

Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion - dargestellt am Beispiel dreier bayerischer Standorte

Markus Gandorfer, Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan

K. Christian Kersebaum, Institut für Landschaftssystemanalyse, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Müncheberg

Die vorliegende Studie beschäftigt sich mit den Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion an drei ausgewählten bayerischen Standorten. Zur Analyse der Auswirkungen möglicher klimatischer Veränderungen auf Naturalerträge bei verschiedenen Stickstoffintensitäten kommt das Pflanzenwachstumsmodell *Hermes* zur Anwendung. Die Analysen beziehen sich auf Klimaszenarien des ECHAM5-Modells, basierend auf dem Treibhausgas-Emissionsszenario A1B. Die so geschaffene Datengrundlage dient zur Schätzung jährlicher Stickstoffproduktionsfunktionen. Die ökonomische Bewertung findet schließlich auf Basis der Erwartungswerte und Standardabweichungen der Deckungsbeiträge sowie der Analyse der kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Deckungsbeiträge statt. Weiterhin werden für die verschiedenen Szenarien Sicherheitsäquivalente und Risikoprämien geschätzt. Die Ergebnisse zeigen, dass an den Standorten Metten und Weihenstephan zukünftig mit Einbussen beim mittleren Deckungsbeitrag sowie mit einem wesentlich höheren Produktionsrisiko gerechnet werden muss. Weiterhin kann für diese Standorte gezeigt werden, dass die Zahlungsbereitschaft für Versicherungsinstrumente ansteigen wird. Am Standort Hof zeigt sich dagegen eine wesentlich stabilere Situation, da sich hier höhere Temperaturen durchaus positiv auf die Weizenproduktion auswirken werden. Technischer Fortschritt und höhere CO₂-Konzentration werden zusätzlich dazu beitragen, dass der Standort Hof vom Klimawandel profitieren könnte.

Markus Gandorfer und K. Christian Kersebaum: Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionsrisiko in der Weizenproduktion - dargestellt am Beispiel dreier bayerischer Standorte. *Yearbook of Socioeconomics in Agriculture* 2008, 161-182

Wie sich diese Aspekte jedoch auf die untersuchten Standorte im Detail auswirken werden, bleibt zu untersuchen.

Schlüsselwörter: Klimawandel, Winterweizen, Risikoanalyse, Pflanzenwachstumsmodell

1. Einleitung

Zu den prognostizierten Folgen des Klimawandels in Deutschland gehören eine Zunahme von Niederschlägen im Winter sowie eine Abnahme der Niederschläge im Sommer mit oft ungünstigen Verteilungen und Starkregenereignissen. Zusätzlich ist mit einer Zunahme extremer Wetterereignisse zu rechnen. Diese Entwicklungen können das ökonomische Risiko im Ackerbau in Abhängigkeit von den Standortvoraussetzungen signifikant erhöhen. Verschiedene Studien (ALCAMO ET AL. 2007, ALEXANDROV ET AL. 2002) zeigen, dass die mittleren Auswirkungen des Klimawandels auf den Ackerbau in Nord- und Mitteleuropa tendenziell positiv zu sein scheinen, wohingegen in Südeuropa eher mit negativen Konsequenzen zu rechnen ist. Auch die speziell für Deutschland verfügbaren Studien (ZEBITSCH ET AL. 2005, SCHALLER und WEIGEL 2008) zeigen im Durchschnitt mittelfristig positive Auswirkungen des Klimawandels im Nord-Westen, wohingegen die Situation im Süd-Osten eher stabil und im Nord-Osten und Süd-Westen eher negativ für die Pflanzenproduktion sein wird. Diese für größere Gebiete oder sogar im globalen Maßstab durchschnittliche Betrachtung von Klimafolgen ist beispielsweise für Aussagen bezüglich der Nahrungsmittelsicherheit von größter Bedeutung. Stehen jedoch einzelbetriebliche Auswirkungen des Klimawandels sowie mögliche betriebliche Anpassungsoptionen im Zentrum des Interesses, so ist eine kleinräumigere Betrachtung angebracht. Denn es ist durchaus möglich, dass es trotz des insgesamt leicht positiven Trends auch Verlierer-Regionen innerhalb des untersuchten Gebiets gibt. Um für diese Bereiche auf Betriebsebene Anpassungsstrategien ableiten zu können ist es notwendig, diese zum einen zu identifizieren und zum anderen die jeweiligen Auswirkungen abzuschätzen.

Das Ziel des Beitrags besteht daher darin, die Auswirkungen des Klimawandels anhand der Leitkultur Winterweizen auf das ökonomische Risiko im Ackerbau an verschiedenen bayerischen Standorten zu

analysieren und zu diskutieren. Es soll geklärt werden, wie sich unterschiedliche Klimaszenarien auf das Ertragsrisiko und das daraus resultierende ökonomische Risiko aus einzelbetrieblicher Sicht auswirken. Ziel der Studie ist ebenfalls, Veränderungen der Zahlungsbereitschaft für Versicherungen auf Grund der klimatischen Veränderungen zu analysieren.

2. Datengrundlage und methodisches Vorgehen

Die gewählte Vorgehensweise für diese Studie besteht darin, die Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien auf das Ertragspotenzial sowie die Ertragsunsicherheit hinsichtlich der klimatischen und standörtlichen Produktionsbedingungen abzuschätzen, und zwar anhand von drei unterschiedlichen Referenzstandorten in Bayern. Der Versuchsstandort Weihenstephan liegt in Mitten des Tertiärhügellands, das durch ein mittleres Ertragspotenzial gekennzeichnet ist. Bei Metten handelt es sich um einen Standort mit hohem Ertragspotenzial, wohingegen der Standort Hof als ertragsschwächer im Vergleich zu den beiden anderen Standorten zu charakterisieren ist. Die verwendeten Klimaszenarien stammen aus den mit dem Modell WETTREG (SPEKAT ET AL. 2007) regionalisierten Datensätzen des Umweltbundesamtes. Die beschriebenen Klimaszenarien beinhalten alle notwendigen Klimaparameter in täglicher Auflösung, die zur Modellierung von Naturalerträgen für verschiedene Stickstoffintensitäten mit dem Pflanzenwachstumsmodell HERMES (KERSEBAUM 1995) notwendig sind. Die so geschaffene Datengrundlage wird mit Hilfe von Produktionsfunktionsanalysen sowie risikoanalytischen Methoden vergleichend für die drei Referenzstandorte ausgewertet.

