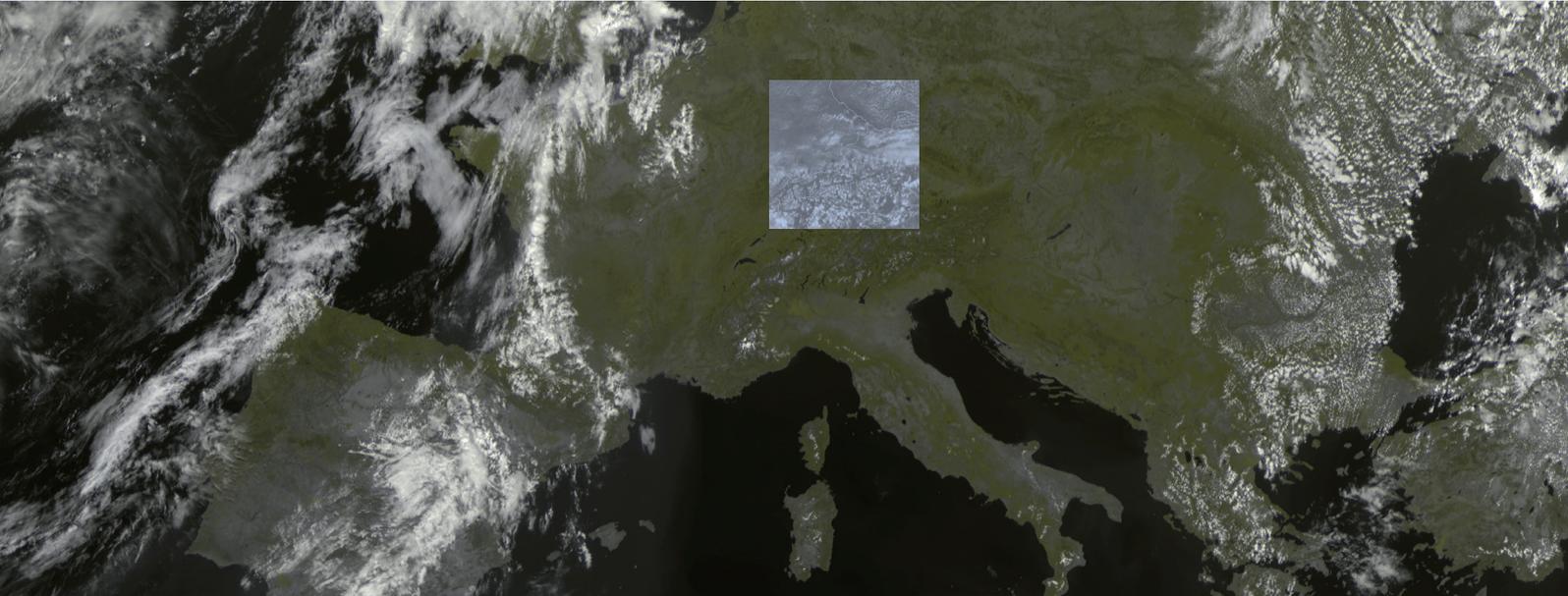


# Klimawandel im Süden Deutschlands

## Herausforderungen – Anpassungen



### FOLGEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,  
ENERGIE, ERNÄHRUNG  
UND FORSTEN

Deutscher Wetterdienst  
Wetter und Klima aus einer Hand



## INHALT

<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>14</b>
<b>7</b>	<b>HOCHWASSER</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>STARKREGEN</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>GEWÄSSERÖKOSYSTEME</b>	<b>20</b>
<b>10</b>	<b>GEWÄSSERTEMPERATUR / AUSBLICK</b>	<b>22/23</b>

### IMPRESSUM/HERAUSGEBER

**LUBW Landesanstalt für Umwelt,  
Messungen und Naturschutz  
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 Umwelt, Energie,  
Ernährung und Forsten  
Rheinland-Pfalz**

