

4.4 Konsequenzen für landwirtschaftliche Produktion und Landschaftsökologie

FRANK EULENSTEIN, ARMIN WERNER & ANDREAS FISCHER

Konsequenzen für die landwirtschaftliche Produktion und Landschaftsökologie: Der Klimawandel in Mitteleuropa wird zu einer Veränderung der jährlichen Niederschlagsverteilung und zu einer Erhöhung der Temperaturen führen. Die Auswirkungen dieser Veränderungen auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion wird dabei regional sehr unterschiedlich sein. In Deutschland werden dabei die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen wesentlich von den Niederschlägen im Sommerhalbjahr und zum Teil auch von denen im Winterhalbjahr bestimmt. Während in Nordostdeutschland die Niederschlagsmengen, im Zuge des Klimawandels, in den nächsten Dekaden, im Sommerhalbjahr, sinken, können in Teilen Westdeutschlands die Niederschlagsmengen durchaus ansteigen. Durch die ansteigenden Temperaturen im Sommerhalbjahr, steigt auch die Verdunstung. Dies kann bei geringer Wasserspeicherkapazität der meist sandigen Böden zu erheblichen Problemen in der landwirtschaftlichen Produktion in Nordostdeutschland führen. Diese Auswirkungen des Klimawandels wurden in Szenarien abgeschätzt, wozu Pflanzenwachstumsmodelle eingesetzt wurden. Die Folgen reduzierter Niederschlagsmengen in der Vegetationsperiode und infolge steigender Temperaturen, ansteigender Verdunstungsraten werden zum Teil durch steigende CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre ausgeglichen. Aus diesem Grund werden auch in Nordostdeutschland die Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturen weniger dramatisch sein als erwartet. Aus den Simulationen ergeben sich Ertragsrückgänge zwischen 0,33% (Sommerroggen) und 9,42% (Kartoffeln). Die größte Auswirkung des Klimawandels auf die Landnutzungssysteme wird die Produktion von Sickerwasser sein. Die Sickerwassermenge unter Ackerflächen wird von 143 mm/Jahr in der Referenzperiode (1993-2001) auf 12 mm/Jahr für den Zeitraum des Klimawandel-Szenarios (2046-2054) sinken. Es ist zu erwarten, dass der »globale Wandel« auf dem Weltmarkt für Agrarprodukte neben dem Klimawandel Auswirkungen auf die regionale Pflanzenproduktion haben wird. Eine weitere Konsequenz des Klimawandels bei gleichzeitigem Anstieg der Weltbevölkerung und deren Nachfrage nach Agrarerzeugnissen ist, dass eine Vermehrung der Anbaufläche für Agrarprodukte einen dramatischen Landnutzungswandel und eine Steigerung der Intensität der Produktion nach sich zieht. Diese Veränderung der pflanzenbaulichen Produktionssysteme wird sicherlich mit negativen ökologischen Folgen verknüpft sein. Eine weitere Konsequenz des Klimawandels bei gleichzeitigem Anstieg der Weltbevölkerung und deren Nachfrage nach Agrarerzeugnissen ist, dass eine Vermehrung der Anbaufläche für Agrarprodukte einen dramatischen Landnutzungswandel und eine Steigerung der Intensität der Produktion nach sich zieht. Diese Veränderung der pflanzenbaulichen Produktionssysteme wird sicherlich mit negativen ökologischen Folgen verknüpft sein.

Consequences for agricultural production and landscape ecology: Climate change in Central Europe will lead to new patterns of precipitation during the year and will increase annual temperature. These changes of climatic variables and the resulting impacts onto agricultural productivity have to be differentiated regionally. In Germany the crop production is depending on sufficient rainfall during the summer time and in some regions on the amount of rain during winter period. In North-East Germany the amount of rainfall in summer will be reduced due to climate change in the next decades whereas in West Germany the precipitation will increase substantially. Due to additionally increasing summer temperatures and low water holding capacity of the soils in North-East Germany the agricultural production can suffer strongly. The impact of climate change was studied with scenarios, using crop simulation models. The effects of reduced summer precipitation and elevated air temperature will in part be compensated by to be expected elevated concentration of CO₂. Therefore the impact of changed climatic conditions in North-East Germany until 2100 is less drastic onto crop yields. The expected losses ranged between 0,33% (summer rye) and 9,42% (potatoes). The strongest impact of climate change onto land use is calculated in the production of seepage water. The drainage rate below arable crops will drop from 143 mm/year in the reference period (1993–2001) down to 12 mm/year in the climate change scenario (2046–2054). Besides the impact of climate change onto regional crop production the global changes will affect heavily the world markets on agricultural products. Another consequence driven by climate change and the population increment is a higher demand of agricultural products in global markets. This will provoke dramatic local land use changes and intensification of agriculture, modifying present crop production systems and affecting ecological landscapes. Another consequence driven by climate change and the population increment is a higher demand of agricultural products in global markets. This will provoke dramatic local land use changes and intensification of agriculture, modifying present crop production systems and affecting ecological landscapes.

Mit dem globalen Klimawandel gehen regionale Änderungen der Niederschlags- und Luftfeuchteverhältnisse einher. Infolge der Temperaturerhöhung wird sich insbesondere in Mitteleuropa der jährliche Verdunstungsanspruch der Atmosphäre erhöhen. Daraus resultiert eine Beschleunigung des hydrologischen Kreislaufs von Verdunstung und Niederschlag. Die temperaturabhängige Zunahme der Wasserdampf-Speicherkapazität der Atmosphäre führt zu einer Zunahme der latenten Energie in der Troposphäre. Daraus resultiert gleichzeitig die weltweite Erhöhung der Anzahl von klimatischen Extremereignissen, wie z.B. Stürme, Dürren und Starkniederschläge mit anschließender Überflutung.

Das vermehrte Auftreten dieser Extremereignisse stellt unter mitteleuropäischen Verhältnissen das eigentliche Problem des Klimawandels dar. Das Hauptproblem dieser Extremereignisse ist, dass sie durch keine derzeit verfügbaren Klimamodelle vorherzusagen sind und ihr Auftreten als Folge des Klimawandels immer häufiger wird. Zudem sind die von den Menschen entwickelten Prinzipien, Verhaltensregeln im Alltag, aber auch die Produktionsverfahren der landwirtschaftlichen Landnutzung auf typische, mittlere Wettersituationen ausgerichtet. Das Planen und das Reagieren unter derart unsicheren Rahmenbedingungen ist sehr schwierig und in den meisten unserer Wirtschafts- und Gesellschaftsbereiche nicht gut oder noch gar nicht entwickelt.

Der Klimawandel ist, neben Wandel von Wirtschaft, Bevölkerungsüberalterung und Migration das zentrale Element des »Globalen Wandels«. Die erwarteten Änderungen des Klimas werden in den nächsten Jahrzehnten eine nicht zu unterschätzende Steuerungsgröße in der Produktivität (z.B. durch Wassermangel/oder-überschuss), aber auch in der landschaftsökologischen Funktionalität von Landnutzungssystemen (wie z.B. Lebensraumfunktion für Arten, Grundwasserneubildung) sein. Es ist bereits heute abzusehen, dass die direkten Wirkungen des Klimawandels auf die Produktivität von Landnutzungssystemen kurz- und mittelfristig die Weltmärkte für Agrarprodukte und damit auch Energie in erheblichem Maße beeinflussen werden.

Aus diesem Grund ist die Untersuchung und Einschätzung der produktions- und landschaftsökologischen Folgen des Klimawandels auf die Landwirtschaft zu untergliedern in die drei Wirkungsbereiche des Klimawandels:

- Wirkung des Klimawandels auf die Produktionsfunktion der Landnutzungssysteme,
- Wirkung des Klimawandels auf die landschaftsökologische Funktionalität von Landnutzungssystemen und

- Wirkung des Klimawandels auf die Weltmärkte für Agrarprodukte mit der zu erwartenden Rückkopplung auf die mitteleuropäische Landwirtschaft. Diese steht im Fokus der vorliegenden Betrachtung.

Nur eine solche komplexe Betrachtung der Wirkungen des Klimawandels wird im Ergebnis der Analysen deutlich machen, dass die Landwirtschaft unter sozio-ökonomischen und landschaftsökologischen Aspekten sowohl zu den Gewinnern als auch zu den Verlierern zählen wird.

Wirkung des Klimawandels auf die Produktions- und die landschaftsökologische Funktion der Landnutzungssysteme

Das UMWELTBUNDESAMT (2007) hat die wichtigsten, sich aus den aktuellen und relevanten Klimastudien ergebenden Konsequenzen bis zum Jahr 2100 (im Vergleich zum Zeitraum 1961–1990) zusammengestellt:

Die Winterniederschläge nehmen im Westen von Deutschland stark zu (30–80%), im Süden ist der Anstieg dagegen mittel (ca. +20%) und gering (< 20%) im Norden und Osten (s. Kap. 1.1 - ROECKNER & JACOB - in diesem Band). Die Sommerniederschläge nehmen im Nordosten von Deutschland stark ab (bis zu -30%), im Süden, Südosten sowie Nordwesten ist die Abnahme dagegen mittel (ca. -20%), und im Westen nehmen die Sommerniederschläge nur gering ab (0–10%).

Die jährliche mittlere Lufttemperatur (in 2 m Höhe) steigt im Nordosten von Deutschland stark an (ca. 2,5 °K). Im zentralen Bereich von Deutschland und der südlichen Landeshälfte steigt die Jahresmitteltemperatur um ca. 2,0 °K. In der Alpenregion sowie in Küstennähe und dem westlichen Niedersachsen und in Schleswig-Holstein steigt die Jahresmitteltemperatur nur um etwa 1,5 °K (s. Kap. 1.1 - ROECKNER & JACOB - in diesem Band).

