

## 6.5 Wassermangel, Dürren und Welternährung

DIETER GERTEN

*Es werden zunächst fundamentale Zusammenhänge zwischen Bodenwasserhaushalt und Vegetation beschrieben, um dann Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels mit Betonung der Folgen von Dürren auf die globale landwirtschaftliche Produktion darzulegen. Schließlich werden Lösungen aufgezeigt, welchen Beitrag verbessertes Boden- und Wassermanagement zur zukünftigen globalen Ernährungssicherung leisten können.*

**Water shortage, droughts and world food security:** *The chapter first describes fundamental links between soil water balance and vegetation, and then proceeds with a portrayal of impacts of anthropogenic climate change and particularly droughts on agricultural production. Finally, solutions will be presented on how improved soil and water management can contribute to securing future food security.*

**Escasez de agua, sequías y alimentos en el mundo:** *Primero, se describen las relaciones fundamentales entre el balance hídrico del suelo y la vegetación, y luego se describen los efectos del cambio climático antropogénico con énfasis en las consecuencias de las sequías en la producción agrícola global. Por último, se mostrarán las soluciones que contribución puede hacer la mejora de la gestión del suelo y el agua a la seguridad alimentaria mundial en el futuro.*

### Bodenfeuchte und Landwirtschaft – Grundsätzliches

Der Wasserhaushalt von Böden ist unterschiedlichen Einflussfaktoren ausgesetzt, wie etwa der Bodenart, der Landnutzung, dem Boden- und Wassermanagement sowie der unmittelbaren Witterung bzw. den langfristigen klimatischen Verhältnissen (vgl. Kap. 1.2 in diesem Band, FOKEN et al. 2021). Die großen zeitlichen und räumlichen Unterschiede in der Bodenfeuchte waren und sind – neben der Verfügbarkeit fruchtbarer Lands – daher ein entscheidender Faktor für die geografische Verteilung sowie die Art und Weise, wie die Menschen seit jeher Landwirtschaft betreiben. So wurde zumindest in einigen Regionen die Sesshaftwerdung durch die Ansiedlung an Flüssen und den Ausgleich mangelnden Bodenwassers durch Installation einfacher Wassersammel- und Bewässerungsanlagen begünstigt oder überhaupt erst ermöglicht. Andererseits spielten lange Trockenzeiten oder auch Versalzung beim Niedergang früherer Zivilisationen wie der Maya, der Khmer oder dem Reich von Akkad eine Rolle (wenn auch i.d.R. nicht die einzige, wie Historiker und Archäologen betonen), indem die Nahrungsmittelproduktion nicht mehr gewährleistet war. Auch heute können Wasserverknappungen und deren Folgen zu teils gewalttätigen Konflikten beitragen (wie zuletzt in Syrien, obgleich mit anderen Faktoren verflochten).

Dass Wassermangel im Boden eine besondere Herausforderung für die Landwirtschaft darstellt, liegt daran, dass alle Pflanzen für ihr Wachstum bzw. ihren Biomasseaufbau Wasser benötigen. Dieses wird durch die Wurzeln aufgenommen und weiter durch die Pflanze transportiert, bevor es schließlich im Zuge der Fotosynthese verdunstet (transpiriert). Bei dieser öffnen sich die Stomata – das sind kleine Poren meist an der Blattunterseite – mehr oder weniger weit, um

Kohlendioxid aus der Atmosphäre aufzunehmen, was unweigerlich mit der Transpiration einhergeht. Ein Teil des in den Boden eingedrungenen Niederschlagswassers – oft »grünes Wasser« genannt, im Gegensatz zum »blauen Wasser« in Flüssen, Reservoirs, Seen und Grundwasserspeichern – verdunstet auch direkt aus dem Boden (Evaporation). Ein weiterer Teil wiederum verdunstet im Blatt- und Astwerk der Pflanzen, worauf Regenwasser »zwischenlagert« werden kann, bevor es den Boden erreicht (Interzeption). Kann der Boden nicht genügend pflanzenverfügbares Wasser nachliefern, erleidet die Pflanze Wasserstress. Dies passiert, weil dann der Dampfdruckgradient zwischen der Innenseite und der Außenseite der Stomata – was dem ungedeckten potenziellen Verdunstungsanspruch der Umgebungsluft entspricht – nicht ausgeglichen werden kann. Infolgedessen schließt die Pflanze die Stomata, drosselt somit aber auch die wichtige CO<sub>2</sub>-Aufnahme (zu einigen grundsätzlichen Mechanismen der Wasserbewegung im System Boden–Pflanze–Atmosphäre s. HERRMANN 1977, S. 35–43). Dies kann in Trockenzeiten einen selbstverstärkenden Effekt in Gang setzen: Welkt Vegetation, steigt das Bowen-Verhältnis zunehmend über eins, was zu einer weiteren Erhöhung von Temperatur und Verdunstungsanspruch führt (s. FOKEN et al. 2021). Demgegenüber kann eine erhöhte Kohlendioxid-Konzentration der Luft wegen dadurch verbesserter Wassernutzungseffizienz der Pflanzen zu einem Produktivitätszuwachs verhelfen – sofern nicht Nährstoffe wie Stickstoff oder Wassermangel limitierend wirken. Das Zusammenspiel ist also komplex: So scheinen der durch die ansteigende atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration überhaupt erst angetriebene Klimawandel und die damit verbundenen regionalen Bodenfeuchtereduktionen mittlerweile den Zugewinn durch direkte CO<sub>2</sub>-Effekte zu mindern (WANG et al. 2020).

