

Projektbericht

Positionspapier der Kooperation KLIWA – Aussagen zur Grundwasserneubildung auf Basis regionaler Klimaprojektionen im Kontext Wasserversorgung

1 Einleitung

Der überwiegende Anteil des Trinkwassers in Süddeutschland wird aus Grundwasser gewonnen. Für dessen nachhaltige Bewirtschaftung ist daher die langfristige Entwicklung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag von zentraler Bedeutung. Ein klimatisch bedingter Anstieg der Lufttemperatur geht mit Veränderungen der Niederschlagshöhe, -intensität und des Jahresgangs einher. Diese haben Auswirkungen auf die gesamte Wasserbilanz und damit letztlich auch auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung.

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasser in den Bundesländern Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz, Hessen und dem Saarland (nachfolgend unter Süddeutschland zusammengefasst) abschätzen zu können, kommen regionale Klimaprojektionen zum Einsatz. Im Rahmen der Kooperation KLIWA ("Klimaveränderung und Wasserwirtschaft") wurden aus auditierten Projektionen für die weitere Betrachtung Ensembles zusammengestellt. Bei der Ableitung von Anpassungsmaßnahmen stellt sich die Frage, wie die Ergebnisse der mit regionalen Klimaprojektionen angetriebenen Bodenwasserhaushaltsmodellierung im Kontext Wasserversorgung Verwendung finden können.

2 Auftrag der Wasserwirtschaft: Handeln nach dem Vorsorgeprinzip

Im Hinblick auf die Sicherstellung der öffentlichen Wasserversorgung spielt das Vorsorgeprinzip eine entscheidende Rolle. Das Vorsorgeprinzip beinhaltet zum einen die Risikovorsorge, die verlangt, "bei unvollständigem oder unsicherem Wissen über Art, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Kausalität von Umweltschäden und -gefahren vorbeugend zu handeln, um diese von vornherein zu vermeiden" (UMWELTBUNDESAMT, 2021). Zum anderen greift die Ressourcenvorsorge, sprich der schonende Umgang mit Ressourcen (u. a. Wasser), um diese langfristig zu sichern.

Teil der staatlichen Daseinsvorsorge und zentraler Auftrag der Wasserwirtschaft ist es, die Versorgungssicherheit im Bereich Trinkwasser auch im Falle von für die Wasserversorgung ungünstigen Klimawandelfolgen zu gewährleisten.

Unter Berücksichtigung des aktuellen Stands des weltweiten Klimaschutzes und dem daraus resultierenden Temperaturanstieg muss die Wasserwirtschaft dabei auch auf ein Szenario vorbereitet sein, in dem sich aktuelle Trends wichtiger Wasserhaushaltsgrößen möglicherweise fortsetzen und das Wasserdargebot sich in der Folge weiter verringern könnte.

3 Regionale Projektionen als Grundlage für die Klimawandelanpassung in der Wasserwirtschaft

Die Kooperation KLIWA hat sich darauf geeinigt, vor allem das Emissionsszenario RCP8.5 zu betrachten. Dieses stellt eine Abschätzung des stärksten, nach jetzigem Kenntnisstand zu erwartendem Temperaturanstieg mit einem Szenarioansatz für die Emissionen ab dem Jahr 2006 dar. Im Vergleich zwischen den tatsächlichen Entwicklungen der letzten 15 Jahre und den weltweiten Zielvorgaben bis zum Jahr 2050 stellt RCP8.5 zumindest für die nahe Zukunft ein durchaus realistisches Szenario dar (SCHWALM et al., 2020). Erhebliche Unterschiede zwischen den Emissionsszenarien werden vor allem ab Mitte des 21. Jahrhunderts und später erkennbar.

Auf Basis eines umfassenden Audits (LfU, 2020) wurde eine große Anzahl von Klimaprojektionen auf neun dynamische Projektionen, die für den süddeutschen Raum eine hohe Plausibilität aufweisen, reduziert. Dieses sogenannte KLIWA-Ensemble soll die Spannweite der denkbaren Entwicklungen wiedergeben. Allerdings ist zu beachten, dass z. B. die europäischen Hitzewellen oder die trocken-heißen Sommer in Deutschland der letzten Jahre von der Mehrheit der Klimamodelle, eingeschlossen solcher, die auf RCP8.5 basieren, nicht adäquat abgebildet werden (ZACHARIAH et al., 2022; STANLEY et al., 2023).

