4.7 Temperaturen und Niederschläge verändern sich: Wie wirkt dies auf die Landwirtschaft und welche Anpassungsmöglichkeiten bestehen?

Hans-Joachim Weigel & Remy Manderscheid

Temperaturen und Niederschläge verändern sich: Wie wirkt dies auf die Landwirtschaft und welche Anpassungsmöglichkeiten bestehen? *- Veränderungen mittlerer Klimawerte (höhere Temperaturen, jahreszeitliche Verschiebungen von Niederschlagsverhältnissen), eine grundsätzlich zunehmende Klimavariabilität sowie Änderungen in Häufigkeit, Dauer und Stärke von Klimaextremen (Hitze- und Trockenperioden, Starkniederschläge, Hagel, Hochwasser, Sturmfluten) stellen Risiken und Chancen für die Landwirtschaft der Zukunft dar, wobei diese regional und lokal verschieden ausfallen werden. Während moderate durchschnittliche Temperaturerhöhungen verbunden mit längeren Vegetationsperioden (und dem CO_2-Düngeeffekt) in kühl-gemäßigten Regionen positive Effekte auf die Produktionsleistung vieler Arten haben können, beschleunigen diese Temperaturveränderungen z.B. die Entwicklung bei Getreide und führen zu sinkenden Erträgen. Getreidearten sind darüber hinaus speziell gegenüber - auch kurzfristig auftretenden - Hitzeperioden empfindlich. Zunehmender Wassermangel bzw. Trockenheitsprobleme in der Hauptvegetationszeit werden die am stärksten wachstumshemmende Folge des Klimawandels darstellen. Weiter zunehmende Temperaturen und Wassermangel werden insbesondere in trocken-heißen Regionen der Erde, wo beide Klimafaktoren bereits heute wachstumslimitierend sind, die landwirtschaftliche Produktion gefährden. Starkniederschlags- und Hochwasserereignisse treten eher lokal auf, ihre Auswirkungen sind jedoch gravierend. Die Anpassungsmöglichkeiten der Landwirtschaft sind vielfältig und können den Nutzen aus dem Klimawandel fördern sowie negative Folgen abmildern bzw. vermeiden. Anpassungsmaßnahmen hängen jedoch stark von der Verfügbarkeit entsprechender Ressourcen und damit von den Rahmenbedingungen in den betroffenen Regionen bzw. Ländern ab. Anpassungsmaßnahmen umfassen autonome Managementmaßnahmen auf der Betriebsebene wie Bodenbearbeitung, Düngung, Fruchtfolgegestaltung, Pflanzenschutz und Sortenwahl. Zu den geplanten Anpassungsmaßnahmen zählen insbesondere eine entsprechend ausgerichtete Pflanzenzüchtung in Forschung und Praxis, Infrastrukturmaßnahmen (Deiche, Wasserreservoire), neue Versicherungsformen und gezielte landwirtschaftliche Beratung.*

Effects of climatic warming and change in precipitation patterns on agriculture. Which adaptation pontentials there are? *Climate change and especially increasing climate variability will affect agricultural production worldwide. While moderate global warming will improve production conditions in temperate and cold regions by lengthening the growing season provided water resources are not limiting. The low latitudes are especially vulnerable to further warming. Here increasing water shortage and water stress, respectively, will be the most critical growth limiting factors in the future. Generally, increasing climate variability, especially more and longer lasting heat waves but also flooding etc. will challenge agricultural systems worldwide and might turn production in most affected areas untenable. Adaptation measures will have to be implemented in order to reduce negative and capitalise on positive effects of climate change. Adaptation includes autonomous measures at the farm level, e.g. soil management, crop fertilization, crop rotation, phytosanitary measures, cultivar selection. Planned adaptation comprises e.g. improved and targeted plant breeding and infrastructural measures (e.g. water reservoirs, dams). While much knowledge is already available, cost-benefit analyses are required for potential adaptation strategies.*

Die Landwirtschaft hängt grundsätzlich und unmittelbar von Witterung und Klima ab und gehört damit zu den sensibelsten Sektoren, die von den Klimaveränderungen betroffen sind. Der bisherige bzw. der projizierte zukünftige Klimawandel mit Relevanz für die Agrarproduktion ist dabei durch folgende generelle Entwicklungen physikalischer und chemischer Klimaelemente gekennzeichnet (IPCC 2013). Das zukünftige Durchschnittsklima wird mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit wärmere und trockenere Sommer und wärmere, feuchtere, schneeärmere Winter verbunden mit einer längeren Vegetationsperiode aufweisen. Darüber hinaus entwickelt sich in der Atmosphäre ein in der jüngeren Erdgeschichte einmalig hohe CO_2-Konzentration. Ferner wird mit steigenden troposphärischen Ozon-Hintergrundkonzentrationen gerechnet. Begleitet werden diese Änderungen von Durchschnittswerten von einer zunehmend höheren Variabilität einzelner Witterungs- bzw. Wetterereignisse, d.h. von dem vermehrten Auftreten von räumlich und zeitlich stark variierenden Perioden extremer Ereignisse wie Hitze, Trockenheit, Ozonepisoden, Starkniederschläge etc.