**Deutscher Wetterdienst**

Frankfurter Straße 135, 63067 Offenbach

**Konzept und Realisation**

ÖkoMedia GmbH, Stuttgart

**Bildnachweis:**

- S. 1: Deutscher Wetterdienst/  
EUMETSAT, © Hennegriff (LUBW)
- S. 3: © Hennegriff (LUBW)
- S. 4/5: © ÖkoMedia, © Hennegriff  
(LUBW), RP Tübingen
- S. 6/7: © Hennegriff (LUBW), fotolia
- S. 8/9: Retro Stöckli, NASA
- S. 10/11: © Siegfried Springer/pixelio.de  
© Hennegriff (LUBW), RP Tübingen
- S. 12/13: © Hennegriff (LUBW), © Huber/  
pixelio.de, WWA Rosenheim
- S. 14/15: © Hennegriff (LUBW), LUBW
- S. 16/17: RP Tübingen, © Hennegriff (LUBW)  
LfU Rheinland-Pfalz
- S. 18/19: © Foltyn (LfU Bayern), RP Tübingen,  
© Hennegriff (LUBW)
- S. 20/21: © Hennegriff (LUBW),  
Fischereiforschungsstelle Baden-  
Württemberg, Kerbtalgew-Fischer
- S. 22/23: © Foltyn (LfU Bayern), © Hennegriff  
(LUBW)

**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.mueef.rlp.de](http://www.mueef.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: Mai 2017**

Diese Broschüre ist klimaneutral gedruckt



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Verbraucherschutz



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR UMWELT,  
ENERGIE, ERNÄHRUNG  
UND FORSTEN

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.

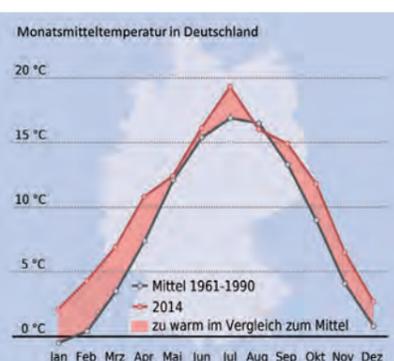
Infolge des Klimawandels mit seinen regionalen Auswirkungen müssen wir uns auf eine Zunahme extremer Wetterereignisse einstellen. Aller Voraussicht nach wird es in Zukunft mehr Starkregenereignisse geben, aber auch mehr Hitzeperioden und Trockenphasen. Für die Wasserwirtschaft heißt das, die möglichen 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 richtig 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

Am 4. November 2016 trat der internationale Klimavertrag, der auf der Weltklimakonferenz in Paris im Dezember 2015 ausgehandelt wurde, in Kraft. Damit verpflichtet sich die Staatengemeinschaft die globale Erwärmung auf deutlich unter 2°C, möglichst 1,5°C, zu begrenzen. Dies ist ein ehrgeiziges Ziel und bedarf großer Anstrengung im Bereich der Vermeidung von Treibhausgasemissionen.



2014 war in Deutschland das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Bis auf den August wiesen alle Monate zum Teil deutlich höhere Mitteltemperaturen auf als während der internationalen Referenzperiode 1961–1990.  
© DWD:Elke Roskamp.

## DER KLIMAWANDEL IST AKUT

Das Erdklima war im Laufe der Jahrtausende schon immer natürlichen Schwankungen unterworfen. Mal war Europa tropisch, mal lasteten mächtige Eispalmen auf dem Kontinent. Sedimentbohrkerne und Pollenanalysen geben Aufschluss über die frühen erdgeschichtlichen Klimaschwankungen der Erde. Seit 1860 werden Wetterdaten regelmäßig erfasst. Deren Auswertung zeigt, dass sich in den letzten 155 Jahren die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1°C erhöht hat und in Deutschland sogar um 1,3°C seit 1881. In den letzten Jahren sind extreme Wetterereignisse aufgetreten: das Jahrhunderthochwasser 2013, der extreme Trockensommer 2015 und zuletzt die Sturzfluten im Frühsommer 2016. Zufall oder Klimawandel? In jedem Fall ist Anpassung an den bereits stattfindenden Klimawandel notwendig und Vorsorge, soweit möglich auch gegen Extremereignisse.

## TREIBHAUS ERDE

Die angenehme globale Durchschnittstemperatur von +15°C haben wir dem natürlichen Treibhauseffekt zu verdanken: Die in der Erdatmosphäre vorkommenden Spurengase Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan wirken wie die Glasscheiben eines Gewächshauses. Sie lassen die kurzwelligen Sonnenstrahlen durch und halten die 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 405 ppm gemessen.