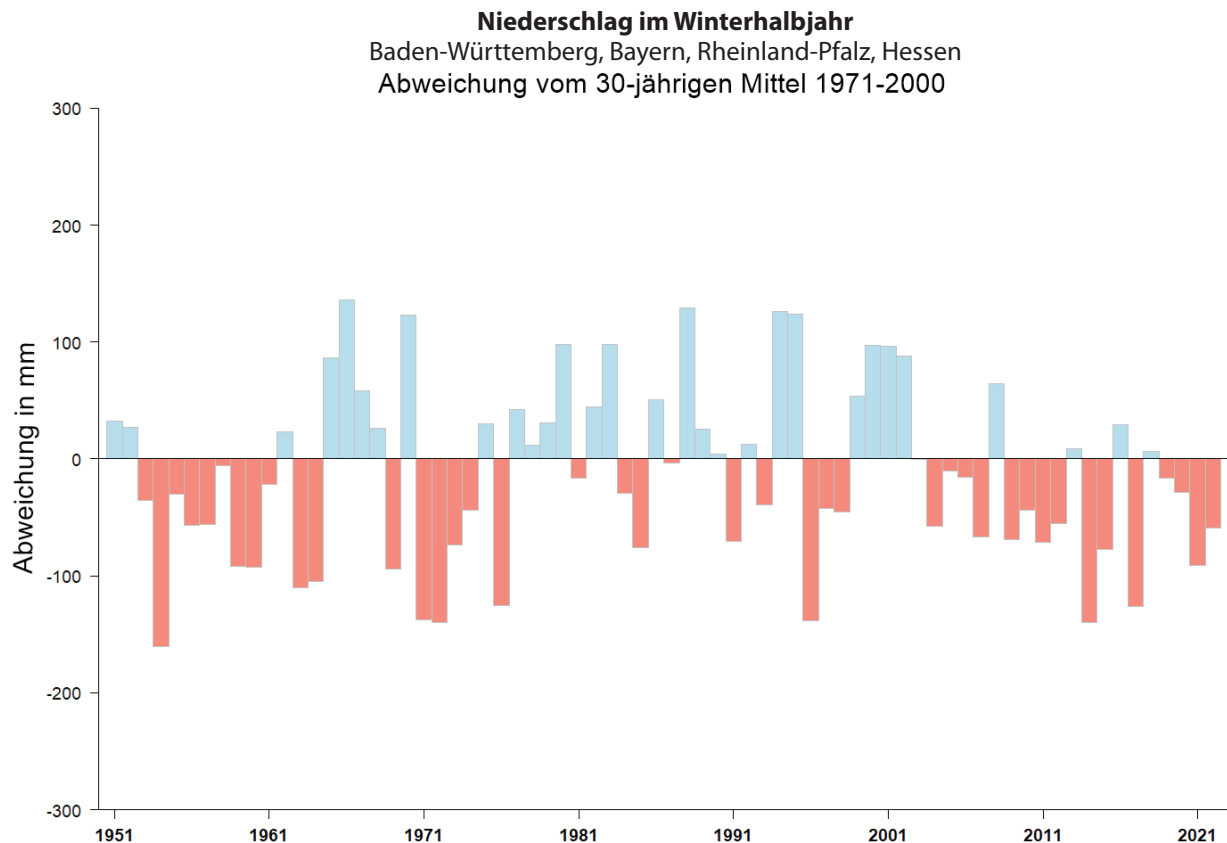
Daher werden für den Bereich Grundwasser zusätzlich vier statistische¹ Projektionen betrachtet. Hieraus ergibt sich eine Zusammenstellung aus dreizehn Projektionen, die im Folgenden als erweitertes KLIWA-Ensemble bezeichnet wird.

4 Entwicklung der Lufttemperatur und Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung

Die beobachtete Temperaturentwicklung (Messdaten) im süddeutschen Raum befindet sich derzeit im oberen Bereich der projizierten Änderungen des KLIWA-Ensembles.

Mit ansteigender Lufttemperatur erhöht sich, auch aufgrund verlängerter Vegetationsperioden, einerseits die (potenzielle) Evapotranspiration, wodurch die Sickerwasserrate und damit die Grundwasserneubildung reduziert wird. Zudem hat die Temperaturentwicklung in den vergangenen Jahrzehnten die

¹ Statistische regionale Modelle rekombinieren die Zukunft aus Beobachtungen der Zusammenhänge der Vergangenheit sowie Änderungen der großräumigen Strukturen der Zukunft aus globalen Klimamodellen, während dynamische regionale Modelle mit den globalen gekoppelt werden und die physikalischen und chemischen Prozesse für alle Parameter simulieren (z. B. Temperatur, Luftfeuchte, etc.).

**Abbildung 1**

Abweichung der Niederschläge in mm im hydrologischen Winterhalbjahr (November bis April) vom langjährigen Mittel 1971 bis 2000 in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen. Datenquelle: DWD (RegNie, für 2022 HYRAS).

Schneerücklage in den Wintermonaten, insbesondere in Bayern und Baden-Württemberg, bereits deutlich reduziert. In Konsequenz fließt ein höherer Anteil des Niederschlags schneller ab und steht in der Folge der Grundwasserneubildung nicht mehr zur Verfügung. Diese Entwicklung dürfte sich im Hinblick auf die richtungsstabile Temperaturentwicklung in Zukunft fortsetzen.