Diese Veränderungen des Klimas wirken sich direkt auf Prozesse des Pflanzenwachstums aus und damit auf den Ertrag und die Qualität der Ernteprodukte und auf strukturelle und funktionelle Eigenschaften von Agrarökosystemen wie z.B. Bodeneigenschaften oder Pflanzenkrankheiten (*Abb.4.7-1*). Auch die Leistungsfähigkeit und Gesundheit von Nutztieren kann betroffen sein. Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft bieten die Möglichkeit, negative Auswirkungen des Klimawandels zu reduzieren und Chancen zu nutzen. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die Konsequenzen von Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags für die Pflanzenproduktion und für Böden. Auswirkungen des Anstiegs der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre werden in Kap. 4.6 - Weigel et al. ausführlich behandelt.

Primärwirkungen von Temperatur- und Niederschlagsveränderungen auf Kulturpflanzen und Agrarökosysteme

Temperaturveränderungen

Temperaturveränderungen betreffen die gesamte Pflanzenproduktion, da alle biologischen und chemischen Reaktionen in Organismen und Ökosystemen von der Temperatur beeinflusst werden. Hierbei sind steigende Durchschnittstemperaturen und zunehmend auftretende Extremtemperaturereignisse (Hitzestress) zu berücksichtigen, die sich unterschiedlich auf die Produktion der verschiedenen Kulturpflanzen auswirken (Morison & Lawlor 1999; Porter & Gawith 1999). Stoffwechsel und Wachstum von Pflanzen hängen von Kardinaltemperaturen (Minimum, Optimum, Maximum) ab, die je nach Pflanzenart oder –sorte bzw. je nach Standort und Herkunft sehr unterschiedlich sind (*Abb.4.7-2*). Der aus den Subtropen stammende Mais hat z.B. ein deutlich höheres Temperaturoptimum für die Photosynthese als Weizen, der aus einer gemäßigteren Klimazone stammt. Bei Überschreiten dieses optimalen Temperaturbereiches gehen Wachstum und Ertrag häufig abrupt zurück. So nimmt die Photosyntheserate z.B. für Weizen bereits bei Temperaturen oberhalb von ca. 25 °C wieder ab.

Eine moderate gleichmäßige Erwärmung wird überall dort positive Auswirkungen auf die Photosynthese bzw. das Pflanzenwachstum haben, wo die gegenwärtige Temperatur limitierend ist. Dagegen führt selbst eine geringe Temperaturerhöhung bei Kulturen, die bereits im Bereich ihres Temperaturoptimums wachsen, wie z.B. in den Tropen und Subtropen, zu Wachstums- bzw. Ertragseinbußen. Licht- und Dunkelatmung, über die 40–50% des assimilierten Kohlenstoffs wieder verloren gehen können, steigen mit zunehmender Temperatur ebenfalls an. Dies führt zur Verringerung des Bilanzüberschusses aus Photosynthese und Atmung und damit zu verminderten Wuchsleistungen.

In Folge der allgemeinen Erwärmung kann einerseits der Anbau bisher Wärme limitierter Kulturen, wie z.B. (Körner-) Mais oder Soja weiter in höhere geogra-

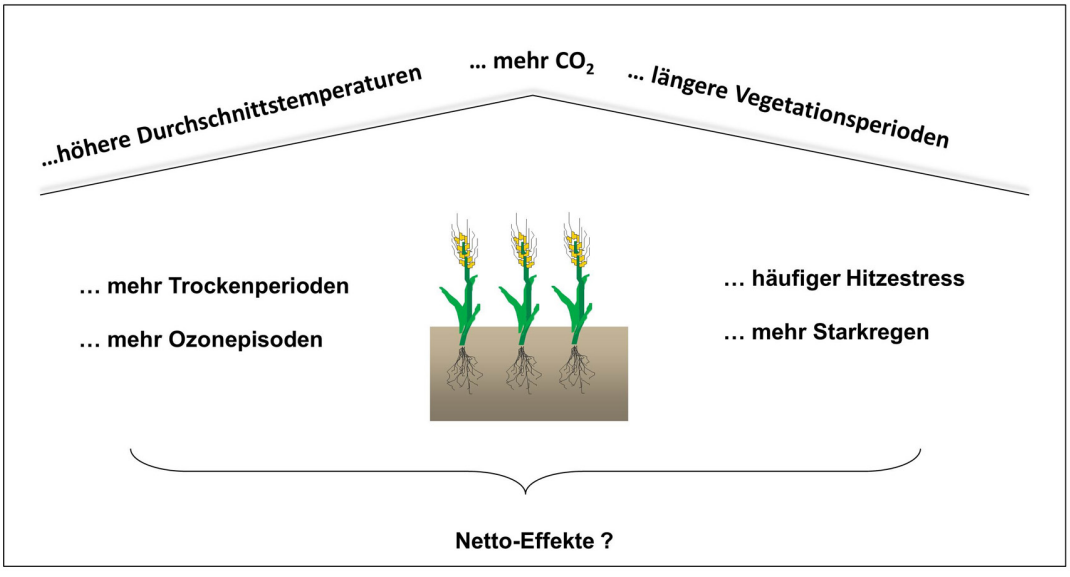

Abb.4.7-1: *Im Klimawandel sind Pflanzen im Agrarökosystem Veränderungen verschiedener Klimaparameter ausgesetzt, die bei einer Bewertung von Effekten berücksichtigt werden müssen (Weigel 2011) .*

phische Breiten und höhere Lagen ausgedehnt werden, zumal auch die Vegetationsperiode früher beginnt und länger andauert. Andererseits reagieren auch die Begleitflora und die Fauna auf eine Erwärmung, was u.U. zu höheren Ertragsverlusten durch Unkraut-, Krankheits- und Schädlingsbefall führen kann.

