

Lauritz Lederer und Perdita Pohle

Der Klimawandel in Bayern

Aktuelle Klimatrends und Zukunftssimulationen im Hinblick auf die Landwirtschaft

Es wird wärmer. Auch in Bayern ist der Klimawandel mess- und nachweisbar. Besonders die Landwirtschaft ist von den Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Boden und Vegetation abhängig und reagiert deshalb besonders sensibel und vulnerabel auf Klimaveränderungen. Der vorliegende Beitrag analysiert und interpretiert zukünftige Entwicklungen des Klimas in Bayern, wobei die Erkenntnisse hauptsächlich auf der Auswertung aktueller regionaler Klimasimulationen basieren. Die Klimamodelldaten belegen, dass auch die Intensität weiterer Klimaänderungen in Bayern szenarienabhängig ist. Im pessimistischsten Szenario RCP-8.5 könnte die Temperatur zum Ende des Jahrhunderts 4 bis 5°C höher sein als im Vergleichszeitraum 1971–2000. Bereits im optimistischeren RCP-4.5 muss mit einer deutlichen Zunahme der Temperaturen sowie mit einem Anstieg der jährlichen Hitzetage um mehr als 10 Tage im Vergleich zu den Jahren 1971–2000 gerechnet werden. In Kombination mit Veränderungen der saisonalen Niederschläge wird auch die Gefahr vor Trockenstresssituationen steigen. Diese könnten in Zukunft nicht nur häufiger auftreten, sondern auch länger anhalten. Die daraus resultierenden Auswirkungen für die bayerische Landwirtschaft unterliegen gleichermaßen dieser Szenarienabhängigkeit und zeigen sich hinsichtlich ihrer Ausprägung in vielen Aspekten ambivalent. Einigen positiven und ertragssteigernden Faktoren, wie z.B. einer Verlängerung der Vegetationsperiode, steht eine Reihe negativer Aspekte gegenüber. Hierzu zählen drohende Ernteverluste und Ertragsschwankungen, die durch Schädlinge und Krankheiten, Hitze- und Strahlungsschäden sowie durch verminderte Bodenfruchtbarkeit entstehen können.

Schlagwörter: **Klimawandel, Klimasimulationen, Bayern, Landwirtschaft, Klimafolgen, Risikopotentiale**

1 Einleitung

Die Frage nach der zukünftigen Entwicklung des Klimas ist nicht nur eine der bedeutendsten der heutigen Weltgemeinschaft, sondern die Antwort liegt auch maßgeblich in ihrer Hand. Der Klimawandel ist eine globale Herausforderung, die auch auf dieser Maßstabsebene verstanden werden muss und sicherlich nur durch weltweite Zusammenarbeit bewältigt werden kann. Dies schließt allerdings die maßstäbliche Differenzierung des Klimawandels nicht aus, da sich Ursachen, Wirkungen und Folgen besonders auf regionalen oder lokalen Ebenen abspielen. Auch in Bayern lassen sich Änderungen des Klimas beobachten. Zum einen wird dies im Abschmelzen der bayerischen Gletscher und der Erwärmung bzw. dem Auftauen des Permafrostes an der Zugspitze sichtbar (KRAUTBLATTER/KELLERER-PIRKLBAUER/GÄRTNER-ROER 2018: 22ff.). Zum anderen belegen langfristige Messungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2020 a,b,c,d,e) eine signifikante Veränderung vieler atmosphärischer Klimaparameter. Beispielsweise waren die Jahresdurchschnittstemperaturen im Zeitraum 1991–2020 fast 1°C wärmer als in den Jahren 1961–1990. Zusätzlich lassen sich für viele Regionen Bayerns eine signifikante Zunahme der jährlichen Hitzetage sowie

eine Abnahme der Frost- und Schneetage während der letzten 60 Jahre nachweisen (DWD 2020d).

Basierend auf diesen aktuellen Beobachtungen und Messungen stellt sich immer drängender die Frage nach den zukünftigen Änderungen des Klimas in Bayern, vor allem im Hinblick auf die Landwirtschaft als elementarer und für Bayern wichtiger Wirtschaftszweig. Welche Veränderungen sind bei den Klimaparametern Temperatur und Niederschlag bis zum Ende des Jahrhunderts zu erwarten? Welche Entwicklung werden die Hitzetage und die Trockenperioden zukünftig nehmen? Zur Beantwortung dieser Fragen wurden im Rahmen einer Abschlussarbeit am Institut für Geographie der FAU Erlangen-Nürnberg auf Basis aktueller Klimamodelle Berechnungen zu zukünftigen Klimaszenarien durchgeführt und deren Ergebnisse analysiert und interpretiert. Die Auswahl der Klimaparameter erfolgte im Hinblick auf ihre Bedeutung für die Landwirtschaft, die als primärer Wirtschaftssektor mit dem populären Begriff der „Systemrelevanz“ gekennzeichnet werden kann, um die Verantwortung ihrer Gesellschaft-Umwelt-Funktion zu verdeutlichen: Ernährung auf der einen, Umweltschutz auf der anderen Seite. Zudem ist die Landwirtschaft der Wirtschaftsbereich, der maßgeblich von den Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Boden und Vegetation abhängig ist und dementsprechend

sensibel und vulnerabel auf Änderungen reagiert. Die im Folgenden präsentierten Zukunftssimulationen des Klimas in Bayern sollen deshalb speziell im Hinblick auf potentielle Auswirkungen auf die Landwirtschaft interpretiert und diskutiert werden.

2 Zur Methodik der Klimasimulationen

Die Basis aller Zukunftsmodellierungen des Klimas liegt in der Analyse und Vorhersage der Strahlungsantriebe, also in der Prognose der Energie, die das Klimasystem durch externe Antriebe, wie z.B. anthropogen verursachte Treibhausgasemissionen, in Zukunft aufnehmen wird. Die Frage nach der Entwicklung des Nettostrahlungsantriebs lässt sich allerdings weder konkret beantworten noch prognostizieren. Zu unsicher und vielfältig sind zukünftige (z.B. politische) Entwicklungen sowie die Verabschiedung und Einhaltung von multinationalen Klimaabkommen und -verträgen. Deshalb können durch die Wissenschaft auch keine exakten Vorhersagen erstellt werden, sondern stattdessen werden Zukunftsszenarien entwickelt, die die Konsequenzen verschiedener Handlungsoptionen

aufzeigen (RAHMSTORF/SHELLEHUBER 2019: 45). Für die Entwicklung solcher hypothetischer Zukunftsmodelle werden Szenarien zur Emission von Treibhausgasen (THG), Aerosolen sowie zu allen weiteren Faktoren des anthropogenen Einflusses auf das Klimasystem benötigt (VAN VUUREN et al. 2011: 6ff.). Die aktuelle Form dieser Szenarien sind die sog. repräsentativen Konzentrationspfade RCPs (Representative Concentration Pathways), die die möglichen Entwicklungen des Nettostrahlungsantriebes bis zum Jahr 2100 im Vergleich zum vorindustriellen Niveau beschreiben. Für den fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden vier RCP-Szenarien kanalisiert, die sich aus den in Tabelle 1 aufgeführten Komponenten zusammensetzen.

Während der RCP-2.6 das optimistischste Klimaszenario darstellt, das mit einer sofortigen aggressiven Emissionsminderung und einem Rückgang der THG-Konzentration rechnet, wird der RCP-8.5 als „worst-case-scenario“ beschrieben (HAUSFATHER/PETERS 2020: 618ff.), bei dem die Nutzung fossiler Rohstoffe weiter wie bisher ansteigt und der deshalb oft auch als „Weiter-wie-bisher-Szenario“ oder „business-as-usual-scenario“ tituliert wird. Gemessen an den Emissionen der vergangenen 15

Tab. 1: Entwicklung der einzelnen Komponenten der Konzentrationspfade bis zum Jahr 2100. Eigene Darstellung nach GOOSE (2015: 250ff.), MYHRE et al. (2013: 700ff.) und VAN VUUREN et al. (2011: 6ff.).

Entwicklung der Komponente	RCP-2.6	RCP-4.5	RCP-6.0	RCP-8.5
Weltbevölkerung	Anstieg auf 9 Mrd. bis 2060, danach konstant	Anstieg auf 9 Mrd. bis 2060, danach leicht abnehmend	Anstieg auf über 9 Mrd. – ab 2080 konstant	stetig steigend bis zu 12 Mrd. in 2100
Landwirtschaftsfläche Ackerland Grünland	hoch mittel	sehr niedrig niedrig	mittel sehr niedrig	mittel sehr hoch
Primärenergieverbrauch	Verdopplung bis 2100			Verdreifachung
Luftverschmutzung durch Aerosole	mittel bis niedrig	mittel	mittel	mittel bis hoch
Treibhausgasemissionen				
CO ₂ (Kohlenstoffdioxid)	sofortige starke Abnahme. Keine Nettoemissionen ab 2070	Abnahme auf konstant niedriges Niveau	steigend bis 2050, danach Rückgang auf momentanes Niveau	weiter stetig steigend
CH ₄ (Methan)	sofortige starke Abnahme	konstant bis 2050, danach Abnahme	steigend bis 2050, danach Abnahme	weiter stetig steigend
N ₂ O (Lachgas bzw. Stickstoffdioxid)	abnehmend	konstant	leicht steigend	weiter stetig steigend
Treibhausgas-konzentration in 2100	400 ppm CO _{2-eq} ¹	650 ppm CO _{2-eq}	850 ppm CO _{2-eq}	1370 ppm CO _{2-eq}

¹⁾ CO₂-Äquivalente (CO_{2-eq}) sind eine Maßeinheit zur Vereinheitlichung der Klimawirkung der unterschiedlichen Treibhausgase. Die Konzentration an CO_{2-eq} kann daher als „Gesamtwirkung“ aller Treibhausgase interpretiert werden.

Jahre sowie der gegenwärtigen Politik könnte laut SCHWALM, GLENDON und DUFFY (2020: 19656f) der RCP-8.5 besonders für die Mitte des Jahrhunderts ein zur Risikoabschätzung nützliches und plausibles Szenario darstellen.