2.1 Datengrundlage

2.1.1 Klimaszenarien

Als Treibhausgas-Emissionsszenario wurde das A1B (NAKICENOVIC ET AL. 2000) ausgewählt. Weiterhin werden die auf diesem Szenario basierende Simulation des Globalen Klimamodells ECHAM5 bis zum Jahr 2100 für die Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes

betrachtet. Die Daten des globalen Klimamodells wurden für die Klimastationen des Deutschen Wetterdienstes mit Hilfe des WETTREG Verfahrens (SPEKAT ET AL. 2007) räumlich und zeitlich höher aufgelöst. Dabei handelt es sich um die statistische Abbildung von Wetterlagenabfolgen für die einzelnen Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes in Deutschland. Die verwendeten simulierten Datenreihen für das Referenzszenarium der Jahre 1970-1989 wurden anstelle der Messdaten für diesen Zeitraum verwendet, um einen entsprechenden Modellfehler für die vergangene Periode im Vergleich zur Zukunftsprognose zu gewährleisten. Als zukünftige Periode wurde ein Zeitraum von 2031-2050 gewählt. Beide Zeiträume, im Folgenden auch als Zeitscheiben bezeichnet, wurden in mehreren sogenannten Realisationen simuliert. Für unsere Berechnungen wurden eine sogenannte Normalrealisation sowie jeweils eine feuchtere und eine trockenere Realisation verwendet, die sich aus den unterschiedlichen statistisch generierten Wetterlagenabfolgen ergeben.

2.1.2 Standortparameter

Aus unterschiedlichen Bodenkarten für Bayern wurden für die drei Standorte Bodenprofile definiert, die als repräsentativ für die jeweilige Region angenommen wurden. Tabelle 1 zeigt einige wesentliche Bodencharakteristika, die der Simulation zugrunde gelegt wurden.

Tab. 1: Übersicht über die bei der Simulation zugrundegelegten Bodeneigenschaften

Standort	Corg [%]	Bodenart	FKWe [mm]	nFKWe [mm]
Weihenstephan	1,2	LU	399	183
Metten	1,0	LS2	398	204
Hof	0,6	SL4/LS4	346	192

Corg = organischer Kohlenstoffgehalt, Bodenart nach bodenkundlicher Kartieranleitung, FKWe = Feldkapazität im effektiven Wurzelraum, nFKWe = nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum

2.2 Methodisches Vorgehen

2.2.1 Modellierung mit dem Pflanzenwachstumsmodell Hermes

Zur Simulation der Stickstoffdynamik und des Pflanzenwachstums wurde das Modell HERMES (KERSEBAUM 1995) verwendet. Das Modell beschreibt auf der Basis täglicher Witterungsdaten (Niederschlag, Temperatur, Einstrahlung, Sättigungsdefizit der Luft) den Wasserhaushalt des Bodens, die Netto-N-Mineralisation von organischer Bodensubstanz und eingebrachten Pflanzenresiduen, die Denitrifikation, den Transport von Nitrat in der Bodenlösung sowie das Wachstum und die N-Aufnahme durch Pflanzen. Das Modell differenziert den Boden in 10 cm dicke Bodenkompartimente, für die jeweils Wasser- und Stickstoffgehalte zu jedem Zeitschritt aus den Witterungsdaten und den oben genannten Prozessen berechnet werden. Die Umsetzungsprozesse Mineralisation und Denitrifikation werden überwiegend durch die Temperatur und die Bodenfeuchte gesteuert. Die Verlagerung von Nitrat wird mit dem Bodenwasserfluss mit Hilfe einer Konvektions-Dispersionsgleichung beschrieben. Das Pflanzenwachstumsmodell simuliert auf der Basis von Sonneneinstrahlung und Temperatur die tägliche Nettotrockenmassebildung aus Photosynthese abzüglich Atmungsverlusten. Parallel wird die Pflanzenentwicklung durch Temperatursummen, modifiziert um eventuelle Einflüsse der Tageslänge und der Erfüllung des Vernalisationsanspruchs, simuliert. Die gebildete Trockenmasse wird in Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der Pflanze auf die unterschiedlichen Pflanzenorgane verteilt. Der Ertrag ergibt sich aus der in der jeweiligen Periode in die Ähre verlagerten Trockenmasse. Auch Wurzeltiefe und -verteilung wird über die Entwicklung gesteuert und bestimmt die Aufnahme von Wasser und Stickstoff aus den einzelnen Bodenkompartimenten. Steht Wasser und Stickstoff nicht in ausreichendem Maße in der Wurzelzone zur Verfügung, wird das Wachstum mittels Stressfunktionen bei Unterschreiten einer entwicklungsabhängigen kritischen N-Konzentration in der Pflanze reduziert. Dabei können ober- und unterirdisches Wachstum unterschiedlich reduziert werden. Zeitweiliger Luftmangel durch Staunässe wird ebenfalls als Stressfaktor in Anlehnung an SUPIT ET AL. (1994) berücksichtigt. Für die Berechnung der Verdunstung wurde das Turc-Wendling Verfahren (WENDLING ET AL. 1991) verwendet, das als eine von mehreren

Verdunstungsformeln im Modell integriert ist. Detailliertere Darstellungen des Modellansatzes finden sich bei KERSEBAUM (1995) und KERSEBAUM (2007).