Um den aus Wasserstress resultierenden landwirtschaftlichen Ertragsminderungen vorzubeugen, wird oft durch künstliche Bewässerung mit blauem Wasser das nötige Bodenwasser zugeführt. So ist insbesondere in den Trockenregionen der Erde die Bewässerungsfläche sukzessive ausgeweitet worden. Global beträgt die entsprechend ausgestattete Fläche nun schätzungsweise über drei Millionen Quadratkilometer, worauf immerhin mehr als ein Drittel der globalen Nahrungsmittelproduktion stattfindet (MEIER et al. 2018). Schwerpunkte befinden sich in Nordindien und Pakistan, im östlichen China, im Westen der USA, in Südeuropa und im östlichen Australien. Allerdings muss ein Großteil des eingesetzten Wassers inzwischen aus fossilen, also allenfalls in ferner Zukunft erneuerbaren Grundwasservorräten gedeckt werden. Grundwasser insgesamt, einschließlich der erneuerbaren Anteile, macht wohl etwa 40% des Bewässerungswassers aus. Selbst die Schätzungen zum gesamten globalen Bewässerungswasserverbrauch differieren aber sehr je nach Datenbasis und Modell. Aller unbewässerter Regenfeldbau – auf dem also noch immer fast zwei Drittel der weltweiten Nahrungsmittelproduktion beruhen (und >95% in Gegenden wie dem sub-Saharischen Afrika) – ist indessen von ausreichendem Niederschlag bzw. genügender Standortfeuchte abhängig und somit Wetter- und Klimaschwankungen ganz unmittelbar ausgesetzt.

### **Dürren – steter Begleiter der Menschheit**

Eine besonders folgenschwere dieser natürlichen Schwankungen sind Dürren – also Zeiträume, in denen (oft über einem großen Gebiet) zunächst der Niederschlag, dann die Bodenfeuchte und die Wassermenge in Oberflächengewässern, später auch im Grundwasser deutlich unter den langjährigen Mittelwerten liegt. Um dieser Sequenz und Komplexität gerecht zu werden, wird oft in meteorologische, landwirtschaftliche und soziologische Dürren unterschieden, und es werden unterschiedliche Dürremaße verwendet (s. BENDER & SCHALLER 2014). In chronischen Trockenregionen wie den Subtropen sind Dürren eine häufige Erscheinung. Insbesondere dort können sie offenbar auch in gewisser zeitlicher Häufung auftreten: Im Westen der USA waren in vergangenen Jahrhunderten jahrzehntelange »Megadürren« typisch. Aber auch in Europa kam es in der Mittelalterlichen Warmzeit und zuweilen noch in späteren Jahrzehnten zu ähnlich langanhaltenden Ereignissen (VOGT et al. 2018). Einige Dürren stehen in Zusammenhang mit großräumigen natürlichen Schwankungen im globalen Klimasystem wie etwa dem El-Niño/Southern Oscillation-Phänomen, das in

Teilen der Welt im mehrjährigen Abstand charakteristische Dürre- aber auch Überschwemmungsmuster produziert – mit entsprechenden Auswirkungen unter anderem für die Landwirtschaft.