Bei Kulturpflanzenarten, deren Entwicklungsverlauf über Wärmesummen gesteuert wird, wie z.B. bei Getreide, beschleunigen höhere Temperaturen die Entwicklung und reduzieren damit bei annuellen Kulturen in der Regel das Ertragspotential. So liegt der optimale Temperaturbereich für eine größtmögliche Ernte für Weizen z.B. bei nur ca. 15–18 °C, was sich u.a. auch in dem Nord-Südgefälle von Weizenerträgen in Europa widerspiegelt (DEFRA 2000). Eine Temperaturerhöhung von 1 °C reduziert die Kornfüllungsphase um ca. 5% und den Ertrag um ca. 10% (Lawlor & Mitchell 2000). Die Verkürzung der Kornwachstumsdauer wird als ein entscheidender Faktor für die Ertragsminderungen bei zukünftiger Erwärmung über einen Anstieg der mittleren Wachstumstemperaturen angesehen. Dagegen erhöht die längere Vegetationsperiode Ertragspotential und -stabilität von Kulturen, die entweder einen hohen Wärmesummenbedarf besitzen (in °C x d; z.B. Körnermais) oder bei ausreichenden Temperaturen über ein kontinuierliches Wachstum verfügen, wie z.B. bei Zuckerrübe und Kartoffel oder bei Grünlandarten. Des Weiteren könnten Schäden in Folge einer erhöhten Spätfrostgefährdung und verringerten Winterhärte zunehmen.

Kritischer als der Anstieg von Durchschnittstemperaturen ist die Zunahme der Variabilität von Temperaturereignissen zu bewerten. Modellrechnungen ergaben z.B., dass für Weizen die Verdopplung der Standardabweichung der Temperatur bei unverändertem Mittelwert den gleichen Ertragsrückgang bewirken kann wie eine Temperaturerhöhung um 4 °C und die Variabilität der Erträge verdoppelt (Porter & Semenov 2005). Kulturpflanzen werden insbesondere durch Temperaturextreme geschädigt. Zunehmender Hitzestress z.B. kann dabei in Abhängigkeit von seinem zeitlichen Auftreten massive Schäden verursachen. Besonders hitzesensitiv sind generative Stadien, wie z.B. die Anthese, d.h. das Entfalten der Blüte bei Getreide. Hier können hohe Temperaturen (für Weizen, Mais oder Reis ab T > 30 bzw. 35 °C) zu Problemen bei der Befruchtung bis hin zur Sterilität führen (Porter & Garwith 1999; Barnabas et al. 2008), was bei Getreide durch die Verringerung der potenziellen Kornzahl deutliche Ertragseinbußen nach sich zieht (*Abb. 4.7-3*). Auch bei anderen sensitiven Kulturen, wie Tomaten, können Blüten oder junge Früchte auf Grund von Hitzestress absterben. Hitzestress kann sich weiterhin negativ auf die Produktqualität auswirken. Bei Weizen z.B. führen hohe Temperaturen während der Kornfüllung z.B. zu einer Erhöhung und qualitativen Veränderung des Proteingehalts und beeinflussen somit funktionelle Eigenschaften für das Brotbacken (Münzing & Lindhauer 2006).

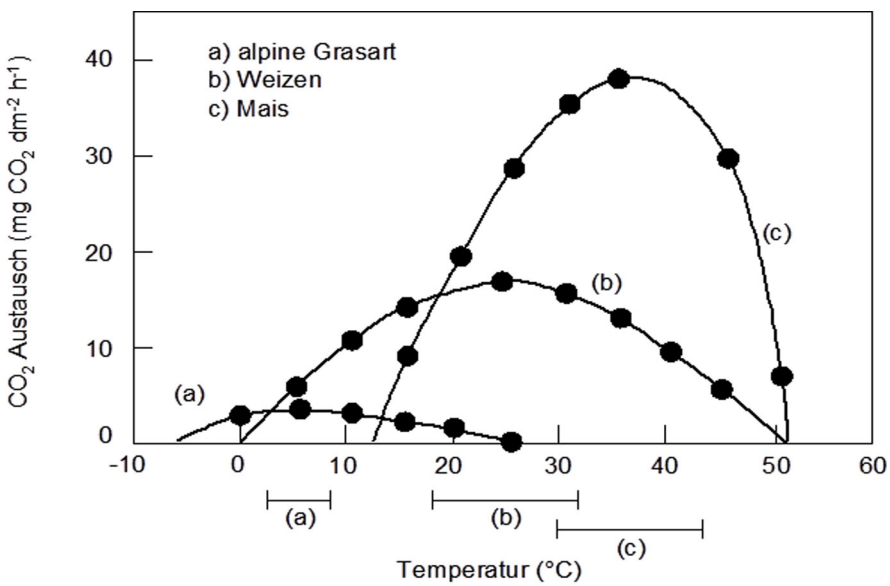

Abb. 4.7-2: *Die Temperaturabhängigkeit der Photosyntheseleistung; die horizontalen Balken geben den Optimumbereich an (nach Wardlaw 1979 zitiert in Rosenzweig & Hillel 1998).*

