003

Bis 2046-55 verändert sich die Situation nochmals deutlich: Große Teile des Gebietes insbesondere im Süden und Osten sind von einem deutlichen Niederschlagsrückgang betroffen (Abb. 8a, b).

Wie im Beobachtungszeitraum sind die Tendenzen im Sommer und Winter konträr.

Während im Winter die positiven Differenzen zwischen den beiden Zukunftszeiträumen und 1951-2003 größenordnungsmäßig etwa gleich bleiben (Abb. 11a, b und 12a, b), sind sie im Sommer für die Differenz 2026-2035 / 1951-2003 räumlich indifferent und vom Betrag her klein (Abb. 9a, b), für 2046-2055 / 1951-2003 dagegen deutlich negativ, vor allem im Nordwesten (Abb. 10a, b).



a) MITTELWERT 2046-55

b) DIFFERENZ 2046-55 / 1951-2003

Abbildung 10: Niederschlagssumme für den hydrologischen Sommer (Mai – Oktober), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003

Unter diesem Szenarium wird es in Ostdeutschland in der Mitte des 21. Jahrhunderts trockener sein als in der zweiten Hälfte des vorhergehenden Jahrhunderts.

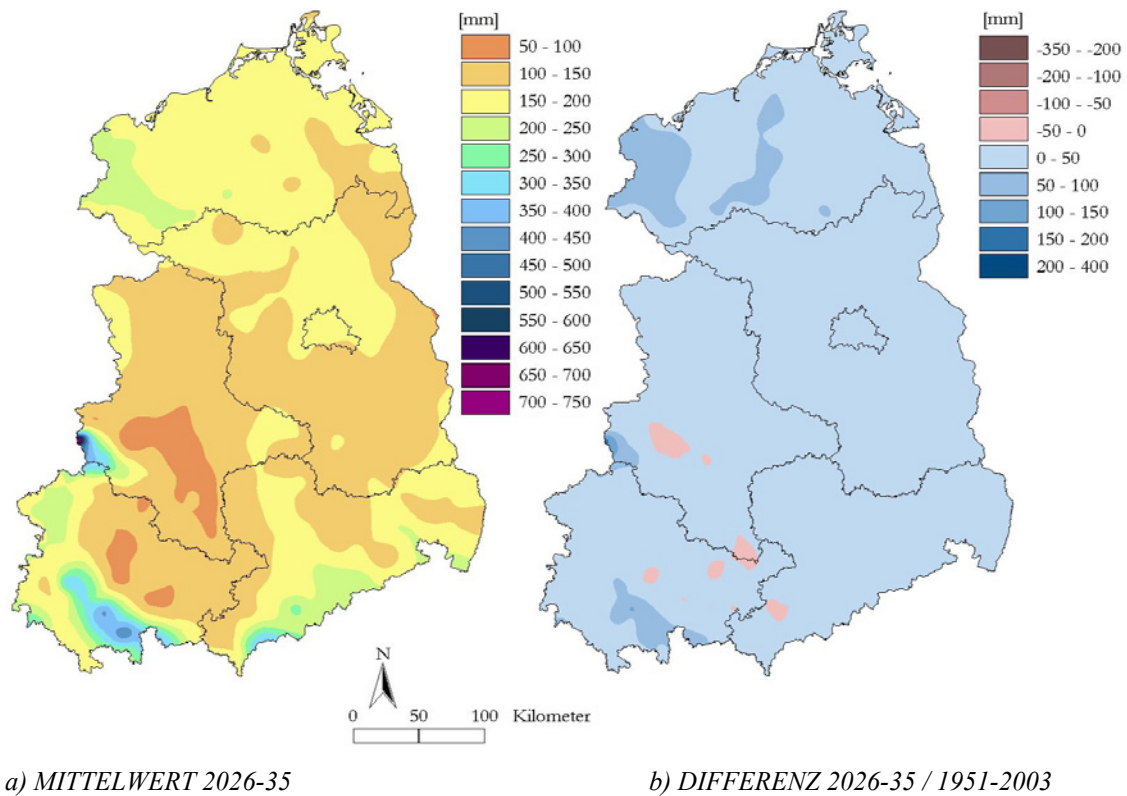


Abbildung 11: Niederschlagssumme für den hydrologischen Winter (November – April), a) Perioden-mittel für die Szenarienperiode 2026-35, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2026-35 und 1951-2003

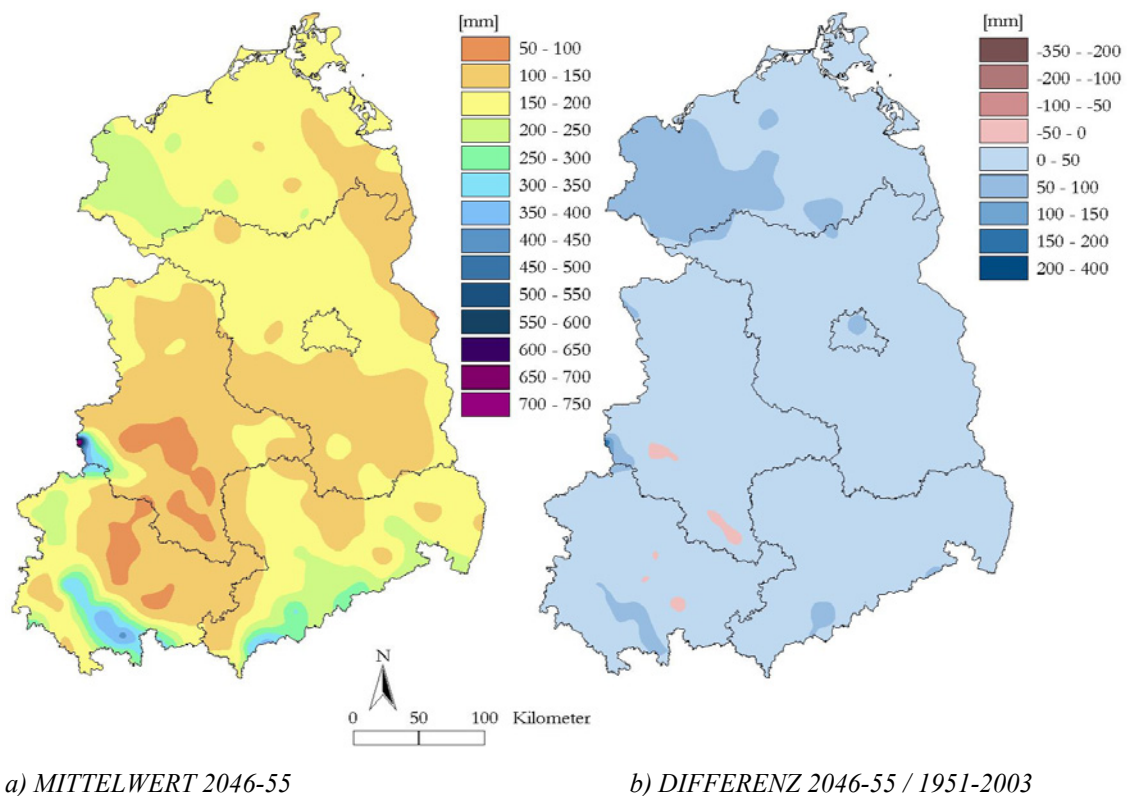


Abbildung 12: Niederschlagssumme für den hydrologischen Winter (November – April), a) Periodenmittel für die Szenarienperiode 2046-55, b) Mittelwertdifferenzen im Vergleich der Perioden 2046-55 und 1951-2003

1.2.2.2 Differenzen

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse für die Zeiträume 2024-45 und 2034-55 im Vergleich zur Periode 1982-2003 dargestellt. Dies ist eine Vergleichsperspektive, die auch in den anschließenden Kapiteln zu den Klimafolgen wiederholt genutzt wird. Im Wesentlichen werden die bereits in Tabelle 2 angegebenen und diskutierten Ergebnisse wiedergespiegelt. Es gibt allerdings auch Unterschiede, die auf die unterschiedliche Wahl der Bezugszeiträume zurückzuführen sind. Als Beispiel kann hier die klimatische Wasserbilanz für das Jahr angeführt werden. Für den Bezugszeitraum 1951-2003 beträgt diese 125.9 mm, für den innerhalb dieses Zeitraumes liegenden Abschnitt 1982-2003 allerdings nur 31.1 mm. Dies wirkt sich auf die Differenzenbildung aus, die im ersten Vergleich (1951-2003 und 2026-2035) noch eine positive Wasserbilanz von 38.6 mm ausweist, im zweiten Fall dagegen (1982-2003 / 2024-2045) eine negative von -45.6 mm. Das heißt, dass bei der Interpretation der Szenarienergebnisse immer der Bezugszeitraum berücksichtigt werden muss, um mögliche Fehleinschätzungen zu vermeiden.

Tabelle 3: Gebietsmittel ausgewählter meteorologischer Parameter für die Zeiträume 2024-45 und 2034-55 im Vergleich zum Zeitraum 1982-2003, Szenarienzeiträume und die Differenzen zwischen Szenarien- und Referenzzeitraum

Variable	Mittelwerte* und Mittelwertdifferenzen**				
	1982-2003*	2024-2045*	2024-45 / 1982-03**	2034-2055*	2034-55 / 1982-03**
T _{max}	12.8	14.6	1.8	15.1	2.3
T _{mit}	8.8	10.2	1.4	10.7	1.9
T _{min}	5.0	6.2	1.2	6.6	1.6
Nied _{Jahr}	638.1	634.9	-3.2	626.8	-11.3
Nied _{Sommer}	196.2	193.2	-3.0	177.7	-18.5
Nied _{Winter}	149.4	152.0	2.6	157.3	7.9
Wabi _{Jahr}	31.1	-45.6	-76.7	-79.8	-110.9
Wabi _{Sommer}	-116.1	-140.4	-24.3	-166.5	-50.4
Wabi _{Winter}	121.0	118.5	-2.5	123.5	2.5
Relf	78.4	77.3	-1.1	77.0	-1.4
Ludr	993.0	992.9	-0.1	993.2	0.2
Dadr	9.4	10.0	0.6	10.3	0.9
Sonn	4.5	4.9	0.4	5.0	0.5
Bewo	5.3	5.1	-0.2	5.1	-0.2
Gstr	1001.0	1079.0	78.0	1100.3	99.3
Wind	2.9	2.8	-0.1	2.8	-0.1
HTg	6.0	8.7	2.7	10.7	4.7
STg	33.2	44.3	11.1	51.5	18.3
FTg	84.0	57.7	-26.3	51.9	-32.1
Etg	24.3	12.2	-12.1	9.8	-14.5
Tg _{ON}	190.1	204.1	14.0	205.9	15.8
Tg _{SN}	14.8	15.2	0.4	14.8	0.0

1.2.3 Haupttendenzen

Die bereits im Zeitraum 1951-2003 beobachteten Tendenzen setzen sich zum Teil auch zukünftig mit unterschiedlicher Ausprägung fort. Als wesentlich zu betrachten sind folgende Entwicklungen:

- Die Temperatur steigt je nach Region im Mittel bis 2026-35 um 1.0 K bis zu 1.7 K an, danach bis 2046-55 nochmals um bis zu 1.0 K.
- Der Niederschlag nimmt gegen Ende des Szenarienzeitraumes leicht ab. Die Verschiebung der Niederschlagsmuster, d.h. die Abnahme der Sommerniederschläge und die Zunahme der Winterniederschläge wird sich weiter fortsetzen.
- Mit der projizierten Entwicklung von Temperatur und Niederschlag ist ein deutlicher Rückgang der Wasserbilanz verbunden.
- Die Zunahme des Wasserdampfdrucks wird durch die Temperaturerhöhung überkompensiert, so dass die relative Luftfeuchte sinkt.
- Im Zusammenhang mit einer Zunahme des Luftdrucks stehen die erhöhte Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie ein leichter Rückgang der Bewölkung.

1.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bei einer Fortsetzung des CO₂-Anstieges bis auf 542 ppm im Jahr 2055 wird sich der seit 1951 beobachtete Temperaturanstieg in Ostdeutschland fortsetzen. Es kann mit einem nochmaligen Temperaturanstieg um bis zu 2.7 K gerechnet werden. In Folge der Erwärmung vermindert sich die klimatische Wasserbilanz. Die in der Vergangenheit beobachtete Umverteilung von Niederschlag aus dem Sommer in den Winter findet sich als Tendenz auch in der Szenarienperiode. Sie ist besonders ausgeprägt zum Ende des betrachteten Zeitraums in der Dekade 2046-55. Von einem kontinuierlichen Rückgang der Jahresniederschläge bzw. einer sukzessiv zunehmenden Umverteilung der Niederschläge aus dem Sommer in den Winter kann jedoch nicht ausgegangen werden. Zwischenzeitlich gibt es relativ feuchte Abschnitte mit vergleichsweise hohen Sommerniederschlägen. Problematisch sind Phasen zurückgehender Sommer- und Jahresniederschläge in der Zukunft, vor allem durch ihre Kombination mit dem sich erhöhenden Verdunstungspotenzial der Landschaft als Folge der Temperaturerhöhung.

2 PROJEKTIONEN ZUR KLIMABEDINGTEN ÄNDERUNG DER ERTRÄGE VON EINJÄHRIGEN SOMMER- UND WINTERKULTUREN DES ACKERLANDES AM BEISPIEL VON SILOMAIS UND WINTERWEIZEN

F. Wechsung, A. Lüttger und F. F. Hattermann

2.1 FRAGESTELLUNG

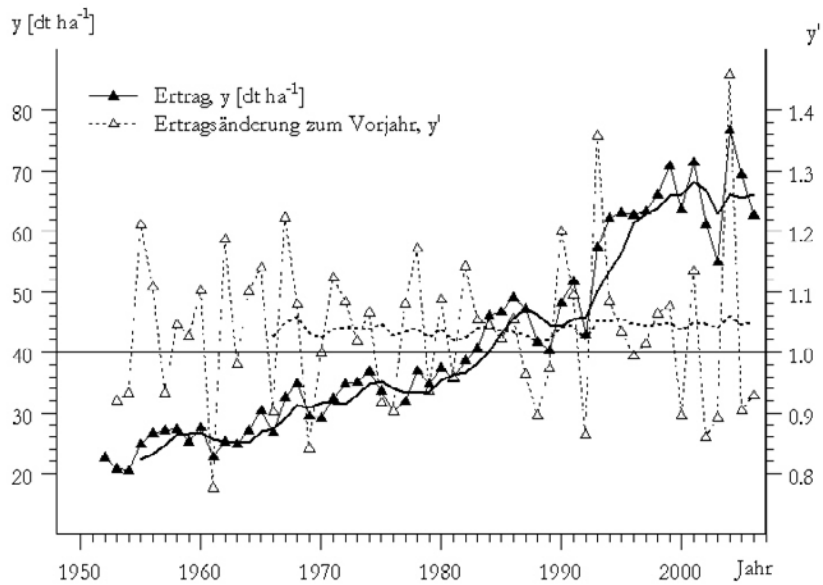
Steigende Temperaturen führen zu einem Anstieg der potenziellen Verdunstung. In Kombination mit möglichen Niederschlagsrückgängen kann die Ertragsfähigkeit sowohl der Sommer- als auch der Winterkulturen auf den Ackerstandorten negativ beeinflusst werden. Kompensierend wirkt der Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration, welche neben ihrer mittelbaren Wirkung über das Klima auch unmittelbar das Pflanzenwachstum beeinflusst. Ein Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration führt über eine höhere Photosyntheseleistung und einen Anstieg der Wassernutzungseffizienz zu einer Ertragssteigerung. Im Folgenden soll abgeschätzt werden, welche Folgen das eingangs entwickelte Klimaszenarium auf die klimatischen Ertragspotenziale der Ackerstandorte Ostdeutschlands hat. Exemplarisch werden hierzu die Kulturen Winterweizen und Silomais betrachtet. Die Ertragspotenziale beziehen sich auf die gegenwärtig in der landwirtschaftlichen Praxis dominierenden Anbautechnologien und Sorten. Wechselwirkungen zwischen Klimawandel und dem technologischen, insbesondere dem züchterischen Fortschritt, werden nicht berücksichtigt. Die Abschätzung erfolgt unter Nutzung von Ertragsmodellen. Der Darstellung und Diskussion von Simulationsergebnissen sind Betrachtungen zur historischen Ertragsentwicklung und den in der Vergangenheit beobachteten Zusammenhängen zwischen Klima und Ertrag vorangestellt.

Die verwendete Datengrundlage, die genutzten Modellansätze, sowie Details der Modellbildung und Ergebnisse der Modellvalidierung sind im Kapitel Material und Methoden im Abschnitt Landwirtschaft darstellt.

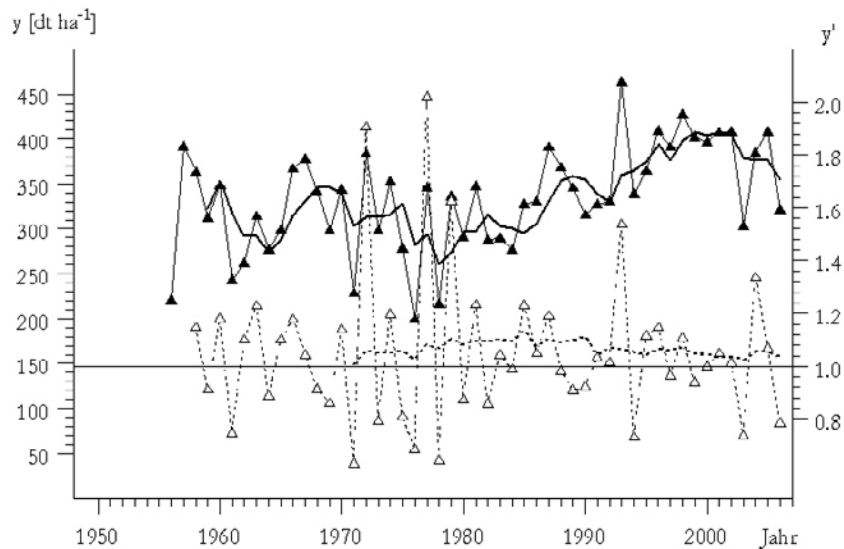
2.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

2.2.1 Ertragssteigerungsraten zwischen 1951 und 2006

Insgesamt konnten die Erträge der einjährigen Ackerkulturen in Ostdeutschland im Verlauf der letzten fünf Dekaden erheblich gesteigert werden. Die Entwicklung der jährlichen Durchschnittserträge und der Ertragsänderungsraten für Winterweizen und Silomais veranschaulicht dies in Abb. 13 exemplarisch. Die dargestellte Entwicklung bei Silomais und Winterweizen ist typisch für das Spektrum der einjährigen Kulturen. In Tabelle 4 sind die durchschnittlichen Ertragsänderungsraten je Dekade gruppiert nach Sommer- und Winterkulturen zusammengestellt. Der Ertragsanstieg ist bei den Winterkulturen deutlich größer als bei den Sommerkulturen. Das züchterische und agronomische Potenzial zur Ertragssteigerung war hier jedoch auch größer als bei den meisten Sommerkulturen.



a) WINTERWEIZEN



b) SILOMAIS

Abbildung 13: Entwicklung des Ertrages (y , durchgezogene Linie) und der Ertragsänderungsrate (y' , gestrichelte Linie) von a) Winterweizen und b) Silomais in Ostdeutschland im Zeitraum 1951-2006 mit dem vierjährigen gleitenden Durchschnitt für y (durchgezogene fette Linie) und dem 14jährigen gleitenden Durchschnitt für y' (gestrichelte fette Linie).

Insbesondere bei Silomais, Kartoffeln und Zuckerrüben war eine Ertragssteigerung an die Erhöhung der Gesamtbiomasse gebunden. Bei den Getreiden - so zeigte sich - konnte durch die Erhöhung des Ernteanteils (hier Kornanteil) an der Gesamtbiomasse hingegen das Ertragsniveau noch zusätzlich angehoben werden. Bei Silomais, Kartoffeln und Zuckerrüben ist der Ernteteil an der Gesamtbiomasse der Pflanzen schon relativ hoch. Eine weitere

Steigerung ist kaum noch möglich. Die Gesamtbiomasse aller Kulturen konnte zwar durch eine Optimierung der Wachstumsbedingungen (Bodenbearbeitung, Nährstoffversorgung, Pflanzenschutz, Bestandesführung) erhöht werden. Der hierdurch erzielte Effekt erreichte jedoch nicht die Größenordnung einer kombinierten Beeinflussung von Ernteanteil und Wachstumsbedingungen, wie sie bei den Wintergetreidearten erfolgte.

Tabelle 4: Ertragszuwachsrate (%) von Sommer- und Winterkulturen in Ostdeutschland für den Zeitraum 1952–2006

Zeitabschnitt	Winterkulturen	Sommerkulturen
	(Weizen, Gerste, Roggen)	(Kartoffeln, Zuckerrüben, Mais)
1952 - 1960	14 %	2 %
1961 - 1970	11 %	4 %
1971 - 1980	29 %	-3 %
1981 - 1990	14 %	6 %
1991 - 2000	30 %	16 %
2001 - 2006	5 %	-2 %

Die Ertragsänderung variierte in der Vergangenheit stark zwischen den Dekaden. Auf Grund der Periodenlänge sollten klimatische Faktoren hierfür von untergeordneter Bedeutung sein. Ungeachtet dessen zeigten Analysen, dass die Schwankungen der Ertragssteigerungsraten bei Winterkulturen teilweise signifikant mit den Wachstumsbedingungen im Winter korrelierten. Signifikant positive Korrelation gab es zum Beispiel zwischen den Dekadentrends beim Weizenertrag einerseits und dem Winterniederschlag ($p \leq 0.01$) und der potenziellen Winterverdunstung ($p \leq 0.05$) andererseits, wenn die mittleren Werte für Ostdeutschland verglichen wurden. Der Winterweizenertrag hat sich demnach in Dekaden mit zunehmend wärmeren und feuchteren Wintern besonders positiv entwickelt.

Der in Tabelle 4 deutlich werdende Rückgang der Dekadentrends für Sommer und Winterkulturen nach 2000 könnte ein frühes Indiz für die allgemein erwartete Minderung bei den Ertragssteigerungsraten sein (Amthor, 1998, Hafner, 2003). Die Abbildungen 13a und 13b zeigen aber zu mindestens für Winterweizen und Silomais keine eindeutigen Tendenzen in dieser Richtung.

2.2.2 Einfaktorielle Zusammenhänge zwischen Ertrags- und Klimavariabilität in der Vergangenheit

Die Karten in Abbildung 14 und 15 zur räumlichen Verteilung der Korrelationen zwischen ausgewählten Kenngrößen der jährlichen Klima- und Ertragsänderung von Silomais und Winterweizen geben einen ersten Eindruck der generellen Empfindlichkeit ostdeutscher Ackerstandorte gegenüber Klimawandel. Es handelt sich dabei um die gleichen Kenngrößen der jährlichen Klimaänderung, die auch in der statistischen Modellbildung berücksichtigt wurden (siehe Kapitel Material und Methoden, Tabelle 12).

Sowohl beim Silomais als auch beim Winterweizen gibt es einen relativ großen Flächenbereich mit negativen Korrelationen zwischen den jährlichen Änderungen von Ertrag (y') und potenzieller Verdunstung im Zeitraum Mai bis Juli (Etp'MJJ). Silomais reagiert jedoch deutlich positiver und damit stärker beim Ertrag auf eine Niederschlagszunahme in der

Periode Mai-Juni-Juli (Nied'MJJ) als Winterweizen (Abb. 14a und 15a). Die Niederschlagshöhe in diesem Zeitraum ist für die Höhe des Maisertrages in vielen Teilen Ostdeutschland demnach relevanter als für den Winterweizen, dessen Vorwinterentwicklung wahrscheinlich Kompensationspotenzial schafft.

Generell scheint die Witterungsabhängigkeit der Erträge beider Kulturen in Mecklenburg-Vorpommern am geringsten ausgeprägt. Der westliche Küstenbereich reagiert absehbar positiv auf die mit der künftigen Erwärmung einhergehende Erhöhung des Verdunstungsanspruches. Die sandigen und leichten Standorte Brandenburgs, Sachsen-Anhalts und Sachsens zeigen die stärksten Korrelationen zwischen Ertragsänderungen und Änderungen bei Niederschlag und Verdunstung im Vergleich zum Vorjahr (Abb. 14 und 15).

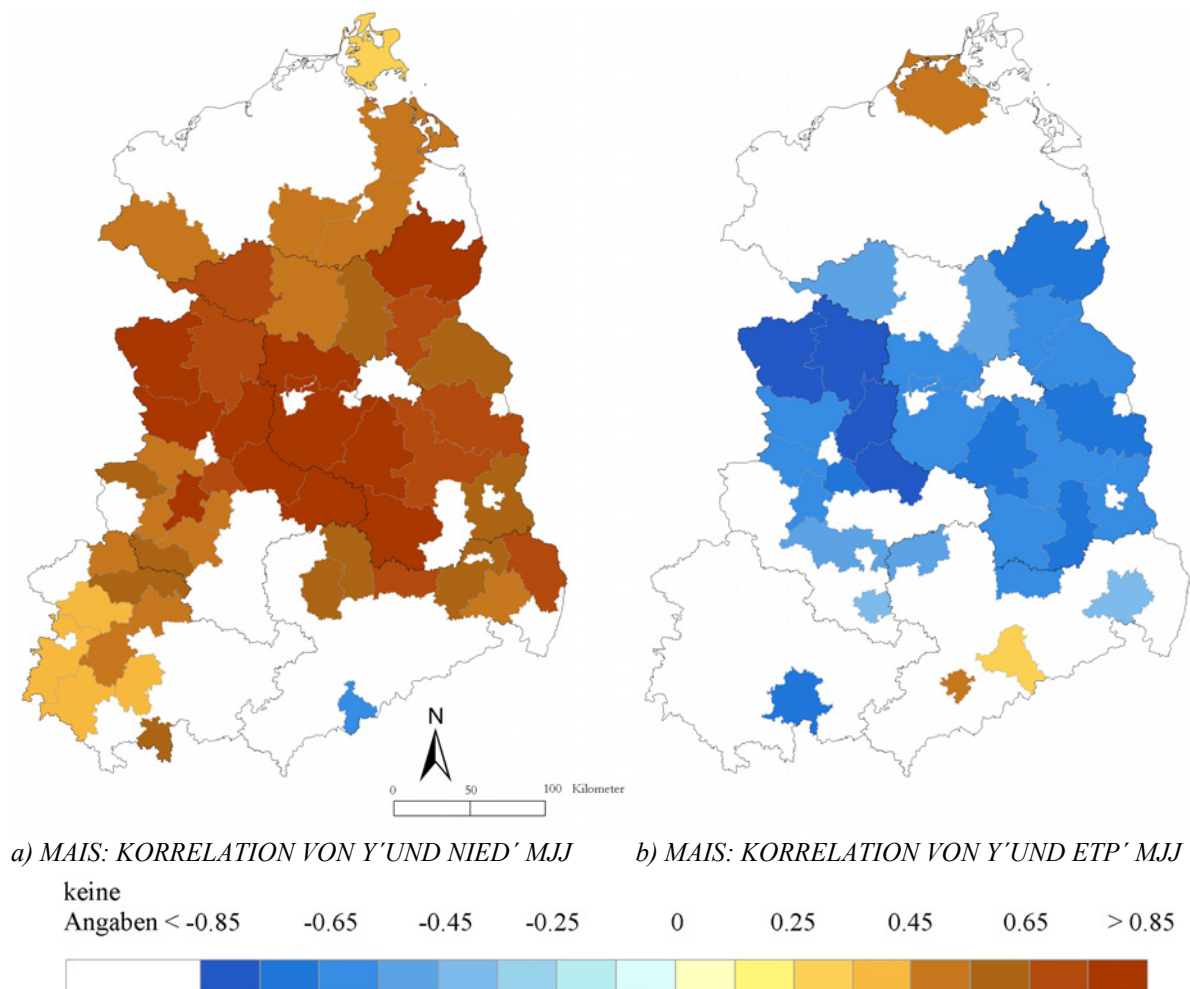


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der kreisweisen Korrelationen zwischen den Ertragsänderungsraten (y') von Silomais und den Änderungsraten ausgewählter Klimavariablen (NIED' MJJ-Niederschlagsänderung im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' MJJ-Änderung im Verdunstungsanspruch im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum)

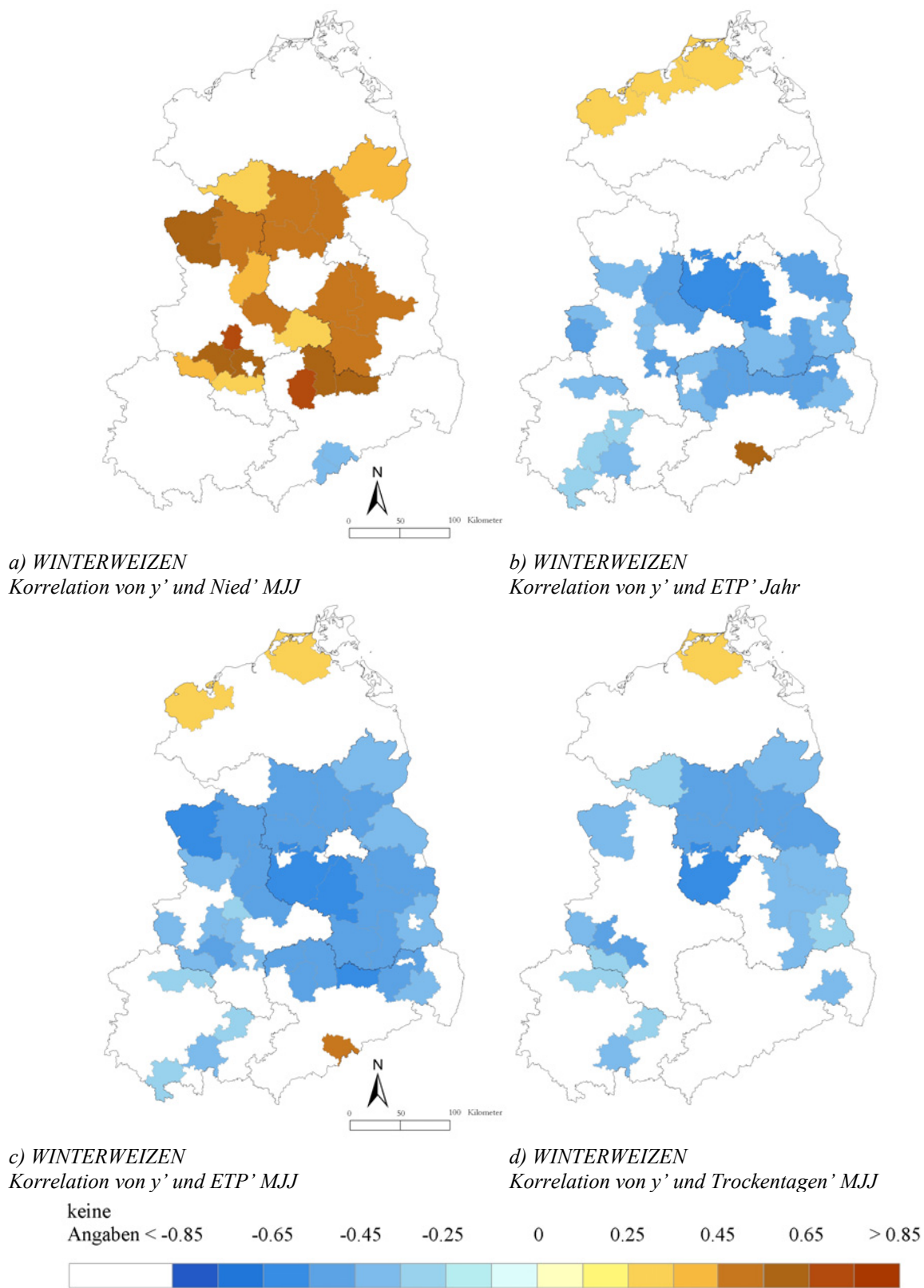


Abbildung 15: Räumliche Verteilung der kreisweisen Korrelationen zwischen den Ertragsänderungsraten (y') von Winterweizen und den Änderungsraten ausgewählter Klimavariablen (NIED' MJJ-Niederschlagsänderung im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' MJJ-Änderung im Verdunstungsanspruch im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum, ETP' Jahr -Änderung im Verdunstungsanspruch im Vergleich zum Vorjahr, Trockentage' MJJ-Änderung bei den Trockentagen im Mai, Juni, Juli im Vergleich zum Vorjahreszeitraum)

Für den Maisertrag war in Regionen mit sandigen und leichten Böden die Wasserversorgung im Zeitraum von Mai-Juni offenbar wichtiger als jene im Zeitabschnitt von Juni – August. Für letzteren wurden kaum signifikante Korrelationen zwischen den Änderungsraten der Klimavariablen und den Ertragsänderungsraten von Mais gefunden.

2.2.3 Ertragswirkungen des Klimawandels

2.2.3.1 Ertragsrelevante Klimatrends

In den Abbildung 16 sind die Tendenzen des rezenten beobachteten Klimawandels und ihre Fortschreibung im Szenario noch einmal zusammenfassend für Ostdeutschland dargestellt.