Jüngst zeichnet sich eine gewisse Häufung, Andauer und Intensivierung von Dürren auf mehreren Kontinenten einschließlich der gemäßigten und ansonsten eher feuchten Breiten ab. Diese können – besonders in der Kombination mit außergewöhnlich hohen Temperaturen – offenbar dem anthropogenen Klimawandel zugeschrieben werden (CHIANG et al. 2021). Aktuell nimmt mit der Häufung von Extremereignissen nicht nur deren statistische Signifikanz zu, sondern auch das Wissen über deren meteorologischen Zusammenhänge. So gibt es plausible Anhaltspunkte dafür, dass ein durch die überproportionale Erwärmung der Arktis ausgelöstes »Schlingern« des Starkwindbands (des Jet-Streams) in der oberen Atmosphäre am wochenlangen Verharren bestimmter Konstellationen von Hoch- und Tiefdruckgebieten und somit an Hitzewellen, Dürren und Hochwassern beteiligt ist (KORNHUBER et al. 2020). Neben solchen atmosphärischen Prozessen und den oben genannten, über die Bodenfeuchte und die Vegetation regulierten selbstverstärkenden Effekten tragen noch andere, direkte menschliche Eingriffe wie Wasserentnahmen oder Wassertransfers zur Entstehung, Verschärfung oder auch Milderung von Dürren bei.

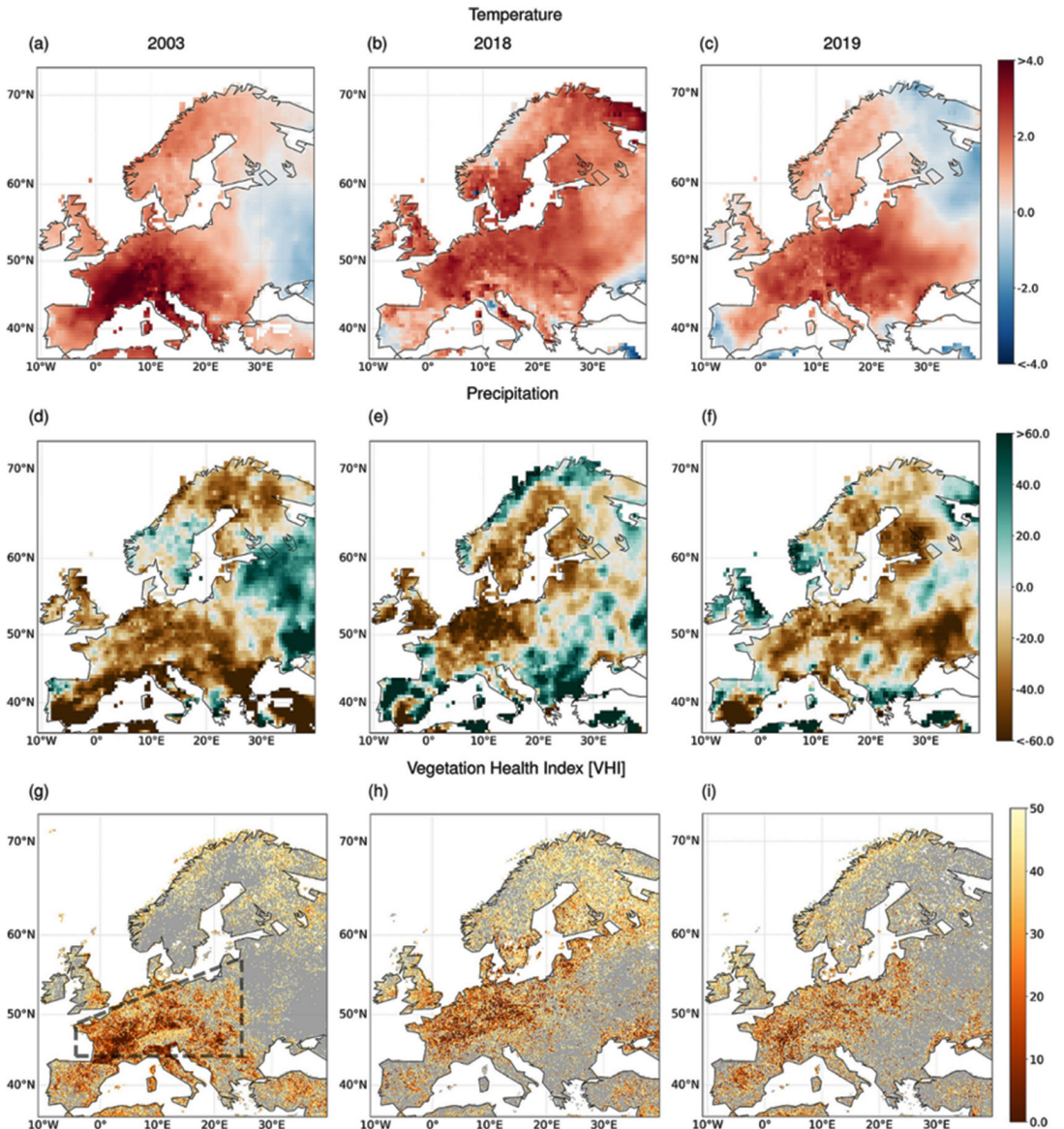
Ungeachtet der Ursachen sind die Schäden und ökonomischen Kosten von Dürren – bisher unter anderem aufgrund von deren gradueller Entwicklung oft unterschätzt – immens: Allein im Zeitraum 1998–2017 beliefen sie sich global auf mindestens 124 Milliarden US-Dollar (UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION 2021). Nicht zuletzt deshalb sind ein laufendes Monitoring und Frühwarnsysteme erforderlich, wie mittlerweile von verschiedenen Organisationen für den gesamten Globus ([www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp](http://www.fao.org/giews/earthobservation/index.jsp), [mars.jrc.ec.europa.eu/asap](http://mars.jrc.ec.europa.eu/asap)), die USA ([droughtmonitor.unl.edu](http://droughtmonitor.unl.edu)) oder Deutschland betrieben ([www.ufz.de/index.php?de=37937](http://www.ufz.de/index.php?de=37937)). Langfristige Beobachtungen auch nach den eigentlichen Dürreereignissen sind im Übrigen zumindest für Wälder ebenso ratsam (BURAS et al. 2020) – denn Produktivitätsverluste, teils in Kombination mit direkten Hitzeschäden, betreffen auch alle natürlichen Landökosysteme: So hat beispielsweise die über zweijährige Dürre 2018/2019 in Deutschland nicht nur zu landwirtschaftlichen Ertragseinbußen geführt (die in Europa ohnedies zunehmen, aber regional komplexe Ursachen haben; WEBER et al. 2020), sondern auch zu weithin sichtbaren Trockenschäden an Wäldern bis hin zum Absterben

