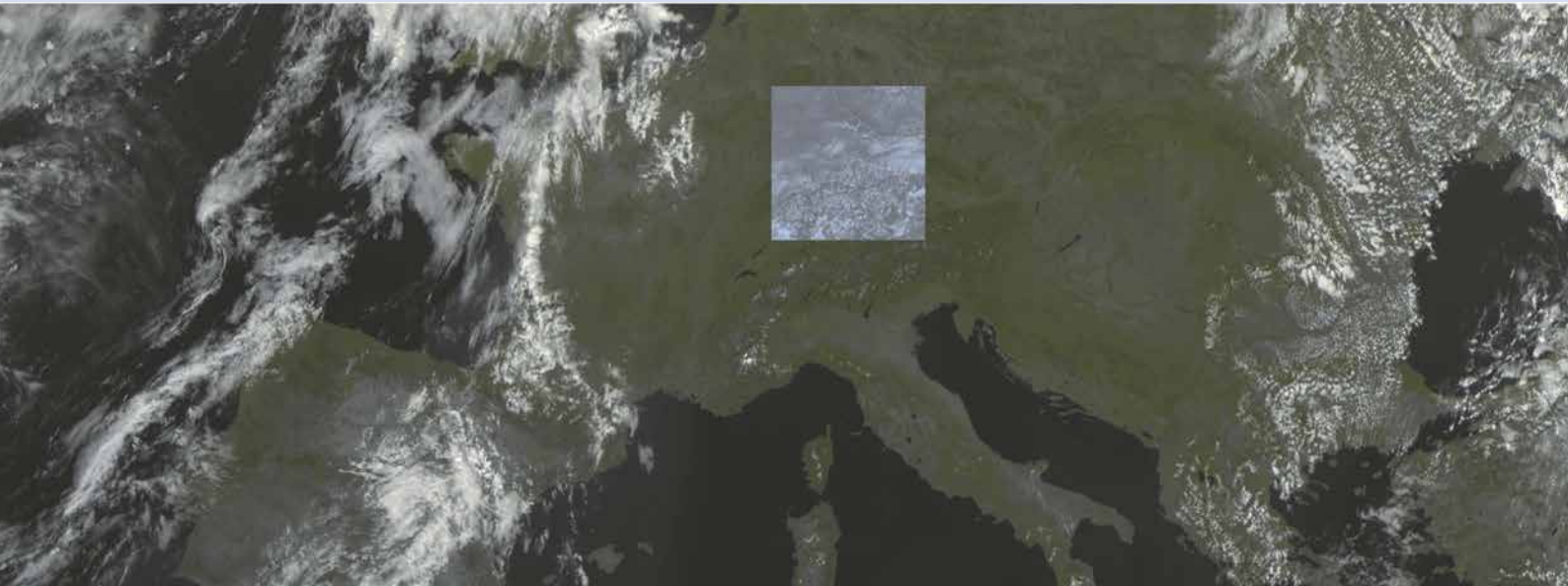


# Zu viel | Zu wenig Extreme meistern | Extremen begegnen



## FOLGEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



**Rheinland-Pfalz**

MINISTERIUM FÜR  
KLIMASCHUTZ, UMWELT,  
ENERGIE UND MOBILITÄT

**Deutscher Wetterdienst**  
Wetter und Klima aus einer Hand



<b>INHALT</b>	<b>1</b>	<b>HERAUSFORDERUNG KLIMAWANDEL</b>	<b>4</b>
	<b>2</b>	<b>REGIONALE VERÄNDERUNGEN</b>	<b>6</b>
	<b>3</b>	<b>INSTRUMENTE DER KLIMAFORSCHUNG</b>	<b>8</b>
	<b>4</b>	<b>ANPASSUNGSSTRATEGIEN</b>	<b>10</b>
	<b>5</b>	<b>GRUNDWASSER</b>	<b>12</b>
	<b>6</b>	<b>NIEDRIGWASSER</b>	<b>16</b>
	<b>7</b>	<b>HOCHWASSER</b>	<b>18</b>
	<b>8</b>	<b>MITTELWASSER</b>	<b>20</b>
	<b>9</b>	<b>STARKREGEN</b>	<b>22</b>
	<b>10</b>	<b>GEWÄSSERÖKOSYSTEME</b>	<b>24</b>
	<b>11</b>	<b>GEWÄSSERTEMPERATUR</b>	<b>26</b>
	<b>12</b>	<b>AUSBLICK</b>	<b>27</b>

#### IMPRESSUM/HERAUSGEBER

LUBW Landesanstalt für Umwelt  
Baden-Württemberg  
Griesbachstraße 1  
76185 Karlsruhe

Im Auftrag des  
Ministeriums für Umwelt, Klima und  
Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Bürgermeister-Ulrich-Str. 160  
86179 Augsburg

Im Auftrag des  
Bayerischen Staatsministeriums  
für Umwelt und Verbraucherschutz

Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz  
Kaiser-Friedrich-Straße 7  
55116 Mainz

Im Auftrag des  
Ministeriums für Klimaschutz, Umwelt,  
Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz

Deutscher Wetterdienst  
Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach

#### KONZEPT

ÖkoMedia, Stuttgart

#### SATZ

Landesamt für Umwelt, Mainz

#### BILDNACHWEIS

S. 1: © Deutscher Wetterdienst/  
EUMETSAT, Hennegriff (LUBW)

S. 4/5: © Pixabay, DWD, KLIWA

S. 6/7: © Christin Bremer, Pixabay,  
Klaus Weichhart, KLIWA

S. 8/9: © NASA, LARSIM-Forum, IPCC, KLIWA

S.10/11: © Pixabay, Dr. Andreas Meuser,  
Warming-stripes\_RLP\_1881–2021, DWD

S. 12/13: © Christian Iber, KLIWA, Hennegriff,  
Huber/pixelio.de, WWA Rosenheim

S.14/15: © KLIWA, Hennegriff, Huber/pixelio.de,  
WWA Rosenheim

S. 16/17: © Pixabay, LfU RP,  
Klaus Weichhart, KLIWA

S. 18/19: © ThuererWiesen-Josef Groß,  
Pixabay, KLIWA

S. 20/21: © StMUV, KLIWA

S. 22/23: © Pixabay, VG Herrstein,  
Sebastian Schmitt, KLIWA, DWD

S. 24/25: © Michael Schäffer (LfU RP),  
A. Hartl, LUBW, KLIWA

S. 26: © Dr. Matthias Brunke, Schäffer (LfU RP)

#### WEITERE INFORMATIONEN

[www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

[www.um.baden-wuerttemberg.de](http://www.um.baden-wuerttemberg.de)

[www.stmuv.bayern.de](http://www.stmuv.bayern.de)

[www.mkuem.rlp.de](http://www.mkuem.rlp.de)

[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

[www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

[www.lfu.rlp.de](http://www.lfu.rlp.de)

[www.dwd.de](http://www.dwd.de)

#### STAND: SEPTEMBER 2022

Diese Broschüre ist klimaneutral gedruckt





Landesanstalt für Umwelt  
Baden-Württemberg

Bayerisches Landesamt für  
Umwelt



Rheinland-Pfalz

LANDESAMT FÜR UMWELT

Deutscher Wetterdienst  
Wetter und Klima aus einer Hand



## VORWORT

Wasser ist eine der wertvollsten Gaben der Natur. Wir alle leben von und mit Wasser. Die Wasserwirtschaft trägt die hohe Verantwortung, die Lebensgrundlage Wasser dauerhaft zu sichern, aber auch vor den Gefahren des Wassers zu schützen. Der Standard der Wasserwirtschaft in Deutschland ist hoch. Wir schützen unsere Gewässer und verbessern ihren Zustand, wo es nötig ist. Wir haben ausreichend Trinkwasser in guter Qualität und investieren viele Millionen in die Verbesserung des Hochwasserschutzes und des Niedrigwassermanagements.

Aber der Wasserkreislauf ist im Wandel. Mit der Veränderung des Klimas ändert sich auch der Wasserhaushalt in Deutschland. Wir wissen heute, dass die mittlere Temperatur auf der Erde infolge des Treibhauseffekts weltweit bereits deutlich zugenommen hat und weiter zunehmen wird. Die Menschheit wird diese Entwicklung auch nicht mehr stoppen, sondern bestenfalls nur verlangsamen können. Wir müssen alle dazu beitragen, das Ausmaß der Veränderungen durch einen konsequenten und wirksamen Klimaschutz beherrschbar zu halten.

Infolge des Klimawandels mit seinen regionalen Auswirkungen müssen wir uns auf eine Zunahme extremer Wetterereignisse einstellen. Aller Voraussicht nach wird es in Zukunft mehr Starkregenereignisse geben, aber auch mehr Hitzeperioden und Trockenphasen. Für die Wasserwirtschaft heißt das, die möglichen Auswirkungen abzuschätzen, dafür Anpassungsstrategien zu entwickeln und dann Wege zu finden, sich an diese Veränderungen gebietsbezogen anzupassen.

Dank der bisherigen Untersuchungen innerhalb der Kooperation „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) können wir heute für den süddeutschen Raum abschätzen, wie sich der Klimawandel hier auf Hochwasser, Niedrigwasser oder die Grundwasservorräte auswirkt. Diese Abschätzungen sind mit Unsicherheiten behaftet. Diese korrekt einzuschätzen und die Weichen für die Zukunft dennoch richtig zu stellen, ist eine große Herausforderung. Bei der Grundlagenarbeit besteht weiterhin Handlungsbedarf: Wie können Unsicherheiten bezüglich der zukünftigen Entwicklungen genauer erfasst und in der Öffentlichkeit dargestellt werden? Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Wasserqualität unserer Bäche und Flüsse aus? Welche Anpassungen sind im Sinne des Vorsorgeprinzips jetzt notwendig, und welche später?

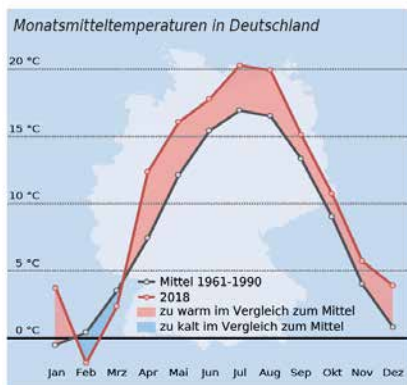
Mit konsequentem Klimaschutz auf globaler, nationaler und regionaler Ebene können wir die Folgen des Klimawandels begrenzen. Der Ausstoß von Treibhausgasen muss so weit wie möglich verringert werden. Auf die dennoch unumkehrbaren Auswirkungen müssen wir mit Anpassungsmaßnahmen reagieren. Das heißt, klimaempfindliche Systeme bestmöglich auf die Veränderungen vorbereiten. Um das zu gewährleisten, sind die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme zu erhöhen und die Verletzbarkeit der Systeme zu verringern. Das bestehende Fachwissen zum Klimawandel und seinen Folgen muss konsequent erweitert werden. Das Kooperationsvorhaben KLIWA leistet dabei für den Bereich einer nachhaltigen Wasserwirtschaft einen wichtigen Beitrag.



# Wo stehen wir?

## Herausforderung Klimawandel

Auf der Weltklimakonferenz in Glasgow im November 2021 haben die Staaten der Welt das Regelbuch zur Umsetzung des Paris-Abkommen aus dem Jahr 2016 vollendet. Es wurde erneut festgestellt, dass die Anstrengungen zur Begrenzung des Klimawandels auf einen Temperaturanstieg um 1,5 °C intensiviert werden müssen. Andernfalls werden die Auswirkungen noch verheerender ausfallen. Die Begrenzung des Temperaturanstiegs auf 1,5 °C ist ein ehrgeiziges Ziel und bedarf ambitionierter Anstrengungen im Bereich der Vermeidung von Treibhausgasemissionen.



2018 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn systematischer Wetteraufzeichnungen. Bis auf Februar und März weisen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen auf als während der internationalen Referenzperiode 1961 – 1990.  
@DWD: Nationaler Klimareport 2022

### DER KLIMAWANDEL IST AKUT

Das Erdklima war im Laufe der Jahrmillionen schon immer natürlichen Schwankungen unterworfen. Mal war Europa tropisch, mal lasteten mächtige Eispanzer auf dem Kontinent. Sedimentbohrkerne und Pollenanalysen geben Aufschluss über die frühen erdgeschichtlichen Klimaschwankungen der Erde. Seit 1850 werden Wetterdaten regelmäßig erfasst. Deren Auswertung zeigt, dass sich die globale Durchschnittstemperatur im Vergleich zu 1850 – 1900 um etwa 1,1 °C erhöht hat; in Deutschland sogar um 1,6 °C.

In den letzten Jahren sind extreme Wetterereignisse in Deutschland gegensätzlicher Natur aufgetreten: zahlreiche Starkregen- und Sturzflutereignisse besonders in den Jahren 2016 und 2018, der extreme Trockensommer 2018 und zuletzt die Jahrhundertflut 2021. Durch den Klimawandel werden solche Ereignisse wahrscheinlicher. Daher ist Anpassung an den bereits stattfindenden Klimawandel notwendig und Vorsorge, soweit möglich, auch gegen Extremereignisse zu treffen.

### TREIBHAUS ERDE

Die angenehme globale Durchschnittstemperatur von etwa +15 °C haben wir dem natürlichen Treibhauseffekt zu verdanken: Die in der Erdatmosphäre vorkommenden Spurengase, wie Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, wirken wie die Glasscheiben eines Gewächshauses. Sie lassen die eingehenden, kurzwelligen Sonnenstrahlen durch und halten die von der Erdoberfläche wieder abgegebene, langwellige Wärmestrahlung teilweise zurück. Deshalb werden sie auch Treibhausgase genannt. Ohne den natürlichen Treibhauseffekt würde die

Durchschnittstemperatur bei lebensfeindlichen -18 °C liegen. Seit Beginn der Industrialisierung steigt der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, der während der vorangegangenen Jahrhunderte relativ konstant bei 280 ppm (parts per million) lag, an. Mittlerweile werden mehr als 410 ppm gemessen. Hinzu kommen anthropogene Spurengase, die erst durch den Menschen in die Atmosphäre gelangten. Dieser zusätzliche vom Menschen verursachte anthropogene Treibhauseffekt beeinflusst den Wasserkreislauf global, aber auch regional. Daher sind Anpassungsmaßnahmen, welche regional entwickelt werden müssen, erforderlich.