5 Entwicklung des Niederschlags und Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung

Der Anstieg der Lufttemperatur bedingt die Veränderung weiterer atmosphärischer Variablen, wie etwa des Niederschlags. Die Niederschlagshöhe wirkt sich wiederum zentral auf alle weiteren Größen der Wasserbilanz aus. Vor allem die Grundwasserneubildung als verhältnismäßig kleiner Bilanzrest von Niederschlag, Verdunstung und Abflussbildung reagiert dabei stark sensitiv auf einen Rückgang von Niederschlägen. Kleine Abweichungen des Niederschlags vom langjährigen Mittel bewirken somit in der Regel deutlich größere Defizite bei der Grundwasserneubildung. Insbesondere die Entwicklung der Niederschläge im Winterhalbjahr ist hierbei ausschlaggebend für den Grundwasserhaushalt.

In den letzten rund 20 Jahren wurden in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz vermehrt trockene Winterhalbjahre beobachtet (Abb. 1). Als "trocken" wird hierbei eine Unterschreitung des 25. Perzentils des mittleren Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr der KLIWA-Referenzperiode 1971 bis 2000 bezeichnet.

Daher befindet sich die beobachtete Entwicklung des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr (Messdaten) im süddeutschen Raum derzeit außerhalb der Bandbreite der projizierten Änderungen des KLIWA-Ensembles.² Sollten trockene Winterhalbjahre weiterhin gehäuft auftreten, hätte dies weitreichende Konsequenzen für die zukünftige Grundwasserneubildung.

Bei der Auswertung von Niederschlags- und später auch Grundwasserneubildungsdaten ist auf die besondere Bedeutung regionaler Auswertungen hinzuweisen. Trendaussagen auf Länder- oder Bundesebene können die Heterogenität der Naturräume nicht abbilden und haben daher eine stark eingeschränkte Aussagekraft für die in Deutschland oft dezentral organisierte Wasserversorgung. So verzeichnet beispielsweise das fränkische Keuper-Lias-Land seit dem Jahr 2003 ein mittleres Defizit des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr von etwa 5 % verglichen mit der KLIWA-Referenzperiode 1971 bis 2000. Demgegenüber weist das Moränenland in Südbayern für den gleichen Zeitraum ein mittleres Defizit von 15 % auf.

² Zur Problematik des aktuell vor allem im Winterhalbjahr im süddeutschen Raum messbaren Rückgangs des Niederschlags gegenüber dem mehrheitlich zunehmenden Niederschlagssignal in den Klimaprojektionen wird auf "Einordnung der Ergebnisse des KLIWA-Ensembles in die aktuelle klimatische Entwicklung – Positionspapier zur Verwendung in der Wasserwirtschaft" (KLIWA, 2023) verwiesen.

Weiterhin erhöht die bereits beobachtete und sich voraussichtlich weiter fortsetzende Entwicklung hin zu häufigeren und intensiveren Starkniederschlagsereignissen unterschiedlicher Dauer den Anteil schneller lateraler Abflusskomponenten und reduziert damit gleichzeitig die Versickerung bzw. die Grundwasserneubildung.