größerer Bestände (etwa WIRTH et al. 2021). Abb. 6.5-1 zeigt beispielhaft, wie sich die Temperatur und der Niederschlag in den drei rezenten europäischen Dürresommern 2003, 2018 und 2019 räumlich verteilt auf die Vegetationsproduktivität ausgewirkt haben (HARI et al. 2020). In einem sich wandelnden Klima sind Wälder ohnehin multiplen Stressfaktoren wie Bränden und Schädlingsbefall ausgesetzt. Hinzu treten die in vielen Regionen weiterhin (teils illegal) vorgenommenen

Waldrodungen, die zusammen mit Waldzustandsverschlechterungen durch Fragmentierung, Holzeinschlag, Feuer und Dürren selbst riesige Flächen wie das Amazonasgebiet auf Kippunkte zutreiben (WALKER 2020).

### Nahrungsmittelproduktion unter Wassermangel: viele Optionen

Der Ausgleich von in Trockenperioden auftretenden Bodenfeuchtedefiziten und die Verhinderung von Pro-



**Abb. 6.5-1:** Abweichung vom jeweiligen Mittelwert 1980–2010 der Lufttemperatur (K), des Niederschlags (mm) und des aus Satellitendaten abgeleiteten Vegetationswasserstresses (%) in drei rezenten europäischen Dürresommern (Juni bis August). Aus HARI et al. (2020), Creative Commons Attribution 4.0 International License.

duktionseinbußen durch Bewässerung ist in vielen Fällen nur zu einem gewissen Grad möglich. Beispielsweise wird das (nachhaltig) verfügbare blaue Wasser nicht immer ausreichen, um das fehlende grüne Bodenwasser genügend aufzustocken. Diese Situation stellt sich abermals besonders häufig in Dürrezeiten ein. Aber auch der Schutz der Gewässerökosysteme kann und sollte Priorität haben, etwa die Einhaltung einer ökologisch begründeten Mindestwasserführung von Flüssen. Wird dieses Umweltziel ernstgenommen, wie es beispielsweise die Europäische Wasserrahmenrichtlinie und darauf ausgerichtete Landesniedrigwasserkonzepte vorsehen, sind zeitweise Beschränkungen von Wassernutzungen einschließlich für die Bewässerung eine mögliche Maßnahme.

