

Ergebnisse des Forschungsprojekts „UFZ-Klimafolgenstudie“ für das DVGW Zukunftsprogramm Wasser

# Zur Entwicklung des Wasserdargebotes im Kontext des Klimawandels

Im Zuge des fortschreitenden Klimawandels werden in Deutschland nicht nur Starkregenereignisse wahrscheinlicher, sondern auch Hitzewellen und die Zahl aufeinanderfolgender Trockentage. Mit Blick auf die Wasserversorgung und die mögliche Änderung der langfristigen mittleren Wasserverfügbarkeit wurde die zukünftige Veränderung von mittleren jährlichen Abflüssen und die Veränderung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung untersucht.

von: Dr.-Ing. Andreas Marx, Friedrich Boeing & Prof. Luis Samaniego (alle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ)



Die globalen Temperaturen steigen an, Extremwetter nehmen zu, das Meereis geht dramatisch zurück – dies ist heute in der Wissenschaft unumstritten [1]. Folgen des Klimawandels in Deutschland sind die Zunahme von Starkregenereignissen, aber auch vor allem im Sommer die Zahl aufeinanderfolgender Trockentage sowie die Andauer von Hitzewellen. Diese Vorgänge haben zur Folge, dass hydroklimatische Gefahren wie Dürren [2] größer werden. Zahlreiche Wirtschaftsbranchen bekommen die Auswirkungen von Dürren zu spüren, etwa die Energieerzeugung, die Industrie oder die Wasserversorgung. Die trockenen Jahre 2018 bis 2020 haben zu einer extremen Dürre bis in tiefere Bodenschichten geführt. Eine Studie mit rekonstruierten Klimadaten zurück bis ins Jahr 1766 hat ergeben, dass im letzten Vierteljahrtausend mit großer Wahrscheinlichkeit kein größeres Dürreereignis über Mitteleuropa aufgetreten ist [3]. Daten des Deutschen Dürremonitors [4] weisen für den Gesamtboden einige Regionen mit

einer mittlerweile vierjährig andauernden Dürre aus. Neben der möglichen klimabedingten Änderung von Extremereignissen muss für die Wasserversorgung auch die mögliche Änderung der langfristigen mittleren Wasserverfügbarkeit geprüft werden. Dazu wurde die zukünftige Veränderung von mittleren jährlichen Abflüssen sowie der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung untersucht.

## Studiendesign

Im Rahmen der Helmholtz-Klimainitiative wurde ein Referenzklimafolgendatensatz mit einer horizontalen Auflösung von  $1,2 \times 1,2$  km<sup>2</sup> entwickelt [5]. Dazu wurden 70 Klimasimulationen aus den Projekten EURO-CORDEX und ReKliES-DE [6] verwendet. Da die zukünftige Treibhausgaskonzentration der Atmosphäre nicht vorhergesagt werden kann, müssen Szenarien eingesetzt werden. Das optimistische Szenario „Klimaschutz“ (RCP2.6) und das pessimistische Szenario „Weiter-so“ (RCP8.5) bildet die Spannbreite der möglichen Entwicklungen unter Klimawandel ab. Die damit verbundene Temperaturerhöhung in Deutschland reicht im Median über alle Simulationen von 1,2 °C (aus 21 verfügbaren Klimasimulationen unter RCP2.6) bis 3,6° C (49 Simulationen unter RCP8.5). Ein Vergleich der simulierten Daten der Vergangenheit mit Beobachtungsdaten ermöglicht die Einschätzung der Modellierungsgüte. Insbesondere hydrologische Klimafolgensimulationen sind schwellenwertsensitiv. Daher wurde der systematische Fehler der Klimasimulationen mit einem trenderhaltenden Verfahren adjustiert [7].

**Tabelle 1: Mittlere jährliche Änderung unterschiedlicher Wasserhaushaltskomponenten [mm/a] am Beispiel des Elbe-Einzugsgebietes\***

Änderung 2069–98 gegen 1971–2000	RCP2.6 [mm/a]	RCP8.5 [mm/a]
Jahresniederschlag P	+41	+108
Potenzielle Verdunstung PET	+24	+61
Tatsächliche Verdunstung aET	+18	+51
<b>Bilanz P-aET</b>	<b>+23</b>	<b>+57</b>

\* Es wird jeweils der Median der Änderung über alle Klima-Hydrologie-Simulationen unter Klimaschutz (21-Simulationen RCP2.6) und Weiter-so (49 Simulationen RCP8.5) gezeigt.

