

This is the preprint of the contribution published as:

Marx, A., Boeing, F., Rakovec, O., Müller, S., Can, Ö., Malla, C., Peichl, M., Samaniego, L. (2021):

Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserbedarf und -dargebot
WasserWirtschaft **111** (11), 14 - 19

The publisher's version is available at:

<http://dx.doi.org/10.1007/s35147-021-0905-5>

Andreas Marx, Friedrich Boeing, Oldrich Rakovec, Sebastian Müller, Özge Can, Chaitanya Malla, Michael Pechl, Luis Samaniego

Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserbedarf und –dargebot Climate impacts on water demand and supply in Germany

Vorspann

Diese Studie nutzt 70 Klima-Wasserhaushaltssimulationen auf der Ein-Kilometer-Skala unter zwei Klimaszenarien für Deutschland. Klimawandel führt zu länger anhaltenden Hitzeperioden, so dass Wasserbedarf und Spitzenwasserabgaben zukünftig steigen werden. Die Grundwasserneubildung nimmt mit zunehmender Erwärmung im Median in Deutschland zu. Während die Veränderungen im Klimaschutzszenario moderat sind und zur Mitte des Jahrhunderts stabilisieren, nehmen sowohl Grundwasserneubildung und Hitzeindikatoren im Weiter-so-wie-bisher Szenario bis zum Ende des Jahrhunderts weiter zu.

Abstract

This study uses 70 climate water balance simulations at the one-kilometer scale under two climate scenarios for Germany. Climate change leads to longer-lasting hot spells, so water demand and peak water releases will increase in the future. Groundwater recharge increases with increasing global warming in Germany. While changes in the climate protection scenario RCP2.6 are moderate and stabilize by mid-century, both groundwater recharge and heat indicators continue to increase until the end of the century in the business-as-usual scenario RCP8.5.

Kompakt

- Klimawandel führt zu länger anhaltenden Hitzeperioden. Daher wird erwartet, dass sowohl der mittlere Wasserbedarf als auch die Spitzenwasserabgaben zukünftig steigen.
- Zukünftig verändert sich auch die Dargebotsseite. Die Grundwasserneubildung nimmt mit zunehmender Erwärmung im Median in Deutschland zu.

1. Ausgangssituation

Der globale Klimawandel äußert sich bereits heute durch häufiger auftretende, stärkere und länger anhaltende Hitzewellen und Dürresituationen mit deutlich unterdurchschnittlichen Niederschlägen bei gleichzeitig erhöhter Verdunstung. Allein in den letzten 20 Jahren war Mitteleuropa sechs Mal von sommerlichen Hitze- und Dürreperioden betroffen. Vor allem die Jahre 2018 und 2019 waren ausgesprochene Dürre- und Hitzejahre, die von extremen Niedrigwasserabflüssen, fallenden Grundwasserständen und starker Austrocknung der Böden geprägt waren. Im Jahr 2018 wurden in Leipzig 36 Tage mit Temperaturen von mehr als 30°C (Heiße Tage) gemessen – ungefähr viermal häufiger als langjährig (1961-1990) erwartet wird. Die Jahre 2018-2020 sind nach Daten des Deutschen Dürremonitors am UFZ (www.ufz.de/duerremonitor, [12]) im Gesamtboden bis in eine Tiefe von ca. 180cm unter den vier trockensten Jahren seit 1951. Gleichzeitig haben Starkniederschlagsereignisse wie 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen neue Ausmaße mit mehr als 170 Todesopfern erreicht. Es herrscht breiter Konsens in der Wissenschaft, dass die Wahrscheinlichkeit von Extremwetterlagen auch zukünftig stark zunehmen wird [4]: Dürre und Niederschlagsdefizite oder Starkniederschläge werden in vielen Regionen Europas und Deutschlands deutlich häufiger und länger

auftreten als in der Vergangenheit [9]. Selbst bei einer Erwärmung von 1.5 Grad müssen die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt durch geeignete Maßnahmen abgedeckt werden bzw. eine technisch-regulative Anpassung erfolgen (z.B. [6], [10]).

Als Folge der ausgeprägten Dürreperioden treten vermehrt multi-sektorale Probleme auf. Die Siedlungswasserwirtschaft sowie die Wasserverfügbarkeit für die Industrie- und Energieproduktion war bisher noch weniger stark betroffen, aber auch hier sind Probleme absehbar, sollten sich derartige Dürreperioden zukünftig häufiger wiederholen oder noch ausgeprägter auftreten und sich damit verbunden regionale und sektorale Wasserkonflikte verschärfen. Folglich muss die Wasserversorgung für die Zukunft auf eine möglicherweise veränderte Wasserverfügbarkeit und einen veränderten Wasserbedarf sowie innerjährliche Veränderungen einstellen.