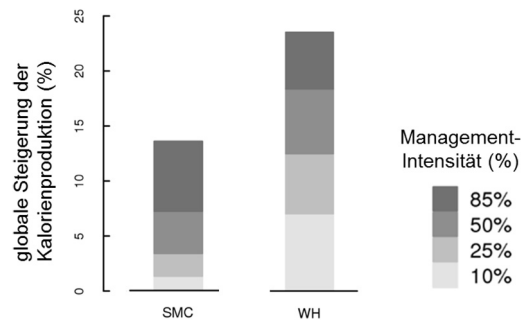
Ferner sind Bewässerungssysteme oft ineffizient. Das heißt, es geht ein größerer Anteil des entnommenen Wassers auf dem Weg zur Pflanze durch Verdunstung, Versickerung, Verschwendung oder Verschmutzung verloren. Es bieten sich aber, je nach Standort und Kulturpflanze, die zielgenaue Tropfbewässerung und weitere effiziente Bewässerungstechniken und -steuerungen an, um diese Verluste zu minimieren (s. etwa SCHIMMELPFENNIG et al. 2018). So eingespartes Wasser könnte für andere Zwecke einschließlich einer sachten Ausdehnung der Bewässerungsfläche genutzt werden. Jedoch manifestiert sich zuweilen ein sog. Rebound-Effekt, indem netto ebenso viel oder sogar mehr Wasser als zuvor zwecks Produktionssteigerung genutzt wird. Um tatsächliche Einsparungen zu erzielen, sind daher entsprechende Regulierungen angezeigt.

Über reine Bewässerungsmaßnahmen hinaus erfordert vor allem der Regenfeldbau weitere Formen des Wassermanagements (ggf. im Verbund mit Nährstoff- und Bodenmanagement), um Ernteverluste während Trockenzeiten möglichst zu begrenzen. Sowohl Feldbeobachtungen (PIEMONTESE et al. 2020) als auch Modellsimulationen zeigen, dass solche standortgerechten Maßnahmen ein hohes Wassersparpotenzial aufweisen – wobei deren konsequente Umsetzung sogar wesentlich zur Steigerung der globalen Nahrungsmittelproduktion beitragen kann (vgl. ausführlich GERTEN 2020). Konkret geht es um verschiedene Verfahren der Bodenbearbeitung wie etwa die Erhöhung der Infiltrationskapazität und das Mulchen. Bei letzterem wird durch das Abdecken (mit Stroh oder auch Plastikplanen) unbedeckter Flächen die direkte Bodenverdunstung vermindert zugunsten der Pflanzen, die dann mehr Wasser zum Wachstum zur Verfügung haben. Neben dieser Umlenkung von Verdunstungs- und Versickerungsströmen im Boden, die bereits eine teils erhebliche Ertragssteigerung ohne Zufuhr weiteren (blauen) Wassers be-

wirken können, kann das Auffangen von Regenwasser in Zisternen oder anderen geeigneten Vorrichtungen zur Überbrückung von Trockenperioden dienen, zumal wenn es dann für effiziente Tropfbewässerung verwendet wird (s. Abb. 6.5-2). Globale Modellstudien zeigen, dass allein die Etablierung von Regenwasserauffanganlagen und Bodenbearbeitungsmaßnahmen auf allen heute existenten Ackerflächen bereits globale Wassereinsparungen und Ertragssteigerungen im zweistelligen Prozentbereich herbeiführen kann. Bei ambitionierter Kombination aller dieser Maßnahmen mitsamt einer erhöhten Bewässerungseffizienz wäre sogar eine globale Ertragserhöhung von rund 40% möglich (JÄGERMEYR et al. 2016).

### Wassermangel und Landwirtschaft unter zukünftigem Klimawandel

Projektionen zeigen für viele Gebiete deutliche Zunahmen an Dürren, und zwar umso mehr, je weiter der Klimawandel voranschreitet. Beispielsweise zeichnet sich für die westlichen USA eine Tendenz zur »Rückkehr« zu den historischen Megadürren ab, wobei unter Szenarien starken Klimawandels zu befürchten ist, dass diese noch intensiver ausfallen als in der Vergangenheit (COOK et al. 2015). Die Unterschiede hinsichtlich der globalen Muster sind zwischen verschiedenen Modellen groß. Aber es kristallisieren sich zumindest gemäß der aktuellen, modellvergleichenden Studie von LU et al. (2019) recht übereinstimmend zukünftige Schwerpunkte stärkerer landwirtschaftlicher Dürren (berechnet als signifikanter Rückgang der Bodenfeuchte) vor



**Abb. 6.5-2:** Simulierte Steigerung der globalen Kalorienproduktion (% i. Vgl. zum Jahr 2005) unter verschiedenen Szenarien des Boden- und Wassermanagements auf allen derzeitigen Ackerflächen. Links: Potenziale durch Vermeidung von 10, 25, 50 und 85% der Bodenverdunstung innerhalb der Wachstumsperiode (»soil moisture conservation« SMC). Rechts: Potenziale durch Erhöhung der Infiltrationskapazität des Bodens und durch Sammlung von 10–85% ansonsten abfließenden Regenwassers mit dessen Wiedernutzung für Bewässerung (»water harvesting« WH). Aus JÄGERMEYR et al. (2016), Creative Commons Attribution 3.0 licence, modifiziert.