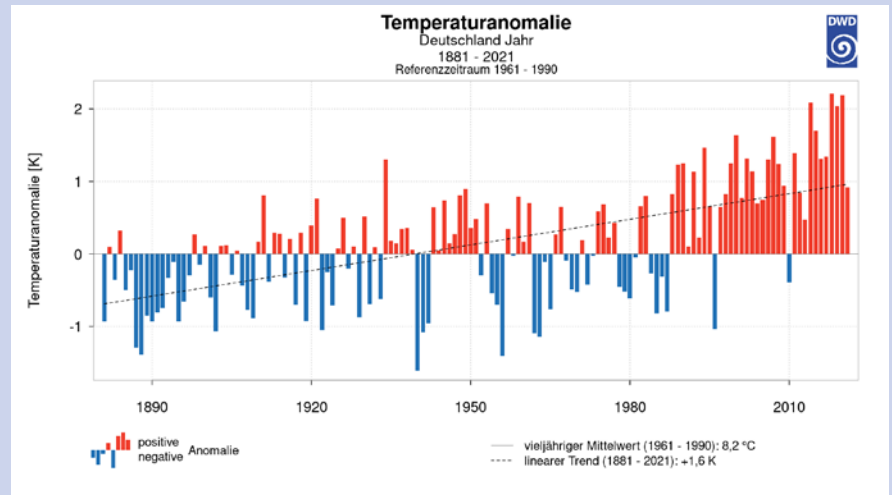
### KOOPERATION KLIWA

Sind die extremen Wetterlagen und Hochwasserereignisse in Süddeutschland der letzten Jahrzehnte bereits deutliche Vorboten des Klimawandels? Wie wird sich das Klima ändern und wie wirkt sich das auf unsere wichtige Ressource Wasser aus? Wie müssen wir darauf reagieren? Um diesen Fragen nachzugehen, haben die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst gemeinsam im Jahr 1999 die Kooperation „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) ins Leben gerufen. Ziel dieser länder- und fachübergreifenden Zusammenarbeit ist es, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die Ökologie der Flussgebiete und Seen im Süden Deutschlands herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.



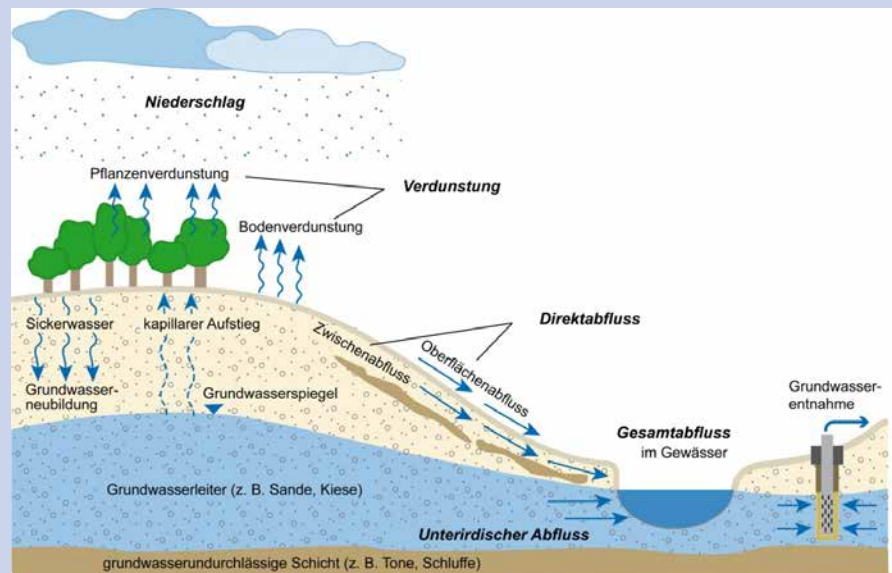
### TEMPERATURVERLAUF IN DEUTSCHLAND VON 1881 BIS 2020

Die Grafik zeigt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur der Bezugsperiode 1961–1990. Die gestrichelte schwarze Linie zeigt den linearen Trend über die Gesamtreihe. Positive Abweichungen (es war wärmer als im Durchschnitt der Periode 1961–1990) sind als rote Balken dargestellt, negative Abweichungen (es war kälter als im Durchschnitt der Periode 1961–1990) als blaue Balken. Es ist eine deutliche Temperaturerhöhung zu sehen, die sich in den letzten Jahrzehnten spürbar beschleunigt hat. Es ist eine deutliche Häufung der warmen Jahre im 21. Jahrhundert zu sehen: Neun der zehn wärmsten Jahre liegen im 21. Jahrhundert.



### DER KREISLAUF DES WASSERS

Die Erdoberfläche ist zu zwei Dritteln mit Wasser bedeckt. Das Wasser zirkuliert in einem gewaltigen Kreislauf als Dampf, Flüssigkeit oder Eis rund um den Globus. Wasser, das von der Erdoberfläche verdunstet, steigt als Wasserdampf auf, kondensiert zu Wolken und fällt als Regen oder Schnee wieder auf die Erde. Dieser Niederschlag fließt über Gewässer ab oder versickert im Boden und trägt so zur Grundwasserneubildung bei. Das meiste Wasser jedoch verdunstet wieder. Dieser Kreislauf wird durch den Klimawandel verändert.



Langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten sind Voraussetzung für Untersuchungen zum Klimawandel – je länger desto besser. Diese Messdaten zeigen die Entwicklung des Klimas für die Vergangenheit auf; beispielsweise die Veränderung der jährlichen Niederschlagsverteilung. Darauf aufbauend wird das zukünftige Klima mit sogenannten regionalen Klimaprojektionen abgeschätzt, welche die Grundlage für die Simulation des zukünftigen Wasserhaushalts

von Flussgebieten bilden. Die bisherigen KLIWA-Untersuchungen befassen sich mit den Themen Hochwasser, Niedrigwasser, Grundwasser, Starkregen und Bodenerosion sowie Gewässerökologie. Haben Veränderungen bereits stattgefunden bzw. zeigen die Simulationen für die Zukunft Änderungen, werden konkrete Anpassungsempfehlungen abgeleitet.

Mehr Informationen unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de).



# Klimamonitoring in KLIWA

## Regionale Veränderungen

Um die bisherige Klimaentwicklung einschätzen zu können, werden zunächst die verfügbaren Messdaten der Vergangenheit untersucht. Aus den langjährigen Messreihen lassen sich die natürliche Schwankungsbreite der Wetterdaten bestimmen und auch Trends erkennen. Um eine fundierte Datengrundlage für die weitere Klimaentwicklung zu haben, wurden in KLIWA rund 260 Temperatur- sowie 1200 Niederschlagsstationen im Süden Deutschlands ausgewertet und einheitlich regionalisiert.



*Niederschlag wird in Zukunft immer seltener als Schnee gespeichert werden. Dies hat Einfluss auf den Wasserhaushalt.*

© Christin Bremer

### ES IST WÄRMER GEWORDEN

Der globale Erwärmungstrend ist auch in Süddeutschland zu beobachten. In den Jahren 1931 bis 2020 ist die Durchschnittstemperatur in den KLIWA-Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie Hessen und Saarland im Mittel um 1,6 °C gestiegen. Seit 2001 lagen hier insgesamt 19 von 20 Jahren über dem langjährigen Mittel der Jahrestemperatur des Zeitraums 1961–1990. Damit hat sich der Erwärmungstrend noch weiter verstärkt. Insgesamt war seit 1931 die Erwärmung im Winterhalbjahr (November bis April) stärker ausgeprägt, als im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). In den letzten 20 Jahren hat sich jedoch der Schwerpunkt der weiteren Erwärmung in den Sommer verschoben. 2018 war das bisher wärmste Jahr seit Beginn der Messungen im Jahr 1881. Die Temperaturen lagen 2018 im Schnitt mehr als 2 °C über dem langjährigen Mittel.

### TROCKENE SOMMER, VERREGNETE WINTER

Die jährliche Niederschlagsmenge ist in den meisten süddeutschen Gebieten im Untersuchungszeitraum etwa gleichgeblieben. Verändert hat sich jedoch die saisonale Niederschlagsverteilung. Das Winterhalbjahr ist feuchter geworden. Hier haben die Niederschläge in den Jahren von 1931–2020 in manchen Regionen um 10–20% zugenommen. Besonders stark sind diese Zunahmen im Bereich nordöstliches Bayern und der Bodenseeregion ausgeprägt. Das Sommerhalbjahr ist in seinem Langzeitverhalten nicht so klar, aber es ist tendenziell trockener geworden.

### MEHR STARKNIEDERSCHLÄGE IM WINTER

In KLIWA werden auch die Trends der maximalen eintägigen Starkniederschläge untersucht. Diese sind aufgrund ihres kleinräumigeren Auftretens naturgemäß uneinheitlicher als für den Gebietsniederschlag. Im hydrologischen Winterhalbjahr findet man im Zeitraum 1931–2020 in fast ganz Süddeutschland mit Ausnahme von den nördlichsten Teilen positive Trends (bis +33 %), eine Voraussetzung für eine Zunahme der winterlichen Hochwasserlagen. Im Sommerhalbjahr ist bisher keine eindeutige Entwicklung zu erkennen. Aussagen über das Langzeitverhalten von Kurzzeitereignissen kleiner als einem Tag sind aktuell aufgrund der zu kurzen Messreihen und des weniger dichten Messnetzes mit hoher zeitlicher Auflösung schwer zu treffen. Hierzu können in Zukunft möglicherweise andere Quellen, zum Beispiel Radarmessungen des Niederschlags Aussagen liefern.

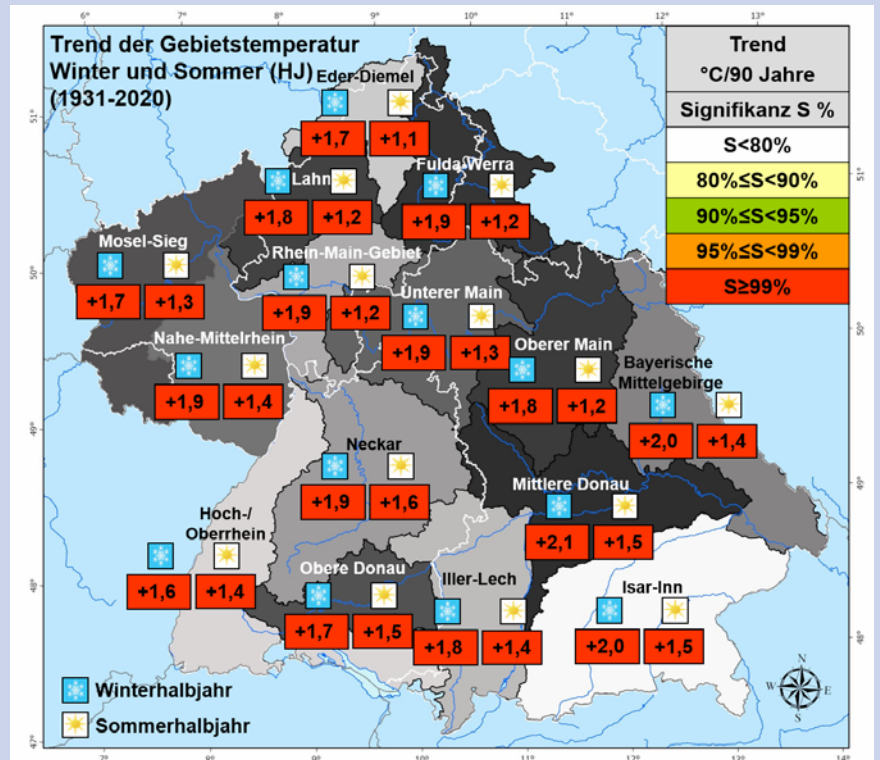
### MONITORING IN KLIWA

Eine wichtige Aufgabe in KLIWA ist die Erfassung von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen, um deren Variabilität bzw. deren Veränderung festzuhalten. Dies dient als Basis für alle weiteren Vergleichsbetrachtungen. Dazu wird alle 5 Jahre ein Monitoringbericht unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht. Die letzte Aktualisierung erfolgte im Jahr 2021.



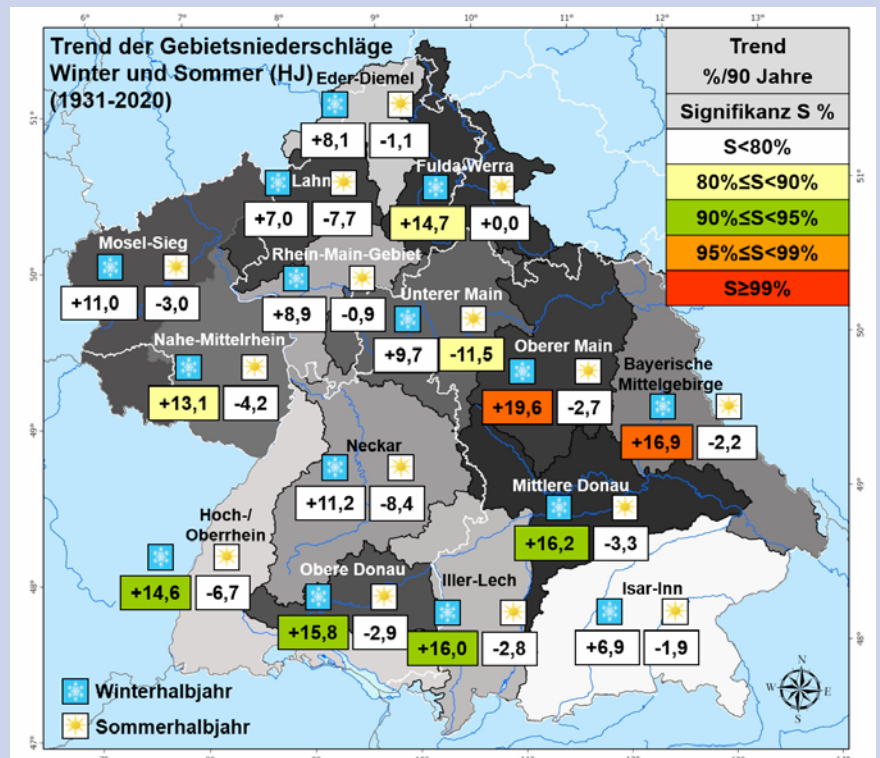
**ZUNAHME DER LUFTTEMPERATUR IM ZEITRAUM 1931 BIS 2020**

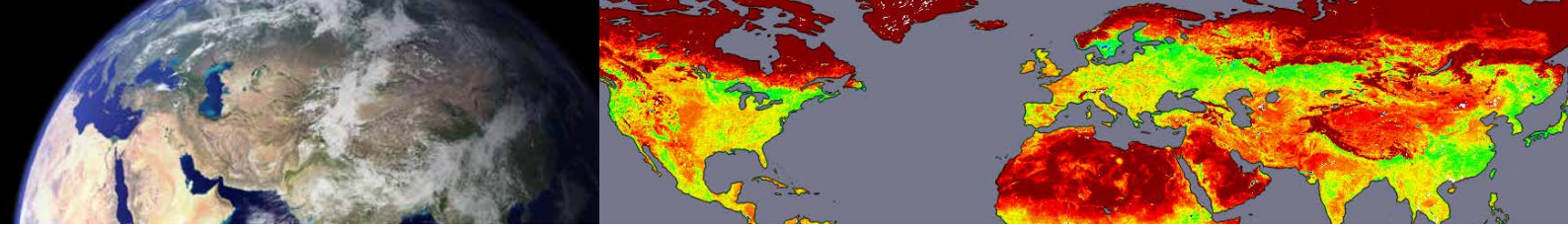
Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren. Die Zunahmen sind im Winter mit +1,6 bis 2,1 °C stärker als im Sommer mit +1,1 bis 1,6 °C.