Niederschlagsveränderungen

Innerhalb einer relativ weiten Temperaturspanne ist grundsätzlich der Niederschlag entscheidend dafür, welche Kulturpflanzen erfolgreich angebaut werden können. Sofern keine Beeinflussung durch Grundwasser vorliegt, setzt sich dieser v.a. aus der Niederschlagsmenge und -verteilung, dem Abfluss und der Verdunstung zusammen. Letztere hängt u.a. von den herrschenden Temperaturen ab und steigt um ca. 5 °C pro °C Temperaturerhöhung. Da die vorliegenden globalen und regionalen Klimamodelle überwiegend eine Abnahme der Niederschläge während der Vegetationsperiode skizzieren, muss mit zunehmender Trockenheit verstärkt mit Ertragseinbußen in der Landwirtschaft gerechnet werden (Davies 2006). Wassermangel kann dabei in der Vegetationsperiode periodisch regelmäßig (z.B. Frühjahrstrockenheit in Teilen Europas) oder periodisch unregelmäßig auftreten. Nach einer Definition des DWD entsteht Wasserstress (oder Trockenstress) bei Pflanzen, wenn über längere Zeit eine optimale Evapotranspiration durch Wassermangel nicht mehr möglich ist. Trockenstress kann sich schnell etablieren oder er kann sich langsam graduell aufbauen, wobei eine gewisse Anpassungsreaktion der Pflanzen möglich ist. Das Reaktionsgeschehen der meisten Pflanzen auf Wassermangel läuft je nach Ausmaß der Verknappung grob vereinfacht über zwei Mechanismen ab: zunächst über eine Reduktion der CO_2 Versorgung bzw. der Photosyntheseleistung durch Stomataverschluss, die zu einer (latenten) Wachstumsminderung führen kann und bei stärkerer Dehydrierung durch Enzym- und Membranschädigungen, in deren Folge die Pflanze irreversibel geschädigt werden.

Mit abnehmender Verfügbarkeit des Bodenwassers wird die Wasseraufnahme durch die Wurzel eingeschränkt, was daher in der Folge unmittelbar das Pflanzenwachstum beeinträchtigt bzw. reduziert. Davon kann zunächst das oberirdische Sproßwachstum stärker betroffen sein als die Wurzelentwicklung selbst. Verschiedene Arten und verschiedene Sorten einer Art reagieren sehr unterschiedlich auf Wassermangel. Darüber hinaus sind bei den vielen Kulturpflanzen unterschiedliche Entwicklungsstadien unterschiedlich empfindlich gegenüber Wassermangel. Nutzpflanzen sind besonders im Stadium der Fortpflanzung (bei Getreide: Blüte; Bestäubung, Kornfüllung) empfindlich gegenüber Wassermangel.

Sensitiv reagiert u.a. auch die Blattentwicklung, so dass sich auch temporär begrenzter Wasserstress durch die Reduktion des Blattflächenindex nachhaltig auf die Photosynthese- und Ertragsleistung auswirken kann. Insbesondere bei einjährigen Kulturpflanzen verkürzt eine zunehmende Sommertrockenheit die effektive Entwicklungsdauer, wobei eine beschleunigte Abreife der Pflanzen in der Regel nicht nur auf Kosten der Fruchtbildung, sondern auch der Produktqualität geht. Tritt eine zunehmende Trockenheit bereits zu Vegetationsbeginn auf, kann sich in Abhängigkeit vom Bodentyp auch das Keimen bzw. Aufgehen von Ackerkulturen verringern.

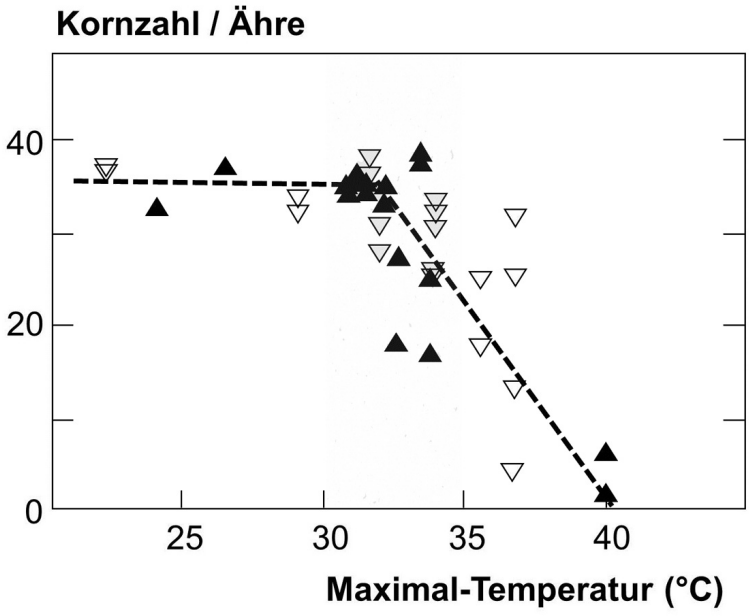

Abb. 4.7-3: *Beziehung zwischen der Kornzahl pro Ähre bei Winterweizen und der maximalen halbstündigen Temperatur in den letzten 5 Tagen vor der Anthese; CO_2-Konzentration: offen = 380 ppm; gefüllt = 700 ppm (nach Wheeler et al. 1996; verändert).*

Kritisch dürfte die Wasserversorgung für landwirtschaftliche Kulturen in Regionen werden, deren Böden über eine geringe Wasserspeicherkapazität verfügen (z.B. Sandböden) und bzw. oder in Regionen, die bereits heute unter Wasserknappheit leiden (z.B. im Mittelmeerraum). Verschärft wird die Situation regional u.U. durch eine reduzierte Rate der Grundwasserneubildung, da Verdunstungsverluste zusätzlich durch die verlängerte Vegetationsperiode ansteigen und der oberirdische Abfluss bei geringerer Infiltration von Starkniederschlägen nach Trockenperioden zunimmt.