Für die Simulation wurde ein Düngungsschema für Winterweizen mit einer Gesamtgabe von 258 kg N ha^{-1} , aufgeteilt in 4 Gaben, zugrunde gelegt. Basierend auf diesem Düngungsschema wurde die Düngungsmenge in 18 Schritten um jeweils 5 % gesenkt, um auf diese Weise die Reaktion des Pflanzenwachstums auf unterschiedliche Mangelsituationen abbilden zu können. Diese Düngungsvarianten wurden für die beiden Vergleichszeiträume 1970-1989 und 2031-2050 mit den jeweils drei Realisationen simuliert. Aus den Modellergebnissen lassen sich sowohl die Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge bei optimalen Bedingungen als auch die jeweilig notwendige N-Düngungsmenge ableiten. Darüber hinaus wären auch Aussagen zu den korrespondierenden ökologischen Kenngrößen, wie z. B. die Veränderung der Grundwasserneubildung sowie des Nitrataustrages aus der Wurzelzone möglich, die jedoch im Rahmen dieses Beitrags nicht diskutiert werden.

2.2.2 Produktionsfunktionsanalysen, Deckungsbeitragsrechnung und optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung

Aus der auf Basis der mit dem Pflanzenwachstumsmodell Hermes geschaffenen Datengrundlage werden jährlich Stickstoffproduktionsfunktionen für die verschiedenen Standorte sowie Zeitscheiben geschätzt. Zur Schätzung der jährlichen Produktionsfunktionen werden die modellierten Weizenerträge für 19 Stickstoffintensitäten herangezogen (vgl. Abschnitt 2.2.1). Gleichung (1) zeigt den Naturalertrag von Winterweizen im Jahr j als Funktion F_j der Stickstoffdüngintensität N_j . Bei $F_j(N_j)$ handelt es sich um eine quadratisch-plateau Stickstoff-Produktionsfunktion, die für jedes der zwanzig Jahre des Ist-Szenarios und der drei Zukunfts-Szenarien geschätzt werden.

$$F_j(N_j) = \begin{cases} a_j + b_j N_j + c_j N_j^2 & \text{für } N_j \leq N_{j \max} = -\frac{b_j}{2c_j} \\ a_j + b_j N_{j \max} + c_j N_{j \max}^2 & \text{für } N_j > N_{j \max} \end{cases} \quad (1)$$

a_j , b_j sowie c_j stellen die geschätzten Regressionsparameter der Stickstoffproduktionsfunktion im Jahr j dar, wobei $c_j < 0$ und $b_j > 0$ ist. Die Wahl des quadratisch-plateau Modells erfolgte aufgrund eines Vergleichs zwischen diesem und einer quadratischen Produktionsfunktion mit Hilfe des Akaike's Criterion (AIC). Die einzelnen Ergebnisse zeigen, dass das quadratisch-plateau-Modell überwiegend zu bevorzugen ist. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da das Pflanzenwachstumsmodell *Hermes* keine Ertragsdepressionen (Lagergetreide) aufgrund zu hoher N-Intensitäten abbilden kann und somit ab einer bestimmten N-Intensität ein Ertragsplateau auftritt. Die detaillierten Ergebnisse dieses Vergleichs werden hier nicht näher dargestellt, da sie den Umfang des Beitrags übersteigen würden.

In Gleichung (2) wird die Kalkulation des Deckungsbeitrages im Jahr j als Funktion der Stickstoffdüngintensität auf Basis der in (1) beschriebenen Produktionsfunktion dargestellt.

$$DB_j(N_j) = F_j(N_j) \cdot P_w - P_N \cdot N_j - VK_{Rest} \quad (2)$$

Dabei ist DB_j der Deckungsbeitrag im Jahr j , P_w der Preis von Winterweizen und P_N der Preis von Stickstoff. Der Stickstoffpreis in € kg^{-1} , der für diese Studie angenommen wird, beträgt 0.90 € kg^{-1} . Der Winterweizenpreis wird mit 20 € dt^{-1} veranschlagt. Es wird ein deterministischer Weizenpreis angenommen, da in dieser Studie die Unterschiede des witterungsbedingten Produktionsrisikos aufgrund der prognostizierten klimatischen Veränderungen isoliert betrachtet werden sollen. In der Realität sind zwar Erträge und Preise miteinander korreliert, das Ausmaß der Korrelation ist aber weniger durch die in dieser Studie betrachteten kleinräumigen jährlichen Ertragsschwankungen bedingt, sondern durch die globale Ertrags- und Nachfragesituation, wie die Ereignisse der letzten Jahre deutlich zeigen. VK_{Rest} sind die variablen Kosten der Weizenproduktion, jedoch ohne die Stickstoffdüngerkosten, da diese bereits berücksichtigt und an das jeweilige Ertragsniveau angepasst wurden. In Anlehnung an das für die Modellstandorte vorherrschende Intensitätsniveau unter Annahme einer mittleren Ertragserwartung werden für VK_{Rest} 580 €/ha angenommen (vgl. LfL 2008). Durch Differenzieren von (2) nach N_j erhält man für $N_j < N_{jmax}$ folgende Bedingung:

$$\frac{dDB_j(N_j)}{d(N_j)} = P_W(b_j + 2c_j N_j) - P_N \quad (3)$$

Die Bedingung erster Ordnung lautet dann wie in (4) beschrieben und zeigt die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung im Jahr j .

$$N_j = \frac{P_N \cdot P_W^{-1} - b_j}{2c_j} \quad (4)$$

Die im Rahmen dieses Beitrags aufgezeigten Natural- sowie Deckungsbeiträge sowie die darauf basierenden kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen sind immer für den Fall dargestellt, dass die Stickstoffdüngung im jährlichen Optimum stattfindet. Dieses Vorgehen erlaubt den Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Szenarien auf Basis einer einheitlichen Grundlage. Da die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung ex post bestimmt wird, spiegelt die gewählte Vorgehensweise jedoch nicht das vollständige Produktionsrisiko wider.