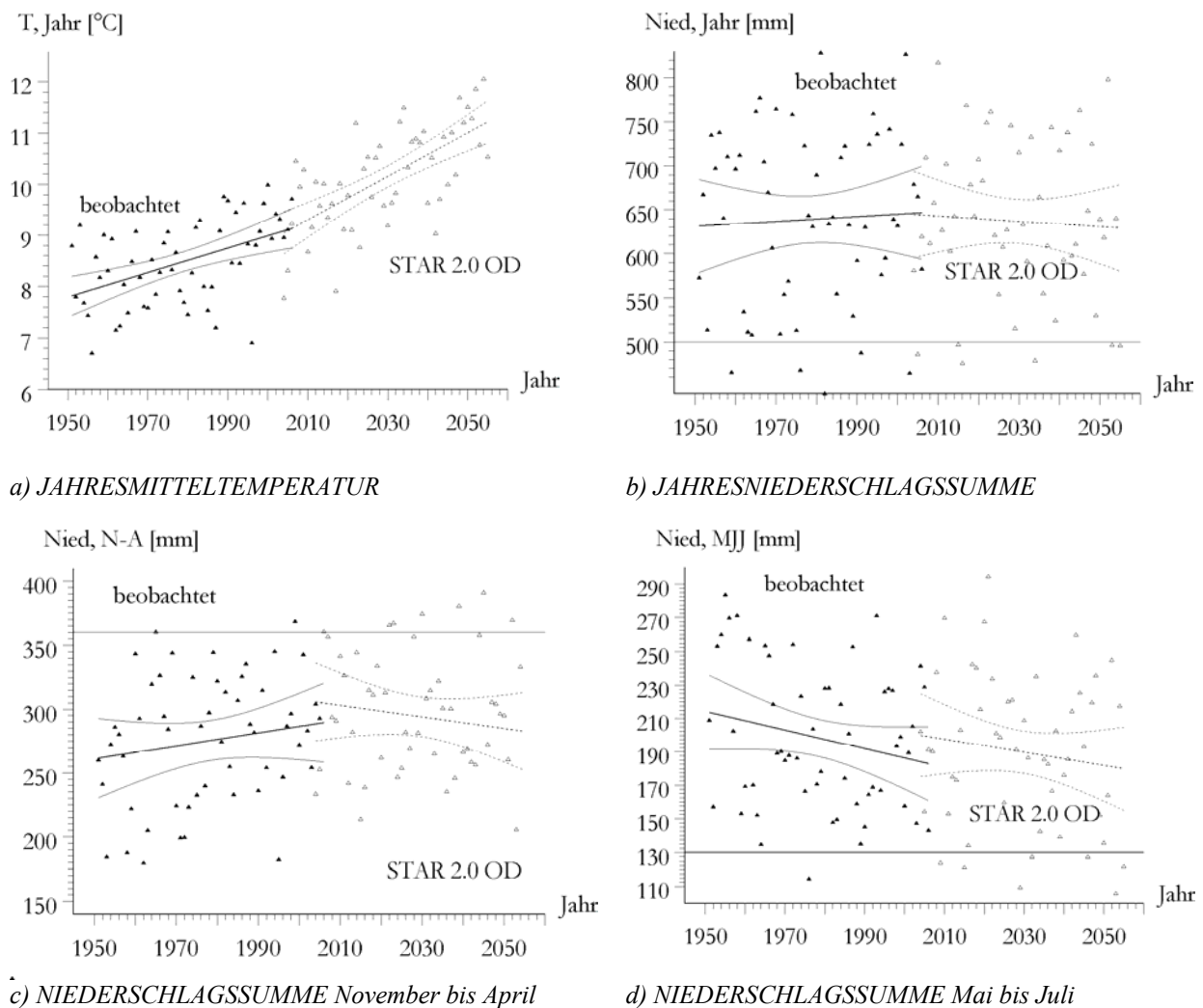


Abbildung 16: Entwicklung a) der Jahresmitteltemperatur, b) der Jahresniederschlagssumme und der Niederschlagssumme in ausgesuchten Zeitabschnitten - c) November bis April und d) Mai bis Juli - von 1951–2055 anhand beobachteter (1951–2006) und mit STAR II simulierter Daten (2004–2055), gemittelt über alle meteorologischen Stationen in Ostdeutschland mit Darstellung linearer Periodentrends und der zugehörigen 95% Konfidenzintervalle

Die Abbildungen zeigen eine Fortsetzung des Erwärmungstrends bei einem insgesamt stabilen Niederschlagsniveau. Die Winterniederschläge bleiben relativ stabil, wobei die Anzahl der Jahre mit hohen Winterniederschlägen zunimmt, die Sommerniederschläge in der Periode Mai, Juni, Juli zeigen eine leicht abnehmende Tendenz. Die Punktwolken um die Ausgleichskurven illustrieren die starke interannuelle Variabilität der Klimaentwicklung. Für den Periodenvergleich bedeutet dies, je kürzer eine der ausgewählten Periode ist, umso höher wird die Wahrscheinlichkeit, dass Niveauunterschiede zwischen zwei Perioden auf die natürliche Variabilität und nicht auf langfristige Veränderungen zurückzuführen sind.

2.2.3.2 Periodenvergleiche

Für die Abschätzung der Klimawirkungen auf die klimatischen Ertragspotenziale (Klimaerträge) des Ackerlandes (für das technologische Niveau der Periode 1990-2005) wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Perioden als Vergleichsgrundlage ausgewählt.

Tabelle 5: Periodenvergleiche mit Referenz- und Vergleichsperioden

Periodenvergleich	Referenzperiode	Vergleichsperiode
I)	1952-2005	2005-2054
II)	1952-1975	1976-2005
III)	2005-2035	2036-2054
IV)	1952-2005	2046-2054
V)	1982-2005	2024-2045

Die Periodenvergleiche erfolgen aus zwei unterschiedlichen Perspektiven, die so gewählt wurden, dass Effekte langfristiger klimatischer Änderungstendenzen hervortreten. Um die Verschiebungen in der Ertragserwartung und Ertragssicherheit für Ostdeutschland insgesamt zu charakterisieren, werden die Häufigkeitsverteilungen der jahresweise simulierten Kreisenerträge über den jeweils betrachteten Perioden verglichen. Diese Perspektive wird in den Periodenvergleichen I bis III eingenommen.

In den Periodenvergleichen IV und V werden die Änderungen räumlich und teilweise auch zeitlich weiter aufgelöst betrachtet. Periodenvergleich IV verdeutlicht die langfristigen Änderungstendenzen, Periodenvergleich V ermöglicht dem Leser einen Quervergleich zu den Ergebnissen im Kapitel Agrarholz.

Die Periodenvergleiche beruhen wiederum auf den je Landkreis, Periode und Fruchtart simulierten Klimaerträgen. Die Klimawirkungen werden allerdings nicht direkt aus den simulierten Erträgen, sondern aus zwei linearen Trendfunktionen je Landkreis abgeleitet. Die Trendfunktionen beschreiben den Klimawirkungstrend in den Perioden 1952-2005 und 2005-2054 basierend auf den kreisweise simulierten Ertragswerten. Für die Periodenvergleiche IV und V werden dabei jeweils die Trendwerte zur Periodenmitte in Beziehung zueinander gesetzt. Durch den Bezug auf Trendwerte wird der Einfluss kurzfristiger Klimaschwankungen auf den Periodenvergleich und damit die Wahrscheinlichkeit technisch bedingter Über- und Unterzeichnungen von Klimafolgen vermindert.

Alle Aussagen zu Ertragsänderungen in den Periodenvergleichen I-V beziehen sich auf das mittlere technologische Niveau des Winterweizen- und Maisanbaus im Zeitraum 1990-2005. Das ist der Zeitraum, auf den sich die Modellparametrisierung bezog (siehe Kapitel

Material und Methoden). Der CO₂-Düngungseffekt wird zunächst nicht betrachtet. Für die Periodenvergleiche IV und V erfolgt eine ergänzende Nachbetrachtung zu den modifizierenden Wirkungen des CO₂-Düngungseffektes.

2.2.3.3 Simulationsergebnisse

In den Simulationen wird in erster Linie auf Ergebnisse der statistischen Ertragsmodellierung Bezug genommen. Auf Ergebnisse des SWIM-Modells für Winterweizen wird ergänzend eingegangen.

2.2.3.3.1 Ergebnisse ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes

Die simulierten Klimawirkungen auf Ertragserwartung und Ertragssicherheit des Anbaus von Winterweizen und Silomais in verschiedenen Perioden des Zeitraumes 1952-2054 werden in den Abbildung 17a-f illustriert. Die Häufigkeitsverteilungen zeigen, dass sich die Ertragserwartungen (Gipfel der Verteilungen) für Ostdeutschland insgesamt bei beiden Kulturen kaum verändern. Leichte Rückgänge sind beim Mais feststellbar. Deutlicher sind die Veränderungen bei der Ertragssicherheit. Während die Ertragsverhältnisse beim Winterweizen relativ stabil bleiben, nimmt die Ertragssicherheit beim Mais insgesamt ab, was in einer deutlich breiteren Verteilung zum Ausdruck kommt (17 a, b). In der Periode 1952-2005 deuten sich diese Veränderungen schon an. Während sich Lage und Form der Ertragsverteilung von Weizen im Vergleich der Perioden 1952-1975 und 1976-2005 kaum ändert, wird die Ertragsverteilung von Mais in der zweiten Periode bei unveränderter Lage deutlich breiter (17 c, d). Die Abbildungen 17 e, f zeigen für die beiden Perioden des Szenarienzeitraumes keine gravierenden Unterschiede. Es wird jedoch deutlich, dass sich das Verhältnis von jährlichen Rückgängen und Gewinnen bei den simulierten Erträgen zu Ungunsten der Gewinne verschiebt, wenn der zweite mit dem ersten Teil des Szenarienzeitraumes verglichen wird. Mittelfristig, d.h. die nächsten 20-30 Jahre, verändern sich die Ertragserwartungen für Ostdeutschland insgesamt betrachtet nur geringfügig.

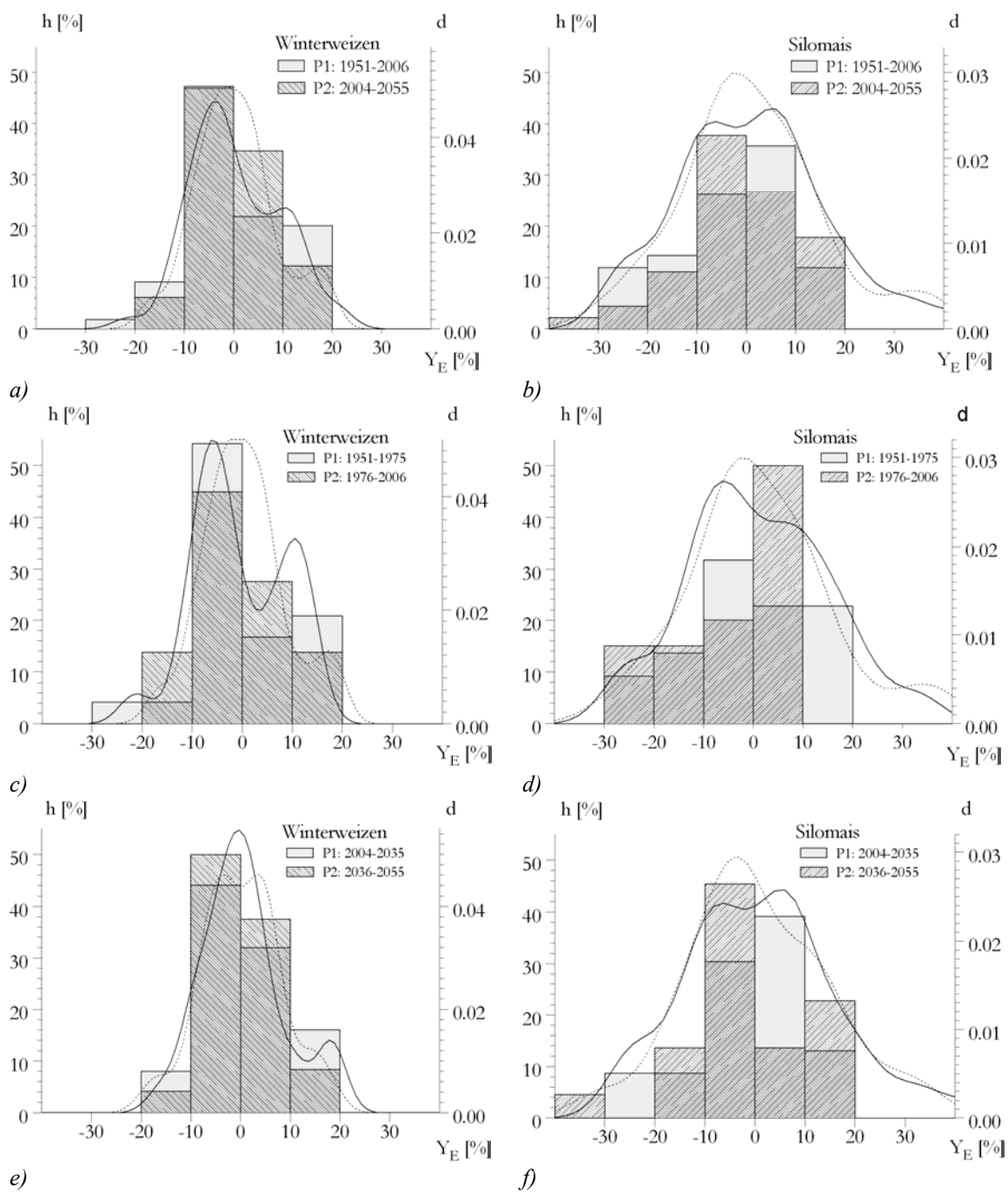


Abbildung 17: Häufigkeitsverteilungen und zugehörige Dichtefunktionen der kreisweise simulierten Klimawirkungen auf den Ertrag von Winterweizen (a, c, e) und Silomais (b, d, f) für die Perioden 1952-2005 und 2005-2054 (a, b), 1952-1975 und 1976-2005 (c, d), 2005-2035 und 2036-2054 (e, f). Y_E ist die mittlere relative Abweichung des Ertrages in einer Periode vom Durchschnittsertrag des Zeitraumes 1990-2006 je Landkreis. Der CO_2 -Düngungseffekt wurde nicht berücksichtigt

Tabelle 6: Relative Änderungen von Klimavariablen zwischen der Szenarienperiode 2046-54 und dem Beobachtungszeitraum 1952-2005 und simulierte Folgen für den Ertrag von Winterweizen und Silomais ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes

		2046-54 vs. 1952-2005				
Bundesland		Brandenburg	Mecklenburg-Vorpommern	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Thüringen
	Einheit	Klimaänderungen				
Nied, Jahr	mm	-4	-7	-18	5	-10
Etp, Jahr	mm	143	132	152	141	144
Nied, N-A	mm	22	38	6	12	10
Etp, N-A	mm	57	52	59	49	54
Nied, MJJ	mm	-18	-25	-18	-2	-16
Etp, MJJ	mm	49	45	54	49	53
Nied, ASO	mm	-7	-20	-7	-5	-5
Etp, ASO	mm	37	34	38	36	37
Frosttage, N-A	N	-40	-40	-40	-38	-39
Schneetage, N-A	N	-15	-15	-19	-16	-19
Trockentage, N-A	N	-4	-5	4	0	1
Trockentage, MJJ	N	8	8	10	7	9
Trockentage, ASO	N	5	6	6	5	4
		Ertragswirkungen [%]				
Winterweizen		-15	4	-7	3	1
Silomais		-16	-15	-1	-20	-2

Eine räumliche und zeitliche Untersetzung der generellen Entwicklung erfolgt in den Periodenvergleichen IV und V. Die entsprechenden Ergebnisse sind in den Tabellen 6 und 7 und in der Abbildung 18 dargestellt. Zum Ende der Szenarienperiode, 2046-54 kommt es in den drei Ländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt (ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes!) zu deutlichen Ertragsrückgängen beim Silomais, wohingegen sich das Ertragsniveau in den Ländern mit einem höheren Anteil von Mittelgebirgslagen an der landwirtschaftlichen Fläche nur wenig ändert. Im Unterschied zum Silomais bleiben die simulierten Winterweizenerträge mit Ausnahme Brandenburgs hingegen weitgehend stabil.

Die zugehörigen Klimaänderungen im Vergleich zur Periode 1952-2005 zeigen nur geringfügige regionale Differenzierungen auf Länderebene. Der Verdunstungsanspruch im Gesamtjahr und einzelnen Jahresabschnitten steigt. Das Niederschlagsniveau bleibt zwar insgesamt stabil, die Niederschlagsverteilung verschiebt sich jedoch. Im Winterhalbjahr nehmen die Niederschläge zu, in der Hauptwachstumsperiode gehen sie zurück. Diese Änderungstendenz ist im Periodenvergleich IV stärker als im Periodenvergleich V ausgeprägt, weshalb die Ertragsänderungen in IV auch deutlicher als in V ausfallen. Das generelle

Änderungsmuster für die beiden Periodenvergleiche IV und V, sowohl bei den betrachteten Klimavariablen als auch den Ertragswirkungen, ist jedoch analog.

Die Variabilität der simulierten Ländererträge lässt sich nicht auf regionale Unterschiede in der Klimaänderung zurückführen. Die Ursachen sind daher in der standortbezogenen Wirksamkeit der Klimaänderungen zu suchen. Generell bleibt festzuhalten, dass Mais empfindlicher auf Veränderungen bei der Wasserversorgung reagiert als Weizen. Dies ist wahrscheinlich der Tatsache geschuldet, dass zu Beginn des Frühjahres die Maisbestände erst noch etabliert werden müssen, wohingegen der Weizen mit einem schon nahezu vollständig ausgebildeten Wurzelsystem noch Teile des Wasservorrats aus dem vorangegangenen Winter nutzen kann. Ein Vorteil, der in Ländern mit einem größeren Anteil von Böden mit hohem Wasserhaltevermögen, wie Sachsen-Anhalt und Mecklenburg, eher zum Tragen kommt als in Brandenburg, das durch leichte und sandige Böden dominiert wird. Deshalb unterscheiden sich die simulierten klimabedingten Ertragsrückgänge zwischen Weizen und Mais für Brandenburg kaum, wohingegen sie in allen anderen Bundesländern mit Ausnahme Sachsens deutlich geringer ausfallen.

Die im Mittel relativ geringen Ertragsverluste in Thüringen und Sachsen beim Mais lassen sich durch überproportionale Ertragsgewinne in den Vorgebirgslagen erklären, die von einer Temperaturerwärmung durch ihre besonders ausgeprägte Temperaturlimitierung einerseits und das häufig höhere Niederschlagsniveau andererseits besonders profitieren.

Die landkreisweise Darstellung der Ertragseffekte für den Periodenvergleich IV (Abb. 18) verdeutlicht die länderübergreifenden Muster der Klimawirkung. Die negativen Effekte auf den Weizenertrag nehmen in den Simulationen von West nach Ost zu (Abb. 18). Positive Ertragsänderungen finden sich gehäuft im küstennahen Bereich. Beim Mais zeigt sich eine geographische Häufung von Ertragsverlusten im und um das Land Brandenburg. In Küstennähe und in den Vorgebirgslagen sind sie am geringsten.

Die Muster spiegeln die bessere Wasserversorgung in Küstennähe wider und unterstreichen die günstige Wirkung einer Temperaturerhöhung auf den Maisertrag in den Vorgebirgslagen. Sie zeigen auch, dass Regionen mit einem im Vergleich höheren Anteil leichter Böden eher mit Ertragsrückgängen rechnen müssen als andere. Hierbei kann es durchaus eine Diskrepanz zwischen dem vorherrschenden Bodentyp und der simulierten Ertragsreaktion geben, wenn z.B. Mais eher auf vergleichsweise gut wasserversorgten Standorten angebaut wird. Dies könnte im Landkreis Dahme-Spreewald der Fall zu sein und würde die gegenüber dem Umland vergleichsweise positive Klimareaktion des Mais erklären. Prinzipiell ist bei einer Diskussion von Unterschieden zwischen benachbarten Landkreisen zu berücksichtigen, dass diese einerseits in kleinräumig voneinander abweichenden Klimaprojektionen, andererseits aber auch auf historischen Unterschieden in der Standortnutzung durch die verschiedenen Kulturen begründet liegen können.

Für Winterweizen und den Periodenvergleich IV wurde eine Simulation mit dem Model SWIM durchgeführt. Die ausgehend von der Klimaänderung nach SWIM zu erwartenden Änderungen des Ertrages belaufen sich für Brandenburg auf -12%, Mecklenburg-Vorpommern -6%, Sachsen -11%, Sachsen-Anhalt -12% und Thüringen -9%. Die simulierten Ertragswirkungen liegen für Brandenburg in einer ähnlichen Größenordnung, ansonsten unterschreiten sie aber die Werte des statistischen Modells leicht und sind dadurch insgesamt deutlich homogener. Dies kann ein Hinweis sein auf eine ungenügende Abbildung der Standortheterogenität in der durch SWIM genutzten Bodenkarte BÜK 1000 und wird Gegenstand weiterer Analysen sein.

Generell zeigen die Simulationsergebnisse, die durch das statistische Modell erhalten wurden, eine stärkere Anfälligkeit des Mais- als des Weizenertrages gegenüber einem wärmeren und trockeneren Sommer. Dies steht im Widerspruch zu früheren Ergebnissen der Autoren, die für ein ähnliches Klimaszenarium erhalten wurden. Bei Simulationsstudien mit dem Modellsystem SWIM reagierte Mais im Mittel positiver als Weizen auf den postulierten Klimawandel im Elbeinzugsgebiet, zu dem 85% der Fläche Ostdeutschlands gehört. Dies wurde auf die Temperatursprüche von Mais zurückgeführt, deren durchschnittlich bessere Befriedigung Ertragseinbrüche in trockenen Jahren überkompensierte. Diese Überkompensation ist jedoch beschränkt auf Böden mit relativ hohem Wasserhaltevermögen. In den Landkreisen mit vorherrschend sandigen Böden stimmen die Ergebnisse von SWIM und des hier verwendeten statistischen Modells dann auch gut überein.

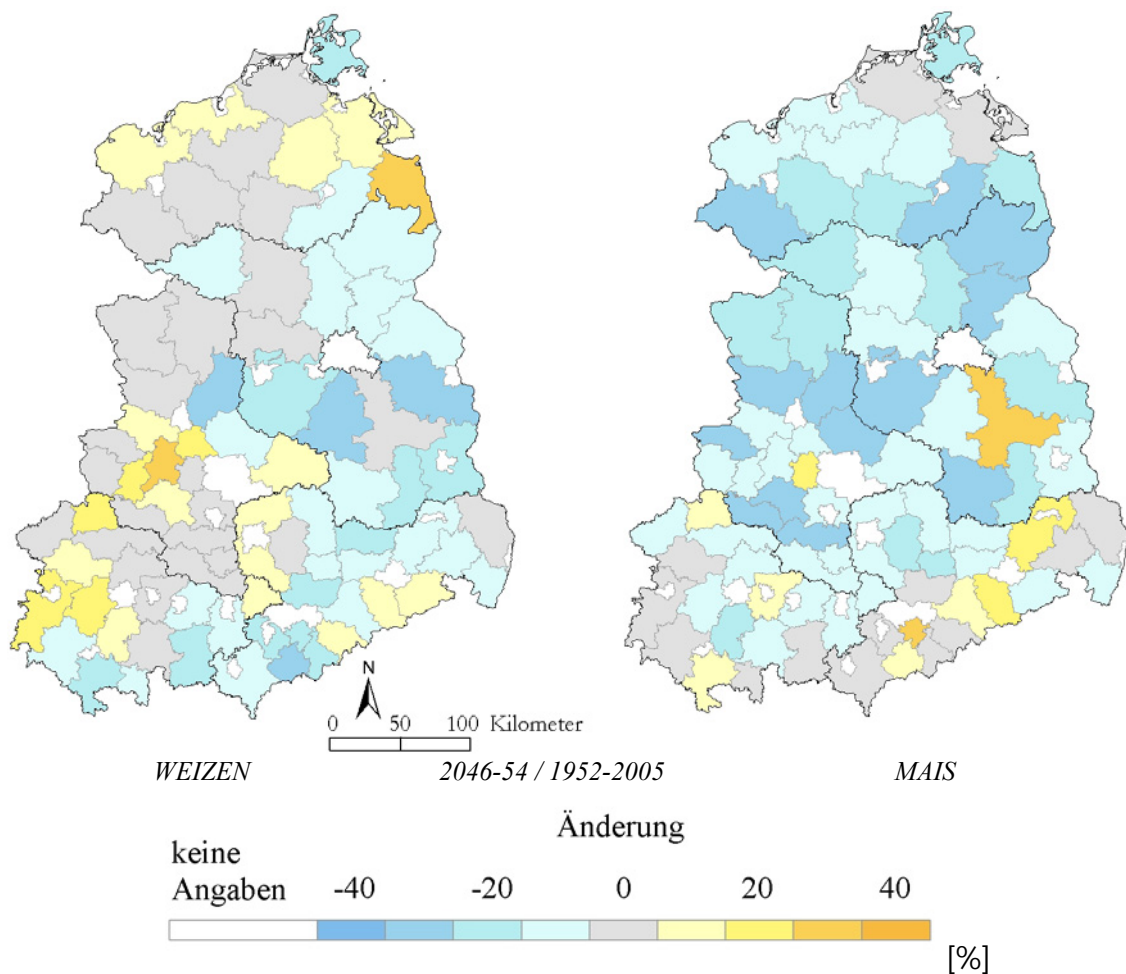


Abbildung 18: Räumliche Verteilung der kreisweise simulierten relativen Ertragsänderungen, y_E von Winterweizen und Silomais für die Periodenvergleiche 2046-54 / 1952-2005 ohne Berücksichtigung des CO_2 -Düngungseffektes

Tabelle 7: Relative Änderungen von Klimavariablen zwischen der Szenarienperiode 2024-45 und dem Beobachtungszeitraum 1983-2003 und simulierte Folgen für den Ertrag von Winterweizen und Silomais ohne Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes

		2024-45 vs. 1983-2003				
Land		Brandenburg	Mecklenburg- Vorpommern	Sachsen	Sachsen- Anhalt	Thüringen
	Einheit	Klimaänderungen				
Nied, Jahr	mm	8	-3	-15	14	-15
Etp, Jahr	mm	98	32	102	92	96
Nied, N-A	mm	17	24	3	6	-7
Etp, N-A	mm	36	32	37	36	35
Nied, MJJ	mm	-2	-13	-2	13	2
Etp, MJJ	mm	32	32	33	28	31
Nied, ASO	mm	-7	-14	-16	-5	-10
Etp, ASO	mm	29	26	31	28	29
Frosttage, N-A	N	-27	-24	-26	-25	-24
Schneetage, N-A	N	-10	-8	-14	-12	-13
Trockentage, N-A	N	-1	-3	5	2	5
Trockentage, MJJ	N	5	6	6	5	6
Trockentage, ASO	N	4	5	6	4	5
		Ertragswirkungen [%]				
Winterweizen		-10	3	-4	4	1
Silomais		-10	-11	1	-12	-2

Aus der Zusammenschau aller Periodenvergleiche lässt sich ableiten, dass über die gesamte Szenarienperiode 2005-2054 betrachtet sich jahresbedingte Ertragsgewinne und -zuwächse ausgleichen. Zum Ende der Periode gibt es jedoch eine stärkere Tendenz zu zurückgehenden Erträgen als zu Beginn. Diese Tendenz ist beim Mais stärker als beim Weizen, auf den sandigen stärker als auf den bindigen Standorten, im Binnenland stärker als an den Küsten und in den Vorgebirgslagen, im Osten stärker als im Westen ausgeprägt.

2.2.3.3.2 Korrektur der Ergebnisse durch die Wirkung des CO₂-Düngungseffektes

Dem SRES-Szenarium A1B liegt ein Anstieg der gegenwärtigen CO₂-Konzentration von 386 ppm auf 542 ppm zu Grunde, was einer Verdopplung des vorindustriellen Niveaus entspricht. Eine solche CO₂-Erhöhung wirkt nicht nur indirekt über das Klima auf die Pflanzen sondern hat auch unmittelbare physiologische Effekte. Die Photosynthese wird stimuliert und der Transpirationsanspruch der Pflanzen vermindert (Long et al. 2006, Tubiello et al. 2007). Diese tendenziell ertragssteigernde Wirkung wird als CO₂-Düngungseffekt bezeichnet. Der CO₂-Düngungseffekt wird nachträglich mit Hilfe eines Korrekturfaktorenmodells berücksichtigt, welches in der Anlage ausführlich dargestellt ist. Die sich danach ergebenden Ertragswirkungen auf der Länderebene sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Erwartungsgemäß führt der CO₂-Düngungseffekt zu einer deutlichen

Minderung von trockenstressbedingten Ertragsverlusten bzw. zu stärkeren Ertragsgewinnen. Anzumerken wäre in diesem Zusammenhang, dass ein solcher Effekt nur realisiert werden kann, wenn die Pflanzen bedarfsgerecht mit Stickstoff versorgt werden. Nur dann wird der CO₂-Düngungseffekt in vollem Umfang realisiert.

Tabelle 8: Länderweise Ertragswirkungen von Klimaänderungen auf Weizen und Silomais gemäß den Periodenvergleichen 2046-54 / 1952-2005 und 2024-45 / 1982-2003 unter Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes

Land	Brandenburg	Mecklenburg-Vorpommern	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Thüringen
Ertragswirkungen [%]					
2046-54 vs. 1952-2005					
Winterweizen	0	11	8	11	11
Silomais	-9	-5	5	-14	5
2024-45 vs. 1983-2003					
Winterweizen	3	7	7	7	7
Silomais	0	-1	3	-3	3

2.3 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Sowohl die Mais- als auch die Weizenenerträge werden in Ostdeutschland mittelfristig, d.h. in den nächsten 20-30 Jahren, wahrscheinlich stabil bleiben, wenn das Klima sich wie projiziert entwickelt. Bis zur Mitte des Jahrhunderts – langfristig - ist allerdings insbesondere auf den leichten Standorten im östlichen küstenfernen Flachland des Gesamtgebietes mit deutlicheren Ertragsrückgängen zu rechnen. Der Mais ist davon stärker als der Weizen betroffen, für den sich die bessere Wasserversorgung im Herbst und Winter günstig auswirkt. Bezug genommen wird dabei auf das gegenwärtige technologische Niveau im Anbau der betrachteten Kulturen und die räumliche Verteilung des Anbaus in den letzten Jahren.

Wenn man zusätzlich den CO₂-Düngungseffekt berücksichtigt, kann in allen Bundesländern beim Winterweizen mit leichten Ertragsgewinnen und beim Mais mit einer Senkung der trockenstressbedingten Verluste im Flachland gerechnet werden.

Der CO₂-Düngungseffekt wird jedoch nicht zwangsläufig zu einer Minderung von Ertragsverlusten bzw. größeren Ertragsgewinnen führen. Seine Wirksamkeit ist an eine optimale Stickstoffdüngung gebunden (Ainsworth und Long 2005, Wall et al. 2006). Es sind durchaus Umstände denkbar, die eine suboptimale Düngung begünstigen. Hierzu zählten beispielsweise Obergrenzen für die Düngung aus Wasser- und Klimaschutzgründen, sowie ein starker Anstieg bei den Rohstoffpreisen.

Bei der Modellbildung wurde die ertragsmindernde Wirkung durch Krankheiten und Schaderreger implizit berücksichtigt. Sie beruht jedoch auf in der Vergangenheit aufgetretenen Wirkungen und sich dahinter verbergenden Schaderregern und Krankheiten. Der Klimawandel führt jedoch auch zur Einwanderung neuer Krankheiten und Schaderreger, deren Wirkungen hier nicht berücksichtigt werden konnten.

Die Modellierung geht implizit weiterhin von einem rationalen Anpassungsverhalten der Landwirtschaft an die neuen Klimabedingungen aus, analog zu dem in der Vergangenheit. Witterungsextreme stellen dabei eine besondere Herausforderung dar. Die daraus resultierenden Risiken für den Ertrag sind mit der gewählten Methode jedoch nicht abschätzbar und prinzipiell einer vorausschauenden Abschätzung nur schwer zugänglich. Ähnliches gilt für Wechselwirkungen zwischen züchterischem Fortschritt und Klimawandel. Generell werden bei Zukunftsabschätzungen wie diesen die Anpassungsmöglichkeiten tendenziell häufig unterschätzt. Unberücksichtigten Risiken stehen also unberücksichtigte Anpassungsmöglichkeiten gegenüber.

Wenn man das Klimawirkungsverhalten der untersuchten Kulturen auf das Fruchtartenspektrum der Sommer- und Winterkulturen überträgt, kann insgesamt davon ausgegangen werden, dass die Zukunftsaussichten der ostdeutschen Landwirtschaft durch die absehbare Entwicklung der Flächenproduktivität bei der hier postulierten Klimaänderung nicht eingeschränkt werden. Dies bestätigt Ergebnisse anderer Autoren zu den Entwicklungsaussichten der Landwirtschaft in Mitteleuropa unter Klimawandel (Olesen und Bindi 2002).

3 ERTRAGSPROJEKTIONEN UNTER KLIMAWANDEL FÜR DEN ALTERNATIVEN ANBAU VON AGRARHOLZ AUF ACKERFLÄCHEN AM BEISPIEL DER ASPE

P. Lasch, C. Kollas, J. Rock

3.1 FRAGESTELLUNG

Der Anbau von schnellwachsenden Baumarten in sogenannten Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen wird in Deutschland seit mehr als zwei Jahrzehnten in der Theorie diskutiert und in der Praxis erprobt (Burger und Sommer, 2003, Hofmann, 1999, von Wühlisch, 2006, Wolf und Böhnisch, 2003). Insbesondere auf den Grenzstandorten für die landwirtschaftliche Produktion stellt der Anbau schnellwachsender Baumarten auf Ackerflächen zur Holzgewinnung (Agrarholz) eine interessante Anbaualternative dar. Neben den betrieblichen Wirkungen (ausgewogene Kostenkalkulation, positive Beschäftigungs- und Einkommenseffekte) gibt es eine Reihe volkswirtschaftlicher Effekte, die langfristig eine steigende Nachfrage nach Holz und damit eine attraktive ökonomische Bewertung von Agrarholz erwarten lassen. Hierzu zählen die weitgehende Klimaneutralität der Holznutzung für die Energiegewinnung, die Verringerung von Importabhängigkeiten bei Gas und Erdöl durch deren Substitution und die positiven Wirkungen einer vermehrten stofflichen Nutzung von Holz in der Bauwirtschaft. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, wie die Anbaualternative Agrarholz unter Klimawandel zu beurteilen ist. Der Ertrag steht als Bewertungskriterium im Vordergrund.

Für die Abschätzung der Erträge der Kurzumtriebsplantagen wurden Simulationen mit dem Waldwachstumsmodell 4C durchgeführt, das für die Baumart Aspe (*Populus tremula* L.) parametrisiert wurde. Hierfür wurden Daten des Bodens, des Klimas, der Flächennutzung und der Bestandesbehandlung herangezogen. Die Untersuchungen werden auf Böden Ostdeutschlands beschränkt, die Ackerzahlen kleiner 50 aufweisen. (Details siehe Material und Methoden, Agrarholz).

3.2 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.2.1 Beurteilung des CO₂-Effektes

Abbildung 19 verdeutlicht die gemittelten Holzerträge in Bezug auf den CO₂-Effekt und die Perioden des Klimaszenariums. Wie erwartet, verbessern sich die Wuchsbedingungen mit steigendem atmosphärischem CO₂-Gehalt. Doch auch ohne die Betrachtung dieses Effektes wird deutlich, dass die Erträge in dem gewählten Klimaszenarium in den kommenden Jahren aufgrund höherer Temperatur und wenig abnehmendem Niederschlags steigen.