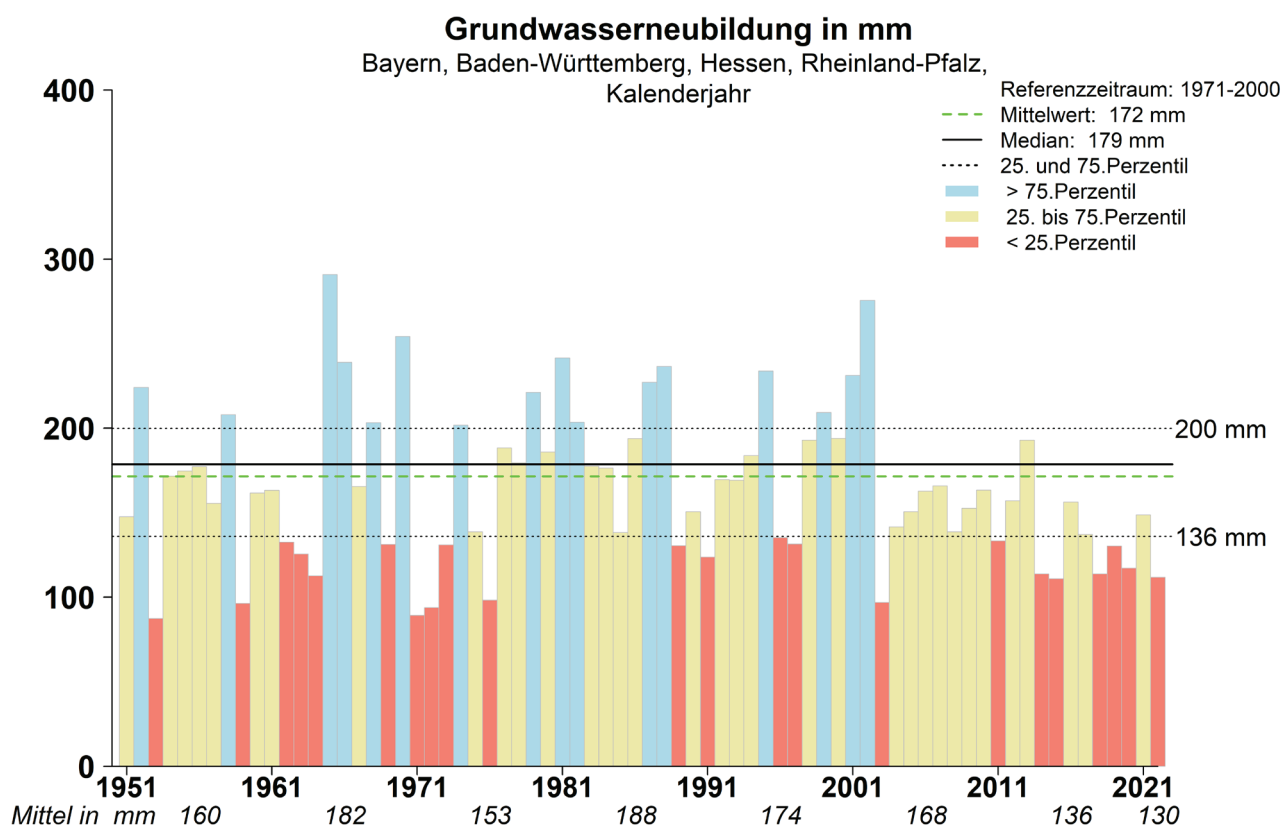
Es ist zu beachten, dass Modelle eine vereinfachte Abbildung der Realität sind. So können Klimamodelle unter anderem aufgrund des chaotischen Verhaltens des Klimasystems nicht alle niederschlagsbestimmenden Prozesse zufriedenstellend abbilden. Durch die hohe Sensitivität des Grundwasserhaushalts gegenüber Veränderungen des Niederschlags fallen Unsicherheiten dieser Variable jedoch besonders stark ins Gewicht. Sie dürfen daher bei der Interpretation der Ergebnisse aus Klimaprojektionen für Anpassungsmaßnahmen nicht außer Acht gelassen werden (DWD, 2021; FATICHI et al., 2016).

6 Grundwasserneubildung: Entwicklung in der Vergangenheit und mögliche zukünftige Spannweiten

Basierend auf der mit Messdaten angetriebenen Bodenwasserhaushaltssimulation hat sich seit dem Jahr 2003 ein Defizit der Grundwasserneubildung aufgebaut (Abb. 2). Dieses bewegt sich bezogen auf den Mittelwert von 1971 bis 2000 (KLIWA-Referenzperiode) für die Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen summarisch in einer Größenordnung von 500 bis 600 mm. Im Vergleich dazu beträgt die mittlere jährliche Grundwasserneubildung dieser Bundesländer jeweils zwischen circa 100 und 200 mm.

Diese Tendenz spiegelt sich auch im Vergleich der Normalperioden 1991 bis 2020 gegenüber 1961 bis 1990 wider. Hier bleibt die Grundwasserneubildung des Zeitraums 1991 bis 2020 durch die unterdurchschnittlichen Werte der letzten 20 Jahre für Bayern 6 %, für Baden-Württemberg 9 %, für Hessen 13 % und Rheinland-Pfalz 18 % unter dem jeweiligen langjährigen Mittel des Zeitraums 1961 bis 1990. Weitere bundeslandspezifische Auswertungen sind in KLIWA (2017) zu finden.

Bei der Gegenüberstellung von Bodenwasserhaushaltssimulationen basierend auf Messdaten und Klimaprojektionen wird deutlich, dass die Entwicklung der Grundwasserneubildung der letzten Jahre aktuell eher auf den trockenen, unteren Rand des erweiterten KLIWA-Ensembles zusteuert (Abb. 3). So zeigen die 30-jährigen gleitenden Mittel auf Basis von Messdaten (schwarze Linie, Abb. 3) für den süddeutschen Raum seit circa 20 Jahren zurückgehende Werte. Diese liegen mittlerweile auf einem Niveau, das je nach Bundesland nur noch von einzelnen Klimaprojektionen unterschritten wird.



Datenquelle: Berechnung mit dem Modell GWN-BW auf Grundlage der CORINE 2000 Landnutzung und der REGNIE (bis 2021) und HYRAS Daten des DWD.

Abbildung 2

Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag (Kalenderjahr) in mm/a in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz von 1951 bis 2022. Simulationsergebnis auf Basis von Beobachtungsdaten im Bodenwasserhaushaltsmodell.