2.2.3 Sicherheitsäquivalente und Risikoprämien

Zur weiteren Analyse bedienen wir uns des Sicherheitsäquivalents sowie der Risikoprämie. Das Sicherheitsäquivalent kennzeichnet den sicheren Geldbetrag, den ein Entscheidungsträger mit gegebener Risikonutzenfunktion als gleichwertig zu einer Alternative mit unsicherem Ausgang ansieht (BERG 1997). Sicherheitsäquivalente sind für risikoaverse Entscheidungsträger immer kleiner als der Erwartungswert z. B. des Gewinns einer unsicheren Alternative (vgl. LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER 2003). Ist ein risikoaverser Entscheidungsträger mit verschiedenen Alternativen konfrontiert, so wählt er die mit dem höchsten Sicherheitsäquivalent. Die Risikoaversion des Entscheidungsträgers drückt sich in einer konkaven Risikonutzenfunktion aus. Zum Schätzen von Sicherheitsäquivalenten wird häufig eine Exponentialfunktion (vgl. BERG 1997) aufgrund der einfachen Handhabung verwendet. So verwenden beispielsweise LAMBERT und LOWENBERG-DEBOER (2003) folgende Risikonutzenfunktion $U(y)$, die wir auch in dieser Studie zugrundelegen:

$$U(y) = -e^{-\lambda y} \quad (5)$$

Dabei ist λ der absolute Arrow-Pratt Risikoaversionskoeffizient (vgl. MOSCHINI und HENNESSY 2001). Die mit der Annahme der in (5) beschriebenen Risikonutzenfunktion implizierte konstante absolute Risikoeinstellung bei variierendem Einkommensniveau wird grundsätzlich kritisch diskutiert, da es wahrscheinlicher ist, dass die Risikoaversion mit zunehmendem Einkommen sinkt (BERG 1997). Die Modellkalkulationen werden daher für verschiedene λ dargestellt, um die Sensitivität für diese Annahme zu prüfen.

Das auf der Pratt'schen Approximation basierende Sicherheitsäquivalent (SA) kann nach ROBISON und BARRY (1987) für normalverteilte DB , sowie der in (5) beschriebenen Risikonutzenfunktion folgendermaßen geschätzt werden:

$$SA(DB) = E(DB) - 0,5 \lambda \sigma^2(DB) \quad (6)$$

Wobei $E(DB)$ der Erwartungswert einer Handlungsalternative ist und $\sigma^2(DB)$ deren Varianz darstellt. $E(DB)$ wird aus dem Mittelwert der DB_j für jedes Ist- und Zukunfts-Szenario berechnet. Die Varianz DB wird ebenfalls aus den DB_j für jede Zeitscheibe bzw. Szenario geschätzt. Zum Test auf Abweichung von der Normalverteilung wird der zu diesem Zweck in der Statistiksoftware PRISM® implementierte Kolmogorov-Smirnov-Test verwendet (MOTULSKY 1999). Die Erwartungswerte der Deckungsbeiträge werden im Rahmen dieser Studie immer für den Fall dargestellt, dass in jedem Jahr die jeweilige optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung ausgebracht wird. Der Bezug auf die optimale spezielle Intensität ermöglicht eine einheitliche Vergleichsgrundlage. Die Risikoprämie π ergibt sich aus der Differenz von Erwartungswert und Sicherheitsäquivalent. Sie spiegelt den erforderlichen Kompensationsbetrag für die Übernahme des Risikos wider.

$$\Pi(DB) = E(DB) - SA(DB) \quad (7)$$

Die Risikoprämie π ist für einen risikoaversen Entscheidungsträger positiv (vgl. BERG 1997). Weiterhin kennzeichnet sie für einen risikoaversen Entscheidungsträger die Zahlungsbereitschaft zur Versicherung des Erwartungswertes einer mit Risiko behafteten Handlungsmöglichkeit.

3. Ergebnisse

3.1 Veränderung pflanzenbaulich relevanter Klimagrößen

Am Standort Hof nehmen gegenüber dem Referenzzeitraum die jährlichen Niederschläge im Durchschnitt der drei Szenarien um 26 mm ab, wobei die stärkste Abnahme von 62 mm im trockenen Szenario auftritt. Die Abnahme ist mit 4,6 % im Winter größer als im Sommer (2,5 %). Gleichzeitig nimmt im Vergleich zu allen drei Zukunftsszenarien die Jahresdurchschnittstemperatur am Standort Hof um etwa 0,7°C zu. Der aufgrund seiner Höhenlage kühlere Standort Hof wird daher für die Pflanzenproduktion günstigere Wachstumsbedingungen bieten, da die Temperatur bislang einen limitierenden Faktor darstellt. Die Anzahl der Frosttage wird um ca. 14 %, die Zahl der Eistage sogar um mehr als 30 % abnehmen; die Zahl der Sommertage wird um 28 % zunehmen. Für Metten ergibt sich eine geringere Streuung zwischen den Szenarien. Hier nehmen in allen drei Zukunfts-Szenarien die jährlichen Niederschläge um durchschnittlich 36 mm ab (28-46 mm), wobei die Abnahme mit 5,7 % im Sommer deutlich stärker ausfällt als im Winter (1,6 %). Die Jahresdurchschnittstemperatur steigt um 0,6 °C, wobei die Zahl der Sommertage um ca. 18 % zunimmt. Der Anstieg in der Anzahl von heißen Tagen mit Höchsttemperaturen über 30 °C wird mit 13 % prognostiziert. Dies weist darauf hin, dass hier die Temperaturerhöhung bereits über den optimalen Bedingungen für das Pflanzenwachstum liegt. Am stärksten wird der Niederschlagsrückgang mit durchschnittlich 47 mm (41-59 mm) für den Standort Weihenstephan prognostiziert, wobei hier auch der Rückgang mit 8,9 % im Sommer besonders ausgeprägt ist (Winter: 2,8 %). In allen drei Zukunfts-Szenarien zeigt sich am Standort Weihenstephan eine Zunahme der Jahresdurchschnittstemperatur von 0,7 bis 1 °C.

