

© Schwerpunkt »Welt im Fieber – Klima & Wandel«

Klimafolgen und Klimaanpassungsoptionen in der Landwirtschaft in Deutschland – ein Überblick

von Claudia Heidecke, Cathleen Frühauf, Sandra Krenzel-Horney
und Mareike Söder

Der Klimawandel hat bereits in den letzten Jahren deutlich die Nahrungsmittelproduktion und die Ernährungssicherheit weltweit beeinträchtigt, insbesondere aufgrund von Erwärmung, sich ändernder Niederschlagsmuster und einer höheren Häufigkeit extremer Wetterereignisse.¹ Damit steht die Landwirtschaft nicht nur vor der Herausforderung, einen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasen zu leisten, sondern auch, sich an verändernde Klimabedingungen anzupassen. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Entwicklungen von für die hiesige landwirtschaftliche Produktion relevanten Wetterereignissen und klimatischen Bedingungen in Deutschland, verdeutlicht die Wahrnehmung und die Bedeutung des Klimawandels für deutsche landwirtschaftliche Betriebe und fasst einige wichtige Anpassungsmöglichkeiten zusammen.

Der globale Klimawandel ist auch in Europa spürbar und wirkt sich – nicht erst in ferner Zukunft – bereits heute in vielerlei Hinsicht auf die landwirtschaftliche Produktion aus. In einigen Regionen der Welt, insbesondere in niedrigen Breiten, sind landwirtschaftliche Erträge mancher Kulturen bereits negativ beeinflusst worden, während in Regionen höherer Breiten landwirtschaftliche Erträge durch steigende Temperaturen und höhere CO₂-Konzentrationen zum Teil auch steigen können, wie auch die Europäische Umweltagentur aufzeigen konnte.²

In Deutschland hat insbesondere das trockene und heiße Jahr 2018, welches das wärmste Jahr seit 1881 war, die Vulnerabilität der Landwirtschaft gegenüber dem Klimawandel verdeutlicht. Daten aus der Erntestatistik zeigen, dass die Hektarerträge bei Getreide (ohne Körnermais) 2018 um 16 Prozent unter dem dreijährigen Mittel der Vorjahre lagen (mit erheblichen regionalen Unterschieden) und dadurch ein Schaden von rund 770 Millionen Euro entstanden ist.³

Im Folgenden stellen wir die für die Landwirtschaft in Deutschland relevanten Wetterereignisse und klimatischen Bedingungen dar und zeigen neben den aktuellen und zu erwartenden Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Betriebe Optionen auf, wie sich die Betriebe an die sich verändernden klimatischen Rahmenbedingungen besser anpassen können.

Klimawandel und Landwirtschaft

Das bisher wärmste in Deutschland beobachtete Jahr seit dem Beginn regelmäßiger Aufzeichnungen im Jahr 1881 war mit einer Mitteltemperatur von 10,5 Grad Celsius das Jahr 2018. Insgesamt war jedes der letzten drei Jahrzehnte wärmer als jedes beliebige vorangegangene Jahrzehnt seit Beginn der Messungen. Die Ergebnisse von Klimaprojektionen im *Fünften Sachstandsbericht* des Weltklimarats⁴ lassen einen weiteren Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwarten. Neun der zehn wärmsten Jahre in Deutschland wurden nach dem Jahr 2000 beobachtet. Über die Jahre gesehen stiegen die Anzahl der heißen Tage und Tropennächte pro Jahr kontinuierlich an. Zudem wird eine Umverteilung der Niederschläge innerhalb des Jahres beobachtet: zunehmend trockene Sommer mit zahlreichen konvektiven Ereignissen und eine deutliche Zunahme der Niederschläge in den Wintermonaten.⁵ Dies sind nur einige Phänomene, die darauf hindeuten, dass sich innerhalb des Klimasystems Veränderungen abspielen, die Deutschland und die deutsche Landwirtschaft betreffen.