**ÄNDERUNG DES GEBIETSNIEDERSCHLAGS IM ZEITRAUM 1931 BIS 2020**

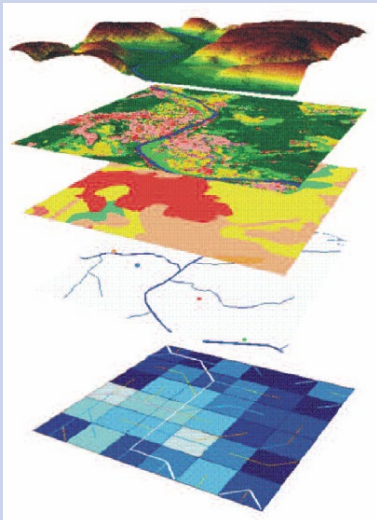
Die Darstellung zeigt die Änderung des Gebietsniederschlags in den hydrologischen Halbjahren. Es zeigen sich deutliche jahreszeitliche Unterschiede: Im Sommer zeigt sich eine meist leichte Tendenz zur Abnahme, im Winter zeigen sich generell Zunahmen von +7 bis 20%. In den letzten 20 Jahren schwächten sich die Trends für den Winter ab.





# Zukünftige Entwicklungen modellieren & verstehen Instrumente der Klimaforschung

Der globale Klimawandel wird in Zukunft weiter fortschreiten. Denn zusätzlich zu den zukünftig emittierten Treibhausgasen werden auch die bis heute in die Atmosphäre abgegebenen Treibhausgase dort noch mehrere Jahrzehnte wirksam sein und zu einer weiteren Erwärmung führen. Um das Ausmaß des zukünftigen Klimawandels abschätzen und geeignete Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können, werden mit Hilfe von Emissionsszenarien globale und regionale Klimaprojektionen erzeugt. In einem weiteren Schritt können die regionalen Klimaprojektionen als Antrieb für hochaufgelöste Wirkmodelle verwendet werden. Auf diese Weise ist es möglich die Auswirkungen des Klimawandels auf verschiedene Komponenten des Wasserhaushalts zu ermitteln.



## DATENGRUNDLAGEN VON WASSERHAUSHALTSMODELLEN

Basis für die Erstellung von Wasserhaushaltsmodellen (WHM) sind umfangreiche digitale Datensätze (u. a. digitales Höhenmodell, Satellitenklassifizierung der Landnutzung, Bodeneigenschaften, Flussnetz). Für jede einzelne WHM-Rasterfläche werden bis zu 16 unterschiedliche Landnutzungen mit ihren spezifischen Verdunstungs- und Abflusseigenschaften erfasst.

## KLIMAMODELLIERUNG

Wetter, Witterung, Klima: Unter diesen drei Begriffen versteht die Meteorologie und Klimatologie Vorgänge, die in der Atmosphäre in verschiedenen langen Zeiträumen ablaufen. Das Wetter beschreibt den kurzfristigen Zustand der Atmosphäre, die Witterung eine Phase von Tagen bis wenigen Wochen und das Klima eine ausreichend große Zeitspanne von mindestens drei Jahrzehnten bis hin zu geologischen Zeitaltern.

Wettervorhersagen sind oft schwierig und mit den heutigen Mitteln je nach Wetterlage für etwa 5–7 Tage möglich. Die langfristige Abschätzung der Entwicklung des Erdklimas ist eine ungleich komplexere Aufgabe, da viele Parameter und Größen sich gegenseitig beeinflussen und nicht alle Prozesse hinreichend bekannt sind. Die anthropogenen Einflüsse (der „Faktor Mensch“) werden in globalen Klimamodellen durch die Annahme verschiedener zusätzlicher Strahlungsantriebe in die Erdatmosphäre in den sogenannten RCP-Szenarien berücksichtigt. Mit dem neuesten IPCC-Bericht gibt es schon die nächste Generation an Szenarien, bisher aber nur auf der globalen Skala.

Die Rasterweite eines globalen Klimamodells (~ 200 km) ist für eine regionale Klimaabschätzung zu grob. Regionale Besonderheiten wie Gebirgszüge oder Flusstäler sind nur durch sich anschließende regionale Klimaprojektionen (~10 km) zu erfassen, die in Deutschland inzwischen auch auf 5 km herunterskaliert vorliegen. Daneben wurde in KLIWA in den vergangenen Jahren auch die Nutzung noch höher aufgelöster Klimaprojektionen (~2,8 km) vorangetrieben,

um konvektive Niederschlagsereignisse und deren Auswirkungen besser zu erfassen.

Durch eine Betrachtung mehrerer Klimaprojektionen (Ensembleansatz) ergibt sich eine Bandbreite des möglichen zukünftigen Klimas, die es erlaubt, dessen Variabilität und vorhandene Unsicherheiten besser zu beurteilen. Aus diesem Grund wurde in KLIWA auf Basis des Emissionsszenarios RCP8.5 ein Klimaensemble aus neun dynamischen regionalen Klimaprojektionen, das sogenannte KLIWA-Ensemble, erstellt. Die Grundlage für die Projektionsauswahl stellte das in Bayern entwickelte Klimaaudit dar. Mit dieser Methodik konnten Projektionen identifiziert werden, die für Untersuchungen des Klimas und Wasserhaushalts im süddeutschen Raum geeignet sind. Das RCP8.5-Szenario wird im Folgenden aber auch generell gelegentlich als Weiter-wie-bisher Szenario bezeichnet. In diesem Fall gilt es zu beachten, dass dieses Szenario einer Welt entspricht, in der keinerlei Maßnahmen zum Klimaschutz unternommen werden und das Wirtschaftswachstum weiterhin auf der Verbrennung fossiler Energieträger fußt.

## WIRKMODELLE

Um Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft treffen zu können, werden die zukünftigen Abflussverhältnisse mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen simuliert. Dazu werden regionale Klimaprojektionen als klimatischer Antrieb verwendet. Eine Quantifizierung der zu erwartenden Änderungen ist Voraussetzung für die Konzeption und Bewertung von Anpassungsmaßnahmen. Mit diesen Modellen ist es möglich, die räumliche und

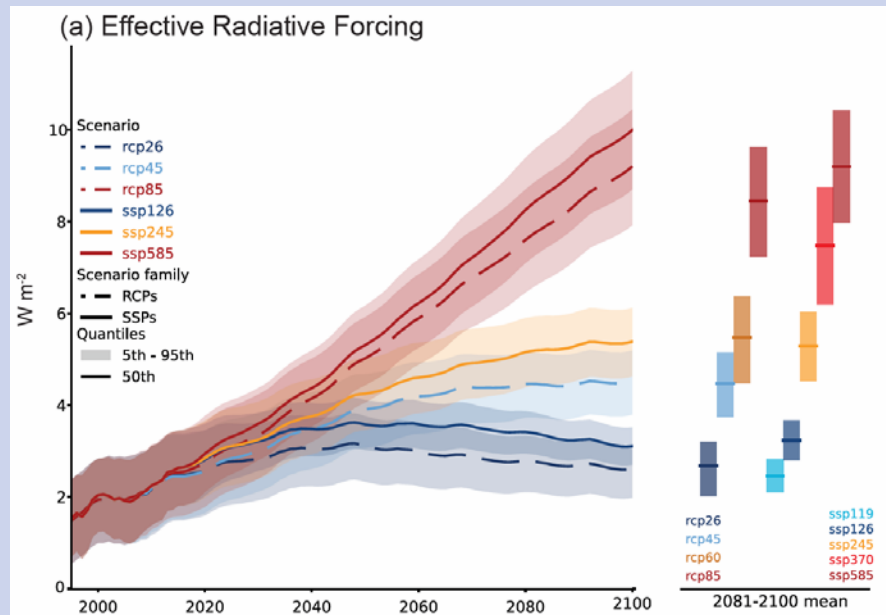


zeitliche Verteilung wesentlicher Komponenten des Wasserhaushaltes wie Verdunstung, Versickerung, Wasserspeicherung und Abfluss zu berechnen. Mit ihrer Hilfe können die Auswirkungen von Veränderungen auf das Gesamtsystem „Wasserhaushalt“ dargestellt und bewertet werden. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung werden ergänzend spezielle Bodenwasserhaushaltsmodelle eingesetzt. Darüber hinaus werden in KLIWA Wasserhaushaltsmodelle zur Berechnung der Wassertemperatur verwendet. Auf diese Weise können neben quantitativen auch qualitative Fragestellungen bearbeitet werden.

Als klimatischer Antrieb werden in den Wasserhaushaltsmodellen die in KLIWA betrachteten regionalen Klimaprojektionen basierend auf den RCP-Szenarien genutzt. Die neuen SSP-Szenarien werden in den nächsten Jahren Gegenstand der Modellierungen in KLIWA sein. Die Ergebnisse werden in die Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen zum Beispiel für Niedrigwasser- oder Hochwasserverhältnisse eingehen.

### BANDBREITE VON ERGEBNISSEN

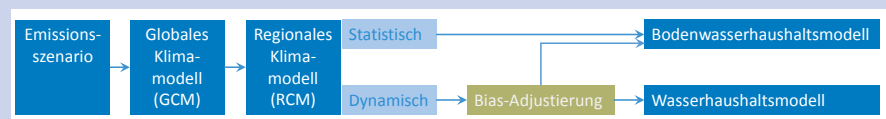
In jedem der oben genannten Modellschritte müssen Annahmen aus dem naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Bereich getroffen werden, die stets mit Unsicherheiten behaftet sind. Dies liegt unter anderem daran, dass nicht alle Prozesse des Klimasystems vollständig verstanden sind und auch nicht in den Klimamodellen abbildbar sind. Die Summe der Unsicherheiten führt dazu, dass „die eine Prognose“ für die Zukunft nicht erstellt werden kann. Stattdessen wird durch die Verwendung einer Vielzahl von globalen und regionalen Klimamodellen eine Reihe von möglichen Entwicklungspfaden aufgezeigt. Die Unsicherheiten der einzelnen Modelle in der Modellkette Globalmodell → Regionalmodell → Wasserhaushaltsmodell verursachen im Endergebnis eine Bandbreite möglicher Veränderungen.



### ANTHROPOGENER ANTRIEB IN DER KLIMAMODELLIERUNG

RCP-Szenarien sind die menschlich verursachten zusätzlichen Strahlungsantriebe (gestrichelt und transparente Bandbreiten); in KLIWA wird derzeit das RCP8.5-Szenario verwendet. Die zukünftig vorliegenden SSP-Szenarien liefern die sozioökonomischen und demographischen Entwicklungspfade, die zu einem gewissen zusätzlichen Strahlungsantrieb führen können. Sie sind mit durchgezogenen Linien und weniger transparenten Bandbreiten dargestellt.

(Quelle: IPCC 2021, AR6 WG I).



### MODELLKETTE FÜR UNTERSUCHUNGEN ZUM REGIONALEN KLIMAWANDEL

Die notwendige Verknüpfung von Modellen zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen und der Simulation künftiger Abflussverhältnisse ist schematisch als Modellkette dargestellt.



# Zukunftssimulationen für unser Klima

## Anpassungsstrategien

Für die Ermittlung der Änderungen des Klimas der Zukunft stehen verschiedene Klimaprojektionen zur Verfügung. Die Ergebnisse unterscheiden sich zwar regional, der generelle Trend zeigt jedoch in dieselbe Richtung: Die Erwärmung setzt sich weiter fort, in den Wintern wird es feuchter, in den Sommern hingegen tendenziell trockener. Die sich daraus ergebenden Veränderungen im Wasserhaushalt erfordern Anpassungsstrategien der Wasserwirtschaft.



Hochwasserschutzmaßnahme in Bad Kreuznach an der Nahe

### EHER HEISS UND WENIGER SCHNEE

Die bisher in KLIWA betrachteten regionalen Klimaprojektionen für Süddeutschland zeigen, dass die Temperatur bis zum Jahr 2100 im Durchschnitt im Weiter-wie-bisher-Szenario (RCP8.5) um 3 bis 4,4 °C im Vergleich zu 1971–2000 zunehmen kann. Dabei fallen die Zunahmen für das Sommerhalbjahr gegen Ende des Jahrhunderts geringfügig stärker aus als für das Winterhalbjahr. Der bisherige Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern wird sich fortsetzen: Während es im Sommer gegenüber heute regional bis zu 15% weniger regnen kann, wird es im Winter spürbar mehr Niederschlag geben – in manchen Regionen sind Zunahmen bis zu 25% möglich. Die größten Niederschlagsmengen werden auch in der Zukunft an den Staulagen der aus dem Westen angeströmten KLIWA Region anfallen. Bei den Starkniederschlägen nehmen besonders die seltenen Extremereignisse – relativ gesehen – stärker zu als weniger extreme Ereignisse. Ein immer größerer Anteil am Gesamtniederschlag wird sich voraussichtlich auf wenige niederschlagsreiche Tage konzentrieren. Trockenperioden werden somit, insbesondere im Sommer, länger andauern.

### FAZIT

Als Folge des durch den Menschen verursachten Treibhauseffekts

- wird die Zahl an heißen Tagen (Tage über 30 °C) und an Sommertagen (Tage über 25 °C) im Vergleich zu heute deutlich zunehmen,
- werden sommerliche Trockenperioden länger andauern,

- nehmen sommerliche Starkniederschlagsereignisse mit lokalen Überschwemmungen zu,
- nehmen die Westwetterlagen, die höhere Niederschläge bringen, vor allem im Winter zu,
- fällt der Niederschlag im Winter vermehrt als Regen und weniger als Schnee,
- wird es weniger Frosttage (Tiefsttemperatur unter 0 °C) und Eistage (Dauerfrost) geben.

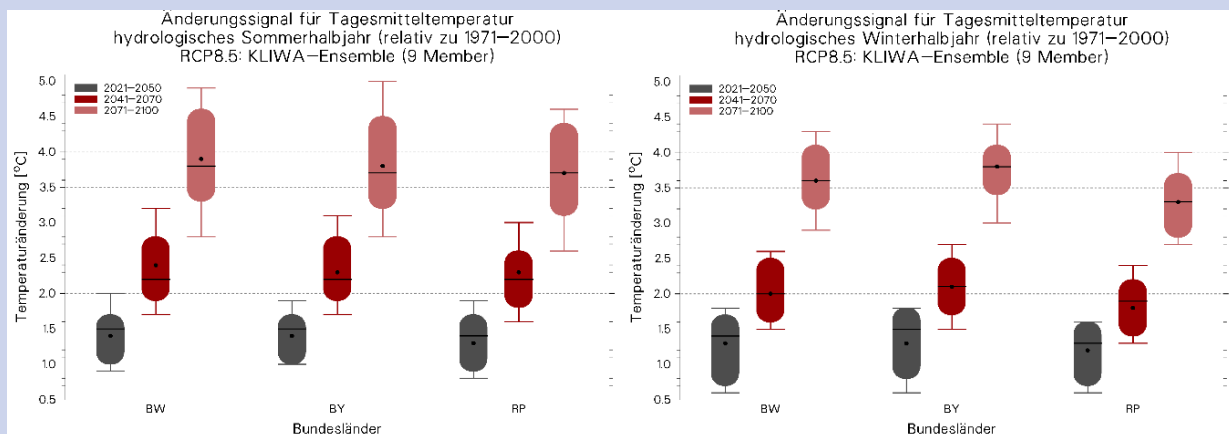
### ANPASSUNGSSTRATEGIEN

In den Anfangsjahren lag der Fokus der Untersuchungen in KLIWA vor allem auf der Entwicklung der Hochwasserabflüsse. Mittlerweile wird ein weites Feld an Themen bearbeitet. Hierzu gehören die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse, die Grundwasserneubildung, die Gewässerökologie sowie auf Starkniederschläge und die Bodenerosion.