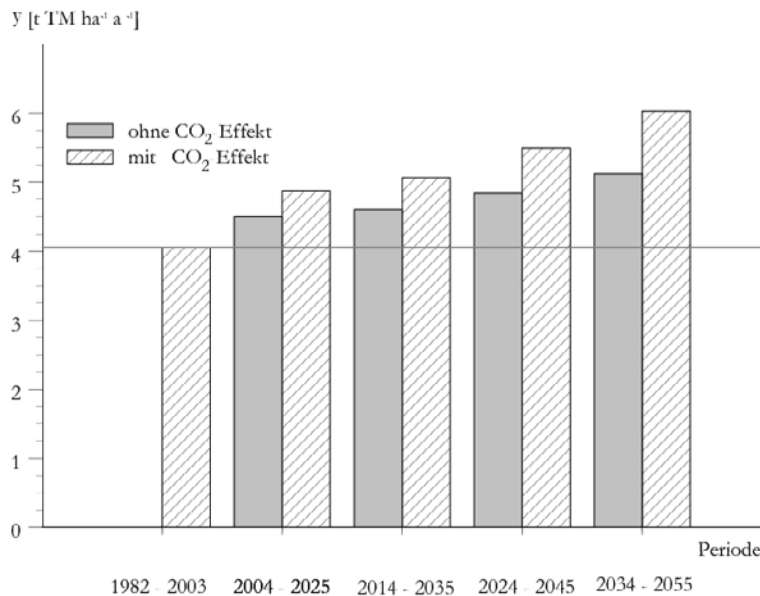


Abbildung 19: Simulierte mittlere jährliche Holzerträge (y) von Aspen-Kurzumtriebsplantagen mit und ohne CO₂-Effekt, gemittelt über die betrachteten Flächen und Perioden

3.2.2 Simulation der Holzerträge für eine rezente Klimaperiode (1982-2003)

Der Vergleich der Ertragssituation auf ausgewählten Flächen in der Referenzperiode ist in Abbildung 20 dargestellt, die die durchschnittlichen Holzerträge auf Gemeindegröße gemittelt zeigt. Nicht berücksichtigt wurden Gemeinden, deren hier untersuchte landwirtschaftliche Fläche weniger als 20 % an der gesamten Gemeindefläche ausmacht.

Die ermittelten jährlichen Holzerträge liegen zwischen 1 und 12 t TM ha⁻¹. Damit decken sich die Ergebnisse mit den Praxisversuchen, die von (Bemmann et al., 2007) für Pappel auf weniger wuchskräftigen Standorten (unter 8 t TM ha⁻¹ a⁻¹) und auf besseren Böden (über 10 t TM ha⁻¹ a⁻¹) in den Bundesländern Sachsen, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg beschrieben werden. (Landgraf et al. 2007, Landgraf et al., 2007) berichtet von weniger als 1 t TM ha⁻¹ a⁻¹ nach zwei Vegetationsperioden auf Kippenstandorten in Brandenburg. In Thüringen wurden bei Anbauversuchen im zweimal fünfjährigen Umtrieb Erträge zwischen 5.1 und 13.2 Tonnen Trockenmasse pro Hektar und Jahr geerntet (Werner et al., 2006).

Räume mit aktuell hoher Produktivität sind das Oderbruch (Teil des Thorn-Eberswalder Urstromtals mit vornehmlich Auenlehm und Gley als Bodentyp) oder die Region entlang des Elbelaufes (Breslau-Bremer Urstromtal und Warschau-Berliner Urstromtal). Geringe Produktivität weisen die Region der Hochflächen des Frankfurter Stadiums (Brandenburgische Platten, zumeist Fahlerden (Sand über Lehm)) und das Erzgebirgische Vorland (versauerte Braunerde aus lößvermischten Verwitterungsprodukten) auf.

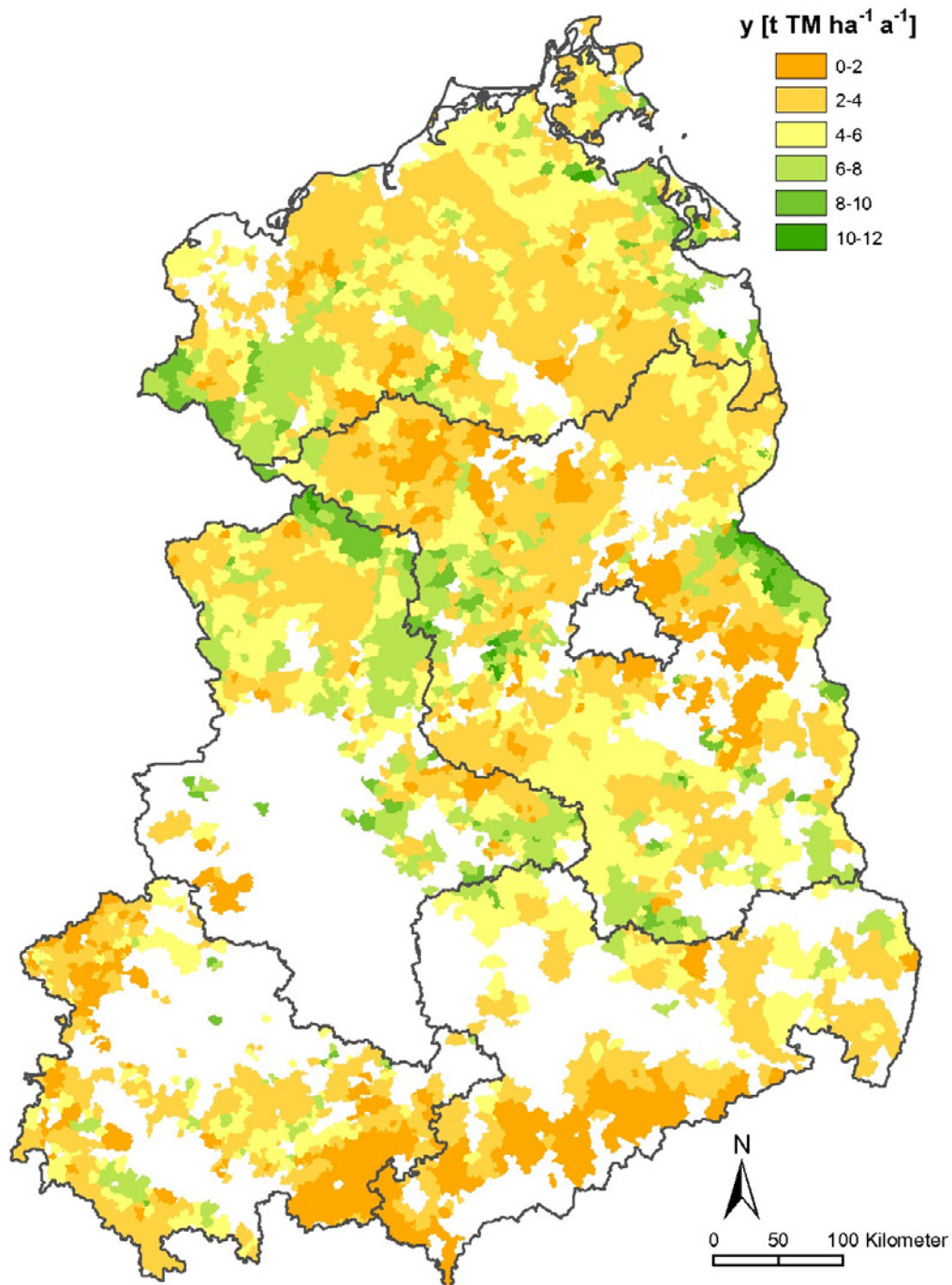


Abbildung 20: Simulierte Holzerträge (y , t TM ha⁻¹ a⁻¹) der Aspen- Kurzumtriebsplantagen auf den betrachteten Flächen, gemittelt auf Gemeindeebene, für die Basisperiode 1982-2003

Betrachtet man die vorherrschenden Leitbodentypen der 5 Bundesländer, so fällt auf, dass bereits 10 Bodentypen rund 55 % der gesamten Fläche ausmachen (Abbildung 21).

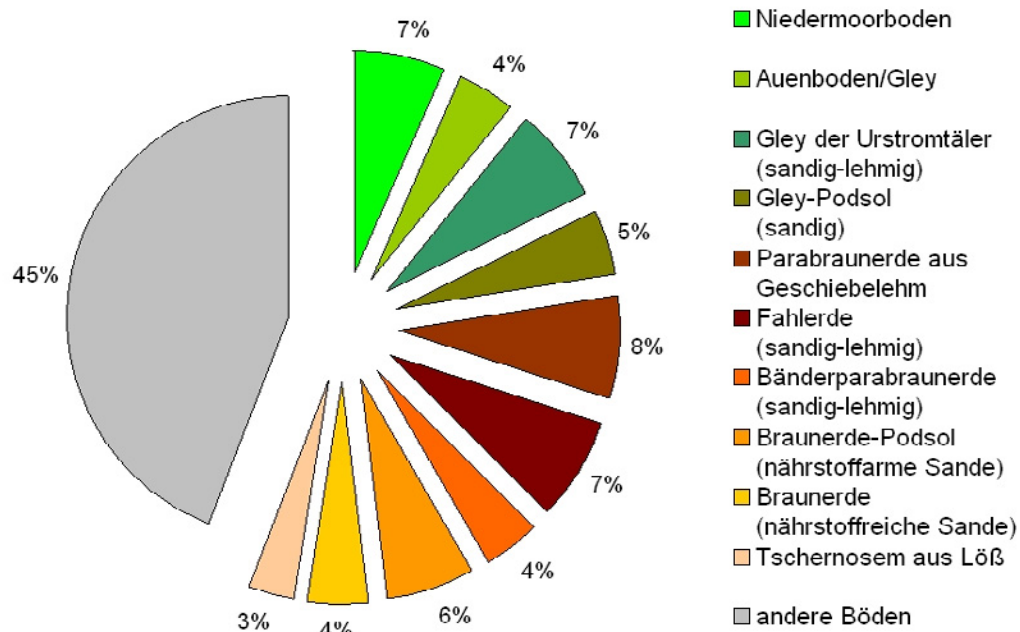


Abbildung 21: Leitbodentypen und ihre Flächenanteile an der Ackerfläche Ostdeutschlands

Zu diesen Leitböden gehören insbesondere Niedermoorböden, Parabraunerden und Fahlerden. Diese 10 Bodentypen gingen unterschiedlich stark in die Untersuchung ein. Die restlichen 45% werden von 40 weiteren Leitbodentypen gebildet.

Tabelle 9: Anteil der untersuchten Flächen an der Ackerfläche Ostdeutschlands (in %) und simulierte Durchschnittserträge ($t\ TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$) je Leitbodentyp in der Basisperiode

Leitbodentyp	Anteil betrachteter Bodentyp in %	Durchschnittlicher Ertrag in $t\ TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$
Niedermoorboden	35.7	10.1
Auenboden / Gley	43.4	9.0
Gley der Urstromtäler (sandig lehmig)	44.7	4.1
Gley-Podsol (sandig)	35.3	7.4
Parabraunerde aus Geschiebelehm	70.4	2.8
Fahlerde (sandig-lehmig)	53.2	1.6
Bänderparabraunerde (sandig-lehmig)	46.2	2.2
Braunerde-Podsol (nährstoffarme Sande)	21.5	1.0
Braunerde (nährstoffreiche Sande)	31.4	7.6
Tschernosem aus Löß	3.6	9.3

Tabelle 9 zeigt die häufigsten Leitbodentypen, ihre durchschnittlichen Erträge und den Flächenanteil je Bodentyp, der in dieser Studie betrachtet wurde. Dabei wird ersichtlich, dass beispielsweise auf Parabraunerde aus Geschiebelehm relativ geringe Erträge erzielt werden. Die sehr geringe Mächtigkeit trotz teilweise vorhandener Lößauflage kann beispielsweise dafür verantwortlich sein, dass diese Ackerflächen nur geringe Ackerzahlen aufweisen. Dieser Boden steht aber für den Anbau schnellwachsender Baumarten großflächig zur Verfügung. Hohe Erträge wurden wie oben erwähnt auf Niedermoor- und Auenböden erzielt. Auf Tschernosemen aus Löß sind ebenfalls sehr hohe Erträge simuliert worden, dieser Boden steht aber für die Kurzumtriebswirtschaft nur in geringem Maße zur Verfügung.

3.2.3 Simulation der Holzerträge unter dem Klimaszenarium

3.2.3.1 Bundesländer

Im Anschluss an die Auswertung der Referenzperiode wurde die Aspen-Kurzumtriebsbewirtschaftung über 4 Perioden von je 20 Jahren mit einem das mögliche zukünftige Klima widerspiegelnden Szenarium (vgl. Kapitel 1) simuliert, beginnend in den Jahren 2004, 2014, 2024 und 2034. Abbildungen 22 und 23 zeigen für die 5 Bundesländer gemittelt, dass sich die Wuchsbedingungen in allen Bundesländern verbessern werden. Des Weiteren ist zu erkennen, dass unter heutigen Bedingungen die höchsten Ertragslagen in Sachsen-Anhalt, Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg zu erwarten sind.

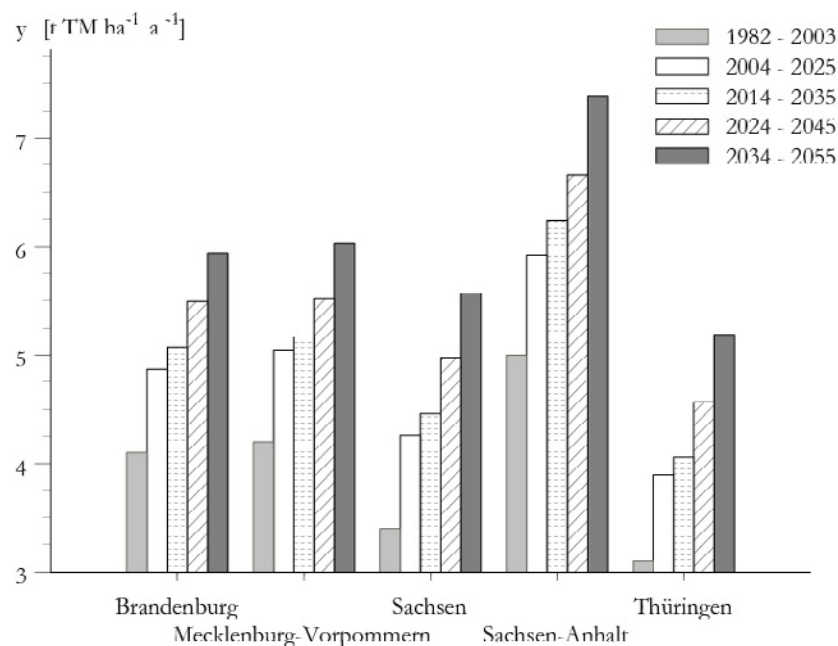


Abbildung 22: Simulierter mittlerer jährlicher Holzertrag (y , t TM ha⁻¹ a⁻¹) der Aspen in den 4 Perioden des Klimaszenariums nach Bundesländern unter Berücksichtigung des CO₂-Düngungseffektes

Unter der angenommenen klimatischen Veränderung und der oben genannten beschränkten Betrachtung von ausschließlich Flächen relativ niedriger Ackerzahl werden sich dort auch in Zukunft die ertragreichsten Lagen befinden. In Sachsen und Thüringen hingegen wird ersichtlich, dass die Flächen in Zukunft sehr hohe prozentuale Gewinne verzeichnen werden. Das heißt, die Zunahme der Temperatur führt in diesen beiden Bundesländern trotz der leichten Abnahme des Niederschlages zu bedeutenden Verbesserungen der

Wuchsbedingungen, weil offenbar für die Aspe an den dortigen Standorten noch kein Wasserstress eintritt. Die Erträge der anderen Bundesländer werden allerdings nicht erreicht.

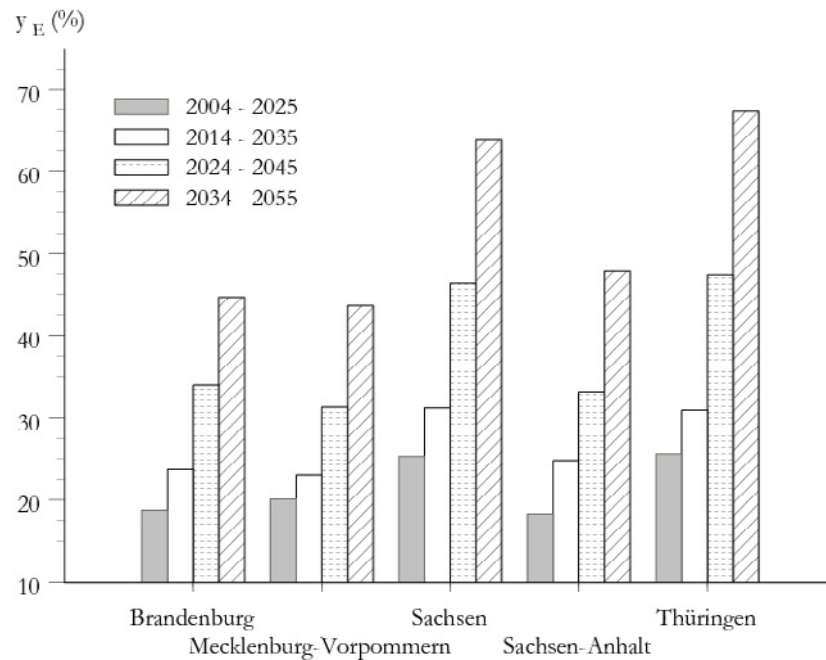


Abbildung 23: Prozentuale Veränderung der simulierte Holzerträge (y_E) der Aspen-Kurzumtriebsplantagen in den 4 Perioden des Klimaszenarios im Vergleich zur Basisperiode (1982-2003) nach Bundesländern

3.2.3.2 Landkreise

Eine Auswertung der Erträge auf Landkreisebene ist in Abbildung 24 dargestellt (die Kreisreform 2007 in Sachsen-Anhalt konnte jedoch nicht berücksichtigt werden). In die Darstellungen wurden jene Kreise nicht aufgenommen, in denen die ermittelten, potenziell für Aspen-Kurzumtriebswirtschaft zur Verfügung stehenden Flächen weniger als 20 % der Kreisfläche ausmachen. Daher ist in den Ergebnissen ebenfalls zu beachten, dass die Aussagen nicht für alle landwirtschaftlichen Flächen eines bestimmten Kreises gelten, sondern nur für die von uns betrachteten. Die Interpretation der Ergebnisse auf Kreisebene wird zudem erschwert durch das Bodenmosaik, das jedem Kreis zu eigen ist.

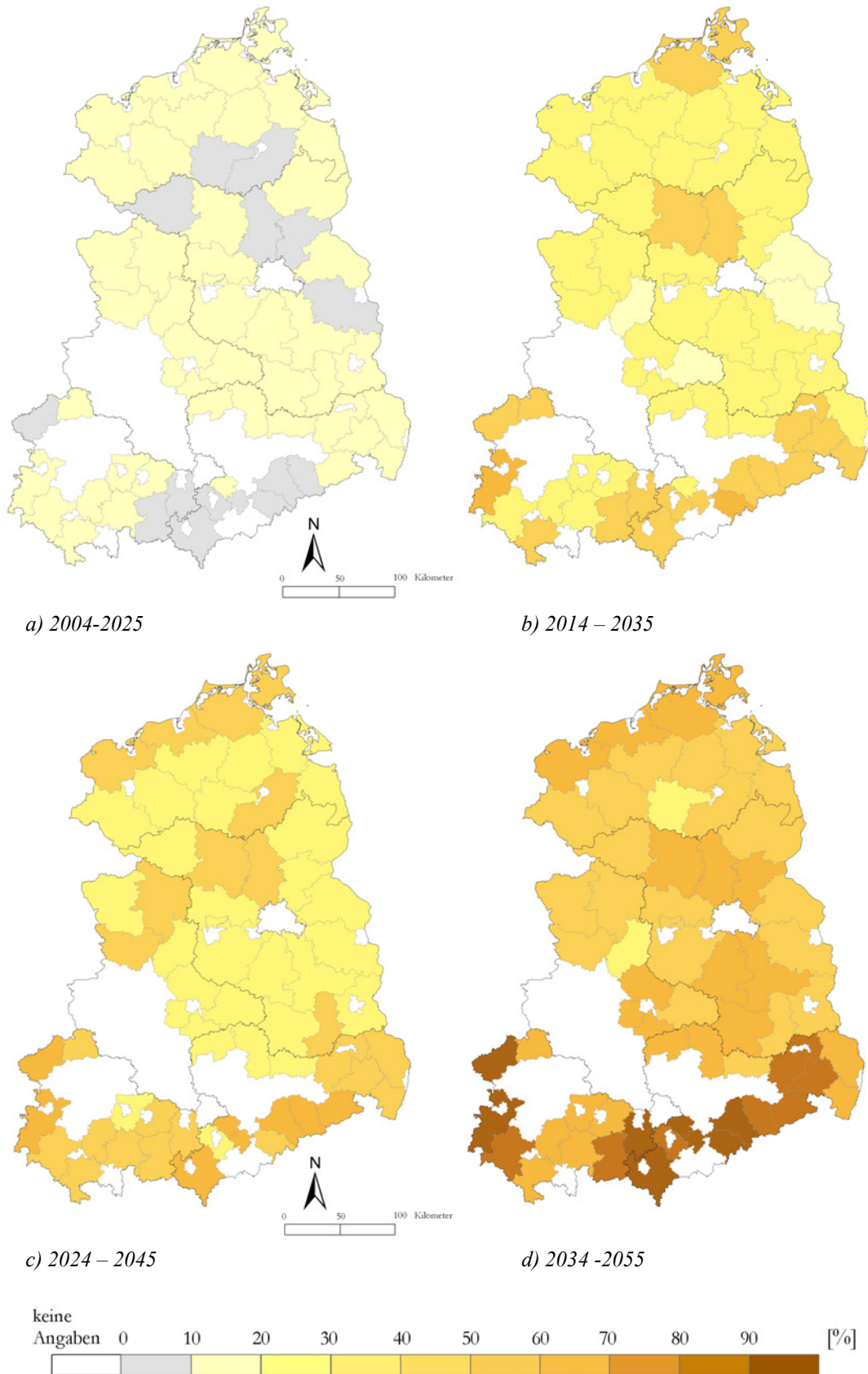


Abbildung 24: Änderung des Holzertes (%) in den einzelnen Szenarienzeiträumen gegenüber dem Basiszeitraum unter Berücksichtigung des CO₂-Effektes auf Landkreisebene

Zwei Landkreise seien hier exemplarisch dargestellt: Bei dem Landkreis Oder-Spree sind eine überdurchschnittliche Temperaturzunahme und Niederschlagsabnahme zu erwarten. Hinzu kommt, dass der Bodentyp der häufigsten dort untersuchten Flächen die wenig fruchtbare Fahlerde ist. Aus den genannten Faktoren erklären sich der geringe aktuelle Ertrag und leichte positive Veränderungen in Zukunft in diesem Landkreis. Die sehr guten Erträge im Landkreis Bitterfeld hingegen erklären sich durch die hier untersuchte Parabraunerde oder Braunerde aus Löß, einer starken Temperaturzunahme und einer leichten Zunahme des Niederschlages.

3.2.3.3 Gemeinden und Standorte

Für die vier Perioden des Zukunftsszenariums ist die Entwicklung der Holzerträge relativ zu den Erträgen des Basiszeitraums in Abbildung 25 auf Gemeindeebene dargestellt.

Der relative Ertragszuwachs liegt in der 4. Periode zwischen 0 und 100 % gegenüber der Referenzperiode. Im Vorland des Erzgebirges, in Lagen über 300 m NN ist er am höchsten; hier wirken sich der Temperaturanstieg und genügend sommerliche Niederschläge am positivsten aus. In Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern schwankt der relative Ertragszuwachs i. a. zwischen 50 und 60 %.

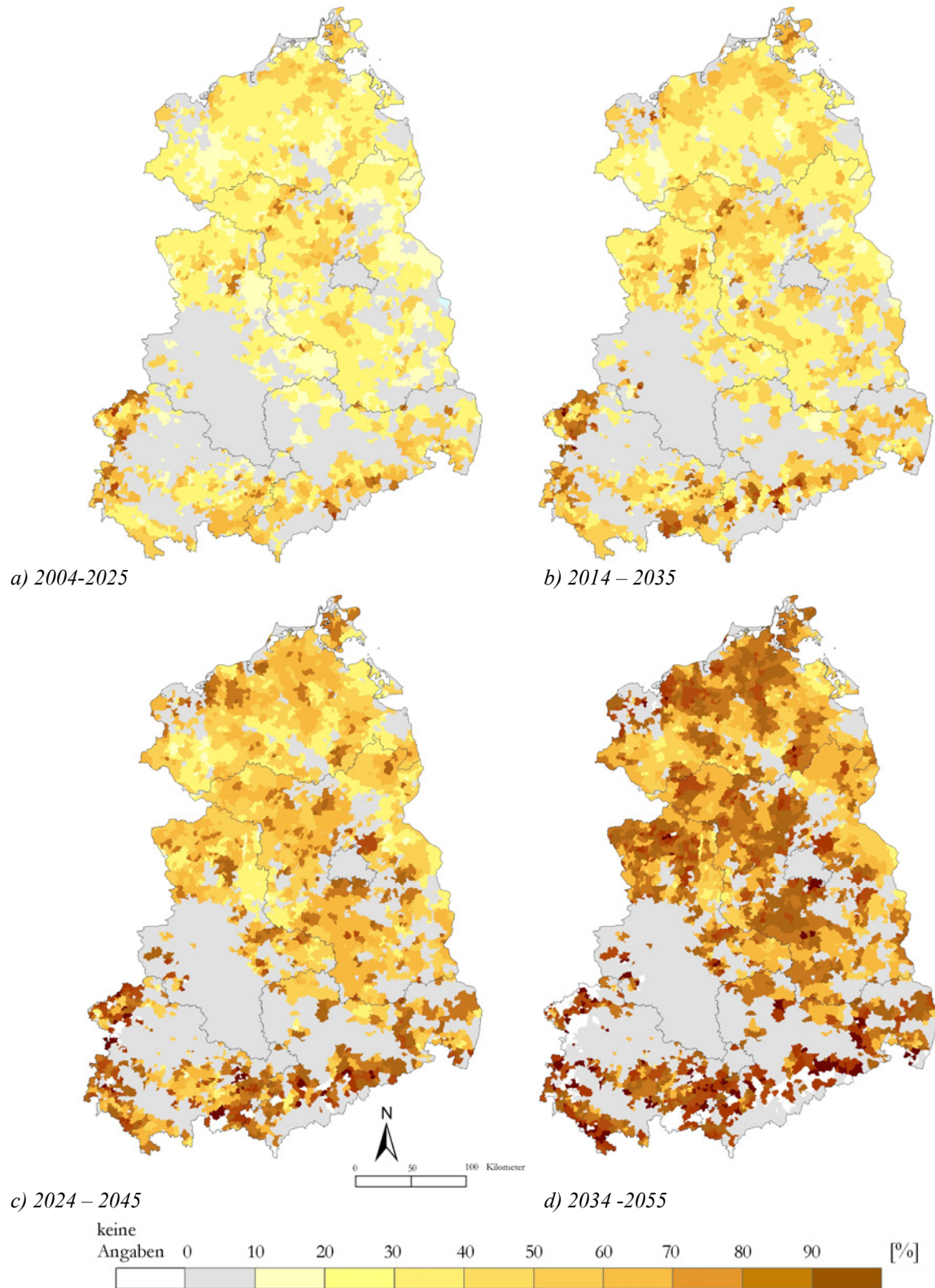


Abbildung 25: Relative Änderungen des simulierten, mittleren jährlichen Holzertrages (y_E) von Aspen-Kurzumtriebsplantagen in den vier Perioden des Klimaszenariums gegenüber der Basisperiode 1982-2003, dargestellt auf Gemeindeebene

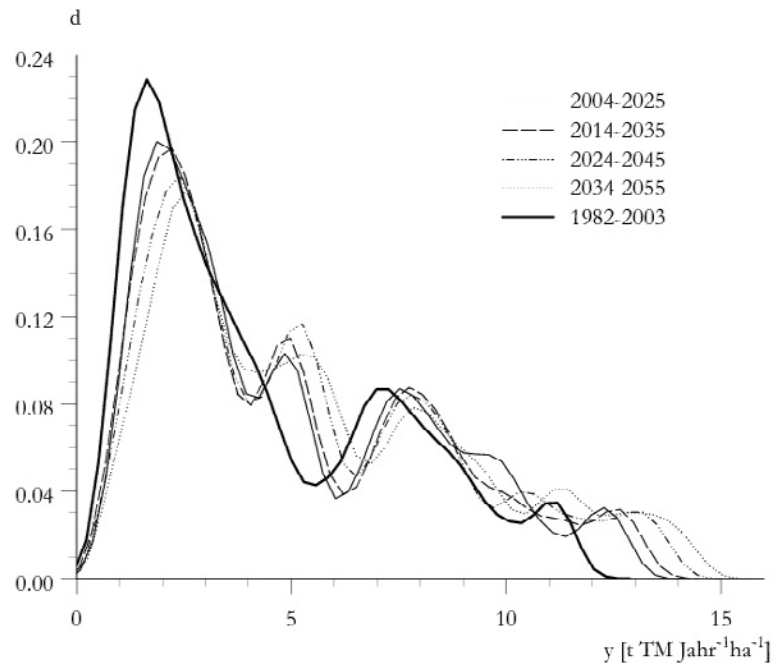


Abbildung 26: Dichtefunktionen zu den Häufigkeitsverteilungen der für die Basisperiode und vier Szenarienperioden simulierten, mittleren jährlichen Holzerträge der Aspen-Kurzumtriebsplantagen für Ostdeutschland unter Berücksichtigung des CO₂-Düngeeffektes

Die mittleren jährlichen Holzerträge für alle betrachteten 2064 Ackerstandorte der Referenzperiode und der Klimaszenarienperioden zeigen in der geglätteten Häufigkeitsdarstellung (Abb. 26) eine deutliche Variation, die vor allem durch den Bodentyp bedingt ist. In der rezenten Klimaperiode treten mit hoher Häufigkeit Erträge um 2 t TM ha⁻¹ a⁻¹, deutlich seltener Erträge um 7 t TM ha⁻¹ a⁻¹ auf. Die Verteilung der Häufigkeiten der Erträge verschiebt sich in den 4 Perioden des Klimaszenariums deutlich hin zu höheren Erträgen. Die Häufigkeit der Erträge um 2 t TM ha⁻¹ a⁻¹ nimmt von der ersten zur vierten Periode ab. Die der Erträge um 8 t TM ha⁻¹ a⁻¹ nimmt zu und es treten mit zunehmender Häufigkeit Erträge über 12 t TM ha⁻¹ a⁻¹ auf. Es gibt keine Verschiebungen zu niedrigeren Erträgen, d.h. alle betrachteten Ackerflächen profitieren unter allen Perioden des Klimaszenariums.

3.2.3.4 Erträge und Böden

Die Erträge von Kurzumtriebsplantagen hängen wesentlich von dem Boden ab, auf dem sie stocken. Wenn die Aspe i.a. auch geringe Ansprüche an den Boden stellt, so zeigt sie den besten Wuchs auf gut durchlüfteten und durchwurzelbaren, nährstoffreichen Böden mit guter Wasserhaltekapazität oder ausreichenden Niederschlägen. Dieser Sachverhalt spiegelt sich in den Ergebnissen der Tabelle 10 wieder. Die dargestellten 10 Leitbodentypen liefern im angenommenen künftigen Klima ausschließlich bessere Erträge als in der Gegenwart. Am meisten profitieren von dem sich ändernden Klima laut der Simulation Anbauten auf Gleyen der Urstromtäler und auf Fahlerden. Maximale Erträge werden auch in Zukunft auf den Niedermoorböden, Auenböden und Tschernosemen zu erwarten sein.

Tabelle 10: Durchschnittliche Biomasseerträge ($t\ TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$) nach Leitbodentypen und Zeiträumen

Leitbodentyp	Durchschnittlicher Ertrag in $t\ TM\ ha^{-1}\ a^{-1}$				
	Basis- periode	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4
Niedermoorboden	10.1	11.8	12.1	13.1	14.0
Auenboden / Gley	9.0	10.1	10.8	11.5	12.4
Gley der Urstromtäler (sandig lehmig)	4.1	5.3	5.5	6.0	6.7
Gley-Podsol (sandig)	7.4	8.6	8.7	9.0	9.5
Parabraunerde aus Geschiebelehm	2.8	3.3	3.5	3.8	4.3
Fahlerde (sandig-lehmig)	1.6	1.9	2.1	2.3	2.5
Bänderparabraunerde (sandig-lehmig)	2.2	2.6	2.7	2.7	3.0
Braunerde-Podsol (nährstoffarme Sande)	1.0	1.3	1.2	1.3	1.5
Braunerde (nährstoffreiche Sande)	7.6	8.5	8.9	9.2	9.7
Tschernosem aus Löß	9.3	10.4	11.3	11.9	13.2

3.3 ZUSAMMENFASSUNG

Die Ertragspotenziale der Baumart Aspe (*Populus tremula* L.) wurden für die fünf ost-deutschen Bundesländer auf Ackerflächen schlechterer Nährstoffversorgung (Ackerzahl kleiner 50) unter heutigem Klima und einem Klimaszenarium für den Zeitraum 2004 bis 2055 abgeschätzt. Das dazu verwendete Waldwachstumsmodell 4C erlaubte die typischen Kurzumtriebsplantagen (20 Jahre Umtriebszeit mit fünfjährigem Erntezyklus) zu simulieren und zusätzlich den Effekt der steigenden atmosphärischen CO₂-Konzentration auf das Wachstum abzubilden. Unter heutigem Klima variieren die Holzerträge von niedrigen Erträgen auf Fahlerden und Braunerde-Podsolen zu höheren auf Gley-Podsolen und Braunerden bis zu hohen Erträgen auf Niedermoor- und Auenböden (Tabelle 11). Aufgrund der hohen räumlichen Variabilität der Bodentypen ist die Ertragsfähigkeit regional entsprechend verschieden. Es zeigt sich auch, dass auf der Hälfte der untersuchten Flächen nur relativ geringe Erträge erzielt werden (unter 4 t TM ha⁻¹a⁻¹). Unter dem Klimaszenarium, das in 4 Zeitperioden eingeteilt wurde, profitieren alle Regionen und Böden, die ertragsreichsten Lagen werden sich vor allem in Mecklenburg-Vorpommern und Sachsen-Anhalt befinden. Über die 4 Zeitperioden hinweg steigen auf allen Böden die Erträge bedingt durch den angenommenen Temperaturanstieg und den nur leichten Rückgang der Jahresniederschläge, der auch im Sommer nicht zu Trockenstress für die Aspe führt. Für Sachsen und Thüringen sind die Ertragssteigerungen besonders hoch, erreichen aber nicht die absoluten Ertragswerte der anderen Bundesländer.