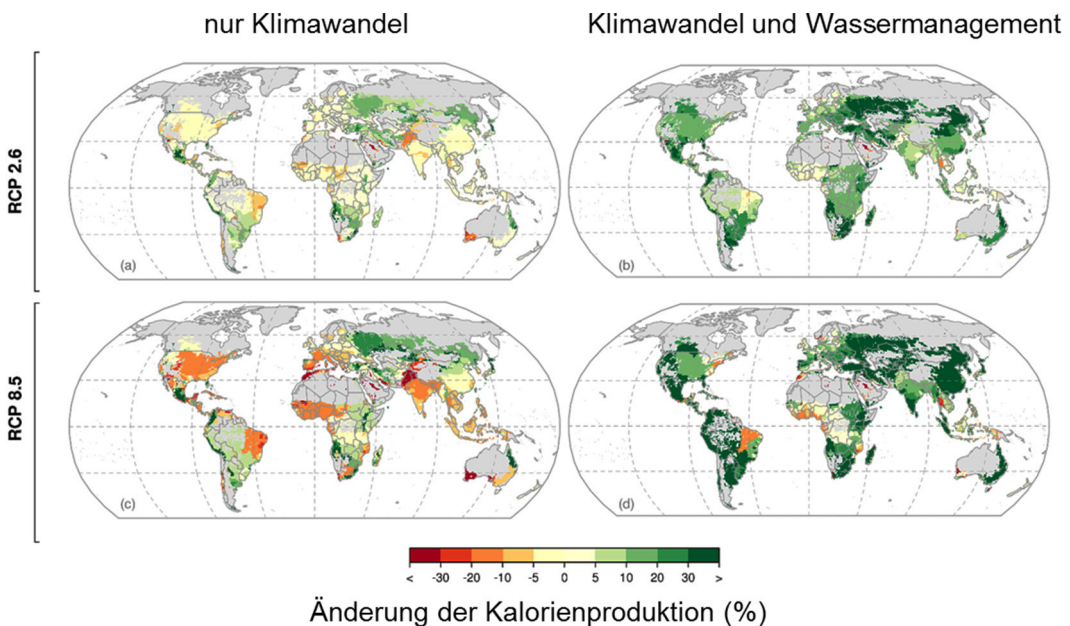
allem in Lateinamerika bis in die westlichen USA, im Mittelmeergebiet sowie im südlichen Afrika heraus. Es ist zu beachten, dass die Bodenfeuchte in globalen Modellen sehr unterschiedlich gehandhabt wird und auch die dynamischen Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Bodenwasserhaushalt auf unterschiedliche Weise und oft nicht mit genügend Prozessdetail erfasst werden. Ferner ist die Bodenfeuchte allein nicht zwingend der beste Indikator für den Wasserstress und den resultierenden Produktionsverlust der Vegetation. Deshalb sind weitere Anstrengungen zur Simulation solcher Folgen des Klimawandels unter Einbezug mehrerer Modelle, verschiedener Indikatoren und wichtiger Boden-Vegetation-Atmosphäre-Kopplungen mitsamt den direkten Wirkungen des erhöhten  $\text{CO}_2$ -Gehalts der Atmosphäre vonnöten.

Die oben diskutierten Möglichkeiten effizienten Managements grünen und blauen Wassers können auch als landwirtschaftliche Anpassungsmaßnahme für zukünftigen Klimawandel und damit verbundene Dürren betrachtet werden. Weitere Simulationen zeigen nämlich, dass solche Ambitionen in vielen Regionen den ansonsten infolge vermehrten Trocken- und Hitzestresses eintretenden Ertragsrückgängen (global um

durchschnittlich 18% ohne mögliche lindernde Einflüsse direkter  $\text{CO}_2$ -Effekte) einigermaßen gut entgegenwirken können (Abb. 6.5-3 gemäß JÄGERMEYR et al. 2016). Allerdings würde dies nicht überall ausreichen, um die durch Klimawandel bedingten Ertragsminderungen vollständig auszugleichen. Darüber hinaus ist zu bedenken, dass angesichts der im Laufe dieses Jahrhunderts erwarteten weiteren Zunahme der Weltbevölkerung mehr Nahrungsmittel als heute erzeugt werden müssen.