Die Folgen des Klimawandels stellen die Länder, Kommunen und letztendlich auch Bürger:innen vor schwierige Aufgaben. Den heute bereits absehbaren und teils schon spürbaren Auswirkungen des Klimawandels kann nur mit konkreten Maßnahmen zur Anpassung begegnet werden. Aus diesem Grund müssen wirksame und robuste, aber flexible Anpassungsstrategien entwickelt werden, die neben den hydrologischen auch politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Die Prinzipien der Nachhaltigkeit und der Umweltverträglichkeit spielen dabei eine große Rolle.

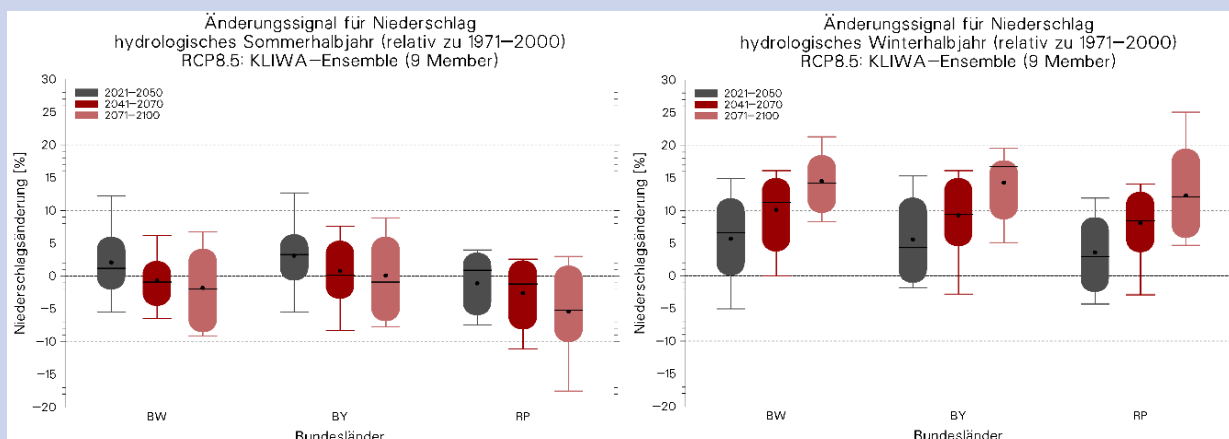
Um die schlimmsten Folgen des Klimawandels zu verhindern und den Anpassungsbedarf möglichst zu reduzieren, müssen die Emissionen von Treibhausgasen wie CO<sub>2</sub> stark gedrosselt werden. Der internationale Klimavertrag, der im November 2016 in

Kraft getreten ist, war ein wichtiger Schritt der Staatengemeinschaft den Klimawandel in Gesetzen zu verankern. Dennoch fehlen bisher internationale Verpflichtungserklärungen, mit denen verbindliche Klimaschutzziele erreicht werden können.



### ZUNAHME DER LUFTTEMPERATUR BIS 2100

Die Darstellung zeigt die Änderung der Lufttemperatur dreier zukünftiger Perioden im Vergleich zu 1971–2000 basierend auf dem Weiter-wie-bisher Szenario für die KLIWA-Länder. Dargestellt ist die Spannweite des KLIWA-Ensembles (9 Member). Die Boxen sind das 15. und 85. Perzentil, Minimum und Maximum sind über die Spannweite gegeben. Der Strich ist der Median und der Punkt der Mittelwert des Ensembles. Die Temperatur nimmt im Winter und Sommer weiter deutlich zu. Die Änderungen sind im Sommer etwas stärker als Winter.



### ÄNDERUNG DES GEBIETSNIEDERSCHLAGS BIS 2100

Die Darstellung zeigt die relative Änderung des Gebietsniederschlags dreier zukünftiger Perioden im Vergleich zu 1971–2000 basierend auf dem Weiter-wie-bisher Szenario für die KLIWA-Länder. Dargestellt ist die Spannweite des KLIWA-Ensembles (9 Member). Die Boxen sind das 15. und 85. Perzentil, Minimum und Maximum sind über die Spannweite gegeben. Der Strich ist der Median und der Punkt der Mittelwert des Ensembles. Die Änderungen sind jahreszeitlich unterschiedlich, in den Wintern wird es überwiegend feuchter, in den Sommern hingegen tendenziell trockener.



# Unser wichtigstes Trinkwasserreservoir Grundwasser

Im Süden Deutschlands werden etwa 80 Prozent des Trinkwassers dem Grundwasser entnommen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt sind bereits zu beobachten und für die Wasserwirtschaft von besonderer Bedeutung. Bei sich verändernden Klimabedingungen muss die Trinkwasserversorgung auch in Zukunft sichergestellt werden.



Der Blautopf in Baden Württemberg

## MESSWERTE ZEIGEN VERÄNDERUNGEN AUF

Die Grundwasserstände und Quellschüttungen werden bereits seit mehreren Jahrzehnten, an einzelnen Messstellen sogar seit über 100 Jahren, beobachtet. Die gewonnenen Datenreihen zeigen daher Langzeitentwicklungen der Grundwasserstände und Quellschüttungen auf. Eine systematische Auswertung ausgewählter Messzeitreihen aus den wichtigsten Grundwasserleitern von Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen hat gezeigt, dass an etwa 80 % der untersuchten Messstellen sinkende Grundwasserstände bzw. abnehmende Quellschüttungen auftreten. Auch der Höchstwert im Jahresgang tritt, an der überwiegenden Anzahl der Messstellen, immer früher auf – ein Resultat wärmerer Winter und abnehmender Schneebedeckung.

## ENTWICKLUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Als Ergebnis einer Bodenwasserhaushaltsmodellierung liegen für den gesamten süddeutschen Raum methodisch vergleichbare Berechnungen für die Periode 1951-2021 vor, anhand derer Veränderungen in der Vergangenheit aufgezeigt werden können.

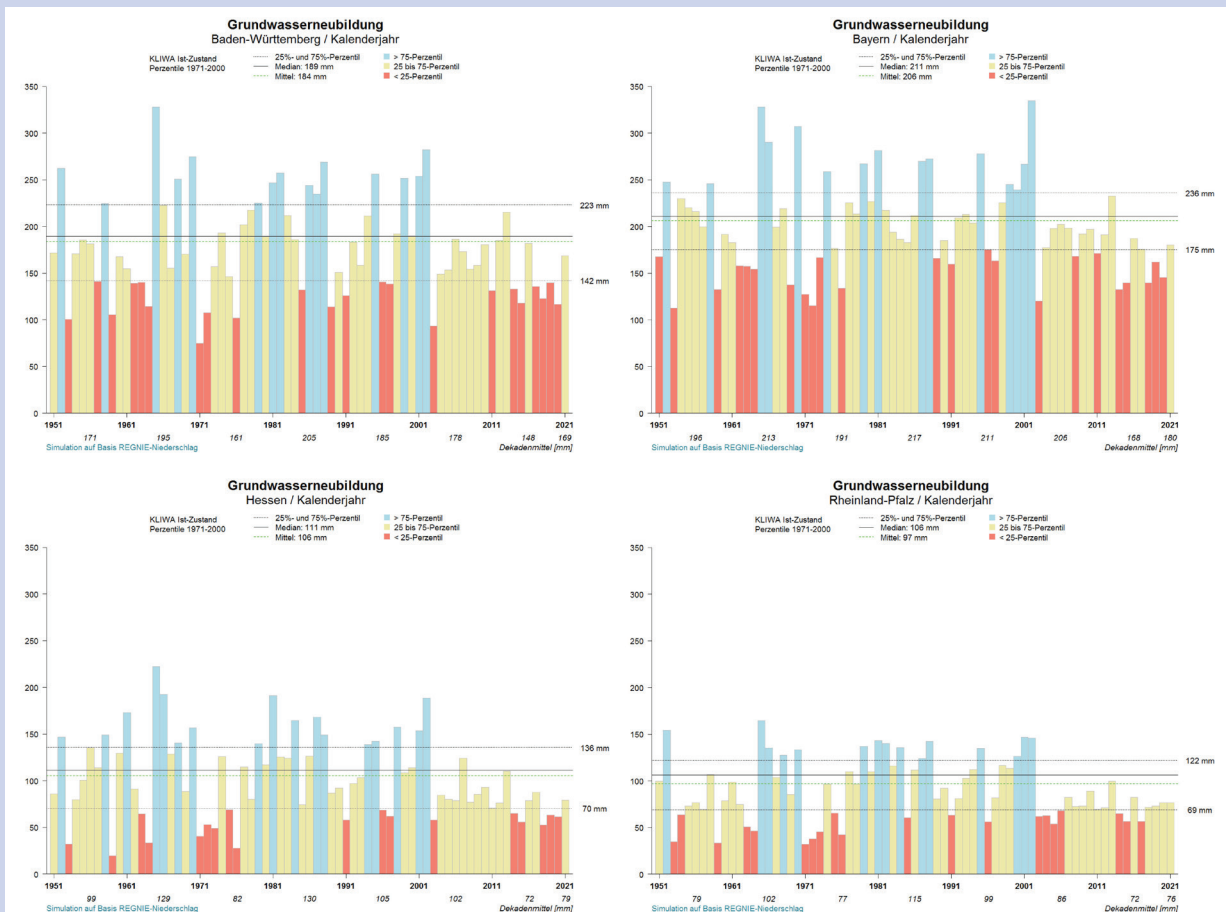
Die durchschnittliche Grundwasserneubildung in Süddeutschland betrug im Zeitraum 1971–2000 172 mm. Bei Betrachtung der Einzeljahre zeigt sich, dass in der jüngeren Vergangenheit, neben einer Reihe sehr Neubildungsarmer Jahre, allenfalls noch durchschnittliche Neubildungsjahre auftraten. So betrug die mittlere Grundwasserneubildung in den vergangenen 19 Jahren seit 2003 lediglich 141 mm und war nahezu flächendeckend auf einem deutlich niedrigeren Niveau als im Zeitraum 1971–2000. Auf Grundlage

des aktuellen, um statistische Klimaprojektionen erweiterten, KLIWA-Ensembles simulierte Grundwasserneubildungsraten ergeben eine Bandbreite von moderaten Zu- bis deutlichen Abnahmen. Das Gros der damit vorliegenden neun dynamischen und vier statistischen Projektionen überschätzt die Entwicklung der Grundwasserneubildung für die vergangenen Jahre seit 2003. Eine künftige Entwicklung der Grundwasserneubildung am „pessimistischeren“ unteren Rand kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Auch anhand von Trockenheitsindices zeigt sich eine Zunahme von Trockenperioden. Der Trockenheitsindex TI30 beschreibt die Anzahl an Tagen im Jahr, an denen eine 30%ige Füllung des Bodenwasserspeichers unterschritten wird. In dieser Zeit erfolgt keine Versickerung und die Vegetation steht unter hohem Trockenstress. Während im Zeitraum 1971–2000 an durchschnittlich 52 Tagen im Jahr in Süddeutschland ein entsprechendes Bodenwasserdefizit auftrat, stieg die Anzahl für den Zeitraum 2003–2021 auf 64 Tage. Auf Grundlage der vorliegenden aktuellen Projektionsbandbreite ist zu erwarten, dass dieser Wert in Zukunft mindestens in gleichem Maße weiter ansteigen wird.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

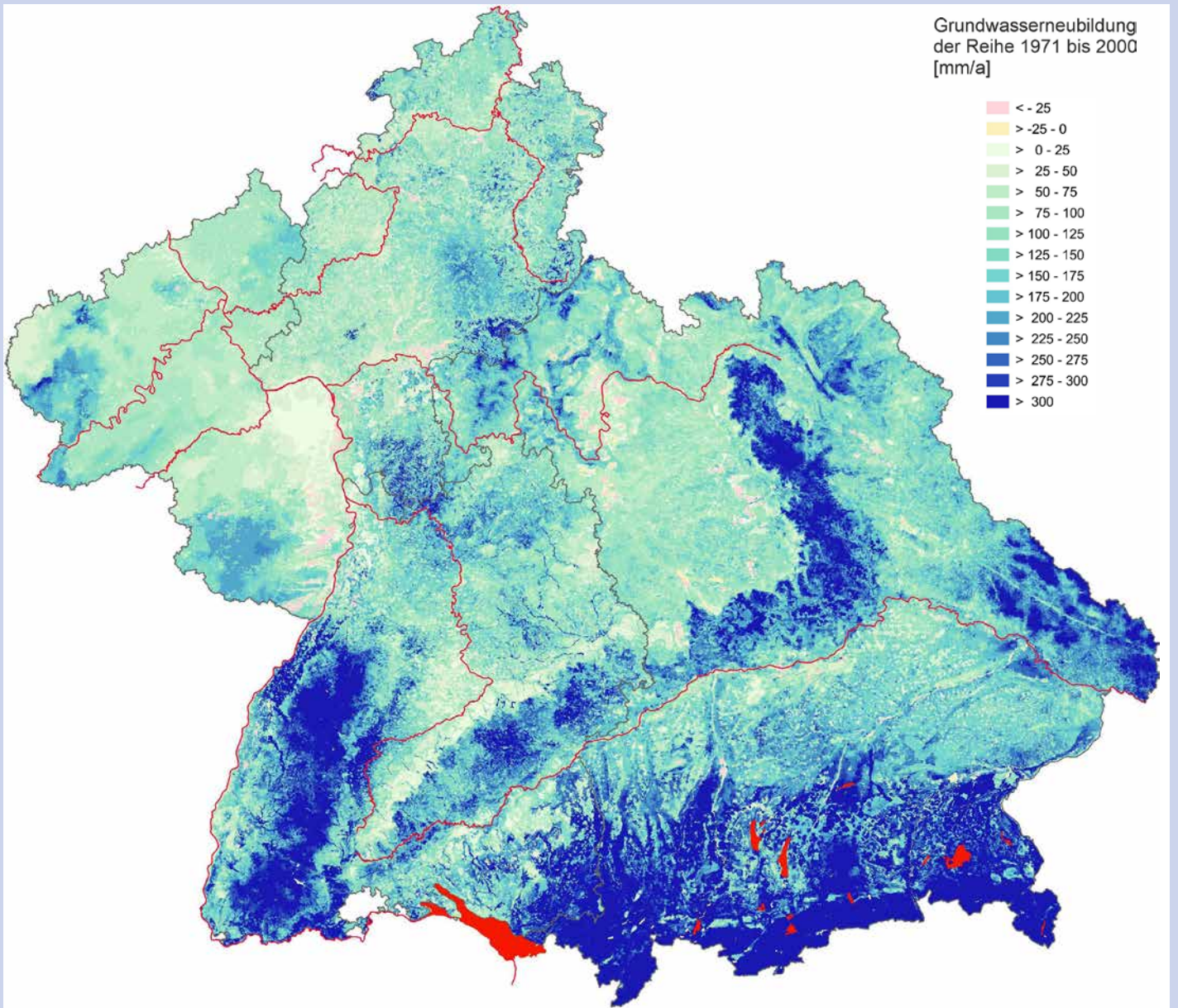
Basis einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung ist die regelmäßige Beobachtung der Grundwassermenge und -beschaffenheit. Im Hinblick auf die Auswirkungen des Klimawandels ist der Messnetzbetrieb daher konsequent fortzuführen. Wie sich bereits in der Vergangenheit zeigte, führten längere sommerliche Trockenperioden zu einem örtlich und zeitlich begrenzten Wassermangel. Um Engpässe bei der Wasser-



Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Süddeutschland (Baden-Württemberg, Bayern, Rheinland-Pfalz und Hessen) im Zeitraum 1951–2021.

versorgung zu vermeiden, müssen regionale und überregionale Verbundlösungen ausgebaut werden. Insbesondere der steigende landwirtschaftliche Bewässerungsbedarf erfordert nachhaltige Konzepte, um Konflikte zwischen den Interessengruppen zu vermeiden und die Wasserversorgung auch zukünftig sicherstellen zu können. In Baden-Württemberg wurde daher im Jahr 2019 mit dem Masterplan Wasserversorgung begonnen. In Bayern wurde die Aktualisierung der Wasserversorgungsbilanzen für jeden Regierungsbezirk im Jahr 2020 gestartet. Rheinland-Pfalz führt im Rahmen der Fortschreibung des Wasserversorgungsplans eine Sensitivitätsanalyse der öffentlichen Wasserversorgung durch. Darin werden für

alle Wasserversorger verschiedene Szenarien untersucht, die die Sicherstellung der öffentlichen Wasserversorgung beeinträchtigen können. Es handelt sich bei den Szenarien um einen zukünftig steigenden spezifischen Verbrauch, um steigende Bevölkerungszahlen und um eine weiter zurückgehende Grundwasserneubildungsrate. Im Hinblick auf zunehmende Extremereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel können vorübergehende lokal bis regional erhöhte Grundwasserstände zu Schäden an Gebäuden und Infrastrukturen führen. Dies ist etwa bei der Ausweisung von Baugebieten in potentiell vernässungsgefährdeten Gebieten zu berücksichtigen.