4 KLIMAÄNDERUNGEN UND WEITERE GLOBALE ENTWICKLUNGEN: LANGFRISTIGE CHANCEN UND RISIKEN FÜR DIE OSTDEUTSCHE LANDWIRTSCHAFT

S. Noleppa

4.1 FRAGESTELLUNG

Die Bewertung der Folgen des Klimawandels auf die Flächenproduktivität ostdeutscher Agrarflächen wird wesentlich von der weiteren Entwicklung der Weltagrarmärkte bestimmt. Im Folgenden wird der Frage nachgegangen, wie die dargestellten Wirkungen eines möglichen Klimawandels auf die Flächenproduktivität der ostdeutschen Landwirtschaft ökonomisch einzuordnen sind.

4.2 ÜBERBLICK ÜBER RELEVANTE REGIONALE KLIMAÄNDERUNGEN UND IHRE WIRKUNGEN

Die postulierten Klimaänderungen für Ostdeutschland innerhalb der nächsten Jahrzehnte lassen sich mit vier Stichpunkten zusammenfassen:

- Es kann von einem leichten bis moderaten Anstieg der Jahresmitteltemperaturen ausgegangen werden.
- Die Gesamtmenge des Jahresniederschlags nimmt auf der einen Seite kaum ab, jedoch gibt es auf der anderen Seite eine deutliche Umverteilung der Niederschlagsmenge innerhalb des Jahres.
- So werden, was die Agrarproduktion betrifft, insbesondere die Monate Mai, Juni und Juli trockener als zuvor.
- Besonders gravierend im Sinne der landwirtschaftlichen Produktion wird sich zudem auswirken, dass die Frequenz und die Stärke von Wetterextremen im langfristigen Mittel zunehmen werden.

Die postulierten Klimaänderungen können auf einzelnen Ackerstandorten zu spürbaren Ertragsverlusten führen. Im Mittel sind diese jedoch nur geringfügig. Generell sind sie bei dem ausgewählten Szenarium am höchsten beim Silomais, es folgt der Winterweizen und am geringsten sind die Verluste beim Anbau von Aspen (Zitterpappeln) als Kurzumtriebsplantagen. Wenn man einen CO₂-Düngungseffekt unterstellt, verschwindet ein Großteil der Ertragsverluste und auf vielen Flächen können Ertragsgewinne realisiert werden.

Ungeachtet der simulierten relativ stabilen mittleren Ertragssituation bei Silomais, Winterweizen und Aspen ist in Zukunft mit einer Vielzahl neuer Ertragseinflüsse zu rechnen, die in den Simulationen nur sehr begrenzt berücksichtigt werden konnten. Diese können aus bisher in dieser Intensität nicht gekannten Schaderregerinvasionen oder Krankheitsbildern resultieren oder auch aus Änderungen in der Zirkulation, die in der klimatischen Szenarienbildung bisher nicht berücksichtigt werden konnten und zu überraschenden neuen extremen Wetterkonstellationen führen. Vor dem Hintergrund des verbleibenden klimatischen Restrisikos ergibt sich die Frage, ob die nichtklimatischen Entwicklungen an den Weltagrar- und Rohstoffmärkten diese Risiken eher verstärken oder mindern.

4.3 AUSGEWÄHLTE NACHFRAGEFAKTOREN AUF DEN AGRARMÄRKTEN

Im Folgenden werden vier Nachfragefaktoren diskutiert, die in der gegenwärtigen Situation auch als Megatrends - vgl. u. a. (von Witzke 2007) bezeichnet werden. Es handelt sich dabei um:

- das globale Bevölkerungswachstum,
- das globale Wirtschaftswachstum,
- den ansteigenden Grad der Urbanisierung der Weltbevölkerung und
- den anhaltenden Boom im Bereich Bioenergie.

4.4 BEVÖLKERUNGSWACHSTUM

Nach allen bisherigen Prognosen wird das globale Bevölkerungswachstum anhalten und infolgedessen die Nachfrage nach Nahrungsmitteln weiter ansteigen. Abbildung 27 zeigt die Entwicklung der Weltbevölkerung bis etwa Mitte des Jahrhunderts.

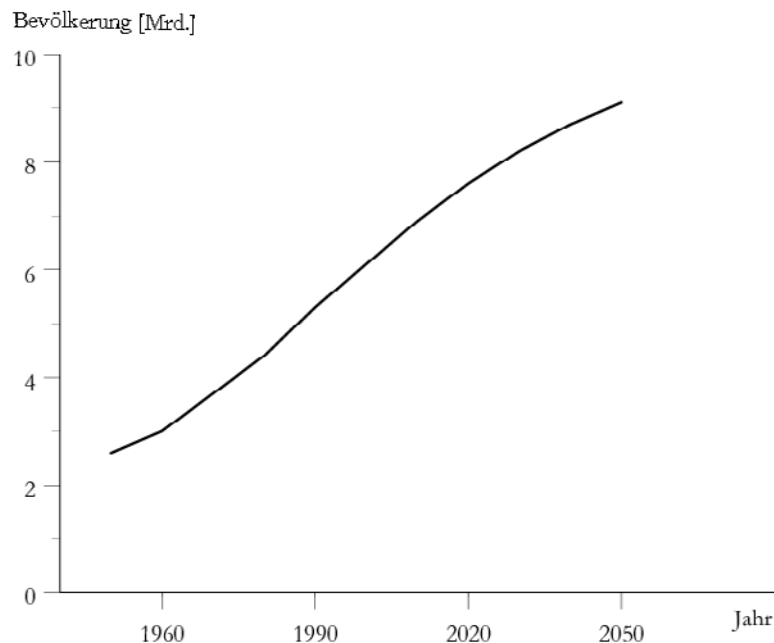


Abbildung 27: Entwicklung der Weltbevölkerung zwischen 1950 und 2050,
Quelle: Eigene Darstellung nach PRB (2007)

Die Weltbevölkerung wird demnach bis zum Jahr 2050 auf etwa 9 Mrd. Menschen ansteigen, das entspricht etwa dem Dreifachen des Jahres 1950 bzw. einer Steigerung von etwa 50 % im Vergleich zu den Zahlen zum Anfang des 21. Jahrhunderts. Bis zum Jahr 2030 kommen jährlich im Durchschnitt etwa 50 Mio. Menschen dazu. Diese Rate nimmt jedoch ab. Für das Jahr 2050 wird nur noch mit einem Anstieg um 25 Mio. Menschen pro Jahr gerechnet. Interessant ist der Fakt, dass das Wachstum der Weltbevölkerung vor allem aus einem Anstieg der Einwohnerzahl in den weniger entwickelten Ländern der Erde resultiert; in Industrieländern sind die Wachstumsraten deutlich geringer bzw. sogar negativ.

Die Konsequenzen für die Agrarmärkte sind offensichtlich. Die Nachfrage wird mit dem Bevölkerungswachstum ansteigen, und das unterschiedliche Wachstum in den Weltregionen wird u. U. zur Verstärkung von Außenhandelsaktivitäten führen.

4.5 WIRTSCHAFTSWACHSTUM UND URBANISIERUNG

Das globale Wirtschaftswachstum und die anhaltende Urbanisierung der Weltbevölkerung sollen gemeinsam diskutiert werden, weil beide Trends hinsichtlich ihres Einflusses auf die Nachfrage nach Agrarprodukten in eine Richtung zielen. Sie verändern die Ernährungspräferenzen. Bevor dieser Zusammenhang genauer umrissen wird, sei auf die Abbildung 28 und Abbildung 29 verwiesen.

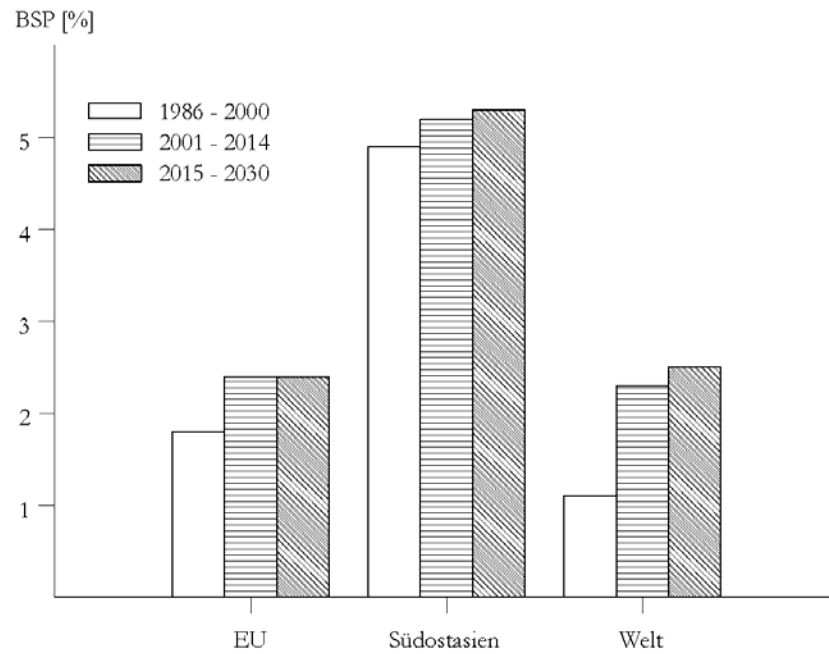


Abbildung 28: Entwicklung des Bruttosozialprodukts in unterschiedlichen Weltregionen zwischen 1986 und 2030, Quelle: Eigene Darstellung nach Worldbank (2006)

Weltweit betrug das Wirtschaftswachstum in den letzten 15 Jahren des 20. Jahrhunderts etwas mehr als 1 %. Global gesehen kann seitdem von einer gewissen Prosperität gesprochen werden. Wachstumsraten der Weltwirtschaft von über 2 % pro Jahr werden nun die Regel, nicht die Ausnahme sein. Motor dieser Entwicklung ist ohne Zweifel Asien, und hier wiederum vor allem auch China, Indien und der gesamte Raum Südasiens, aber auch die so genannten Transformationsländer Mittel- und Osteuropas zählen zu den dynamischen Regionen. Gleichwohl sind die wirtschaftlichen Aussichten auch in Industrieländern, wie am Beispiel der Abbildung 30 etwa mit der EU aufgezeigt, besser als zuvor. Höheres Wirtschaftswachstum ist verbunden mit einer Besserung der allgemeinen Lebensverhältnisse und insbesondere der Einkommenssituation vieler Menschen sowie mit einem erweiterten Zugang zu Nahrungsmitteln für Bevölkerungsgruppen, die zuvor zumindest in Teilen davon abgeschnitten waren (Stichwort: Unterernährung). Dies schafft zusätzliche Nachfragepotenziale auf den Agrarmärkten.

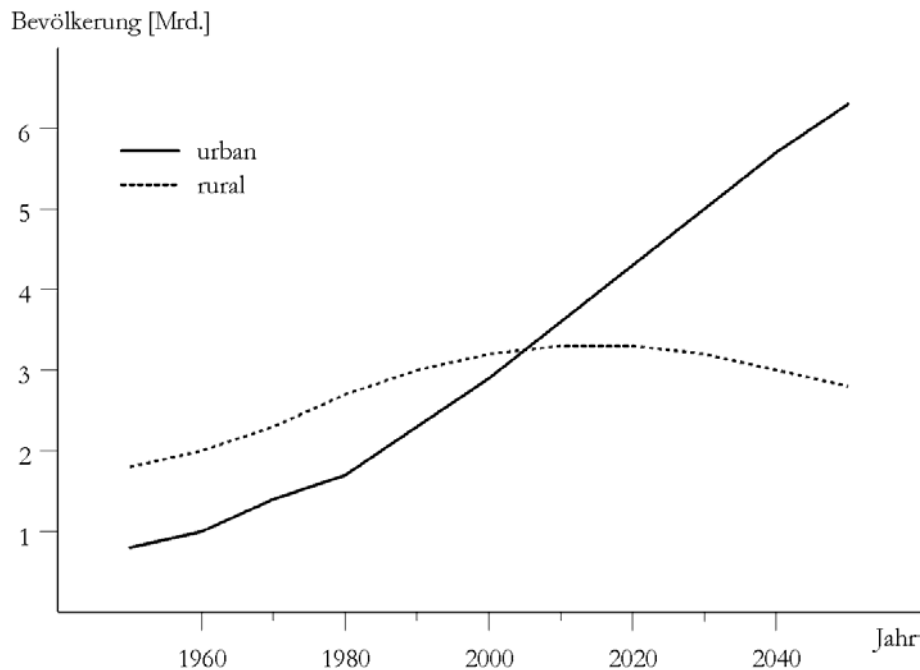


Abbildung 29: Entwicklung der Weltbevölkerung in urbanen und ländlichen Gebieten zwischen 1980 und 2050,
Quelle: Eigene Darstellung nach UN (2005)

Dem ist der ansteigende Grad der Urbanisierung der Weltbevölkerung hinzuzusetzen. Das aktuelle Jahr markiert dabei einen Wendepunkt in der Geschichte der Menschheit. Erstmals werden im Jahr 2008 sehr wahrscheinlich mehr Menschen in Städten wohnen als in ländlichen Gebieten.

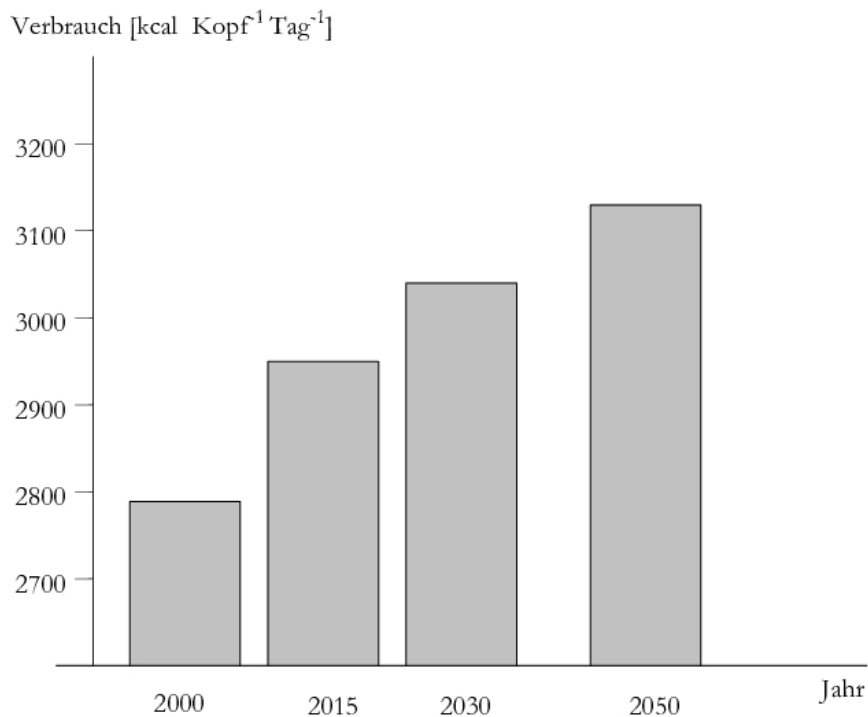


Abbildung 30: Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs an kcal zwischen 2000 und 2050,
Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006)

Und bereits im Jahr 2050 könnten doppelt so viele Menschen in Städten wohnen wie auf dem Lande. Abgesehen davon, dass die Geschwindigkeit der Verstädterung der Weltbevölkerung offensichtlich rapide zugenommen hat – Pinstrup-Andersen (1999) erwarteten einen Gleichstand der Bevölkerungsgruppen in Stadt und Land erst für den Zeitraum 2015-2020 – sind die Konsequenzen ohnehin dramatisch. Urbanisierung bedeutet weitere Transportwege für Nahrungsmittel und somit höhere Verluste bei Transport und Lagerung, d.h. aber auch ein höherer Grad an Verarbeitungsprodukten für den menschlichen Verzehr. Infolgedessen wird ebenfalls mehr an landwirtschaftlichen Rohstoffen nachgefragt werden, um einen adäquaten Input in Form von kcal für die menschliche Ernährung zu erzielen, was weitere Nachfrageschübe im Vergleich zu vorherigen Marktsituationen generieren wird.

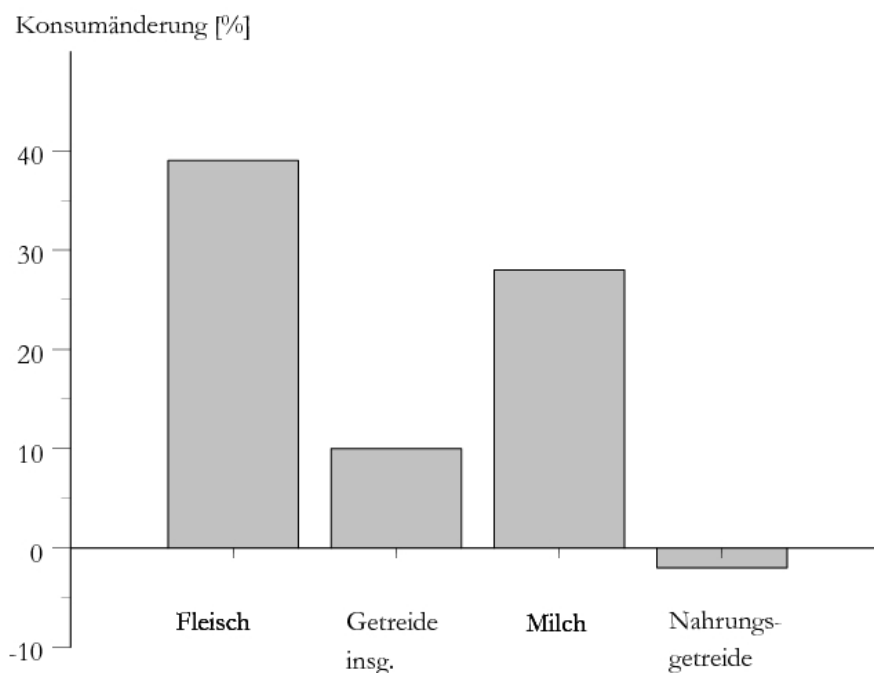


Abbildung 31: Entwicklung des Konsums von Nahrungsmitteln zwischen 2000 und 2050, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006)

Beide ökonomische Effekte – Wirtschaftswachstum und Urbanisierung – werden zusammengenommen zwei Nachfragewirkungen manifestieren. Es wird zu einer Erhöhung des Pro-Kopf-Verbrauchs an kcal insgesamt kommen, und es wird sich darüber hinaus die Zusammensetzung der Ernährung verändern: mehr und mehr verarbeitete und qualitativ hochwertigere Nahrungsmittel werden konsumiert. Die Abbildung 30 und 31 stellen die damit zu erwartenden Wirkungen dar.

Es zeigt sich also zunächst, dass die Nachfrage – gemessen in konsumierten kcal – um deutlich mehr als 10 % innerhalb von 50 Jahren steigen wird. Gleichzeitig wird sich die Nahrungsmittelnachfrage zugunsten tierischer Verarbeitungsprodukte verschieben, was einen stark erhöhten Input in Form von insbesondere pflanzlichen Rohstoffen – Futtergetreide, Proteinpflanzen, Futtergräsern etc. – nach sich ziehen dürfte.

4.6 BIOENERGIE

Der Nachfrageboom nach nachwachsenden Rohstoffen und insbesondere Bioenergie – zur Produktion bzw. Verwertung von Biodiesel, Bioäthanol und Biogas – ist offenkundig und wohl auch nachhaltig geworden. Das wird mit einer deutlichen Ausweitung der Nachfrage nach entsprechenden Produkten verbunden sein, wie es z. B. Abbildung 32 für die EU aufzeigt.

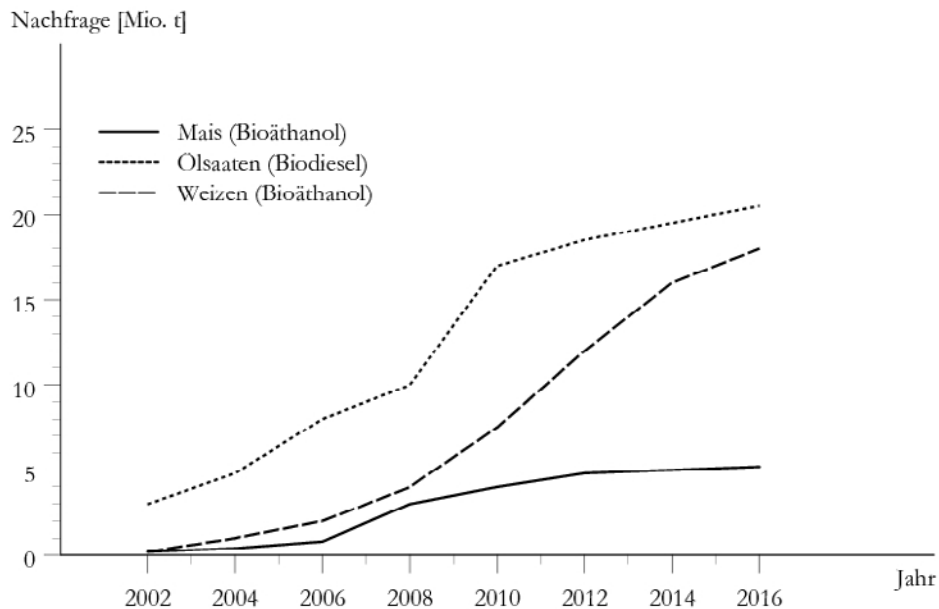


Abbildung 32: Entwicklung der EU-Nachfrage nach pflanzlichen Produkten für die Produktion von Bioenergie zwischen 2000 und 2016, Quelle: Eigene Darstellung nach OECD (2006)

Ähnliche Entwicklungen auf den Bioenergiemärkten werden weltweit erwartet, so auch bei den für die EU wichtigsten Wettbewerbern auf wesentlichen Agrarmärkten, d.h. in Nordamerika und in Brasilien, aber auch in Ländern wie China. Solange die Ölpreise auf einem relativ hohen Niveau bleiben, und davon wird allgemein ausgegangen, wird sich an der beschriebenen Dynamik nichts Wesentliches verändern. Mithin wird es zu einer Verschärfung des bereits offensichtlichen Konflikts in der Nutzung von Biomasse für Nahrungsmittel oder für Bioenergie kommen, wodurch der Druck auf die Fläche zunehmen wird. Es ist zu fragen, wie das Angebot an Agrarprodukten damit Schritt halten kann.

4.7 AUSGEWÄHLTE ANGEBOTSAKTOREN AUF DEN AGRARMÄRKTEN

Auch auf der Angebotsseite werden Schlüsselfaktoren für künftige Entwicklungen diskutiert - vgl. wiederum u. a. (von Witzke 2007). Es handelt sich dabei um:

- den globalen Wasserverbrauch,
- die Verfügbarkeit von Land und
- die Entwicklung von Flächenerträgen.

4.7.1 Wasser

Global nimmt der Wasserverbrauch zu. Momentan werden Steigerungsraten von 20 % innerhalb von 10 Jahren berechnet (Abbildung 33). Es wird deutlich, dass in einem globalen Maßstab die Entnahme von Wasser zunehmen wird und dass die Zunahme besonders groß in der Industrie, aber auch in den privaten Haushalten (als direkter Effekt der Steigerung der Weltbevölkerung) sein wird.

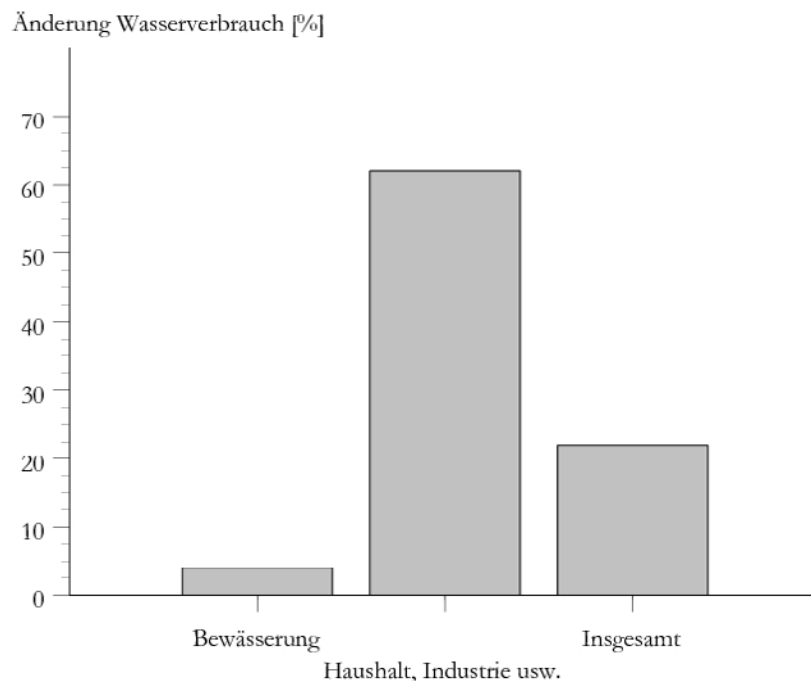


Abbildung 33: Entwicklung des weltweiten Wasserverbrauchs zwischen 1995 und 2005, Quelle: Eigene Darstellung nach IFPRI und IWMI (2007)

Offensichtlich wird also die zusätzliche Entnahme von Wasser durch die Agrarproduktion weniger stark steigen können, selbst wenn intelligente Lösungen in der Applikation Einzug halten, die den Wasserverbrauch je produzierter Einheit Agrarprodukt absenken könnten. Wenn mit der Nachfrage nach Agrarprodukten angebotsseitig Schritt gehalten werden soll, trägt dies zu einer noch stärkeren relativen Wasserknappheit bei. Auf die Wasserverfügbarkeit wird sich dieses eher begrenzend auswirken.

4.7.2 Land

Ähnlich dürfte es sich in diesem Zusammenhang mit der Verfügbarkeit des Faktors Boden bzw. Land verhalten. Zwar ist von einer vergleichsweise hohen theoretischen Verfügbarkeit an kultivierbarem, pflanzenproduktionstechnisch nutzbarem Land auszugehen, wie Abbildung 34 in Anlehnung an (FAO 2006) aufzeigt, doch ist die praktische Nutzung der Reserven

begrenzt, weil Detailstudien, etwa durch (Hofreither 2005) oder auch (IFPRI 2005), technologische und gesellschaftliche Rahmenbedingungen dagegen sprechen lassen. So kann beispielsweise davon ausgegangen werden, dass dort, wo Landwirtschaft bereits betrieben wird, die besten Böden genutzt werden, weitere in die Nutzung einfließende Böden also eher marginaler Natur sein werden, was ihrer zusätzliche Produktivität aus ökonomischer Sicht Grenzen setzen dürfte.

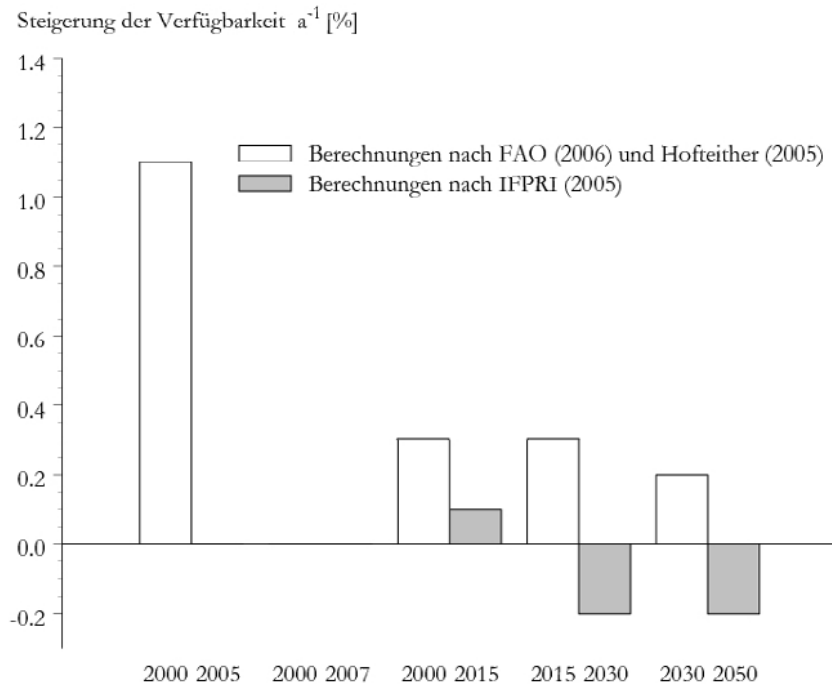


Abbildung 34: Theoretische und realistische Verfügbarkeit von Land für die globale Agrarproduktion, Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006), Hofreither (2005) und IFPRI (2005)

Gegebenenfalls ist sogar mit Rückgängen an ackerbaulich nutzbarer Fläche zu rechnen, insbesondere dann, wenn auf der einen Seite Infrastrukturmaßnahmen (und Städtebau) sowie gleichzeitig Renaturierungsmaßnahmen Platz beanspruchen bzw. eingeleitet werden.

Offensichtlich ist eine dynamische Angebotsentwicklung – ähnlich der prognostizierten Nachfrageentwicklung auf Agrarmärkten – aus Ressourcensicht nicht oder nur eingeschränkt möglich. Mithin müssten entsprechende Effekte aus der Produktivität der Inanspruchnahme von Ressourcen, insbesondere des Bodens, kommen. Hier stellen sich die Aussichten wie folgt dar.

4.7.3 Erträge

Grundlegendes Paradigma in den Agrarwissenschaften war es lange Zeit, dass autonomer technischer Fortschritt aus den bestehenden Systemen heraus in Höhe von 2 bzw. 3 % und mehr pro Jahr real war. Eine solche Situation kann jedoch im Weltmaßstab nicht mehr verzeichnet werden. Im Gegenteil, die globalen Ertragszuwächse sind kontinuierlich zurückgegangen. Werte um 1 % und weniger sind heute Realität. An dieser Situation wird sich in absehbarer Zeit nach Abbildung 35 auch kaum etwas ändern. Dafür sprechen zwei Gründe:

- die gegenwärtig erschließbaren Zuchtpotenziale in der EU und anderen Industrieländern sind weitgehend ausgeschöpft und

- eine Notwendigkeit von technologischen Weiterentwicklungen und Innovationen, um wieder höhere Ertragssteigerungen zu erzielen, ist zwar erkannt, gesellschaftspolitisch und technisch jedoch noch nicht umgesetzt.

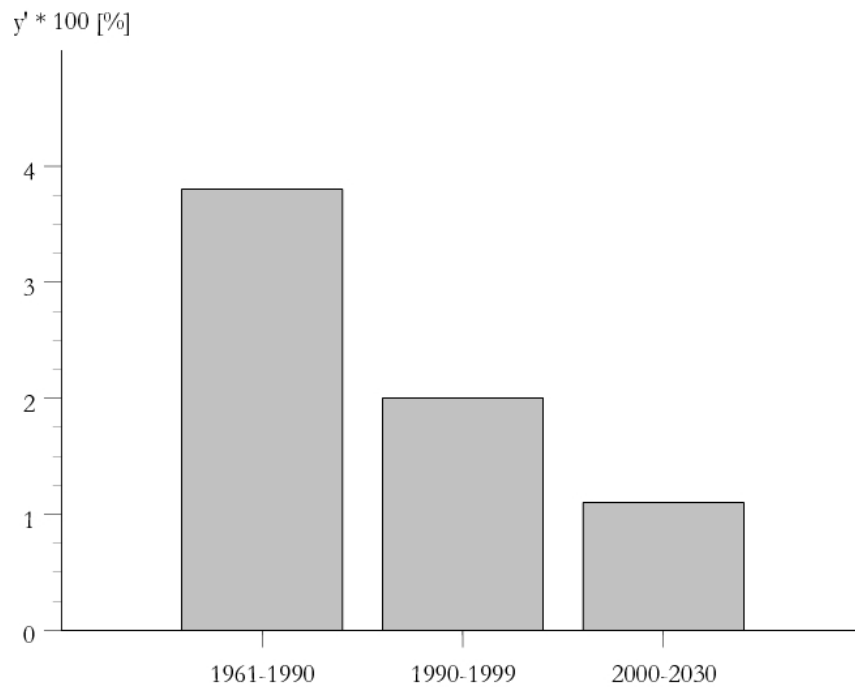


Abbildung 35: Entwicklung durchschnittlicher globaler Ertragszuwachsrate y' zwischen 1961 und 2030,

Quelle: Eigene Darstellung nach FAO (2006)

4.8 KONSEQUENZEN FÜR DIE EINHEIMISCHEN AGRARMÄRKTE

Es wird offensichtlich, dass das Angebot auf den internationalen Agrarmärkten nicht mit der Nachfrageentwicklung Schritt halten kann. Dieser Prozess ist bereits in vollem Gange, wie die aktuelle Preisentwicklung zeigt. In den vergangenen Jahren und insbesondere Monaten haben die Agrarpreise merklich angezogen.