Die Klimasimulationen mit täglichen Daten zwischen 1971 und 2098 decken das Gebiet Deutschlands sowie die Ursprungsgebiete von Rhein, Elbe, Oder und Donau ab. Mit dem hydrologischen Modellsystem mHM ([8], [9]) wurden Klimafolgen für den Wasserhaushalt auf dem mit den Klimasimulationen identischen Modellgitter abgeschätzt. Das Umweltsystemmodell berechnet neben den täglichen Oberflächenabflüssen z. B. auch Schneespeicher, Bodenwasserkomponenten, Grundwasserneubildung, Interzeption oder aktuelle Verdunstung. Das Modell wurde durch alle Klimasimulationen angetrieben, so dass insgesamt 70 Klima-Hydrologie-Simulationen auf der Ein-Kilometer-Skala mit täglichen Daten zwischen 1971 und 2098 für Deutschland vorliegen.

Die hier eingesetzte Ensemble-Strategie erlaubt eine umfassende Auswertung sowohl der im Rahmen der Modellunsicherheiten wahrscheinlichsten Entwicklung (Median der Änderungen über alle Klimasimulationen in einem Klimaszenario) und der Gesamtspannbreite der möglichen Veränderungen (Best-case-/Worst-case Betrachtungen) als auch der Robustheit der Änderungen unter verschiedenen Szenarien des Klimawandels.

### **Mittlere langjährige Veränderungen**

Die Ergebnisse zeigen für Deutschland allgemein, dass die klimabedingten Veränderungen auch unter dem Klimaschutzszenario ungefähr bis zur Mitte des Jahrhunderts voranschreiten und sich danach stabilisieren, während die Änderungen unter dem Szenario „Weiter-so“ bis zum Ende des Jahrhunderts fortschreiten. Neben den mittleren Temperaturen ändern sich auch Hitzeperioden. Bis zum Ende des Jahrhunderts werden bei den Hitzetagen mit Tageshöchsttemperaturen über 30° C unter RCP 2.6 Zunahmen um 3,5 Tage/Jahr und unter RCP 8.5 um 15,5 Tage/Jahr erwartet. Verglichen wird immer gegen die Vergangenheitszeitscheibe 1971 bis 2000, in der im Mittel in Deutschland 5,8 Hitzetage/Jahr aufgetreten sind. Inwieweit damit Änderungen des Wasserbedarfes verbunden sind, wird aktuell im Rahmen des DVGW-Zukunftsprogramms Wasser im Projekt „WatDemand“ untersucht.

Zukünftige Änderungen des Wasserdargebots werden wesentlich durch den Niederschlag bestimmt, da sich Klimawandel auf die Menge und Verteilung des Niederschlags auswirkt. Vor diesem Hintergrund wurden saisonale und jährliche Änderungen des Niederschlags ausgewertet. Saisonale Änderungen beziehen sich auf die mete-

orologischen Jahreszeiten, die ganze Monate umfassen (z. B. Winter: Dezember–Februar). Generell steigt die Jahresniederschlagssumme mit zunehmender Erwärmung leicht an. Im Ensemblemedian unter RCP 2.6 wird regional bis 2050 eine Zunahme zwischen +4,5 Prozent (Donau, Rhein) und +6,8 Prozent (Oder) erwartet, danach treten uneinheitliche und nur leichte Änderungen auf. Demgegenüber wird für das Szenario RCP 8.5 eine Zunahme der mittleren Jahresniederschlagssummen um ungefähr 11 Prozent (Maas) bis knapp 20 Prozent im Oder- und Warnow-Peene-EZG in der Zukunftszeitscheibe 2069 bis 2098 ersichtlich.