2. Ein Ensemble aus 70 Klima-Hydrologie-Simulationen: Datenbasis für die Klimafolgenabschätzung

Im Rahmen der Helmholtz-Klimainitiative wurde in den letzten beiden Jahren ein hochaufgelöster Referenzklimadatensatz entwickelt. Dazu wurden 88 Klimasimulationen aus den Projekten EURO-CORDEX sowie ReKliES-DE [3] und auf eine horizontale Auflösung von $1.2 \times 1.2 \text{ km}^2$ für Deutschland sowie der umliegenden Einzugsgebiete disaggregiert. Der gerichtete Fehler der Klimasimulationen wurde wie in [7] mit einem trenderhaltenden Verfahren adjustiert. Damit steht eine umfassende Datenbasis zur Beschreibung von Hitzewellen zur Verfügung. Die Entwicklung von mittleren Temperaturen, aber auch von Extremwerten, hängt maßgeblich von der Entwicklung der Treibhausgase ab. Diese werden in Klimamodellen in unterschiedlichen Szenarien berücksichtigt, die letztlich die zukünftige Entwicklung z.B. von Energieerzeugung und Verbrauch, der Landnutzung und Landwirtschaft, der Bevölkerung oder der technologischen Entwicklung beinhaltet. Mit den beiden extremsten Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 wird die Spannweite der möglichen Entwicklungen unter Klimawandel abgedeckt. Für das Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5 steht für einen repräsentativen Konzentrationspfad mit einem Strahlungsantrieb von $8,5 \text{ Wm}^{-2}$) wurde bis zum Ende des Jahrhunderts eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur in Deutschland um fast $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bandbreite des Klimaänderungssignals von $2,8$ bis $5,2 \text{ }^\circ\text{C}$) ermittelt. Im Klimaschutz-Szenario RCP2.6 (zusätzlicher Strahlungsantrieb von $2,6 \text{ Wm}^{-2}$) würde die Erwärmung nur $1 \text{ }^\circ\text{C}$ (Bandbreite von $0,7$ bis $2,4 \text{ }^\circ\text{C}$) ausmachen [3]. Klimafolgen für den Wasserhaushalt wurden mit dem hydrologischen Modellsystem mHM ([5], [8]) auf dem mit den Klimasimulationen identischen Modellgitter abgeschätzt. Das Umweltsystemmodell kann dominante ökosystemare Prozesse im Landschaftsmaßstab mathematisch beschreiben und berechnet neben den Oberflächenabflüssen z.B. die Interzeption und aktuelle Verdunstung, Bodenwasserkomponenten oder die Grundwasserneubildung. Das Modell wurde durch alle Klimasimulationen angetrieben, so dass insgesamt 88 Klima-Hydrologie-Simulationen auf der Ein-Kilometer-Skala für Deutschland vorliegen.

3. Zukünftige Hitzewellen erhöhen sommerlichen Wasserbedarf weiter

In den letzten Jahren hat sich gezeigt, dass Hitzewellen einen spürbaren Einfluss auf die Wasserversorgung haben können. Der Jahrhundertssommer 2003 hat in Kombination mit

hydrologischer und agrarischer Dürre bereits zu großen ökonomischen Schäden, aber auch zu Herausforderungen in der Wasserwirtschaft, geführt. Die Jahre 2018 und 2019 haben in der Ausprägung von aufeinander folgenden Jahren mit extremer sommerlicher Hitze in Kombination mit anhaltenden Dürren neue Maßstäbe gesetzt. Ähnlich trockene aufeinanderfolgende Sommer hat es in Mitteleuropa mindestens seit einem Vierteljahrtausend nicht gegeben [2]. Bisher sind Auswirkungen der Hitzewellen in den Sommermonaten häufig durch die Effekte der Urlaubszeit abgemildert worden. Unter Klimawandel verlängert sich jedoch der innerjährliche Zeitraum, indem Hitzewellen auftreten können als auch die Intensität, sodass mit stärkeren Auswirkungen auf den Wasserbedarf zu rechnen ist. Sowohl im Frühjahr als auch in den Herbst hinein nimmt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Sommertagen über 25°C und Heißen Tagen über 30°C zu. In Deutschland werden diese häufig zur Beschreibung von Hitzewellen genutzt (z.B. [1]). So wurden bereits im April 2018 die ersten Heißen Tage des Jahres in Deutschland beobachtet.