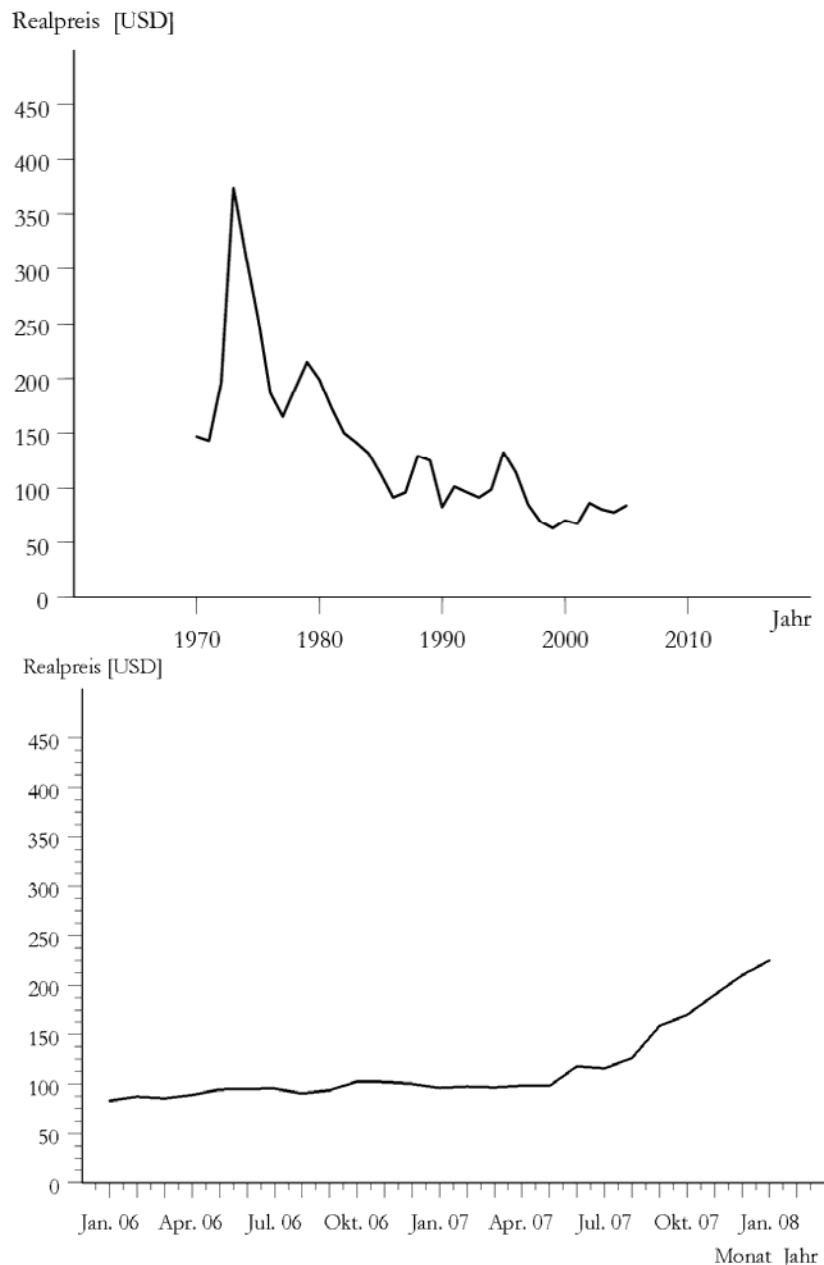


Abbildung 36: Realpreisentwicklung bei Weizen zwischen 1970 und der Gegenwart, Quelle: Eigene Darstellung nach USDA (verschiedene Jgg.)

Für das Beispiel der aktuellen und historischen Weizenpreise ist die Entwicklung seit 1970 in Realpreisen mit der Abbildung 36 aufgezeigt. Preisrückgängen in der Vergangenheit stehen Preissteigerungen in der Gegenwart gegenüber. Dieser Trend wird angesichts der oben aufgezeigten Diskussion anhalten, was zu bedeutsamen Implikationen für die Landwirtschaft führen könnte. Diese Auswirkungen sollen im Folgenden noch kurz skizziert werden.

4.9 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die aufgezeigten Entwicklungen dürften gerade auch mit Bezug auf die ostdeutsche Landwirtschaft langfristig und im Mittel deutliche Wirkungen haben:

- Die Erlöse werden wahrscheinlich über dem Niveau der vergangenen Jahre liegen, da der globale Nachfrageschub und Restriktionen auf der Angebotsseite den Marktpreis positiv beeinflussen.
- Die Produktionskosten dürften ebenfalls steigen, u. a. weil von einem höheren Preisniveau Intensivierungs- und Investitionsanreize ausgehen; zudem wirken steigende Energie- und Rohstoffpreise.
- Per Saldo dürften langfristig und im Mittel die landwirtschaftlichen Einkommen über dem Niveau der vergangenen Jahre liegen.
- Das setzt zweifelsfrei aber auch unternehmerische Anpassungen voraus, etwa zur Absicherung klimabedingter Ertragsschwankungen. Dabei könnte der verstärkte Anbau mehrjähriger Kulturen sowie die alternative Nutzung von Biomasse als Energierohstoff (vgl. auch die an anderer Stelle der Gesamtanalyse angebrachten Untersuchungen zu Aspen) eine wichtige Rolle spielen.
- Profitieren dürften auch die Bodeneigentümer. Hohe Agrarpreise, der Flächendruck durch konkurrierende Nutzungsmöglichkeiten von Biomasse und die fortlaufende Annäherung des ostdeutschen an den westdeutschen Bodenmarkt werden die Bodenpreise weiter anziehen lassen.

Langfristige Prognosen beruhen auf Annahmen und bergen demzufolge Unsicherheiten in sich. Offene Fragen bleiben vor dem Hintergrund der hier erörterten Trends und Auswirkungen. Insbesondere wurde nicht auf die folgenden Fragen eingegangen:

- Wie entwickelt sich die Agrarpolitik weiter, wird die begonnene Liberalisierung weiter voranschreiten?
- Wie wird die Landwirtschaft selbst in die Klimaschutzpolitik integriert; wird auch sie ihren Beitrag zur Mitigation – etwa in Form von Emissionssteuern und einem Emissionsrechtehandel – leisten müssen?
- Wird es in absehbarer Zeit technologische Sprünge geben, etwa im Sinne einer zweiten „Grünen Revolution?“
- Entscheidende neue Sichtweisen könnten sich ergeben, je nachdem, wie eine Einschätzung zu diesen und anderen Fragen ausfällt. Dennoch: Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann geschlussfolgert werden, dass trotz aller Unsicherheiten und der Vielzahl von Annahmen zu Klima- und anderen globalen Effekten die Chancen für die ostdeutsche Landwirtschaft höher einzuschätzen sind als die Risiken.
- Insbesondere dürfte zutreffen, dass der Klimawandel zwar eine wichtige, jedoch nicht die entscheidende Herausforderung ist, der sich die Landwirtschaft in Deutschland und darüber hinaus zu stellen hat. Etwaige negative klimabedingte Auswirkungen können sogar mehr als ausgeglichen werden, wenn die sich ergebenden Marktchancen wahrgenommen und genutzt werden.

5 GESAMTEINSCHÄTZUNG ZUM KLIMARISIKO FÜR DIE OSTDEUTSCHEN ACKERSTANDORTE

F. Wechsung

Auf der Grundlage von Simulationsergebnissen zum weiteren Temperaturanstieg in Mitteleuropa in Folge einer Erhöhung der atmosphärischen CO₂-Konzentration von gegenwärtig 386 ppm auf 542 ppm im Jahr 2055 wurde eine komplexe Klimaprojektion für Ostdeutschland für den Zeitraum 2004-2055 vorgenommen. Aus der Vielzahl der statistisch möglichen Entwicklungen wurde die Variante ausgewählt, die am besten an etablierten Trends zur Entwicklung der klimatischen Wasserbilanz anschließt. Diese Variante wurde als die bedingt-wahrscheinlichste Klimaprojektion bezeichnet und als Ausgangspunkt gewählt für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die natürliche Produktivität der Ackerflächen mit Bezug auf die gegenwärtig gebräuchlichen Sorten und Anbauverfahren. Nach der bedingt-wahrscheinlichsten Klimaprojektion ergeben sich erst zur Mitte des Jahrhunderts Konstellationen bei den Klimavariablen (Niederschlagsrückgang im Sommer, Anstieg der potenziellen Verdunstung während des gesamten Jahres), die zu deutlichen Ertragseinbußen vor allem beim Mais führen können. Mit Ertragseinbußen ist insbesondere zu rechnen, wenn auf Grund von ansteigenden Kostenbelastungen für die Stickstoffdüngung nicht mehr optimal gedüngt werden kann. In diesem Fall wird der ansonsten stark kompensatorisch wirkende CO₂-Düngungseffekt nur bedingt wirksam werden. Die Entwicklung beim Mais dürfte mehr oder weniger repräsentativ für den Anbau anderer Sommerkulturen, insbesondere von Kartoffeln, Sommergetreide und Zuckerrüben, sein. Ausschlaggebend ist dabei die ähnliche Empfindlichkeit gegenüber Wasserstress. Physiologische Unterschiede im Photosynthesemechanismus treten dahinter zurück.

Im Vergleich zur Sommerkultur Mais reagiert der Winterweizen weniger stark mit Ertragsverlusten. Er profitiert von den günstigeren Bedingungen für die Vorwinterentwicklung, wodurch er vergleichsweise robust gegenüber Witterungsabläufen mit ausgeprägter Vorsommertrockenheit ist. Dieses Verhalten dürfte repräsentativ für das Spektrum der einjährigen Winterkulturen (Wintergetreide, Raps) sein.

Von den kritischen Klimaveränderungen gegen Ende des betrachteten Zeitraumes sind naturgemäß die leichteren sandigen Standorte stärker als jene mit einem höheren Wasserrückhaltevermögen betroffen. Interessanterweise kann auf diesen Standorten beim Anbau von Aspen in Kurzumtriebsplantagen unter vergleichbaren Bedingungen mit Ertragsgewinnen gerechnet werden. Der Niederschlagsrückgang während der Sommermonate erreicht offenbar kein kritisches Niveau und kann durch Zugewinne im Winterhalbjahr ausgeglichen werden. Der Temperaturanstieg stimuliert insgesamt die Wüchsigkeit. Ein Effekt, der durch den Anstieg des atmosphärischen CO₂-Anstiegs noch verstärkt wird.

Die ökonomischen Rahmenbedingungen sprechen insgesamt dafür, dass die Wertschätzung der Märkte für Rohstoff- und Biomasseproduktion vom Ackerland eher zu- als abnimmt. Selbst wenn es zu Rückgängen beim klimatischen Ertragspotenzial von Ackerkulturen in Ostdeutschland kommen sollte, werden die monetären Verluste durch die parallel zu erwartenden Preisanstiege wahrscheinlich überkompensiert. Unabhängig davon gibt es im Spektrum der landwirtschaftlichen Kulturen noch Kompensationsreserven z.B. durch eine Ausdehnung des Anbaus von Winterkulturen. Die Ausweitung des Agrarholzanbaus auf leichten Standorten kann darüber hinaus zu einer erheblichen

Stabilisierung der Einkommenssituation der hier wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betriebe beitragen.

Auf der Basis der vorliegenden Klimaprojektion und unter Berücksichtigung der globalen und regionalen Markttendenzen wird das Klimarisiko für den Werterhalt ostdeutscher Ackerflächen insgesamt als mäßig bis gering eingestuft.

6 MATERIAL UND METHODEN

6.1 KLIMA

6.1.1 Temperaturprojektionen für Ostdeutschland

Der Temperaturtrend aus einem globalen Zirkulationsmodell (ECHAM5/OM, Röckner et al. 2003) wurde für die Temperaturprojektion zugrunde gelegt. Es wurde der Modelllauf ECHAM5/OM IPCC-AR4 MPI-ECHAM5_T63L31 MPI-OM_GR1.5L40 20C3M run no.1: atmosphere 6 hour values MPImet/MaD Germany genutzt.

6.1.2 Klimareihen

Für die statistische Analyse regionaler Klimatrends und die Szenarienbildung standen Klimareihen von insgesamt 829 meteorologischen Stationen für den Zeitraum 1951 – 2003 zur Verfügung. Sie wurden durch den Deutschen Wetterdienst bereitgestellt. Von den 829 Stationen waren 96 synoptische Klimastationen mit 11 gemessenen meteorologischen Größen (Tab. 1) und 733 reine Niederschlagsstationen. Für die Niederschlagsstationen wurden die übrigen am Standort nicht gemessenen meteorologischen Größen mittels Interpolation aufgefüllt. Für die Interpolation wurde ein gewichtetes Distanzverfahren genutzt, wobei bei der Temperatur und dem Luftdruck die Höhenabhängigkeit berücksichtigt wurde.

Alle meteorologischen Messreihen wurden auf Qualität geprüft. Für die Homogenitätsprüfung wurden die Differenzen zwischen den (um den Jahresgang bereinigten) Werten von benachbarten Stationen genutzt. Sprünge und Inhomogenitäten wurden mit Hilfe eines gleitenden t-Test identifiziert und dann unter Nutzung bekannter Nachbarschaftsrelationen außerhalb des als fragwürdig eingestuften Bereichs korrigiert. Entsprechende Fehlwerte wurden unter Nutzung von Regressionsmodellen aufgefüllt.

6.1.3 Beschreibung des regionalen statistischen Klimamodells STAR II

Das Verfahren STAR II geht von folgenden Annahmen aus:

- Zeitliche Abschnitte meteorologischer Beobachtungsreihen können in der Zukunft erneut oder zumindest in sehr ähnlicher Weise auftreten.
- Es ist prinzipiell möglich, durch Neukombination von Klimadatensätzen aus der Vergangenheit ein künftiges Klima zu erzeugen.
- Es gibt dominante Klimavariablen, z.B. die Temperatur, deren Änderung die anderen Klimavariablen folgen. Trends zur Änderung von dominanten Klimavariablen können deshalb als Zielgrößen für die Neukombination von Klimadatensätzen genutzt werden (vgl. Abb. 37).

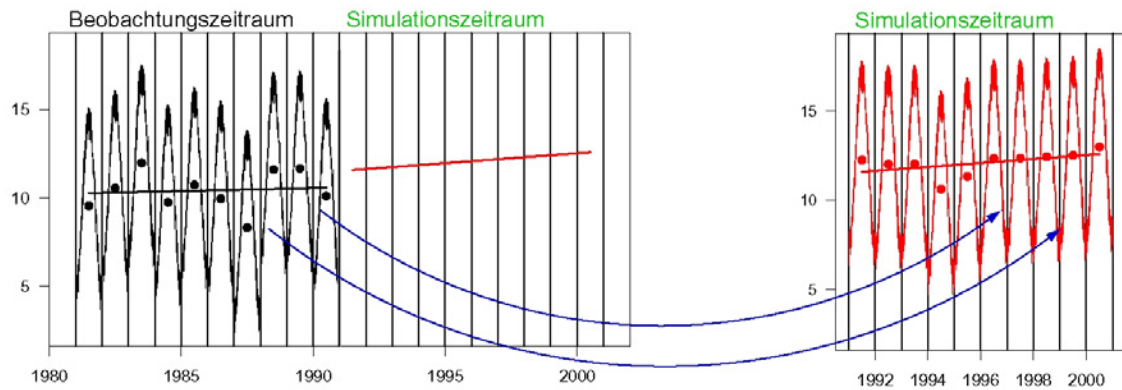


Abbildung 37: Illustration des Vorgehens: Gegeben ist (links) eine Beobachtungsreihe für eine dominante Klimavariablen (hier die Temperatur, schwarz) und eine Trendannahme zu deren Fortsetzung (rote Regressionsgerade) für den Simulationszeitraum. Gesucht wird (rechts) eine Neukombination der Klimareihe (rot), die der Vorgabe genügt und aus Abschnitten der Beobachtungsreihe zusammengesetzt ist (rechts). Die Punkte zeigen jeweils die Jahresmittel an, auf die sich die Regressionsvorgabe bezieht.

Für die Neukombination von Klimadaten in einem Szenariendatensatz können folgende Konsistenzforderungen aufgestellt werden:

- physikalische Plausibilität, ein Tag mit Niederschlag, aber ohne Bewölkung darf z.B. nicht auftauchen,
- realistische Jahresgänge, die Sommer müssen z.B. wärmer als die Winter simuliert werden,
- realistische zeitliche Persistenz der einzelnen Variablen, einem heißen Tag sollte kein unmittelbarer Frosteinbruch folgen,
- realistische räumliche Persistenz der Beobachtungsvariablen, ein simulierter lauer Frühlingsstag in Berlin etwa sollte keinen Frosteinbruch in Potsdam begleiten.

6.1.3.1 Die Szenarienbildung für einzelne Stationen

Im Folgenden wird zunächst am Beispiel einer Station dargelegt, wie Abschnitte der Beobachtungsperiode so neu aneinandergesetzt werden können, dass die entstehenden Reihen einen vorgegebenen Klimatrend (hier: Temperatur) nachvollziehen und zusätzlich noch den oben beschriebenen Konsistenzigenschaften genügen (Abb. 38).

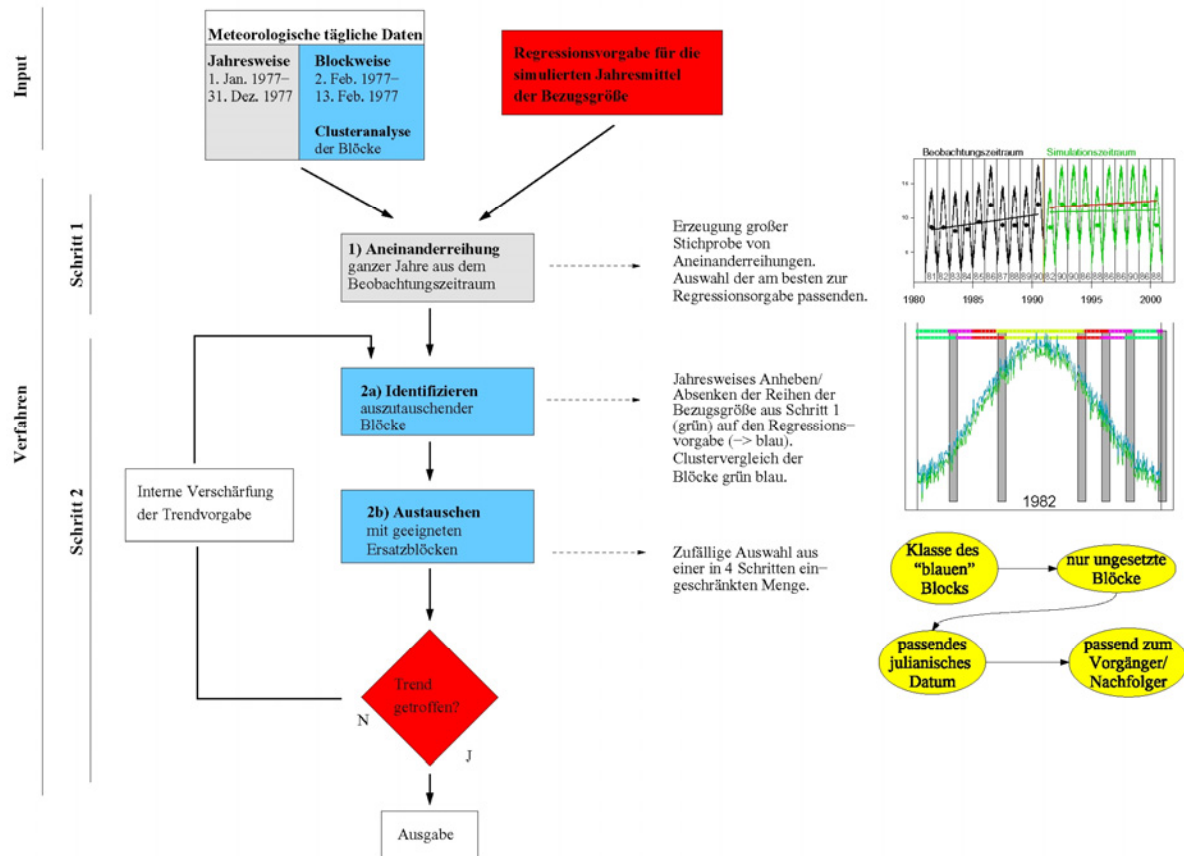


Abbildung 38: Zusammenfassende Gesamtdarstellung des Verfahrens STAR II für eine einzelne Station mit der Temperatur als dominanter Klimavariablen und Bezugsgröße

Das Verfahren STAR II beschreitet dazu einen heuristischen Weg, der für die Szenarienbildung an einer einzelnen Station in Abbildung 38 zusammengefasst ist und aus zwei Schritten besteht, die auf unterschiedlichen Zeitskalen arbeiten: der erste auf der Skala von Jahren (in der Abbildung grau hinterlegt), der zweite auf der Skala von 12-Tages-Blöcken (hellblau hinterlegt).

Die Beobachtungsreihe wird zu Beginn einmal nach Jahren (vom 1. Januar bis 31. Dezember), einmal nach gleitenden 12-Tages-Blöcken unterteilt. Sowohl mit dem Begriff „Jahr“ als auch mit dem „12-Tages-Block“ verbindet sich eine Liste von Kalenderdaten und ihren zugehörigen Beobachtungen.

Die Blöcke 1 - n der Beobachtungsperiode, charakterisiert durch ihre Werte der Bezugsgröße, werden in der Vorbereitung durch eine Cluster-Analyse (Gerstengarbe und Werner 1997; Gerstengarbe et al. 1999) klassifiziert und die einander ähnlichen Blöcke in Klassen zusammenfasst. Diese vorbereitenden datenorganisierenden Maßnahmen sind im oberen „Input“-Teil der Abbildung mit angedeutet. Darunter findet sich im „Verfahren“-Teil ein Flussdiagramm, das die beiden Schritte des Verfahrens darstellt, wobei die Zeitskala des jeweiligen Schritts mit der hinterlegten Farbe angezeigt wird. Rechts finden sich in Wort und Bild die Grundideen zu den einzelnen Schritten.

Im ersten Schritt werden jahresweise Abschnitte der meteorologischen Beobachtungsreihe neu aneinandergereiht. Ziel dieses Schritts ist es, durch die Neuordnung bereits möglichst nah an einen vorab festgelegten Trend für die dominante Klimavariablen (hier: Temperatur) zu gelangen. Dazu wird eine große Stichprobe von zufälligen Reihungen jahresweiser Abschnitte erzeugt, deren Länge der des Simulationszeitraums entspricht. Für jede dieser zufälligen Reihungen wird der Trend der Bezugsgröße bestimmt und schließlich diejenige ausgewählt, die den vorgegebenen Parametern am nächsten liegt. Diese „erste Näherung“ weist garantiert realistische Jahressgänge und Persistenzen auf, da sie aus Abfolgen innerhalb der Jahre besteht, die bereits einmal beobachtet wurden. Auch wenn der zugehörige lineare Trend nicht allzu weit von der Vorgabe entfernt ist, wird es im Allgemeinen nur selten gelingen, bereits mit der ersten Näherung die Trendvorgabe zu erreichen. Eine Nachbesserung wird erforderlich sein.

Hierzu wird im zweiten Schritt von der Zeitskala ganzer Jahre auf die kürzere Skala von 12-Tages-Blöcken übergegangen. Die Nachbesserung besteht darin, die sich aus der ersten Näherung ergebende Reihe Block für Block durchzugehen und für jeden Block zu entscheiden, ob er aus der ersten Näherung übernommen wird oder nicht. Dazu wird ein heuristisches Kriterium verwendet, das bewertet, ob ein Block aus der ersten Näherung die exakte Trendvorgabe erfüllt. Wenn dies nicht der Fall, muss ein passender Ersatz aus den Blöcken des Beobachtungszeitraums gesucht werden. Der Ersatzblock wird so ausgewählt, dass sich mit seinen Beobachtungen einerseits physikalisch plausible Witterungsabfolgen ergeben; andererseits soll er dazu beitragen, dass die auf diese Weise schrittweise entstehende Reihe der Bezugsgröße der Trendvorgabe genügt.

Hinter dem Vorgehen des zweiten Schritts stehen folgende Überlegungen:

- Durch die Verwendung von Blöcken als zeitlichen Abschnitten sind realistische Witterungsabfolgen innerhalb der Blöcke garantiert – sie entstammen ja einem tatsächlich beobachteten Wettergeschehen. Die Länge von 12 Tagen orientiert sich dabei an typischen Erhaltungsneigungen von Größen wie Temperatur, Luftdruck und Niederschlag. Ein bei der Auswahl passender Ersatzblöcke verwendetes heuristisches Kriterium verlangt außerdem, dass die Blocklänge gerade sein muss.
- Durch das Beibehalten einiger Blöcke aus der ersten Näherung bleibt ein „Grundgerüst“ der beobachteten Jahre erhalten. Dies trägt zu einer physikalisch plausiblen Witterungsabfolge innerhalb der einzelnen Jahre bei.
- Die Art der Ersetzung der Blöcke, die nicht beibehalten werden, geschieht anhand von Kriterien, die für eine physikalisch plausible Witterungsabfolge in der entstehenden Reihe sorgen.

6.1.3.2 Die Szenarienbildung für mehrere Stationen einer Region

Die beschriebene Herangehensweise lässt sich praktisch unverändert auf Simulationen für mehrere Stationen übertragen – die Abläufe finden lediglich in einem höherdimensionalen Raum statt. Anstatt eines einzelnen Wertes der Bezugsgröße werden die Werte von allen betrachteten Stationen verwendet, anstatt einer einzelnen Trendvorgabe wird eine Vorgabe für jede betrachtete Station benötigt. Die Cluster-Analyse klassifiziert Blöcke, die nicht nur durch ihre Werte der Bezugsgröße an einer Station, sondern durch ihre Werte an allen Stationen charakterisiert werden. Ein Jahr der Beobachtungsperiode enthält neben den Kalenderdaten die Beobachtungen aller Stationen der Untersuchungsregion, genauso wie die Blöcke. Diese Unterschiede in der Dimensionalität sind die einzigen.

Je nach Dichte der Stationen und der klimatischen Heterogenität des Untersuchungsgebietes kann es überflüssig sein, wirklich alle Stationsreihen an der Konstruktion der Simulationsreihen zu beteiligen. In diesem Fall bietet sich wiederum die Cluster-Analyse an, diesmal, um die Stationen nach Ähnlichkeit zu klassifizieren. Für jede der Stationsklassen wird nun eine Station als Repräsentantin gewählt und einzig diese repräsentativen Stationen bekommen Trendparameter vorgegeben und bringen ihre Beobachtungsreihen in das Verfahren ein. Die für den Zeitraum des Szenariums bestimmte Blockfolge an den repräsentativen Stationen dient dann im nächsten Schritt als Muster für die Neuordnung der Klimablöcke an allen anderen Stationen je Stationsklasse. Im konkreten Szenarienfall wurde genau so vorgegangen. Als für Ostdeutschland repräsentativ wurden die Stationen Schwerin, Potsdam, Waren, Grebenhain und Seesen identifiziert.

6.1.3.3 Die Erzeugung einer ausreichend großen Stichprobe von Realisierungen eines Szenariums

Das Modell STAR II ist prinzipiell in der Lage, für jedes Szenarium beliebig viele Realisierungen zu berechnen. Dabei versteht man unter einer Realisierung die Berechnung eines Szenarienlaufs. Sollen für ein Szenarium mehrere Realisierungen berechnet werden, wird die Abfolge der Daten (Jahre) in den zu erzeugenden Zeitreihen über eine Monte-Carlo-Simulation variiert ohne das dabei die für die Bezugsgröße vorgegebenen statistischen Charakteristika (Trend, Mittelwert, Varianz etc.) verändert werden. Auf diese Art und Weise erhält man n zufällig erzeugte Realisierungen (Stichprobenwerte) für das vorgegebene Szenarium. Damit ist es möglich, Aussagen zur Schwankungsbreite der durch das Modell erzeugten Ergebnisse zu machen.

Für die weitere Arbeit mit diesen Simulationen ist es vorteilhaft, bestimmte Realisierungen zu charakterisieren und/oder Gruppen aus der Gesamtmenge auszugliedern. Dazu wird eine für die weiteren Untersuchungen wichtige Zielgröße ausgewählt. Geeignet dafür ist zum Beispiel der komplexe Parameter der klimatischen Wasserbilanz, in dessen Bestimmung neben dem Niederschlag auch noch die aus Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte und Globalstrahlung berechnete potentielle Verdunstung nach Turc/Ivanov (DVWK 1996) eingeht. Nach Berechnung der klimatischen Wasserbilanz wird für jede Realisierung der Trend des Gebietsmittels dieser Größe berechnet. Die Verteilung der n Trends (hier $n = 1000$) bildet die Basis für die Auswahl der weiter zu verwendenden m ($m \leq n$) Realisierungen. Für die vorliegende Untersuchung wurde die dem Median der Verteilung am nächsten liegenden Realisierung aus den 1000 vorher berechneten ausgewählt. Sie wird im Weiteren als mittlere Realisierung des Szenariums bezeichnet.

6.1.4 Modellvalidierung

Der überwiegende Teil des Untersuchungsgebietes Ostdeutschland (85%) wird vom deutschen Teil des Elbeeinzugsgebietes überdeckt. Für das Elbeeinzugsgebiet wurde bereits in einer früheren Arbeit eine umfassende Validierung des beschriebenen STAR II Algorithmus vorgenommen (Orlowsky et al., 2007). Auf diese Ergebnisse soll im Folgenden zurückgegriffen werden. Die Validierung des Modells wurde anhand der Daten mehrerer Klimastationen durchgeführt. Zur Prüfung des Szenarienmodells wurde ein Szenarium mit 1000 Realisierungen für den Referenzzeitraum 1976–2000 erzeugt. Als Trainingszeitraums wurde die Periode 1951–1975 genutzt. Die Verteilungen der simulierten Klimavariablen des Szenariums wurden stationsweise mit den tatsächlich beobachteten Werten verglichen. Für die Visualisierung der Verteilungen wurden Box-Grafiken genutzt.

Die Vorgaben für die Validierungsparameter der statistischen Tests für den Vergleich von beobachteten und simulierten Reihen kann Tabelle 11 entnommen werden.

Tabelle 11: Vorgaben für Validierungsparameter

Messwert	Auswertung	Abkürzung
Niederschlag	mittlerer Monatswert	
	Standardabweichung	
	Monatsmaximum (höchster Tageswert)	
	Anzahl der Tage < 0.1 mm /Tag	(TgON)
	Anzahl der Tage ≥ 10.0 mm/Tag	(TgSN)
Temperatur	Monatsmittelwerte	
	Standardabweichungen	
	Eistage	(Etg)
	Frosttage	(FTg)
	Sommertage	(STg)
	heiße Tage	(HTg)
Alle anderen Parameter	Monatsmittelwerte	
	Standardabweichung	

6.1.4.1 Temperatur

6.1.4.1.1 Langjähriges Mittel

Abbildung 39 zeigt in den Boxen die Spannweite der 1000 Simulationen für die über die komplette Referenzperiode gemittelten Tagesmittel der Lufttemperatur an allen 63 Stationen des Elbe-Einzugsgebietes. Die Spannweiten zeigen sich allgemein als klein und liegen sehr nahe an den beobachteten Mitteln. Die Abweichungen überschreiten ± 0.2 K nicht und lassen keine räumliche Systematik erkennen, sie scheinen also zufällig zu sein. Die gute Übereinstimmung war für die repräsentativen Stationen zu erwarten, da mit der linearen Trendvorgabe natürlich auch das Mittel vorgegeben wurde. Auch für die restlichen Stationen ist die Übereinstimmung jedoch ausgezeichnet, was die „Repräsentativität“ dieser vorab als repräsentativ eingestuften Stationen bestätigt.

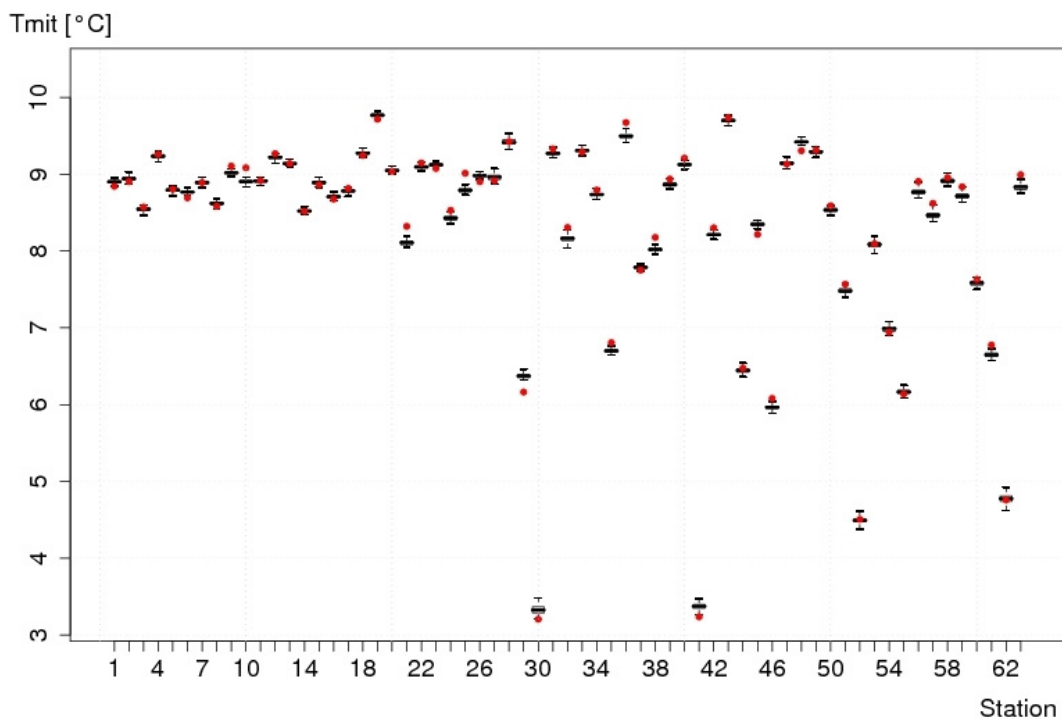


Abbildung 39: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Jahresmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes

6.1.4.1.2 Standardabweichung der Tagesmittel

In Abbildung 40 sind die simulierten und beobachteten Standardabweichungen der Tagesmitteltemperatur an den einzelnen Stationen dargestellt. Im Vergleich zu den Mitteln fällt eine größere Spannweite in den Simulationen auf, im Mittel werden die beobachteten Standardabweichungen jedoch sehr gut getroffen.