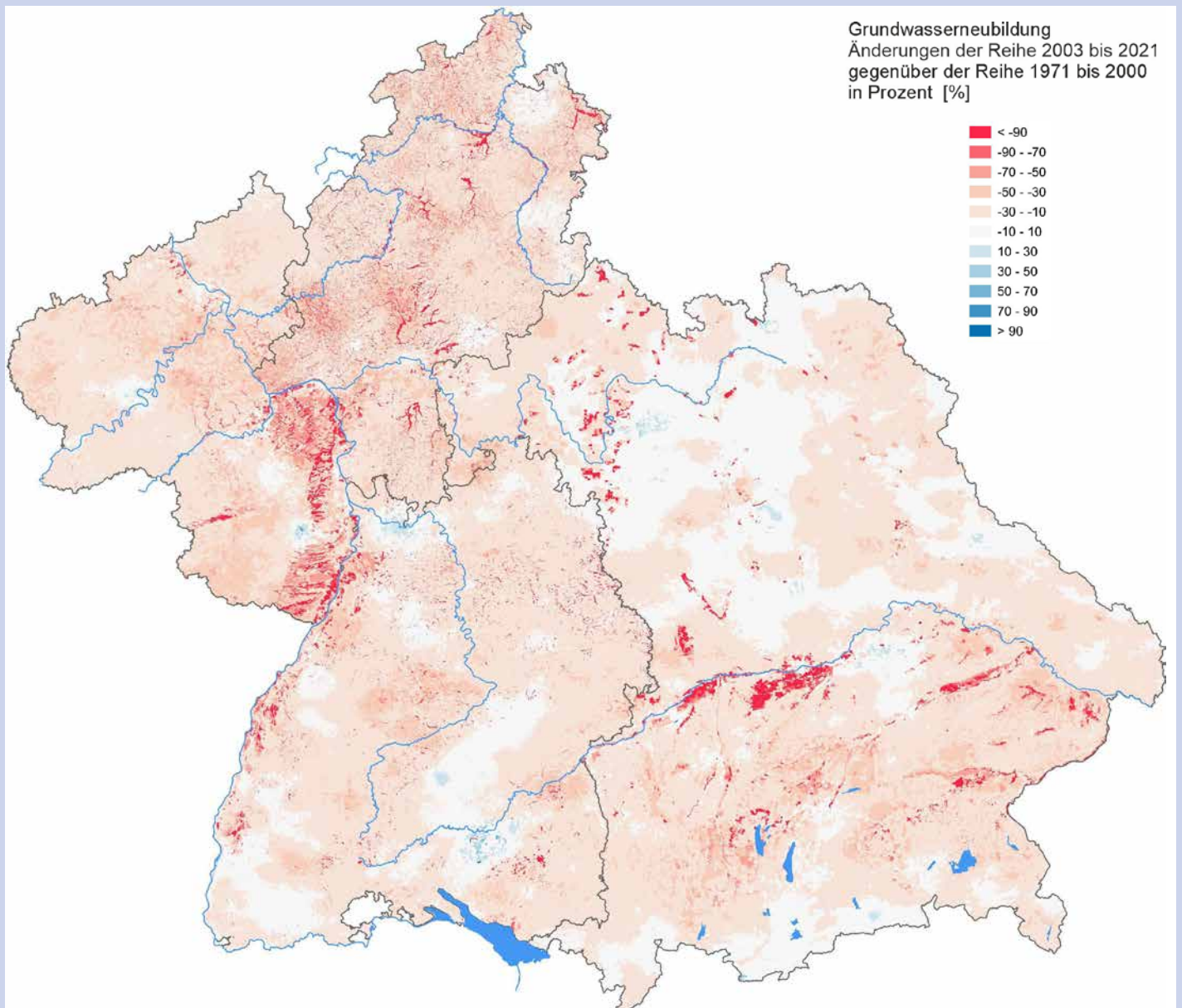


#### MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG – MITTEL DER REFERENZPERIODE 1971–2000

Die Grundwasserneubildung ist wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung und ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Im Rahmen von KLIWA wurde die Grundwasserneubildung der Periode 1951–2021 für vier Bundesländer mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW berechnet. Als Referenz dient der Zeitraum 1971–2000.



Grundwasserneubildung  
Änderungen der Reihe 2003 bis 2021  
gegenüber der Reihe 1971 bis 2000  
in Prozent [%]



**ÄNDERUNG DER MITTLEREN JÄHRLICHEN GRUNDWASSERNEUBILDUNG IM ZEITRAUM 2003 BIS 2021 IM VERGLEICH ZUR REFERENZPERIODE 1971 BIS 2000**

Die mittlere jährliche Grundwasserneubildung lag in den vergangenen 19 Jahren nahezu flächendeckend auf einem deutlich niedrigeren Niveau als im Zeitraum 1971–2000.



# Öfter und länger trocken Niedrigwasser

Die trockeneren und wärmeren Sommer in der Zukunft lassen die Wasserstände sinken. Diese Niedrigwasserphasen setzen nicht nur der Binnenschifffahrt, sondern auch der Landwirtschaft, der Energiewirtschaft, der Trinkwasserversorgung sowie gewerblichen und industriellen Betrieben, die für ihre Produktionsprozesse Wasser benötigen, zu. Die wirtschaftlichen Folgen von lang andauernden Trockenperioden und damit verbundene volkswirtschaftliche Schäden können gravierend sein. Hinzu kommt, dass neben den wasserwirtschaftlichen Nutzungen ebenso die Gewässerökologie mit weitreichender Wirkung und Schäden von Niedrigwasser betroffen ist.



Rhein bei Osterspai bei Niedrigwasser

## HÄUFIG NACHTEILIGE ENTWICKLUNGEN DES WASSERHAUSHALTS IN DEN FLUSSGEBIETEN

Der Klimawandel mit höheren Temperaturen führt zu einer Intensivierung im Wasserkreislauf. In der Folge werden extreme Witterungsereignisse häufiger auftreten. Sinkende Wasserstände und damit einhergehende Niedrigwasserperioden treten regelmäßig nach längeren Trockenperioden auf. Allein in den vergangenen Jahren gab es an größeren und kleineren Flüssen länger andauernde Niedrigwasserperioden, wobei insbesondere das Niedrigwasserjahr 2018, aber auch 2022, hervorstechen. Auf solche Situationen muss sich die Wasserwirtschaft künftig vermehrt einstellen.

## WENIGER REGEN UND HÖHERE VERDUNSTUNG = WENIGER ABFLUSS IM SOMMER

Langjährige Zeitreihen an Pegeln zeigen für die jährlichen Niedrigstwasserabflüsse eine ausgeglichene Verteilung von zunehmenden: die Niedrigwassersituation hat sich entspannt – und abnehmenden: die Niedrigwassersituation hat sich verschärft – Trends. Gegenüber älteren Auswertungen bis zum Jahr 2015, hat die Anzahl abnehmender Trends jedoch zugenommen.

Für die jährlichen 7-Tages-Mittel-Niedrigstwasserabflüsse weist die Mehrzahl an Pegeln inzwischen sogar eine abnehmende Tendenz auf. Werden die Zeitreihen von 1951 auf 1974 verkürzt, so wird in beiden Fällen die abnehmende Tendenz noch deutlicher.

Die Gewässer in Süddeutschland werden stark wasserwirtschaftlich genutzt – beispielsweise durch Wasserzuleitungen oder Speicherbewirtschaftung. Diese überprägen die erwarteten Rückgänge der Abflüsse, zeigen aber auch, dass die Wasserwirtschaft geringere Wassermengen bis zu einem gewissen Grad abpuffern konnte. Das Klimasignal tritt dennoch immer deutlicher hervor.

In KLIWA werden regelmäßig Abflussprojektionen mit aktuellen Klimaprojektionen durchgeführt. Seit 2021 stehen dabei die Wasserhaushaltmodellierungen mit dem KLIWA-Ensemble, basierend auf neun regionalen Klimaprojektionen des Weiter-wie-bis-her Szenarios RCP8.5, im Fokus. Wir wollen wissen: Wie werden sich die projizierten steigenden Lufttemperaturen, trockeneren Sommer und feuchteren Winter auf die Niedrigwassersituation in Süddeutschland auswirken?

In Regionen mit pluvial geprägtem Regime tritt das natürliche Abflussminimum im Spätsommer/Herbst ein. Sie sind daher von einer vermehrten sommerlichen Trockenheit besonders betroffen. Hier ergibt sich zum Ende des 21. Jahrhunderts ein eindeutiges Bild: Im Sommerhalbjahr (April bis September) werden die Niedrigwasserabflüsse aufgrund des Klimawandels weiter abnehmen, die Niedrigwassersituation wird sich verschärfen. Doch auch im Winterhalbjahr (Oktober bis März) wird der Niedrigwasserabfluss in diesen Regionen womöglich weiter zurückgehen.





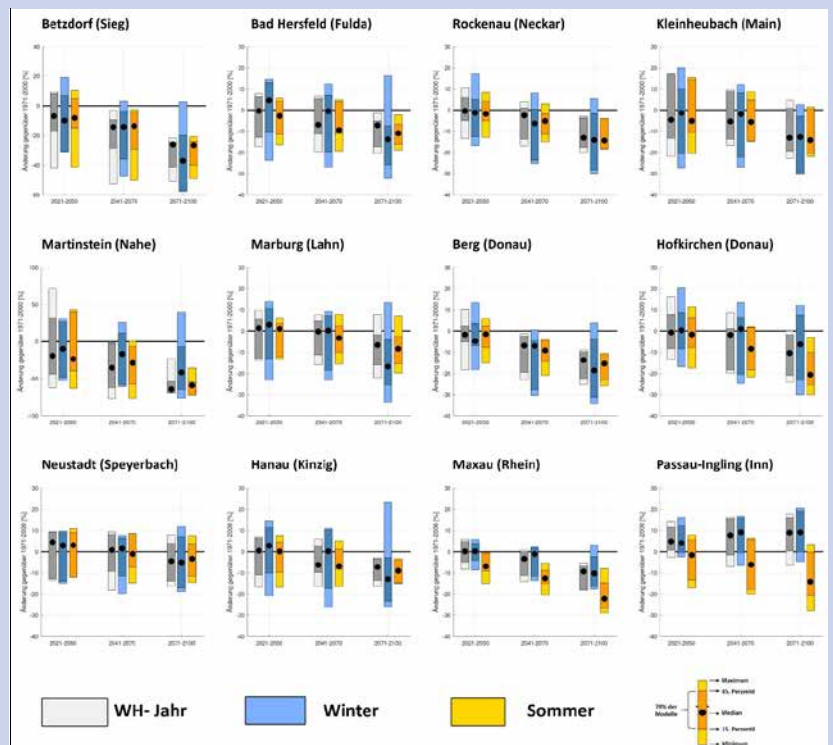
Im nival geprägten Alpenvorland (Abflussminimum im Winter) fallen die sommerlichen Abnahmen in die Zeit, in der aktuell die höchsten gemessenen mittleren Niedrigwasserabflüsse im Jahresverlauf auftreten. Diese Region erfährt daher tendenziell weniger starke Auswirkungen, einzelne Nutzungen können aber nichtsdestotrotz merklich beeinträchtigt sein. Im Winter wird für diese Region hingegen eine Erhöhung des Niedrigwasserabflusses projiziert. Niederschlag wird immer seltener in Form von Schnee im Einzugsgebiet gespeichert, sondern kommt direkt zum Abfluss. Die winterliche Niedrigwassersituation wird sich entspannen.

**WAS TUN?**

Um die Folgen von häufigerem Niedrigwasser und Trockenheit abzumildern, braucht es ein Paket an Maßnahmen. Einerseits sind dies kurzfristige operationelle Maßnahmen wie die Einschränkung oder das Verbot von Wasserentnahmen, die während konkreter Niedrigwassersituationen ergriffen werden können. Andererseits benötigt man langfristige Maßnahmen wie die Förderung der Versickerung oder die Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Fläche, die bei zukünftigen Niedrigwasserereignissen vorbeugend wirken. Hier ist die Abstimmung mit allen betroffenen Akteuren wichtig, um Nutzungskonflikte weitest möglich zu mindern. KLIWA untersucht die Auswirkungen, Konflikte und Handlungsoptionen zu Niedrigwasser in Fallstudien. Dabei dienen Stresstests, also die Simulation besonders extremer Niedrigwasserbedingungen, als Diskussionsgrundlage für den Umgang mit solchen Situationen.



Viele wasserwirtschaftliche Nutzungen und ökologischen Funktionen können durch Niedrigwasser beeinträchtigt werden, da sie entweder eine ausreichende Wassermenge (Quantität) oder Wassergüte (Qualität) benötigen. Weiterhin hängen diese Nutzungen oft in einem vielschichtigen Wirkgefüge zusammen. Daraus resultieren bei einem Rückgang der Wasserverfügbarkeit Nutzungskonflikte.



Projizierte Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Vergleich zur Referenzperiode (1971–2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern.



# Im Winter steigt die Gefahr Hochwasser

In den vergangenen Jahren gab es in Süddeutschland zahlreiche Hochwasserereignisse – zuletzt das verheerende Hochwasser im Ahrtal und in der Eifel im Juli 2021. Die Untersuchungen in KLIWA weisen darauf hin, dass die Hochwasserabflüsse in der Vergangenheit zugenommen haben und dies auch in Zukunft weiter tun werden. Daher sind entsprechende Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Dabei sind Maßnahmen zu bevorzugen, die langfristig wirken und zweckmäßig sind. Der Hochwasser-Vorsorge kommt dabei eine besondere Bedeutung zu.