Die zukünftige Entwicklung hängt, wie oben beschrieben, maßgeblich von der weiteren Entwicklung der Treibhausgasemissionen ab. Zur Abschätzung der Entwicklung von Hitzewellen wurden die Tagesmaximaltemperaturen aus den 21 Klimasimulationen unter dem Klimaschutzszenario RCP2.6 sowie 49 Simulationen unter dem extremen Weiter-so-wie-bisher Szenario RCP8.5 ausgewertet. Bei den Sommertagen ergeben sich im Median über alle 70 Simulationen über Deutschland für die Vergangenheitszeitscheibe (1971-2000) 29 Sommertage pro Jahr.

Tabelle 1: Entwicklung der Heißen Tage ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) sowie der Sommertage ($\geq 25^{\circ}\text{C}$). Gezeigt sind die Entwicklungen für das Klimaschutzszenario (Median aus 21 Simulationen unter RCP2.6) und des Weiter so wie bisher Szenarios (Median aus 49 Simulationen unter RCP8.5), jeweils räumlich gemittelt über Deutschland. Zusätzlich ist in der Spalte Max der Wert für die maximale Veränderung in Deutschland angegeben.

Sommertage	RCP2.6 Klimaschutz		RCP8.5 Weiter-so-wie-bisher	
<i>Zeitscheibe</i>	Median	Max	Median	Max
1971-2000	29,2	57	29,6	57,2
2021-2050	39	68,2	38,9	71,3
2070-2099	38,8	70,4	62	100,7
Heiße Tage	RCP2.6 Klimaschutz		RCP8.5 Weiter-so-wie-bisher	
<i>Zeitscheibe</i>	Median	Max	Median	Max
1971-2000	5,6	15,7	5,7	16
2021-2050	9,6	24,5	10,1	25,4
2070-2099	9,1	23,4	21,7	47,5

Unter RCP2.6 nehmen die Sommertage bis 2050 im Median über Deutschland auf 39 Tage pro Jahr zu (siehe **Tabelle 1**), ebenso wie im Zeitraum 2070-2099. Es findet also auch in Deutschland eine Stabilisierung durch globalen Klimaschutz statt. Die Entwicklung unter dem Weiter-so-wie-bisher Szenario RCP8.5 zeigt diese Stabilisierung nicht. Bis zum Ende des Jahrhunderts steigen die Sommertage auf 62 Tage pro Jahr an. **Bild 1** zeigt die flächige Entwicklung des Medians der Sommertage aus den 49 Klimasimulationen. Die Struktur ist generell von den Klimaregionen und der Höhenlage ü. N.N. geprägt. In der Zeitscheibe bis 2050 werden mehr als 60 Sommertage im Median

nur im Oberrheingraben erreicht, während bis zum Ende des Jahrhunderts große Teile Deutschlands durchschnittlich über 70 jährliche Sommertage zeigen.