An dem zukünftig vorausgesagten Klimawandel wird deutlich, dass in Westdeutschland, vor allem aber im Südwesten Deutschlands nur vergleichsweise geringe und damit die landwirtschaftliche Produktion nur wenig betreffende Änderungen der Temperatur und der Niederschläge stattfinden werden. Allerdings sind dabei auch regionale Unterschiede zu konstatieren: Für das dem Südwesten zuzuordnende Rhein-Main-Gebiet werden schon bereits heute (1991–2005) um etwa 10% höhere Temperaturen gemessen als im Vergleich zum Referenzzeitraum (1961–1990). Dort zeigt sich zudem bei den Niederschlägen sowohl im Winter- wie auch im Sommerhalbjahr eine leichte Abnahme. Das Ausmaß der Betroffenheit durch den Klimawandel ist dagegen in Nordostdeutschland durch deutlich sinkende Som-

merniederschläge und erheblich steigende Temperaturen am größten.

Am Beispiel von zwei konkreten Untersuchungsgebieten mit typischer Landnutzung und ähnlichen Böden wurde von EULENSTEIN et al. (2005a, 2006) geprüft, wie sich die Komponenten des Bodenwasserhaushaltes und hierbei speziell die Wasserverfügbarkeit für landwirtschaftliche Kulturen in Folge des zu erwartenden Klimawandels ändern könnten. Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete wurde bewusst darauf Wert gelegt, dass in beiden Untersuchungsgebieten sandige Böden mit geringer Feldkapazität dominieren. Dieser Faktor stellt die Größe des Speichers für Wasser im Boden dar (entspricht dem in die Tiefe durchwurzelbaren Bereich). In dem in Nordwestdeutschland lokalisierten Untersuchungsgebiet werden sich die pflanzenbaulichen Rahmenbedingungen bei Zutreffen der angenommenen Klimaszenarien im zu erwartenden Klimawandel eher verbessern. In den Sandgebieten Ostdeutschlands werden die schon jetzt gerade in der Vegetationsperiode schwierigen pflanzenbaulichen Rahmenbedingungen noch ungünstiger. Zwischen 1961 und 1990 betrug der langjährig ermittelte, mittlere Niederschlag in Deutschland 790 mm (1 mm »Wassersäule« entspricht einer Menge von einem Liter Wasser pro Quadratmeter Boden). Für Brandenburg beträgt der langjährige mittlere Niederschlag aber lediglich 615 mm, im Raum Münchenberg (Kleinstadt östlich von Berlin) nur 520 mm/Jahr und im weiter östlich gelegenen Oderbruch sogar nur 460 mm/Jahr.

Neben den geringen Niederschlagsmengen macht sich hier der Umstand bemerkbar, dass wir es in Nordostdeutschland und Westpolen überwiegend mit Böden mit geringer Wasserspeicherkapazität zu tun haben. Die mit der offiziellen Bodenschätzung ermittelten Bodenwertzahlen korrelieren sehr gut mit der Menge an Wasser, das pflanzenverfügbar im durchwurzelten Raum des Bodens gespeichert wird. Die in den o.g. Regionen dominierenden Böden sind überwiegend eiszeitlich geprägte Grund- und Endmoränen sowie Sanderflächen mit relativ niedrigen Bodenwertzahlen. Diese Sandböden der norddeutschen Tiefebene besitzen etwa 100–

150 mm Speicherkapazität bis in einen Meter Tiefe. Die als diesbezüglich besten Böden, die Schwarzerdeböden des Harzvorlandes können dahingegen ca. 240 mm Wasser in der gleichen Tiefe pflanzenverfügbar speichern. An warmen Tagen im Hochsommer verdunsten ca. 6 mm Wasser (entspricht 6 l/m²). Eine Schwarzerde in der Magdeburger Börde würde den Pflanzen unter diesen Bedingungen für 40 Tage Wasser zur Verfügung stellen können. Ein Bestand auf Sandböden ist rein rechnerisch bereits nach 17 Tagen am Ende der Wassernachlieferung aus dem Boden angelangt. Ähnliche bodenbildende, sandige Substrate sind auch in weiten Teilen Niedersachsens vorzufinden. Allerdings sind in Niedersachsen die mittleren Jahresniederschläge um 200 mm höher.

In Brandenburg, der Altmark und im östlichen Niedersachsens (Raum Uelzen/Lüchow) und im westlichen Polen kumulieren diese Probleme der geringen Speicherkapazität der Böden und der geringen Niederschläge in einer für Mitteleuropa einzigartigen Weise. Genau in diesen Regionen dürften auch die Auswirkungen des zu erwartenden Klimawandels am gravierendsten sein.

Diese Standortverhältnisse – mit Wasser als wichtigstem Produktionsfaktor im Mangel – in Kombination mit sehr wenig wasserspeichernden Böden führen dazu, dass die Produktionsbedingungen für Landwirtschaftsbetriebe in diesen Regionen gerade bei niederschlagsarmen Phasen innerhalb der Vegetationsperioden als problematisch zu beurteilen sind. Im Zuge der prognostizierten Erwärmung, des Rückganges und der innerjährlichen Umverteilung der Niederschläge vom Sommer- zum Winterhalbjahr (GERSTENGARBE et al. 2003) kann sich diese Situation zukünftig noch verschärfen.

Entwicklung des regionalen pflanzenbaulich relevanten Wasserdargebotes in den östlichen Bundesländern

Das Wasserdargebot entspricht nach SCHINDLER et al. (2007) der nutzbaren Feldkapazität des Bodens im effektiven Wurzelraum (nFKWe) und dem Niederschlagsdargebot in der Wasserbedarfsperiode. Die Be-

Tab. 4.4-1: Bewertung der Trockenheitsgefährdung für Fruchtartengruppen nach dem Wasserdargebot nach SCHINDLER et al. (2007).

Bewertung	Wasserdargebot für Fruchtartengruppen in mm		
	Getreide (April–Juni)	Hackfrüchte (Mai–September)	Gras (April–Oktober)
<i>sehr hoch</i>	weniger als 220	weniger als 300	weniger als 400
<i>hoch</i>	220–280	300–390	400–480
<i>mittel</i>	280–340	390–480	480–560
<i>gering</i>	340–400	480–570	560–640
<i>sehr gering</i>	mehr als 400	mehr als 570	mehr als 640

wertung des Wasserdargebotes hinsichtlich Trockenheitsgefährdung erfolgt in Bezug zur gegenwärtigen Ertragsbildung in fünf Klassen, von sehr hoch und trockenheitsgefährdet bis sehr gering und ohne Trockenheitsgefährdung (Tab. 4.4-1). Grundlage für die Ableitung der Wasserdargebotsklassen bildeten Ergebnisse aus Lysimeter- und Feldversuchen (ROTH et al. 1997; SCHINDLER et al. 2001; MÜLLER et al. 2004) zu Beziehungen zwischen Wasserverbrauch, Effektivität der Wasserausnutzung und Ertrag.

Auf der Basis von Wetteraufzeichnungen von 368 Wetterstationen (bereitgestellt vom PIK Potsdam und dem Deutschen Wetterdienst) und einem Klimasze-

nario vom PIK Potsdam (GERSTENGARBE et al. 2003) wurden für die in den neuen Bundesländern typischen Standorteinheiten mit geeigneten rechnerischen Methoden synthetische Daten zu Niederschlägen erzeugt. Das tatsächliche Niederschlagsdargebot hat sich in den letzten 50 Jahren (1951–2000) im Mittel für das Gesamtgebiet vermindert und wird sich entsprechend des Klimaszenarios bis 2055 weiterhin verringern (s. Kap. 1.1 - ROECKNER & JACOB - in diesem Band). Je nach betrachtetem Vegetationszeitraum betrug die Abnahme der Niederschläge im Messzeitraum (1951–2000) im Mittel zwischen 220–50 mm. Das Klimaszenario (2001–2055) prognostiziert eine weitere Reduzierung