Absprerrung bei Hochwasser

## HOCHWASSER – ALTBEKANNTES PHÄNOMEN IN NEUEM GEWAND

Der Klimawandel beeinflusst das Abflussgeschehen im Allgemeinen und die Hochwasserabflüsse im Speziellen. Durch ihn fällt in Süddeutschland im Winterhalbjahr mehr Niederschlag und im Sommerhalbjahr weniger. Zudem kann eine wärmere Atmosphäre mehr Wasser aufnehmen, wodurch das Potential für intensivere Niederschläge steigt. In Süddeutschland muss zwischen nivalen Abflussregimen, geprägt durch Schneeschmelze und -speicherung, und pluvialen Abflussregimen, geprägt durch Niederschlag, unterschieden werden. An pluvial geprägten Fließgewässern tritt das natürliche Abflussmaximum im Winterhalbjahr auf. Sie sind daher im Hinblick auf Hochwasser von einer Zunahme winterlicher Niederschläge besonders betroffen.

Wie sich die Veränderung des Niederschlagsgeschehens auf die Hochwasserabflüsse genau auswirkt, wird in KLIWA durch das Monitoring von Abflussmessungen und die Auswertung von Abflussprojektionen untersucht. Auf dieser Grundlage werden anschließend geeignete Anpassungsmaßnahmen bestimmt.

## MEHR REGEN UND WENIGER SCHNEE IM WINTER = MEHR HOCHWASSER

Die Auswertung von 116 Pegeln zeigt zwischen 1932 – 2020 im Gesamtjahr, und im hydrologischen Winterhalbjahr (November-April) jeweils überwiegend zunehmende Trends. Diese Trends sind im Winterhalbjahr deutlich häufiger signifikant als im Gesamtjahr. Die (signifikanten) Zunahmen treten v. a. in Bayern und Baden-Württemberg auf, in Rheinland-Pfalz halten sich Zu- und Abnahmen die Waage.

Die Anzahl der signifikanten Zu- und Abnahmen ist seit 2015 etwa gleichgeblieben. Allerdings gibt es bei den nicht signifikanten Veränderungen weniger Zunahmen und mehr Abnahmen.

Im Sommerhalbjahr weisen etwa je 40 Prozent der untersuchten Pegel zu- bzw. abnehmende Trends auf, wobei die Zunahmen deutlich häufiger signifikant sind. In Baden-Württemberg und Bayern überwiegen die Zunahmen, in Rheinland-Pfalz die Abnahmen.

In KLIWA werden regelmäßig Abflussprojektionen mit aktuellen Klimaprojektionen durchgeführt. Seit 2021 stehen dabei die Wasserhaushaltmodellierungen mit dem KLIWA-Ensemble, bestehend aus neun regionalen Klimaprojektionen des Weiterwie-bisher-Szenarios RCP8.5, im Fokus. Wir wollen wissen: Wie werden sich Hochwasserabflüsse in Zukunft in Süddeutschland verändern?

Insgesamt muss mit einer Zunahme der Hochwasserabflüsse gerechnet werden – sowohl im Gesamtjahr als auch in den beiden Halbjahren. Im Gesamtjahr und im Winterhalbjahr weisen die betrachteten Pegel i.d.R. zunehmende Tendenzen auf, die sich an den meisten Pegeln im Laufe des 21. Jahrhunderts verstärken. An Pegeln mit pluvialen Abflussregime ist die Bandbreite und Größe der Zunahme des Gesamtjahres in etwa vergleichbar mit dem Änderungssignal im Winterhalbjahr. Wohingegen an Pegeln mit nivalem Abflussregime größere Zunahmen im Winterhalbjahr zu verzeichnen sind. Ursache ist, dass zukünftig im Winter immer weniger Niederschlag als Schnee gespeichert, sondern in Form von Regen direkt abflusswirksam wird.



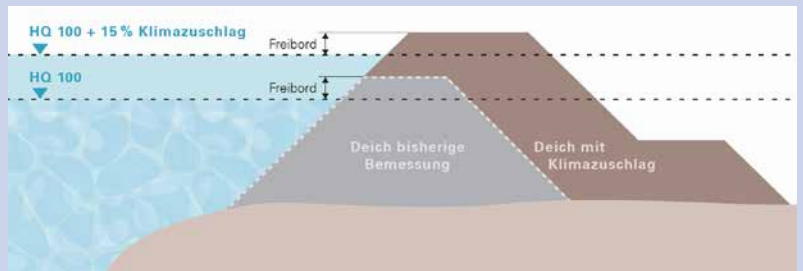
Das Änderungssignal im Sommerhalbjahr zeigt ebenfalls überwiegend Zunahmen und kann an einzelnen Pegeln eine hohe Bandbreite aufweisen. Eine Ursache könnte sein, dass zukünftig ein größerer Anteil des sommerlichen Niederschlags als (lokaler) Starkniederschlag und nicht in Form von sogenanntem Landregen fallen wird.

**ANPASSUNGSMASSNAHMEN – DER LASTFALL KLIMA ÄNDERUNG**

Die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels sind bereits heute bei der Planung neuer Hochwasserschutzmaßnahmen zu berücksichtigen. Daher wurden Anfang der 2000er Jahre sogenannte „Klimaänderungsfaktoren“ eingeführt. Diese erhöhen den aktuellen Bemessungswert um den Lastfall Klimaänderung.

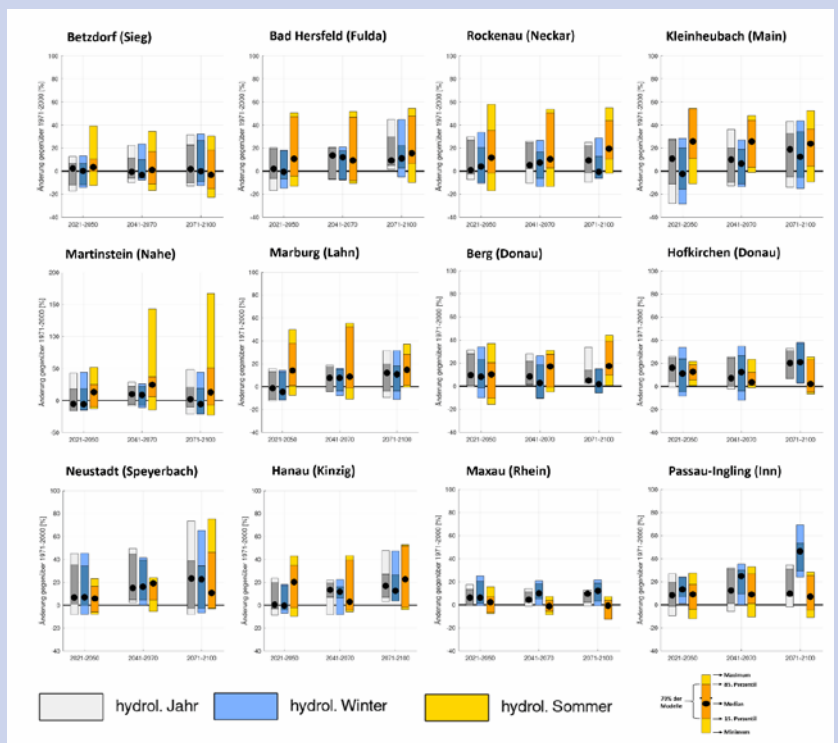
In Bayern wurde 2004 auf der Grundlage der ersten Untersuchungsergebnisse in KLIWA ein Klimaänderungsfaktor von pauschal 15 Prozent auf den statistischen Wert des HQ100 eingeführt. In Baden-Württemberg wurde ein regional differenzierter Klimaänderungsfaktor unterteilt nach Wiederkehrintervallen eingeführt, um die räumlich unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse zu berücksichtigen. In Rheinland-Pfalz richtet sich die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen nach den Randbedingungen des Einzelfalls. Dabei orientiert sich diese an der gefährdeten Bevölkerung, den Hochwasserschadenspotentialen sowie der Wirtschaftlichkeit.

Die bisherigen Erkenntnisse zur zukünftigen Veränderung der Hochwasserabflüsse und daraus abgeleiteter Anpassungsmaßnahmen werden derzeit mithilfe der Abflussprojektionen mit dem KLIWA-Ensemble evaluiert.



**KLIMAÄNDERUNGS-ZUSCHLAG**

Ein Zuschlag auf den heutigen Hochwasserabfluss bei der Bemessung von Hochwasserschutzanlagen berücksichtigt den möglichen Einfluss des Klimawandels. Der Freibord dient dazu, die Überströmung von Hochwasserschutzanlagen z.B. in Folge von Wellen- und Windstau zu verhindern.



Projizierte Änderung des mittleren Hochwasserabflusses MHQ im Vergleich zur Referenzperiode (1971-2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern.



# Mehr im Winter – Weniger im Sommer

## Mittlerer Abfluss

Durch den Klimawandel steigt die Lufttemperatur und damit einhergehend die potentielle Verdunstung. Zudem wird sich auch die saisonale Niederschlagsverteilung verändern. Untersuchungen zeigen außerdem, dass zukünftig ein größerer Anteil des sommerlichen Niederschlags als Starkregen und nicht in Form von sogenanntem Landregen fallen wird. Damit hat der Klimawandel direkte Auswirkungen auf die Wasserbilanz und somit auf den mittleren Abfluss (MQ). Der MQ ist eine statistische Größe des Wasserhaushalts und gibt den langjährigen durchschnittlichen Abfluss an einem Fließgewässer an. Er gibt also Auskunft über die durchschnittliche Wasserverfügbarkeit aus Fließgewässern für unterschiedliche Nutzungen wie z.B. Bewässerung, Schifffahrt oder für die Kühlwassernutzung.

### ZWEI STRATEGIEN: MESSWERTE UND MODELLERGEBNISSE

Um den Einfluss des Klimawandels auf den Abfluss abzuschätzen, werden in KLIWA zwei Strategien verfolgt: Aus Messdaten der Vergangenheit werden Trends für 116 Pegel, verteilt über das gesamte KLIWA-Gebiet, berechnet. Aus diesen Trends lassen sich vergangene Änderungen ableiten. Durch die regelmäßige Fortschreibung der Trenduntersuchungen (i.d.R. alle fünf Jahre), kann festgestellt werden, ob sich Trends verstärken oder abschwächen.

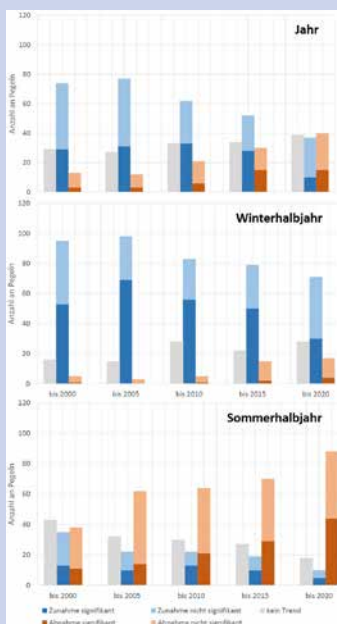
Da viele Anpassungsmaßnahmen wie der Bau von Rückhaltebecken oder Bescheide zur Entnahme von Oberflächenwasser für die Bewässerung auf einen längeren Planungshorizont ausgerichtet sind, werden in KLIWA Wasserhaushaltsmodelle verwendet. Damit ist es möglich, das zukünftige Abflussgeschehen im KLIWA-Gebiet bis ins Jahr 2100 an Hand eines Ensembles an Klimaprojektionen abzuschätzen.

### BEOBACHTETE TRENDS IM KLIWA-UNTERSUCHUNGSGEBIET

Für den Monitoringbericht 2021 wurde das Trendverhalten des MQ an 116 Pegeln von 1932 bis 2020 untersucht und den Trendauswertungen der bisher erschienenen Monitoringberichte gegenübergestellt. Beim Vergleich der Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume bis 2000, 2005, 2010, 2015 und 2020 deutet sich für das Gesamtjahr eine Trendumkehr an:

Waren bis 2015 noch mehrheitlich zunehmende Trends zu verzeichnen, so überwiegt aktuell geringfügig die Anzahl der Pegel mit negativen Trends d.h. der mittlere Abfluss hat insgesamt abgenommen.

Deutlicher wird der Einfluss des Klimawandels bei der Gegenüberstellung der sommerlichen und winterlichen Trendberechnungen. Im Winterhalbjahr nimmt der MQ für den Großteil der Pegel zu, wobei sich bei einigen wenigen Pegeln durchaus auch ein abnehmender Trend beobachten lässt. Im Sommerhalbjahr führt die Fortschreibung der ausgewerteten Zeitreihen bis zum Jahr 2020 hingegen zu einem eindeutigen Bild. Der sommerliche MQ nimmt ab.



Überblick über die Entwicklung des Trendverhaltens der mittleren Abflüsse ab 1932 über das hydrologische Jahr (oben), das hydrologische Winterhalbjahr (mitte) und das Sommerhalbjahr (unten) für die 116 Pegel des KLIWA-Gebietes.