Temperatur

Von 1881 bis 2019 ist das Jahresmittel der Lufttemperatur für Deutschland um 1,6 Grad Celsius angestiegen.⁶ Basierend auf den vorliegenden Klimaprojektionen

ist zukünftig mit einer weiter ansteigenden mittleren Lufttemperatur zu rechnen. Die vorliegenden Klima-projektionen zeigen für das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) einen Anstieg in Deutschland von plus 3,1 bis plus 4,7 Grad Celsius zum Vergleichszeitraum 1971 bis 2000 für die ferne Zukunft (2071 bis 2100). Das Szenario einer konsequenten Umsetzung von weltweiten Klimaschutzmaßnahmen (RCP2.6) kann den Anstieg auf plus 0,9 bis plus 1,6 Grad Celsius begrenzen. Besonders deutliche Zunahmen sind im Auftreten extrem hoher Temperaturen und Hitzewellen zu erwarten, während Frostereignisse voraussichtlich seltener auftreten. In den meisten Regionen ist mit einem weiteren sichtbaren Anstieg von Sommertagen, heißen Tagen und Tropennächten zu rechnen. Dagegen wird die Anzahl an Frost- und Eistagen in allen Regionen, wie bereits in den letzten Jahrzehnten, weiter zurückgehen.

Niederschlag

Der Niederschlag unterliegt sehr starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Deutschlandweit hat die jährliche Niederschlagshöhe seit 1881 um 74 Millimeter bzw. neun Prozent relativ zur Referenzperiode 1961 bis 1990 zugenommen, wobei sich dieser Anstieg zum größten Teil durch die Zunahme der Winterniederschläge erklären lässt.⁷ Zukünftig nehmen die Niederschlagssummen im Mittel voraussichtlich leicht zu – insbesondere im Winter, während im Sommer zukünftig auch Niederschlagsabnahmen möglich sind.

Die Entwicklung für das Frühjahr sind noch unsicher, da die Beobachtungen der letzten Jahre einen Rückgang zeigen, während die Klimamodelle von einer leichten Zunahme ausgehen.⁸ Außerdem ist zukünftig mit häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen zu rechnen.

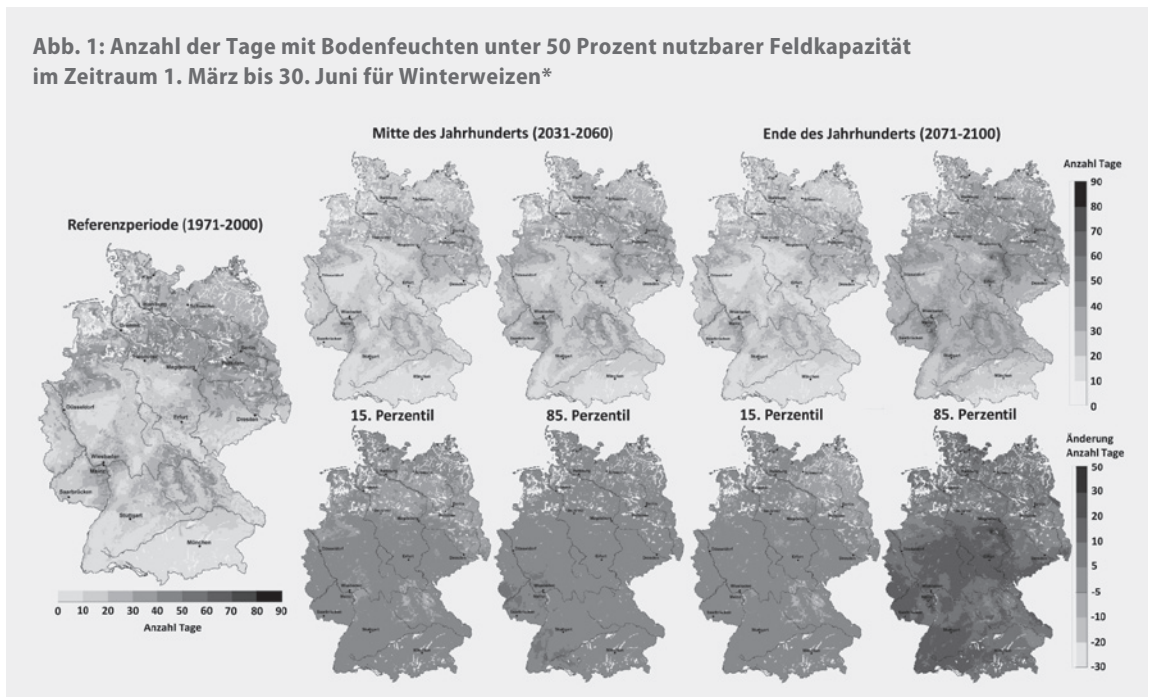
Kohlendioxid (CO₂)

Der anthropogene Treibhauseffekt wird durch die Emission von Treibhausgasen in die Atmosphäre verursacht. Mit der zunehmenden Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre verbleibt mehr Wärme und damit auch zusätzliche Energie in der Atmosphäre. Dieser Prozess erhöht den Energiegewinn der Erdoberfläche und führt zu deren weiterer Erwärmung.