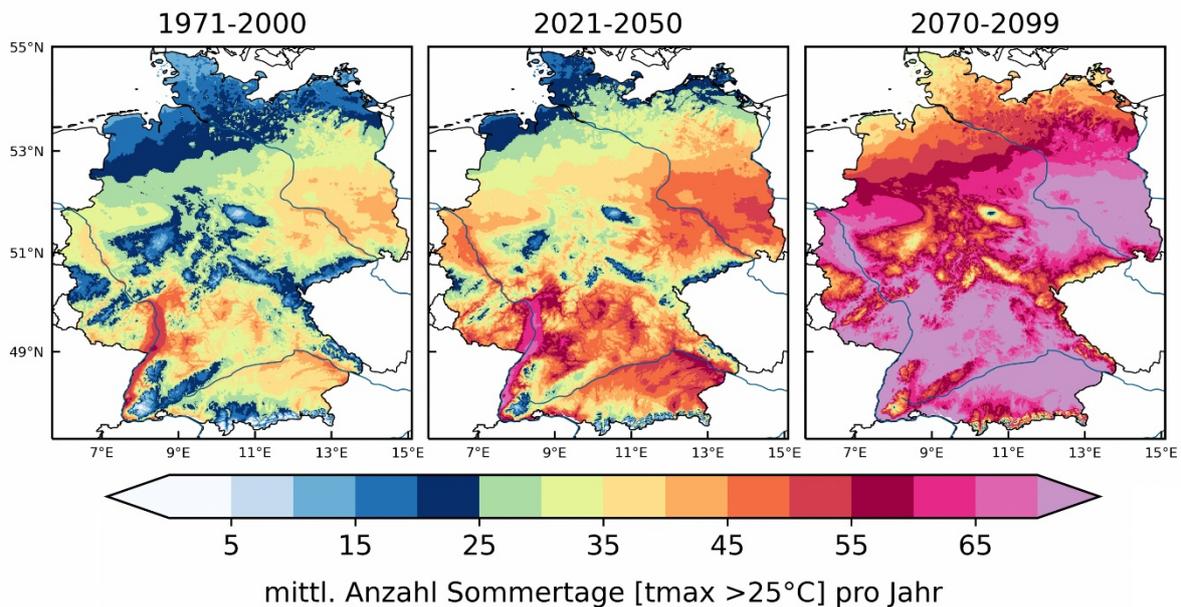


Bild 1: Entwicklung der Sommertage in der Vergangenheit (1971-2000) und der fernen Zukunft (2070-2099) aus 70 Klima-Hydrologie-Simulationen unter zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5). Dargestellt ist jeweils der Median der Änderung über Deutschland. (Quelle: eigene)

Die Entwicklung der Heißen Tage mit Tageshöchsttemperaturen von mindestens 30°C verläuft ähnlich wie bei den Sommertagen (Tab. 1). Unter RCP8.5 findet nicht, wie unter RCP2.6, ab Mitte des Jahrhunderts eine Stabilisierung bei knapp 10 Tagen pro Jahr statt. Bis zum Ende des Jahrhunderts wäre im Vergleich zur Vergangenheitszeitscheibe eine mehr als Verdreifachung der Heißen Tage zu erwarten.

Generell kann festgehalten werden, dass mit steigenden mittleren Temperaturen auch die Sommer- und Heißen Tage zunehmen. Während unter dem Klimaschutzszenario ein Anstieg der Indikatortage bis 2050 festgestellt werden kann, stabilisieren sich die Werte danach jeweils auf diesem höheren Niveau unter RCP2.6, während beide Hitzewellenindikatoren unter RCP8.5 weiter ansteigen.

4. *Steigender Winterniederschlag erhöht die Grundwasserneubildung*

Ein wichtige Komponente der Wasserverfügbarkeit ist in Deutschland die Grundwasserneubildung (GWN). Hier wurden 70 Klima-Hydrologiesimulationen mit dem mesoskaligen Modell mHM ausgewertet. Die Grundwasserneubildung wird als Besonderheit in mHM als lineares Reservoir definiert, welches den Basisabfluss speist. Die absoluten Flüsse der Modell-GWN sind geringer als nach [11]. Gründe sind konzeptionelle Unterschiede in der Flusseparierung zwischen Oberflächen-, Zwischen- und Basisabfluss und aktuelle Modellparametrisierung. Für die Berechnung der GWN werden daher auch Anteile des langsamen Interflow in mHM genutzt. Dieser Anteil wird als Faktor, der sich aus dem Unterschied der längsjährigen mittleren GWN 1961-1990 in mHM gegen die GWN nach [11] ergibt, berechnet. Der Faktor wird dabei zwischen 0 – 1 begrenzt, so dass sich Zuordnungen des langsamen Interflow zur GWN von 0 – max. 100 % ergeben. Die Gesamtflüsse werden somit in hydrologischen Modell konsistent erhalten. Im wesentlichen entspricht diese Vorgehensweise einer Bias-Korrektur. **Bild 2** zeigt die Muster der Änderungen unter den beiden betrachteten Klimaszenarien. Insgesamt nimmt die GWN über Deutschland zu. Unter dem Klimaschutzszenario beträgt der Median der Zunahme sowohl in der nahen Zukunft bis 2050 als auch in der fernen Zukunft bis 2099 zwischen 8-9% im Flächenmittel über Deutschland. Unter dem Weiter-so-wie-bisher Szenario betragen die

Zunahmen 14% in der nahen bzw. 23% in der fernen Zukunft. Insgesamt spiegelt die Entwicklung der GWN die Zunahme des Winterniederschlages (hier: November-April) wider. Mit zunehmender Erwärmung über das Gesamtklimaensemble aus 88 Klimasimulationen einschließlich des mittleren Szenarios RCP4.5 (das hier nicht gezeigt wird) nimmt sowohl der Jahres- als auch der Winterniederschlag zu.