3.2 Auswirkungen der prognostizierten klimatischen Veränderungen auf Ertrag, optimale spezielle Intensität sowie Deckungsbeitrag von Winterweizen

Die Tabelle 2 zeigt die Erwartungswerte der Naturalerträge von Winterweizen, die optimalen speziellen Intensitäten sowie die resultierenden Deckungsbeiträge im Vergleich des Ist-Szenarios mit den drei Realisierungen der Zukunfts-Szenarien („normal“, „feucht“ und „trocken“). Weiterhin sind in Klammern für die jeweiligen Kennzahlen deren Standardabweichungen angegeben. Erwartungswerte und Standardabweichungen werden jeweils über die 20 Jahre des Ist-Szenarios sowie der drei Zukunfts-Szenarien berechnet.

Für den Modellstandort Metten ist aus Tabelle 2 zu entnehmen, dass sich die prognostizierten klimatischen Veränderungen negativ auf die mittlere Ertragserwartung auswirken werden, und zwar für alle drei untersuchten Zukunfts-Szenarien. Es ist an diesem Standort mit statistisch signifikanten Ertragseinbußen im Bereich von 9 bis 19 dt/ha zu rechnen. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die Ertragseinbußen nur statistisch signifikant sind, wenn die Klimaprognosen und die auf deren Basis modellierten Erträge zukünftig tatsächlich eintreten werden. Aufgrund der beschriebenen negativen Auswirkungen auf das mittlere Ertragspotenzial ist, wie Tabelle 2 entnommen werden kann, auch mit korrespondierenden negativen Auswirkungen auf die mittleren Deckungsbeiträge zu rechnen (zirka -160 bis -350 €/ha). Der Tabelle 2 kann weiterhin entnommen werden, dass die optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung aufgrund der prognostizierten klimatischen Veränderungen zukünftig leicht sinken wird.

Der Standort Hof zeigt im Vergleich zum Standort Metten eine andere Reaktion auf die prognostizierten klimatischen Veränderungen. Die Modellergebnisse zeigen, dass hier mit überwiegend konstanten Verhältnissen gerechnet werden kann. Nur im Vergleich zum Zukunfts-Szenario „trocken“ zeigen sich nicht signifikante negative Auswirkungen auf das Ertragspotenzial (-8 dt/ha) sowie den Deckungsbeitrag (ca. -130 €/ha). Dasselbe gilt für die zu erwartenden mittleren optimalen speziellen Intensitäten der Stickstoffdüngungen (vgl. Tabelle 2).

Am Modellstandort Weihenstephan zeigen sich ähnliche Auswirkungen wie am Standort Metten. Es muss in Abhängigkeit vom Zukunfts-Szenario im Vergleich zum Ist-Szenario mit einem um ca. 9 bis 17 dt/ha

niedrigeren mittleren Ertragspotenzial gerechnet werden (vgl. Tabelle 2). Für die Deckungsbeiträge bedeutet dies einen Rückgang um ca. 170 bis 320 €/ha bei den angenommenen Weizenpreisen und variablen Kosten. Die beschriebenen Rückgänge sind, wie der Tabelle 2 zu entnehmen ist, bei $\alpha=5\%$ statistisch signifikant absicherbar. Für die mittleren optimalen speziellen Intensitäten der Stickstoffdüngung kann zukünftig ein leichter Rückgang beobachtet werden (vgl. Tabelle 2).

Tab. 2: Mittelwerte und Standardabweichungen der optimalen speziellen Intensitäten der N-Düngung, der Naturalerträge und der Deckungsbeiträge im Ist-Szenario und in den Zukunfts-Szenarien

Szenario	Nopt. ¹ kg ha ⁻¹	Ertrag bei Nopt. dt ha ⁻¹	DB bei Nopt. € ha ⁻¹
Metten			
Ist-Szenario	173 (27) ²	94 (9)	1137 (161)
Zukunfts-Szenario normal	163 (22)	85* (11)	973* (205)
Zukunfts-Szenario feucht	172 (16)	79* (17*)	846* (326)*
Zukunfts-Szenario trocken	153 (27)	75* (24*)	790* (469)*
Hof			
Ist-Szenario	169 (25)	72 (12)	704 (243)
Zukunfts-Szenario normal	172 (25)	74 (15)	751 (289)
Zukunfts-Szenario feucht	184 (16)	72 (15)	702 (287)
Zukunfts-Szenario trocken	152 (35)	64 (19)*	573 (354*)
Weihenstephan			
Ist-Szenario	147 (32)	85 (15)	996 (280)
Zukunfts-Szenario normal	125 (40)	76* (14)	828* (257)
Zukunfts-Szenario feucht	134 (22)	72* (17)	732* (343)
Zukunfts-Szenario trocken	117 (37)	68* (23)*	675* (438)*

¹optimale spezielle Intensität der Stickstoffdüngung

² Werte in Klammern: Standardabweichung

* statistisch signifikant unterschiedlich zu Ist-Szenario bei $\alpha=5\%$

3.3 Auswirkungen des Klimawandels auf das Produktionsrisiko

Zur Beurteilung von Veränderungen des Produktionsrisikos unter zukünftigen Klimabedingungen bedienen wir uns im Folgenden der Standardabweichung von Ertrag und Deckungsbeitrag. In Tabelle 2 sind diese jeweils in Klammern unter den Erwartungswerten angegeben. Weiterhin sind in Abbildung 1 für die modellierten Standorte die kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Deckungsbeiträge dargestellt. Dies erlaubt zusätzlich eine detaillierte grafische Beurteilung der modellierten Veränderungen.