Aktuell erreicht die atmosphärische Konzentration von CO₂ beispielsweise den höchsten Wert in den letzten 800.000 Jahren und auch die anderen Treibhausgase erreichen Konzentrationen, wie sie in dieser Zeitspanne nicht beobachtet wurden.⁹ Die atmosphärische Konzentration von CO₂ lag nach Angaben der amerikanischen Wetter- und Ozeanografiebehörde NOAA im September 2020 bei einem neuen Rekordwert von 411,3 parts per million (ppm).¹⁰ Die Messungen am Mauna Loa Observatorium auf Hawaii zeigen über den Messzeitraum seit 1959 eine immer schnellere Zunahme der CO₂-Konzentration, die aktuell bei etwas über 2,4 ppm pro Jahr (Mittelwert 2010 bis 2019) liegt.

Die steigende CO₂-Konzentration beeinflusst das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen. Zu

Abb. 1: Anzahl der Tage mit Bodenfeuchten unter 50 Prozent nutzbarer Feldkapazität im Zeitraum 1. März bis 30. Juni für Winterweizen*



* Referenzperiode (1971 bis 2000) und Szenario RCP8.5 (2031 bis 2060 und 2071 bis 2100), Modell AMBAV, Böden BÜK1000.¹¹

nennen ist hier zum einen der CO₂-Düngeeffekt, der unter optimalen Bedingungen zu einem stärkeren Wachstum führen kann, und zum anderen die bessere Wasserausnutzungseffizienz. Durch die damit verbundene geringere Abgabe von Wasser durch die Verdunstung führt dies aber gleichzeitig zu einer Zunahme der Blattoberflächentemperatur (fehlende Verdunstungskühlung).

Extremwetter

Die globale Erwärmung schreitet auch in Zukunft weiter fort und damit ändern sich auch die klimatologischen Gegebenheiten in Deutschland. Neben der Veränderung der Mittelwerte ist dabei insbesondere auch mit dem vermehrten Auftreten von Extremwetterereignissen und -lagen zu rechnen. Der Jahrhundertssommer 2003 wird in Zukunft zu einem durchschnittlichen Ereignis werden.¹² Bei den Starkniederschlägen nehmen besonders seltene Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zu als weniger extreme Ereignisse. Es wird bereits in den Beobachtungen der letzten Jahre sichtbar, dass sich ein immer größerer Anteil am Gesamtniederschlag auf wenige niederschlagsreiche Tage konzentriert.

Auswirkungen auf die Landwirtschaft

Verschiebung von Vegetationsperioden

Die Temperatur steuert viele Prozesse in den Pflanzen. Durch den Klimawandel und die damit steigenden Temperaturen verschieben sich die Entwicklungsphasen der Pflanzen. Phänologische Beobachtungen zeigen bereits jetzt einen früheren Vegetationsbeginn. Dies hat zur Folge, dass empfindliche Pflanzenphasen früher im Jahr auftreten und gleichzeitig, obwohl die Winter milder werden, die Spätfrostgefährdung zunehmen kann. Ein weiterer Effekt durch die steigenden Temperaturen ist, dass die einzelnen Entwicklungsphasen schneller durchlaufen werden. Dies kann z. B. beim Getreide zu einer Verkürzung der Kornfüllungsphase führen und den Ertrag beeinflussen.¹³