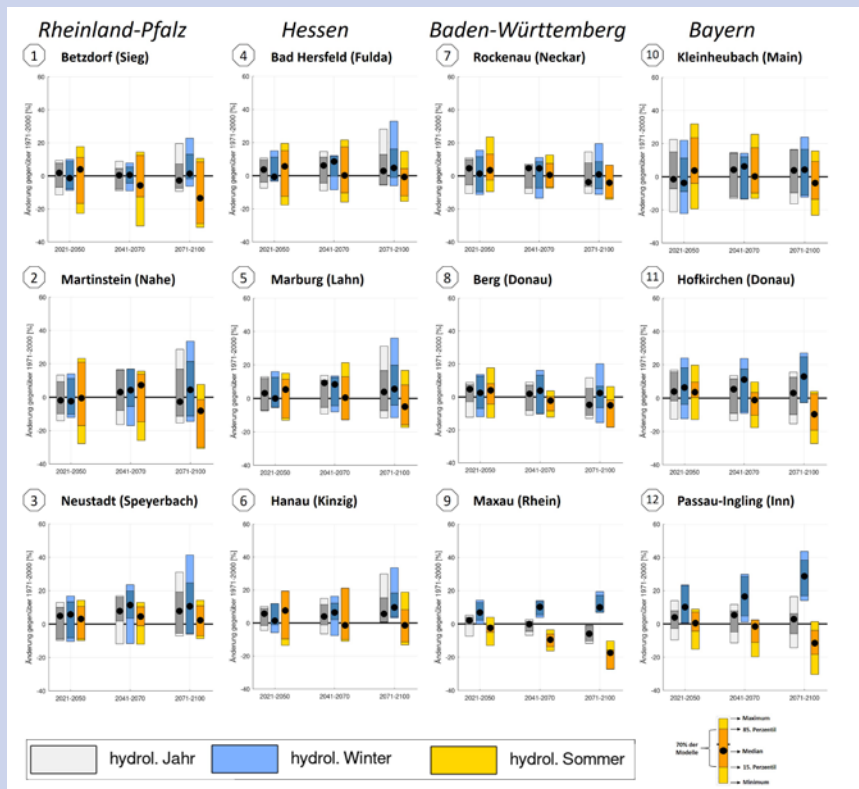


### WAS ZEIGT DIE ZUKUNFT?

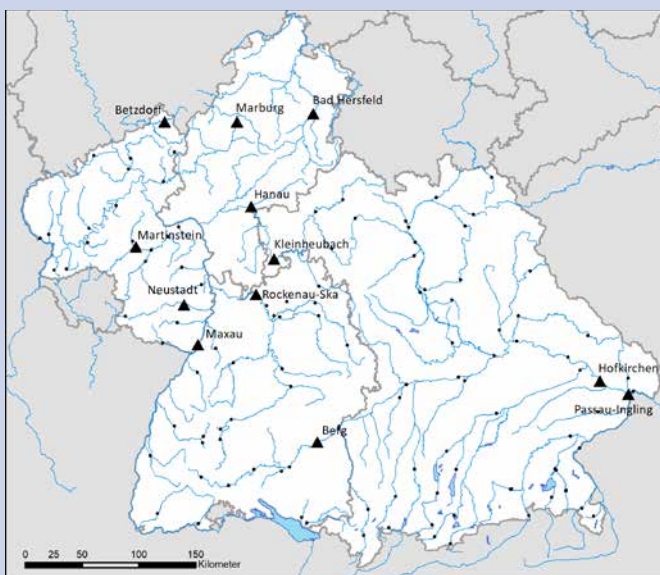
Es stellt sich die Frage, ob sich dieser Trend in Zukunft fortsetzen wird. Hierzu nutzt KLIWA ein auf dem RCP8.5-Szenario basierendes Ensemble aus regionalen Klimaprojektionen. Diese wurden als Antrieb für verschiedene Wasserhaushaltsmodelle verwendet um Abflussprojektionen bis zum Jahr 2100 zu simulieren. Die Abbildung zeigt an jeweils drei exemplarischen Pegeln für die drei KLIWA-Bundesländer und Hessen die Klimasignale für den jährlichen MQ sowie den MQ für das Winter- und Sommerhalbjahr. Die Signale beziehen sich jeweils auf die nahe (2021–2050), mittlere (2041–2070) und ferne (2071–2100) Zukunft im Vergleich zur Referenzperiode 1971 bis 2000.

Die einzelnen Abflussprojektionen des Ensembles zeigen eine große Bandbreite an potentiellen Klimasignalen – sie weisen dabei eine Streuung bis hin zu über 40 % auf. Dennoch ist zu erkennen, dass der Großteil der Pegel im Winterhalbjahr ein zunehmendes Signal und im Sommerhalbjahr ein abnehmendes Signal aufweist.

Die beiden nival, d. h. durch Schneeschmelze beeinflussten Pegel Maxau am Rhein und der Inn-Pegel bei Passau, weisen ein eindeutiges Signal für die beiden Halbjahre auf: Zunahmen des mittleren Abflusses im Winterhalbjahr und Abnahmen im Sommerhalbjahr. Auch die beiden Donauegel Berg und Hofkirchen zeigen im Median diese Charakteristik, wenn auch in abgeschwächter Form. In den weiter nördlich gelegenen pluvialen d.h. durch Regen geprägten Einzugsgebieten ist die projizierte Änderung des mittleren Abflusses insbesondere für den Zeitraum 2021–2050 weniger eindeutig und erst in der fernen Zukunft werden im Median Zunahmen des mittleren Abflusses im Winterhalbjahr und Abnahmen im Sommerhalbjahr projiziert.



Projizierte Änderung des mittleren Abflusses MQ im Vergleich zur Referenzperiode (1971–2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Rheinland-Pfalz, Hessen, Baden-Württemberg und Bayern.



Übersicht über die untersuchten Pegel zur Trendberechnung (Punkte und Dreiecke) und exemplarische Pegel für die Darstellung der Abflussprojektionen (Dreiecke)



# Eine zunehmende Gefahr! Starkregen & Bodenerosion

Konvektive Starkregenereignisse sind durch hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit gekennzeichnet. Sie haben häufig eine geringe räumliche Ausdehnung und stellen ein schwer zu kalkulierendes Risiko für die Entstehung von Sturzfluten und Bodenerosion dar. Mit dem Klimawandel und der damit einhergehenden Erwärmung steigt grundsätzlich das Potenzial für höhere Niederschlagsmengen und damit auch das Risiko für extremere Niederschlagsereignisse.



Sturzflut in Fischbach  
(Rheinland-Pfalz)

## WAS WIR ZU STARKNIEDERSCHLÄGEN WISSEN

Um langfristige Trends in Häufigkeit und Intensität bei Starkniederschlägen zu untersuchen und von der natürlichen Variabilität zu unterscheiden, werden möglichst langjährige, räumlich und zeitlich hochauflösende Messungen benötigt. In der Vergangenheit wurden viele (v. a. kurzzeitige und kleinräumige) Starkniederschläge durch das stationsbasierte Niederschlagsmessnetz nicht erfasst, und nur wenige Messstationen konnten Niederschläge in einer hohen zeitlichen Auflösung (Minuten bis Stunden) aufzeichnen. Daher ist die Datenbasis für eine historische Starkniederschlagsanalyse bisher deutlich schlechter als diejenige für Auswertungen auf der Grundlage von Tagesniederschlägen.

Die in Deutschland seit rund 20 Jahren flächendeckend vorliegenden Radardaten haben die Datenbasis für die Analyse von Starkregen jedoch verbessert. Sie zeigen beispielsweise, dass ein Großteil der Starkregenereignisse im Sommerhalbjahr auftritt und deren Anzahl von Jahr zu Jahr stark variiert. Aufgrund der geringen Länge der Zeitreihe können jedoch noch keine Trendaussagen getroffen werden. Vorläufige Ergebnisse deuten jedoch insgesamt auf eine Zunahme der sommerlichen Starkniederschläge in den letzten zwei Jahrzehnten hin. Inwieweit ein Starkregenereignis zu einem gravierenden Schaden führt, ist u.a. von dem Ort des Auftretens des Ereignisses abhängig und kann nicht aus der Anzahl an Ereignissen abgeleitet werden.

Um die zukünftige Entwicklung von Starkregenereignissen zu untersuchen wurde im Rahmen von KLIWA ein Ensemble von fünf konvektionserlaubenden Projektionen ausgewertet. Auf Grund ihrer hohen räumlichen Auflösung (Gitterweite < 4 km) können einzelne Gewitter und Schauer von den Modellen simuliert werden. Die Daten liegen in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde vor. Basierend auf dem Weiterwiesbisher-Szenario (RCP8.5) zeigt der Vergleich der Perioden 1971–2000 und 2071–2100: Extreme sommerliche einstündige Ereignisse (oberhalb des 99,99 Perzentils oder seltener als einmal im Jahr) werden in ihrer Intensität um 5 bis 30 % zunehmen. Dabei zeigen alle Projektionen diesen Anstieg der Intensität. Die Stärke des Anstiegs und die regionale Ausprägung unterscheidet sich jedoch deutlich zwischen den Mitgliedern des Ensembles. Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass zukünftig ein größerer Anteil des sommerlichen Niederschlags als Starkniederschlag fallen wird.

## STURZFLUTEN UND BODENEROSION

Das Risiko für Sturzfluten und Bodenerosion infolge von Starkniederschlägen ist aufgrund vieler weiterer Einflussfaktoren (Gelände- und Bodeneigenschaften, Bewirtschaftung und Versiegelung) lokal sehr unterschiedlich. Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sind jedoch die auslösenden Faktoren. Ändern sich diese in Zukunft, wird in der Regel auch eine Zunahme des Risikos für Sturzfluten und Bodenerosion und der damit verbundenen Gefährdungen erwartet. Beides verursacht langfristig ökologische und wirtschaftliche Schäden.



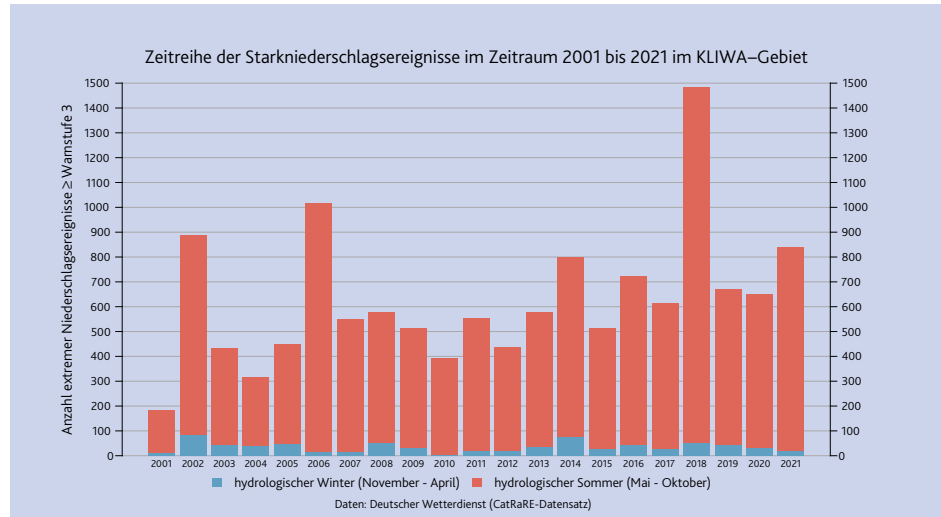
Auf den betroffenen Flächen geht fruchtbarer Boden verloren und Bodenfunktionen werden beeinträchtigt. Benachbarte Flächen und Bauwerke sind durch das angeschwemmte Bodenmaterial betroffen. An Bodenpartikel gebundene Nähr- und Schadstoffe gelangen in andere Ökosysteme, z. B. Gewässer.

**ANPASSUNG – WAS KÖNNEN KOMMUNEN TUN?**

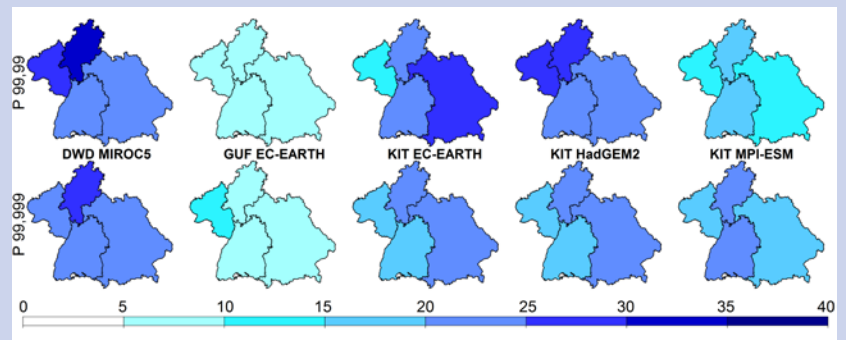
Da Starkniederschläge über Deutschland mit steigender Intensität zunehmend gleichverteilt sind, kann prinzipiell jede Gemeinde betroffen sein. Kommunen sollten daher mögliche Gefährdungen von Menschen sowie Schäden an Objekten in Betracht ziehen und geeignete Vorsorgemaßnahmen treffen. Dazu gibt es auf Länderebene verschiedene Aktivitäten.

In Bayern werden kommunale Konzepte zum Sturzflut-Risikomanagement gefördert, die den Kommunen Möglichkeiten zur Vorsorge, Vermeidung und Nachsorge aufzeigen. Außerdem gibt es ein umfassendes Informationsangebot auf der Seite [www.hochwasserinfo.bayern.de](http://www.hochwasserinfo.bayern.de), wo sich u.a. Bürgerinnen und Bürger sowie Gemeinden rund um das Thema Hochwasser und Sturzfluten informieren können.

Baden-Württemberg hat einen Leitfaden zum Kommunalen Starkregenrisikomanagement entwickelt. Damit stellt das Land den Kommunen ein einheitliches Verfahren zur Verfügung, um Gefahren und Risiken als Basis für ein kommunales Handlungskonzept zu analysieren. Mithilfe von Starkregengefahrenkarten können die Kommunen einschätzen, wo sich Oberflächenabfluss sammelt und wo er abfließt. Auf dieser Grundlage können Maßnahmen erarbeitet werden, um mögliche Schäden im Ernstfall so weit wie möglich zu vermeiden. Im Fokus stehen dabei öffentliche Einrichtungen, Infrastruktur, Wohnsiedlungen, Gewerbe- und Industrieflächen sowie die Information der Öffentlichkeit und aller Beteiligten über die Starkregengefahr.



Anzahl der Starkregeneignisse der DWD Warnstufe 3 oder größer im KLIWA Gebiet inklusive Hessen. Ereignisse im hydrologischen Sommer sind rot und im hydrologischen Winter blau eingefärbt (DWD Kataloge der Starkregeneignisse - CatRaRE)



Prozentuale Änderung der Intensität der einstündigen Ereignisse in den Monaten Juni, Juli und August im Projektionszeitraum 2071-2100 gegenüber dem Referenzzeitraum 1971-2000. Die obere Reihe zeigt das 99,99 Perzentil der sommerlichen Niederschläge, das in etwa einem jährlichen Ereignis entspricht. Die untere Reihe zeigt das 99,999 Perzentil, das in etwa einem Ereignis alle 10 Jahre entspricht. Die Spalten zeigen die fünf verschiedenen Modellkombinationen des hochaufgelösten Ensembles.

Das Land Rheinland-Pfalz fördert die Erstellung örtlicher Hochwasser- und Starkregenvorsorgekonzepte und stellt dazu neben den Hochwassergefahren- und -risikokarten sogenannte „Starkregengefährdungskarten“ (Gefährdungsanalyse Sturzfluten nach Starkregen) zur Verfügung. Bei der Konzepterstellung werden in einem Beteiligungsprozess ortsspezifische Vorsorgelösungen gesucht und die Eigenvorsorge aller Beteiligten gestärkt.



# Auswirkungen auf die Gewässerqualität Gewässerökosysteme

Wenn sich das Klima verändert, dann wirkt sich das auch auf die Gewässer mit ihren Tieren und Pflanzen aus. Steigende Temperaturen und sinkende Wasserstände belasten die aquatischen Lebensgemeinschaften in vielfältiger und komplexer Weise. Vor allem der Lebensraumverlust, die Beeinträchtigung des Sauerstoffhaushalts und veränderte Mischungsverhältnisse infolge von Einleitungen können in der Folge zu Verschiebungen im Funktionsgefüge bis hin zu Artensterben führen. Was sich bereits verändert hat und was in der Zukunft zu erwarten ist, wird auf der Basis von Modellierungen der physikalischen Umweltbedingungen in Zusammenhang mit Langzeitbeobachtungen der Lebensgemeinschaften untersucht.



Männchen der gebänderten Prachtlibelle (*Calopteryx splendens*) mit einer erbeuteten, frisch geschlüpften Maifliege (*Ephemera danica*).



Äschen (*Thymallus thymallus*) vor der Paarung.

Die Lebenszyklen vieler aquatischer Insektenlarven und Fischarten sind an hohe Sauerstoffkonzentrationen und niedrige Wassertemperaturen angepasst. Sie werden von den Auswirkungen des Klimawandels besonders betroffen sein und eignen sich daher auch als Indikatoren für klimabedingte Umweltveränderungen.