In vorigen Klimafolgenstudien im Rahmen der Copernicus Climate Change Services für Europa mit einem Multi-Modell-Ensemble aus 15 Klimaantrieben und vier hydrologischen Modellen sowie darauf basierender Auswertungen für Deutschland und der Bundesländer [10] hat sich gezeigt, dass die Unsicherheiten durch die Auswahl des hydrologischen Modells größer sein können als die des Klimaantriebes (z.B. [7]). Dies betrifft vor allem schnee- und frostbeeinflusste Prozesse und damit auch die hauptsächlich vom Winterhalbjahr dominierte GWN.

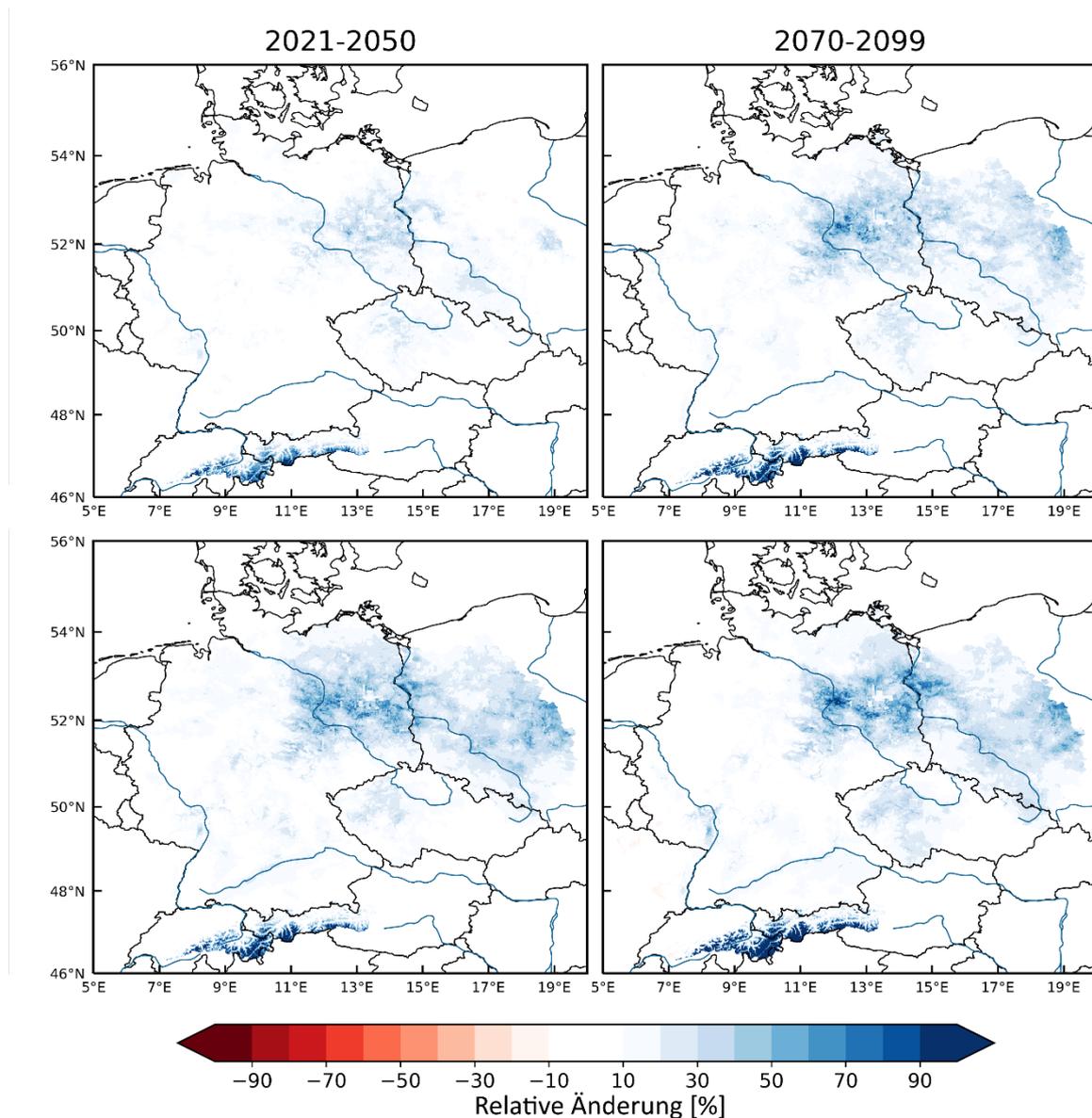


Bild 2: Entwicklung der Grundwasserneubildung aus dem Modell mHM in der nahen Zukunft (2021-50) und der fernen Zukunft (2070-99), verglichen mit 1971-2000 aus 70 Klima-Hydrologie-Simulationen unter zwei Klimaszenarien für Deutschland und die angrenzenden Einzugsgebiete. Dargestellt ist jeweils der Median der Änderung unter dem Klimaschutzszenario RCP2.6 (oben) und dem Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5 (unten). (Quelle: eigene)