Auswirkung auf Bodenfeuchte

Der frühere Vegetationsbeginn und die höheren Temperaturen innerhalb der Vegetationsperiode erhöhen den Wasserverbrauch der Pflanzen. Selbst wenn die Niederschlagsmengen gleichbleiben, führt die höhere Verdunstung zu einer Verringerung der Bodenfeuchte. Nehmen die Sommernie-

derschläge ab, verschärft dies die Situation zusätzlich. Die Wahrscheinlichkeit für Starkregen nimmt zu. Fällt dieser auf trockenen Boden, geht ein großer Teil durch Oberflächenabfluss verloren und steht den Pflanzen damit nicht zur Verfügung und führt gleichzeitig auch zu Bodenerosion. Modellierungen zur Abschätzung der zu erwartenden Änderungen der Bodenfeuchte wurden für das Szenario RCP8.5 durchgeführt. Abbildung 1 zeigt, wie häufig im Zeitraum März bis Juni in der Referenzperiode (1971 bis 2000) und in der nahen und fernen Zukunft (2031 bis 2060 bzw. 2071 bis 2100) der Schwellenwert von 50 Prozent der nutzbaren Feldkapazität (nFK) unterschritten wird.

Auswirkung auf Erträge

Die direkten Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge in Deutschland sind nicht eindeutig vorherzusagen. Nach Simulationen und Auswertungen der Europäischen Umweltagentur¹⁴ sind die Auswirkungen für die zentralen und nördlichen europäischen Regionen weniger eindeutig und können sich von Region zu Region stark unterscheiden. Abbildung 2 zeigt die Ertragsentwicklung der wichtigsten Getreidesorten in den letzten 20 Jahren in Deutschland. Die trockenen Jahre 2003 und 2018 sind deutlich in verringerten Erträgen zu sehen, jedoch unterschiedlich zwischen den Sorten (hier insbesondere zwischen Sommergersten und Wintergersten).

Um spezifischer die Auswirkungen von klimatischen Veränderungen auf Erträge der deutschen Landwirtschaft abzuleiten, wurden für Winterweizen¹⁵ und für Weizen, Gerste, Raps, Körnermais, Kartoffeln und Zuckerrüben¹⁶ auf Basis historischer Ertragsentwicklungen die Wirkung von extremen Wetterereignissen auf Erträge regional und national geschätzt. Hierfür wurde die regionale Extremwetterhäufigkeit des Zeitraums 1961 bis 2015 zugrunde gelegt. Nach

Abb. 2: Landwirtschaftliche Erträge einiger Getreidesorten zwischen 2000 und 2019 in Dezitonnen je Hektar (dt/ha).¹⁷

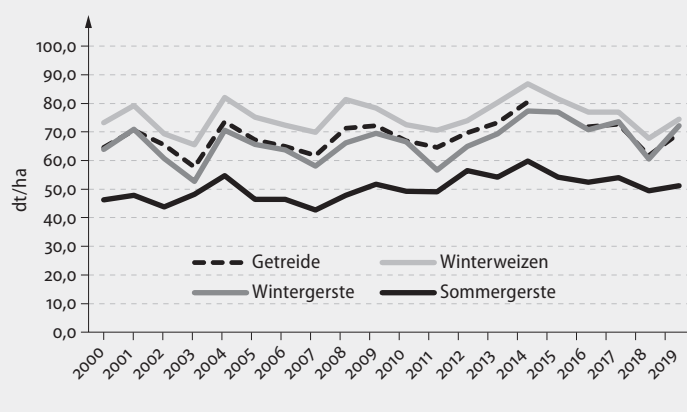
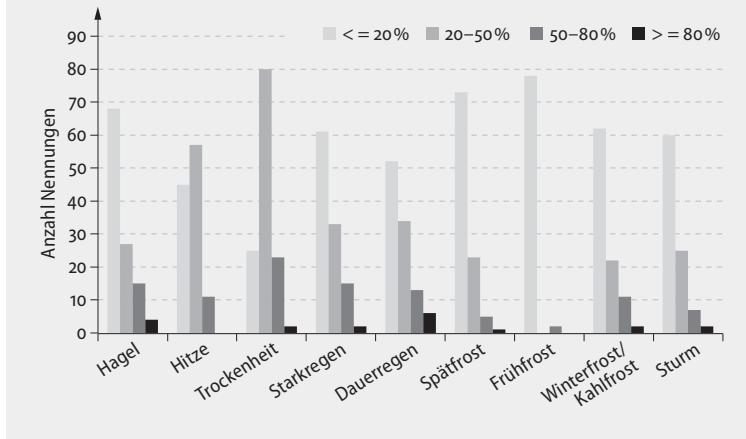