Dieser zusätzliche vom Menschen verursachte anthropogene Treibhauseffekt beeinflusst den Wasserkreislauf global, aber auch regional. Dies erfordert regionale Anpassungsmaßnahmen.

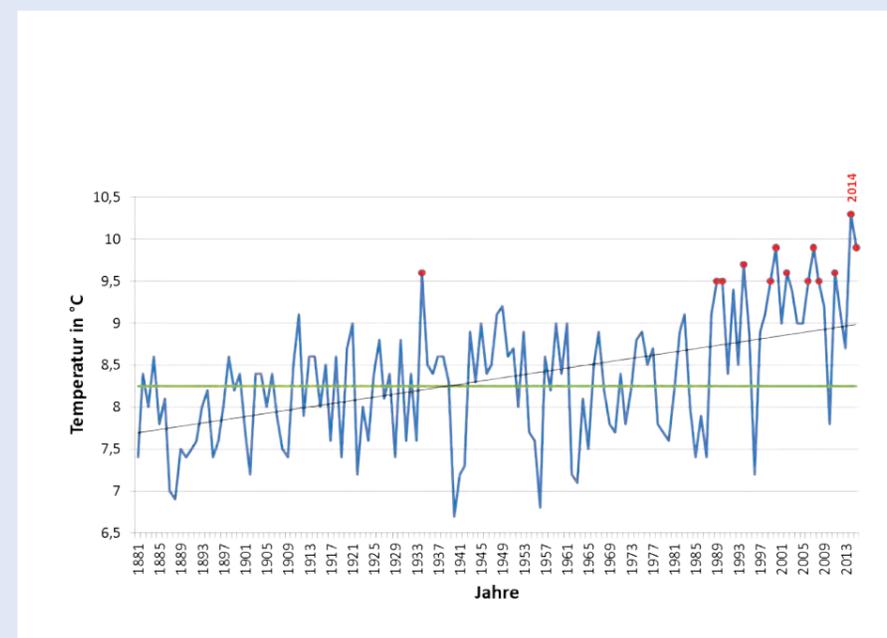
## KOOPERATION KLIWA

Sind die extremen Wetterlagen und Hochwasserereignisse in Süddeutschland der letzten Jahrzehnte bereits deutliche Vorboten des Klimawandels? Wie wird sich das Klima regional 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 KLIWA ins Leben gerufen. Ziel dieser länder- und fachübergreifenden Zusammenarbeit ist es, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die Ökologie der Flussgebiete im Süden Deutschlands aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.

Langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten sind Voraussetzung für Untersuchungen zum Klimawandel – je länger umso besser. Diese Messdaten zeigen Entwicklungen des Klimas für die Vergangenheit auf. Darauf aufbauend wird das zukünftige Klima mit sogenannten regionalen Klimaprojektionen abgeschätzt. Diese Klimadaten sind Grundlage für die Simulationen des zukünftigen Wasserhaushalts von Flussgebieten. Die bisherigen KLIWA-Untersuchungen befassen sich mit den Themen Hochwasser, Niedrigwasser, Grundwasser, Bodenerosion und Gewässerökologie. Anhand von detektierten Veränderungen werden konkrete Anpassungsempfehlungen abgeleitet.