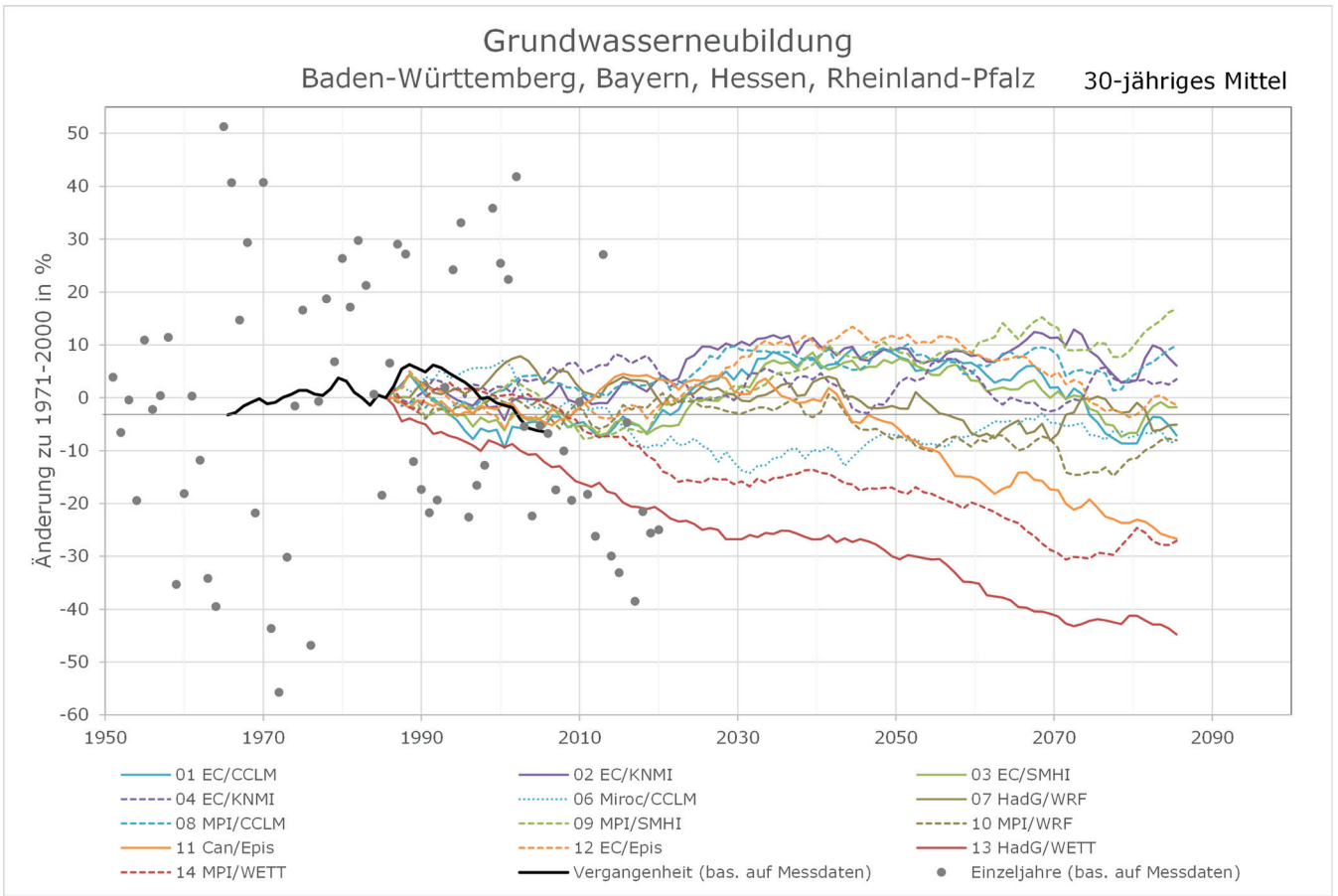


Abbildung 3
 Projizierte Entwicklung der Änderung der mittleren Grundwasserneubildung aus Niederschlag (hydrologisches Jahr) in Prozent in Baden-Württemberg, Bayern, Hessen und Rheinland-Pfalz von 1971 bis 2100 im gleitenden 30-jährigen Mittel. Simulationsergebnis auf Basis des erweiterten KLIWA-Ensembles (neun dynamische Modelle, vier statistische) den Modellierungen der Vergangenheit auf Basis von Messdaten ab 1951 gegenübergestellt.

Der Blick in die Zukunft zeigt, dass ab Mitte des 21. Jahrhunderts gut die Hälfte der Projektionen des erweiterten KLIWA-Ensembles ein vieljähriges Defizit bei der Grundwasserneubildung aufweisen (Abb. 3).