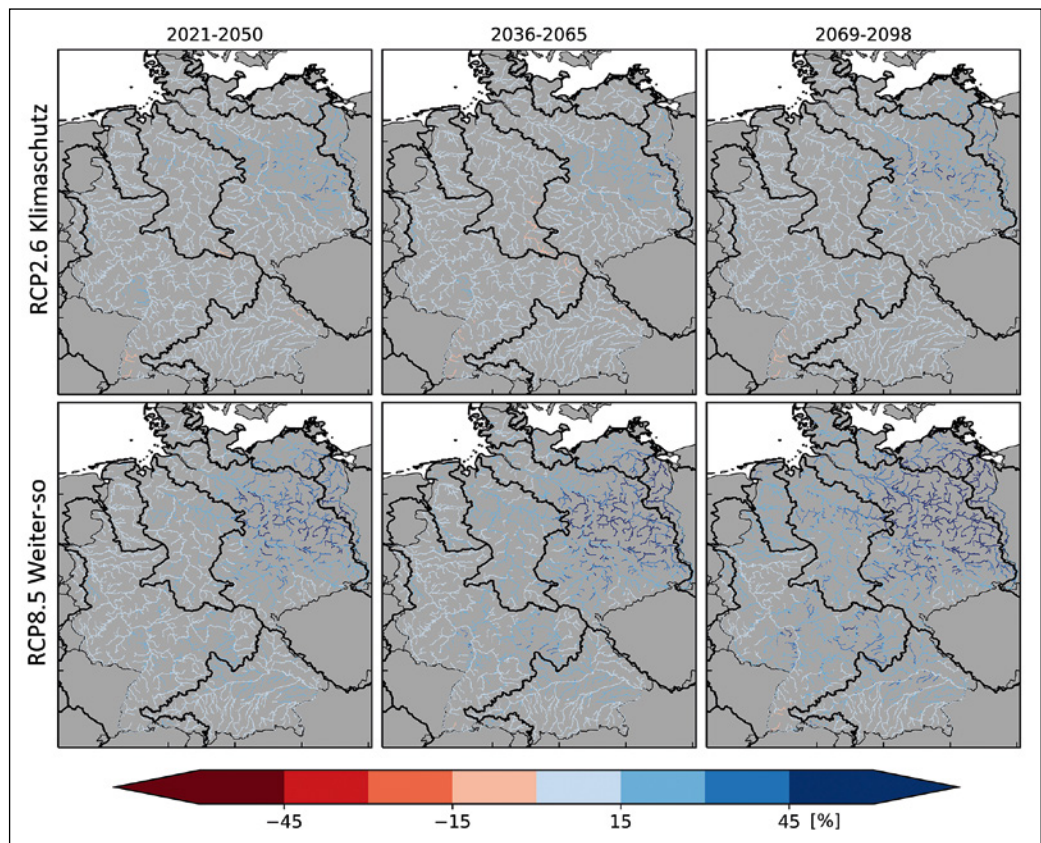


## *Zukünftige Änderungen des Wasserdargebots werden wesentlich durch den Niederschlag bestimmt, da sich der Klimawandel auf die Menge und Verteilung des Niederschlags auswirkt.*

Die Niederschlagsänderungen fallen saisonal sehr unterschiedlich aus. Im Sommer zeigen sich die stärksten mittleren Niederschlagsabnahmen unter dem RCP 8.5 Szenario von ca. -7 Prozent (Rhein) bis -9 Prozent (Maas) und leichte Zunahmen im Oder Gebiet (+7 Prozent). Im Winter werden im Median über alle Simulationen Niederschlagszunahmen erwartet. Diese fallen unter RCP 8.5 an Maas (+27 Prozent) und Warnow-Peene (+33 Prozent) am stärksten aus. Die prozentualen Änderungen weisen den Median über das Klimaensemble aus und stellen damit im Rahmen der Modellunsicherheiten die wahrscheinlichste Entwicklung dar. Unter beiden Szenarien finden sich jedoch auch Simulationen sowohl mit stärkeren Niederschlagszunahmen als auch mit Niederschlagsabnahmen. Diese sind möglich, aber weniger wahrscheinlich.

In den letzten Jahren wurde in Deutschland der Anstieg der Verdunstung als maßgeblicher Treiber der Wasserhaushaltsänderung diskutiert. So hat sich die klimatische Wasserbilanz als Indi-

**Abb. 1:** Relative Änderung der mittleren jährlichen Abflüsse [%] in drei Zukunftszeitscheiben verglichen mit 1971-2000. Oben ist der Median über das Klimaschutzszenario RCP2.6, unten über das Weiter-So-Szenario RCP8.5 dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit werden nur Flussabschnitte mit mindestens 100 km<sup>2</sup> Einzugsgebietsgröße dargestellt.