Doch die Modellierung zukünftiger Szenarien ist nur ein erster wichtiger Schritt, um Aussagen zur künftigen Entwicklung des Klimas erstellen zu können. Im zweiten Schritt werden globale Klimamodelle entworfen, die mit den oben genannten Komponenten der jeweiligen RCPs gespeist werden, um schließlich Simulationen für die Zukunft berechnen zu können. Lokale oder regionale klimatische Schwankungen und Entwicklungen können aufgrund der begrenzten Auflösung der Globalmodelle allerdings nicht hinreichend genau simuliert werden. Deshalb müssen im dritten Schritt regionale Klimamodelle (vgl. z.B. KEUP-THIEL/HENNEMUTH/PFEIFER 2012: 6ff.) entworfen werden, die von diesen Globalmodellen angetrieben werden. Den Regionalmodellen liegt ein detaillierteres und höher auflösendes Geländemodell zugrunde, sodass kleinräumige Effekte, wie z.B. Niederschlagsmuster, besser abgebildet werden können. Allerdings können diese Regionalmodelle erst nach statistischen Korrekturverfahren belastbare Aussagen zu Klimaänderungen liefern. Zur Korrektur werden Messungen der beobachteten Realität (min. 30-jährige Zeitreihen) als Grundlage zur empirisch-statistischen Fehlerkorrektur (Bias-Adjustierung) genutzt, die wiederum mittels vieler verschiedener Methoden erfolgen kann (JACOB et al. 2007: 32ff.). Letztendlich stehen regionale Klimasimulationen zur Verfügung, die eine wesentlich höhere Auflösung als die Globalmodelle besitzen.

Die im Folgenden präsentierten und interpretierten Klimaprojektionsdaten wurden vom Bayerischen Landesamt für Umwelt (*LfU*) auf Anfrage zur Verfügung gestellt und entstammen entweder dem EURO-CORDEX-Projekt oder dem ReKliEs-DE-Projekt (*LfU* 2020). Sie wurden auf Basis der RCP-Szenarien erstellt und modernisieren dadurch frühere Zukunftssimulationen, die auf Basis des Special Report on Emissions Scenarios (SRES) entstanden sind (vgl. *LfU* 2012). Eine Bias-Adjustierung der Projektionsdaten wurde am Referat 81 des LfU auf Basis von Referenzdatensätzen für den Zeitraum 1971–2000 mit Hilfe des Quantile Mappings (vgl. TEUTSCHBEIN/SEIBERT 2012: 12ff.; MPELASOKA/CHIEW 2009: 1168ff.) durchgeführt. Die Daten decken das Gebiet des administrativen Bayerns ab und liegen als Rasterdatensatz im NetCDF-Format vor, wobei die räumliche Auflösung bzw. der Gitterabstand 5 km beträgt. Das Zeitintervall der Klimaprojektionsdaten reicht bis zum Jahr 2100 und besitzt dabei eine zeitliche Auflösung von einem Tag. Zur Verfügung stehen Werte zu Tagesmittel- und

Tageshöchsttemperatur sowie Daten zum Niederschlag pro Tag. Auf dieser Datengrundlage konnten mithilfe des Tools Climate Data Operators (CDO) sowie der Software R Berechnungen durchgeführt werden, die anschließend mit gängigen Tools (R und gnuplot) visualisiert wurden. Wie alle Modelle sind auch Klimamodelle vereinfachte Abbildungen der Wirklichkeit und können die Realität nicht vollends repräsentieren. Alle Modellierungen besitzen spezifische und methodenabhängige Besonderheiten, die an dieser Stelle nicht explizit diskutiert werden können (vgl. z.B. KRAUS/ZIMMER/MANGER 2013: 2). Daher werden die Klimasimulationen pro RCP als Ensemble zusammengefasst und dargestellt, wobei eine Mittelung der jeweiligen Modellläufe erfolgte. Insgesamt stehen acht Modellkombinationen für den RCP-2.6, sechs für den RCP-4.5 und zwölf für den RCP-8.5 zur Verfügung (vgl. Abbildung 1).

3 Regionale Klimasimulationen für Bayern

3.1 Temperatur

Abbildung 1 stellt Klimasimulationen zur Abweichung der Jahresdurchschnittstemperatur in Bayern im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 dar. Die Klimasimulationen divergieren besonders in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, denn nur im Falle des RCP-2.6 kann die Erwärmung in Bayern gestoppt werden. Lediglich in diesem Szenario wird sie am Ende des Jahrhunderts mit großer Sicherheit weniger als 2°C im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 betragen. Für die Mitte des Jahrhunderts muss selbst im optimistischsten Szenario RCP-2.6 mit einer Temperaturerhöhung um 1°C gegenüber 1971–2000 gerechnet werden. Für eine Verlangsamung des heute beobachtbaren Erwärmungstrends in Bayern muss zumindest das Szenario RCP-4.5 erreicht werden. In diesem Szenario wird zwar die Erwärmung in diesem Jahrhundert nicht gestoppt werden können, sie kann allerdings deutlich entschleunigt werden, wohingegen sie im RCP-8.5 schon bis 2050 um 2°C gestiegen sein könnte. Wenn sich der anthropogene Strahlungsantrieb weiter wie bisher entwickelt, dann hält auch die Erwärmung wie in den vergangenen Jahrzehnten an. Das RCP-8.5-Ensemble in Abbildung 1 suggeriert sogar, dass im pessimistischsten Szenario die Erwärmung in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts rascher vonstatten gehen wird als in der ersten Hälfte. Für diesen Fall ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass die Jahresdurchschnittstemperatur am Ende des Jahrhunderts um 4 bis 5°C höher sein wird als im Referenzzeitraum 1971–2000.

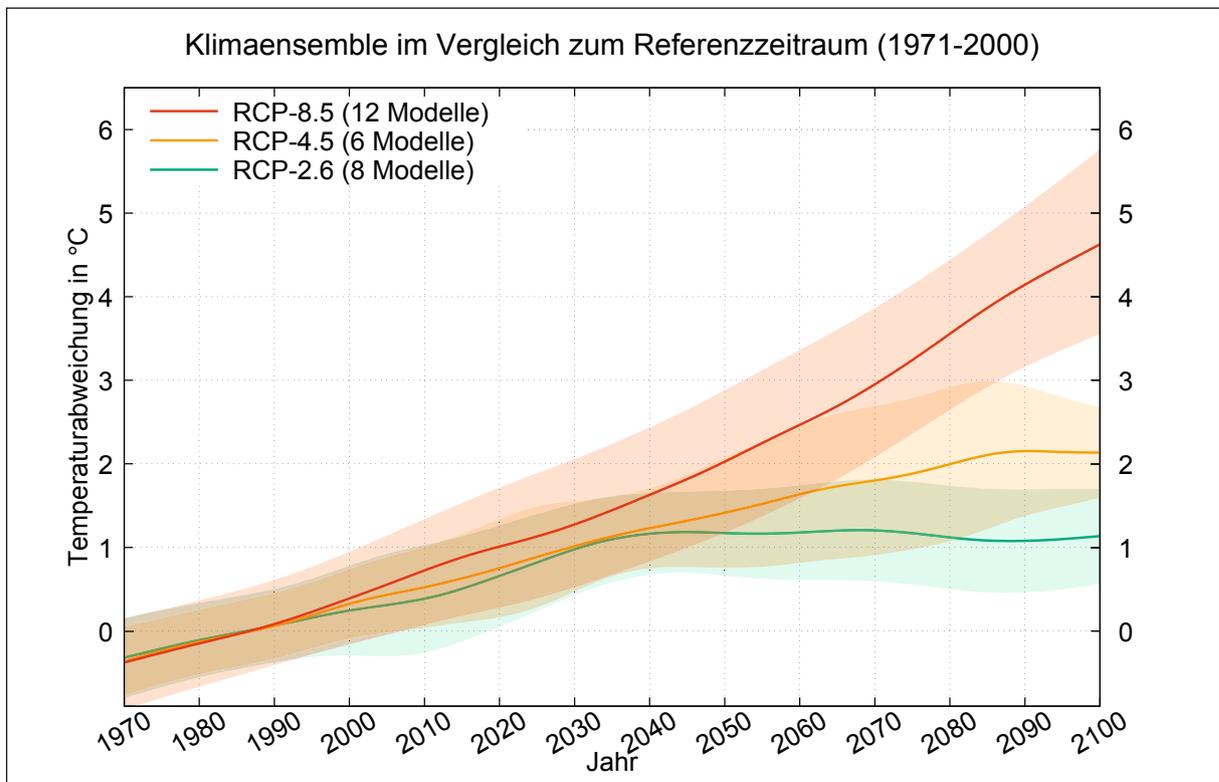


Abb. 1: Klimasimulationen zur Abweichung der Jahresdurchschnittstemperatur in Bayern im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000. Dargestellt sind Ensemblemittelwerte und -standardabweichungen aus allen einzelnen Modellläufen.
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

3.2 Hitzetage ($T_{\max} > 30^{\circ}\text{C}$)

Als Hitzetag wird ein Tag klassifiziert, an dem die Tageshöchsttemperatur die normativ festgelegte 30°C -Marke überschreitet (vgl. z.B. DWD 2020f). Anhand Abbildung 2 wird deutlich, dass die mittlere Anzahl an Hitzetagen in den kommenden 30 Jahren (2021–2050) sowohl im RCP-4.5 als auch im RCP-8.5 in vielen bayerischen Regionen im Mittel um 5 bis 10 Tage und in einigen Gebieten sogar um mehr als 10 Tage zunehmen könnte. Längerfristig betrachtet (2071–2100) divergieren auch hier die Simulationen je nach RCP stark voneinander. Im pessimistischsten Szenario (RCP-8.5) kann in vielen Regionen eine mittlere Zunahme von weit über 25 Hitzetagen pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet werden. Die räumliche Verteilung der Zunahme der Hitzetage scheint sich besonders auf die Regionen Mittel- und Unterfrankens sowie auf Gebiete entlang der Donau zu konzentrieren. In den Gebirgs- und Mittelgebirgsregionen (Alpen, Bayerischer Wald, Fichtelgebirge, Fränkische Alb) ist eine geringere Zunahme der Hitzetage zu erkennen, bedingt durch die per se

niedrigeren Tageshöchsttemperaturen in höheren Lagen und die Definition von Hitzetagen mit Temperaturen über 30°C . Dies bedeutet aber nicht, dass in den Gebirgen Bayerns die Tageshöchsttemperaturen weniger stark zunehmen als im Flachland. Ganz im Gegenteil wird bei weiterer Analyse sogar deutlich, dass die Gebirgsregionen überdurchschnittlich stark vom Klimawandel betroffen sind (LfU 2020).