Abb. 3: Praktikerbefragung (n=143) zum Schadpotenzial aufgetretener Extremwetterereignisse und -lagen im Ackerbau *



* (Verbundprojekt EMRA, Befragungszeitraum 30. Januar bis 14. August 2018).¹⁸

den Ergebnissen des Thünen-Instituts¹⁹ führen Kahlfröstmereignisse sowie Trockenheit und Dürre zu den größten Ertragsverlusten von Winterweizen in den letzten Jahrzehnten. Die Situation bei Wintergerste stellt sich insgesamt ähnlich dar. In der Kartoffelproduktion verursachte extreme Sommertrockenheit die größten Ertragseinbußen für Betriebe ohne Bewässerung, gefolgt von Spätfrost und Staunässe. Am Beispiel von Äpfeln konnte in einer anderen Studie²⁰ gezeigt werden, dass neben mengenmäßigen Ertragsverlusten, auch mit qualitativen Ertragsverlusten durch extreme Temperaturen zu rechnen ist.

Des Weiteren wurde in einem vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) geförderten Verbundprojekt²¹ eine Onlinebefragung zur Betroffenheit durch Extremwetterlagen, von denen in vielen Fällen ein besonders hohes Schadensrisiko ausgeht, durchgeführt. Die deutschlandweite Auswertung ergab, dass von insgesamt neun abgefragten Extremwetterereignissen und -lagen im Ackerbau, Trockenheit, Hitze und Starkregen in den letzten Jahren das höchste Potenzial für Ertrags- und Qualitätsverluste hatten (Top 3). Abbildung 3 zeigt das von der jeweils betrachtenden Wetterlage abhängige, in den befragten Betrieben aufgetretene Schadpotenzial.

Weitere Auswirkungen

Neben den direkten Auswirkungen auf die Vegetationsperiode, die Bodenfeuchte und den Ertrag können auch weitere Folgen für die Landwirtschaft durch die klimatischen Veränderungen entstehen. Die Relevanz bereits etablierter Krankheiten, Schädlinge und Unkräuter sowie Schädner kann sich verändern/verschieben und neue Arten können sich etablieren.²² Eine Quantifizierung der Auswirkungen ist schwierig,

denn nicht nur die Schadorganismen selbst sind betroffen, sondern ebenfalls ihre als Nützlinge bezeichneten Gegenspieler.²³ Durch extreme Niederschlagsereignisse oder längere Trockenperioden können auch Bodenerosion, Nährstoffauswaschung sowie Verlust an biologischer Vielfalt – inklusiver Agrobiodiversität – zunehmen.²⁴

Optionen für Klimaanpassungen

Insgesamt kann sich die Landwirtschaft mit einer Vielzahl an kurz- bis langfristig umsetzbaren Optionen an den Klimawandel anpassen, sowohl an durchschnittliche Klimaveränderungen als auch

an extreme Wetterereignisse. Die Wirksamkeit und Umsetzbarkeit hängen dabei, wie bereits für die Betroffenheit aufgeführt, von vielen Faktoren ab. Die Herausforderung in der Anpassung an sich verändernde klimatische Bedingungen liegt vor allem in der steigenden Variabilität der Bedingungen und damit steigenden Unsicherheiten für die Landwirtschaft.²⁵ In Bezug auf Klimaanpassungsoptionen kann man zwischen Ex-ante- und Ex-post-Anpassungsmaßnahmen unterscheiden.²⁶ Ex-ante-Maßnahmen dienen dazu, Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion und Erträge abzumildern oder zu vermeiden, z. B. durch die Verwendung von angepassten Sorten oder veränderte Produktionstechniken. Auch Maßnahmen zur Risikostreuung, etwa durch die Diversifizierung der Fruchtfolgen werden unter ex-ante-Maßnahmen subsumiert.²⁷ Ex-post-Maßnahmen sollen bereits eingetretene Auswirkungen auffangen, etwa durch die Kompensation von Ertragsausfällen. Darüber hinaus kann man die Akteure und räumliche Ebene der Anpassungsoptionen unterscheiden, angefangen von betrieblichen Anpassungsmöglichkeiten, über marktbasierende oder finanzielle Anpassungsoptionen und regionale und überregionale Maßnahmen. – Im Folgenden werden einige betriebliche Anpassungsmöglichkeiten sowie regionale und überregionale Maßnahmen vorgestellt.