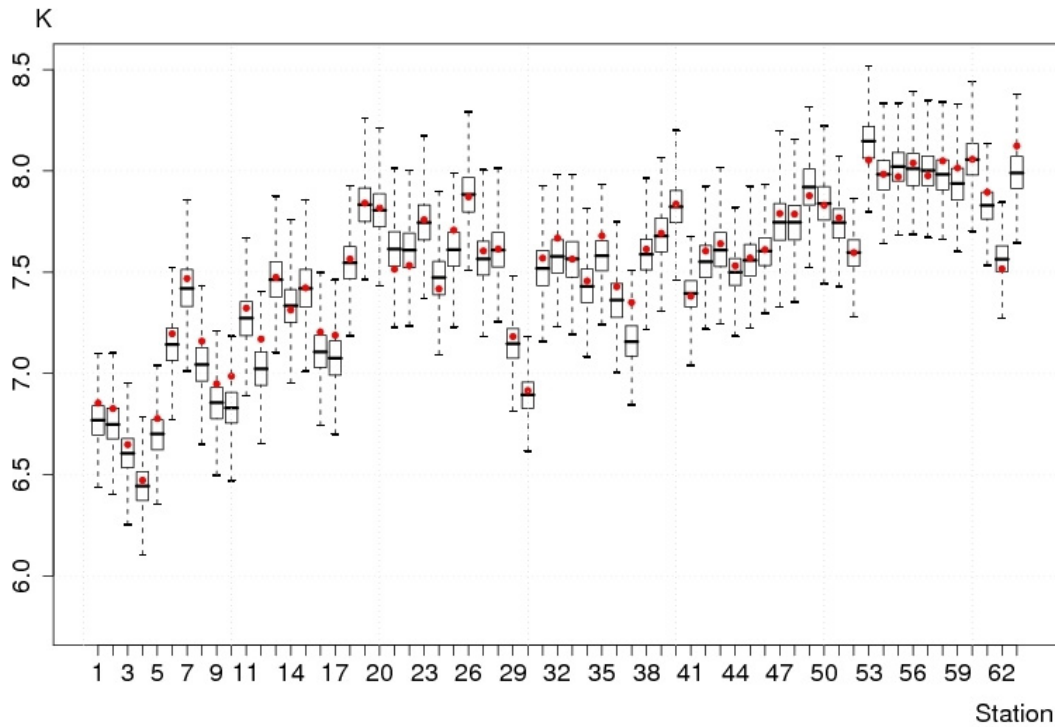


Abbildung 40: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Standardabweichung der Tagessmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes

6.1.4.1.3 Standardabweichung der Jahresmittel

Ebenfalls relativ breit streuen die Standardabweichungen der Jahresmittel der Lufttemperatur. Hinzu kommt eine systematische Unterschätzung der beobachteten Standardabweichung (Abb. 41). An dieser Stelle wird die Begrenzung des statistischen Ansatzes deutlich: Das Verfahren generiert Simulationsreihen, deren Eigenschaften statistisch ähnlich zu denen der Beobachtungsreihen sind. Wenn sich eine Klimavariablen gegenüber der Vergangenheit gravierend ändert, wie es hier bei der interanuellen Standardabweichung der Fall ist, kann das Verfahren diese Verschiedenheit in manchen Fällen nur näherungsweise abbilden.

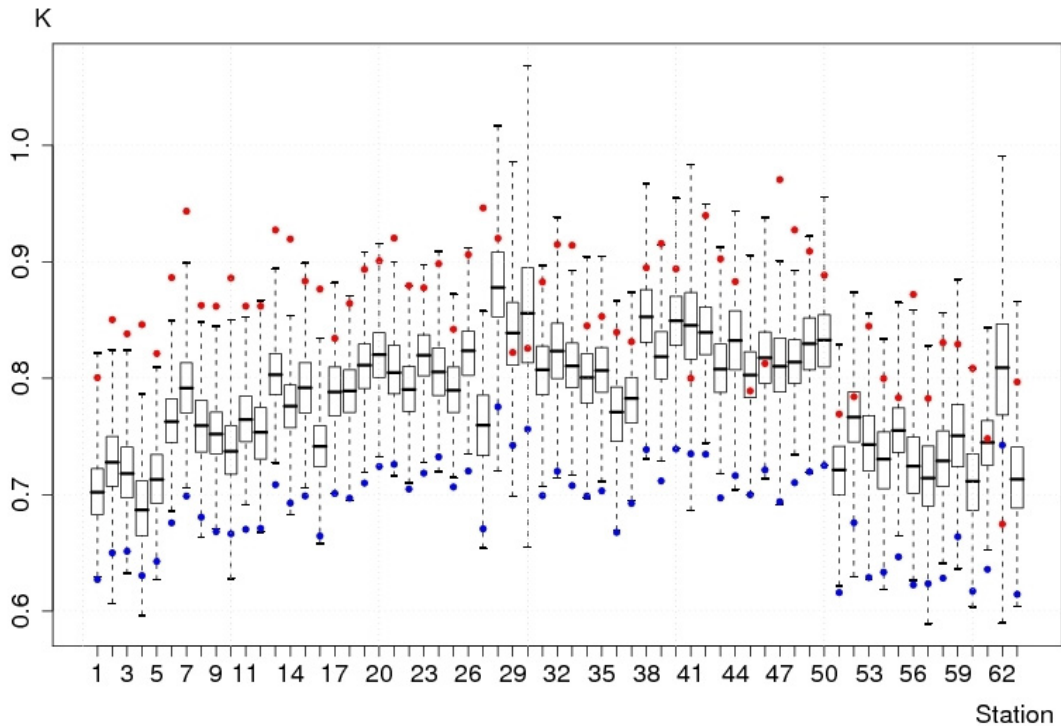


Abbildung 41: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Standardabweichung der Jahresmitteltemperatur (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

6.1.4.2 Niederschlag

6.1.4.2.1 Langjähriges Mittel

Auch wenn die Übereinstimmung zwischen simulierten und beobachteten Jahresniederschlägen im Mittel nicht ganz so gut ist wie für die Mitteltemperaturen, fällt die beobachtete mittlere Summe für die meisten Stationen in den simulierten Bereich, der wiederum im allgemeinen sehr eng ist (s. Abb. 42). Die Abweichungen überschreiten eine Größenordnung von 10% nicht.

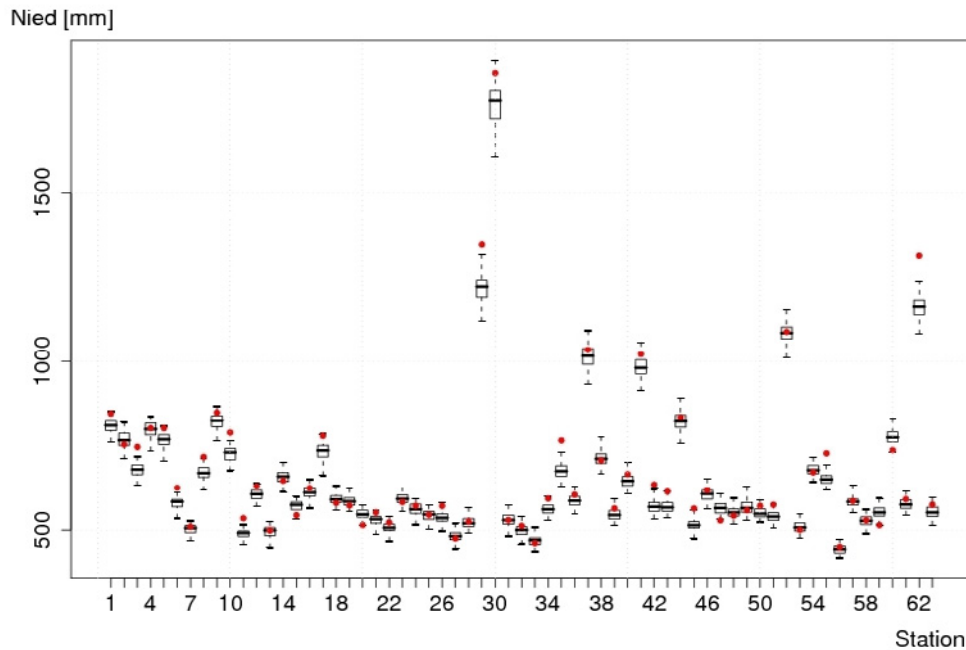


Abbildung 42: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Jahresniederschlagssumme (1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

6.1.4.3 Jahresgänge von Temperatur und Niederschlag

Die simulierten Jahresgänge wurden für Potsdam und Grambeck - zwei der repräsentativen Stationen - ausgewertet. Die Stationen stehen für das kontinentale bzw. das küstennahe Klima des Elbgebiets. Dargestellt sind jeweils die Monatsmittel für die Temperatur (Abbildung 43) bzw. die Monatssumme für den Niederschlag (Abbildung 44).

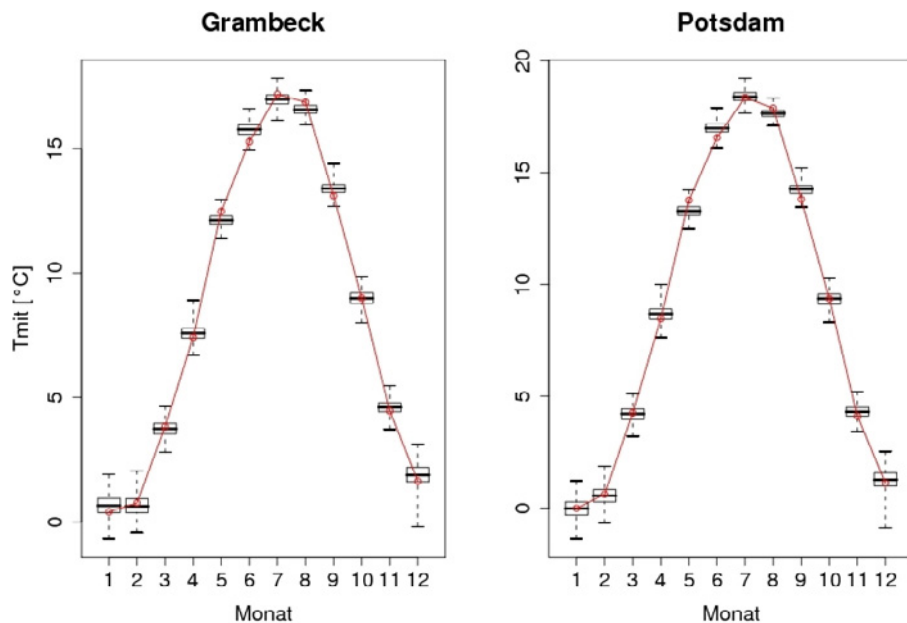


Abbildung 43: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Monatsmittel der Temperatur (1976-2000) für Grambeck (links) und Potsdam (rechts)

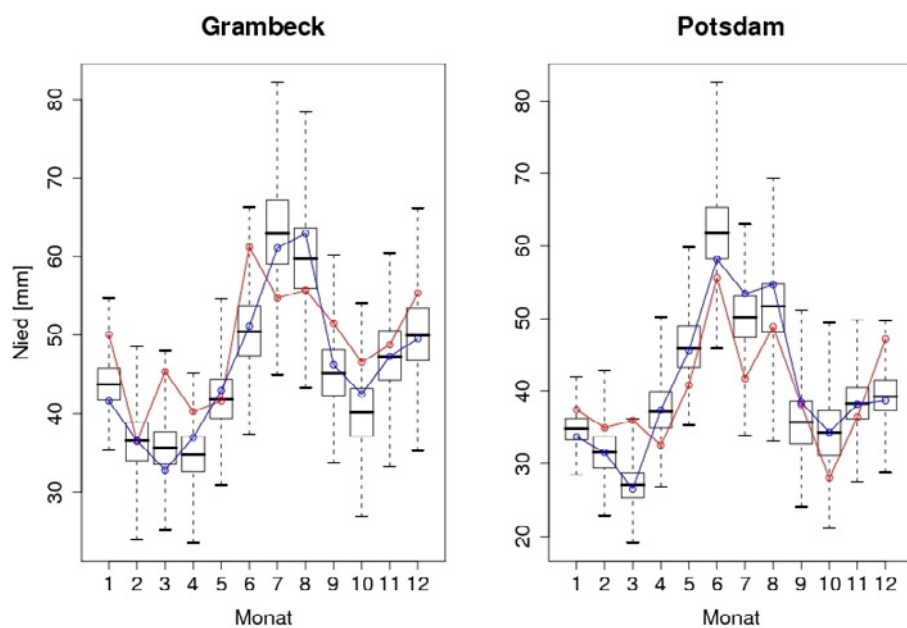


Abbildung 44: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Monatssummen des Niederschlags für Grambeck (links) und Potsdam (rechts)

Der Jahresgang der Temperatur wird sehr gut getroffen, die Spannbreite der Abweichungen für die meisten Simulationen ist kleiner als 1 K. Die Übereinstimmung für den Niederschlag ist ähnlich gut.

6.1.4.4 Persistenz

Auswertungen von Andauern bestimmter Ereignistage bieten einen intuitiven Zugang zur Persistenz in einer klimatologischen Zeitreihe. Typische Ereignistage sind Sommertage ($T_{\max} \geq 25.0 \text{ C}$) oder trockene Tage ($RR = 0.0 \text{ mm}$). Die mittleren Andauern dieser beiden Ereignistage sind in Abbildung 45 und Abbildung 46 dargestellt. Die in der Referenzperiode beobachteten Andauern finden sich für praktisch alle Stationen innerhalb der simulierten Bereiche. Für die Trockenperioden lässt sich an den küstennahen Stationen eine systematische Unterschätzung feststellen.

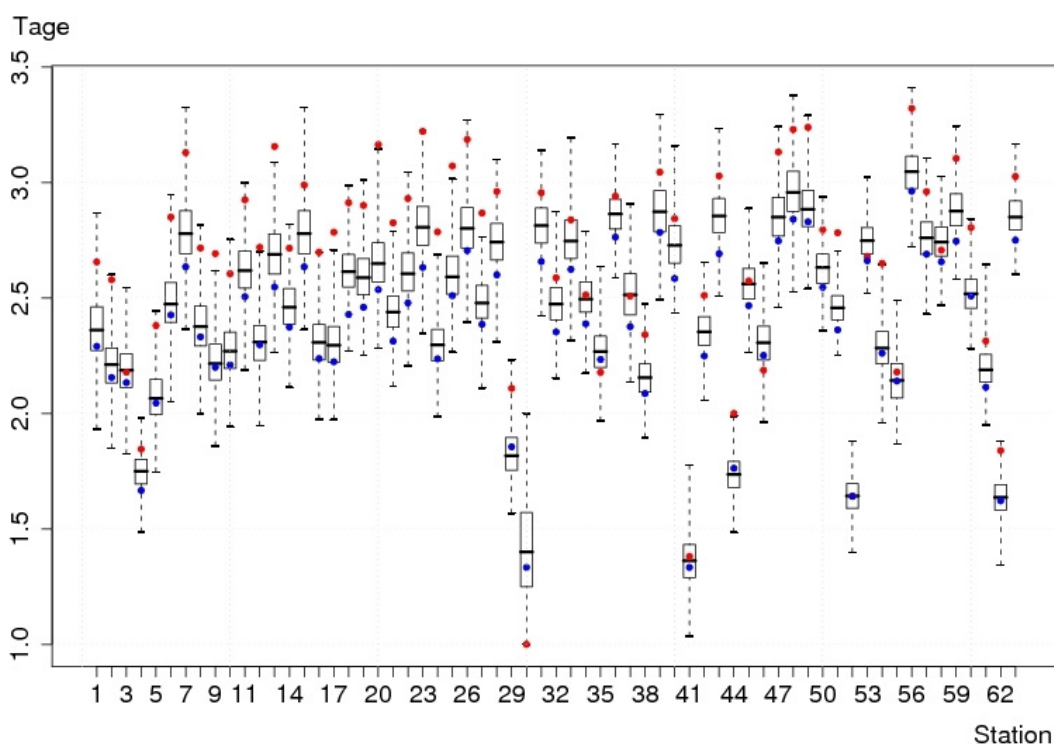


Abbildung 45: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Andauern von Sommertagen für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

6.1.4.5 Extreme

Zusätzlich zu den statistischen Standardparametern wurden noch einige Extreme in die Validierung aufgenommen, da extreme Witterungsereignisse gegenwärtig intensiv untersucht werden. Dahinter steht die Erfahrung, dass in vielen Regionen zwar mit den allmählichen Klimaänderungen der letzten Jahrzehnte, etwa der Erwärmung in der Größenordnung von 1 K während der letzten 50 Jahre im Elbegebiet, noch keine Einbußen an Lebensqualität einhergehen. Extreme Witterungsereignisse wie die außergewöhnlichen Starkniederschläge im Sommer 2002, die zu dem verheerenden Elbhochwasser führten, wirken hingegen sofort und stark. Die Frage, ob solche Ereignisse im Zuge der zu erwartenden Klimaentwicklungen zunehmen werden, ist daher von großer gesellschaftlicher Relevanz. Sollen die mit STAR II erhaltenen Abschätzungen verwertbar sein, muss seine Fähigkeit, solche Ereignisse abzubilden, nachgewiesen werden.

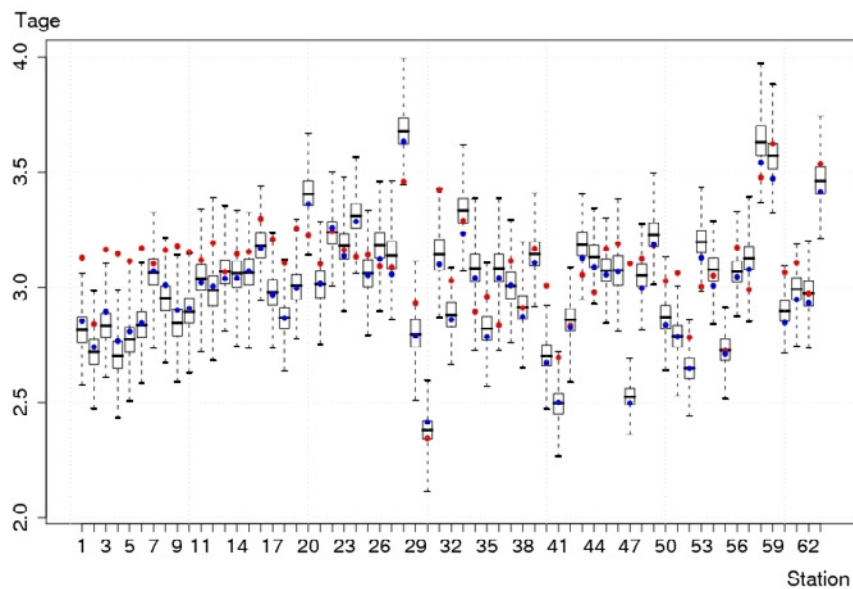


Abbildung 46: Stationsmittel (Punkte blau: 1951-1975, rot: 1976-2000) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz: 1976-2000) der Andauern von trockenen Tagen für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

6.1.4.5.1 Anzahl von Starkniederschlagstagen

Ein üblicher Zugang zu Starkniederschlagsereignissen besteht darin, einen Schwellenwert für den Niederschlag festzulegen und die Tage zu zählen, an denen der Schwellenwert überschritten wird. Ein üblicher Schwellenwert sind 10 mm. Abbildung 47 wertet die Anzahl der Tage mit $RR > 10$ mm pro Jahr aus. Die in der Referenzperiode beobachteten Anzahlen an den meisten Stationen fallen in den simulierten Bereich, die Übereinstimmung ist sehr gut.

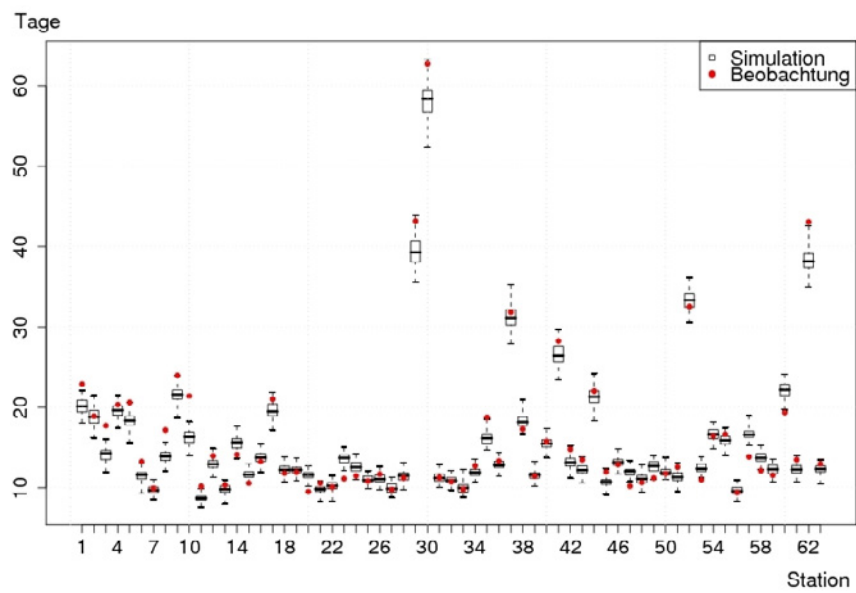


Abbildung 47: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Tage mit Starkniederschlägen ($RR > 10\text{mm}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

6.1.4.5.2 Anzahl von Sommer- und Frosttagen

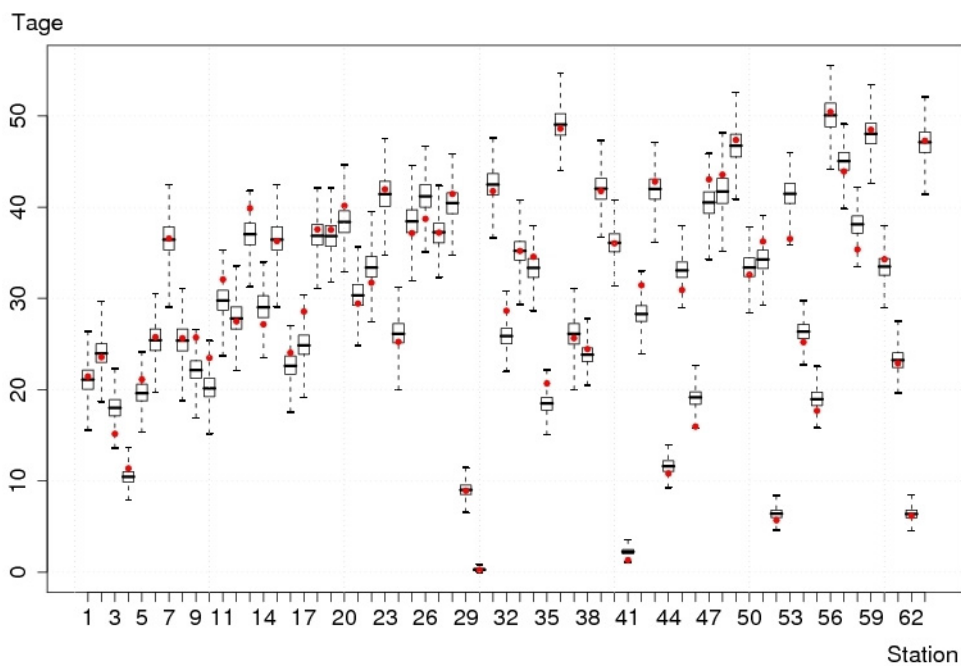


Abbildung 48: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Sommertage ($T_{\max} \geq 25\text{ °C}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeinzugsgebietes

Ein Analogon zu den Starkniederschlagstagen sind für die Temperatur Sommertage, deren Anzahl vom Verfahren sehr befriedigend wiedergegeben wird (Abbildung 48).

In die gleiche Kategorie fallen die Frosttage, also die Tage, bei denen die Temperatur unter 0.0 C fällt (Abbildung 49). Die Übereinstimmung zwischen Simulationen und Beobachtung ist wie für die Sommertage befriedigend.

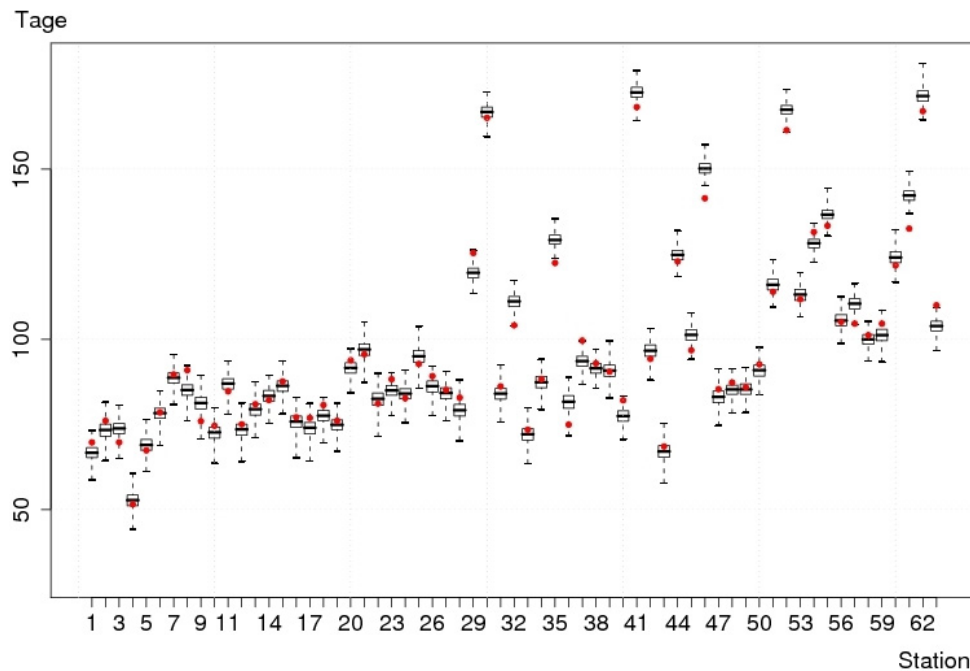


Abbildung 49: Stationsmittel (Punkte, rot) und simulierte Verteilungen (Box-Grafiken, schwarz) der Anzahl der Frosttage ($T_{min} \leq 0 \text{ } ^\circ\text{C}$, 1976-2000) für 63 Stationen des deutschen Elbeeinzugsgebietes

6.1.5 Zusammenfassende Bewertung

Die Auswertung ergab, dass das Verfahren wesentliche Statistiken der Referenzreihen befriedigend reproduziert. Systematische, jedoch akzeptable Abweichungen gibt es bei den interannuellen Standardabweichungen der Temperatur, bei den Persistenzen des Niederschlags sowie beim Jahresgang des Niederschlags. Die Abweichungen lassen sich letztlich auf die dem Verfahren implizite Stationaritätsannahme zurückführen. Wie alle statistischen Ansätze ist auch dieser nur begrenzt in der Lage, von den Trainingszeitreihen deutlich verschiedene Simulationsreihen zu erzeugen. Berücksichtigt man die klimatologische Verschiedenheit der Trainings- und Simulationsperiode in diesem Experiment, so sind die Ergebnisse insgesamt sehr zufriedenstellend, insbesondere für den Niederschlag, dessen Modellierung generell problematisch ist. Dies gilt umso mehr, als in dem Verfahren für den Niederschlag keinerlei Vorgaben gemacht werden. Da die Übereinstimmung der Statistiken aus den Simulationen und den Beobachtungen an allen Stationen gleichmäßig gut ist, ist das Verfahren offensichtlich in der Lage, auch die räumliche Charakteristik des Klimas zu reproduzieren. Die gute Wiedergabe der für Extremereignisse relevanten Statistiken empfiehlt das Verfahren für Impact-Analysen dieser Ereignisse.

Die Validierungsrechnungen haben gezeigt, dass es möglich ist mit dem verwendeten Szenarienmodell realitätsnahe Simulationen durchzuführen, wobei folgende Kriterien zu beachten sind:

- Verwendung homogener meteorologischer Datenreihen.
- Bei der Simulation der zukünftigen Entwicklung sollten möglichst viele Realisierungen berechnet werden, um die möglichen Extreme dieser Entwicklung besser abschätzen zu können.

Da von der Annahme ausgegangen wird, dass sich die statistischen Randbedingungen des Beobachtungszeitraumes nicht wesentlich von denen des Simulationszeitraumes unterscheiden und sich damit der Modellansatz nicht ändert, können Simulationsergebnisse für zukünftige Klimaszenarien von gleicher Genauigkeit wie in der Validierung nachgewiesen erwartet werden.

6.2 LANDWIRTSCHAFT

6.2.1 Basisdatensatz zur Ertragsänderung

Für die Darstellung der langfristigen Tendenzen in der Entwicklung landwirtschaftlicher Erträge, der bisher beobachteten Zusammenhänge zwischen Ertragsvariabilität und Klima, sowie für die Modellanpassung und -überprüfung wurde ein Basisdatensatz benutzt. Dieser umfasst Ertragsreihen mittlerer Felderträge von Winterweizen und Silomais für alle Landkreise Ostdeutschlands. Die Ertragsreihen reichen von 1952 bis zum Jahr 2006. Quellen des Basisdatensatzes sind bis 1990 die Statistischen Jahrbücher der Bezirke der DDR und für die Zeit nach 1990 Angaben der Landesämter für Statistik. Die Jahrbücher der DDR-Bezirke erschienen erstmalig in den Jahren 1952 und 1956, ab 1958 in lockerer Folge und ab 1961 jährlich für alle Bezirke. Nach der Wiedervereinigung wurden die Kreisstatistiken durch die neu gegründeten Statistikämter zunächst weitergeführt. Die ab 1991 in Ostdeutschland stattgefundenen Kreisgebietsreformen führten zumeist zu neuen Kreisstrukturen, wobei hauptsächlich mehrere kleine zu einer größeren Einheit zusammengeführt wurden. Um die Anschlussfähigkeit der Statistiken herzustellen, wurden die Erträge der früheren DDR-Kreise flächengewichtet mit Bezug auf den Umfang landwirtschaftlicher Nutzfläche in Landkreiserträge, entsprechend der aktuellen administrativen Gliederungen, umgerechnet.

6.2.2 Simulationsansätze

Um die Wirkung möglicher Klimaänderungen auf den Ertrag zu simulieren, kamen zwei verschiedene Modellansätze zur Anwendung: ein statistisches Modell für die Klimavariabilität der Kreiserträge und das ökohydrologische Modellsystem SWIM (Krysanova et al. 1999).

Das statistische Modell besteht aus einem System statischer Relationen zwischen Klima- und Ertragsvariablen je Landkreis. Es wird in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

Das Modellsystem SWIM ist ein ökohydrologisches Modell zur dynamischen Simulation von Wasserhaushalt und Biomassebildung in Flusseinzugsgebieten und administrativen Gliederungen. Das Modul zur Simulation von Biomasse und Ertrag beruht auf dem Modell EPIC (Williams et al. 1989). Mit dem Modul EPIC wird das Biomassewachstum landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die damit einher gehende Ertragsbildung im Tagestakt simuliert. Eine spezielle, für die Region parametrisierte landwirtschaftliche Datenbasis bildet die Grundlage für die Parametereinstellung des Modells. Im Unterschied zum statistischen Modell bildet nicht der Landkreis die kleinste homogene Einheit sondern der Standort. Insgesamt wurden 10420 unterschiedliche Standorte betrachtet, die sich in Klima und Bodentyp unterscheiden. Es wurden 49 Bodentypen nach BÜK-1000

berücksichtigt. Die Klimatologie der Standorte wurde ausgehend von 829 Stationsreihen für die Vergangenheit und die Szenarienperiode interpoliert.

6.2.3 Statistisches Modell für die Fruchtarten Winterweizen und Mais

6.2.3.1 Modellansatz

Das statistische Ertragsmodell setzt die relativen Ertragsänderungen im Vergleich zum Vorjahr, $y'_{t,t-1} = y_t/y_{t-1}$ in Beziehung zu den relativen Änderungen summarischer Witterungsgrößen, $x(i)_{t,t-1} = x(i)_t/x(i)_{t-1}$. Eine Übersicht der berücksichtigten Witterungsgrößen $x(i)$ gibt Tabelle 12.

Tabelle 12: Liste der in den statistischen Fruchtartenmodellen berücksichtigten Klimavariablen und der genutzten Abkürzungen (WW: Winterweizen, Mais: Silomais)

i	X(i)	Einheit	Abkürzung	Kultur
1	Summe des Niederschlags, Jan-Dez	mm	Nied, Jahr	WW, Mais
2	Summe der potenziellen Verdunstung, Jan-Dez	mm	Etp, Jahr	WW, Mais
3	Summe des Niederschlags, Nov-April	mm	Nied, N-A	WW, Mais
4	Summe der potenziellen Verdunstung, Nov-April	mm	Etp, N-A	WW, Mais
5	Summe des Niederschlags, Mai-Jul	mm	Nied, MJJ	WW, Mais
6	Summe der potenziellen Verdunstung, Mai-Jul	mm	Etp, MJJ	WW, Mais
7	Summe des Niederschlags, Aug-Okt	mm	Nied, ASO	WW, Mais
8	Summe der potenziellen Verdunstung, Aug-Okt	mm	Etp, ASO	WW, Mais
9	Frosttage mit Minimumtemperatur unter 0°C, November-April	Anzahl	Frosttage, N-A	WW, Mais
10	Schneetage, Tage mit Niederschlag und Minimumtemperatur unter 0°C, Nov-April	Anzahl	Schneetage, N-A	WW, Mais
11	Niederschlagsfreie Tage, Nov-April	Anzahl	Trockentage, N-A	Mais
12	Niederschlagsfreie Tage, Mai-Jul	Anzahl	Trockentage, MJJ	Mais
13	Niederschlagsfreie Tage, Aug-Okt	Anzahl	Trockentage, ASO	Mais

Bei der Variablenwahl wurde davon ausgegangen, dass die jahresweise Ertragsvariabilität vor allem durch Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit geprägt ist.

Als Modellansatz wurde folgendes allgemeine Modell verwendet:

$$y' = y'_0 \prod_{i=1}^n x'(i)^{a_i} \text{ mit}$$

y' relativer Änderungsfaktor des Ertrages im Vergleich zum Vorjahr
(1- keine Änderung)

y'_0 mittlerer relativer Ertragsanstieg im Vergleich zum Vorjahr
(Ertragssteigerungsrate durch technologischen Fortschritt)

$x'(i)$ relativer Änderungsfaktor der i-ten Einflussvariablen im Vergleich zum Vorjahr (1- keine Änderung)

a_i Parameter

Für die Parameterschätzung wurde auf die logarithmisierte Form

$\log(y') = \log(y'_0) + a_1 \log(x_1) + a_2 \log(x_2) + \dots + a_i \log(x_i) + a_n \log(x_n)$, $i=1 \dots n$ zurückgegriffen.

Der Modellansatz unterstellt, dass die Schwankungsweiten für die relative Ertragsvariabilität konstant bleiben und nicht rückläufig sind. Das heißt, die absoluten Abweichungen vom Trendertrag nehmen mit dem Ertragsniveau zu, die relativen Abweichungen bleiben konstant (vgl. Abb. 13).