Neben der räumlichen Verteilung sind besonders die interannuellen Schwankungen der Hitzetage interessant. Als Maß für diese interannuellen Schwankungen sowie zur Abschätzung der Spannweite der einzelnen Klimasimulationen wurde die Bandbreite der Hitzetage für das Gebiet Mittelfrankens genauer untersucht. Hierfür wurde eine räumliche Mittelung der Hitzetage über Mittelfranken für jede einzelne Klimasimulation des RCP-8.5 durchgeführt. Anschließend wurden für jede Klimasimulation der Mittelwert und die Standardabweichung für die Zeiträume 2011–2040, 2041–2070 und 2071–2100 gebildet. In Abbildung 3 ist die Zunahme der mittleren Anzahl an Hitzetagen pro Jahr relativ zum Zeitraum 1971–2000 für das Gebiet Mittelfrankens dargestellt. Farblich gekennzeichnet sind die verwendeten Regionalmodelle, die teilweise von verschiedenen Globalmodellen angetrieben werden. Sie sind aufgrund der Kombinationen mit den

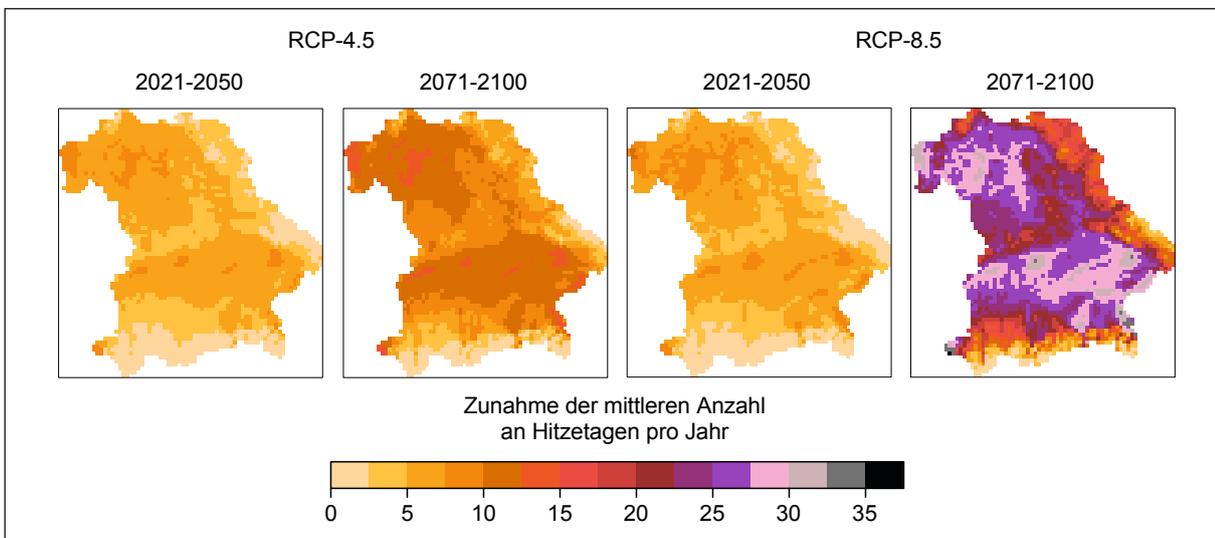


Abb. 2: Zunahme der mittleren Anzahl an Hitzetagen pro Jahr in Bayern im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000. Dargestellt sind die Ensemblemittelwerte aus den verfügbaren Modellkombinationen.
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

zugrundeliegenden Globalmodellen mehrfach gelistet und können unterschiedliche Ergebnisse zeigen.

Aus Abbildung 3 lassen sich zwei zentrale Aspekte herauslesen. Zum einen nimmt die Bandbreite zwischen den einzelnen Klimasimulationen mit der Zeit zu, was anhand der zunehmenden Streuung der einzelnen Mittelwerte erkennbar ist. Die langfristigen Änderungen (2071–2100) können deshalb mit geringerer Sicherheit projiziert werden als die kurzfristigen Änderungen. Dennoch ist es als wahrscheinlich einzustufen, dass die Hitzetage in Mittelfranken im Mittel

um 25 Tage pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts zunehmen könnten, wenn das „worst-case-Szenario“ eintritt. Zum anderen nimmt die Standardabweichung der einzelnen Modelle ebenfalls mit der Zeit zu. Dies kann als Hinweis gedeutet werden, dass auch in Zukunft die interannuellen Schwankungen der Hitzetage ansteigen werden. Aus methodischer Sicht ist darüber hinaus interessant, dass die Kombinationen eines Regionalmodells mit verschiedenen Globalmodellen unterschiedliche Simulationen liefern können, die sich aber in ihrer Plausibilität nicht unterscheiden.

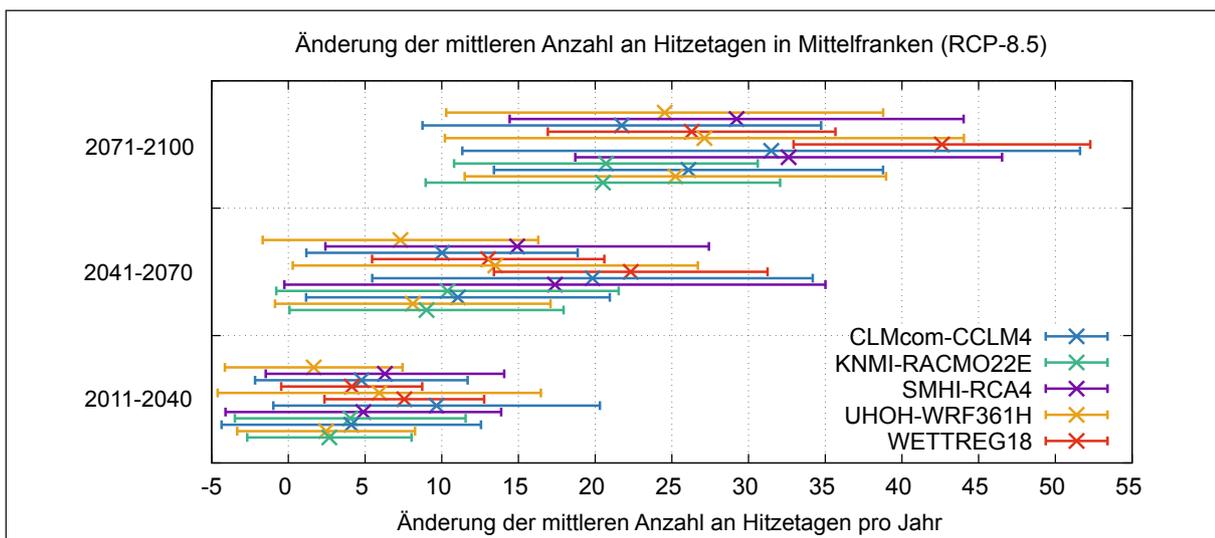


Abb. 3: Änderung der mittleren Anzahl an Hitzetagen pro Jahr in Mittelfranken im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000. Dargestellt sind Mittelwerte und Standardabweichungen für alle zwölf Klimasimulationen des RCP-8.5. Farblich gekennzeichnet sind die verwendeten Regionalmodelle.
Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

3.3 Niederschläge

Neben den temperaturbedingten Kennzahlen sind vor allem die Gebietsniederschläge sowohl in ihrer Intensität als auch in ihrer Regelmäßigkeit ein relevanter Klimaparameter für die Landwirtschaft, um Risikopotentiale bewerten oder optimale Anbaubedingungen charakterisieren zu können. Eine erste Kenngröße sind die mittleren saisonalen Niederschläge, d.h. die mittlere Niederschlagssumme in einer meteorologischen Jahreszeit. Da sie einer relativ hohen jährlichen Variabilität unterliegen – so auch die Niederschläge im Referenzzeitraum – sollte von einer signifikanten Änderung nur dann gesprochen werden, wenn die Änderung im 30-jährigen Mittel außerhalb des Konfidenzintervalls von $\pm 10\%$ liegt (LfU 2012). Unter dieser Berücksichtigung lassen sich im Ensemblemittel der Klimasimulationen für den Zeitraum 2021–2050 keine signifikanten Änderungen der mittleren Gebietsniederschläge im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 identifizieren. Im Gegensatz dazu liefern die langfristigen Simulationen (2071–2100) einheitlichere Tendenzen. Abbildung 4 stellt die Ensemblemittelwerte für den RCP-4.5 und den RCP-8.5 für diesen Zeitraum dar.

In beiden Szenarien zeichnet sich vor allem in den Wintermonaten eine Zunahme der Niederschläge ab.