Quelle: UFZ

kator etabliert, bei der die potenzielle Verdunstung (PET) eingesetzt wird. Die PET wird jedoch maßgeblich durch die Änderungen der maximalen Temperaturen beeinflusst, so dass diese steigen muss und damit für terrestrische Klimafolgenergebnisse die tatsächliche Verdunstung (aET) genutzt werden sollte. **Tabelle 1** zeigt am Beispiel des Elbe-Einzugsgebietes, dass die mit mHM simulierte Zunahme der tatsächlichen Verdunstung weniger stark ausfällt als die PET (nach Hargreaves-Samani). Die aET war bisher in Deutschland im Wesentlichen energielimitiert. Bei abnehmenden Sommerniederschlägen und regelmäßig unter Klimawandel stärker austrocknenden Böden in der Vegetationsperiode II (Juli bis September) tritt zukünftig jedoch vermehrt eine Wasserlimitation der Verdunstung auf. Es bleibt zu berücksichtigen, dass das eingesetzte hydrologische Modell mHM kein dynamisches Pflanzenwachstumsmodul enthält. Damit kann eine erwartete leichte weitere Verfrühung des phänologischen Frühjahres und damit eine Verlängerung der Vegetationsperiode nicht vollständig abgebildet werden, was zu einer aET-Unterschätzung führt. Gleichzeitig findet aber auch eine Pflanzenanpassung hin zu höherer Wassereffektivität in der Landwirtschaft und in Wäldern [z. B. 10] statt (Modell-aET-Überschätzung). Inwieweit diese Effekte sich gegenseitig aufheben, ist wissenschaftlicher Untersuchungs-

gegenstand. Weiterhin ist in Tab. 1 ersichtlich, dass die zukünftige atmosphärische Bilanz  $P-aET$  positiv ist und somit terrestrisch zukünftig ein leichter Wasserüberschuss entsteht.

Die Auswertung der Änderung der mittleren jährlichen Abflüsse (Abb. 1) ergibt insgesamt über Deutschland zunehmende jährliche Abflussmengen. Die Zunahmen nehmen von Südwesten nach Nordosten sowie mit zunehmender Erwärmung zu. Jährliche Abnahmen finden sich vereinzelt z. B. in der Weser oder im Schwarzwald.

Im Rahmen des Projektes wurden zudem die jährlichen Zuflüsse für 96 Trinkwasser-Talsperren untersucht. Die Einzugsgebiete (EZG) im hydrologischen mHM-Modellsetup wurden anhand hochaufgelöster digitaler Geländemodelle bestimmt. Technische Infrastruktur wird dabei nicht berücksichtigt. Von den 27 Talsperren mit einem Einzugsgebiet größer als 50 km<sup>2</sup> zeigen bis zum Ende des Jahrhunderts alle Talsperren einen steigenden mittleren jährlichen Zufluss unter dem Weiter-so Szenario RCP8.5; unter dem Klimaschutzszenario weist lediglich eine der Talsperren einen zukünftigen leichten Rückgang des mittleren jährlichen Zuflusses aus.

Die Grundwasserneubildung (GWN) ist unter anderem abhängig von der Niederschlagsart,