Ausgehend von den sich abzeichnenden, langjährigen Entwicklungen von Lufttemperatur und Niederschlag und unter Berücksichtigung aller Unsicherheiten kann nicht ausgeschlossen werden, dass man sich weiterhin auf einem für die Grundwasserneubildung nachteiligen Entwicklungspfad bewegen wird.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Bodenwasserhaushalts-simulationen ist generell zu beachten, dass nur die Veränderungen des Klimas als Änderungssignal in die Modellierung eingehen. Andere Eigenschaften und Parameter der Modellierung sind hingegen stationär. Veränderungen der Landnutzung, der Bodenbewirtschaftung oder des Landschaftswasserhaushalts werden bei diesem Modellansatz nicht berücksichtigt. Dies trifft insbesondere auf sich verändernde Bodeneigenschaften zu, zum Beispiel auf Makroporen, Bodenverdichtung oder anhaftendes Wasser. Veränderungen im Wasserhaushalt, die sich aus diesen Prozessen oder durch Maßnahmen zum Landschaftswasserhaushalt ergeben, kommen somit ergänzend zu den Veränderungen

durch das Klima hinzu und können diese ggf. abschwächen oder verstärken.

Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass Grundwasserneubildung aus Niederschlag bei der Bestimmung des Grundwasserangebots zwar meist die wesentliche Größe darstellt. Jedoch sind im Einzelfall lokale Gegebenheiten wie z. B. lateraler Zustrom oder Interaktion mit Oberflächengewässern bei der Bilanzierung zu berücksichtigen. Die Grundwasserbewirtschaftung (u. a. Entnahmen) fließt in die Modellierung des natürlichen Bodenwasserhaushalts nicht mit ein.

7 Anpassung und Vorsorge in Bezug auf die Sicherung der Wasserversorgung – Betrachtung des trockenen Randes eines Klimaprojektionsensembles

In noch stärkerer Weise als in der Vergangenheit muss die Infrastruktur der Trinkwasserversorgung zukünftig auf ein- oder mehrjährige Dürreperioden vorbereitet sein (DVGW, 2022). Klimaänderungssignale haben sich dabei grundsätzlich als praktikable Kennwerte zur erforderlichen Dimensionierung von Anpassungsmaßnahmen herausgestellt. Insbesondere für Änderungssignale auf Basis regionaler Klimaprojektionen stellt

sich jedoch die Frage, in welcher Weise entsprechende Daten sinnvoll ausgewertet werden können.

Die Verwendung eines über 30 Jahre hinweg geglätteten Änderungssignals der Grundwasserneubildung, das sich auf eine vergleichsweise moderate Entwicklung (= Median des Ensembles) stützt, steht dem Vorsorgeprinzip entgegen. Analysen zur Variabilität des Klimas und der Änderungssignale der Größen des Bodenwasserhaushalts sollten stets auch die Ränder der Verteilung im Blick behalten.

In Bezug auf die Trinkwasserversorgungssicherheit und das Vorsorgeprinzip spielt der "trockene Rand" (= Minima) des Ensembles die entscheidende Rolle. Anpassung muss insbesondere auf die Risiken abzielen, die hinter diesen potenziellen Entwicklungen stehen. Die alleinige Betrachtung des Medians ist für diese Zwecke nicht zielführend.

Entscheidend ist, bei der Interpretation der vorliegenden Ergebnisse die daraus abzuleitenden Anpassungsmaßnahmen auf den gewünschten Grad der Vorsorge ("Sicherheit") abzustimmen. An welchem Bereich eines Ensembles sich eine Anpassungsmaßnahme orientiert, "hängt von der jeweiligen Fragestellung im Handlungsfeld ab und ist von den Fachexperten zu entscheiden" (LINKE et al., 2022). Mit einer Ausrichtung auf den trockenen Rand des Ensembles wäre die Klimaanpassung der Trinkwasserversorgung weitgehend "auf der sicheren Seite". Das bedeutet, dass hier Anpassungsmaßnahmen auf alle projizierten Entwicklungspfade des Ensembles ausgerichtet sind.

Die Verwendung des Medians des Änderungssignals (Grundwasserneubildung) würde demgegenüber 50 % der Klimaprojektionen außer Betracht lassen. Losgelöst von der rein wissenschaftlichen Sicht erlaubt eine Berücksichtigung der trockenen Entwicklungspfade der Grundwasserneubildung, sich im Sinne der Vorsorge auf eine sehr viel größere Anzahl von möglichen Entwicklungen einzustellen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit aller Projektionen innerhalb des Ensembles ist dabei grundsätzlich als identisch zu bewerten (LINKE et al., 2022).

8 Notwendigkeit der Betrachtung von Trockenextremen für eine gezielte Anpassung an mehrjährige Dürreperioden

Trotz einer Ausrichtung auf den trockenen Rand des Ensembles sind 30-jährige Mittelwerte in ihrer Aussagekraft stark eingeschränkt, wenn die Auswirkungen ein- oder mehrjähriger Dürreperioden berücksichtigt werden sollen. Der Großteil der Projektionen des KLIWA-Ensembles enthält auch in der Zukunft mehrjährige, extreme Trockenphasen, auf welche die Wasserwirtschaft vorbereitet sein muss. Das bereits beobachtete Auftreten der Trockenjahre 2015, 2018 bis 2020 und 2022 innerhalb einer Dekade unterstreicht dies. Derartige Entwicklungen der Grundwasserneubildung können aufgrund der ausgeprägten mehrjährigen Variabilität des Niederschlagsregimes zu jeder Zeit innerhalb eines 30-jährigen Auswertzeitraums auftreten. Es ist zudem wahrscheinlich, dass sich einzelne Trockenjahre oder Trockenperioden in Zukunft wegen der sich fortsetzenden Erwärmung extremer auswirken werden.