6.2.3.1.1 Ertragsberechnung

Der Ertrag eines Jahres ergibt sich durch Multiplikation des Vorjahresertrages mit der relativen Änderungsrate. Setzt man den Ertrag im ersten Jahr gleich 100 ergibt sich der Relativertrag $y^0(t)$ eines Jahres n aus der sukzessiven Multiplikation aller jahresweise simulierten Ertragsänderungsraten $y'(t)$ vom Periodenbeginn bis zum Jahr n und der Multiplikation des Ergebnisses mit 100%:

$$y^0(t) = \left(\prod_{t=1}^n y'(t) \right) \cdot 100.$$

Die relative Ertragsänderung der Jahre t im Vergleich zur Kalibrierungsperiode, der Relativertrag $y(t)$, wird durch Normierung der Jahreserträge auf den durchschnittlichen Relativertrag der Periode 1990-2005 erhalten.

Die Relativerträge $y^0(t)$ und $y(t)$ werden zunächst für die rezente Klimaperiode 1952-2005 kalkuliert. Für die Ermittlung der Relativerträge $y^0(t)$ und $y(t)$ der Szenarienperiode 2005-2054 wird der Wert $y^0(t)$ für das Jahr 2004 aus dem rezenten Klimadatensatz als Startwert genutzt.

6.2.3.2 Modellparametrisierung und Anpassungsgüte

Die Modellanpassung erfolgte für die Gesamtperiode 1952-2005 und getrennt für die Perioden 1952-1989 und 1990-2005. Die Periodentrennung erfolgte vor dem Hintergrund des in Ostdeutschland nach 1989 erfolgten Strukturwandels, der zu Veränderungen in den Relationen zwischen Klima und Ertrag geführt haben dürfte.

Es wurden je Landkreis und Fruchtart separate Modelle geschätzt. Die Parameterschätzung erfolgt mit dem Modellsystem SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) unter Verwendung der Prozedur PROC REG. Der Modellansatz wurde schrittweise erweitert. Nicht signifikante Modellterme ($p > 0.05$) wurden nicht in den Modellansatz aufgenommen. Die über der Gesamtperiode erfolgte Modellanpassung wies eine hohe, durch das Modell nicht erklärte Restvarianz auf, wobei die Anpassungsgüte für den Zeitraum 1951-1989 besonders schlecht war. Die periodenbezogenen Teilmodelle für 1951-89 und 1990-2006 differierten dann auch erheblich in der Anpassungsgüte (vgl. Tabelle 13). Es kann davon ausgegangen werden, dass nichtklimatische Faktoren die Ertragsvariabilität vor allem vor 1989 stärker beeinflussten als nach 1989. Vor 1989 gab es kontinuierlich Änderungen beim Faktoreinsatz (Düngung, Technik, Pflanzenschutzmittel, Sorten), Anbauumfang und Agronomie. Die deutsche Wiedervereinigung bewirkte zu Beginn der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts noch einmal einen Qualitätssprung bei der Verfügbarkeit von Produktionsfaktoren für die ostdeutsche Landwirtschaft, was sich auch in der Ertragsentwicklung spiegelt (vgl. Abb. 13). Seitdem haben sich aber nur noch graduelle Änderungen ergeben. Relativ stabile technologische, agronomische und politische Randbedingungen begünstigen die Quantifizierung des

Klimaeinflusses auf die Ertragsvariabilität und sind wahrscheinlich verantwortlich für die bessere Anpassungsgüte der für 1990-2006 parametrisierten Modelle. Weitere mögliche Gründe für die periodenbedingten Unterschiede in der Anpassungsgüte, die noch zu prüfen wären, sind Qualitätsunterschiede in der Ertragerhebung, sowie systematische Fehler in der Ertragsumrechnung von der alten in die neue Landkreisstruktur.

Aufgrund der besseren Anpassungsgüte und der ausgeprägteren technologischen Ähnlichkeit wurde für die Abschätzung der Folgen des Klimawandels auf die für den Zeitraum 1990-2005 angepassten Kreis-Modelle zurückgegriffen. Die relative technologische Stabilität des Ertrages während dieser Periode wird durch die Tatsache unterstrichen, dass für den Parameter y_0' , der den mittleren Ertragsfortschritt quantifiziert, nur in Einzelfällen signifikante Schätzergebnisse erhalten wurden. Er wurde deshalb generell auf den Wert 1 gesetzt. Damit ergibt sich ein Modellansatz, der den Klimaeinfluss auf die Ertragsvariabilität für das gegenwärtige (1990-2006) technologische und agronomische Niveau der Weizen- und Maisproduktion quantifiziert. Technologische und agronomische Anpassungsmaßnahmen werden dabei nicht berücksichtigt. Eine weitere Einschränkung bei der Interpretation ergibt sich aus dem Strukturbezug der Klima-Ertragsrelationen. Alle Extrapolationen unterstellen, dass die regionale Standortnutzung durch die Kulturen konstant bleibt. Verschiebungen in der Standortnutzung als Reaktionen zweiter Ordnung auf den Klimawandel werden nicht berücksichtigt.

Tabelle 13: Bestimmtheitsmaße der kreisbezogen geschätzten Ertragsmodelle für Winterweizen und Silomais nach Perzentilen für die beiden Perioden 1951-1989 und 1990-2006

	25% Perzentil	50% Perzentil	75% Perzentil
<u>Winterweizen</u>			
1951-1989	0.11	0.25	0.42
1990-2006	0.28	0.47	0.67
<u>Mais</u>			
1951-1989	0.83	0.66	0.83
1990-2006	0.49	0.81	0.9

Die Modellschätzungen der Kreiserträge für die Kalibrierungsperiode wurden zu Ländererträgen zusammengefasst und mit den erhobenen Ländererträgen verglichen (Abb. 50). Dabei zeigte sich, dass die mittleren Bestimmtheitsmaße für den linearen Zusammenhang zwischen geschätzten und erhobenen Werten auf Länderebene deutlich höher als auf Kreisebene sind. Die Bestimmtheitsmaße der Länderwerte liegen in der Nähe des 75% Perzentils der auf Kreisebene ermittelten Werte (Tabelle 13). Generell kann daher den aus Aggregation hervorgegangenen Simulationen zu den Ländererträgen eine höhere Vertrauenswürdigkeit als den simulierten Kreiserträgen unterstellt werden.

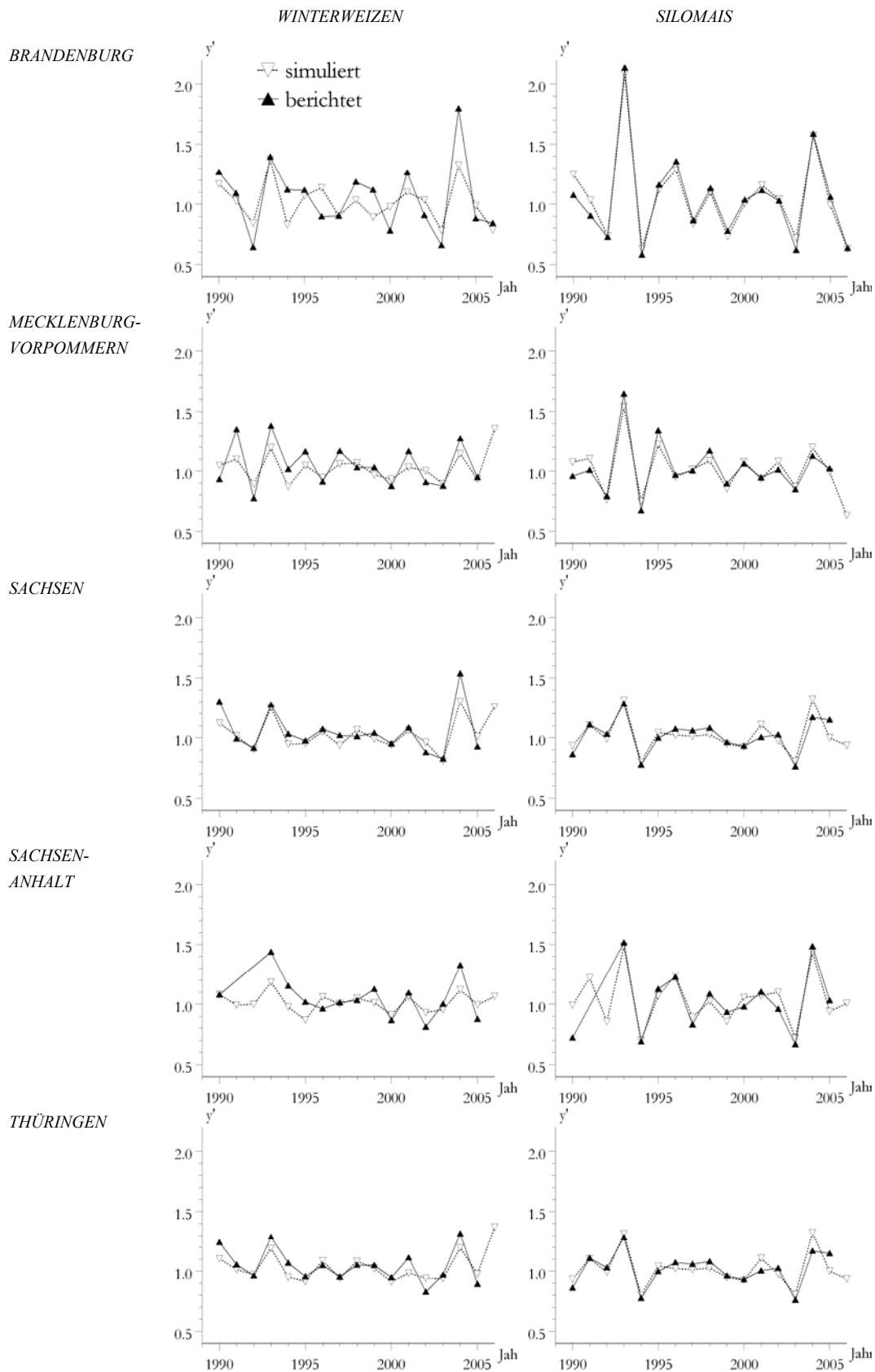


Abbildung 50: Vergleich der simulierten mit den beobachteten Ertragsänderungsraten (y') für Winterweizen und Silomais auf Länderebene

6.2.4 Rezente Ertragssimulationen mit SWIM

Mit dem Modellsystem SWIM wurden ergänzende flächendeckende Simulationen mit Winterweizen als Hauptfrucht auf den Ackerstandorten Ostdeutschlands für den Zeitraum 1952-2003 durchgeführt. Die Anpassungsgüte der Simulationsergebnisse mit dem Modell SWIM und den tatsächlich beobachteten Erträgen für den Beobachtungszeitraum 1951-1989 und 1990-2003 ist länderweise in Tabelle 14 zusammengestellt.

Tabelle 14: Bestimmtheitsmasse für das Modellsystem SWIM

Betrachtungs-zeitraum	Bundesländer				
	Brandenburg	Mecklenburg-Vorpommern	Sachsen	Sachsen-Anhalt	Thüringen
1951-1989	0.18	0	0	0	0
1990-2003	0.40	0.40	0.04	0.62	0.05

Die Bestimmtheitsmaße liegen deutlich niedriger als bei Nutzung des statistischen Ansatzes. Dies ist vermutlich vor allem drei Umständen geschuldet: Zunächst wurde hier auf eine nachträgliche Modellanpassung verzichtet. Dann wird bei den SWIM-Simulationen von einer flächendeckenden Nutzung der Ackerfläche ausgegangen. Insbesondere in den Ländern mit einem höheren Anteil ertragsschwacher Standorte, die tatsächlich gar nicht für den Winterweizenanbau genutzt werden, kommt es in Folge dessen zu einer Überschätzung von Ertragsrückgängen bei Trockenstress, was letztlich zu einer verminderten Modellbestimmtheit führt. Schließlich nimmt die Unbestimmtheit der klimatischen Informationen, insbesondere des Niederschlags in orographisch stärker gegliederten Ländern wie Sachsen und Thüringen mit größeren Flächenanteilen von Mittelgebirgen, zu. Dies führt zu größeren Fehlern bei der notwendigen Interpolation zwischen den Werten benachbarter Klimastationen für die Abschätzung des Klimas an den einzelnen Ackerstandorten.

6.2.5 Korrektur simulierter Ertragseffekte um die Wirkung des CO₂-Düngungseffektes

Dem Klimaszenarium A1B liegt ein Anstieg der gegenwärtigen CO₂-Konzentration von 386 ppm auf 542 ppm zu Grunde, was einer Verdopplung des vorindustriellen Niveaus entspricht. Die CO₂-Erhöhung stimuliert die Photosynthese und vermindert die Transpirationsverluste der Pflanzen (Tubiello et al. 2007), wobei die Stimulierung der Photosynthese bei C3-Pflanzen deutlicher höher ausfällt als bei C4-Pflanzen.

Um die Wirkung von erhöhtem CO₂ in den Ertragssimulationen mit dem statistischen Modellansatz zu berücksichtigen, wird ein globales Korrekturfaktoren-Konzept genutzt. Es werden zwei Korrekturfaktoren eingeführt (f_{α} und f_{β^*}). Die direkte Ertragswirkung von erhöhtem CO₂ über eine stimulierte Photosynthese wird über f_{α} abgebildet. Die Minderung von trockenstressbedingten Ertragsverlusten repräsentiert f_{β^*} .

Der Ertrag unter erhöhtem CO₂ im Vergleich zur Kalibrierungsperiode 1990-2005 wird nach folgendem Algorithmus ermittelt:

- a. Wenn $y_E < 0$, dann $y_{E,CW} = y_E * 1/f_{\beta^*} + 100 * (1/f_{\beta^*} - 1)$, sonst $y_{E,CW} = y_E$
- b. $y_{E,C} = y_{E,CW} * f_{\alpha} + 100 * (f_{\alpha} - 1)$

mit:

- f_{α} , f_{β^*} Korrekturfaktoren für die CO₂-Wirkung auf Photosynthese und Transpiration,
- y_E relative Ertragsänderung ohne Berücksichtigung von erhöhtem CO₂ [%], $y_{E,CW}$ - relative Ertragsänderung bei Berücksichtigung des Transpirationseffektes von erhöhtem CO₂ [%],
- $y_{E,C}$ relative Ertragsänderung bei Berücksichtigung des Transpirations- und Photosyntheseeffektes von erhöhtem CO₂

Der Wert des Faktors f_{α} für eine CO₂-Erhöhung gegenüber dem aktuellen Niveau wird mit Hilfe eines Interpolationsverfahrens ermittelt. Nach Long et al. (2006) kann unter Freilandbedingungen bei ausreichender Wasser- und Stickstoffversorgung für Weizen und Mais mit f_{α} -Werten von 1.13 und 1.06 gerechnet werden, wenn die CO₂-Konzentration von 380 auf 550 ppm steigt. Nach dem hier betrachteten Szenario A1B werden im Jahr 2055 542 ppm erwartet. Durch lineare Interpolation ergeben sich für die Periodenmitten 2050 (2046-54) und 2034 (2024-45) zu erwartende CO₂-Konzentrationen von 529 und 474 ppm. Für diese CO₂-Konzentrationen wurden mittels linearer Interpolation die zugehörigen Ertragserhöhungsfaktoren f_{α} geschätzt, wenn Wasser und Stickstoff bedarfsgerecht zur Verfügung stehen. Sie betragen 1.11 (529 ppm) und 1.07 (474 ppm) für Weizen und 1.05 (529 ppm) und 1.03 (474 ppm) für Mais.

Ein Ansatz von Wechsung (beschrieben in Krysanova et al. 1999) wurde genutzt, um zu berechnen, wie sich der potenzielle Verdunstungsanspruch unter erhöhtem CO₂ vermindern würde. Zunächst wird der Verminderungsfaktor f_{β} ermittelt und aus diesem dann f_{β^*} hergeleitet. Der Verminderungsfaktor f_{β} ergibt sich aus dem Quotienten von aktueller und künftiger CO₂-Konzentration multipliziert mit dem CO₂-Ertragsänderungsfaktor ohne Wasserstress. Für die CO₂-Konzentrationen 380 und 550 ppm und dem Wert 1.13 für f_{α} ergibt dies beispielsweise einen Verminderungsfaktor f_{β} von 0.9. Der Verminderungsfaktor 0.9 bedeutet, der künftige Wasseranspruch einer Pflanze verringert sich gegenüber heutigen Bedingungen um 10%. Aus mindestens zwei Gründen kann davon ausgegangen werden, dass diese Reduktion nicht in vollem Umfang realisiert werden kann. Zum einen ist aus mikrometeorologischer Sicht damit zu rechnen, dass die beschriebene Reduktion der Verdunstung in Folge verminderter Spaltöffnungsweite über Vegetation geringer Höhe (landwirtschaftliche Kulturpflanzen) deutlich geringer als über hoher Vegetation (Wald) ist. Zum anderen kann nicht jede simulierte Ertragsminderung auf erhöhten Wasserstress zurückgeführt werden. Es wird deshalb ein Wirksamkeitsfaktor für f_{β^*} eingeführt, der postuliert, dass von der möglichen Reduktion des Verdunstungsanspruches ca. 25% realisiert werden können. Der Wert für f_{β^*} ergibt sich dann aus

$$f_{\beta^*} = 1 - ((1 - f_{\beta}) * 0.25).$$

6.3 AGRARHOLZ

Als schnellwachsende Baumarten werden Gehölze mit rascher Jugendentwicklung und hohem Zuwachs in den ersten Jahren bezeichnet (z. B. Birke (*Betula pendula*), Robinie (*Robinia pseudoacacia*), Aspe (*Populus tremula* L.), Weiden (*Salix spec.*) und Rot-Erle (*Alnus glutinosa*). Die Aspe liefert unter einer Vielzahl von günstigen und ungünstigen klimatischen und bodenphysiologischen Bedingungen gute Erträge in Ostdeutschland. Unter Kurzumtriebsplantagen (KUP) werden Plantagen verstanden, in denen diese Baumarten angebaut und in Intervallen (drei bis fünf Jahre) geerntet werden. Aus den verbleibenden Stöcken bildet sich bei diesen Baumarten ein neuer Austrieb, der für die nächste Ernte genutzt wird (sogenannter „Stockausschlagbetrieb“).

Für die Abschätzung der Erträge der Kurzumtriebsplantagen wurden Simulationen mit dem Modell 4C durchgeführt. Hierfür wurden Daten des Bodens, des Klimas, der Flächennutzung und der Bestandesbehandlung herangezogen.

6.3.1 Modell 4C

Das prozessbasierte Waldwachstumsmodell 4C (FORESEE – FORESt Ecosystems in a changing Environment) beschreibt die Dynamik und das Wachstum von Waldbeständen (Lasch et al. 2005, Schaber et al. 1999, Suckow et al. 2001). Ausgehend von einem definierten Anfangszustand (in dieser Untersuchung: Pflanzung) oder auf Basis simulierter Naturverjüngung wachsen die Bäume unter Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe, wobei Baumindividuen einer Art, gleichen Alters und identischer Baumdimensionen in Kohorten zusammengefasst sind. Produktion und Wachstum werden für jede Kohorte berechnet. Es ist möglich, den Effekt sich ändernder atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf das Wachstum der Bäume abzubilden. Die Position der Individuen der Kohorten im Bestand ist nicht bekannt; es wird angenommen, dass die Bäume gleichmäßig auf der Bestandesfläche verteilt sind. Der Kronenraum des Bestandes ist in 0.5 m hohe Schichten eingeteilt, um detaillierte Informationen der Stoffflüsse in den Kompartimenten des Baums zu erhalten. Der Boden wird den Bodenhorizonten folgend in beliebig viele Schichten beliebiger Dicke gegliedert, in welchen u.a. Temperatur und Bodenfeuchte simuliert werden. Das Modell ist derzeit für 10 Baumarten, einschließlich Aspe, parametrisiert und nutzbar. Es benötigt als Eingabegrößen für die Simulation an einem Standort die Informationen über den Bestand, den Boden und tägliche meteorologische Parameter (Temperatur, Niederschlag, Strahlung, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit).

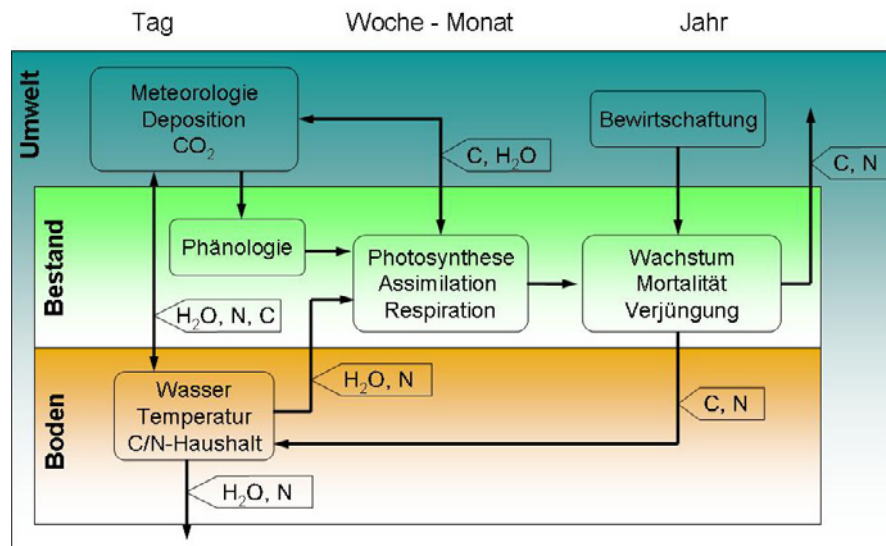


Abbildung 51: Schematische Darstellung des Waldwachstumsmodells 4C

Abbildung 51 beschreibt die Teilprozesse des Modells 4C innerhalb der Sphären Umwelt, Bestand und Boden sowie deren zeitliche Auflösung.

Das Modell erlaubt die Simulation von Waldbewirtschaftungsmaßnahmen und der bei Kurzumtriebsplantagen üblichen Eingriffen. Darüber hinaus ist es möglich, die bei Ernten übliche totale Entnahme der Bäume durch ein „Auf den Stock setzen“ (bodennahes Zurückschneiden) der Aspe zu ersetzen und damit auch die Stockaustriebe zu simulieren. Die Simulationen von Aspen-Kurzumtriebsplantagen wurde mit Versuchsdaten aus Deutschland überprüft (Rock et al. submitted).

6.3.2 Verfügbare Daten

Für die Ermittlung der in Ostdeutschland theoretisch für Aspen-Kurzumtriebsplantagen zur Verfügung stehenden Flächen wurden mittels eines Geographischen Informationssystems die im Datensatz des CORINE Land Cover 2000 (Umweltbundesamt, DLR-DFD 2004) als nicht bewässertes Ackerland ausgewiesenen Flächen extrahiert. Von den gewonnenen Flächen wurden lediglich jene ausgewählt, deren Ackerzahl (nach Reichsbodenschätzung) kleiner gleich 50 ist. Flächen mit höheren Ackerzahlen, wie sie häufig in Sachsen, Thüringen und Sachsen-Anhalt vorkommen (insbesondere der breite Lößgürtel am Nordrand der Mittelgebirge), werden für die Nahrungsmittelproduktion als zu wertvoll erachtet, als das die Anlage von Kurzumtriebsplantagen realistisch erscheint. Die errechneten 2064 Teilflächen (entsprechen 3.8 Mio. ha) machen 30 % der Landesfläche und 52 % der landwirtschaftlichen Fläche der 5 ostdeutschen Bundesländer aus. In Mecklenburg-Vorpommern entsprachen die betrachteten Flächen 50.3% der Landesfläche, in Brandenburg 40.8%, in Sachsen-Anhalt 26.2 %, in Sachsen 28.3 % und in Thüringen 25.9 % der Landesfläche. Eine Karte dieser betrachteten Räume stellt Abbildung 52 dar.

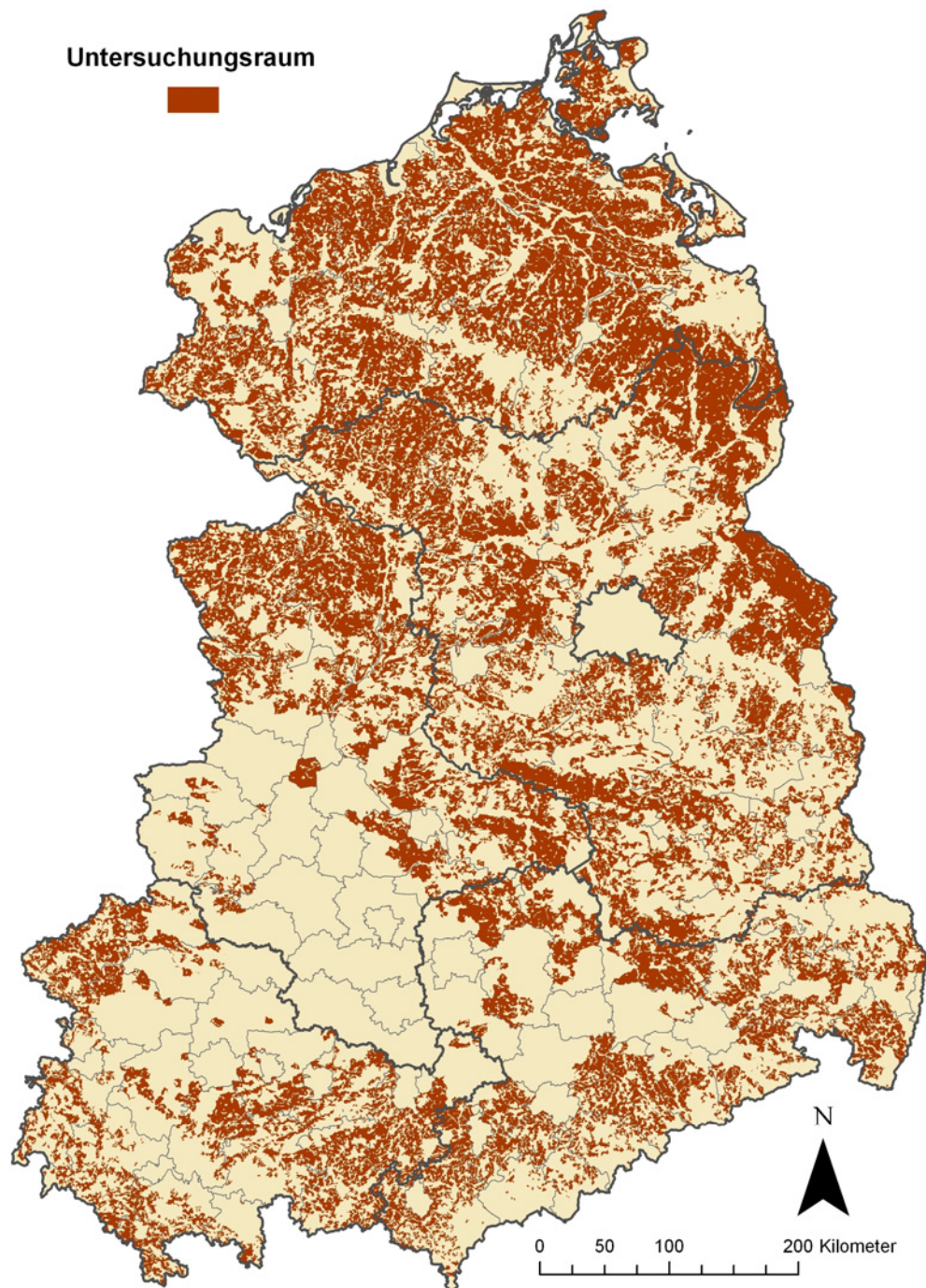


Abbildung 52: Landwirtschaftliche Flächen mit Ackerzahlen < 50

6.3.3 Bestandesbehandlung

Die Simulation der Kurzumtriebsplantage wurde wie folgt festgelegt: 8300 Aspenstecklinge werden je Hektar (in Doppelreihe, Pflanzabstand 0.9 m) gepflanzt. Die erste Ernte der gesamten oberirdischen Biomasse (Stämme und Äste) findet nach 5 Jahren statt, dabei bleibt der Wurzelstock im Boden, so dass der Stockausschlag und die damit verbundene Vermehrung der Stammzahl zu einem bereits höheren Ertrag in der 2. Rotation führt. Vier Rotationen in 20 Jahren werden in dieser Studie angenommen, bevor der Stock gerodet werden muss. Die Biomasseerträge der 4 Ernten (Stämme und Äste/Zweige) werden zusammengefasst, gemittelt und als Biomasse gesamt in Tonnen Trockenmasse je Hektar und

Jahr ausgegeben. Diese Größe ist mit dem in der Forstwirtschaft üblichen dGZ (durchschnittlicher Gesamtwuchs), wenn man ihn in Tonnen atro („absolut trocken“, Wassergehalt nahe Null) je Hektar und Jahr ausgibt, vergleichbar.

6.3.4 Simulationen

Für die Simulation der Kurzumtriebsplantagen sind für die ausgewählten Ackerflächen des Weiteren Informationen des Bodens und des Klimas vonnöten. Die Bodendaten wurden mittels Verschneidung der Teilflächen mit der Bodenübersichtskarte für Deutschland 1:1.000.000 (BÜK 1000) der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) gewonnen. Die in der BÜK hinterlegten Referenzprofile für jeden Bodentyp dienen dem Modell 4C als Initialisierung der Bodenparameter an einem bestimmten Standort.

Für die Bestimmung der Klimadaten wurde mittels der Methode der Thiessen-Polygone zu jeder betrachteten Teilfläche die nächstliegende Klimastation aus dem PIK-Datensatz bestimmt. Dadurch steht jeder Fläche ein Klimadatenatz zur Verfügung, der die Referenzperiode (real aufgezeichnete Klimadaten aus der Vergangenheit: 1951-2003) und ein Klimaszenarium, das den Zeitraum 2004 bis 2055 abdeckt und in Kapitel 1 beschrieben ist, beinhaltet. Das Szenarium wird ab 2004 benutzt, da die Überprüfung und Aufbereitung der realen Messdaten sehr zeit- und arbeitsaufwändig ist und bisher für die Jahre 2004–2006 noch kein entsprechender Datensatz vorliegt.

Tabelle 15: Vergleichszeiträume bei der Ermittlung von Klimawirkungen für Aspen-KUP in Ostdeutschland

Zeitraum	Bezeichnung
1982-2003	Basisperiode
2004-2025	Klimaszenarium, 1. Periode
2014-2035	Klimaszenarium, 2. Periode
2024-2045	Klimaszenarium, 3. Periode
2034-2055	Klimaszenarium, 4. Periode

Für die Ermittlung der klimabedingten Ertragspotenziale wurden Zeitperioden von 20 Jahren betrachtet, da das ausgewählte Konzept der Kurzumtriebsplantage 4 Ernten nach je 5 Jahren vorsieht. Das Modell 4C benötigt zusätzlich 2 Jahre Simulationszeit, um die Initialisierung zu generieren. Tabelle 15 verdeutlicht die betrachteten Zeiträume.

Mit den so gewählten Informationen zu Klima und Boden wurde das Waldwachstumsmodell 4C initialisiert, um die Simulationen für alle betrachteten 2064 Ackerflächen und für alle Perioden durchzuführen.

6.3.5 Erträge und atmosphärische CO₂-Konzentration

Die CO₂-Konzentration in der Luft ist seit vorindustrieller Zeit von 280 ppm auf 379 ppm im Jahre 2005 angestiegen. In dem verwendeten Klimaszenarium, das sich auf das SRES-A1B-Szenarium des IPCC stützt, wird ein weiterer Anstieg bis zum Jahre 2055 auf 542 ppm angenommen. Das eingesetzte Modell 4C integriert diese Konzentrationsänderung. Die erlangten Ergebnisse müssen jedoch vor zwei Unsicherheiten kritisch betrachtet werden. Zum einen ist sehr ungewiss, ob sich die zukünftige Entwicklung tatsächlich analog zum A1B-Szenarium vollziehen wird. Zum anderen ist der Effekt, den eine gesteigerte CO₂-

Konzentration in der Luft auf Pflanzen ausübt, nicht genügend geklärt. Einerseits werden höhere Photosyntheseraten und damit z.B. gesteigerte Biomasseproduktion und verbesserte Wassernutzungseffizienz sowie die Pufferung negativer Effekte (Wasserstress, Nährstoffmangel, Ozon) erwartet, andererseits wurden in einzelnen Untersuchungen auch eine Sättigung dieser Effekte über die Zeit oder aber ein völliges Ausbleiben jeglicher Reaktion beobachtet (vgl. Dickson et al. 2000, Körner 2006 für eine umfassende Diskussion). Bei Kurzumtriebsplantagen mit Pappeln wurden zumindest in den ersten Jahren bis zum Erreichen des Kronenschlusses positive Effekte nachgewiesen (Calfapietra et al., 2003, Cotrufo et al. 2005, Ferris et al. 2001, Gielen et al. 2002, Gielen und Ceulemans 2001, Liberloo et al. 2004). Aufgrund dieser Unsicherheit wurden alle Simulationen mit und ohne den Effekt des gesteigerten CO₂-Gehaltes durchgeführt. Dargestellt sind die Ergebnisse mit Einbeziehung des CO₂-Konzentrationsanstiegs.

7 LITERATUR

7.1 KLIMA

- DVWK (1996) Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. DVWK Merkblätter, 238/1996, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn.
- Gerstengarbe F.W. und Werner P.C. (1997) A method to estimate the statistical confidence of cluster separation. *Theoretical and Applied Climatology*, **57**, 103-110.
- Gerstengarbe F.W., Werner P.C. und Fraedrich K. (1999) Applying non-hierarchical cluster analysis algorithms to climate classification: Some problems and their solution. *Theoretical and Applied Climatology*, **64**, 143-150.
- Nakicenovic N. und Swart R., eds (2000) *Special Report on Emissions Scenarios (SRES)*. IPCC, Cambridge.
- Orlowsky B., Gerstengarbe F.W. und Werner P.C. (2007) A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Röckner E., Bäuml G., Bonaventura L., Brokopf R., Esch M., Gjogetta M., Hagemanns S., Kirchner I., Manzini L.K.E., Rhodin A., Schlese U., Schulzweida U. und Tompkins A. (2003) *The atmospheric general circulation model ECHAM 5. Part I: Model description*. MPI-Report.