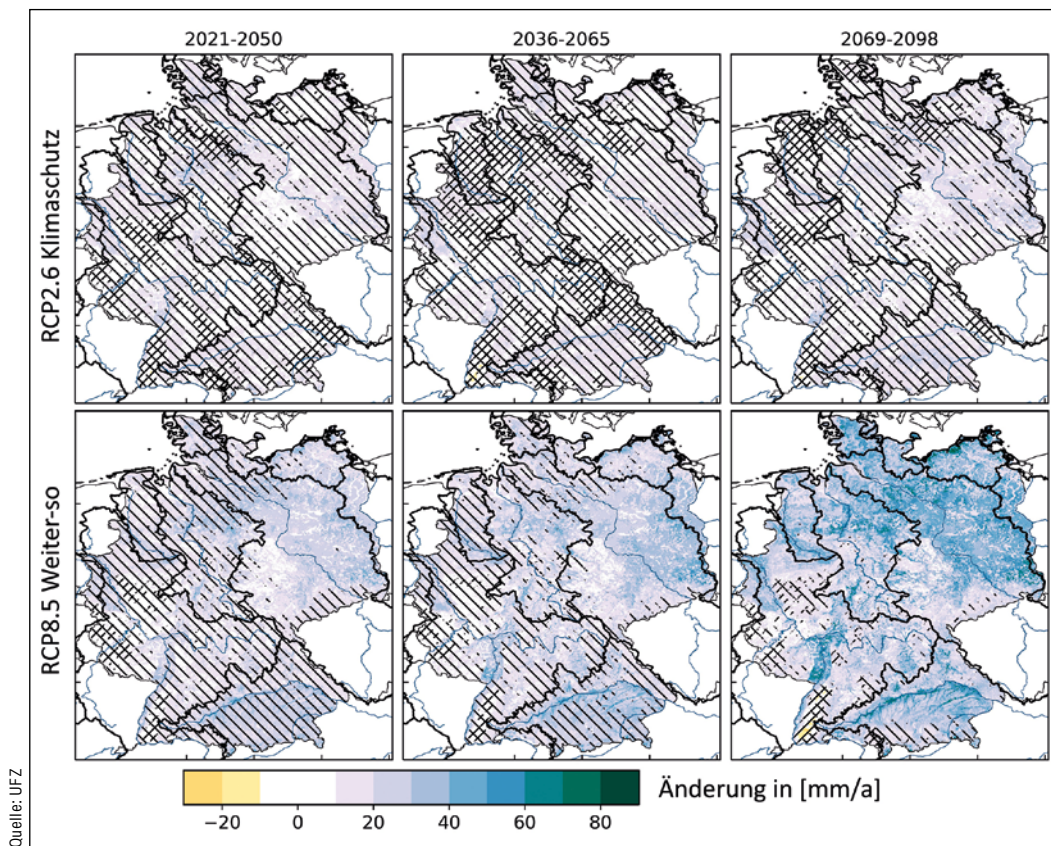


Abb. 2: Median der absoluten Änderung der jährlichen Grundwasserneubildung [mm/a] in drei Zukunftszeitscheiben verglichen mit 1971 bis 2000. Oben ist das Klimaschutzszenario RCP2.6, unten das Weiter-So-Szenario RCP8.5 dargestellt. Die Schraffuren kennzeichnen die Robustheit. Unschraffierte Bereiche zeigen dabei robuste Änderungen, gekreuzte Schraffur bedeutet, dass keine Änderung im Vergleich zur Vergangenheit festgestellt wird.

-menge und -intensität. Niederschläge im Sommerhalbjahr spielen wegen der Vegetationsaktivität und höheren aktuellen Verdunstung im Vergleich zum hydrologischen Winterhalbjahr eine untergeordnete Rolle. Aufgrund großer naturräumlicher und klimatischer Unterschiede schwankt die langjährige GWN in Deutschland zwischen unter 25 mm/a (z. B. im Mitteldeutschen

Trockengebiet) und deutlich über 350 mm/a im Mittelgebirgsraum sowie im Alpenvorland und den Alpen [11]. Die jährliche GWN wurde aus den täglichen vertikalen Wasserflüssen im Boden des hydrologischen Modells mHM abgeschätzt.

Wie schon beim Jahres- und Winterniederschlag nimmt der Median der jährlichen GWN mit zu-

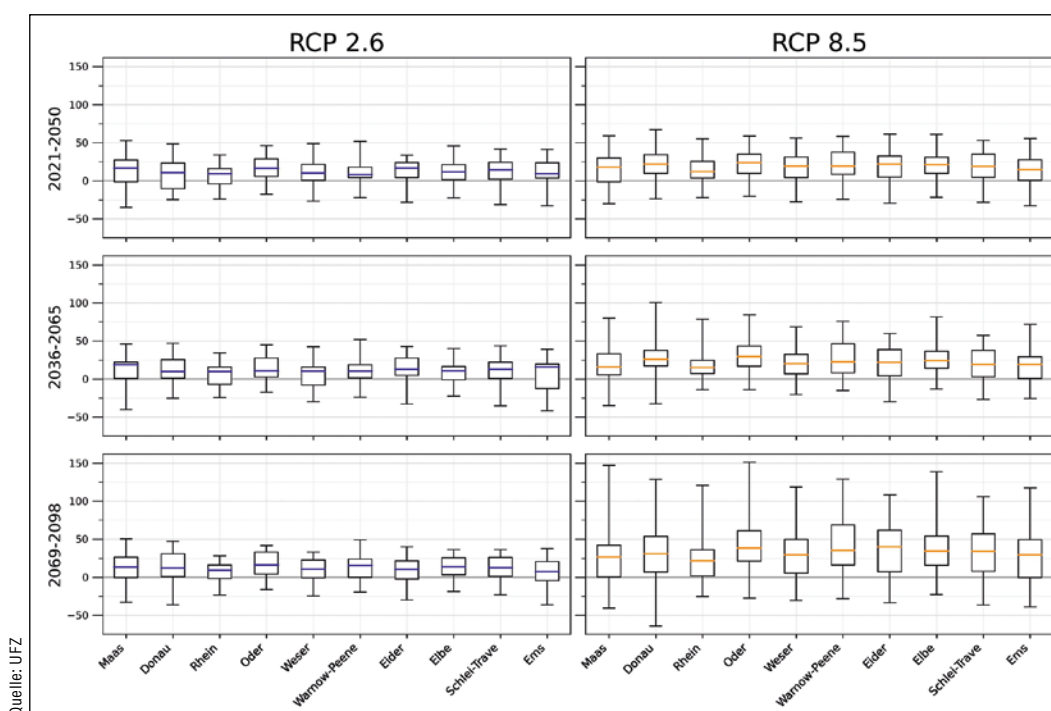
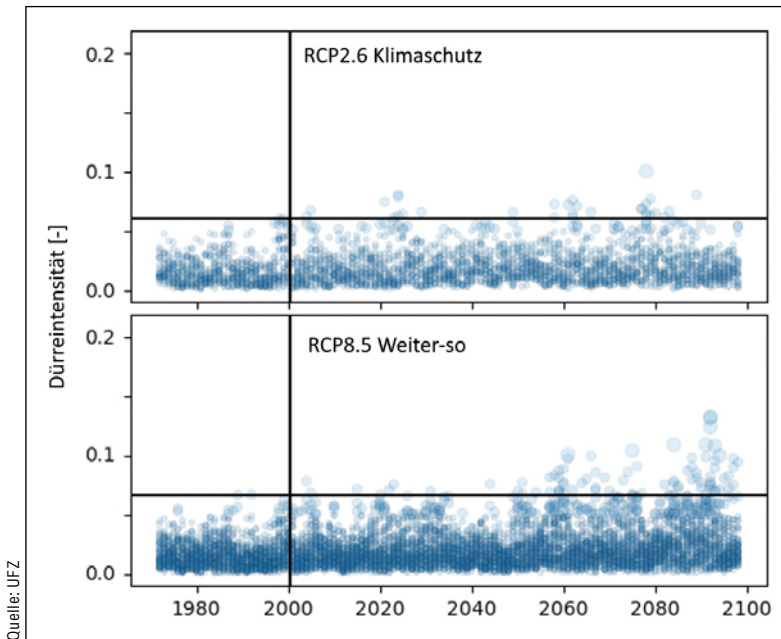