Für den Standort Metten kann gezeigt werden, dass es vor allem in den Zukunfts-Szenarien „trocken“ und „feucht“ zu einer signifikanten Erhöhung des Produktionsrisikos kommen kann. Dies spiegelt sich in einer Erhöhung der Standardabweichung des Ertrags im Bereich von 8 bis 15 dt/ha wider (vgl. Tabelle 2). Mit der Standardabweichung des Deckungsbeitrages verhält es sich ähnlich. Abbildung 1 zeigt zusätzlich die kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen des Deckungsbeitrages. Hier wird ersichtlich, dass die Verteilungsfunktionen der Zukunfts-Szenarien komplett links von der des Ist-Szenarios liegen. Dies bedeutet, dass im Ist-Szenario auf jedem Wahrscheinlichkeitsniveau ein höherer Deckungsbeitrag erzielt wird als in den Zukunfts-Szenarien. Das Ist-Szenario ist in diesem Fall stochastisch dominant ersten Grades gegenüber den Zukunfts-Szenarien. Abbildung 1 verdeutlicht zudem, dass speziell die Wahrscheinlichkeiten für niedrige Deckungsbeiträge zukünftig enorm zunehmen können. Würde das Zukunfts-Szenario „trocken“ eintreten, dann läge die Wahrscheinlichkeit für einen negativen Deckungsbeitrag bei ca. 10 % und das bei einem hohen angenommenen Winterweizenpreis von 20 €/dt.

Für den Standort Hof ergeben sich bei Annahme der Zukunfts-Szenarien „normal“ sowie „feucht“ keine nennenswerten Änderungen bezüglich des Produktionsrisikos (vgl. Tabelle 2). Dies wird auch aus der grafischen Analyse der kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen aus Abbildung 1 deutlich. Würde jedoch das Zukunfts-Szenario „trocken“ eintreten, so wäre auch hier mit einer statistisch signifikanten Zunahme des Produktionsrisikos gemessen an der Standardabweichung des Ertrags (+7dt/ha) sowie des Deckungsbeitrages (ca. +110 €/ha) zu rechnen.

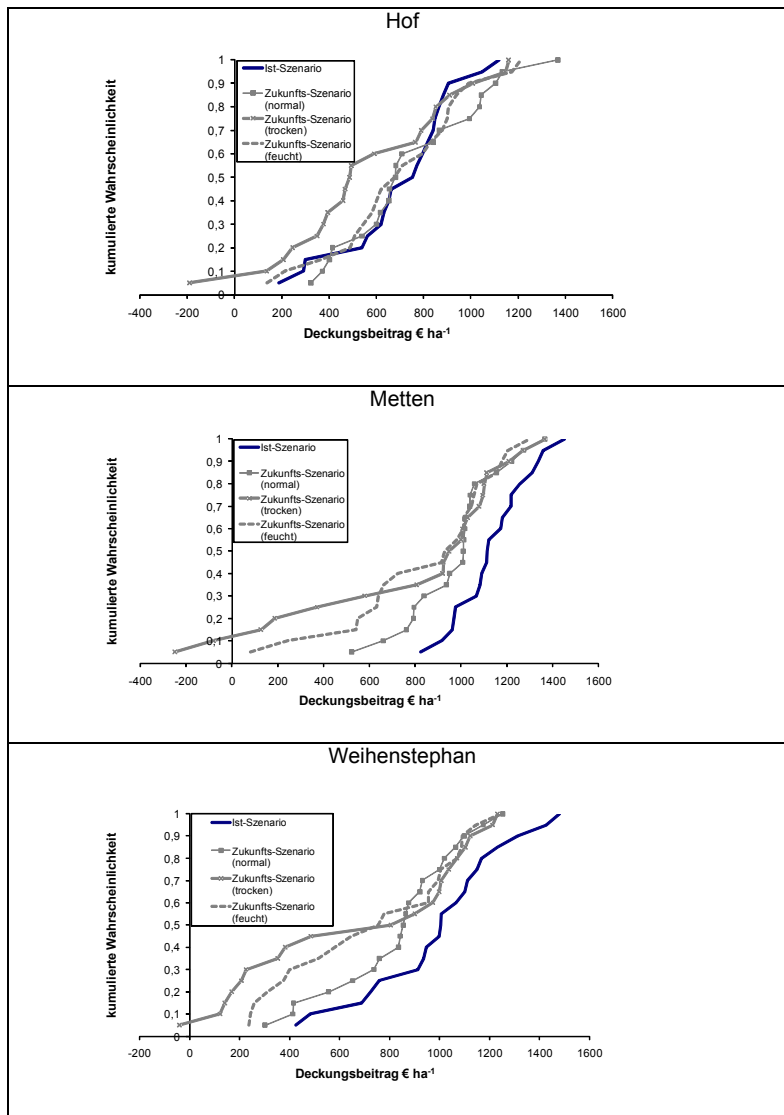


Abb. 1: Kumulierte Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Deckungsbeitrags von Winterweizen im Ist-Szenario sowie in den drei Zukunfts-Szenarien. (Quelle: eigene Berechnungen).

Die Modellierung am Standort Weihenstephan zeigt, dass sich die Standardabweichung des Ertrags (+8 dt/ha) sowie des Deckungsbeitrages (+ ca. 160 €/ha) nur im Vergleich zum Zukunfts-Szenario „trocken“ signifikant erhöht (vgl. Tabelle 2). Im Vergleich zu den Zukunfts-Szenarien „feucht“ sowie „normal“ zeigen sich keine extremen Veränderungen bezüglich der Standardabweichungen. Die kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktionen des Deckungsbeitrages (vgl. Abbildung 1) aller drei Zukunfts-Szenarien liegen jedoch wie am Standort Metten auch gänzlich links von der des Ist-Szenarios. Dies bedeutet, wie auch für den Standort Metten erläutert, dass das Ist-Szenario als stochastisch dominant ersten Grades gegenüber den Zukunfts-Szenarien zu betrachten ist.

3.4 Auswirkungen des Klimawandels auf Risikoprämie und Sicherheitsäquivalent

In Tabelle 3 sind die Sicherheitsäquivalente (SA)¹ des Deckungsbeitrages (Werte in Klammern) und der Risikoprämien für verschiedene absolute Risikoaversionskoeffizienten λ im Ist-Szenario sowie für die drei Zukunfts-Szenarien dargestellt.