### Weitsichtige Umsetzung erforderlich

Die Sicherung der zukünftigen Welternährung unter Bedingungen des Klimawandels erfordert letztlich weitgehende technologische und kulturelle Transformationen inklusive Ernährungsumstellungen (GERTEN et al. 2020). Der schonenden, nachhaltigen Nutzung der weltweiten Süßwasserressourcen kommt eine Schlüsselrolle für die Ernährungssicherung und die Erreichung weiterer Nachhaltiger Entwicklungsziele innerhalb planetarischer Umweltgrenzen zu (JÄGERMEYR 2020). Dabei gibt es noch besonderen Bedarf, Maßnahmen, die Brücken zwischen den verschiedenen Entwicklungszielen bilden, konsequent umzusetzen – und zwar



**Abb. 6.5-3:** Mit einem Biosphärenmodell simulierte Änderungen der Agrarproduktion (in %, nur auf derzeitigen Landwirtschaftsflächen) bis zum Ende des 21. Jahrhunderts unter verschiedenen Klimawandelszenarien (Mittel aus 20 Klimamodellen) gemäß der »Repräsentativen Konzentrationspfade« RCP2.6 (mit deutlichen Anstrengungen zum Klimaschutz) und RCP8.5 (wenig Anstrengungen mit resultierender starker Erwärmung). Links: ohne, rechts: mit Berücksichtigung ambitionierten Wassermanagements. Direkte, die Produktion potenziell erhöhende Auswirkungen der höheren  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre sind hier nicht berücksichtigt. Leicht modifiziert aus JÄGERMEYR et al. (2016), Creative Commons Attribution 3.0 licence.

unter fairem Einbezug der betreffenden Menschen wie den oft auf grünes Wasser angewiesenen Kleinbauern (UN-WATER 2018). Auch ein planetarischer Blickwinkel ist zunehmend relevant: Lokale Veränderungen in Wasserhaushalt und Landnutzung werden zunehmend von globalen Prozessen beeinflusst (z.B. über Klimawandel und Handelsbeziehungen), und Entscheidungen können komplex mit der Wasserverfügbarkeit und dem Klima über die eigentliche Region hinaus verbunden sein. Mithin bringt der bereits in vielen Regionen virulente und sich in Zukunft wohl weiter verschärfende Wassermangel enorme Herausforderungen an Wasser-, Klima-, Umwelt- und Agrarpolitiken hervor: Die Situation erfordert eine Integration dieser Politikfelder untereinander, über verschiedene räumliche und administrative Skalen hinweg und insbesondere im Hinblick auf Dürren auch vorsorglich über längere Zeiträume hinweg (WILHITE & PULWARTY 2018).