5. Gegenüberstellung von Wasserbedarfs- und Wasserverfügbarkeitsindikatoren

Ein erster Schritt hin zu einer Gesamtbetrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit ist die Gegenüberstellung von Indikatoren der zukünftigen Änderungen des Wasserdargebots sowie des Wasserverbrauchs. Eine einfache Herangehensweise ist hierbei die Gegenüberstellung der oben einzeln betrachteten Sommertage sowie der Grundwasserneubildung. Diese ist in **Bild 3** gezeigt. Unter dem Klimaschutzscenario RCP2.6 (blaue Punkte) sind die Veränderungen insgesamt moderat. Fünf der 21 Ensemble-Member zeigen eine Abnahme der GWN. Insgesamt ist festzustellen, dass die Streuung der Änderungen klein ist und mit Zunahme des Wasserbedarfsindicators Sommertage insgesamt eine Zunahme des Wasserverfügbarkeitsindicators GWN vorliegt. Ein Vergleich mit dem Weiter-so-wie-bisher Szenario zeigt im ersten Schritt, dass die farblich orange markierten Simulationen keine Schnittmenge mit dem Klimaschutzscenario zeigt. Die Änderungen sind deutlich stärker ausgeprägt, ebenso die Spannweite sowohl bei den Sommertagen mit einem Unterschied in der Zunahme von mehr als 60 Tagen als auch bei der Änderung der GWN mit einer Spannweite von mehr als 150 mm/a. Damit kann geschlussfolgert werden, dass die Grundaussage aus dem Klimaschutzscenario ebenfalls zutrifft. Mit Zunahme des Wasserbedarfsindicators Sommertage geht insgesamt eine Zunahme des Wasserverfügbarkeitsindicators einher, durch die weit größere Spannweite ist die Unsicherheit der Ergebnisse jedoch wesentlich höher.

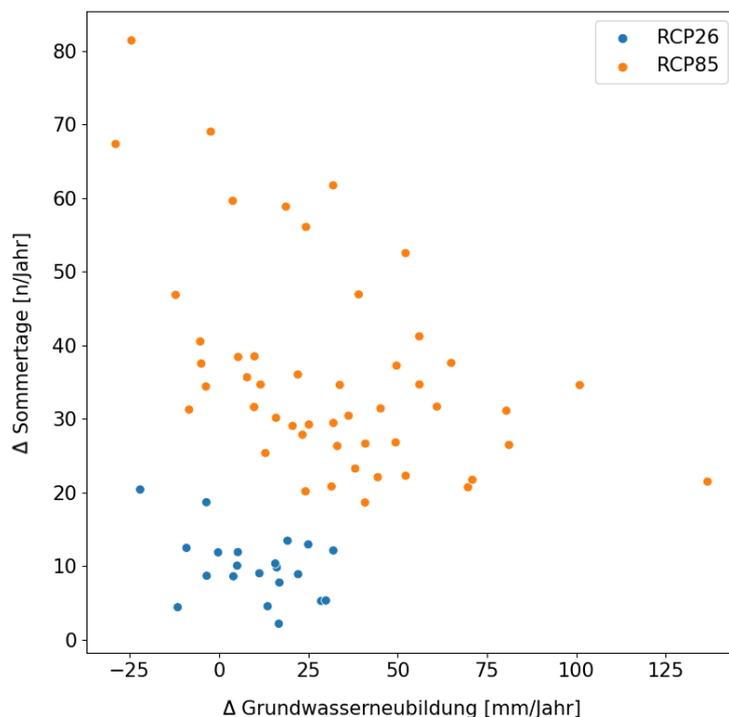


Bild 3: Absolute Zunahme der Sommertage gegen die absolute Veränderung der GWN zwischen der Vergangenheit (1971-2000) und 2070-2099 unter zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) für jede der 70 Klima-Hydrologie-Simulationen. Dargestellt ist jeweils die Änderung des Flächenmittels über Deutschland. (Quelle: eigene)

Daten zu zukünftigen Talsperrenzuflüssen oder Abflussmengen Δ mit Auswirkungen auf das Uferfiltrat liegen vor, wurden bisher jedoch noch nicht ausgewertet. Diese sollten in eine Gesamtbetrachtung eingebunden werden. Alle hier gezeigten Änderungen beschränken sich zudem auf die klimabedingten Effekte. Natürlich müssen in regionalen Arbeiten auch z.B. zukünftige Veränderungen der Demographie oder veränderte Bedarfe in der Industrie oder Landwirtschaft einbezogen werden.