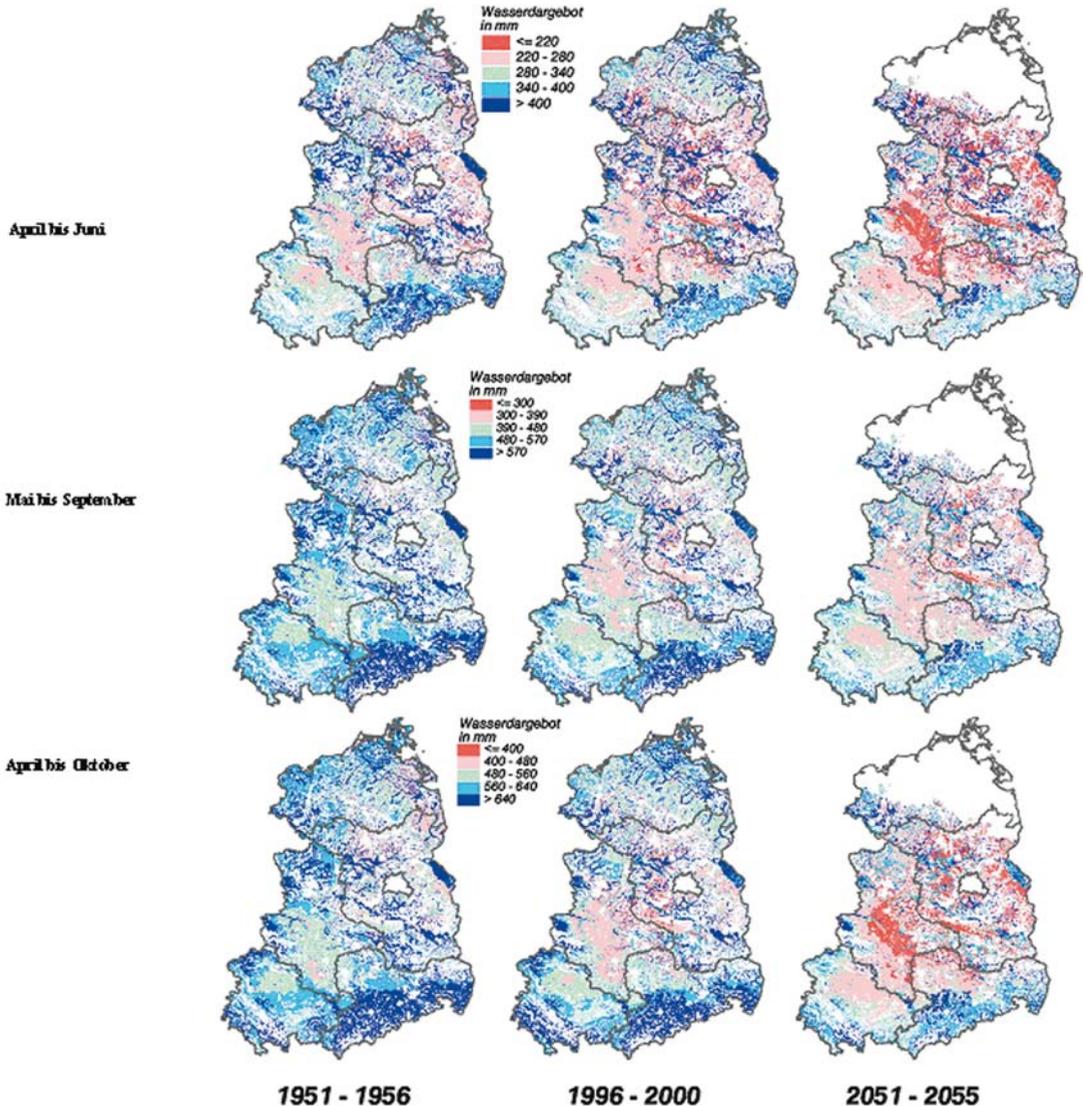


Abb. 4.4-1: Regionale Darstellung der Trockenheitsgefährdung in den östlichen Gebieten Deutschlands nach dem Wasserdargebot für Fruchtartengruppen nach SCHINDLER et al. 2007.

um 32–68 mm. Regional sind jedoch sehr große Differenzierungen ablesbar. In den meisten Regionen nahmen die Niederschläge ab und werden sich auch zukünftig weiter vermindern. Es gibt aber auch Landschaftsbereiche (wie Nordost Mecklenburg-Vorpommern, Harzvorland, Oberlausitz), in denen von 1951–2055 zunehmende Niederschläge prognostiziert werden.

Die Auswirkungen der Niederschlagsveränderungen auf die Pflanzenwasserversorgung können nach SCHINDLER et al. (2007) für die nord-östlichen, die Neuen Bundesländer regional sehr unterschiedlich sein.

Am stärksten von Wassermangel betroffen werden die Bundesländer Brandenburg und Sachsen-Anhalt (Abb. 4.4-1). Die schon jetzt sehr angespannte Wasserversorgungssituation wird sich in diesen Regionen zukünftig für alle Fruchtartengruppen weiter verschärfen.

Auf teilweise mehr als 40% der landwirtschaftlichen Nutzfläche (LN) wird in dieser Region im Mittel der Jahre das Wasserdargebot so gering sein, dass dort bisher eher nur für Einzeljahren bekannte, nunmehr durchgehende Trockenheit vorherrscht. Aufgrund des höheren Niederschlagsdargebotes und der besseren Bodenwasserspeicherverhältnisse (Abb. 4.4-2) werden die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Thüringen und Sachsen nicht so deutlich sein.

In diesen Bundesländern wird die Pflanzenwasserversorgung im Wesentlichen mittel bis gut bleiben. Dort wird auf nur einem vergleichsweise geringen Flächenanteil im Mittel der Jahre mit Trockenheit zu rechnen sein.

Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Erträge landwirtschaftlicher Produktionssysteme

Ziel einer Studie von WIGGERING et al. (2005) war die Analyse der Auswirkungen der zu erwartenden Klimaänderung auf die Landnutzung und den Landschaftswasserhaushalt von Agrarstandorten Nordost- und Mitteldeutschlands.

Im Einzelnen galt es zunächst zu klären: wie sich die klimatische Wasserhaushaltsbilanz und Stoffausträge (Nitrat und Sulfat) unter landwirtschaftlich genutzten Flächen sowie die Erträge der landwirtschaftlichen Kulturpflanzen unter zukünftigen Klimaverhältnissen verändern.

Für diese Berechnungen wurde eine Agrarlandschaft direkt östlich der deutschen Hauptstadt Berlin ausgewählt. Sie umfasst 54.000 ha. Flächengenaue Erhebungen im Zeitraum 1993–2001 zu Anbaufrüchten, Erträgen und Düngung von insgesamt 54 Landwirtschaftsbetrieben dienten dabei als Grundlage für die Kalkulationen. Der Zeitabschnitt von 1993–2001 dient als Referenzperiode für das von GERSTENGARBE et al. (2003) definierte Klimaszenario (Abb. 4.4-3). Die Szenarienberechnungen beruhen auf einem Temperaturanstieg von ca. 1,4 °K für den Zeitabschnitt 2001–2055. Dieser Trend wurde aus den Ergebnisdaten des Modells ECHAM4-OPYC3 des Max-Planck-Institutes für Meteorologie Hamburg bestimmt. Diesem Modelllauf liegt das Emissionsszenarium A1B-CO2 des IPCC (2001) zugrunde, welches eine relativ moderate Temperaturerhöhung zur Folge hat.

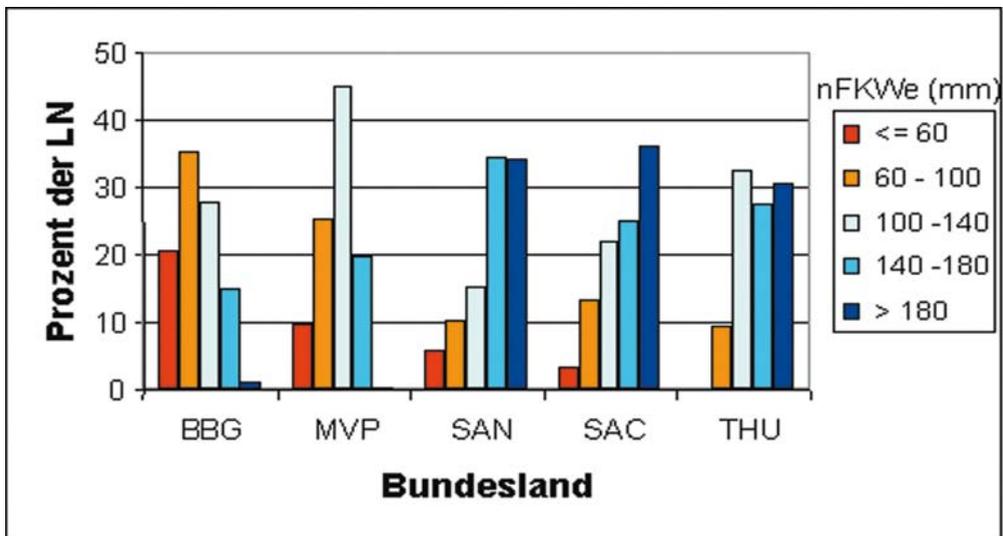


Abb. 4.4-2: Prozentuale Verteilung der nutzbaren Feldkapazität im effektiven Wurzelraum (nFKWe) der Agrarstandorte in den Bundesländern: BBG-Brandenburg, MVP-Mecklenburg-Vorpommern, SAN-Sachsen-Anhalt, SAC-Sachsen und THU-Thüringen (nach SCHINDLER et al. 2007).

Auswirkungen auf den Wasserhaushalt landwirtschaftlicher Produktionssysteme

Es zeigte sich, dass die Pflanzenbestände während der Vegetationsperiode den Wasservorrat des Bodens bereits unter den heutigen klimatischen Bedingungen vollständig ausschöpfen, so dass die berechnete aktuelle Evapotranspiration während des Sommerhalbjahres keine Unterschiede zwischen dem Ist-Klima und dem angenommenen Klimaszenario zeigt. Die berechnete Evapotranspiration ist in dem Klimaszenario über das Jahr summiert um 20 mm höher als die im Ist-Klima. Die differenzierte Aufstellung der Komponenten der Wasserhaushaltsbilanz zeigt, dass dies ausschließlich auf eine höhere Evapotranspiration im Winterhalbjahr zurückzuführen ist.

Der mittlere Jahres-Niederschlag betrug im Zeitraum 1993–2001 569 mm/Jahr (s. Tab. 4.4-2). Mit Hilfe der Modelle HERMES/SULFONIE von KERSEBAUM (1995) wurde eine potenzielle Evapotranspiration in Höhe von 510 mm/Jahr berechnet. Unter Berücksichtigung der angebauten Fruchtarten und der begrenzten Wasserverfügbarkeit in den Sommermonaten liegt die aktuelle Evapotranspiration fast 100 mm niedriger und beträgt 417 mm/Jahr. Die Sickerwasserspende beträgt im Mittel der Jahre etwa 140 mm/Jahr. In dem Modell wird das abwärts verdrängte Bodenwasser als Sickerwasser ausgewiesen, welches tiefer als 2 m verlagert wird.

Tab. 4.4-2: Komponenten des Wasserhaushaltes im Untersuchungsgebiet für das heutige Klima und ein Klimaszenario nach GERSTENGARBE (2003).