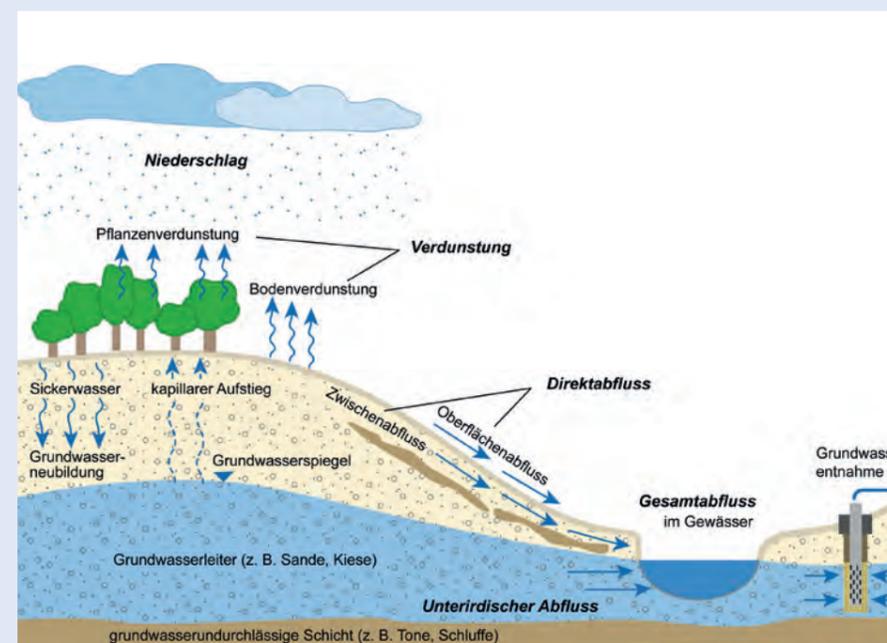
## TEMPERATURVERLAUF IN DEUTSCHLAND VON 1881 BIS 2015

Die Grafik zeigt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur der Bezugsperiode 1961-1990. Das Mittel 1961-1990 ist in grün dargestellt und der lineare Trend über die Gesamtreihe in schwarz. Es ist eine deutliche Klimaerwärmung zu sehen, die sich in den letzten Jahrzehnten spürbar beschleunigt hat. Die zehn höchsten Jahresmittelwerte seit Beginn flächendeckender Messungen 1881 sind rot markiert (derselbe Mittelwert kann mehrmals auftreten). Es ist eine deutliche Häufung der warmen Jahre im 21. Jahrhundert zu sehen.



## DER KREISLAUF DES WASSERS

Die Erdoberfläche ist zu zwei Dritteln mit Wasser bedeckt. Ein Teil des Wassers 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.



# Klimamonitoring in KLIWA Regionale Veränderungen

Um die bisherige Klimaentwicklung einschätzen zu können, werden zuerst die verfügbaren Messdaten für die Vergangenheit untersucht. Aus den langjährigen Messreihen lassen sich die natürliche Schwankungsbreite der Wetterdaten bestimmen und auch Trends erkennen. Für KLIWA wurden rd. 200 Temperatur- sowie 900 Niederschlagsstationen im Süden Deutschlands ausgewertet und einheitlich regionalisiert, um eine fundierte Datengrundlage für die weitere Klimaentwicklung zu haben.



Das Schmelzen der Gletscher wird den Wasserhaushalt massiv beeinflussen. © fotolia.com

## ES IST WÄRMER GEWORDEN

Der globale Erwärmungstrend ist auch in Süddeutschland zu beobachten. In den Jahren 1931 bis 2015 ist die Durchschnittstemperatur in den KLIWA Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz im Mittel um 1,3°C gestiegen. Seit 2001 lagen hier insgesamt 14 von 15 Jahren über dem langjährigen Mittel der Jahrestemperatur des Zeitraums 1961-1990. 2014 war das bisher wärmste Jahr seit Beginn der Messungen 1881, die Temperaturen lagen in diesem Jahr im Schnitt ca. +2°C über dem langjährigen Mittel. Damit hat sich der Erwärmungstrend noch weiterverstärkt. Insgesamt war seit 1931 die Erwärmung im Winterhalbjahr (November bis April) stärker ausgeprägt als im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober). In den letzten 15 Jahren lag jedoch der Schwerpunkt der weiteren Erwärmung im Sommer.

## TROCKENE SOMMER, VERREGNETE WINTER

Die jährliche Niederschlagsmenge ist in den meisten süddeutschen Gebieten im Untersuchungszeitraum etwa gleich geblieben. Verändert hat sich aber die saisonale Niederschlagsverteilung. Das Winterhalbjahr ist feuchter geworden. Die Niederschläge haben in den Jahren von 1931-2015 in manchen Regionen um 16-27% zugenommen. Besonders betroffen sind in Baden-Württemberg der Schwarzwald und der Nordosten, in Bayern Franken und Teile des Bayerischen Waldes sowie in Rheinland-Pfalz die Eifel und der Westerwald. Das Sommerhalbjahr ist in seinem Langzeitverhalten uneinheitlich, aber überwiegend tendenziell trockener geworden.