6. Einordnung der Ergebnisse in bestehende Arbeiten

Die Auswahl einer einzelnen Klimasimulation und darauf basierende Klimafolgenabschätzungen bedeuten ein Würfeln eines Ergebnisses in den Unsicherheitsraum. Daher werden heute häufig Modellensembles ausgewertet und der Median der Änderung als wahrscheinlichster Wert ausgewiesen. Dazu werden in Deutschland zwei unterschiedliche Typen von regionalen Klimamodellen eingesetzt. Neben den international gebräuchlichen regionalen Klimamodellen mit einem dynamischen Kern (RCM) werden auch statistische Modelle (ESD) eingesetzt. Die letzteren liefern ähnliche Spannbreiten bei der zukünftigen Temperatur, jedoch systematisch weniger Niederschlag als die RCMs [3]. Dies hat zur Folge, dass unterschiedliche Studien zur Temperaturänderungen einschließlich Hitzewellen in Deutschland zu vergleichbaren Ergebnissen führen. Betrachtungen des Niederschlages oder abgeleiteter Wasserhaushaltskomponenten wie z.B. der Grundwasserneubildung führen jedoch zu teilweise sehr unterschiedlichen Aussagen. In der vorliegenden Wasserhaushaltsstudie wurde das bisher größte Klimamodellensemble in Deutschland eingesetzt. ESD kamen nicht zum Einsatz, da diese im wissenschaftlichen Bereich eine untergeordnete Rolle spielen und in der Vergangenheit systematische Unterschiede zu den methodisch sehr vielfältigen RCMs gezeigt haben. Basierend alleine auf dem extremsten statistischen Modell wird z.B. für Sachsen eine deutliche zukünftige Abnahme der GWN¹ gezeigt. Dies ist jedoch nicht die wahrscheinlichste, sondern die extremste der möglichen zukünftigen Entwicklungen. Daher liegt es in der Verantwortung der Modellierer, gegenüber potentiellen Nutzern von Klima- und Klimafolgendaten kenntlich zu machen, wie die Ergebnisse methodisch generiert worden sind und wie die Ergebnisse im Vergleich zu anderen Studien einzuordnen sind.

7. Entwicklung umfassender Klimafolgeninformationen für die Wasserversorgung

In der Vergangenheit wurden einige Studien zur Entwicklung des Wasserhaushaltes entweder in Teilen Deutschlands, für eine einzelne Wasserhaushaltskomponente oder ein bestimmtes Extremereignis wie Hochwasser oder Dürren durchgeführt. Dabei wurden sektorale Konflikte, die z.B. durch einen Klimaanpassungseffekt stärkerer Bewässerung in der Landwirtschaft auftreten können, in der Regel nur qualitativ beschrieben. Unterschiedliche Studien haben zudem keine konsistente Klimasimulationsdatenbasis, so dass die Ergebnisse schwer zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden können. Mit der vorliegenden Datenbasis kann diese Lücke weiter geschlossen werden. Dies hat sich das in diesem Jahr gestartete Wissenstransferprojekt „Wasserressourcen-Informationssystem für Deutschland“ WIS-D² zum Ziel gesetzt. Zusammen mit Praxispartnern aus der Wasserwirtschaft sowie zuständigen Behörden soll eine konsistente, umfassende Daten- und Informationsbasis geschaffen werden. Damit können sowohl die Wasserwirtschaft als auch der Prozess der im Juni veröffentlichten nationalen Wasserstrategie unterstützt werden.

Danksagung

Teile dieser Arbeit wurden im Auftrag des Deutschen Vereins des Gas- und Wasserfaches e. V. – technisch-wissenschaftlicher Verein (DVGW) mit Sitz in Bonn sowie mit Mitteln des Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft (IVF) in der Helmholtz-Klima-Initiative (www.helmholtz-klima.de) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren. Die Klimasimulationsdatenbasis wurde in Kooperation zwischen dem Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (UFZ) und dem Helmholtz-Zentrum Hereon (*Climate Service Center Germany GERICS*) erstellt. Unser Dank gilt hier insbesondere Thomas Remke sowie Kevin Sieck. Die EURO-CORDEX-Initiative (<https://euro-cordex.net>) ist eine freiwillige Anstrengung vieler der

1 <https://visdat.de/gwn-sachsen/>

2 <https://www.ufz.de/index.php?de=47684>

führenden und aktivsten Institutionen im Bereich der regionalen Klimaforschung in Europa. Wir danken der EURO-CORDEX-Gemeinschaft dafür, dass sie ihre RCM-Simulationsergebnisse öffentlich zugänglich gemacht hat. Wir danken auch dem vom BMBF geförderten Projekt ReKliEs-De (<http://reklies.hlnug.de>) für die Veröffentlichung seiner RCM-Simulationsergebnisse

Anschrift der Autoren

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Department Hydrosystemmodellierung, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig.