Im Gegensatz zu den sommerlichen Problemen mit Wassermangel kann die prognostizierte Zunahme winterlicher Niederschläge besonders auf schweren Böden oder bei hoch anstehendem Grundwasser die Bodenbewirtschaftung erschweren. Auch muss zukünftig wahrscheinlich verstärkt mit Hochwässern – v.a. im Winter und Frühjahr – und damit Überflutung von landwirtschaftlichen Flächen und Staunässe gerechnet werden; gleichzeitig nimmt die Erosionsgefahr und die Auswaschung von Nähr- und Schadstoffen zu (Abildtrup & Gylling 2001).

Interaktionen verschiedener Klimaelemente

Bezüglich der komplexen Auswirkungen der sich ändernden Klimaelemente Temperatur und Niederschlag einerseits und der chemischen Zusammensetzung der Atmosphäre (z.B. CO_2, O_3) andererseits (vgl. *Abb. 4.7-1*) bestehen noch weitreichende Unsicherheiten (Fuhrer 2003), da Klimaimpaktstudien bisher vorwiegend monofaktoriell angelegt waren. Auf einige mögliche Interaktionen der verschiedenen Klimaparameter wurde bereits in Kap. 4.6 - Weigel et al. eingegangen. Wird z.B. bei einem Temperaturanstieg zunehmend die Wasserversorgung zum limitierenden Faktor, könnte der »CO_2-Düngeeffekt« eine entscheidende Rolle für das Ergebnis der Wechselwirkungen spielen, da bei erhöhten atmosphärischen CO_2-Konzentrationen bei C3-Pflanzen die Photosyntheserate gesteigert wird und sich das Photosynthese-Optimum zu höheren Temperaturen hin verschiebt und generell die Wassernutzungseffizienz C3- und C4-Pflanzen verbessert wird (s. Kap. 4.6 - Weigel et al.). Kritisch sind in diesem Zusammenhang auch steigende troposphärische Ozon-Konzentrationen in wichtigen Agrarregionen weltweit zu sehen, die einer positiven Wirkung erhöhter CO_2-Konzentrationen entgegenwirken, da Ozon als phytotoxisch gilt (Felzer et al. 2005; Bender & Weigel 2011).

Auswirkungen auf Bodenressourcen und auf Schadorganismen und Krankheiten

Eigenschaften landwirtschaftlicher Böden werden grundsätzlich durch die landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung selbst stark beeinflusst. Vor diesem Hintergrund sind Einflüsse des Klimawandels auf Bodeneigenschaften zu bewerten. Die Auswirkungen der verschiedenen Klimaelemente auf strukturelle und funktionelle Bodeneigenschaften sind komplexer Natur und in einer sehr umfangreichen Fachliteratur beschrieben. In *Tab. 4.7-1* sind mögliche Auswirkungen der sich ändernden Klimaparameter auf Bodeneigenschaften nur stichwortartig zusammengestellt.

Klimafaktoren bestimmen sowohl die Anfälligkeit der Wirtspflanze als auch Wachstum sowie Überdauerungs- und Ausbreitungsvermögen von Schaderregern. Damit ist auch mit Auswirkungen des Klimawandels auf Pflanzenkrankheiten zu rechnen, wobei dies Acker- und Gartenbau sowie Grünland betreffen wird, da alle diese Bereiche empfindlich auf Veränderungen im Auftreten von Pflanzenkrankheiten, Pathogenen oder Parasiten (Unkräuter, bakterielle, pilzliche und virale Pflanzenkrankheiten, Insekten/Schädlinge, invasive gebietsfremde Arten etc.) reagieren, die sich aus einem sich verändernden Klima ergeben.

Die Bewertung der Fragen in diesem Bereich ist komplex und schwierig, weil Veränderungen von Temperaturen, Niederschlägen und atmosphärischer CO_2-Konzentration nicht nur auf die Schadorganismen selbst wirken, sondern ebenfalls auf ihre als »Nützlinge« bezeichneten Antagonisten (Prädatoren und Parasitoide). In welcher Weise die Veränderungen der einzelnen Klimaelemente die ausbalancierten Wechselwirkungen zwischen Schad- und Nutzorganismen beeinträchtigen, ist zurzeit noch nicht hinreichend zu beantworten (Chakraborty et al. 2000; Juroszek & v. Tiedemann 2013).