## MEHR STARKNIEDERSCHLÄGE IM WINTER

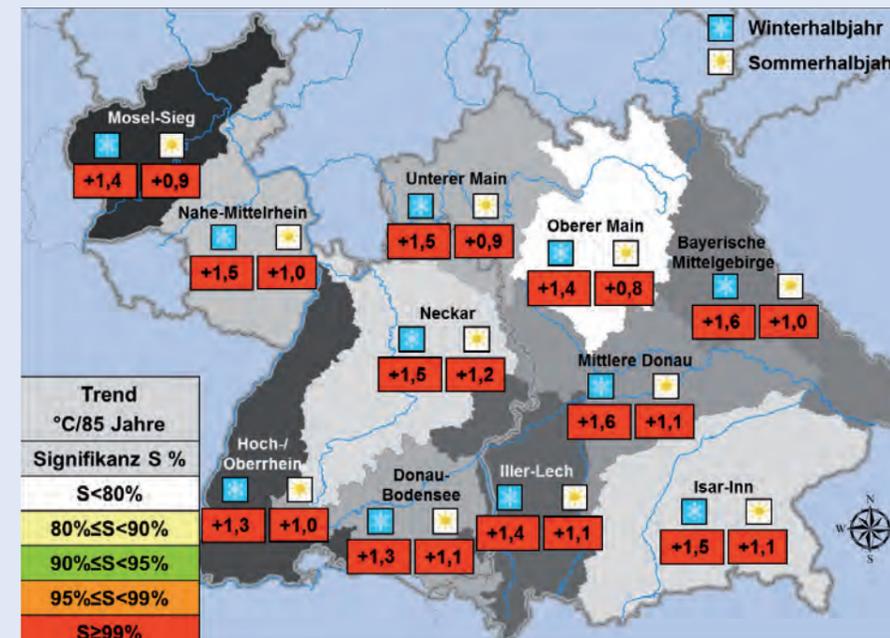
In KLIWA werden auch die Trends der maximalen eintägigen Starkniederschläge untersucht. Diese sind aufgrund ihres kleinräumigeren Auftretens naturgemäß uneinheitlicher als für den Gebietsniederschlag. Im hydrologischen Winterhalbjahr findet man im Zeitraum 1931-2015 allerdings in fast ganz Süddeutschland regional klare 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 Vergleichsbeobachtungen. Dazu wird alle 5 Jahre ein Monitoringbericht (letzte Aktualisierung 2016) unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht.

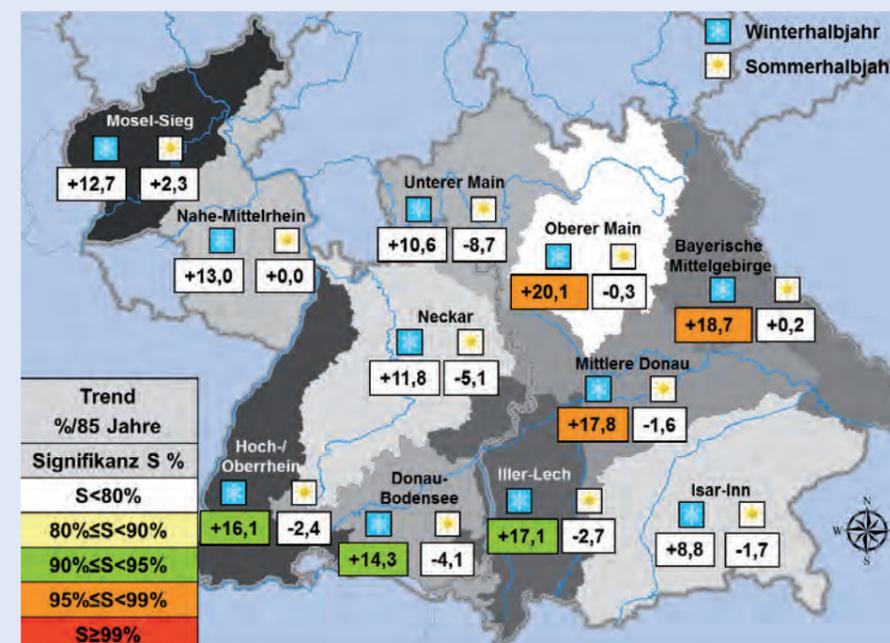
## ZUNAHME DER LUFTTEMPERATUR IM ZEITRAUM 1931 BIS 2015

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren. Die Zunahmen sind im Winter mit +1,3 bis 1,6°C stärker als im Sommer mit +0,8 bis 1,2°C.