Die Ergebnisse für den Standort Metten zeigen, dass die Risikoprämien in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung sowie vom zugrunde gelegten Zukunfts-Szenario enorm ansteigen können. So erhöht sich beispielsweise die Risikoprämie (bei $\lambda=0,002$) von 26 €/ha im Ist-Szenario auf 107 €/ha im Zukunfts-Szenario „feucht“. Dies bedeutet, dass die Zahlungsbereitschaft zur Versicherung des Erwartungswertes zukünftig enorm ansteigen kann. Ein Blick auf die Sicherheitsäquivalente zeigt, dass diese für die Zukunfts-Szenarien im Vergleich zum Ist-Szenario (in Abhängigkeit von der Risikoeinstellung) sinken. Wie bereits erläutert, kennzeichnet das Sicherheitsäquivalent den sicheren Geldbetrag, den ein Entscheidungsträger mit einer bestimmten Risikonutzenfunktion als gleichwertig zu einer Alternative mit unsicherem Ausgang ansieht. Das heißt eine Veränderung des SA kann bei dem hier dargelegten Fall als Veränderung des individuellen Nutzens aus der

¹ In keinem der untersuchten Szenarien konnte eine Abweichung der Verteilung des Deckungsbeitrages von der Normalverteilung nachgewiesen werden (Kolmogorov-Smirnov-Test, $\alpha = 0.10$).

Produktion von Winterweizen interpretiert werden. Somit kann für den Standort Metten geschlossen werden, dass der individuelle Nutzen aus der Weizenproduktion zukünftig sinken wird.

Ähnliches gilt für den Standort Hof bei Annahme des Zukunfts-Szenarios „trocken“. Für die beiden anderen Zukunfts-Szenarien („feucht“ und „normal“) ist die Zunahme der Risikoprämien bzw. Abnahme der Sicherheitsäquivalente weniger stark ausgeprägt. So tritt beispielsweise bei Annahme des Zukunfts-Szenarios „normal“ eine Zunahme der Risikoprämie von 59 €/ha im Ist-Szenario auf 83 €/ha ein ($\lambda=0,002$). Das Sicherheitsäquivalent erhöht sich sogar leicht von 645 €/ha im Ist-Szenario auf 667 €/ha im Zukunfts-Szenario „normal“ (für $\lambda=0,002$, vgl. Tabelle 3). Letzteres ist auf die mäßige Steigerung des Erwartungswertes des Deckungsbeitrages zurückzuführen (siehe Tabelle 2).

Für den Standort Weihenstephan zeigen sich ganz ähnliche Ergebnisse hinsichtlich Risikoprämie und Sicherheitsäquivalent wie am Standort Metten für die Zukunfts-Szenarien „trocken“ und „feucht“ (vgl. Tabelle 3). Für das Zukunfts-Szenario „normal“ sinken jedoch die Risikoprämien leicht im Vergleich zum Ist-Szenario. Dies ist darauf zurückzuführen, dass für dieses Beispiel die Standardabweichung des Deckungsbeitrages leicht, jedoch statistisch nicht signifikant, rückläufig ist (vgl. Tabelle 2).

Tab. 3: Risikoprämien (in €/ha) für verschiedene absolute Risikoaversionskoeffizienten λ im Ist-Szenario und in den Zukunfts-Szenarien

Szenario	absolute Risikoaversionskoeffizienten λ		
	0.001	0.002	0.003
	- €/ha -		
	Metten		
Ist-Szenario	13 (1124)	26 (1111)	39 (1098)
Zukunfts-Szenario normal	21 (952)	42 (931)	63 (910)
Zukunfts-Szenario feucht	53 (792)	107 (739)	160 (686)
Zukunfts-Szenario trocken	110 (680)	220 (569)	330 (459)
	Hof		
Ist-Szenario	29 (674)	59 (645)	88 (615)
Zukunfts-Szenario normal	42 (709)	83 (667)	125 (626)
Zukunfts-Szenario feucht	41 (661)	82 (620)	124 (578)
Zukunfts-Szenario trocken	63 (511)	126 (448)	188 (385)
	Weihenstephan		
Ist-Szenario	39 (957)	78 (918)	117 (879)
Zukunfts-Szenario normal	33 (795)	66 (762)	99 (729)
Zukunfts-Szenario feucht	59 (673)	118 (614)	177 (555)
Zukunfts-Szenario trocken	96 (580)	192 (484)	288 (388)

² Werte in Klammern: Sicherheitsäquivalente in €/ha

4. Diskussion und Schlussfolgerung

Die dargestellten Analysen zeigen deutlich, dass sich die zu erwartenden klimatischen Veränderungen in Bayern regional unterschiedlich auf die Weizenproduktion auswirken werden. Selbst im engeren Umkreis der betrachteten Orte ist durch die Variabilität der Bodeneigenschaften sowie kleinräumige Höhenunterschiede (die betrachtete Station Hof-Hohensaas liegt ca. 100 m über der Stadt Hof) mit einer weiteren Differenzierung in den Reaktionen auf den Klimawandel zu rechnen. Die Betrachtungen sind daher als erster Schritt zu sehen und bedürfen für betriebliche Entscheidungen einer weiteren Untersetzung mit räumlich differenzierten Bodeninformationen.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Standorten Weihestephan und Metten aus ökonomischer Sicht mit negativen Auswirkungen des Klimawandels zu rechnen ist. Weiterhin zeigen die Modellergebnisse für die beiden Standorte eine Zunahme des Produktionsrisikos. Aus der Analyse der kumulierten Verteilungsfunktionen geht hervor, dass an diesen Standorten speziell die Wahrscheinlichkeit niedriger Deckungsbeiträge zunehmen wird. In Abhängigkeit von der individuellen Risikoeinstellung werden Betriebsleiter an diesen Standorten zukünftig eine wesentlich höhere Zahlungsbereitschaft für Versicherungsinstrumente zeigen. Für den Standort Hof kann ein positiveres Bild ermittelt werden. Hier zeigen sich im Vergleich zu den beiden anderen Standorten relativ stabile Bedingungen hinsichtlich des mittleren Niveaus des Deckungsbeitrages sowie des Produktionsrisikos. Im Vergleich deutet sich somit an, dass bislang wärmelimitierte Standorte in höheren Lagen mit zukünftig noch ausreichenden Niederschlägen (z. B. Hof, je nach Zukunftsszenario) vom Klimawandel profitieren werden. Dagegen ist auf bislang gemäßigten Standorten, wie die untersuchten Standorte Metten und Weihestephan, mit zukünftig trockeneren Phasen während der Vegetationsperiode mit negativen Auswirkungen zu rechnen.