Betriebliche Anpassung der Produktionssysteme

Durch eine Anpassung von Produktionssystemen können landwirtschaftliche Betriebe potenziellen physischen Ertrags- und Qualitätsverlusten vorbeugen, aber auch den ökonomischen Schaden durch z. B. Diversifizierung oder Versicherungen begrenzen. Dabei

spielen bei der Wahl von Maßnahmen die Betriebsstrukturen, die angebauten Kulturen, standortspezifische Auswirkung des Klimawandels sowie weitere regionale Voraussetzungen eine Rolle.²⁸ Darüber hinaus kann der institutionelle Rahmen die betriebliche Anpassung fördern oder behindern.

Regionalspezifische Lösungen werden unter anderem in Forschungsprojekten wie z. B. im Projekt der Bodenseestiftung AgriAdapt²⁹ oder im Projekt EMRA³⁰ erarbeitet, aber auch durch die Beratung der Länder untersucht und in die Praxis kommuniziert. In der Agenda Klimaanpassung des BMEL³¹ werden die unterschiedlichen Ebenen, Maßnahmen und Möglichkeiten der Bundesländer in Deutschland sichtbar, Anpassungen der Landwirte zu unterstützen.

Anpassung durch Züchtungsfortschritt

Zu den überbetrieblichen Ex-ante-Anpassungsmaßnahmen zählt auch die Pflanzenzucht und Züchtungsforschung zur Bereitstellung leistungsfähiger und resistenter Kulturpflanzenarten und -sorten. Der Bereich ist jedoch sehr komplex und kann hier nicht detailliert vorgestellt und diskutiert werden. In der bisherigen Forschung ist jedoch deutlich geworden, dass es erforderlich sein wird, die Physiologie der Ertragsbildung und -stabilität in ihrer gesamten Breite im Blick zu behalten.³² Dabei ist neben der Erforschung von Genvarianten auch in Zukunft die Bereitstellung von genetisch reichhaltigen Genpools entscheidend.

Wassermanagement

Ein effizientes Wassermanagement in der Landwirtschaft ermöglicht nicht nur, Trockenheit, also zu wenig Wasser, zu bewältigen, sondern auch zu viel Wasser z. B. durch Starkniederschlagsereignisse. Effiziente Wassermanagementlösungen können zum einen auf den landwirtschaftlichen Betrieben umgesetzt werden. Hier spielen beispielsweise effiziente und wasser- und energiesparende Bewässerungssysteme, ein effizientes Management von Düngung und Bewässerung, pflanzenbauliche Anpassungen wie Zwischenfrüchte, Bodenbearbeitungsmaßnahmen wie etwa eine geringe Intensität der Bodenbearbeitung und eine Erhöhung des Bedeckungsgrads des Bodens eine Rolle.³³ Zum anderen ist Wassermanagement aber auch eine regionale und überregionale Aufgabe. Hierzu gehören beispielsweise eine gezielte Grundwasseranreicherung für trockene Gebiete, die Regulierung des Wasserhaushaltes durch Änderungen der Stauregulierung in entwässerten Gebieten zur Reduzierung des Wasserbedarfs in Trockenperioden,³⁴ Wasserregulierung durch Stauanlagen oder Wasserrückhalteoptionen zur Bewässerung.³⁵ Die Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen trägt auch zum landwirtschaftlichen Wassermanagement bei. So reguliert z. B. die Verord-

nung des Europäischen Parlaments vom 7. April 2020 die Wasserwiederverwendung in der Landwirtschaft. Zukünftig wird in Deutschland ein integriertes, nachhaltiges und über die Sektoren abgestimmtes Wassermanagement notwendiger werden, um die verstärkte Wassernachfrage, sich abzeichnende Zielkonflikte und schwankende Wasserangebote zu meistern.