Im Ensemblemittel nehmen die Winterniederschläge in vielen bayerischen Gebieten um bis zu 20% und in einigen um mehr als 20% zu, wie z.B. in den Gebieten entlang der Donau sowie in Teilen Unter- und Mittelfrankens. Die Gebirge Bayerns, die Alpen, der bayerische Wald und das Fichtelgebirge werden von der Zunahme der Winterniederschläge wenig bis gar nicht betroffen sein. In beiden Szenarien zeigt sich außerdem eine leichte Zunahme der Frühlingsniederschläge. Signifikante Unterschiede zwischen den beiden Szenarien werden vor allem hinsichtlich der Sommerprojektionen deutlich. Während im RCP-4.5 keine signifikante Veränderung erkennbar ist, nehmen die Niederschläge im Mittel des RCP-8.5-Ensembles an vielen Orten um mindestens 10% und an einigen Orten sogar um mehr als 15% ab. Neben dem Allgäu scheinen vor allem die nordbayerischen Gebiete besonders betroffen zu sein. Insbesondere die Gebiete nordwestlich Würzburgs sowie die fränkische Schweiz könnten beim Eintreten des RCP-8.5-Szenarios langfristig erhebliche Niederschlagsabnahmen verzeichnen, die in Kombination mit einer Temperaturerhöhung die Standortfaktoren für den landwirtschaftlichen Anbau massiv verändern würden. Während der Herbstmonate zeichnet sich in beiden Szenarien keine Veränderung der mittleren Niederschlagssummen ab.

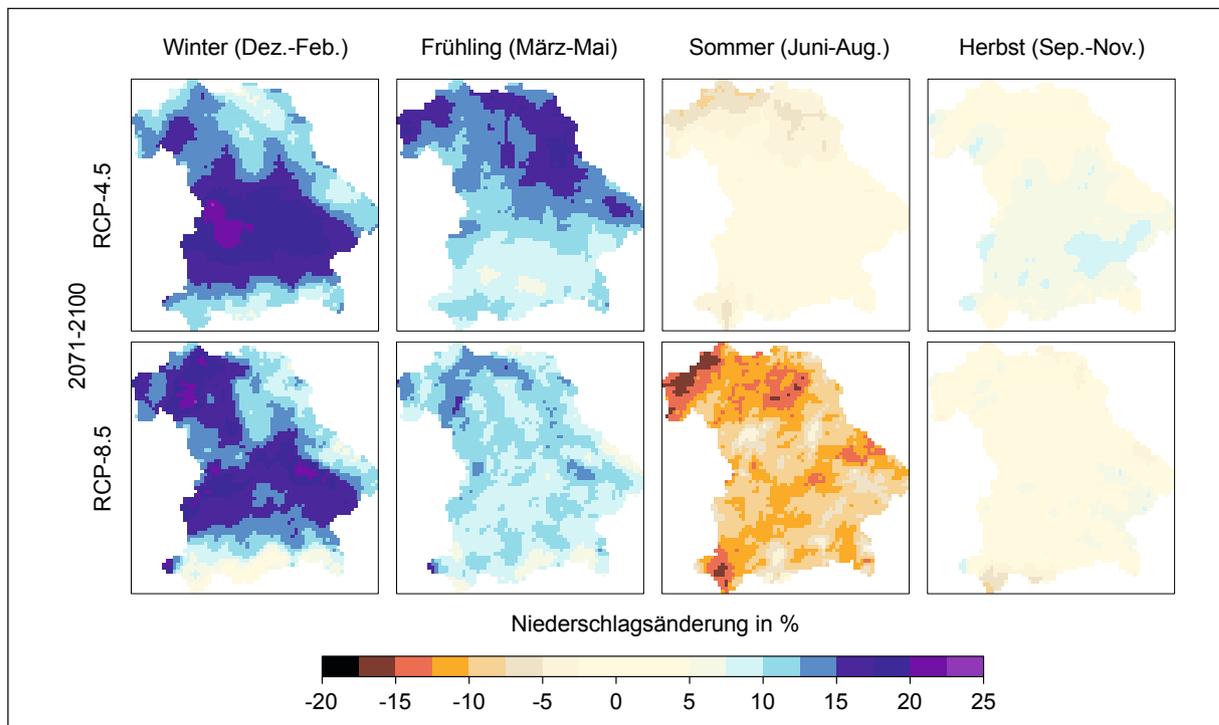


Abb. 4: Änderung der saisonalen Niederschläge in Bayern zwischen 2071–2100 im Vergleich zum Zeitraum 1971–2000. Dargestellt sind die Ensemblemittelwerte aus den verfügbaren Modellkombinationen.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

3.4 Trockenperioden

Die Niederschlagssummen während der Sommermonate können allerdings nicht zwangsläufig Auskunft über günstige bzw. ungünstige Anbaubedingungen eines Jahres geben. Beispielsweise kann ein extrem trockener Juli nicht durch einen extrem nassen August wettgemacht werden, wenn im Juli bereits große Verluste im Kulturpflanzenanbau zu verzeichnen gewesen sind. Die Sommerniederschläge sind also nicht nur in ihrer Intensität, sondern vor allem auch in ihrer Regelmäßigkeit bedeutsam. Für die Anzahl an aufeinanderfolgenden Tagen ohne Niederschlag, ab der von einer Trockenperiode gesprochen werden kann (international als consecutive dry days), existiert in der Literatur keine einheitliche Definition (DWD 2020f). Wann der Trockenstress für Pflanzen beginnt, hängt prinzipiell nicht nur von den Niederschlägen oder der Pflanze selbst ab, sondern u.a. auch von der maximalen Sonneneinstrahlung, der Luft- und Bodentemperatur sowie der damit verknüpften Verdunstung und der Bodenfeuchte (bzw. der nutzbaren Feldkapazität) (VON WILPERT et al. 2016: 343ff.).

Laut GÖMANN et al. (2015: 30ff.) kann der Trockenstress für Kulturpflanzen bei hoher Lufttemperatur in den Sommermonaten schon nach wenigen Tagen beginnen. Für die nachfolgenden Berechnungen soll deshalb als Trockenperiode definiert werden, wenn an fünf aufeinanderfolgenden Tagen weniger als 1mm Niederschlag pro Tag fällt. Darauf aufbauend wurden für die Zeiträume 2021–2050 und 2071–2100 zwei Kennzahlen der Trockenperioden untersucht: zum einen die mittlere Anzahl an Trockenperioden pro Frühling bzw. Sommer und zum anderen die mittlere Länge der längsten Trockenperiode eines Sommers. Für den Frühling lassen sich im Ensemblemittel weder im RCP-4.5 noch im RCP-8.5 signifikante Veränderungen der mittleren Anzahl an Trockenperioden im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 erkennen. Im Gegensatz dazu deuten die Simulationen an, dass die mittlere Anzahl an Trockenperioden pro Sommer zunehmen könnte. In Abbildung 5 ist die mittlere Anzahl an Trockenperioden pro Sommer für den RCP-4.5 und den RCP-8.5 jeweils für die beiden Zeiträume dargestellt.

Allgemein fällt in Abbildung 5 ähnlich wie bei den mittleren Sommerniederschlagssummen der starke Nord-Süd-Kontrast innerhalb Bayerns auf. Die leichte Tendenz der Zunahme um meist nicht mehr als eine halbe Trockenperiode pro Sommer ist im RCP-4.5 nicht zuletzt aufgrund der Spannweite der Simulationsergebnisse eher mit geringer Signifikanz einzustufen. Dagegen könnten langfristig gesehen die Trockenperioden im RCP-8.5 im Mittel sogar um bis zu zwei Trockenperioden pro Sommer zunehmen, wie z.B. in Teilen Frankens oder in Gebieten entlang der

Donau. Der Nord-Süd-Kontrast scheint sich dabei noch zu verstärken, denn die Veränderungen sind im Ensemblemittel des RCP-8.5 in Nordbayern stärker ausgeprägt als in Südbayern, insbesondere gegenüber dem Alpenraum. Auch kurzfristig (2021–2050) lassen sich im „worst-case-Szenario“ deutliche Änderungen erkennen. Besonders die Gebiete entlang der Donau sind im Vergleich zwischen RCP-4.5 und RCP-8.5 in diesem Zeitraum stärker betroffen. Darüber hinaus lohnt sich ein Blick auf die mittlere Länge der längsten Trockenperiode eines Jahres, um nicht nur die Entwicklung der durchschnittlichen Häufigkeit der Trockenperioden abschätzen zu können, sondern auch Aussagen zum Verlauf der Trockenperioden selbst tätigen zu können. Abbildung 6 zeigt, dass sowohl im RCP-4.5 als auch im RCP-8.5 im Ensemblemittel eine Zunahme der mittleren Länge der Trockenperioden erkennbar ist. Der auch hier wieder deutlich hervorgehobene Nord-Süd-Kontrast verstärkt sich besonders für den Zeitraum 2071–2100 im RCP-8.5. Für diesen Zeitraum deuten die Simulationen für große Teile Frankens an, dass die längste Trockenperiode im Durchschnitt um drei bis fünf Tage länger werden könnte im Vergleich zum Referenzzeitraum. Im Gegensatz zu Südbayern ist für diesen Zeitraum auch im RCP-4.5 mit signifikanten Veränderungen in Franken zu rechnen. Kurzfristig betrachtet lassen die Simulationen im Ensemblemittel insbesondere für Südbayern sehr geringe und für Teile Frankens leichte Veränderungen erkennen.

4 Auswirkungen des Klimawandels auf die bayerische Landwirtschaft

Die ermittelten aktuellen Klimatrends und Zukunftssimulationen sollen nun im Folgenden im Hinblick auf mögliche Auswirkungen und Risikopotentiale für die bayerische Landwirtschaft dokumentiert und bewertet werden. Die Erörterung erfolgt auf Grundlage der Fachliteratur und kann angesichts des komplexen und breiten Themenfeldes keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Sie bildet jedoch die wichtigsten Entwicklungen ab, die durch auf- oder absteigende Pfeile nach dem unten stehenden Farbschema (grün sehr positive – rot sehr negative Entwicklung) symbolisiert werden.

Analog zu den Veränderungen des Klimas selbst können auch die Auswirkungen auf die Landwirtschaft räumlich variieren und sich zudem erhebliche Unterschiede je nach Nutzungs- und Kulturart ergeben. Bei Betrachtung von Tabelle 2 lässt sich allgemein feststellen, dass in einigen Bereichen mit insgesamt negativen Auswirkungen zu rechnen ist, während in anderen Bereichen die Folgen ambivalent ausfallen können.