Klima	Niederschlag mm/Jahr	=	Evapotranspiration mm/Jahr	+	Sickerwasser mm/Jahr	+	Vorratsänderung mm/Jahr
Ist-Klima 1993–2001 (»Referenz«)	569	=	417	+	143	+	9
Klimaszenario 2046–2054	457	=	437	+	12	+	8

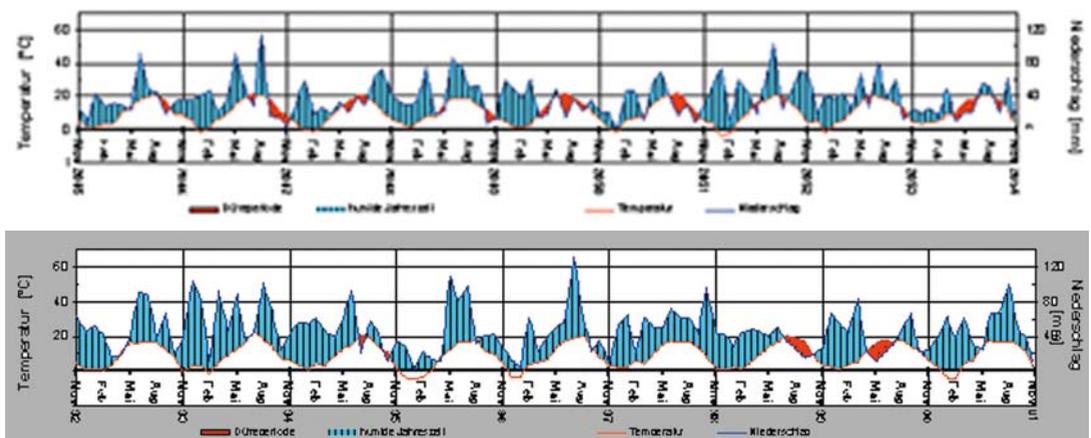


Abb. 4.4-3: Verlauf von Niederschlägen und Temperatur für die Station Müncheberg. Oben für die Periode 1993–2001; unten für das Klimaszenario des PIK nach GERSTENGARBE et al. (2003). Diagramm nach WALTER & LIETH (1967).

Abb. 4.4-4 zeigt den Verlauf von vier Größen des Wasserhaushaltes für das Ist-Klima und das Klimaszenario. Für das Ist-Klima folgt die Sickerwasserrate weitgehend den Streuungen der Jahresniederschläge. Die höhere Sickerwasserspende 1999 bei geringeren Niederschlägen kommt dadurch zustande, dass in 2 m Bodentiefe zunächst noch Sickerwasser aus dem Vorjahr versickert. Da die Niederschläge des Jahres 1999 relativ gering waren, wurde die Bodenfeuchte stärker ausgeschöpft, welches den niedrigen Bodenwassergehalt zum Ende des hydrologischen Jahres 1999 erklärt.

Die anhand der Ergebnisse der Klimamodelle synthetisch erzeugten Daten von Witterungsverläufen des Klimaszenarios zeigen folgendes Bild: Die Evapotranspiration folgt weitgehend den Niederschlagsraten, während die Sickerwasserrate auf ein sehr niedriges Niveau fällt. Für das Jahr 2052 wurde (stochastisch, d.h. bei zufälliger Wahl aus den möglichen Witterungsverläufen) ein feuchterer Witterungsverlauf angenommen, welcher zu einer leichten Anhebung des Bodenwasservorrates zum Ende des hydrologischen Jahres führt.

Aus diesen Berechnungen (Abb. 4.4-4) ist abzuleiten, dass sich unter den mittleren zukünftig zu erwartenden Klimaveränderungen die durch das Wasserdargebot bedingten Stresssituationen für Pflanzenbestände erhöhen könnten. Die Verdunstung gerade in den Wintermonaten, bedingt durch Temperaturerhöhung, wird wahrscheinlich ansteigen. Aus dem gesamten Ausmaß

der Verdunstungsänderung ist die Zunahme des Wassermangels für landwirtschaftliche Kulturpflanzen jedoch als eher moderat einzustufen. Daher dürften auch die negativen Konsequenzen für die Ertragsbildung unter mittleren Verhältnissen eher überschaubar bleiben. Entscheidend für die ökonomische Situation in der Landwirtschaft ist aber sicherlich die Häufigkeit des Auftretens von Extremwetterlagen, wie etwa 2003 (Sommertrockenheit) oder 2002 (niederschlagsbedingte Überschwemmungen). Die Häufung derartiger Extremjahre könnte zum eigentlichen Problem für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion werden.

Auswirkungen auf die Erträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen

Die Bodenqualität und insbesondere das Bodenwasserdargebot sind besonders in Jahren mit geringen Niederschlägen, aber auch in Jahren mit durchschnittlicher Witterung entscheidende Einflussgrößen für die Erträge, z.B. für Getreide. Für Silomais trifft das nicht gleichermaßen zu. Offensichtlich wird hier das Ertragsniveau sehr viel stärker von anderen Faktoren wie der Temperaturentwicklung und Niederschlagsverteilung in der Hauptwachstumsperiode beeinflusst.

Die Ertragschätzung unter zukünftig geänderten klimatischen Rahmenbedingungen berücksichtigt zu-

dem, wie eingangs dargestellt wurde, nicht den züchterischen Fortschritt und den daraus resultierenden zunehmenden Anbau stresstoleranterer Kulturpflanzensorten. Dies wird ebenso dazu beitragen, die negativen klimatischen Auswirkungen zu kompensieren. Der mittlere Ertragszuwachs an Getreide 1987–2001 lag bei etwa 1 dt/(ha×Jahr). Abweichungen von diesem Trend waren witterungsbedingt.

Wertet man die realen Erträge landwirtschaftlicher Kulturpflanzen statistisch aus, ergeben sich von Jahr zu Jahr erhebliche Schwankungen bzw. Spannweiten. Diese Ertragsschwankungen sind vor allem auf Wassermangel in der Vegetationsperiode zurückzuführen: Niederschläge geringer als 100 mm von April–Juni bedeuten deutliche Ertragsausfälle. Beispielsweise führte das extreme Trockenjahr 2000 mit Niederschlägen von nur 50 mm im Zeitraum April–Juni zu Ertragseinbußen von ca. 12 dt/ha bei Getreide.

Das Ertragsniveau ist in der Region gegenwärtig schon nicht sehr hoch. Dies gilt vor allem für Raps (Saatbettprobleme bei Trockenheit, höhere Ernteverluste aufgrund von Bodenheterogenität). In Einzeljahren mit günstiger Witterung kann bei Wintergetreide und vor allem bei Mais aber durchaus auch einmal ein hohes Ertragsniveau erreicht werden. Bodenheterogenität, zyklische Erschöpfungen des Bodenspeichers, kontinen-

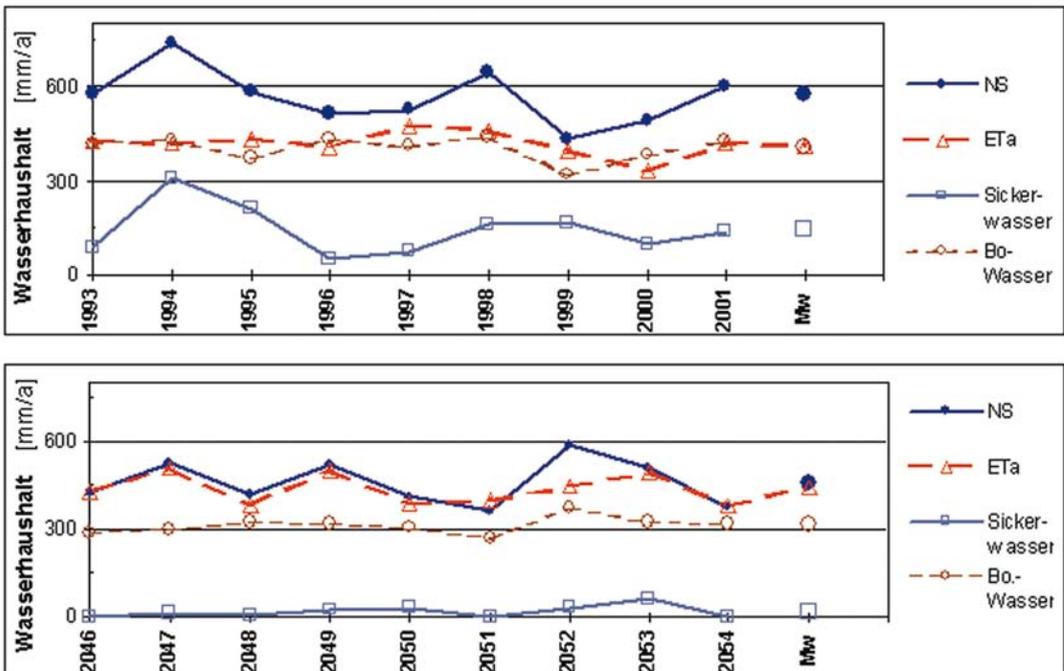


Abb. 4.4-4: Verlauf der Kenngrößen des Wasserhaushaltes für das Ist-Klima und das Klima-Szenario. (mit: NS = Niederschlag, Eta = berechnete Verdunstung, Bo.-Wasser = Wasservorrat des Bodens in 0–2 m Tiefe zum Ende des hydrologischen Jahres (31.10.), Mw = Mittelwert.)

taler Klimaeinfluss und Witterungsschwankungen sind eine wesentliche Ursache mangelnder Ertragsstabilität in der Region. Vernässung in Niederungsgebieten aufgrund überdurchschnittlicher Winterniederschläge und ungenügender Vorflut der Wasserregulierungssysteme sind ebenfalls wichtige ertragsmindernde Faktoren.