Finanzielle und regionale/überregionale Maßnahmen

Prinzipiell gehört Risikomanagement zu den Kernaufgaben eines jeden Unternehmens. Je stärker der Staat allerdings mit öffentlichen Finanzmitteln finanzielle Schäden der Landwirte begleicht, desto mehr wird die Umsetzung vorbeugender Anpassungsmaßnahmen gehemmt. Nach der OECD sollte sich die Rolle staatlichen Handelns für eine wirksame Anpassungspolitik zur Stärkung der landwirtschaftlichen Resilienz im Kontext multipler Risiken auf extreme, unregelmäßige und katastrophale Ereignisse, welche signifikanten Schaden für alle oder zumindest sehr viele Landwirte bedeuten und deren Regulierung außerhalb der Kapazitätsgrenzen der Landwirte und Märkte liegen, konzentrieren.³⁶ Dabei sollte der Staat weiterhin Anreize setzen, um normale Betriebsrisiken zu bewältigen und in das Risikomanagement zu investieren.

Fazit

Dieser Beitrag lieferte einen Überblick über die wichtigsten Aspekte für den Bereich Klimafolgen und Klimaanpassung in der Landwirtschaft, die jeweils separat ausführlicher diskutiert werden könnten. Es wird deutlich, dass insbesondere extreme Wetterlagen zunehmen werden. Diese können zum Teil erhebliche negative Auswirkungen auf die Landwirtschaft und landwirtschaftliche Erträge und Erntequalitäten haben. Die durchschnittliche Veränderung von Klimaverhältnissen kann sich hingegen positiv oder negativ auswirken, je nach Region, Frucht und Betriebsform. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Landwirtschaft werden zudem andere Regionen der Erde deutlich stärker treffen als Deutschland. Trotzdem gilt es, sich möglichst effektiv anzupassen und mögliche Chancen zu nutzen. Neben vielen betrieblichen Anpassungsoptionen im Produktionsprozess können auch überregionale und staatliche Prozesse zur Anpassung beitragen. Im Rahmen der interdisziplinären Kontaktstelle Agrarmeteorologie arbeiten das Thünen-Institut, das Julius Kühn-Institut und der Deutsche Wetterdienst gemeinsam daran, den Erkenntnisfortschritt aus unterschiedlichen Fachrichtungen zu verdichten, um eine optimale Grundlage für politisches Handeln und eine breite Wissensbasis im Bereich der agrarmeteorologischen Forschung zu schaffen.

Anmerkungen

- 1 International Panel on Climate Change (IPCC): Summary for policymakers. In: Climate change and land: An IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. Geneva 2019.
- 2 Ebd. sowie European Environment Agency (EEA): Climate change adaptation in the agriculture sector in Europe. EEA Report No 04/2019. Luxembourg 2019.
- 3 Deutscher Wetterdienst (DWD): Zeitreihen und Trends: Temperaturanomalie (www.dwd.de/DE/leistungen/zeitreihen/zeitreihen.html). – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Trockenheit und Dürre 2018 – Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Trockenheit und Dürre 2018 – Überblick über Maßnahmen (www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/klimaschutz/extremwetterlagen-zustaendigkeiten).
- 4 International Panel on Climate Change (IPCC): Klimaänderung 2014: Synthesebericht. Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderungen (IPCC). Bonn 2016.
- 5 S. Brienen et al.: Klimawandelbedingte Änderungen in Atmosphäre und Hydrosphäre: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Szenarienbildung (SP-101) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertenetzwerks. 2020 DOI: 10.5675/ExpNBS2020.2020.02
- 6 Deutscher Wetterdienst (DWD): Nationaler Klimareport. 3. korrigierte Auflage. Potsdam 2020.
- 7 Ebd.
- 8 Deutscher Wetterdienst (DWD): Deutscher Klimaatlas. 2020 (www.deutscher-klimaatlas.de).
- 9 D. Lüthi et al.: High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. In: Nature 453/7193 (2008), pp. 379-382. DOI: 10.1038/nature06949. Zitiert bei Brienen et al. 2020 (siehe Anm. 5).
- 10 National Oceanic & Atmospheric Administration (NOAA): Monthly average Mauna Loa CO₂. 2020 (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/#global).
- 11 Quelle: Modellberechnungen des DWD (2020).
- 12 Lüthi et al. (siehe Anm. 9).
- 13 H. Gömann et al.: Landwirtschaft. In: Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven. Hrsg. von G. Brasseur, D. Jacob und S. Schuck-Zöller. Wiesbaden 2017, S. 184–191.
- 14 European Environment Agency (siehe Anm. 2).
- 15 H. Gömann et al.: Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen: Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Abschlussbericht: Stand 3. Juni 2015. Thünen Report 30. Braunschweig 2015.
- 16 C. Heidecke, F. Offermann und M. Hauschild: Abschätzung des Schadpotentials von Hochwasser- und Extremwetterereignissen für landwirtschaftliche Kulturen. Thünen Working Paper 76. Braunschweig 2017.
- 17 Quelle: Destatis 2000-2019: Wachstum und Ernte - Feldfrüchte - Fachserie 3 Reihe 3.2.1.
- 18 S. Kregel-Horney, M. Möller und T. Ulbrich: Onlineumfrage im Projekt EMRA, eigene Auswertungen (2020).
- 19 Gömann (siehe Anm. 13) und Heidecke et al. (siehe Anm. 16).
- 20 T. Dalhaus et al.: The effects of extreme weather on apple quality. In: Scientific Reports 10/1 (2020), pp. 1-7. <https://emra.julius-kuehn.de>.
- 21 S. Kregel et al.: Veränderungen im Auftreten von Pflanzenkrankheiten, Schädlingen und deren natürlichen Gegenspielern. In: J. L. Lozán et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Gesundheitsrisiken. Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Hamburg 2014 (www.warnsignale.uni-hamburg.de).
- 22 Gömann (siehe Anm. 13).