7.2 LANDWIRTSCHAFT

- Ainsworth E. A. & Long S. P. (2005) What have we learned from 15 years of free-air CO₂-enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, **165**, 351–372.
- Amthor J.S. (1998) Perspective on the relative insignificance of increasing atmospheric CO₂ concentration to crop yield. *Field Crops Research*, **58**, 109-127.
- Hafner S. (2003) Trends in maize, rice, and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: a prevalence of linear growth. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **97**, 275–283.
- IPCC Fourth Assessment Report; 7.9 % N₂O-Beitrag zum globalen Treibhauseffekt.
- Krysanova, V., F. Wechsung, A. Becker, W. Poschenrieder, J. Gräfe (1999). Mesoscale ecohydrological modeling to analyze regional effects of climate change. *Environmental Modeling & Assessment*, **4**, 259-271.
- Olesen J.E. und Bindi M. (2002) Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, **16**, 239-262.
- Tubiello F.N., Amthor J.S., Boote K.J., Donatelli M., Easterling W., Fischer G., Gifford R.M., Howden M., Reilly J. und Rosenzweig C. (2007) Crop response to elevated CO₂ and world food supply: A comment on "Food for Thought..." by Long et al., Science 312:1918-1921, 2006. *European Journal of Agronomy*, **26**, 215-223.

Wall, GW; Garcia, RL; Kimball, BA; Hunsaker, DJ; Pinter, PJ; Long, SP; Osborne, CP; Hendrix, DL; Wechsung, F; Wechsung, G; Leavitt, SW; LaMorte, RL; Idso, SB (2006) Interactive effects of elevated carbon dioxide and drought on wheat. *Agronomy Journal*, **98** (2), 354-381.

Williams J.R., Jones C.A., Kiniry J.R. und Spanel D.A. (1989) The EPIC crop growth model. *Transactions of the ASAE*, **32**, 497-511.

7.3 AGRARHOLZ

Bemmann A., Feger K.-H., Gerold D., Große W., Hartmann K.-U., Petzold R., Röhle H., Schweile J. und Steinke C. (2007) Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in der Region Großenhain im Freistaat Sachsen. *Forstarchiv*, **78**, 95-101.

Burger F. und Sommer W. (2003) Von der Pappel bis zum Hackschnitzel. *LWF - aktuell*, **39**, 4 - 6.

Calfapietra C., Gielen B., Sabatti M., De Angelis P., Miglietta F., Scarascia-Mugnozza G. und Ceulemans R. (2003) Do above-ground growth dynamics of poplar change with time under CO₂ enrichment? *New Phytologist*, **160**, 305-318.

Cotrufo M.F., De Angelis P. und Polle A. (2005) Leaf litter production and decomposition in a poplar short-rotation coppice exposed to free air CO₂ enrichment (POPFACE). *Global Change Biology*, **11**, 971-982.

Dickson R.E., Lewin K.F., Isebrands J.G., Coleman M.D., Heilman W.E., Riemenschneider D.E., Sober J., Host G.E., Zak D.R., Hendrey G.R., Pregitzer K.S. und Karnosky D.F. (2000) *Forest Atmosphere Carbon Transfer and Storage (FACTS-II). The Aspen Free-Air CO₂ and O₃ Enrichment (FACE) Project: An Overview.* (vol. GTR - NC - 214). USDA Forest Service, North Central Research Station, St. Paul.

Ferris R., Sabatti M., Miglietta F., Mills R.F. und Taylor G. (2001) Leaf area is stimulated in *Populus* by free air CO₂ enrichment (POPFACE), through increased cell expansion and production. *Plant Cell and Environment*, **24**, 305-315.

Gielen B., Calfapietra C., Claus A., Sabatti M. und Ceulemans R. (2002) Crown architecture of *Populus* spp. is differentially modified by free-air CO₂ enrichment (POPFACE). *New Phytologist*, **153**, 91-99.

Gielen B. und Ceulemans R. (2001) The likely impact of rising atmospheric CO₂ on natural and managed *Populus*: a literature review. *Environmental Pollution*, **115**, 335-358.

Hofmann M., ed (1999) *Modellvorhaben "Schnellwachsende Baumarten" - Zusammenfassender Abschlußbericht.* Landwirtschaftsverlag, Münster.

Körner C. (2006) Plant CO₂ responses: an issue of definition, time and resource supply. *New Phytologist*, **172**, 393-411.

Landgraf D., Böcker L. und Oldenburg C. (2007) Landwirte als Energieholz-Produzenten?! *AFZ-Der Wald*, 751-753.

Landgraf D., Ertle C. und Böcker L. (2007) Stockausschlagpotenzial von Aspe und Robinie. *AFZ-Der Wald*, 80-83.

Lasch P., Badeck F.W., Suckow F., Lindner M. und Mohr P. (2005) Model-based analysis of management alternatives at stand and regional level in Brandenburg (Germany). *Forest Ecology And Management*, **207**, 59-74.

- Liberloo M., Gielen B., Calfapietra C., Veys C., Pigliacelli R., Scarascia-Mugnozza G. und Ceulemans R. (2004) Growth of a poplar short rotation coppice under elevated atmospheric CO₂ concentrations (EUROFACE) depends on fertilization and species. *Annals Of Forest Science*, **61**, 299-307.
- Rock J., Lasch P., Suckow F., Badeck F.W., Wolf H. und v. Wühlisch G. (submitted) Current and future potentials for short-rotation coppice fuelwood plantations - an example from Germany.
- Schaber J., Badeck F.-W. und Lasch P. (1999) Ein Modell der Sukzessionsdynamik europäischer Wälder - Forest Ecosystems in a changing Environment (4C). In: *Deutscher Verband forstlicher Versuchsanstalten - Sektion forstliche Biometrie und Informatik. 11. Jahrestagung und Internationale biometrische Gesellschaft. Deutsche Region. Arbeitsgruppe Ökologie, Herbstkolloquium* (eds D.R. Pelz, O. Rau, und J. Saborowski), pp. 212-217, Freiburg.
- Suckow F., Badeck F.-W., Lasch P. und Schaber J. (2001) Nutzung von Level-II-Beobachtungen für Test und Anwendungen des Sukzessionsmodells FORESEE. *Beitr. Forstwirtsch. u. Landsch.ökol.*, **35**, 84-87.
- von Wühlisch G. (2006) Ergebnisse der Züchtung von Pappeln und Aspen in Großhansdorf - Perspektiven für die Energie- und Rohstoffherzeugung. *Vortr. Pflanzenzüchtg.*, **70**, 157 - 172.
- Werner A., Vetter A. und Reinhold G. (2006) *Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Energieholz*. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft.
- Wolf H. und Böhnisch B. (2003) Modellvorhaben StoraEnso / Verbundvorhaben Pappelanbau für die Papierherstellung: Teilvorhaben Anbau von Pappeln und Aspen auf potentiellen landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase I). / Monitoring von Pappelanbauten auf landwirtschaftlichen Stilllegungsflächen unter besonderer Berücksichtigung ökologischer Gesichtspunkte (Phase II). Landesforstpräsidium Sachsen.

7.4 ÖKONOMIE

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (2006) *World Agriculture towards 2030/2050*. FAO.
- Hofreither M.F. (2005) *Von Malthus zum Treibhauseffekt – Landwirtschaft und Welternährung als Prognoseproblem*. Boku.
- IFPRI (International Food Policy Research Institute) (2005) *New Risks and Opportunities for Food Security : Scenario Analyses for 2015 and 2050*. IFPRI.
- IFPRI (International Food Policy Research Institute) und IWMI (International Water Management Institute) (2007) *Global Water Outlook 2025: Averting an Impending Crisis*. IFPRI.
- OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) (2006) *Agricultural Market Impacts of Future Growth in the Production of Biofuels*. OECD.
- Pinstrup-Andersen P. R.P.-L., M.W. Rosegrant (1999) *World Food Prospects: Critical Issues for the Early Twenty-First Century*. IFPRI.
- PRB (Population Reference Bureau) (2007) *World Population Data Sheet*. PRB.

United Nations (2005) *World Population Prospects, the 2004 Revision: Highlights*. UN.

USDA (United States Department of Agriculture) (verschiedene Jgg.) U.S. and Foreign Wheat Prices.

von Witzke H. (2007) *Landwirtschaft in der ökologischen Marktwirtschaft: Sicherung der Welternährung vs. Klimaschutz und Bioenergie*.

Worldbank (2006) *Global Economic Prospects, 2006*. Worldbank.

8 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

A	
a	Jahr
atro	„absolut trocken“, Wassergehalt nahe Null
B	
BVVG	Bodenverwertungs- und -verwaltungsGmbH
C	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
D	
d	Tag
d.h.	das heißt
dGZ	durchschnittlicher Gesamtwuchs
dt	Dezitonne
E	
ECHAM	Klimamodell des MPI
ECHAM5/OM	Die 5te Generation der am Max Planck Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelten ECHAM globalen Zirkulationsmodelle
Etg	Eistage
Etp MJJ	Evapotranspiration in den Monaten Mai, Juni, Juli
Etp' MJJ	Änderung der potentiellen Verdunstung vom Jahr t ₁ zu t ₀ in den Monaten Mai, Juni, Juli
F	
FACE	Free Air Carbon dioxide Enrichment
FAO	Food and Agriculture Organization
Ftg	Frosttage
G	
GCM	Global Circulation Model (Globales Zirkulations-Modell)
GIS	geographisches Informationssystem (auch: Geoinformationssystem)
H	
H ₂ O	Wasser, Wasserdampf
ha	Hektar
HadCM	Hadley Center Climate Model
HI	Harvest index (Ertragsindex)
HTg	Heiße Tage
I	
IFPRI	International Food Policy Research Institute
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
J	
K	
KUP	Kurzumtriebsplantage
L	

M

MPI-M Max-Planck-Institut für Meteorologie

N

Nied_{MJJ} Niederschlag in den Monaten Mai, Juni, Juli

Nied'_{MJJ} Änderung des Niederschlags vom Jahr t_1 zu t_0 in den Monaten Mai, Juni, Juli

O

OECD Organisation for Economic Cooperation and Development – Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung

P

ppm parts per million

Q

R

RCM Regional Circulation Model (Regionales Zirkulations-Modell)

RR Niederschlag

S

SRES Special Report on Emission Scenarios

STg Sommertage

SWIM Soil and Water Integrated Model

T

TgON Anzahl der Tage $< 0,1$ mm/Tag

TgSN Anzahl der Tage ≥ 10 mm/Tag

Tmax < 0 °C Eistage (Tmax < 0 °C)

Tmin ≤ 0 °C Frosttage (Tmin ≤ 0 °C)

Tmax $\geq 25,0$ °C Sommertage (Tmax $\geq 25,0$ °C)

Tmax ≥ 30 °C heiße Tage (Tmax ≥ 30 °C)

U

UNEP United Nations Environmental Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)

V

W

X

Y

y Ertrag

y' Ertragsänderung

y_E relative Ertragsänderung

Z

9 GLOSSAR

BÜK-1000	Bodenübersichtskarte für Deutschland 1:1.000.000 der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
C3-Pflanzen	Die Kohlenstoffdioxid-Fixierung während der Photosynthese erfolgt im Calvin-Zyklus. Im Vergleich zu C4 zeigen C3 Pflanzen eine langsame Photosynthese bei kühleren Temperaturen und geringerer Strahlungsintensität.
C4-Pflanzen	Anhäufung von Kohlendioxid im Blatt durch Vorschaltung eines zusätzlichen, sehr wirksamen, rasch ablaufenden Kohlendioxid-Fixierungsprozesses vor dem Calvin-Zyklus. Dadurch ist die Anpassungen an ökologische Bedingungen trocken-heißer oder salzreicher Standorte mit hohem Lichtangebot gegeben. Durch die bessere Ausnutzung des vorhandenen Kohlendioxids sind die Wasserverluste der C4-Pflanzen geringer. Zu den C4-Pflanzen gehören Mais, Zuckerrohr und Hirse.
Emissionsszenario A1B	Szenarium für die künftig möglichen, überwiegend vom Menschen verursachten Treibhausgasemissionen nach den IPCC Emissionsszenarien
EPIC	Simulation des Biomassewachstums landwirtschaftlicher Kulturpflanzen und die damit einher gehende Ertragsbildung im Tagestakt.
Evapotranspiration	Summe aus Transpiration und Evaporation, der Verdunstung von Wasser der Pflanzen und der Bodenoberfläche
Hydrologischer Sommer	Monate Mai bis Oktober
Hydrologischer Winter	Monate November bis April
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change - der Zwischenstaatliche Ausschuss für Klimaänderungen oder auch Weltklimarat veröffentlicht Berichte zur Beurteilung der Risiken der globalen Erwärmung und zeigt Vermeidungsstrategien auf. Die Sachstandsberichte erschienen bisher 1990, 1992 (Ergänzung zu 1990), 1995, 2001, 2007 http://www.ipcc.ch/
Klimamodell	Computer-Modell zur Berechnung und Vorhersage des Klimas für einen bestimmten Zeitabschnitt
Meteorologischer Sommer	Einteilung der meteorologischen Jahreszeiten erfolgt anhand der Kalendermonate für die Sommermonate Juni-August
Meteorologischer Winter	Wintermonate von Dezember – Februar

Modell 4C	Prozess-basiertes Waldwachstumsmodell für die Dynamik und das Wachstum von Waldbeständen
Monte-Carlo-Simulation	Ableitung des Namens in den 40er Jahren von dem monegasischen Stadtteil Monte Carlo, der durch seine Spielbank bekannt wurde. Die auch durch ein Roulette-Rad zu erzeugenden Zufallszahlen bilden die Grundlage des stochastischen Verfahren, welches auf sehr häufig durchgeführten Zufallsexperimenten basiert. Mittels der Wahrscheinlichkeitstheorie werden Fragestellungen, die analytisch nicht oder nur aufwändig lösbare Probleme darstellen, in einem mathematischem Kontext numerisch gelöst
orographisch	Bezeichnung aus den Geowissenschaften, beschreibt die Höhenstrukturen auf der natürlichen Erdoberfläche. Das können Erscheinungen, Eigenschaften und Zusammenhänge sein, die von Hangneigungen und Hangrichtungen eines Geländes und seinen fließenden Gewässern geprägt werden
Perzentil	Perzentile (lat. ‚Hundertstelwerte‘, oder Prozenträge) stellt die Zerlegung in 100 gleich große Teile dar. Perzentile teilen die Verteilung also in 1-%-Segmente auf
SAS	Computerprogramm des Business-Intelligence(BI)-Anbieters SAS zur Statistischen Analyse, Modellierung, Vorhersage und Optimierung mathematischer Fragestellungen
SRES	Second Report on Emission Szenarios, der 2. Bericht über die Emissionsszenarien aus dem Jahr 2000, der den IPCC-Berichten zugrunde liegt. Die SRES-Emissionsszenarien beschreiben die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert in Bezug auf das Bevölkerungswachstum, die ökonomische, soziale und technologische Entwicklung, den Ressourcen-Verbrauch und den Umgang mit den natürlichen Ressourcen. Die insgesamt 40 Szenarien werden in vier Hauptgruppen (A1, A2, B1, B2) unterteilt und werden als Szenarienfamilien bezeichnet http://www.grida.no/climate/ipcc/emission/
SWIM	Ökohydrologisches Modell zur dynamischen Simulation von Wasserhaushalt und Biomassebildung
Szenarium	Modellorientierte Entwicklungstechnik zur Beschreibung einer möglichen Zukunft; Szenarien sind nicht gleichzusetzen mit Vorhersagen. In der Klimatologie, bei der die künftigen Emissionen von Treibhausgasen von vielen Faktoren abhängen und schwer abzuschätzen sind,

Thiessen-Polygone

basieren Szenarien auf einer bestimmten Entwicklung der Emissionen (siehe auch Szenarien des IPCC)

Begriff aus den Geowissenschaften, welcher eine eindeutige Modelldefinition für eine räumliche Einteilung bezeichnet

PIK Report-Reference:

- No. 1 3. Deutsche Klimatagung, Potsdam 11.-14. April 1994
Tagungsband der Vorträge und Poster (April 1994)
- No. 2 Extremer Nordsommer '92
Meteorologische Ausprägung, Wirkungen auf naturnahe und vom Menschen beeinflusste Ökosysteme, gesellschaftliche Perzeption und situationsbezogene politisch-administrative bzw. individuelle Maßnahmen (Vol. 1 - Vol. 4)
H.-J. Schellnhuber, W. Enke, M. Flechsig (Mai 1994)
- No. 3 Using Plant Functional Types in a Global Vegetation Model
W. Cramer (September 1994)
- No. 4 Interannual variability of Central European climate parameters and their relation to the large-scale circulation
P. C. Werner (Oktober 1994)
- No. 5 Coupling Global Models of Vegetation Structure and Ecosystem Processes - An Example from Arctic and Boreal Ecosystems
M. Plöchl, W. Cramer (Oktober 1994)
- No. 6 The use of a European forest model in North America: A study of ecosystem response to climate gradients
H. Bugmann, A. Solomon (Mai 1995)
- No. 7 A comparison of forest gap models: Model structure and behaviour
H. Bugmann, Y. Xiaodong, M. T. Sykes, Ph. Martin, M. Lindner, P. V. Desanker, S. G. Cumming (Mai 1995)
- No. 8 Simulating forest dynamics in complex topography using gridded climatic data
H. Bugmann, A. Fischlin (Mai 1995)
- No. 9 Application of two forest succession models at sites in Northeast Germany
P. Lasch, M. Lindner (Juni 1995)
- No. 10 Application of a forest succession model to a continentality gradient through Central Europe
M. Lindner, P. Lasch, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 11 Possible Impacts of global warming on tundra and boreal forest ecosystems - Comparison of some biogeochemical models
M. Plöchl, W. Cramer (Juni 1995)
- No. 12 Wirkung von Klimaveränderungen auf Waldökosysteme
P. Lasch, M. Lindner (August 1995)
- No. 13 MOSES - Modellierung und Simulation ökologischer Systeme - Eine Sprachbeschreibung mit Anwendungsbeispielen
V. Wenzel, M. Kücken, M. Flechsig (Dezember 1995)
- No. 14 TOYS - Materials to the Brandenburg biosphere model / GAIA
Part 1 - Simple models of the "Climate + Biosphere" system
Yu. Svirezhev (ed.), A. Block, W. v. Bloh, V. Brovkin, A. Ganopolski, V. Petoukhov, V. Razzhevaikin (Januar 1996)
- No. 15 Änderung von Hochwassercharakteristiken im Zusammenhang mit Klimaänderungen - Stand der Forschung
A. Bronstert (April 1996)
- No. 16 Entwicklung eines Instruments zur Unterstützung der klimapolitischen Entscheidungsfindung
M. Leimbach (Mai 1996)
- No. 17 Hochwasser in Deutschland unter Aspekten globaler Veränderungen - Bericht über das DFG-Rundgespräch am 9. Oktober 1995 in Potsdam
A. Bronstert (ed.) (Juni 1996)
- No. 18 Integrated modelling of hydrology and water quality in mesoscale watersheds
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, A. Becker (Juli 1996)
- No. 19 Identification of vulnerable subregions in the Elbe drainage basin under global change impact
V. Krysanova, D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Cramer, A. Becker (Juli 1996)
- No. 20 Simulation of soil moisture patterns using a topography-based model at different scales
D.-I. Müller-Wohlfeil, W. Lahmer, W. Cramer, V. Krysanova (Juli 1996)
- No. 21 International relations and global climate change
D. Sprinz, U. Luterbacher (1st ed. July, 2nd ed. December 1996)
- No. 22 Modelling the possible impact of climate change on broad-scale vegetation structure - examples from Northern Europe
W. Cramer (August 1996)

- No. 23 A method to estimate the statistical security for cluster separation
F.-W. Gerstengarbe, P.C. Werner (Oktober 1996)
- No. 24 Improving the behaviour of forest gap models along drought gradients
H. Bugmann, W. Cramer (Januar 1997)
- No. 25 The development of climate scenarios
P.C. Werner, F.-W. Gerstengarbe (Januar 1997)
- No. 26 On the Influence of Southern Hemisphere Winds on North Atlantic Deep Water Flow
S. Rahmstorf, M. H. England (Januar 1977)
- No. 27 Integrated systems analysis at PIK: A brief epistemology
A. Bronstert, V. Brovkin, M. Krol, M. Lüdeke, G. Petschel-Held, Yu. Svirezhev, V. Wenzel (März 1997)
- No. 28 Implementing carbon mitigation measures in the forestry sector - A review
M. Lindner (Mai 1997)
- No. 29 Implementation of a Parallel Version of a Regional Climate Model
M. Kücken, U. Schättler (Oktober 1997)
- No. 30 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Overview and key results
W. Cramer, D. W. Kicklighter, A. Bondeau, B. Moore III, G. Churkina, A. Ruimy, A. Schloss, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 31 Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of the seasonal behaviour of NPP, LAI, FPAR along climatic gradients across ecotones
A. Bondeau, J. Kaduk, D. W. Kicklighter, participants of "Potsdam '95" (Oktober 1997)
- No. 32 Evaluation of the physiologically-based forest growth model FORSANA
R. Grote, M. Erhard, F. Suckow (November 1997)
- No. 33 Modelling the Global Carbon Cycle for the Past and Future Evolution of the Earth System
S. Franck, K. Kossacki, Ch. Bounama (Dezember 1997)
- No. 34 Simulation of the global bio-geophysical interactions during the Last Glacial Maximum
C. Kubatzki, M. Claussen (Januar 1998)
- No. 35 CLIMBER-2: A climate system model of intermediate complexity. Part I: Model description and performance for present climate
V. Petoukhov, A. Ganopolski, V. Brovkin, M. Claussen, A. Eliseev, C. Kubatzki, S. Rahmstorf (Februar 1998)
- No. 36 Geocybernetics: Controlling a rather complex dynamical system under uncertainty
H.-J. Schellnhuber, J. Kropp (Februar 1998)
- No. 37 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen auf Weizenbestände des Free-Air Carbondioxid Enrichment (FACE) - Experimentes Maricopa (USA)
T. Kartschall, S. Grossman, P. Michaelis, F. Wechsung, J. Gräfe, K. Waloszczyk, G. Wechsung, E. Blum, M. Blum (Februar 1998)
- No. 38 Die Berücksichtigung natürlicher Störungen in der Vegetationsdynamik verschiedener Klimagebiete
K. Thonicke (Februar 1998)
- No. 39 Decadal Variability of the Thermohaline Ocean Circulation
S. Rahmstorf (März 1998)
- No. 40 SANA-Project results and PIK contributions
K. Bellmann, M. Erhard, M. Flechsig, R. Grote, F. Suckow (März 1998)
- No. 41 Umwelt und Sicherheit: Die Rolle von Umweltschwellenwerten in der empirisch-quantitativen Modellierung
D. F. Sprinz (März 1998)
- No. 42 Reversing Course: Germany's Response to the Challenge of Transboundary Air Pollution
D. F. Sprinz, A. Wahl (März 1998)
- No. 43 Modellierung des Wasser- und Stofftransportes in großen Einzugsgebieten. Zusammenstellung der Beiträge des Workshops am 15. Dezember 1997 in Potsdam
A. Bronstert, V. Krysanova, A. Schröder, A. Becker, H.-R. Bork (eds.) (April 1998)
- No. 44 Capabilities and Limitations of Physically Based Hydrological Modelling on the Hillslope Scale
A. Bronstert (April 1998)
- No. 45 Sensitivity Analysis of a Forest Gap Model Concerning Current and Future Climate Variability
P. Lasch, F. Suckow, G. Bürger, M. Lindner (Juli 1998)
- No. 46 Wirkung von Klimaveränderungen in mitteleuropäischen Wirtschaftswäldern
M. Lindner (Juli 1998)
- No. 47 SPRINT-S: A Parallelization Tool for Experiments with Simulation Models
M. Flechsig (Juli 1998)

- No. 48 The Odra/Oder Flood in Summer 1997: Proceedings of the European Expert Meeting in Potsdam, 18 May 1998
A. Bronstert, A. Ghazi, J. Hladny, Z. Kundzewicz, L. Menzel (eds.) (September 1998)
- No. 49 Struktur, Aufbau und statistische Programmbibliothek der meteorologischen Datenbank am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
H. Österle, J. Glauer, M. Denhard (Januar 1999)
- No. 50 The complete non-hierarchical cluster analysis
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (Januar 1999)
- No. 51 Struktur der Amplitudengleichung des Klimas
A. Hauschild (April 1999)
- No. 52 Measuring the Effectiveness of International Environmental Regimes
C. Helm, D. F. Sprinz (Mai 1999)
- No. 53 Untersuchung der Auswirkungen erhöhter atmosphärischer CO₂-Konzentrationen innerhalb des Free-Air Carbon Dioxide Enrichment-Experimentes: Ableitung allgemeiner Modelllösungen
T. Kartschall, J. Gräfe, P. Michaelis, K. Waloszczyk, S. Grossman-Clarke (Juni 1999)
- No. 54 Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN
L. Menzel (August 1999)
- No. 55 Dry atmosphere asymptotics
N. Botta, R. Klein, A. Almgren (September 1999)
- No. 56 Wachstum von Kiefern-Ökosystemen in Abhängigkeit von Klima und Stoffeintrag - Eine regionale Fallstudie auf Landschaftsebene
M. Erhard (Dezember 1999)
- No. 57 Response of a River Catchment to Climatic Change: Application of Expanded Downscaling to Northern Germany
D.-I. Müller-Wohlfel, G. Bürger, W. Lahmer (Januar 2000)
- No. 58 Der "Index of Sustainable Economic Welfare" und die Neuen Bundesländer in der Übergangsphase
V. Wenzel, N. Herrmann (Februar 2000)
- No. 59 Weather Impacts on Natural, Social and Economic Systems (WISE, ENV4-CT97-0448)
German report
M. Flechsig, K. Gerlinger, N. Herrmann, R. J. T. Klein, M. Schneider, H. Sterr, H.-J. Schellnhuber (Mai 2000)
- No. 60 The Need for De-Aliasing in a Chebyshev Pseudo-Spectral Method
M. Uhlmann (Juni 2000)
- No. 61 National and Regional Climate Change Impact Assessments in the Forestry Sector - Workshop Summary and Abstracts of Oral and Poster Presentations
M. Lindner (ed.) (Juli 2000)
- No. 62 Bewertung ausgewählter Waldfunktionen unter Klimaänderung in Brandenburg
A. Wenzel (August 2000)
- No. 63 Eine Methode zur Validierung von Klimamodellen für die Klimawirkungsforschung hinsichtlich der Wiedergabe extremer Ereignisse
U. Böhm (September 2000)
- No. 64 Die Wirkung von erhöhten atmosphärischen CO₂-Konzentrationen auf die Transpiration eines Weizenbestandes unter Berücksichtigung von Wasser- und Stickstofflimitierung
S. Grossman-Clarke (September 2000)
- No. 65 European Conference on Advances in Flood Research, Proceedings, (Vol. 1 - Vol. 2)
A. Bronstert, Ch. Bismuth, L. Menzel (eds.) (November 2000)
- No. 66 The Rising Tide of Green Unilateralism in World Trade Law - Options for Reconciling the Emerging North-South Conflict
F. Biermann (Dezember 2000)
- No. 67 Coupling Distributed Fortran Applications Using C++ Wrappers and the CORBA Sequence Type
T. Slawig (Dezember 2000)
- No. 68 A Parallel Algorithm for the Discrete Orthogonal Wavelet Transform
M. Uhlmann (Dezember 2000)
- No. 69 SWIM (Soil and Water Integrated Model), User Manual
V. Krysanova, F. Wechsung, J. Arnold, R. Srinivasan, J. Williams (Dezember 2000)
- No. 70 Stakeholder Successes in Global Environmental Management, Report of Workshop, Potsdam, 8 December 2000
M. Welp (ed.) (April 2001)

- No. 71 GIS-gestützte Analyse globaler Muster anthropogener Waldschädigung - Eine sektorale Anwendung des Syndromkonzepts
M. Cassel-Gintz (Juni 2001)
- No. 72 Wavelets Based on Legendre Polynomials
J. Fröhlich, M. Uhlmann (Juli 2001)
- No. 73 Der Einfluß der Landnutzung auf Verdunstung und Grundwasserneubildung - Modellierungen und Folgerungen für das Einzugsgebiet des Glan
D. Reichert (Juli 2001)
- No. 74 Weltumweltpolitik - Global Change als Herausforderung für die deutsche Politikwissenschaft
F. Biermann, K. Dingwerth (Dezember 2001)
- No. 75 Angewandte Statistik - PIK-Weiterbildungsseminar 2000/2001
F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.) (März 2002)
- No. 76 Zur Klimatologie der Station Jena
B. Orłowsky (September 2002)
- No. 77 Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil
A. Güntner (September 2002)
- No. 78 Phenology in Germany in the 20th Century: Methods, Analyses and Models
J. Schaber (November 2002)
- No. 79 Modelling of Global Vegetation Diversity Pattern
I. Venevskaia, S. Venevsky (Dezember 2002)
- No. 80 Proceedings of the 2001 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change "Global Environmental Change and the Nation State"
F. Biermann, R. Brohm, K. Dingwerth (eds.) (Dezember 2002)
- No. 81 POTSDAM - A Set of Atmosphere Statistical-Dynamical Models: Theoretical Background
V. Petoukhov, A. Ganopolski, M. Claussen (März 2003)
- No. 82 Simulation der Siedlungsflächenentwicklung als Teil des Globalen Wandels und ihr Einfluß auf den Wasserhaushalt im Großraum Berlin
B. Ströbl, V. Wenzel, B. Pfützner (April 2003)
- No. 83 Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven
F.-W. Gerstengarbe, F. Badeck, F. Hattermann, V. Krysanova, W. Lahmer, P. Lasch, M. Stock, F. Suckow, F. Wechsung, P. C. Werner (Juni 2003)
- No. 84 Well Balanced Finite Volume Methods for Nearly Hydrostatic Flows
N. Botta, R. Klein, S. Langenberg, S. Lützenkirchen (August 2003)
- No. 85 Orts- und zeitdiskrete Ermittlung der Sickerwassermenge im Land Brandenburg auf der Basis flächendeckender Wasserhaushaltsberechnungen
W. Lahmer, B. Pfützner (September 2003)
- No. 86 A Note on Domains of Discourse - Logical Know-How for Integrated Environmental Modelling, Version of October 15, 2003
C. C. Jaeger (Oktober 2003)
- No. 87 Hochwasserrisiko im mittleren Neckarraum - Charakterisierung unter Berücksichtigung regionaler Klimaszenarien sowie dessen Wahrnehmung durch befragte Anwohner
M. Wolff (Dezember 2003)
- No. 88 Abflußentwicklung in Teileinzugsgebieten des Rheins - Simulationen für den Ist-Zustand und für Klimaszenarien
D. Schwandt (April 2004)
- No. 89 Regionale Integrierte Modellierung der Auswirkungen von Klimaänderungen am Beispiel des semi-ariden Nordostens von Brasilien
A. Jaeger (April 2004)
- No. 90 Lebensstile und globaler Energieverbrauch - Analyse und Strategieansätze zu einer nachhaltigen Energiestruktur
F. Reusswig, K. Gerlinger, O. Edenhofer (Juli 2004)
- No. 91 Conceptual Frameworks of Adaptation to Climate Change and their Applicability to Human Health
H.-M. Füssel, R. J. T. Klein (August 2004)
- No. 92 Double Impact - The Climate Blockbuster 'The Day After Tomorrow' and its Impact on the German Cinema Public
F. Reusswig, J. Schwarzkopf, P. Polenz (Oktober 2004)
- No. 93 How Much Warming are we Committed to and How Much Can be Avoided?
B. Hare, M. Meinshausen (Oktober 2004)

- No. 94 Urbanised Territories as a Specific Component of the Global Carbon Cycle
A. Svirejeva-Hopkins, H.-J. Schellnhuber (Januar 2005)
- No. 95 GLOWA-Elbe I - Integrierte Analyse der Auswirkungen des globalen Wandels auf Wasser, Umwelt und Gesellschaft im Elbegebiet
F. Wechsung, A. Becker, P. Gräfe (Hrsg.) (April 2005)
- No. 96 The Time Scales of the Climate-Economy Feedback and the Climatic Cost of Growth
S. Hallegatte (April 2005)
- No. 97 A New Projection Method for the Zero Froude Number Shallow Water Equations
S. Vater (Juni 2005)
- No. 98 Table of EMICs - Earth System Models of Intermediate Complexity
M. Claussen (ed.) (Juli 2005)
- No. 99 KLARA - Klimawandel - Auswirkungen, Risiken, Anpassung
M. Stock (Hrsg.) (Juli 2005)
- No. 100 Katalog der Großwetterlagen Europas (1881-2004) nach Paul Hess und Helmut Brezowsky
6., verbesserte und ergänzte Auflage
F.-W. Gerstengarbe, P. C. Werner (September 2005)
- No. 101 An Asymptotic, Nonlinear Model for Anisotropic, Large-Scale Flows in the Tropics
S. Dolaptchiev (September 2005)
- No. 102 A Long-Term Model of the German Economy: $lagom^{d_sim}$
C. C. Jaeger (Oktober 2005)
- No. 103 Structuring Distributed Relation-Based Computations with SCDRC
N. Botta, C. Ionescu, C. Linstead, R. Klein (Oktober 2006)
- No. 104 Development of Functional Irrigation Types for Improved Global Crop Modelling
J. Rohwer, D. Gerten, W. Lucht (März 2007)
- No. 105 Intra-Regional Migration in Formerly Industrialised Regions: Qualitative Modelling of Household Location Decisions as an Input to Policy and Plan Making in Leipzig/Germany and Wirral/Liverpool/UK
D. Reckien (April 2007)
- No. 106 Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050) -
Schlußbericht zum FDW-Vorhaben: Klima 2050
M. Stock, F. Badeck, F.-W. Gerstengarbe, D. Hoppmann, T. Kartschall, H. Österle, P. C. Werner,
M. Wodinski (Juni 2007)
- No. 107 Climate Policy in the Coming Phases of the Kyoto Process: Targets, Instruments, and the Role of Cap and Trade Schemes - Proceedings of the International Symposium, February 20-21, 2006, Brussels
M. Welp, L. Wicke, C. C. Jaeger (eds.) (Juli 2007)
- No. 108 Correlation Analysis of Climate Variables and Wheat Yield Data on Various Aggregation Levels in Germany and the EU-15 Using GIS and Statistical Methods, with a Focus on Heat Wave Years
T. Sterzel (Juli 2007)
- No. 109 MOLOCH - Ein Strömungsverfahren für inkompressible Strömungen - Technische Referenz 1.0
M. Münch (Januar 2008)
- No. 110 Rationing & Bayesian Expectations with Application to the Labour Market
H. Förster (Februar 2008)
- No. 111 Finding a Pareto-Optimal Solution for Multi-Region Models Subject to Capital Trade and Spillover Externalities
M. Leimbach, K. Eisenack (November 2008)
- No. 112 Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel
F. Wechsung, F.-W. Gerstengarbe, P. Lasch, A. Lüttger (Hrsg.) (Dezember 2008)