Klimaimpaktstudien

Für nationale und regionale Abschätzungen der Auswirkungen des Klimawandels auf die Landwirtschaft (Klimaimpaktstudien) werden meist großskalige bzw. regionalisierte Klimamodelle angewandt und mit Pflanzenwachstums- bzw. Agroökosystemodellen verknüpft, mit deren Hilfe Aussagen über mögliche biophysikalische Auswirkungen der Veränderungen einzelner Klimaelemente auf Pflanzen und Böden etc. möglich sind. Zum Teil werden ökonomische Modelle eingesetzt, um mögliche Folgen für den Agrarsektor insgesamt abzuschätzen. Die Ergebnisse werden zumeist auf aggregierter Ebene (z.B. Bundesländer, Boden-Klima-Räume) dargestellt. Die Modellaussagen werden u.a. beeinflusst

Tab. 4.7-1: *Stichwortübersicht zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Bodeneigenschaften; grau unterlegt: positive Auswirkungen bzw. Zunahmen; nicht unterlegt: negative Auswirkungen bzw. Abnahmen; nach* ROGASIK *et al. 1996, verändert.*

Eigenschaft / Prozess	erhöhte CO_2 Konzentration	erhöhte Temperatur	Trockenheit	extreme Niederschläge
biologische Aktivität	höherer C-Input (Wurzel- u. Ernte-rückstände ➔ Aktivität des Bodenlebens	Bodenbiologie all-gemein; Beschleunigung der Stoff-umsätze; Respiration > Photo-syntheseleistung ➔ Verlust an C_{org}	Bodenbiologie all-gemein; Stoffum-setzungsprozesse	Biologische Aktivität (häufigkeitsab-hängig)
organische Substanz	C-Input ➔ höherer Gehalt an C_{org} ; Veränderung der Humusqualität	Ertragsrückgange, Rückgang Ernte- und Wurzelrückständen ➔ abnehmende Humus-gehalte	C-Akkumulation möglich	Erodierbarkeit; Verschlechterung der Humusqualität
Boden-struktur	Anzahl stabiler Bioporen (Regen-wurmröhren, Wurzel-gänge); Bearbeitbar-keit	Verdichtungsgefährdung durch Verlust an org. Bodensubstanz	red. Verdichtungs-risiko; Schrumpfung, Risse, geringere Porosität	Neigung zu Ver-schlämmung und Verdichtung; redu-zierte Bearbeitbar-keit
Boden-wasser- und Gebiets-wasserbilanz	Wassernutzungseffi-zienz; Wasser-verbrauch fällt; größere Biomasse-produktion kann posi-tive Effekte kom-pensieren	Evaporation; Speicherung von pflanzenverfügbarem Bodenwasser infolge Humusverlustes; nutz-bare Grundwasser-vorräte	reduzierter Boden-wassergehalt	zeitweiser Über-schuss an Bodenwasser (Auswaschungs-gefährdung)
Nährstoff-status	Nährstoffmobilisierung Nährstoffvorräte infolge erhöhter Biomasseproduktion	Nährstoffverfügbarkeit (kurzfristig) Puffer-kapazität, Redox-potential; Nährstoff-dynamik durch Humus-abbau	Nährstoffverfüg-barkeit; Dünge-effizienz	Verlagerung von Nährstoffen
Erosion / Infiltration	Oberflächenabfluss und Erodibilität infolge höherer Biomasse-produktion und besserer Bodenbe-deckung	Oberflächenabfluss, Infiltration,Erodierbarkeit durch Wasser/ Wind wegen Humusverlust u. verminderter Pflanzen-decke	Erodierbarkeit durch Wind	Erosionsschäden und erhöhter Ober-flächenabfluss; Minderung der Niederschlags-Infiltration
Nährstoffaus waschung	geringerer Nährstoff-verlust bei höheren Entzügen bzw. besserer Sorptions-kapazität	N-Mineralisierung ➔ N-Verluste	minimale Nährstoff –verluste; Nitrat im Sickerwasser	Verarmung an Nährstoffen durch Oberflächenabtrag und Nährstoff-austrag
Produktions-potential	Zunahme des Ertrags-potentials auch auf weniger fruchtbaren Böden möglich	bei zunehmender Sommertrockenheit bzw. dem vermehrten Auftreten von Extremereignissen ➔ vermindertes Ertragspotential auch auf fruchtbaren Böden		

durch die Wahl des Emissionsszenarios, das eingehende globale Zirkulationsmodell und das Regionalisierungsmodell für die Klimadaten. Während z.B. die simulierten Temperaturänderungen unterschiedlicher globaler Zirkulationsmodelle innerhalb bestimmter Bandbreiten liegen, differieren vor allem die regionalen Niederschlagsprojektionen deutlich. In vielen Modellansätzen zur Abschätzung der Pflanzenproduktion fehlt darüber hinaus die Einbeziehung des CO_2-Düngeeffektes (Kap. 4.6 - Weigel et al.), der meist positive Ertragseffekte bewirkt. Unberücksichtigt bleiben oft auch mögliche indirekte Wachstums- oder Ertragseffekte, z.B. über eine durch Klimaveränderungen veränderte phytosanitäre Situation oder über die Auswirkungen von Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft. Zudem muss bei der Interpretation der Ergebnisse die jeweilige Annahme der Intensität der Klimaveränderung sorgfältig beachtet werden. Betrachtet wurden darüber hinaus bisher fast ausschließlich Veränderungen mittlerer Klimawerte. Beispielhaft zeigt *Tab. 4.7-2* Ergebnisse von Klimafolgenabschätzungen für Winterweizen in verschiedenen Regionen Deutschlands. Ausgehend von der gegenwärtigen Klima- und Ertragssituation ergaben die Ertragssimulationen sowohl Ertragszunahmen von > 20%, aber auch Rückgänge um bis zu >15%, wenn z.B. der CO_2-Düngeeffekt nicht berücksichtigt wird. Wird der positiv wirkende CO_2-Effekt einbezogen, zeigt sich in allen Teilregionen unter allen Klimaszenarien eine deutlich positive Ertragsveränderung.

Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft

Die Entwicklung und Anwendung von Anpassungsmaßnahmen entscheidet mit darüber, welche tatsächlichen Konsequenzen die zukünftige Klimaveränderung für die Agrarproduktion haben wird (Vulnerabilität). Die Anpassungen müssen auf den verschiedenen Ebenen der landwirtschaftlichen Produktion, von der Auswahl der einzelnen Kulturpflanze bis hin zum gesamtbetrieblichen Management sowie vor- und nachgelagerte Produktionszweige und der internationale Agrarhandel betrachtet werden. An Veränderungen mittlerer Klimawerte kann sich zumindest die einheimische Landwirtschaft fortlaufend anpassen. Während diese Anpassungen selbständig (und mehr oder weniger kostenneutral) von den Landwirten durchgeführt werden können (autonome Anpassung), benötigen längerfristig notwendige Maßnahmen gezielte Vorgaben seitens Wissenschaft, Politik und Verwaltung (geplante Anpassung). Anpassungsmaßnahmen an die zunehmende Klimavariabilität bzw. an die Zunahme extremer Ereignisse sind weit schwieriger zu planen und zu realisieren. Nachfolgend sind einige autonome und geplante Möglichkeiten, sich an klimatische Änderungen anzupassen, stichwortartig aufgeführt.

- Maßnahmen im Bereich Anbaueignung, Wachstum, Produktivität und Gesundheit von Kulturpflanzen (z.B. Änderung von Aussaatterminen, Saatdichten und Reihenabständen; Auswahl geeigneter Arten und Sorten, z.B. höhere generelle Trocken-, Hitze- bzw. Klimatoleranz; Anpassung von Fruchtfolgen durch Anbau von anderen Kulturen bzw. Sorten; Mischung von C3-/C4-Pflanzen; generell stärkere Diversifizierung von Fruchtfolgen zur Risikominimierung; Optimierung von Düngestrategien; Änderung des Pflanzenschutzmanagements; Verbesserung der Agrowettervorhersage).
- Maßnahmen im Bereich Verfügbarkeit und Nutzungsmöglichkeiten von Wasserressourcen sowie Schonung biotischer und abiotischer Bodenressourcen (z.B. Optimierung der landwirtschaftlichen Beregnung z.B. durch Präzisionsbewässerung; Anlage von Wasserreservoiren in trockenheitsgefährdeten Regionen; Mehrfachnutzung von Wasser; Ausbau von Entwässerungssystemen zum Schutz gegen Extremniederschläge in gefährdeten Regionen; Optimierung von Techniken zur Konservierung der Bodenfeuchte; Förderung und Einsatz von natürlichen

Tab. 4.7-2: *Relative Ertragsänderungen von Winterweizen in verschiedenen Regionen Deutschlands ermittelt aus regionalen Klima-Impakt-Studien mittels Modellberechnungen ohne Berücksichtigung des CO_2-Düngeeffektes sowie (in Klammern) mit CO_2-Düngeeffekt; eigene Zusammenstellung aus verschiedenen Quellen.*

Bundesland / Naturraum	*Ertragsänderung*	*[%] Szenarium (SRES, RCP)*	*Zeithorizont*
Baden Württemberg	-14	A1	2050
Hessen	-10	B2	2041-2050
Brandenburg	-17 (-10)	A1B	2055
Märkisch-Oderland	-5 (+0,5)	A1B	2055
Sachsen-Anhalt	-7–1	A1B	2071-2100
Elbeinzugsgebiet	-7,5	A1,B2	2020
Nordrhein-Westfalen	bis -5 (+10 bis > +20)	A1B	2050
(verschiedene Regionen)	bis -7 (+5 bis > +15)	B1	

Bodenverbesserern; Änderungen der Bodenbearbeitung)

- Maßnahmen im Bereich Züchtung, genetische Ressourcen, Agrobiodiversität (z.B. züchterische Weiterentwicklung robuster und ertragsstabiler Kulturen; Bereitstellung von Saatgut neuer, Wärme liebender Pflanzensorten; Züchtung zur optimalen Ausnutzung des CO_2-Düngeeffektes und zur Sicherstellung einer hohen stofflichen Qualität; Resistenzzüchtung zur Abwehr von neuen, durch den Klimawandel auftretenden Schädlingen und Krankheiten; ev. Koppelung von Arten- und Biotopschutzprogrammen mit Maßnahmen zum Schutz (pflanzen)genetischer Ressourcen; grundsätzliche Förderung von Kulturarten- bzw. Nutzungsvielfalt).

Fazit

Der Klimawandel wird die Landwirtschaft in den verschiedenen Regionen der Erde unterschiedlich stark treffen. Während grundsätzliche Auswirkungen von Veränderungen einzelner Klimaelemente wie Temperatur und Niederschlag auf die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion schon relativ gut vorstellbar sind, bestehen deutliche Wissenslücken zu den Interaktionen der verschiedenen physikalischen und chemischen Klimaelemente. Nur mit dieser Kenntnis lassen sich realistischere Prognosen der Auswirkungen des Klimawandels auf die lokale, regionale und letztlich globale Agrarproduktion treffen. Im Gegensatz zu vielen Ländern mit bereits heute ungünstigen Klimabedingungen und mit geringem Entwicklungsstatus sollte Mitteleuropa aufgrund der insgesamt geringen Vulnerabilität und der guten Ressourcenausstattung in der Lage sein, mögliche negative Auswirkungen der Klimaveränderungen – und hier vor allem die allmählichen Veränderungen mittlerer Klimabedingungen – zu meistern sowie sich daraus eröffnende Chancen sogar zu nutzen. Besondere Risiken entstehen aber generell aus der zunehmenden Klimavariabilität und insbesondere durch zunehmend häufigere extreme Witterungsereignisse. Langfristig sind darüber hinaus auch negative Effekte durch eine noch stärkere Zunahme der globalen Durchschnittstemperaturen (T>3–40 °C) zu erwarten. Die unterschiedlichen regionalen Auswirkungen der Klimaveränderungen insgesamt werden die gegenwärtigen Unterschiede in den Produktionspotentialen zwischen verschiedenen Regionen vergrößern.