- 23 S. Schimmelpfennig et al.: Klimaanpassung in Land- und Forstwirtschaft – Ergebnisse eines Workshops der Ressortforschungsinstitute FLI, JKI und Thünen-Institut. Thünen Working Paper 86. Braunschweig 2018.
- 24 H. Webber et al.: No perfect storm for crop yield failure in Germany. In: Environmental Research Letters 15/10 (2020) 104012.
- 25 OECD: Strengthening agricultural resilience in the face of multiple risks. Paris 2020. DOI: 10.1787/2250453e-en.
- 26 Siehe z. B. AgriAdapt: Handbuch zur nachhaltigen Anpassung der Europäischen Landwirtschaft an den Klimawandel. 2019 (https://agriadapt.eu/descargas/MANUALagriadapt_ALE_BAJA.pdf).
- 27 Gömann (siehe Anm. 15).
- 28 <https://awa.agriadapt.eu/de>.
- 29 <https://emra.julius-kuehn.de>.
- 30 Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL): Agenda Anpassung von Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und Aquakultur an den Klimawandel. Stand 28. März 2019.
- 31 Siehe hierzu die Beiträge in Schimmelpfennig et al. (siehe Anm. 24).
- 32 Ebd.
- 33 O. Dietrich, M. Fahl und J. Steidl: Anpassung des Wasser-managements in stauregulierten Niederungsgebieten an zunehmende Wetterextreme – Möglichkeiten und Grenzen der Einflussnahme auf Wasserhaushaltsgrößen In: S. Kaden, O. Dietrich und S. Theobald (Hrsg.): Wassermanagement im Klimawandel – Möglichkeiten und Grenzen von Anpassungsmaßnahmen. KLIMZUG Band 3. München 2014, S. 161-189.
- 34 Gömann et al. (siehe Anm. 28).
- 35 OECD (siehe Anm. 26).



Dr. Claudia Heidecke
Wissenschaftlerin in der Stabsstelle Klima des Thünen-Instituts.

claudia.heidecke@thuenen.de



Dr. Cathleen Frühauf
Wissenschaftlerin am Zentrum für Agrarmeteorologische Forschung des Deutschen Wetterdienstes (DWD).

cathleen.fruehauf@dwd.de



Dr. Sandra Kregel-Horney
Wissenschaftlerin am Institut für Strategien und Folgenabschätzung des Julius Kühn-Instituts und betreut dort die Stabsstelle Klimaanpassung.

sandra.kregel-horney@julius-kuehn.de



Dr. Mareike Söder
Wissenschaftlerin in der Stabsstelle Klima des Thünen-Instituts.

mareike.soeder@thuenen.de