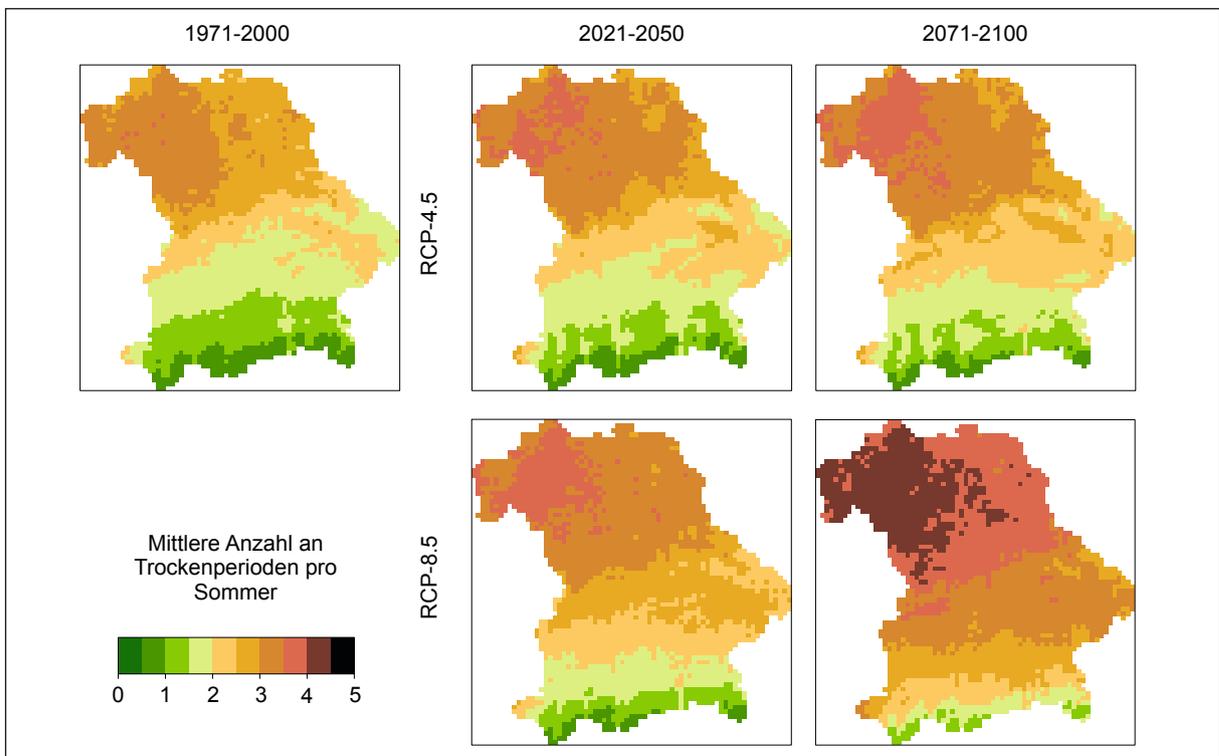


Abb. 5: Mittlere Anzahl an Trockenperioden pro Sommer in Bayern. Dargestellt sind Ensemblemittelwerte aus den jeweils verfügbaren Modellkombinationen. Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

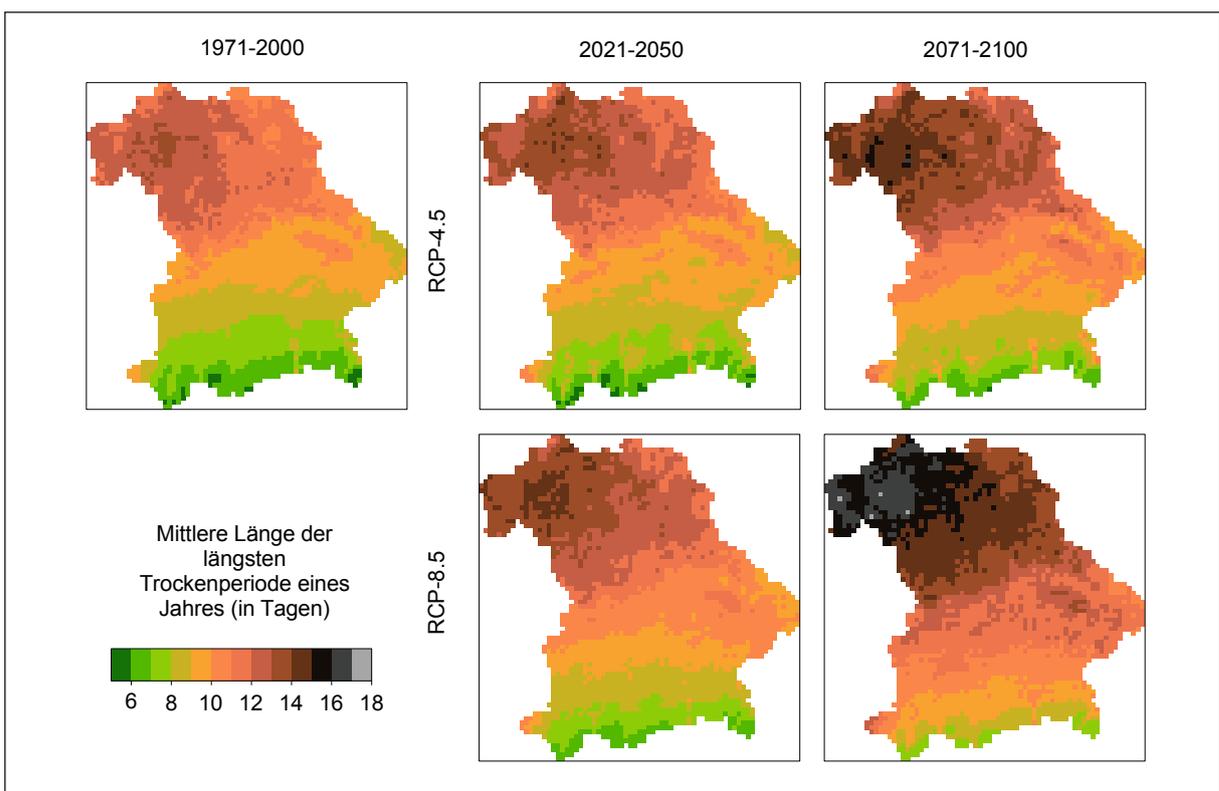


Abb. 6: Mittlere Länge der längsten Trockenperiode eines Jahres in Bayern. Dargestellt sind Ensemblemittelwerte aus den jeweils verfügbaren Modellkombinationen.

Quelle: Eigene Berechnung und Darstellung auf Datenbasis des LfU (2020)

Tab. 2: Überblick über Auswirkungen und Risikopotentiale der bayerischen Landwirtschaft im Hinblick auf zukünftige Klimaveränderungen

	RCP-4.5		RCP-8.5	
	2021-2050	2071-2100	2021-2050	2071-2100
Temperaturbedingte Änderungen der Vegetationsperiode				
Länge der Vegetationsperiode				
Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten				
Frostschäden im Frühjahr (durch früheren Austrieb)				
Schädlinge und Krankheiten				
Krankheiten inkl. Pilzbefall				
Auftreten neuartiger Schädlinge und Krankheiten				
Hitze und Trockenheit				
Hitze- und Strahlungsschäden				
Trockenstress				
Ernte und Ertrag				
Erhöhte CO ₂ -Konzentration				
Ernteertragsschwankungen				
Erntequalität im Ackerbau				
Bodenfruchtbarkeit in Folge von Erosion und Denudation				

Legende:

Entwicklung	starke Zunahme		Bewertung der Entwicklung	sehr positiv
	leichte Zunahme			positiv
	keine Änderung			keine Bewertung möglich
	leichte Abnahme			negativ
	starke Abnahme			sehr negativ

Quelle: Eigene Darstellung nach LfU (2020), KEHRBERGER/HOLZSCHUH (2019), MA et al. (2019), PFEIDERER/MENKE/SCHLEUSSNER (2019), SCHMITT/NANZ (2019), UBA (2019), DEUTSCH et al. (2018), KREMER/DORN/FUCHS (2018), PONIATOWSKI et al. (2018), WEBBER et al. (2018), ELLSWORTH et al. (2017), GÖMANN et al. (2017), CHMIELEWSKI (2016), EITZINGER/KERSEBAUM (2016), HOFFMAN/STOLL/SCHULTZ (2016), MIRSCHEL et al. (2016), WEIGEL/MANDERSCHIED (2016a), ASSENG et al. (2015), REINEKE (2015), SIEGMUND/VOLZ (2015), LfU (2014), KRENGEL et al. (2014), NENDEL et al. (2014), WEIGEL et al. (2014), WEIGEL (2011), VITI et al. (2010), BARNABÁS/JÄGER/FEHÉR (2008)

Deutlich negative und ertragsmindernde Konsequenzen sind durch Erhöhung des Schädlings- und Krankheitsdrucks zu erwarten. Die milderen Winter begünstigen laut KRENGEL et al. (2014: 2f.) insbesondere die Ausbreitung von Pilzkrankheiten, wie z.B. *Blumeria graminis* (Mehltau) sowie die besonders Weizen und Gerste befallenden Spezialformen der *Puccinia graminis* (Getreideschwarzrost). Auch der Schädlingsdruck wird sich durch schnellere Entwicklung der Erreger, steigende Anzahl an Generationen, Verlängerung der Befallssaison, steigende Überwinterungsraten der Schädlinge sowie die dauerhafte Etablierung neuer und invasiver Arten erhöhen. Zusätzlich zeigen die Klimasimulationen, dass mit einer zunehmenden Variabilität des Klimas zu rechnen ist, weswegen auch von steigenden Ertragsschwankungen ausgegangen werden muss.