## ÄNDERUNG DER GEBIETSNIEDERSCHLÄGE IM ZEITRAUM 1931 BIS 2015

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsniederschläge in den hydrologischen Halbjahren. Es zeigen sich deutliche jahreszeitliche Unterschiede: Im Sommer sind die Veränderungen uneinheitlich, im Winter zeigen sich generell Zunahmen von +9 bis 20%. In den letzten 15 Jahren schwächten sich die Trends für den Winter ab, während im Sommer sich vermehrt steigende Niederschläge zeigten.

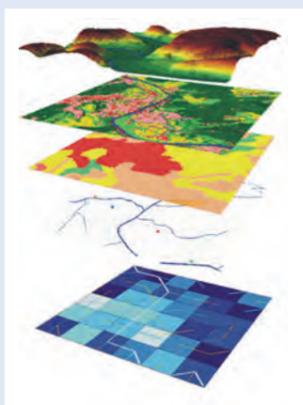


# Zukünftige Entwicklungen modellieren Instrumente der Klimaforschung

Es gibt keine Zweifel mehr, der globale Klimawandel schreitet fort. Denn schon das heute in die Atmosphäre abgegebene Kohlendioxid wird dort noch mehrere Jahrzehnte wirksam sein und zur weiteren Erwärmung führen. Daher sind Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Mit globalen und regionalen Klimaprojektionen allein können noch keine Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft getroffen werden. Nur mit hoch aufgelösten Wasserhaushaltsmodellen, angetrieben durch regionale Klimamodelle, lassen sich die Änderungen im Abflussverhalten ermitteln, insbesondere die Veränderung der Hoch- oder Niedrigwassersituation.

## 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 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 Wochen bis mehreren Monaten und das Klima die Zeitspanne von Jahrzehnten bis hin zu geologischen Zeitaltern.

Wettervorhersagen sind oft schwierig und mit den heutigen Mitteln 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. Globale Klimamodelle basieren jeweils auf einem atmosphärischen Modell, das durch ein Ozean-, ein Schnee- und Eis- sowie ein Vegetationsmodell ergänzt wird. Die anthropogenen Einflüsse (der „Faktor Mensch“) werden dabei durch die verschiedenen Annahmen zur Freisetzung von Treibhausgasen (SRES-Szenarien) bzw. in der neuesten Klimamodellgeneration durch Strahlungsantriebe (RCP-Szenarien) berücksichtigt.

Die Rasterweite eines globalen Klimamodells (~200 km) ist für eine regionale Klimaabschätzung zu grob. Regionale Besonderheiten wie Gebirgszüge oder Flusstäler sind nur durch regionale Klimaprojektionen (~10 km) zu erfassen. Die Untersuchungen mit SRES-Szenarien sind inzwischen abgeschlossen. Bei den neuen RCP-Szenarien beginnen die Auswertungen gerade und werden auch Aufgabe der nächsten Jahre in KLIWA sein. Um konvektive Niederschlagsereignisse besser zu erfassen, werden derzeit in KLIWA noch höher aufgelöste Klimaprojektionen (~2,8 km) betrachtet.