Abb. 3: Mittlere absolute Änderung der jährlichen Grundwasserneubildung [mm/a] in drei Zukunftszeitscheiben verglichen mit 1971 bis 2000 über die Fläche der zehn Haupteinzugsgebiete. Links ist das Klimaschutzszenario RCP2.6, rechts das Weiter-So-Szenario RCP8.5 dargestellt. Gezeigt sind Minimum, 25-Perzentil, Median, 75-Perzentil und Maximum der Änderung aus allen Simulationen eines Szenarios.



Quelle: UFZ

**Abb. 4:** Zweijährige Bodenfeuchtedürren bis 30 cm Bodentiefe über die Fläche Deutschlands und den Ursprungsgebieten unserer Flüsse. Oben ist das Klimaschutzszenario RCP2.6 (21 Simulationen), unten das Weiter-So-Szenario RCP8.5 (49 Simulationen) dargestellt. In den Quadranten links unten sind die zweijährigen Dürreintensitäten der Vergangenheit gezeigt, rechts oben finden sich jeweils zukünftig auftretende größere Dürreintensitäten als in der Vergangenheit. Eine jahresscharfe Zuordnung ist nicht möglich, da Klimasimulationen nicht das tatsächliche Wetter abbilden.

nehmender Erwärmung über alle zukünftigen 30-jährigen Zeiträume zu. Neben dem insgesamt im Winterhalbjahr zunehmenden Niederschlag nehmen auch Frosttage ab. Bis zum Ende des Jahrhunderts nehmen die Tage mit Minimumtemperaturen unter  $0^{\circ}\text{C}$  im Median zwischen  $-20\text{ d/a}$  (RCP2.6) bis  $-58\text{ d/a}$  (RCP 8.5) ab [12]. Ein Rückgang von Tagen mit Bodenfrosth begünstigt wiederum die Infiltration des Niederschlagswassers in den Boden. Die absoluten Änderungen der GWN sind insgesamt klein, regional sind diese prozentual aber teilweise hoch. Dies betrifft vor allem den Nordosten Deutschlands (Abb. 2).

Neben der wahrscheinlichsten Entwicklung (Median über das Modellensemble) wird auch die Robustheit der Änderung dargestellt. Dazu werden die Übereinstimmung der Änderungsrichtung sowie die Signifikanz der Änderung verwendet. Wenn weniger als zwei Drittel der Simulationen dieselbe Änderungsrichtung zeigen, wurden die entsprechenden Flächen in Abb. 2 nach rechtsoben [//] schraffiert. Die Signifikanz der Änderung beinhaltet den Test, ob zukünftige Änderungen innerhalb oder außerhalb der natürlichen Variabilität liegen. Nach [12] ist eine Klimaänderung signifikant, wenn sie gemäß eines sogenannten U-Tests (hier: Wilcoxon Rangsummentest) mit einer Wahrscheinlichkeit von unter 5 Prozent mit zufälligen Schwankungen erklärbar ist. Wenn weniger als 50 Prozent der Simulationen eine signifikante Änderung zeigen, wurde die Flächen in Abb. 2 nach rechtsunten schraffiert [\]. Schraffierungen in beide Richtungen liefern ebenfalls eine klare Aussage, da

keine Änderung zwischen Vergangenheits- und Zukunftszeitscheibe zu erwarten ist. Die gesamte Spannbreite der Simulationen über die zehn großen Einzugsgebiete Deutschlands ist zusätzlich in Abb. 3 dargestellt.