Bei der Ableitung von Klimaänderungssignalen, die lediglich auf dem Vergleich von 30-jährigen Mittelwerten basie-

ren, geht essenzieller Informationsgehalt im Hinblick auf mögliche Extreme verloren. Eine gezielte Betrachtung von Trockenextremen ist somit für die Sicherstellung der Wasserversorgung unerlässlich.

Für diesen Zweck ist die weitergehende Auswertung der Ergebnisse der Ensemblesimulationen anhand von Kennwerten zu empfehlen, die losgelöst von langjährigen Mittelwerten vor allem extreme Verhältnisse regional berücksichtigen. Dies kann bei Niederschlag und Grundwasserneubildung zum Beispiel die Auswertung von potenziell mehrjährigen Trockenereignissen bezüglich Dauer, Variabilität, Abfolge und Häufigkeiten anhand von Unter- oder Überschreitungen spezifischer Schwellenwerte sein.

Im Sinne einer echten "Worst-Case-Betrachtung" können die Auswertungen ergänzt werden um Stresstests als mehrjährige Abfolge von Trockenperioden und Hitzesommern auf Grundlage bereits beobachteter Extremsituationen. Ein solcher Stresstest kann beispielsweise auf einer synthetischen Zeitreihe basieren, die aus dem trockenen Winterhalbjahr 2014/2015, dem trocken-heißen Sommerhalbjahr 2018 und dem trockenen Winterhalbjahr 2021/2022 besteht. Durch Stresstests ist eine sinnvolle Verknüpfung der beobachteten Vergangenheit und potenziellen Entwicklungen in der Zukunft möglich (KLIWA, 2019).

Globale Klimaschutzbemühungen haben das Potenzial zu erheblichen Emissionsminderungen, was die Einhaltung ambitionierter Klimaschutzziele möglich machen kann (BOEHM et al., 2022). Die derzeitige Emissionsentwicklung lässt jedoch noch keine Trendumkehr erkennen (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2023). Die Betrachtung der Entwicklung der Grundwasserneubildung am trockenen Rand des erweiterten KLIWA-Ensembles (RCP8.5) für die nahe bis mittlere Zukunft – ergänzt durch Auswertungen mit Fokus auf Extremereignisse – ist für den Zweck der Trinkwassersicherheit somit anzuraten.

9 Kernbotschaften

Erkenntnisse aus den KLIWA-Untersuchungen

- Die beobachtete Entwicklung der Lufttemperatur (Messdaten) im süddeutschen Raum im aktuell oberen Bereich der projizierten Änderungen des KLIWA-Ensembles (RCP8.5) hat zu signifikanten Veränderungen des Wasserhaushaltsgeschehens geführt, die in Summe bereits nachweislich zu Lasten der Grundwasserneubildung gehen.
- In der Periode 1991 bis 2020 blieb die Grundwasserneubildung in Bayern, Baden-Württemberg, Hessen und Rheinland-Pfalz etwa 8 % unter dem Mittel der Periode 1961 bis 1990. Sollten trockene Winterhalbjahre, wie sie bereits seit rund 20 Jahren in Süddeutschland beobachtet werden, weiterhin vermehrt auftreten, hätte dies weitreichende Konsequenzen für die zukünftige Grundwasserneubildung.

Konsequenzen für die Verwendung des erweiterten KLIWA-Ensembles zu Anpassungszwecken

- Ausgehend von den sich abzeichnenden, langjährigen Entwicklungen darf nicht ausgeschlossen werden, dass sich das Klima auch weiterhin auf einem Entwicklungspfad bewegen wird, der sich nachteilig auf die Grundwasserneubildung auswirkt.

- In Bezug auf die Versorgungssicherheit und das Vorsorgeprinzip spielen trockene Entwicklungen innerhalb des Ensembles ("trockener Rand") eine übergeordnete Rolle. Eine Anpassung muss insbesondere die damit verbundenen Risiken berücksichtigen. Die alleinige Betrachtung des Medians ist für diese Zwecke nicht zielführend.
- Für die in Deutschland oft dezentral organisierte Wasserversorgung ist die regionale, naturräumliche Auswertung von hydrologischen Extremen entscheidend.
- Bei der Ableitung von Klimaänderungssignalen, die lediglich auf dem Vergleich von 30-jährigen Mittelwerten basieren, geht unter Umständen essenzieller Informationsgehalt verloren. Um Extrema nicht aus dem Blick zu verlieren, sollte die Betrachtung von 30-jährigen Mitteln ergänzt werden z. B. um Stresstests und Auswertungen zur Variabilität, Abfolge und Häufigkeit von Extremjahren.
- Aufgrund der sich fortsetzenden Erwärmung ist es wahrscheinlich, dass Trockenjahre und Trockenperioden in Zukunft häufiger und intensiver auftreten werden. Extreme Entwicklungen der Grundwasserneubildung können daher auch zukünftig jederzeit eintreten.