Doch nicht alle klimawandelbedingten Auswirkungen zeigen einheitliche Tendenzen. Die Ambivalenz von ertragssteigernden und ertragsmindernden Auswirkungen soll nachfolgend exemplarisch anhand der temperaturbedingten Änderungen der Vegetationsperiode diskutiert werden. Einerseits kann eine Verlängerung der Vegetationsphase und die Verschiebung der phänologischen Jahreszeiten für einige Kulturarten zu den ertragssteigernden Faktoren gezählt werden. Vor allem für Sommergetreidearten, wie z.B. Sommergerste oder auch Körnermais, könnten sich hierbei potentiell positive Effekte ergeben. Durch eine frühere Blüte und Abreife des Getreides, die aus Verschiebungen der phänologischen Jahreszeiten entstehen, könnte der Hitze- und Trockenstress für viele Getreidearten während der Sommermonate zum Teil umgangen werden (NENDEL et al. 2014: 47ff.). Auch der Obstanbau in Bayern kann von der Verlängerung der Vegetationsperiode profitieren. Laut CHMIELEWSKI (2016: 13) können durch die Verlängerung der Vegetationsperiode z.B. neue Apfelsorten angebaut werden, die eine deutlich längere Reifezeit benötigen als die bisher angebauten Sorten. Bei einer Erwärmung um 2°C wird die Apfelblüte nach PFEIDERER, MENKE und SCHLEUSSNER (2019: 515ff.) im Mittel ca. 10 Tage früher stattfinden. Der seit einigen Jahren erfolgreiche Anbau der wärmeliebenden Sorte Braeburn mit über 2,2 Mio. Bäumen in Deutschland kann gemäß CHMIELEWSKI (2016: 13) als erster Trend hin zu neuen Sorten gewertet werden. Auch für den Weinbau kann nach HOFFMAN, STOLL und SCHULTZ (2016: 23ff.) eine wärmere Reifephase samt früherem Reifebeginn positive Auswirkungen auf Sortenwahl, Ertrag und Qualität des Weines haben.

Veränderungen der Vegetationsperiode und der phänologischen Phasen können auf lange Sicht gesehen aber auch viele negative Auswirkungen verursachen. Erstens kann durch die extrem heterogene Verschiebung und Veränderung der phänologischen Jahreszeiten die wichtige Kornfüllungsphase vieler

Getreidearten verkürzt werden, weswegen mit hohen Ertragseinbußen zu rechnen ist (GÖMANN et al. 2017: 185). In Folge der stärkeren Erwärmung der Winter-, Sommer- und Herbstmonate gegenüber den Frühlingsmonaten werden sich die phänologischen Jahreszeiten vor allem in den Sommer- und Herbstmonaten und weniger in den Frühlingsmonaten verlängern – trotz früherer Blüte und früherem Frühlingsbeginn.

Zweitens kann diese Verkürzung der Vegetationsruhe während der Wintermonate weitere ertragsmindernde Auswirkungen haben. Insbesondere Winterkulturen, wie z.B. Winterweizen und Wintergerste, benötigen einen Kältereiz (Vernalisation), um die Schosshemmung abzubauen. Wird das Kältebedürfnis während der Vegetationsruhe aufgrund eines zu milden oder zu kurzen Winters nicht ausreichend erfüllt, können laut GÖMANN et al. (2017: 185) ungleichmäßiger Austrieb und schließlich erhebliche Ertragseinbußen die Folge sein. Unter Einbezug der Zukunftssimulationen muss davon ausgegangen werden, dass der Trend zu milderen Wintern bis mindestens Mitte des Jahrhunderts anhalten wird und sich danach je nach Szenario verstärken oder abschwächen kann. Ein hohes Risiko ist hierbei auch bei Spargel oder Obstgehölzen gegeben, da sie zum Beenden der Unterdrückung ihres Triebwachstums und somit zur Überwindung der Winterruhe ebenso ein sorten- und artenspezifisches Kältebedürfnis besitzen (CHMIELEWSKI 2016: 13f.). Wird das Kältebedürfnis nicht ausreichend erfüllt, kann analog zu den oben erwähnten Getreidewinterkulturen eine verspätete und ungleichmäßige Blüte entstehen, da die komplexen biochemischen Prozesse innerhalb des Gewächses verspätet oder nur unzureichend ausgelöst werden (VITI et al. 2010: 221ff.).

Drittens könnte durch das frühere Austreiben der Vegetation auf lange Sicht gesehen die Gefahr von Frostschäden im Frühjahr steigen (MA et al. 2019: 351ff.). Durch die nach wie vor auftretenden Kaltlufteinbrüche während der Frühjahrsmonate, die meist durch Nord- oder Nordostwetterlagen entstehen, könnte das Risiko von Schäden nach dem Austreiben laut SIEGMUND und VOLZ (2015: 5) erheblich steigen. PFEIDERER, MENKE und SCHLEUSSNER (2019: 515ff.) konnten durch die kombinierte Analyse von phänologischen und klimatischen Zukunftssimulationen zeigen, dass das Risiko von Frostschäden im Apfelanbau bei einer Erwärmung um 2°C um 10% in Teilen Süddeutschlands und sogar um 25% am Bodensee zunehmen könnte. Dies würde wohlge-merkt in etwa dem RCP-4.5 der Klimasimulationen entsprechen und nicht dem pessimistischsten Szenario.

Viertens kann es laut GÖMANN et al. (2017: 185) zur Entkopplung von Systemen kommen, da sich die Frühjahrspflanzen vor allem temperatursensitiv anpassen, wohingegen die bestäubenden Insekten

überwiegend photosensitiv reagieren, d.h. auf Basis des Sonnenstandes bzw. der Tageslänge. Hierdurch kann es laut KEHRBERGER und HOLZSCHUH (2019: 1ff.) zu Verschiebungen zwischen der Blüte des Gewächses und der Schlupfzeitpunkte der Insekten kommen, was gleichermaßen negative Folgen haben kann, da viele Kulturarten, wie z.B. Obst- und Gemüse sowie Ölpflanzen, auf die Bestäubung durch Insekten angewiesen sind oder zumindest stark profitieren. Im Rapsanbau kann die Bestäubung durch Bienen laut BLE (2017: 24) eine Ertragssteigerung von über 25% generieren, was durchschnittlich einem Mehrertrag von ca. 1000kg Rapskörnern pro Hektar entspricht. Bei einer Verschiebung von Frühjahrsblüte und -schlupf nimmt allein schon aus statistischer Sicht die Wahrscheinlichkeit der Bestäubung und damit die Chance für einen erfolgreichen Fruchtansatz ab (BEIERKUHNLEIN/FOKEN 2008: 193). Die temperaturbedingte Veränderung der Vegetationsperiode kann auf kurze Sicht gesehen einige Vorteile für den Kulturpflanzenanbau in Bayern bieten. Langfristig betrachtet können bei zu großer Veränderung der phänologischen Jahreszeiten gepaart mit einem steigenden Risiko an Frostschäden die negativen Auswirkungen deutlich überwiegen.

Darüber hinaus muss zu den ertragsmindernden Faktoren auch das steigende Risiko von Hitze- und Strahlungsschäden sowie von Trockenstress gezählt werden. Die Gründe hierfür fußen aus Sicht der Zukunftssimulationen vor allem auf drei Indizien. Erstens wird die Zunahme der saisonalen Temperaturen den Wasserhaushalt in den Böden bzw. die Bodenfeuchte und damit die nutzbare Feldkapazität für die Pflanzen über die gesamte Anbauperiode hinweg negativ beeinflussen. Die Zukunftssimulationen erwarten vor allem für Sommer und Herbst abnehmende oder stagnierende Niederschlagssummen. Durch die Kombination von abnehmenden bzw. stagnierenden Niederschlägen mit der Erwärmung der Luft- (und Boden-)temperaturen wird das Dampfdruckdefizit ansteigen, weshalb auch das Verdunstungspotenzial zunehmen wird. Zweitens deuten die Klimasimulationen Veränderungen in den Niederschlagsmustern an. In den Sommermonaten muss sowohl im RCP-4.5 als auch im RCP-8.5 von einer Zunahme des Trockensstress für Kulturpflanzen ausgegangen werden, da sich sowohl die mittlere Anzahl der Trockenperioden pro Jahr als auch die Länge der Trockenperioden erhöhen wird. Drittens ist es als sehr wahrscheinlich einzustufen, dass insbesondere in den Sommermonaten der Trockenstress deutlich schneller auftreten wird als bisher. Dies ergibt sich aus den oben erwähnten höheren Dampfdruckdefiziten in Kombination mit einem Anstieg der Hitzetage bzw. Temperaturextreme während der Sommermonate. Besonders diese Extremtage können sich bei zunehmender Länge und Häufigkeit ertragsmindernd auswirken.

Der Anstieg der Hitzetage könnte für die bayerische Landwirtschaft laut EITZINGER und KERSEBAUM (2016: 5) sowie nach GÖMANN et al. (2017: 185f.) sogar eine größere Herausforderung als die Trockenheit alleine werden. Auch wenn die Hitzebelastung häufig mit Trockenstress verbunden ist bzw. der Trockenstress oft durch die Kombination von ausbleibenden Niederschlägen und extrem heißen Witterungen entsteht, kann eine separate Betrachtung der Klimaveränderungen sinnvoll sein, da die Pflanzen unterschiedliche Schutzmechanismen zur Anpassung an Trockenheit und Hitze besitzen. Laut WEBBER et al. (2018: 2) können sich diese Schutzmechanismen sogar gegenseitig ausschließen. Beispielsweise kann die Anpassung an Trockenheit durch Drosselung der Transpiration (Schließen der Stomata) zu heißeren Temperaturen in den Blüten und Blättern führen. Wenn weniger kühlendes Wasser aus dem Boden über die Stomata verdunstet, nehmen die Temperaturen auch in der Pflanze zu und somit die Gefahren von Hitze- und Strahlungsschäden (WEBBER et al. 2018: 2). Außerdem können Veränderungen der Bodenbeschaffenheit, wie z.B. beim Austrocknen der Böden entstehende Schrumpfungsprozesse, die feinen Wurzeln der Pflanzen nachhaltig schädigen. Das erhöhte Risiko von Hitze- und Strahlungsschäden kann aus den Zukunftssimulationen zusätzlich durch den Anstieg der mittleren Temperaturen, der Zunahme der mittleren Anzahl der Hitzetage sowie der zunehmenden Variabilität abgeleitet werden. Laut GÖMANN et al. (2017: 185) schädigen Temperaturextreme oberhalb des Temperaturoptimums die Kulturpflanzen meistens sehr schnell und häufig irreversibel. Bei Getreide sind nach BARNABÁS, JÄGER und FEHÉR (2008: 11ff.) insbesondere die generativen Stadien der Blüte äußerst empfindlich und können – ab 30°C bei Weizen bzw. ab 35°C bei Mais – sogar zur Sterilität der Pollen führen. Ebenso können Früchte und Gemüse durch zu hohe Hitzebelastung sehr schnell erheblichen Schaden nehmen.