Das ZALF (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Müncheberg; www.zalf.de) hat für die regionale Ertragsschätzung einen Modellansatz entwickelt und durch Integration in das Spatial Analysis and Modeling Tool (SAMT) (WIELAND et al. 2004) zu einem raumbezogenen Simulationstool ausgebaut. Die mit Hilfe dieses Tools entwickelten Ertragsmodelle erlauben es, den Einfluss sich ändernder Witterungsverläufe auf den Ertrag zu untersuchen. Mit diesen Modellen für das Untersuchungsgebiet vorgenommene Berechnungen ergeben eine Ertragsdepression zwischen 14% bei Kartoffeln und ca. 5% bei den Hauptgetreidearten Gerste, Weizen, Roggen und Triticale. Unter Berücksichtigung der aus anderen Untersuchungen (etwa die sogenannten FACE-Experimente: free-air concentration enrichment) bekannten Wirkungen erhöhter CO₂-Konzentrationen sind die geschätzten Ertragsrückgänge bei allen Kulturen kleiner als 10% und vor allem bei den im Anbauumfang dominierenden Getreidearten marginal. Das heißt, dass letztlich die emissionsbedingte Erhöhung des CO₂-Gehaltes in der Atmosphäre eine Förderung des Pflanzenwachstums und eine effizientere Verwertung des Wasserangebotes mit sich bringt und zur Kompensation der Ertragseinbrüche beitragen kann. In Bezug auf Wirkung der CO₂-Konzentration der Atmosphäre auf viele Kulturpflanzen konnten in letzter Zeit zahlreiche Experimente und wertvolle Daten über Zusammenhänge zwischen

der CO₂-Konzentration und der temperaturabhängigen Reaktion der Kulturpflanzen gewonnen werden. Experimentell erfolgte dies an sonnenbeschienenen-kontrollierten Kammern, »Open-Top-Kammern«, Freiluft CO₂-Anreicherungs-Untersuchungen, (free-air CO₂ enrichment [FACE] studies) und in begrenztem Umfang, Phytotron Studien (BOOTE et al. 2011, HATFIELD et al. 2011, JONES et al. 2011).

Die räumliche Verteilung des klimabedingten Rückganges der Erträge auf dem Klimaniveau 2050 gegenüber dem Klimaniveau 2000 zeigt kleinräumig deutliche Unterschiede. So ist im Untersuchungsgebiet in Einflussbereichen des Oderbruchs mit den geringsten Ertragseinbußen zu rechnen, was mit der in diesem Auengebiet vorherrschenden besseren Grundwasserversorgung zu erklären ist. Die Ertragseinbußen liegen dort überwiegend nur im Bereich bis zu 5%. Auf den Ackerschlägen der Lebuser Platte hingegen sind die Einbußen höher und liegen in der Regel über 5% und teilweise über 10–15%.

Die Auswirkungen des lokal zu erwartenden Klimas für das Klimaniveau 2050 (PIK-Klimaszenarien) auf die Ertragsleistung landwirtschaftlicher Fruchtarten sind im Vergleich zur Ertragsleistung des Klimaniveaus 2000 auf den betrachteten repräsentativen Ackerschlägen für die wichtigsten im Untersuchungsgebiet angebauten Fruchtarten in der *Tab. 4.4-3* zusammengefasst. Dabei werden die Ertragsveränderungen, die bei sich nicht änderndem CO₂-Gehalt der Atmosphäre ermittelt wurden, den Ertragsveränderungen, die unter Berücksichtigung eines CO₂-Anstiegs der Atmosphäre bis auf 465 ppm im Jahre 2050 ermittelt wurden, gegenübergestellt. Bei der ertragswirksamen Berücksichtigung des CO₂-Einflusses wurde auf die für Wintergerste,

Tab. 4.4-3: Übersicht über die Auswirkungen der in 2050 in Märkisch-Oderland zu erwartenden lokalen Klimaänderung (PIK-Klimaszenarien) auf die Ertragsleistung im Vergleich zur Ertragsleistung des Klimaniveaus 2000, aufgeschlüsselt auf die hauptsächlich angebauten landwirtschaftlichen Fruchtarten (nach MIRSCHEL et al. 2007).

Fruchtart	Anbauanteil (%)	Durchschnitt ohne	Ertragsveränderung mit CO ₂ ⁺
Winterroggen	21,68	-5,53	-0,33
Winterweizen	19,26	-4,81	0,48
Silomais	9,57	-7,93	-2,87
Winterraps	7,13	-10,97	-6,07
Wintergerste	6,18	-4,77	0,47
Triticale	5,56	-4,44	0,10
Zuckerrüben	1,11	-9,05	-4,05
Luzerne	1,02	-11,68	-6,62
Sommergerste	0,99	-4,97	0,26
Sommerraps	0,58	-7,39	-2,30
Sommerweizen	0,41	-4,35	0,91
Klee gras	0,37	-13,1	-8,32
Hafer	0,30	-5,06	0,16
Kartoffeln	0,28	-14,14	-9,42

⁺(CO₂ in %) - Grundlage: Ertragswirksamer CO₂-Einfluss aus dem FACE-Experiment der FAL Braunschweig (gemittelt über Fruchtarten und Jahre), bezogen auf 465 ppm im Jahre 2050

Zuckerrüben, Winterweizen und Weidelgras im FACE-Experiment der FAL Braunschweig erzielten Messergebnisse unter Freilandbedingungen zurückgegriffen. Ausgehend von einer dabei für alle vier Fruchtarten durchschnittlich erzielten Ertragssteigerung von 10,7% bei einem CO₂-Anstieg von 375 ppm auf 550 ppm (WEIGEL et al. 2005) (s. Kap. 4.6 - WEIGEL et al. - in diesem Band) wurde der Einflussfaktor durch die Annahme einer linearen Änderung auf ein CO₂-Niveau von 465 ppm, mit dem im Jahr 2050 zu rechnen ist, umgerechnet.

Wird der positive CO₂-Einfluss auf die Ertragsbildung (»CO₂-Düngung«) nicht berücksichtigt, kommt es beim Klimaniveau 2050 bei allen betrachteten Fruchtarten im Vergleich zum Klimaniveau 2000 zu Ertragseinbußen. Diese schwanken zwischen 4,35% bei Sommerweizen und 14,14% bei Kartoffeln. Unter Berücksichtigung des CO₂-Effekts werden bei den angebauten Getreidearten die durch Temperatur- und Niederschlagsänderungen bedingten Ertragseinbußen wieder ausgeglichen. Bei Hackfrüchten, Silomais, Raps, Luzerne und Klee gras ist dies aber nicht der Fall und Ertragseinbußen sind wahrscheinlich.

Wirkung des Klimawandels auf die landschaftsökologische Funktion der Landnutzungssysteme

Wesentlich gravierender als auf die landwirtschaftlichen Erträge dürfte die Auswirkung des Rückganges der Grundwasserneubildung auf die Speisung der ökologisch wertvollen Feuchtgebiete sein. Die landwirtschaftliche Flächennutzung führt anders als die forstliche Nutzungsalternative augenblicklich zu nennenswerten Grundwasserneubildungsraten (EULENSTEIN et al. 2005b). Sie liefert aus der Sickerung und deren lateralem Abfluss die Speisung der zahlreichen in Brandenburg vorkommenden ökologischen Feuchtbiotope (Seen, Sölle, Moore und sonstige Niederungsgebiete). Sollte sich die Sickerwasserspense der landwirtschaftlichen Nutzflächen tatsächlich so entwickeln, wie es das Szenario hergibt, dann wird die ökologische Funktionsfähigkeit dieser Ökosysteme in Frage zu stellen sein.

Entsprechend der Klimaszenarien wird zunächst ein niedrigerer Stickstoffaustrag prognostiziert. Dies erklärt sich vor allem dadurch, dass infolge geringerer Sickerwasserraten Stickstoff und Schwefel nicht so schnell in den Untergrund verlagert werden und sich somit letztlich der Vorrat an diesen Stoffen in der oberen, 2 m tiefen Bodenschicht zunächst anreichert.

Die Modellierung, für die im Untersuchungsgebiet erhobenen und bilanzierten Schläge wurde mit den Modellen HERMES/SULFONIE von KERSEBAUM (1995) durchgeführt. In Abb. 4.4-5 und -6 sind neben den

Komponenten des Wasserhaushaltes, die Sulfat- und Nitratausträge aus der durchwurzelten Zone sowie deren Konzentrationen im Sickerwasser dargestellt. Die Stickstoffausträge streuen, mit Ausnahme des Peaks, zwischen 25 und 100 kg/ha und Jahr. Diese Abbildungen zeigen deutlich, wie der erhöhte Jahresniederschlag im Jahr 1994 zu einer erhöhten Sickerwasserrate und einem stark erhöhten Stoffaustrag, besonders für Stickstoff, führt. Da der Stoffaustrag stärker steigt als die Sickerwassermenge, führt dies zu einer hohen Nitratkonzentration von etwa 300 mg/l im Sickerwasser. Der erhöhte Niederschlag im Jahr 1998 führt zu einer Erhöhung der Sickerwasserspense, die sich auf die Jahre 1998 und 1999 verteilt. Infolgedessen fällt das Maximum des Stoffaustrages gering aus, bei den Konzentrationen ist kein eindeutiges Maximum mehr feststellbar.

Dieser Prozess dauerte während der Simulationszeit noch an. Späterhin ist mit einem drastischen Anstieg des Austrages zu rechnen, denn die akkumulierten Mengen an Stickstoff und Schwefel werden zeitverzögert in den tieferen Untergrund verlagert. Die dann steigenden Raten des Stoffaustrages können dabei zu erhöhten Nitratkonzentrationen von bis zu 900 mg/l im Sickerwasser führen.