Literatur

ABILDTRUP, J. & M. GYLLING (2001): Climate change and regulation of agricultural land use: A literature survey on adaptation options and policy measures. Danish Institute of Agricultural and Fisheries Economics, SJFI, 52 pp.

BARNABAS, B., K. JAGER, & A. FEHER (2008): The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. Plant Cell Environ. 31 (1), 11-38.

BENDER, J. & H. J. WEIGEL (2011): Changes in atmospheric chemistry and crop health: a review. Agriculture for Sustainable Development 31: 81-89.

CHAKRABORTY, S., VON TIEDEMANN A. & P. S. TENG (2000): Climate change: potential impact on plant diseases. Environmental Pollution 108: 317–326.

DAVIES, W. J. (2006): Responses of plant growth and functioning to changes in water supply in a changing climate. In: Morrison, J. I. L. & M. D. Morecroft (eds.) Plant Growth and Climate Change. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 96-117.

DEFRA (Department of Environment, Food and Rural Affairs) (2000): Climate Change and Agriculture in the United Kingdom. 71 pp. Zugriff: http://www.defra.gov.uk/farm/environment/climate-change/impact/climate.pdf.

FELZER, B., REILLY, J., MELILLO, J., KICKLIGHTER, D., SAROFIM, M., WANG, C., PRINN, R. & Q. ZHUNANG (2005): Future effects of ozone on carbon sequestration and climate change policy using a global biogeochemical model. Climatic Change 73, 345-373.

FUHRER, J. (2003): Agroecosystem responses to combinations of elevated CO_2, ozone, and global climate change. Agriculture Ecosystems and Environment 97: 1-20.

IPCC (2013) Climate Change 2014: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to AR5. Zugriff: http://www.ipcc-wg2.org/.

JUROSZEK, P. & A. VON TIEDEMANN (2013): Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: a review of approaches, challenges, research gaps, key studies, and concepts. Journal of Agricultural Science 151 (2): 163-188

LAWLOR, D. W. & R. A. C. MITCHELL (2000): 4. Crop Ecosystem Responses to Climatic Change: Wheat. In: Reddy K.R. & Hodges, H.F. (Hrsg.). Climate Change and Global Crop Productivity. CABI Publishing, New York, USA, 57-80.

MORRISON, J. I. L. & D. W. LAWLOR (1999): Interactions between increasing CO_2 concentration and temperature on plant growth. Plant Cell and Environment 22: 659-682.

MÜNZING, K & M. G. LINDHAUER (2006): Die Qualität der deutschen Weizenernte. 2. Teil: Mahl- und Backqualität von Weizensorten und –partien in der Bundesrepublik Deutschland. Mühle + Mischfutter 143, 664-671.

PORTER, J. R. & M. GAWITH (1999): Temperatures and the growth and development of wheat: a review. European Journal of Agronomy 10: 23-36.

PORTER, J. R. & M. A. SEMENOV (2005): Crop responses to climatic variation. Philosophical Transactions of the Royal Society of London B 360 (1463), 2021-2035.

ROGASIK, J., DÄMMGEN, U. & M. LÜTTICH (1996): Ökosystemare Betrachtungen zum Einfluss klimatischer Faktoren und veränderter Intensität der Landnutzung auf Quellen- und Senkeneigenschaften von Böden für klimarelevante Spurengase. In: 1.Workshop, Klimaänderung und Landbewirschaftung - Landwirtschaft als Verursacherin und Betroffene. Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 165: 87-104.

ROSENZWEIG, C. & D. HILLEL (1998): 3. Carbon Dioxide, Climate Change and Crop Yields. In: Rosenzweig, C. & D. Hillel (Hrsg.). Climate Change and the Global Harvest. Potential Impacts of the Greenhouse Effect on Agriculture. Oxford University Press, Oxford, 70-100.

WEIGEL, H. J. (2011): Klimawandel - Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. Landbauforsch SH 354:9-28.

WHEELER, T. R., BATTS, G. R., ELLIS, R. H., HADLEY, P. & J. I. L. MORISON (1996): Growth and yield of winter wheat (Triticum aestivum) crops in response to CO_2 and temperature. Journal of Agricultural Science 127, 37-48.

Kontakt:
Prof. Dr. Hans Joachim Weigel
Dr. Remy Manderscheid
Thünen-Institut für Biodiversität
hans.weigel@ti.bund.de
remy.manderscheid@ti.bund.de

Weigel, H.-J. & R. Manderscheid (2014): Temperaturen und Niederschläge verändern sich: Wie wirkt dies auf die Landwirtschaft und welche Anpassungsmöglichkeiten bestehen? In: Lozán, J. L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektron. Veröffent. (Kap. 4.7) - www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de.