Kontakt: andreas.marx@ufz.de, friedrich.boeing@ufz.de, oldrich.rakovec@ufz.de, sebastian.mueller@ufz.de, oezge.can@ufz.de, Chaitanya.Malla@ufz.de, Michael.Peichl@ufz.de, Luis.Samaniego@ufz.de

Literatur

- [1] Haakh, F. (2018). Aktuelle Herausforderungen der Fernwasserversorgung, 3R, 03/2018, pp. 42-53.
- [2] Hari, Vittal, Oldrich Rakovec, Yannis Markonis, Martin Hanel & Rohini Kumar (2020): Increased future occurrences of the exceptional 2018-2019 Central European drought under global warming, Scientific Reports, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68872-9>
- [3] 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
- [4] 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.
- [5] Kumar, R., Samaniego, L., and Attinger, S.: 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>, 2013.
- [6] LAWA (2017) Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft. Bestandsaufnahme, Handlungsoptionen und strategische Handlungsfelder
- [7] Marx, A., Kumar, R., Thober, S., Zink, M., Wanders, N., Wood, E. F., Ming, P., Sheffield, J., and Samaniego, L. (2018): Climate change alters low flows in Europe under a global warming of 1.5, 2, and 3 degrees, Hydrol. Earth Syst. Sci., 22, 1017-1032, <https://doi.org/10.5194/hess-2017-485>.
- [8] Samaniego, L., Kumar, R., and Attinger, S.: 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>, 2010.
- [9] 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>
- [10] Thober, S., Marx, A., Boeing, F. (2018): Auswirkungen der globalen Erwärmung auf hydrologische und agrarische Dürren und Hochwasser in Deutschland. Ergebnisse aus dem Projekt HOKLIM: Hochaufgelöste Klimaindikatoren bei einer Erderwärmung von 1.5 Grad. Online verfügbar unter www.ufz.de/hoklim.
- [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] Zink, M., Samaniego L, Kumar R, Thober S, Mai J, Schaefer D and Marx A (2016) The German drought monitor, Environmental Research Letters, Environ. Res. Lett. 11, doi:10.1088/1748-9326/11/7/074002

Verzeichnis der Bildunterschriften und Tabellenüberschriften

Bild 1: Entwicklung der Sommertage in der Vergangenheit (1971-2000) und der fernen Zukunft (2070-2099) aus 70 Klima-Hydrologie-Simulationen unter zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5). Dargestellt ist jeweils der Median der Änderung über Deutschland. (Quelle: eigene)

Bild 2: Entwicklung der Grundwasserneubildung aus dem Modell mHM in der nahen Zukunft (2021-50) und der fernen Zukunft (2070-99), verglichen mit 1971-2000 aus 70 Klima-Hydrologie-Simulationen unter zwei Klimaszenarien für Deutschland und die angrenzenden Einzugsgebiete. Dargestellt ist jeweils der Median der Änderung unter dem Klimaschutzszenario RCP2.6 (oben) und dem Weiter-wie-bisher-Szenario RCP8.5 (unten). (Quelle: eigene)

Bild 3: Absolute Zunahme der Sommertage gegen die absolute Veränderung der GWN zwischen der Vergangenheit (1971-2000) und 2070-2099 unter zwei Klimaszenarien (RCP2.6 und RCP8.5) für jede der 70 Klima-Hydrologie-Simulationen. Dargestellt ist jeweils die Änderung des Flächenmittels über Deutschland. (Quelle: eigene)

Tabelle 1: Entwicklung der Heißen Tage ($\geq 30^{\circ}\text{C}$) sowie der Sommertage ($\geq 25^{\circ}\text{C}$). Gezeigt sind die Entwicklungen für das Klimaschutzszenario (Median aus 21 Simulationen unter RCP2.6) und des Weiter so wie bisher Szenarios (Median aus 49 Simulationen unter RCP8.5), jeweils räumlich gemittelt über Deutschland. Zusätzlich ist in der Spalte Max der Wert für die maximale Veränderung in Deutschland angegeben.