An dieser Stelle muss jedoch ausdrücklich betont werden, dass hier mit Hilfe des Modells Verhältnisse simuliert wurden, für die kaum Resultate aus realen Erhebungen vorliegen. Insbesondere für zukünftige Situationen können aber nur solche Modellrechnungen verwendet werden, um belastbare und datengestützte Erkenntnisse zu erhalten. Aussagen darüber, ob die Abschätzungen aus der Simulation auch tatsächlich eintreffen werden, können daher erst nach der Durchführung entsprechender systematischer Untersuchungen gemacht werden. Das betrifft insbesondere die Prozesse der heterotrophen und der autotrophen Denitrifikation unterhalb der Krume in der ungesättigten Bodenzone oberhalb des Grundwassers, da diese für die Reduktion des Nitrats zu molekularem Stickstoff auf quartären und tertiären, pyrithaltigen Substraten, wie sie in der Beispielsregion typisch sind, eine entscheidende Rolle spielen.

Neben dem rein quantitativen Effekt der Reduktion der Grundwasserneubildung ist sehr deutlich auch der qualitative Aspekt in den Fokus der Betrachtung zu stellen. Unter der Berücksichtigung der Tatsache, dass die landwirtschaftliche Flächennutzung aus ihrem Abfluss nicht nur Grundwasserleiter, sondern auch ökologisch wertvolle Feuchtgebiete speist, ist zu erwarten, dass diese oligotrophen (und damit naturnäheren) Standorte in erheblichen Umfängen der Gefahr der Eutrophierung ausgesetzt sein können.

Auswirkungen auf die Weltmärkte für Agrarprodukte und die zu erwartenden Rückkopplungen auf die mitteleuropäische Landwirtschaft

Die bisher bekannten und allgemein gültigen Einflüsse auf die Landwirtschaft wandeln sich in den nächsten Jahren erheblich. Neben einem prognostizierten Klimawandel beeinflussen insbesondere die ökonomischen Rahmenbedingungen in hohem Maße, wie Landwirte die strategisch-langfristigen, aber auch die kurzfristigen Entscheidungen für ihre Betriebe bzw. die Produktion treffen. Dieses Entscheidungsverhalten wird dabei neben dem technischen Fortschritt und neuen Märkten vorrangig durch die agrarpolitischen und gesellschaft-

lichen Vorgaben vorgeprägt.

Dazu zählen neben einer erheblich zunehmenden Bedeutung von Marktmechanismen:

- Abnahme der Agrarhandelspolitik bzw. der Markt- und Preispolitik und
- zunehmende Umwelt-, Tierschutz- und Verbraucherpolitik bei gleichzeitiger
- Intensivierung der Produktionsverfahren infolge weltweit steigender Nachfrage und Preise.

Betrachtet man die sich global abzeichnenden Klimaänderungen, so wird deutlich, dass andere bislang intensiv genutzte Agrarregionen durch steigende Temperaturen und sinkende Niederschlagsmengen wesentlich

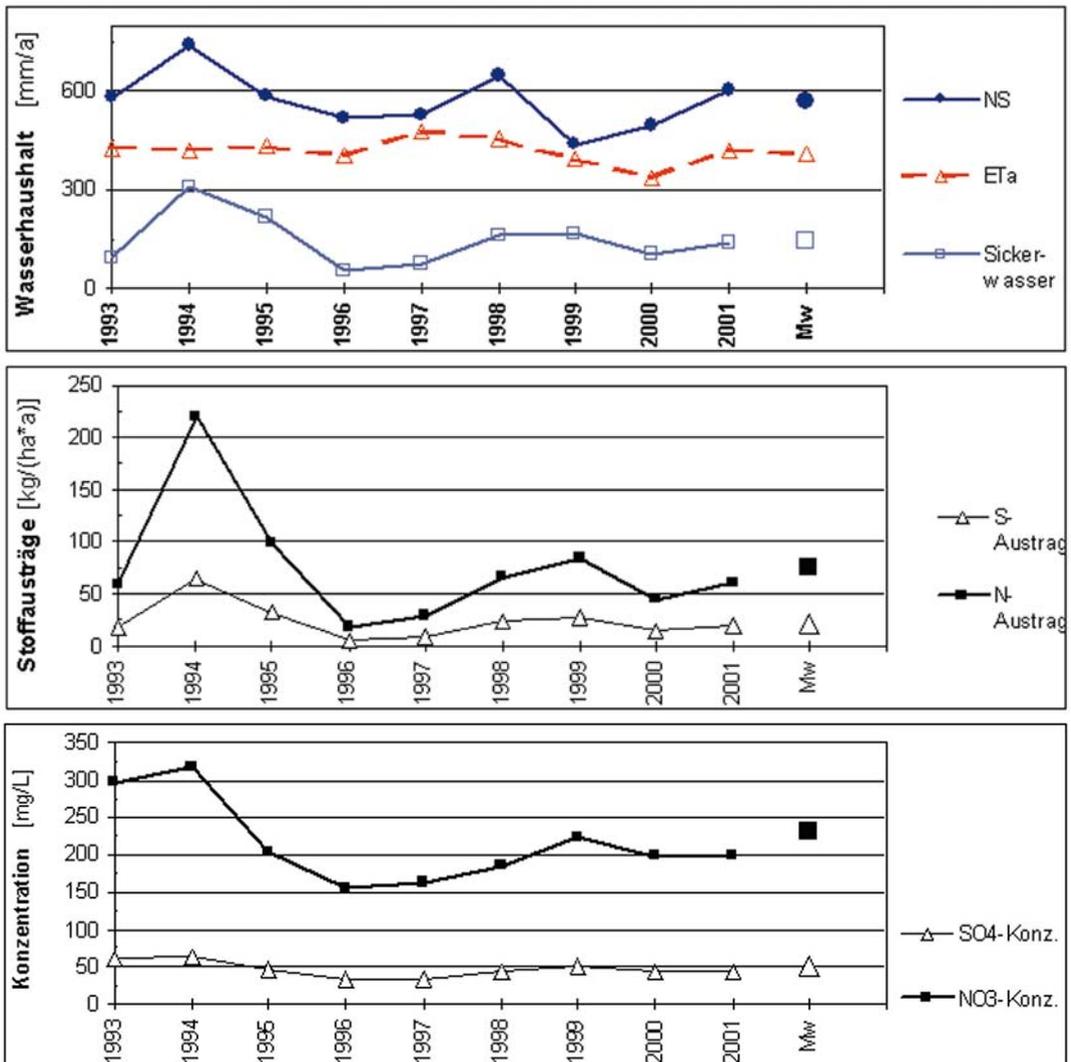


Abb. 4.4-5: Verlauf der simulativ berechneten Stoffausträge und Konzentrationen für die Periode 1993-2001 des Ist-Klimas.

gravierender vom Klimawandel betroffen sein werden als Mitteleuropa. Das Angebot an Agrarerzeugnissen aus den betroffenen Regionen, wie z.B. dem mediterranen Raum, dem Balkan, der Ukraine, aber auch Australien und dem mittleren Westen der USA wird aus diesem Grunde nicht wesentlich erweitert werden können. Auf der anderen Seite gibt es, wie jüngere Studien zeigen, durchaus Gunstlagen wie beispielweise in Südbrasilien. LANA (2013) konnte durch Ertragssimulationen für Mais und Sojabohne zeigen, dass bei richtiger Sortenwahl keine nennenswerten Ertragseinbußen unter den Bedingungen des zukünftigen Klimawandels zu erwarten sind. Ähnliches gilt im Gegensatz zu Australien auch für Neuseeland.

Bei steigender Nachfrage werden bei konstantem oder sinkendem Angebot die Preise steigen und damit die Einkommen der Landwirte. Die bisherige Einkommenssituation der landwirtschaftlichen Betriebe in Deutschland ist oft recht unzulänglich, gelegentlich ruinös. Die Aussichten auf höhere Preise für die Produkte der Landwirte sind deshalb aus Sicht des Erhaltes der Betriebe deshalb grundsätzlich positiv zu sehen. Als Folge der Angebotsverknappung und Energiepreissteigerungen werden auch Futtermittel, Dünger und Treibstoffe teurer und damit die Kosten der landwirtschaftlichen Produktion höher. Steigende Erlöse aufgrund steigender Marktpreise für landwirtschaftliche Produkte werden somit durch den steigenden Kosten-