Bei der Diskussion der hier beschriebenen Auswirkungen muss folgendes bedacht werden: Bei der Modellierung mit dem Pflanzenwachstumsmodell *Hermes* wird der positive Effekt einer zukünftig höheren CO₂-Konzentration der Atmosphäre auf das Pflanzenwachstum noch nicht berücksichtigt. Weiterhin ist zudem mit einem gewissen technischen Fortschritt (z. B. im Bereich der Züchtung) zu rechnen, der sich positiv auf die Ertragserwartung auswirken sollte. Somit sind die

hier dargestellten Ergebnisse als eine eher konservative Einschätzung der zukünftigen Situation zu sehen. Andererseits gilt es auch zu bedenken, dass mögliche weitere Negativeffekte, wie die mögliche Zunahme der Ozonbelastung oder der Befallsdruck durch Schädlinge, auftreten können. Es besteht somit noch erheblicher Forschungsbedarf, um die zuletzt aufgeführten Aspekte zukünftig in Klimafolgenabschätzungen in ihrer Kombinationswirkung angemessen berücksichtigen zu können (SCHALLER und WEIGEL 2008).

Die Herausforderung besteht jetzt zudem darin, für die stark vom Klimawandel betroffenen Standorte adäquate Anpassungsstrategien zu entwickeln, um die Veränderungen meistern zu können. Neben möglichen Anpassungen des Produktionsmanagements (z. B. Fruchtfolge oder Betriebsmittelinputniveaus) werden versicherungstechnische Lösungen und vor allem züchterische Fortschritte benötigt werden. Speziell zur Anpassung des Produktionsmanagements sind weitere Studien notwendig, die für verschiedene Kulturen die kleinräumigen Auswirkungen verschiedener Klimaszenarien detailliert analysieren.

Literatur

- ALCAMO J., MORENO J.M., NOVÁKY B., BINDI M., COROBOV R., DEVOY R.J.N., GIANNAKOPOULOS C., MARTIN E., OLESEN, J.E. AND SHVIDENKO A., (2007). Europe. Climate Change (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 541-580.
- ALEXANDROV V., EITZINGER J., CAJIC V., OBERFORSTER, M., (2002). Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Glob. Change Biol.* 8, 372-389.
- BERG E., (1997). Der Einfluß von Unsicherheit und Risikoeinstellung auf die Intensität und das Produktionsprogramm im Ackerbau. Arbeitspapier. <http://www.lbwl.unibonn.de/pu/Forschung/Publikationen/RiskBe97.pdf>.
- KERSEBAUM K.C., (1995). Application of a simple management model to simulate water and nitrogen dynamics. *Ecol Model* 81,145–156.
- KERSEBAUM K.C., (2007). Modelling nitrogen dynamics in soil–crop systems with HERMES. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 77, 39-52.
- LAMBERT D.M., LOWENBERG-DEBOER J., (2003). Economic Analysis of Row Spacing for Corn and Soybean. *Agronomy Journal* 95, 564–573.
- LFL (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft), (2008). Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. <http://www.lfl.bayern.de/ilb/db/14249/index.php> (Abrufdatum: 28.02.2008).
- MOSCHINI G., HENNESSY D.A., (2001). Uncertainty, risk aversion, and risk management for agricultural producers. *Handbook of agricultural economics*. Herausgeber: B.L. GARDNER und G.C. RAUSSER. Elsevier, New York.
- MOTULSKY H.J., (1999). Analyzing Data with GraphPad Prism, GraphPad Software Inc., San Diego CA. www.graphpad.com.

NAKICENOVIC N., ALCAMO J., VRIES B. DE, FENHANN J., GAFFIN S., GREGORY K., GRÜBLER A., JUNG T.Y., KRAM T., ROVERE E.L. L., MICHAELIS L., MORI S., MORITA T., PEPPER W., PITCHER H., PRICE L., RAIHI K., ROEHL A., ROGNER H.-H., SANDOVSKI A., SCHLESINGER M., SHUKLA P., SMITH S., SWART R., ROOIJEN S. VAN, VICTOR N., DADI Z., (2000). IPCC Special Report on Emission Scenarios. Cambridge, U.K. und New York, USA. Cambridge University Press, 2000.

ROBISON L.J., BARRY P.J., (1987). The competitive firm's response to risk. Macmillan Publ. Co., New York.

SCHALLER M., WEIGEL H.-J., (2008). Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 316, Bundesforschungsanstalt f. Landwirtschaft, Braunschweig.

SPEKAT A., ENKE W., KREIENKAMP F., (2007). Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Publikationen des Umweltbundesamtes, Dessau.

SUPIT I., HOOIJER A.A., VAN DIEPEN C.A., (eds.) (1994). System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in CGMS. Vol. 1: Theory and Algorithms. EC Publication EUR 15956, Luxemburg.

WENDLING U., SCHELLIN H.-G., THOMÄ, M., (1991). Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. Z Meteorol 41, 468-475.

ZEBITSCH M., GROTHMANN T., SCHRÖTER, D., HASSE C., FRITSCH U., CRAMER W., (2005). Klimawandel in Deutschland - Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Climate Change 08/05. Umweltbundesamt, Dessau.

Danksagung

Wir danken den beiden anonymen Gutachtern des Beitrags für ihre wertvollen Hinweise.

Kontaktautoren:

Dr. Markus Gandorfer
Lehrstuhl für Wirtschaftslehre des Landbaues
Technische Universität München
Alte Akademie 14
D-85350 Freising-Weihenstephan
Email: markus.gandorfer@wzw.tum.de

PD Dr. K. Christian Kersebaum
Institut für Landschaftssystemanalyse
Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF)
D-15374 Müncheberg
Email: ckersebaum@ZALF.de