## AUSWIRKUNGEN AUF DIE GEWÄSSER-ÖKOLOGIE

Der Klimawandel verändert in Fließgewässern und Seen grundlegende Umweltfaktoren wie etwa die Wassertemperatur und den Abfluss, den Eintrag von Feinsedimenten, die Konzentration von Nähr- und Schadstoffen oder das Schichtungsverhalten von Seen. Dadurch wird eine Vielzahl komplexer Prozesse in Gang gesetzt, die sich letztlich auf die Pflanzen und Tiere in den Gewässern direkt und indirekt auswirken können: Manche Arten werden seltener oder verschwinden, andere Arten erweitern ihr Verbreitungsgebiet oder vermehren sich stark (z. B. Plankton), gebietsfremde Arten wandern ein.

Die Lebensgemeinschaften der Gewässer und die Funktionsweise des aquatischen Naturhaushalts werden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit verändern. Da insbesondere die Wassertemperatur maßgeblich eine Vielzahl von biologischen und physikalisch-chemischen Prozessen im Gewässer steuert, wie z. B. Stoffwechselraten von Gewässerorganismen, kommt ihr eine entscheidende Bedeutung zu. Während der Einfluss des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Süddeutschland bereits flächendeckend modelliert wird, sind Veränderungen der Gewässerbiologie bisher nur in Teilgebieten bekannt. So ist bei einzelnen Fließgewässertypen, die an kühlere Umweltbedingungen angepasst sind, bereits eine Tendenz zur Verschiebung des Lebensraums in Richtung der kälteren Oberläufe belegt worden.

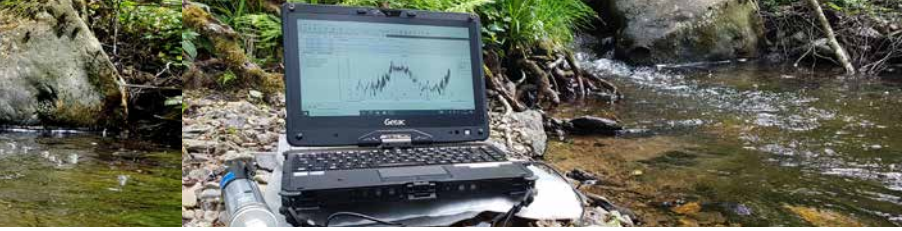
## MONITORING POTENZIELLER FOLGEN DES KLIMAWANDELS

Um den klimawandelbedingten Anstieg der Wassertemperatur und die damit verbundenen potenziellen Folgen für gewässerökologische Prozesse und Besiedlungsmuster aquatischer Organismen wissenschaftlich erfassen und bewerten zu können, startete 2018 ein langfristig angelegtes gewässerökologisches Klimafolgenmonitoring. Im Fokus stehen möglichst anthropogen unbeeinflusste Gewässer in Süddeutschland. Das Messnetz umfasst insgesamt 54 Messstellen in Fließgewässern und 9 Messstellen in Seen in den drei KLIWA-Ländern und Hessen.

In den Fließgewässern werden neben der kontinuierlichen Messung der Wassertemperatur und des Abflusses regelmäßig Daten zu den Lebensgemeinschaften erhoben. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den aquatischen Wirbellosen (Makrozoobenthos) und den Fischen, die auch für die ökologische Bewertung von Gewässern eine große Bedeutung haben. Ergänzt wird dieses Messprogramm durch monatliche Erhebungen eines abgestimmten Sets an chemisch-physikalischen Parametern.

In Seen werden ebenfalls biologische Daten erhoben (hier v. a. Phyto- und Zooplankton) und mit den physikalisch-chemischen Randbedingungen in Beziehung gesetzt. Dabei gilt es auch die vertikale Dimension zu berücksichtigen, weshalb Tiefenprofile zur Erfassung des Schichtungsverhaltens eine große Rolle spielen. Dazu dienen kontinuierliche Messungen der Wassertemperatur und des Sauerstoffgehaltes in verschiedenen Gewässertiefen.





Außerdem sind aufgrund der größeren Abhängigkeit von den meteorologischen Bedingungen entsprechende Begleitparameter, wie z. B. Globalstrahlung, Windstärke und -richtung und Lufttemperatur, von besonderem Interesse.

Mit diesem Klimafolgenmonitoring wird die Datenbasis erarbeitet, um langfristig potenzielle, durch den Klimawandel hervorgerufene Effekte auf gewässerökologische Zusammenhänge zu erfassen, Zukunftsprognosen zu ermöglichen und ziel- und lösungsorientierte Handlungsoptionen auf regionaler Ebene ableiten zu können. Dazu wurde beispielsweise im Projekt „2-Grad-Ziel für unsere Gewässer – Ufervegetation und Beschattung“ das Abkühlungspotenzial von Ufergehölzen für verschiedene Gewässergrößen quantifiziert und unter der Berücksichtigung von Gewässerstrukturdaten und verschiedener Handlungsszenarien flächendeckend simuliert.

**KLIMAWANDELINDIKATOREN FÜR DIE GEWÄSSERQUALITÄT**

Eine gute Datenbasis ist allerdings nur der erste Schritt. Denn: Wie müssen Daten ausgewertet werden, um den Einfluss des Klimawandels von anderen Einflüssen auf die Gewässer zu unterscheiden? Hier braucht es neue Indikatoren. Ein Indikator für die Fließgewässer wurde in KLIWA bereits erarbeitet.

Der KLIWA-IndexMZB wurde entwickelt, um die Veränderungen in der Artenzusammensetzung bei den Kleinlebewesen der Gewässersohle (Makrozoobenthos) „messbar“ zu machen. Solche Veränderungen – hin zu Arten, die höhere Temperaturen und geringere Sauerstoffgehalte tolerieren – sind zu erwarten, da der Klimawandel vor allem im Sommer durch erhöhte Wassertemperaturen und verminderte Fließgeschwindigkeiten eine Verschlechterung der Atmungsbedingungen bewirken wird.



**BERGBÄCHE SIND EMPFINDLICH**

Die Oberläufe unserer Bergbäche, wie die Alb in Baden-Württemberg weisen hohe Strömungs- und Substratvielfalt auf. Sie sind kalt und gut mit Sauerstoff versorgt. Ihre artenreiche Wirbellosenfauna könnte besonders empfindlich auf Klimaveränderungen reagieren.

Oberlauf der Alb (BW); Fließgewässer des Klimafolgenmonitorings (Foto LUBW)



**MONITORING POTENZIELLER FOLGEN DES KLIMAWANDELS**

Die Messstellen für das gewässerökologische Klimafolgenmonitoring sind bei den beteiligten KLIWA-Partnern so verteilt, dass möglichst naturbelassene Abschnitte von unterschiedlichen Gewässertypen im Monitoring berücksichtigt werden.

# Heiße Sommer, warme Flüsse und Seen?

## Gewässertemperatur

Die Gewässertemperatur ist ein zentraler Güteparameter. Sie steuert alle biologischen und chemischen Prozesse im Gewässer. Sie beeinflusst auch die Nutzungsmöglichkeiten durch uns Menschen in vielfältiger Form. Sei es die Nutzung als Erholungsraum, Nahrungsquelle oder als Mittel zur Kühlung von Kraftwerken und Industrieanlagen. Wird die Luft wärmer, so erwärmen sich auch die Bäche, Flüsse und Seen.



*Dichte Beschattung am Ufer vermindert die Erwärmung von Gewässern durch Sonneneinstrahlung*

### DIE TIER UND PFLANZENWELT SIND TEMPERATURABHÄNGIG

Die Wassertemperatur beeinflusst maßgeblich eine Vielzahl von biologischen und physikalisch-chemischen Prozessen im Gewässer und steuert die Geschwindigkeit des Stoffwechsels. Somit wirkt sie sich direkt auf alle im Wasser lebenden Organismen aus und ist unter anderem relevant für die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaften, für die Photosyntheseleistung, die Sterblichkeit von Fischen, die gewässerinternen Stoffumsatzraten sowie die Löslichkeit von Gasen und die Toxizität von zahlreichen Umweltchemikalien. Insbesondere für Fische gibt es je nach Region unterschiedliche Orientierungswerte für die tolerable Gewässertemperatur, die in der Oberflächengewässerverordnung (OGewV) festgeschrieben sind. Mögliche Überschreitungen dieser Werte können zu einer zunehmenden Gefährdung der Fischlebensgemeinschaften führen.

### AUCH IM WASSER WIRD ES WÄRMER

In ersten Untersuchungen für Bayern wurden Wassertemperaturmessungen seit 1951–2015 untersucht. Dabei wurde seit 1980 ein Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur um etwa 0,5 °C pro Dekade ermittelt. Räumliche Unterschiede sind dabei nicht zu erkennen. In den Sommermonaten von Mai bis August tritt dieser Trend besonders deutlich hervor. Auch im Rhein zeigt sich bei vergleichbaren Untersuchungen eine Häufung der sommerlichen Maximalwerte von über 25 °C. In der vergangenen Dekade erreichten die Wassertemperaturen dabei Tagesmittelwerte von über 28 °C und Tagesmaxima von über 29 °C.

Für den größten Teil der Gewässererwärmung sind saisonale und regionale klimatische Einflüsse verantwortlich. Allerdings ist einzuschränken, dass auch menschliche Eingriffe die Erwärmung zusätzlich verstärken, zum Beispiel Wärmeableitungen, das Errichten von Staustufen oder fehlende Beschattung durch Ufervegetation. Eine Trennung der Ursachen und Einflussgrößen ist im Einzelfall daher nur eingeschränkt möglich. Eine grundsätzliche Erhöhung der Durchschnittstemperatur in Fließgewässern verringert unmittelbar die aus ökologischen Gründen zulässige Aufwärmung des Gewässers durch weitere Nutzungen. An extrem heißen Sommertagen muss bereits aufgrund klimabedingter erhöhter Wassertemperaturen die Einleitung erwärmter Abwässer reduziert werden, mit direkten ökonomischen Folgen.

### SETZT SICH DIE ERWÄRMUNG FORT?

Zur Ableitung von Aussagen für die Zukunft ist die Modellierung der weiteren Temperaturentwicklung in den Gewässern von großem Interesse. Allerdings müssen neben dem Abfluss viele weitere Faktoren berücksichtigt werden, die diese Modellierung zusätzlich erschweren. Während in Bayern ein statistischer Ansatz mit ersten Ergebnissen vorliegt, verfolgen Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz eine physikalisch basierte Modellierung mit Wasserhaushalts-Wärmodellen. Die Verknüpfung mit Klimaprojektionen erlaubt in beiden Ansätzen erste Aussagen, wie sehr sich der Klimawandel auf die Gewässertemperatur zukünftig auswirkt. Sie stellt eine wichtige Grundlage für die weitere Betrachtung der Veränderungen in der Gewässerökologie und für die Ableitung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien dar.

# Zusammenfassung

## Ausblick

In Zukunft müssen wir mit weiteren Klimaveränderungen im Wasserhaushalt rechnen. Diese treten in Form von sich verändernden Niederschlagsregimen und in der zunehmenden Häufung und Intensivierung von Extremereignissen (Trockenperioden/Niedrigwasser und Starkregen/Flusshochwasser) in Erscheinung. Der regionale Wasserkreislauf und damit auch der Wasserhaushalt unserer Flussgebiete wird nachhaltig verändert. Aus diesem Grund stellt sich KLIWA seit 2022 organisatorisch neu auf.

Die Extremereignisse im 21. Jahrhundert nehmen zu: Trockensommer, zuletzt 2015, 2018 und 2022, Starkregensommer 2016, 2018 und die Hochwasserereignisse 2021 in Rheinland-Pfalz und Nordrhein-Westfalen. Der Klimawandel führt zu häufigerem und intensiverem Auftreten von Extremereignissen in Süddeutschland.

Der Klimawandel hat bereits heute weitreichende Folgen für die Wasserwirtschaft, denn ein veränderter Wasserhaushalt wirkt sich auf die verschiedensten Gewässernutzungen aus – sei es die direkte Entnahme zur Trinkwasserversorgung und zur landwirtschaftlichen Bewässerung, die Nutzung als Kühlwasser für die Kraftwerke der Energiewirtschaft, als Verkehrswege für die Schifffahrt oder die vielfältigen Freizeitnutzungen. Damit verknüpft ist die Frage nach den Auswirkungen auf die Gewässergüte und den ökologischen Zustand unserer Gewässer.

Um geeignete regionale Anpassungsmaßnahmen für die Wasserwirtschaft ergreifen zu können liefert KLIWA seit 1999 wertvolle Grundlagen. Dabei stand zunächst die Untersuchung der Veränderung von Hochwasserereignissen im Fokus, mittlerweile sind auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse, das Grundwasser, auf Starkregen und Trockenheit sowie die Gewässerökologie in den Mittelpunkt der Untersuchungen gerückt.

Das KLIWA-Monitoring liefert die Grundlagen für bereits erfolgte Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts. Im Monitoringbericht 2021 sind die zentralen Veränderungen zwischen 1931 und 2020 festgehalten worden. Dabei zeigt sich, dass durch die jüngste Erweiterung des Datenzeitraums bis 2020 die Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt immer deutlicher ausfallen.

Mit der Anwendung von in die Zukunft gerichteten Klimaprojektionen basierend auf dem KLIWA-Ensemble werden Aussagen zur künftigen Entwicklung des Klimas und des Wasserhaushalts in Süddeutschland geschärft. Den Ensemble-Ansatz wird KLIWA auch in Zukunft weiterverfolgen.

Im Bereich Gewässerökologie wurden und werden wegweisende Grundlagen gelegt. Sei es beim einheitlichen gewässerökologischen Klimafolgenmonitoring, der Entwicklung des KLIWA-Index MZB oder Forschungsthemen zur Beschattung von Gewässern und damit einhergehenden Entwicklungen der Gewässertemperaturen.

KLIWA wird in Zukunft seine Schwerpunkte zunehmend auf die wasserwirtschaftlichen Extreme legen. Die ermittelten Grundlagen können hierbei wertvolle Erkenntnisse für das Niedrigwassermanagement, die Wasserversorgung oder das Starkregenmanagement der Bundesländer liefern. Ein erklärtes Ziel ist auch die Bewertung, Begleitung, Hilfestellung und Kommunikation hinsichtlich der Auswahl und des Einsatzes von Anpassungsmaßnahmen in den Wasserwirtschaftsverwaltungen.

In seinen vier Bereichen ‚Monitoring‘, ‚Szenariorechnungen‘, ‚Anpassung‘ und ‚Kommunikation‘ nutzt KLIWA sowohl die Synergien zwischen den einzelnen Bundesländern als auch den einzelnen Disziplinen selbst und fungiert zudem als anwendungsbezogene Schnittstelle zu der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser – LAWA.

Doch neben regionalen Maßnahmen, die den Klimawandel in seinen Auswirkungen abzufedern versuchen, sind Schritte hin zu einem aktiven Klimaschutz ebenfalls wichtig. Die Senkung des Treibhausgasausstoßes steht dabei an erster Stelle. Da sich aufgrund der Trägheit des Klimasystems selbst bei einem (fiktiven) sofortigen Emissionsstopp der Temperaturanstieg zunächst noch jahrelang fortsetzen wird, müssen bereits heute größte Anstrengungen unternommen werden, damit die Ziele des Pariser Klimaabkommens noch erreicht werden können.

# KLIWA 2022