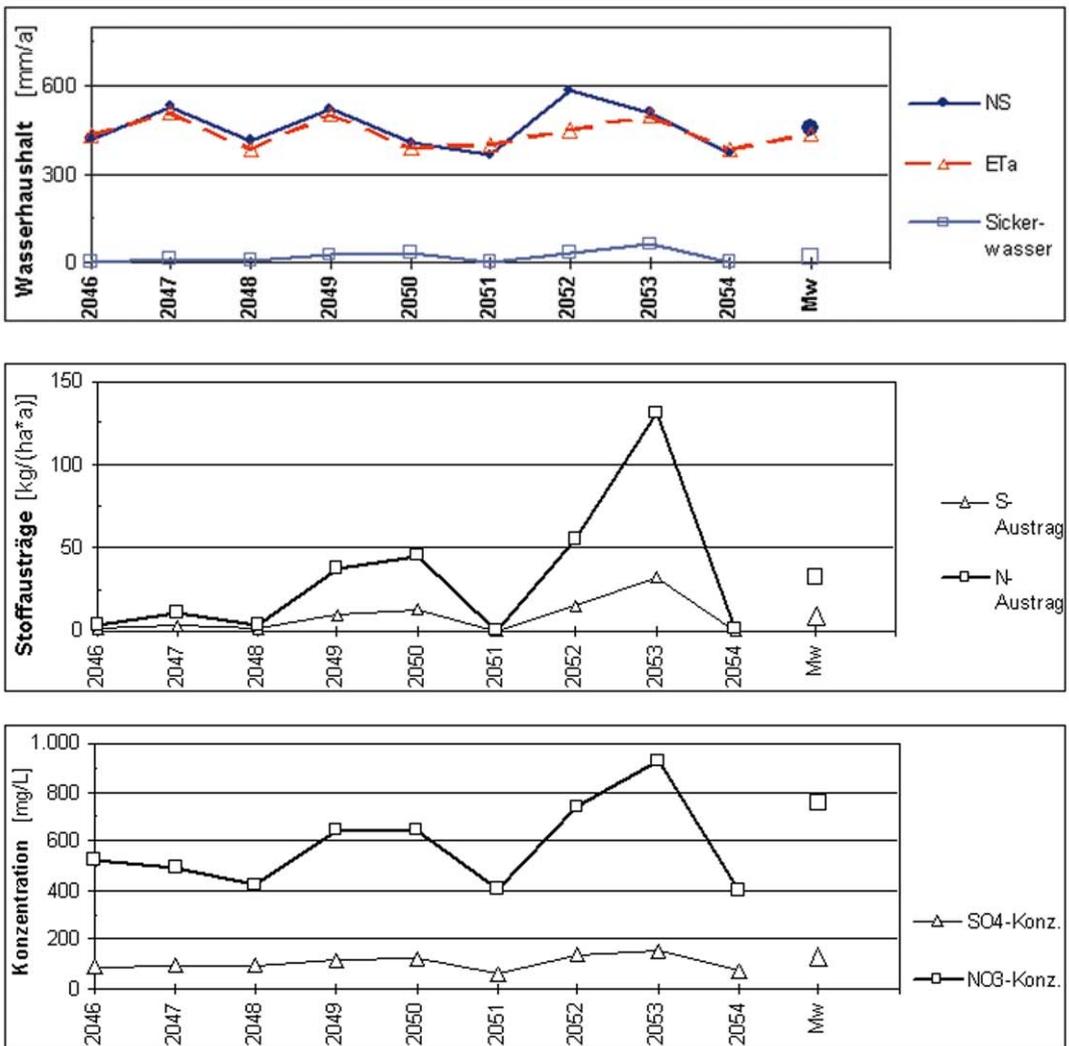


Abb. 4.4-6: Potenzieller Verlauf der simulativ berechneten Stoffausträge und Konzentrationen für die Periode 2046-2054 des Klimaszenarios.

druck teilweise kompensiert. Steigende Variabilität des Klimas führen zu höheren Unsicherheiten in der Produktion, die sich in größeren Risiken / Ausfällen und damit höheren Kosten ausprägen werden. Dennoch ist aufgrund der hohen Produktivität der Agrarstandorte in Mitteleuropa sowie dem oft sehr guten, flexiblen Management der landwirtschaftlichen Betriebe zu erwarten, dass die überwiegende Zahl an Agrarflächen in Mitteleuropa bis auf einige Grenzstandorte auch zukünftig landwirtschaftlich genutzt werden.

Die als alternative Produktion gepriesene Nutzung von pflanzlicher Biomasse für Energienutzung basiert in ihrer aktuellen stürmischen Entwicklung auf niedrigen Preisen für die Agrarprodukte in den letzten Jahren bis Mitte 2006. Nach ISERMAYER & ZIMMER (2007) werden sich diese Preise aber aufgrund der Flächen- und Ressourcenkonkurrenz an die Entwicklung des Erdölpreises anlehnen. Steigt dieser, steigen auch die Preise für Agrarprodukte auf dem Weltmarkt. Dies beeinträchtigt die Planungssicherheit für die Landwirte insbesondere bei den nachwachsenden Rohstoffen und Energieträgern erheblich. Die Ausrichtung der deutschen Politik auf einen Schwerpunkt an Biomasse und Bioenergie ist deshalb für die nächsten 10–15 Jahren kritisch zu diskutieren. Mit Recht fragen deshalb u.a. ISERMAYER & ZIMMER (2006), ob dann »... festgestellt wird, dass der Standortvorteil Deutschlands in einer liberalisierten Welt ausgerechnet nicht bei Biogas liegt?«.

Wenn man dann noch berücksichtigt, dass die Weltbevölkerung bis Mitte der 2030er Jahre von derzeit über 6 Mrd auf über 9 Mrd Menschen ansteigen wird, kann man erahnen, zu welcher Nachfragesteigerung es an Agrarprodukten kommen wird. Die FAO rechnet mit einer Steigerung der jährlichen Nachfrage um eine Milliarde Tonnen pflanzlicher Produkte bis Mitte der 2030er Jahre (Abb. 4.4-7). Der Anstieg der Weltbevölkerung um 32% bis zum Jahr 2050 wird ein machtvoller Faktor bei der Nahrungsmittelverteilung werden. Darüber hinaus wird die tägliche Energiezufuhr von derzeit 2.831 kcal (FAOSTAT 2013) auf 3.130 kcal in 2050 steigen.

Die Konkurrenz um Fläche zur landwirtschaftlichen Produktion von Biomasse für Ernährungszwecke, als Tierfutter, für Industrierohstoffe und als Energieträger sowie um verfügbare Wasserressourcen (bei Wasserrückhalt in der Landschaft für ökologische Funktionen, für Beregnung etc.) wird deshalb zunehmen. Abb. 4.4-8 verdeutlicht bereits den Trend des Preisanstieges für landwirtschaftliche Flächen in Deutschland.

Dieser Trend macht sich vor allem dort sichtbar, wo landwirtschaftliche Flächen auf dem Markt gehandelt werden. Dies ist durch die Veräußerung staatseigener Flächen in den neuen Bundesländern der Fall. Das Gleiche gilt für die Entwicklung der Pachtpreise für landwirtschaftliche Flächen (s. Abb. 4.4-9).

Der Klimawandel im weltweiten Maßstab wird die

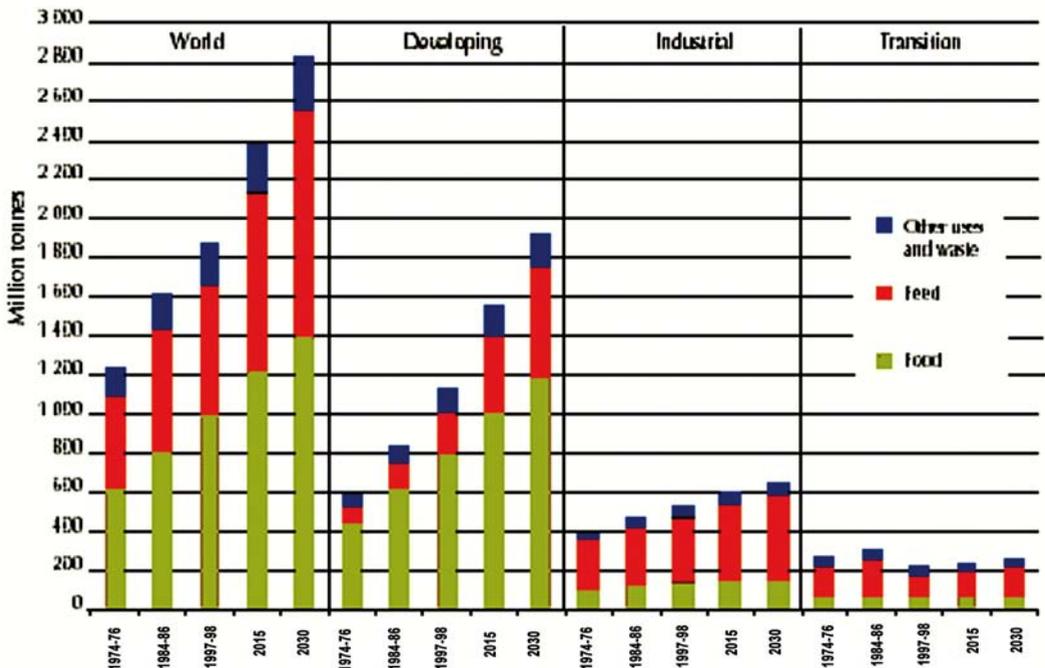


Abb. 4.4-7: Zusammenfassende Entwicklung des Verbrauchs pflanzlicher Erzeugnisse nach Verwendungskategorien. Titel: World Agriculture: Towards 2015/2030. An FAO Perspektive (FAO 2003).

landwirtschaftlichen Produktionsverfahren in Mitteleuropa intensivieren. Steigende Boden-, und Pachtpreise zwingen die Flächennutzer zur Gewinnoptimierung, wenn sie nicht Eigentümer sind und Pachten erwirt-

schaften oder Kredite zum Kauf der Flächen aufnehmen müssen. Extensive Nutzungsverfahren wie der »Ökologische Landbau« oder »extensive Mutterkuhhaltung« werden bei der Vergabe von Pachtflächen



Abb. 4.4-8: Kaufpreise (2000-2011) landwirtschaftlicher Grundstücke im Bundesgebiet (nach HAMMANN 2012) (Quelle: Statistischer Bundesamt).