Literaturverzeichnis

- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (LfU) (2020): Das Bayerische Projektionsensemble – Audit und Ensemblebildung. Augsburg.
- BOEHM, S., L. JEFFERY, K. LEVIN, J. HECKE, C. SCHUMER, C. FYSON, A. MAJID, J. JAEGER, A. NILSSON, S. NAIMOLI, J. THWAITES, E. CASSIDY, K. LEBLING, M. SIMS, R. WAITE, R. WILSON, S. CASTELLANOS, N. SINGH, A. LEE, & A. GEIGES (2022): State of Climate Action 2022. Berlin and Cologne, Germany, San Francisco, CA, and Washington, DC. Bezos Earth Fund, Climate Action Tracker, Climate Analytics, ClimateWorks Foundation, NewClimate Institute, the United Nations Climate Change High-Level Champions, and World Resources Institute. DOI:10.46830/wriprt.22.00028.
- DEUTSCHER VEREIN DES GAS- UND WASSERFACHES e. V. (DVGW) (2022): Auswirkungen des Klimawandels auf das Wasserdargebot Deutschlands. Überblick zu aktuellen Ergebnissen der deutschen Klimaforschung.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD) (2021): Klimavorhersagen und Klimaprojektionen. Bonn. Offenbach am Main.
- GLOBAL MONITORING LABORATORY (2023): Trends in CO₂. Abgerufen am 28.07.2023 von https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/#mlo_growth.
- FATICHI, S., V.Y. IVANOV, A. PASCHALIS, N. PELEG, P. MOLNAR, S. RIMKUS, J. KIM, P. BURLANDO & E. CAPORALI (2016): Uncertainty partition challenges the predictability of vital details of climate change. *Earth's Future* (4), p. 240–251. DOI:10.1002/2015EF000336
- KLIWA (2017). Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen (1951 bis 2015). KLIWA-Berichte, Heft 21.
- KLIWA (2019): Leitfaden zur Durchführung von KLIWA-Stresstests. KLIWA-Kurzbericht.
- KLIWA (2023): Einordnung der Ergebnisse des KLIWA-Ensembles in die aktuelle klimatische Entwicklung – Positionspapier zur Verwendung in der Wasserwirtschaft. Positionspapier.
- LINKE, C. et al. (2022): Leitlinien zur Interpretation regionaler Klimamodelldaten des Bund-Länder-Fachgespräches "Interpretation regionaler Klimamodelldaten". Potsdam.
- SCHWALM C.R., S. GLENDON & P.B. DUFFY (2020): RCP8.5 tracks cumulative CO₂ emissions. *Proc Natl Acad Sci USA*, 117(33), p. 19656–19657. DOI: 10.1073/pnas.2007117117.
- STANLEY, K., N. LEPS, S. HÄNSEL, L. KLIPPEL, F. IMBERY & A. WALTER (2023): Recent hot and dry summers in Germany in comparison to climate projections. *Meteorologische Zeitschrift*. DOI:10.1127/metz/2022/1152.
- UMWELTBUNDESAMT (21.01.2021): Vorsorgeprinzip. Abgerufen am 28.07.2023 von <https://www.umweltbundesamt.de/vorsorgeprinzip>.
- ZACHARIAH, M., R. VAUTARD, D.L. SCHUMACHER, M. VAHLBERG, D. HEINRICH, E. RAJU, L. THALMEIER, J. ARRIGHI, R. SINGH, S. LI, J. SUN, G. VECCHI, W. YANG, S.I. SENEVIRATNE, S.F.B. TETT, L.J. HARRINGTON, P. WOLSKI, F.C. LOTT, M. MCCARTHY, J.S. TRADOWSKY & F.E.L. OTTO (2022): Without human-caused climate change temperatures of 40 °C in the UK would have been extremely unlikely. Abgerufen am 01.12.2022 von <https://www.worldweatherattribution.org/without-human-caused-climate-change-temperatures-of-40c-in-the-uk-would-have-been-extremely-unlikely/>.

Weiteres zur Kooperation "Klimaveränderung und Wasserwirtschaft" (KLIWA) und Publikationen, u. a. zu den Themen Grundwasser und Bodenwasserhaushalt, unter www.kliwa.de.

*Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg,
Bayerisches Landesamt für Umwelt,
Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie,
Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz,
Landesamt für Umwelt- und Arbeitsschutz Saarland,
KLIWA AG Grundwasser
kliwa@lubw.bwl.de*