Die Ambivalenz der Auswirkungen trifft auch auf den sog. CO₂-Düngeeffekt zu. Einigkeit herrscht bislang nur bezüglich der negativen Aspekte des CO₂-Düngeeffekts, wie beispielsweise Veränderungen von Makro- und Mikroelementen sowie allen weiteren Inhaltsstoffen der Pflanzen, was letztlich Protein- und Vitamingehalt der landwirtschaftlichen Erzeugnisse beeinflusst (GÖMANN et al. 2017: 187; WEIGEL/MANDERSCHIED 2016a: 32f.; WEIGEL et al. 2014: 4). Die positiven Auswirkungen einer erhöhten CO₂-Konzentration (höhere Biomasseproduktion von C3-Pflanzen und gesteigerte Wassernutzungseffizienz) sind nach wie vor mit einer großen Unsicherheit behaftet und führen in theoretischen und praktischen Forschungsarbeiten zu kontroversen Diskussionen, wie beispielsweise die gegensätzlichen Ergebnisse der Arbeiten von WEBBER et al. (2018: 2ff.) und WEIGEL et al. (2014: 4) belegen.

5 Fazit

Mit Hilfe der Klimamodellierungen können viele belastbare Aussagen bezüglich der zukünftigen Entwicklungen von Klimafaktoren getroffen werden, deren Ausprägungsintensität aber stark von den jeweiligen Klimaszenarien abhängig ist. Die Jahresdurchschnittstemperaturen werden in Bayern in den nächsten 30 Jahren weiterhin zunehmen. Nur bei Erreichen des RCP-2.6 kann die Erwärmung in Bayern in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts gestoppt werden. Im Vergleich zur Referenzperiode 1971–2000 wird sie nur in diesem Szenario weniger als 2°C betragen, wohingegen die Jahresdurchschnittstemperatur im RCP-8.5 mit großer Sicherheit schon bis 2050 um 2°C gestiegen sein wird. Die Zunahme der Hitzetage in Bayern hängt ebenso maßgeblich vom eintretenden Klimaszenario ab. Im RCP-8.5 könnte die Anzahl der Hitzetage in sehr vielen Regionen Bayerns im Mittel um 25 Tage pro Jahr zunehmen. Gleichermäßen haben die Simulationen gezeigt, dass aktiver Klimaschutz insbesondere für die Veränderungen der Niederschläge relevant ist. Änderungen der Niederschlagsmuster und -summen fallen im RCP-4.5 wesentlich geringer aus als im RCP-8.5. Letzteres Szenario könnte angesichts der Klimasimulationen für die Landwirtschaft in der momentanen Form höchstwahrscheinlich existenzbedrohend werden. Auch wenn die längerfristigen Simulationen aufgrund der zunehmenden Unsicherheit zwischen den einzelnen Klimamodellen eine geringere Signifikanz als die kurzfristigen aufweisen, verdeutlichen sie trotzdem die weitreichenden Folgen eines „worst-case-Szenarios“.

Die größten Unsicherheiten in den ausgewerteten Klimasimulationen bestehen hinsichtlich der Niederschlagsverteilungen. Einerseits unterliegen die Niederschläge in Bayern per se sehr hohen interannuellen Schwankungen, weshalb das Änderungssignal der einzelnen Klimamodelle erst den Bereich von $\pm 10\%$ verlassen sollte, bevor die Änderung als Klimaveränderung interpretiert werden kann. Andererseits variieren die Niederschläge im 30-jährigen Mittel innerhalb Bayerns extrem in ihrer Lokalität, was eng mit der Topographie Bayerns zusammenhängt. Diesen lokalen Unterschieden gerecht zu werden, kann für die Klimamodellierung eine große Herausforderung darstellen. Außerdem konnte hier nur die absolute Niederschlagssumme pro Tag untersucht werden, während beispielsweise zur Lufttemperatur Minima, Mittelwerte und Maxima zur Verfügung standen, sodass sich für temperaturbedingte Parameter grundsätzlich eine breitere Datengrundlage ergab.

Die klimawandelinduzierten Folgen für die bayerische Landwirtschaft sind gleichermaßen wie die Klimaveränderungen szenarienabhängig. Es kann fest davon ausgegangen werden, dass die Auswirkungen für

die Landwirtschaft im RCP-4.5 insgesamt deutlich geringer als im RCP-8.5 ausfallen werden. Zudem weisen alle Risikopotentiale, die in Tabelle 2 zusammengefasst sind, eine enorme räumliche, zeitliche und kulturartenspezifische Variabilität auf. Obwohl beispielsweise durch die Verlängerung der Vegetationsperiode einige Klimaveränderungen auch positive Effekte für den landwirtschaftlichen Anbau in Bayern haben können, ist insgesamt mit einer Abnahme der Erträge und der Ertragsstabilität zu rechnen. Vor allem der Trend der steigenden Auftretenswahrscheinlichkeit von Extremwetterlagen wird die Ertragsschwankungen potenzieren. Auch hinsichtlich der Intensität der Auswirkungen existieren große Unsicherheiten, die aufgrund der verschiedenen Klimaszenarien und der Unmöglichkeit einer präzisen Prognose der zukünftigen Entwicklung des Klimas entsteht.

In der Verknüpfung der Klimaveränderungen mit den Folgen für die Landwirtschaft bleibt nicht nur im Hinblick auf die Auswirkungen des CO₂-Düungeffekts enormer Forschungsbedarf bestehen. Aufgrund der vielfältigen und teils unerforschten Wechselwirkungen zwischen Klima, Boden und Vegetation kann auch per se keine allgemein gültige Strategie für die Anpassung an die Klimaveränderungen entwickelt werden. Es müssen nicht nur lokale Umwelt-, Standort- und Produktionsbedingungen, sondern auch die sozialen und ökonomischen Rahmenbedingungen und Pfadabhängigkeiten berücksichtigt werden, wie z.B. der Weinbau in Unterfranken, der Hopfenanbau und -handel in der Hallertau, der Gemüseanbau samt nachgelagerten Wertschöpfungsketten in Franken, oder auch die Milchwirtschaft samt der Milchverarbeitung und den touristischen Effekten in den Alpen und im Voralpenland. Eine komplette Abkehr von der Viehzucht würde beispielsweise bayernweit viele Kulturlandschaften gefährden und zerstören. Entsprechend besteht auch in diesem Themenbereich großer Forschungs- und letztlich Handlungsbedarf, bei dem Anpassungsstrategien an den Klimawandel zu entwickeln sind, die einerseits auf wissenschaftlichen Erkenntnissen, andererseits auf lokalen Expertisen und Kompetenzen beruhen. Bei diesen Anpassungsstrategien dürfen nicht nur Ertragsstabilität und -sicherung im Vordergrund stehen, sondern es müssen auch die Klimaschutzpotenziale Berücksichtigung finden, da die Landwirtschaft einen erheblichen Anteil klimawirksamer Treibhausgase produziert. Die ausgeprägte Diskrepanz zwischen den Folgen der verschiedenen RCPs zeigt, dass die weitere Entwicklung des Klimas maßgeblich vom weiteren Handeln der Menschheit abhängt. Ohne fundamentale Änderung des anthropogenen Eingriffs, die auch eine klimafreundlichere und nachhaltigere Landwirtschaft einschließt, werden die Klimaveränderungen in Bayern wesentlich intensiver und drastischer ausfallen.

Danksagung

Unser Dank geht an das Bayerische Netzwerk für Klimaforschung (bayklif) für die Projektförderung aus Mitteln des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst, an das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) für die Bereitstellung der Klimadaten, an Prof. Dr. Anja Rammig und Mona Reiss für die Koordination des BLIZ-Forschungsverbundes sowie an Dr. Andreas Krause für die Durchsicht des Manuskripts.