## Literatur

- BENDER, S. & M. SCHALLER (2014): Vergleichendes Lexikon – Wichtige Definitionen, Schwellenwerte und Indices aus den Bereichen Klima, Klimafolgenforschung und Naturgefahren. Version 2.0.1. Climate Service Center, Hamburg, 129 pp.
- BURAS, A., A. RAMMIG & C. S. ZANG (2020): Quantifying impacts of the 2018 drought on European ecosystems in comparison to 2003. *Biogeosci.* 17, 1655-1672. doi: 10.5194/bg-17-1655-2020.
- CHIANG, F., O. MAZDIYASNI & A. AGHAKOUCHAK (2021): Evidence of anthropogenic impacts on global drought frequency, duration, and intensity. *Nature Commun.* 12, 2754. doi: 10.1038/s41467-021-22314-w.
- COOK, B. L., T. R. AULT & J. E. SMERDON (2015): Unprecedented 21st-century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Sci. Adv.* 1, e1400082. doi: 10.1126/sciadv.1400082.
- FOKEN, T., B. HUWE & A. ARNETH (2021): Die Energie- und Wasserhaushalt von Böden und ihre klimatische Bedeutung. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL et al. (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. Online: [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). doi: 10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.04.
- GERTEN, D. (2020): Wasser – Knappheit, Klimawandel, Welt-ernährung. 2. Aufl. C. H. Beck, München, 207 pp.
- GERTEN, D., V. HECK, J. JÄGERMEYR, B. L. BODIRSKY et al. (2020): Feeding ten billion people is possible within four terrestrial planetary boundaries. *Nature Sust.* 3, 200–208. doi: 10.1038/s41893-019-0465-1.
- HARI, V., O. RAKOVEC, Y. MARKONIS, M. HANEL et al. (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018–2019 Central European drought under global warming. *Sci. Rep.* 10, 12207. doi: 10.1038/s41598-020-68872-9.
- HERRMANN, R. (1977): Einführung in die Hydrologie. Teubner, Stuttgart, 152 pp.
- JÄGERMEYR, J. (2020): Agriculture's historic twin-challenge toward sustainable water use and food supply for all. *Front. Sustain. Food Syst.* 4, 35. doi: 10.3389/fsufs.2020.00035.
- JÄGERMEYR, J., D. GERTEN, S. SCHAPHOFF, J. HEINKE et al. (2016): Integrated crop water management might sustainably halve the global food gap. *Environ. Res. Lett.* 11, 025002. doi: 10.1088/1748-9326/11/2/025002.
- KORNHUBER, K., D. COUMOU, E. VOGEL, C. LESK et al. (2020): Amplified Rossby waves enhance risk of concurrent heatwaves in major breadbasket regions. *Nature Clim. Change* 10, 48-53. doi: 10.1038/s41558-019-0637-z.
- LU, J., G. J. CARBONE & J. M. GREGO (2019): Uncertainty and hotspots in 21st century projections of agricultural drought from CMIP5 models. *Sci. Rep.* 9, 4922. doi: 10.1038/s41598-019-41196-z.
- MEIER, J., F. ZABEL & W. MAUSER (2018): A global approach to estimate irrigated areas – a comparison between different data and statistics. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22, 1119-1133. doi: 10.5194/hess-22-1119-2018.
- PIEMONTESE, L., G. CASTELLI, I. FETZER, J. BARRON et al. (2020): Estimating the global potential of water harvesting from successful case studies. *Global Environ. Change* 63, 102121. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2020.102121.
- SCHIMMELPFENNIG, S., J. ANTER, C. HEIDECHE, S. LANGE et al. (Hrsg.) (2018): *Bewässerung in der Landwirtschaft*. Tagungsband zur Fachtagung am 11./12.09.2017 in Suderburg. Thünen Working Paper 85. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, 161 pp. doi: 10.3220/WP1515755414000.
- UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (2021). *GAR Special Report on Drought*. UN, Genf, 210 pp.
- UN-WATER (2018): *Sustainable Development Goal 6 – Synthesis Report 2018 on Water and Sanitation*. United Nations, Genf, 199 pp.
- VOGT, J. V., J. SPINONI & G. NAUMANN (2018): Dürre in Europa: Lozán, J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl et al. (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Extremereignisse*. S. 119-125. Online: [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). doi: 10.25592/warnsignal.klima.extremereignisse.17.
- WALKER, R. T. (2020): Collision course: development pushes Amazonia toward its tipping point. *Environ. Sci. Pol. Sust. Develop.* 63, 15-25. doi: 10.1080/00139157.2021.1842711.
- WANG, S., Y. ZHANG, W. JU & J. M. CHEN (2020): Recent global decline of CO2 fertilization effects on vegetation photosynthesis. *Science* 370, 1295-1300. doi: 10.1126/science.abb7772.
- WEBBER, H., G. LISCHIED, M. SOMMER, R. FINGER et al. (2020): No perfect storm for crop yield failure in Germany. *Environ. Res. Lett.* 15, 104012. doi: 10.1088/1748-9326/aba2a4.
- WILHITE, D. A. & R. S. PULWARTY (Hrsg.) (2018): *Drought and Water Crises – Integrating Science, Management and Policy*. 2. Aufl. CRC Press, Boca Raton, 582 pp.
- WIRTH, C., R. ENGELMANN, N. HAACK, H. HARTMANN et al. (2021): Naturschutz und Klimawandel im Leipziger Auwald – ein Biodiversitätshotspot an der Belastungsgrenze. *Biol. uns. Zeit* 51, 55-65. doi: 10.11576/biuz-4107.

## Kontakt:

Prof. Dr. Dieter Gerten  
 Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)  
 Forschungsbereich Erdsystemanalyse und  
 Humboldt-Universität zu Berlin, Geographisches Institut  
[gerten@pik-potsdam.de](mailto:gerten@pik-potsdam.de)

GERTEN, D. (2021): *Wassermangel, Dürren und Welternährung*. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL & D. KASANG (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung*. S. 285-290. *Wissenschaftliche Auswertungen in Kooperation mit GEO, Hamburg*. [www.warnsignal-klima.de](http://www.warnsignal-klima.de). DOI: 10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.40