### Entwicklung von Dürreereignissen

Dürren sind Extremereignisse mit einer Trockenheit, die statistisch nur in 20 Prozent der Fälle erreicht wird. Sie können über mehrere Jahre andauern. Die Entwicklung der oben gezeigten langjährigen zukünftigen Änderungen des Niederschlages und der GWN zeigen deutlich, dass die aktuelle Bodenfeuchtedürre seit 2018 kein neuer Normalzustand ist.

Innerjährlich nehmen zukünftig Dürren in der Bodenschicht bis 30 cm Tiefe durch die Stagnation oder Abnahme des Sommerniederschlages im Südwesten Deutschlands am stärksten zu. Dies betrifft vor allem die Vegetationsperiode II von Juli bis September. Darüber hinaus wurden zweijährige Dürreintensitäten für die gesamte Fläche Deutschlands und der Ursprungsgebiete der großen EZG berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 4 dargestellt.

Die Dürreintensität ist ein dimensionsloses Maß, um die Stärke einer Dürre abzuschätzen. In die Berechnung fließen die Länge der Dürreperiode in zweijährigen Zeiträumen und die absolute Trockenheit im zeitlichen Verlauf ein. Zusätzlich wird eine Normierung über Zeit und Raum vorgenommen, so dass ein Maximalwert von 0.2 erreicht werden kann. Dieser würde bedeuten, dass jeder Tag innerhalb von zwei Jahren in der gesamten betrachteten Fläche trockener war als alle Tage im Vergleichszeitraum 1971 bis 2000. Die zweijährigen Dürreintensitäten wurden für jede Klima-Hydrologie-Simulation berechnet. Abb. 4 zeigt, dass unter beiden Klimaszenarien zukünftig größere Intensitäten auftreten und dass diese unter dem Weiter-so Szenario stärker ausgeprägt sind. Insgesamt steigt also in Deutschland die Wahrscheinlichkeit zweijähriger Ereignisse mit größeren Intensitäten als in der Vergangenheitszeitscheibe.

### Zusammenfassung

Die Anpassung an den Klimawandel erfordert eine robuste Entscheidungsbasis. Dazu wurden alle verfügbaren Klimasimulationen, die Deutschland und die Ursprungsgebiete unserer EZG abdecken, genutzt, um zukünftige Änderungen mit

dem hydrologischen Modell mHM abzuschätzen. Neben den Informationen zur wahrscheinlichsten Entwicklung sind auch Informationen zu Trendstabilität, Signifikanz von Änderungen und deren Spannweiten abgeleitet worden.

Während Temperatur- und Hitzeindikatoren einen eindeutig zunehmenden Trend zeigen, finden sich unter den Klimasimulationen in der Gesamtspannweite sowohl zukünftige Zu- als auch Abnahmen des Jahresniederschlags. Die wahrscheinlichste Entwicklung (Median über die Szenariensembles) über die Fläche Deutschlands ist eine leichte Jahresniederschlagszunahme, die mit zunehmender Erwärmung stärker ausfällt. Damit verbunden sind sowohl leichte Zunahmen des mittleren jährlichen Abflusses – und damit der Zuflüsse zu Talsperren – als auch der GWN. Es konnte gezeigt werden, dass trotz der Zunahme des langjährigen zukünftigen Wasserdargebotes innerjährlich mit einem stärkeren Austrocknen der Böden von Juli bis September zu rechnen ist. Außerdem steigt die Wahrscheinlichkeit zweijähriger Dürreereignisse mit zunehmender Erwärmung.

## Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden mit Mitteln des Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft (IVF) in der Helmholtz-Klimainitiative ([www.helmholtz-klima.de](http://www.helmholtz-klima.de)) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Wir danken insbesondere Oldrich Rakovec und Rohini Kumar (UFZ) sowie Thomas Remke und Kevin Sieck (Helmholtz-Zentrum Hereon, Climate Service Center Germany GERICS) für die wissenschaftliche Unterstützung. Wir danken der EURO-CORDEX-Gemeinschaft (<https://euro-cordex.net>) sowie dem vom BMBF geförderten Projekt ReKliEs-De (<http://reklies.hlnug.de>) für die Veröffentlichung der Ergebnisse regionaler Klimasimulationen. Sebastian Müller, Özge Can und Chaitanya Malla danken wir für die technische Unterstützung. ■

## Literatur

- [1] IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- [2] Samaniego, L. S., Thober, R., Kumar, N., Wanders, O., Rakovec, M., Pan, M., Zink, J., Sheffield, E. F., Wood, and A. Marx (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*. <http://dx.doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>
- [3] Rakovec, O., Samaniego, L., Hari, V., Markonis, Y., Vojtech Moravec, Stephan Thober, Martin Hanel, Rohini Kumar: The 2018–2020 Multi-Year Drought Sets a New Benchmark in Europe. *Earth's Future*, <https://doi.org/10.1029/2021EF002394>

- [4] Zink, M., Samaniego L., Kumar R., Thober S., Mai J., Schaefer D. and Marx A. (2016). The German drought monitor, *Environmental Research Letters*, *Enviro n. Res. Lett.* 11, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074002
- [5] Marx, A., Rakovec, O., Boeing, F., Kelbling M., Thober S., Müller S., Samaniego, L. (2022). Towards high-resolution multi-model climate-hydrology indicators for Germany. In: Helmholtz Climate Initiative. Final report. <https://www.helmholtz-klima.de/projekte/veroeffentlichungen>
- [6] Hübener, Heike; Bülow, Katharina; Fooker, Cornelia; Früh, Barbara; Hoffmann, Peter; Höpp, Simona; Keuler, Klaus; Menz, Christoph; Mohr, Victoria; Radtke, Kai; Ramthun, Hans; Spekat, Arne; Steger, Christian; Toussaint, Frank; Warrach-Sagi, Kirsten; Woldt, Michael (2017). ReKliEs-De Ergebnisbericht. World Data Center for Climate (WDCC) at DKRZ. [https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe\\_Ergebnisbericht](https://doi.org/10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Ergebnisbericht)
- [7] Samaniego, L., Remke, T., Kevin S., Boeing, F., Rakovec, O., Marx, A., Thober, S., Müller, S. (2022). High-resolution bias-adjusted and disaggregated climate simulation ensemble. In: Helmholtz Climate Initiative. Final report. <https://www.helmholtz-klima.de/projekte/veroeffentlichungen>
- [8] Kumar, R., Samaniego, L., and Attinger, S. (2013). Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations: DISTRIBUTED HYDROLOGIC MODEL PARAMETERIZATIONS, *Water Resources Research*, 49, 360–379, <https://doi.org/10.1029/2012WR012195>, <http://doi.wiley.com/10.1029/2012WR012195>
- [9] Samaniego, L., Kumar, R., and Attinger, S. (2010): Multiscale parameter regionalization of a grid-based hydrologic model at the mesoscale: MULTISCALE PARAMETER REGIONALIZATION, *Water Resources Research*, 46, <https://doi.org/10.1029/2008WR007327>, <http://doi.wiley.com/10.1029/2008WR007327>
- [10] Urban J, Ingwers M, McGuire MA, Teskey RO (2017). Stomatal conductance increases with rising temperature. *Plant Signal Behav.* 12(8):e1356534. doi: 10.1080/15592324.2017.1356534.
- [11] von Jankiewicz, P., Neumann, J., Duijnisveld, W. H. M., Wessolek, G., Wycisk, P., & Hennings, V. (2005). Abflusshöhe – Sickerwasserrate – Grundwasserneubildung – Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. *Hydrologie Und Wasserbewirtschaftung*, 49(1), 2–13.
- [12] Pfeifer S, Rechid D, Bathiany S: Klimaaußblick Deutschland v1.2. (2021). Climate Service Center Germany (GERICS) [https://gerics.de/products\\_and\\_publications/fact\\_sheets/index.php.de](https://gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/index.php.de)

## Die Autoren

**Andreas Marx** leitet den Deutschen Dürremonitor am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung.

**Friedrich Boeing** ist Doktorand am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung und der Universität Potsdam.

**Luis Samaniego** ist Professor an der Universität Potsdam und stellvertretender Leiter des Departments Hydrosystemmodellierung am UFZ

### Kontakt:

Dr. Andreas Marx  
Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ  
Permoserstraße 15  
04318 Leipzig  
Tel: 0341 235 1074  
E-Mail: [andreas.marx@ufz.de](mailto:andreas.marx@ufz.de)  
[www.ufz.de](http://www.ufz.de)