Literatur

- ASSENG, S. et al. 2015: Rising Temperatures Reduce Global Wheat Production. In: *Nature Climate Change* 5: 143–147.
- BARNABÁS, B.; JÄGER, K.; FEHÉR, A. 2008: The effect of drought and heat stress on reproductive processes in cereals. In: *Plant Cell Environment* 31: 11–38.
- BEIERKUHNLEIN, C.; FOKEN, T. 2008: Klimawandel in Bayern. Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: *Bayreuther Forum Ökologie* 113.
- BLE, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. 2017: Ohne Bienen keine Früchte. Bedeutung und Lebensweise der Honigbiene. Bonn.
- CHMIELEWSKI, F. 2016: Was bringt der Klimawandel dem Obstbau? In: *Geographische Rundschau* 68/3: 12–19.
- DEUTSCH, C. A. et al. 2018: Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. In: *Science* 361: 916–919.
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020a: Climate Data Center (CDC): Zeitreihen für Gebietsmittel für Bundesländer und Kombinationen von Bundesländern. Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/regional_averages_DE/annual/air_temperature_mean/regional_averages_tm_year.txt (02.01.2020).
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020b: DWD – Klima atlas. Online: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klima atlas/klima atlas_node.html (24. 01.2020).
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020c: Climate Data Center (CDC): Jahreswerte der Messstation Nürnberg (Stations-ID 03668). Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/annual/kl/historical/jahreswerte_KL_03668_18790101_20201231_hist.zip (03. 01.2020).
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020d: Climate Data Center (CDC): Tageswerte der Messstation Nürnberg (Stations-ID 03668). Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/tageswerte_KL_03668_18790101_20201231_hist.zip (10. 02.2020).
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020e: Climate Data Center (CDC): Monatswerte der Messstation Hengersberg–Unterfrohstetten (Stations-ID 02132). Online: https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/monthly/more_precip/historical/monatswerte_RR_02132_19510101_20201231_hist.zip (28. 02.2020).
- DWD, *Deutscher Wetterdienst*. 2020f: Wetterlexikon. Online: <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=102672&lv3=102792> (28.04.2020).
- EITZINGER, J.; KERSEBAUM, K. 2016: Klimawandel und Pflanzenbau. In: *Geographische Rundschau* 68/3: 4–11.
- ELLSWORTH, D. S. et al. 2017: Elevated CO₂ does not increase eucalypt forest productivity on a low-phosphorus soil. In: *Nature Climate Change* 7: 279–283.
- GÖMANN, H. et al. 2015: Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Thünen Report 30. Braunschweig.
- GÖMANN, H. et al. 2017: Landwirtschaft. In: BRASSEUR, G.; JACOB, D.; SCHUCK-ZÖLLER, S. (Hg.): *Klimawandel in Deutschland. Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Springer Verlag: 183–192.
- GOOSE, H. 2015: *Climate System Dynamics and Modelling*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- HAUSFATHER, Z.; PETERS, G. P. 2020: Emissions—the “business as usual” story is misleading. In: *Nature* 577: 618–620.
- HOFFMAN, M.; STOLL, M.; SCHULTZ, H. 2016: Klimawandel und Weinbau. In: *Geographische Rundschau* 68/3: 20–26.
- JACOB, D. et al. 2007: An inter-comparison of regional climate models for Europe: model performance in present-day climate. In: *Climatic Change* 81: 31–52.
- KEHRBERGER, A.; HOLZSCHUH, S. 2019: Warmer temperatures advance flowering in a spring plant more strongly than emergence of two solitary spring bee species. In: *PLOS ONE* 14. Online: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218824> (15.06.2020).
- KEUP-THIEL, E.; HENNEMUTH, B.; PFEIFER, S. 2012: Besonderheiten und Merkmale regionaler Klimamodelle im Hinblick auf die weitere Kopplung mit Impaktmodellen, CSC Report 9, Climate Service Center, Germany.
- KRAUS, C.; ZIMMER, M.; MANGER, R. 2013: Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP) – Klimamodelle und Klimaprojektionen. Themenblatt. Hg.: Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen.
- KRAUTBLATTER, M.; KELLERER-PIRKLBAUER, A.; GÄRTNER-ROER, I. 2018: Permafrost in den Alpen. Erscheinungsformen, Verbreitung und zukünftige Entwicklung. In: *Geographische Rundschau* 70/11: 22–29.
- KREMER, P.; DORN, B.; FUCHS, H. 2018: Mehr weißes Gold durch den Klimawandel?! In: *Praxis Geographie* 48/11: 50–52.
- KRENGEL, S. et al. 2014: Veränderungen im Auftreten von Pflanzenkrankheiten, Schädlingen und deren natürlichen Gegenspielern. In: Lozán, J.L.; Grassl, H.; KARBE, L.; JENDRITZKY, G. (Hg.). *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. 2. Auflage. Elektronische Veröffentlichung (Kapitel 4.3) Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de (22.06.2020).
- LfU, *Bayerisches Landesamt für Umwelt*. 2012: Der Klimawandel in Bayern. Auswertung regionaler Klimaprojektionen – Klimabericht Bayern. Augsburg.
- LfU, *Bayerisches Landesamt für Umwelt*. 2014: Beeinflusst der Klimawandel die Jahreszeiten in Bayern? Antworten der Phänologie. Augsburg.
- LfU, *Bayerisches Landesamt für Umwelt*. 2020: Auf Anfrage zur Verfügung gestellte Klimamodell Daten für Bayern. Referat 81. Hof.
- MA, Q. et al. 2019: Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. In: *Global Change Biology* 25: 351–360.
- MIRSCHER, W. et al. 2016: Klimawandel und Pflanzenbau. Dargestellt am Beispiel Thüringens. In: *Geographische Rundschau* 68/3: 42–50.
- MPELASOKA, F. S.; CHIEW, F. H. S. 2009: Influence of Rainfall Scenario Construction Methods on Runoff Projections. In: *Journal of Hydrometeorology* 10: 1168–1183.
- MYHRE, G. et al. 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*

- Change [STOCKER, T.F. et al. (Hg.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.
- NENDEL, C. et al. 2014: Testing farm management options as a climate change adaptation strategy using the MONICA model. In: *European Journal of Agronomy* 52: 47–56.
- NOAA, *National Oceanic and Atmospheric Administration*. 2020: Annual Greenhouse Gas Index (AGGI) – Global Radiative Forcing, CO₂-equivalent mixing ratio, and the AGGI 1979-2019. Online: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/aggi/aggi.html> (25.05.2020)
- PFEIDERER, P.; Menke, I.; SCHLEUSSNER, C.-F. 2019: Increasing risks of apple tree frost damage under climate change. In: *Climatic Change* 157: 515–525.
- PONIATOWSKI, et al. 2018: Arealveränderungen mitteleuropäischer Heuschrecken als Folge des Klimawandels. In: *Natur und Landschaft* 93/12: 553–561.
- RAHMSTORF, S.; SCHELLNHUBER, H. J. 2019: *Der Klimawandel: Diagnose, Prognose, Therapie*. 9. Auflage. C.H. Beck Verlag.
- REINEKE, A. 2015: Schädpotential der Kirschessigfliege *Drosophila suzukii* im Weinbau: Aktueller Stand und mögliche Bekämpfungsstrategien. In: Geisenheimer Betriebsleiter-tagung Weinbau und Kellerwirtschaft: 6–7.
- SCHMITT, J.; NANZ, M. 2019: *Cercospora* ist die bestimmende Krankheit. Aktuelles zu den Zuckerrüben-Blattkrankheiten. In: *Landwirtschaftliches Wochenblatt* 25: 36–38.
- SCHWALM, C. R., GLENDON, S. und DUFFY, P. B. 2020: RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 117: 19656–19657.
- SIEGMUND, A.; VOLZ, D. 2015: Dem Wandel begegnen. Anpassung an die regionalen Folgen des Klimawandels. In: *Praxis Geographie* 45/5: 4–7.
- TEUTSCHBEIN, C.; SEIBERT, J. 2012: Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate change impact studies. Review and evaluation of different methods. In: *Journal of Hydrology*, Volumes 456–457: 12–29.
- UBA, *Umweltbundesamt*. 2019: Monitoringbericht 2019 zur deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Bericht der interministeriellen Arbeitsgruppe Anpassungsstrategie der Bundesregierung. Dessau-Roßlau.
- VITI, R. et al. 2010: Effect of climatic conditions on the overcoming of dormancy in apricot flower buds in two Mediterranean areas: Murcia (Spain) and Tuscany (Italy). In: *Scientia Horticulturae* 124: 217–224.
- VAN VUUREN, D. P. et al. 2011: The representative concentration pathways: an overview. In: *Climatic Change*, Volume 109: 5–31.
- VON WILPERT, K. et al. 2016: Bodenwasserhaushalt und Trockenstress. In: WELLBROCK, N.; BOLTE, A.; FLESS, H. (Hg.): *Dynamik und räumliche Muster forstlicher Standorte in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung im Wald 2006 bis 2008*. Thünen Report 43. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig.
- WEBBER, H. et al. 2018: Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. In: *Nature Communications* 9/1. Online: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2> (25.06.2020).
- WEIGEL, H.-J. 2011: Klimawandel – Auswirkungen und Anpassungsmöglichkeiten. In: RAHMANN, G.; SCHUMACHER, U. (Hg.): *Neues aus dem Ökologischen Landbau*: 9–28.
- WEIGEL, H.-J. et al. 2014: Mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre: Wie reagieren Kulturpflanzen? In: LOZÁN, J. et al. (Hg.): *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. 2. Auflage. Elektron. Veröffentl. (Kap. 4.6) – Online: www.klima-warn-signale.uni-hamburg.de (22. 06.2020).
- WEIGEL, H.-J.; MANDERSCHIED, R. 2016a: Der CO₂-Dünge-Effekt. Produktivere und effizientere Nutzpflanzen durch den Klimawandel? In: *Geographische Rundschau* 68/3: 28–33.
- WEIGEL, H.-J.; MANDERSCHIED, R. 2016b: Thünen à la carte – FACE-Versuche: Basis für Klimafolgenmodelle. Thünen-Institut. Braunschweig.

Abstract: Climate change in Bavaria – Recent regional climate change simulations and the impacts on agriculture

Temperatures rise. Official data show that also Bavaria is affected by climate change. Especially the sector of agriculture is dependent on interactions between the atmosphere, soil and vegetation and is therefore vulnerable to climate change. Based on an analysis of recent regional climate simulations, this article examines and interprets future changes to climate in Bavaria. Climate model data reveal and verify that also the intensity of further climate changes hinge upon the scenario modulating future changes to weather and climate. According to the most pessimistic scenario RCP-8.5, the average temperature could be 4 to 5 °C higher at the end of this century compared to the reference period from 1971 to 2000. More optimistic scenarios, like for example RCP-4.5, expect a rise in temperature as well as an increase of annual hot days to up to ten days more compared to the reference period 1971–2000. In combination with changes of seasonal precipitation, drought periods will be more likely. Longer periods without precipitation might not only happen more frequently but could also last longer. The impacts on Bavarian agriculture are consequently also subject to these scenarios that can be ambivalent with regard to their predictions. Positive yield-increasing factors, e.g. an extension of vegetation periods, are opposed to a number of negative aspects. These include a threat of harvest loss and yield fluctuations caused by pests or diseases, by heat and radiation damage as well as by reduced soil fertility.

Keywords: Climate change, climate change simulations, Bavaria, agriculture, climate impacts, climate risks

Autor*innen: Lauritz Lederer, lauritz.lederer@fau.de, Institut für Geographie der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg; Prof. Dr. Perdita Pohle, perdita.pohle@fau.de, Institut für Geographie der Friedrich-Alexander-Universität (FAU) Erlangen-Nürnberg.