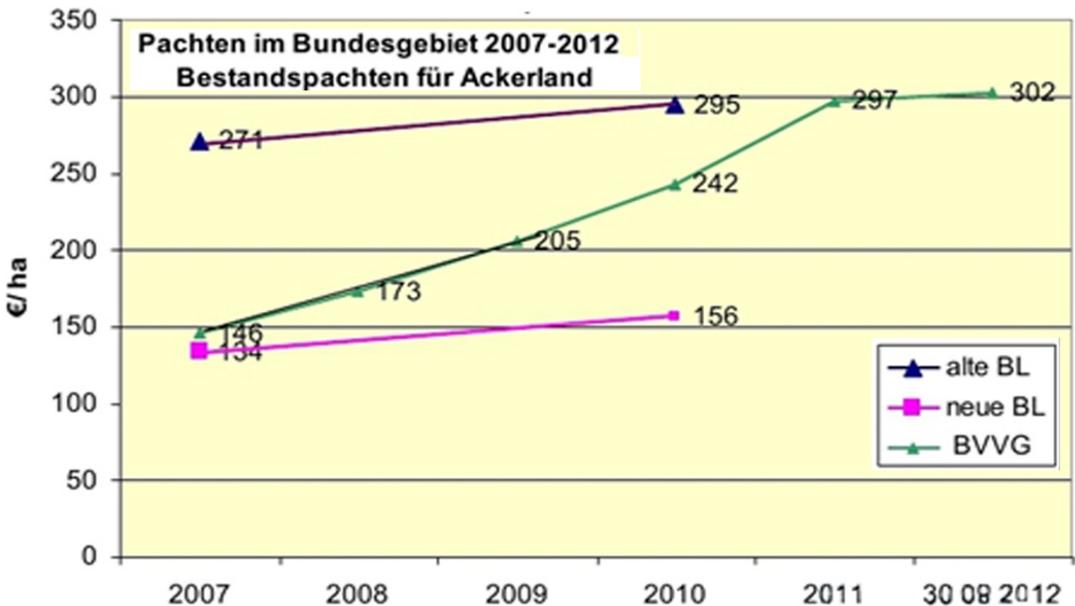


Abb. 4.4-9: Pachten im Bundesgebiet 2007-2012 (nach HAMMANN 2012). Quelle: Bodenmarkt 2012/2013 Nr.5, BVVG.

oder dem Neuerwerb landwirtschaftlicher Nutzflächen leider das »Nachsehen« haben gegenüber intensiven Veredelungsbetrieben oder/und gutgeführten »Biogasbetrieben«. Bei der zu erwartenden Intensivierung kommt es jedoch in größerem Maße darauf an, dass diejenigen Ansprüche ausreichend berücksichtigt werden, die der Handel und die Verarbeitung (Stichworte »Produktqualität« und »Rückverfolgbarkeit«) erwarten bzw. solche, die seitens der Gesellschaft (Stichwort »Multifunktionalität«) an die Pflanzenproduktion gestellt werden. Die Qualität des Produktionsprozesses selber steht somit zunehmend im Vordergrund und die Landwirte reagieren entsprechend. Ein Zurücksetzen der derzeit hohen Umweltstandards darf nicht erfolgen, obwohl hierzu die durch den Klimawandel bedingte Marktentwicklung eine Gefahr darstellt. Damit dies nicht geschieht, müssen in landwirtschaftlich geprägten Regionen zunehmend die ökologischen und sonstigen Ziele zur agrarischen Landnutzung festgesetzt und verbindlich umgesetzt werden.

Literatur

- BOOTE, K. J., ALLEN, L. H., PRASAD, P. V. V. & J. W. JONES (2011): Testing effects of climate change in crop models. In Handbook of Climate Change and Agroecosystems (Eds. D. Hillel & C. Rosenzweig). London: Imperial College Press.
- EULENSTEIN, F., J. OLEJNIK, M. WILLMS, B. H. CHOJNICKI, S. L. SCHLINDWEIN, U. SCHINDLER & L. MÜLLER (2005a): Possible effects of climate changes on land use in North Central Europe and consequences for land use planning. *Eisfora* 3 (1): 16-32.
- EULENSTEIN, F., J. OLEJNIK, M. WILLMS, B. H. CHOJNICKI & URBANIAK (2005b): The influence of land use on soil water balances under present and future conditions in North-Eastern Central Europe. - In: Integrated land and water resources management : towards sustainable rural development ; 15 -19 May 2005, Frankfurt (Oder), Germany and Slubice, Poland ; Proceedings ; 21st European Regional Conference of the International Commission on Irrigation and Drainage : 1-10; Münchenberg (ICID German Nat Comm.
- EULENSTEIN, F., J. OLEJNIK, M. WILLMS, U. SCHINDLER, B. H. CHOJNICKI & R. MEISSNER (2006): Mögliche Auswirkungen der Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt von Agrarlandschaften in Nord-Mitteleuropa. *Wasserwirtschaft* 96 (9): 32-36.
- FAO (2003): World Agriculture: Towards 2015/2030. An FAO perspective. Jelle Bruinsma (ed.). (ISBN: 9251048355), 444 pp.
- FAOSTAT (2013): FAOSTAT. Vol. 2013.
- GERSTENGARBE, F.-W., F. BADECK, F. HATTERMAN, V. KRYSANOVA, W. LAHMER, P. LASCH, M. STOCK, F. SUCKOW, F. WECHSUNG & P. C. WERNER (2003): Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2055 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK Report No. 83; Potsdam Institut für Klimafolgenforschung, 92 S.
- HAMMANN, D. (2012): Bodenmarkt: aktuelle Entwicklung aus Sicht der BVVG. 7. DKB-Elitforum Landwirtschaft 2012. Vortrag 17.-19. Oktober 2012. Schloss & Gut Liebenberg.
- HATFIELD, J. L., BOOTE, K. J., KIMBALLI, B. A., ZISKA, L. H., IZAURRALDE, R. C., ORT, D., THOMSEN, A. M. & D. WOLFE (2011): Climate impacts on agriculture: Implications for crop production. *Agronomy Journal* 103(2): 351-370.
- ISERMEYER, F. & Y. ZIMMER (2006): Thesen zur Bioenergiepolitik in Deutschland. Braunschweig : FAL, I, Arbeitsberichte des Bereichs Agrarökonomie 2006/02. 28 S.
- ISERMEYER, F. & Y. ZIMMER (2007): Perspektiven der Förderung von Energie aus Biomasse. *Agrarspectrum*, Band 40, 41-45.
- JONES, J. W., BARTELS, W. L., FRAISSE, C., BOOTE, K. J., INGRAM, K. T. & G. HOOGENBOOM (2011): Use of Crop Models for Climate-Agricultural Decisions. In Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation (Eds. D. Hillel and C. Rosenzweig). Imperial College Press.
- KERSEBAUM, K. C. (1995): Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecological modelling* 81: 145-156.
- LANA, M. A. (2013): Regionalization of climate change impacts and adaptation strategies for maize in Santa Catarina State, Brazil. Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades Abteilung Acker- und Pflanzenbau der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel.
- MIRSCHER, W., EULENSTEIN, F., WILLMS, M., WIELAND, R., SCHINDLER, U. & K.-O. WENKEL (2007): Model-based climate change impact assessment for arable land in a moraine landscape of North-East Germany and adaptation possibilities. In: EFITA/WCCA 2007: Proceedings of the 6th Biennial Conference of the European Federation of IT in Agriculture; Glasgow, 2-5 July 2007 Glasgow Caledonian University, Glasgow, 1-6.
- MÜLLER, L., A. BEHRENDT, G. SCHALITZ & U. SCHINDLER (2004): Water Use Efficiency of Crops at Shallow Water Tables in a Temperate Climate. Proceedings of the 8th International Drainage Symposium Sacramento, USA, 409-418.
- ROTH, D., R. GÜNTHER & S. KNOBLAUCH (1997): Wasserbilanz sowie Wasserverbrauch und Bodenwassererschöpfung landwirtschaftlicher Fruchtarten auf einem tiefgründigen Lössstandort. *Agribiol. Res.* 50 (3): 271-278.
- SCHINDLER, U., M. WOLFF & G. KÜHN (2001): Lysimeterstudie zum Einfluss von Düngung und Bewirtschaftung auf die Ertragsbildung, den Wasserhaushalt und die Nährstoffauswaschung im Trockengebiet der Uckermark. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, (164): 697-703.
- SCHINDLER, U., J. STEIDL, L. MÜLLER, F. EULENSTEIN & J. THIÈRE (2007): Drought risk to agricultural land in Northeast and Central Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 170 (3): 357-362.
- UMWELTBUNDESAMT (UBA) (2007): Hintergrundpapier „Neue Ergebnisse zu Klimaänderungen“. <http://www.umweltbundesamt.de/uba-info-presse/hintergrund/Regionale-Klimaänderungen.pdf>.
- WALTER, H. & H. LIETH (1967): Klimadiagramm-Weltatlas. Fischer, Jena, 253 S.
- WEIGEL, H.-J., R. MANDERSCHIED, A. PACHOLSKI, S. BURKHART & G. JANSEN (2005): Mehr CO₂ in der Atmosphäre: Prima Klima für die Landwirtschaft? In: Forschungsreport (Zeitschrift des Senats der Bundesforschungsanstalten), 1/2005, 14-17.
- WIELAND, R., W. MIRSCHER, K.-O. WENKEL & I. AJIBEFUN (2004): Räumliche Simulation mit SAMT. In: Wittmann, J.; Wieland, R. [Hrsg.]: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften -Workshop Münchenberg 2004, (Berichte aus der Umweltinformatik), Shaker Verlag Aachen, 161-181.
- WIGGERING, H., F. EULENSTEIN & J. AUGUSTIN [Hrsg.] (2005): Entwicklung eines integrierten Klimashutzmanagements für Brandenburg : Handlungsfeld Landwirtschaft ; (DS 3/6821-B). Münchenberg (Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung, 76 S.

Kontakt:

Prof. Dr. Frank Eulenstein
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.
Münchenberg - eule@zal.f.de

Dr. Andreas Fischer
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.
Münchenberg - info@schafe-fischer.de

Dr. Armin Werner
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.
Münchenberg

Eulenstein, F., A. Werner & A. Fischer (2014): Konsequenzen für landwirtschaftliche Produktion und Landschaftsökologie. In: Ložán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffent. (Kap. 4.4) - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.