## WASSERHAUSHALTSMODELLE

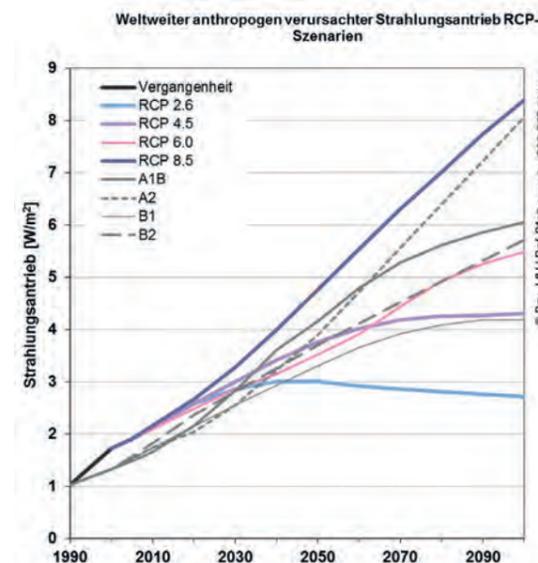
Um Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft treffen zu können, werden mit klimatischem Antrieb durch regionale Klimaprojektionen die zukünftigen Abflussverhältnisse mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen simuliert. Die Verknüpfung Emissionsszenario – Klimamodell – Wasserhaushaltsmodell wird als Modellkette bezeichnet. Mit den Wasserhaushaltsmodellen 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 den Wasserhaushalt quantifiziert, bewertet und Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung werden ergänzend spezielle Bodenwasserhaushaltsmodelle eingesetzt. Die Ergebnisse gehen in die Erarbeitung von Anpassungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen zum Beispiel für Niedrigwasser- oder Hochwasserverhältnisse ein.

## BANDBREITE VON ERGEBNISSEN

Die Ergebnisse von Klimaprojektionen unterliegen einer Reihe von Unsicherheiten. Durch die Betrachtung mehrerer Klimaprojektionen (Ensembleansatz) ergibt sich eine Bandbreite des möglichen zukünftigen Klimas, die erlaubt, dessen Variabilität und die vorhandenen Unsicherheiten abzuschätzen. Es ist erforderlich, durch mehrere Projektionen mögliche Entwicklungspfade zu betrachten und eine Bandbreite möglicher Veränderungen aufzuzeigen.

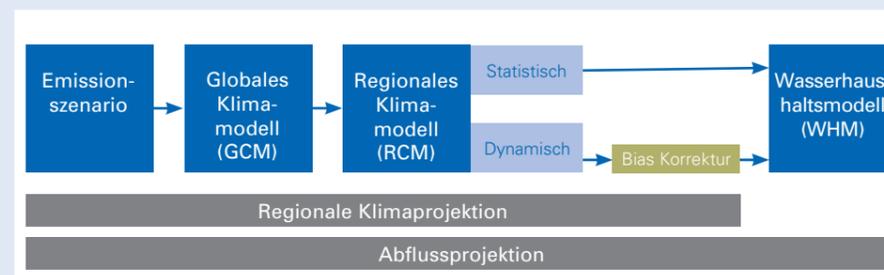
## ANTHROPOGENER ANTRIEB IN DER KLIMAMODELLIERUNG

RCP-Szenarien sind die menschlich verursachten zusätzlichen Strahlungsantriebe; grau gehalten sind die Verläufe der „alten“ SRES-Szenarien (Datenquellen: RCP database, IPCC 2007). Genutzt werden in KLIWA aktuell vor allem das RCP-Szenario 8.5 sowie das SRES-Szenario A1B.



## 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 für die „nahe Zukunft“ 2021-2050 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.



Hochwasserrückhaltebecken Urlau an der Eschach

### EHER HEISS UND WENIGER SCHNEE

Die bisher in KLIWA betrachteten regionalen Klimaprojektionen für Süddeutschland zeigen, dass die Temperatur bis zum Jahr 2050 im Durchschnitt um 0,6 bis 1,8°C zunehmen kann. Dabei fallen die Zunahmen für Sommer- und Winterhalbjahr leicht unterschiedlich aus.

Der bisherige Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern wird sich fortsetzen: Während es im Sommer gegenüber heute regional bis zu 10% weniger regnen kann, wird es im Winter spürbar mehr Niederschläge geben – in manchen Regionen sind Zunahmen bis zu 30% möglich. Die größten Niederschlagsmengen werden auch in der Zukunft an den Staulagen der aus dem Westen angeströmten KLIWA-Region anfallen. Zudem werden im Winter die Tage mit starken Niederschlägen (über 25 mm) deutlich zunehmen, in manchen Regionen wird sich die Zahl sogar verdoppeln. Dagegen wird es im Sommer tendenziell mehr Tage geben ohne Niederschlag: Trockenperioden werden somit länger andauern.

### FAZIT BIS 2050

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.

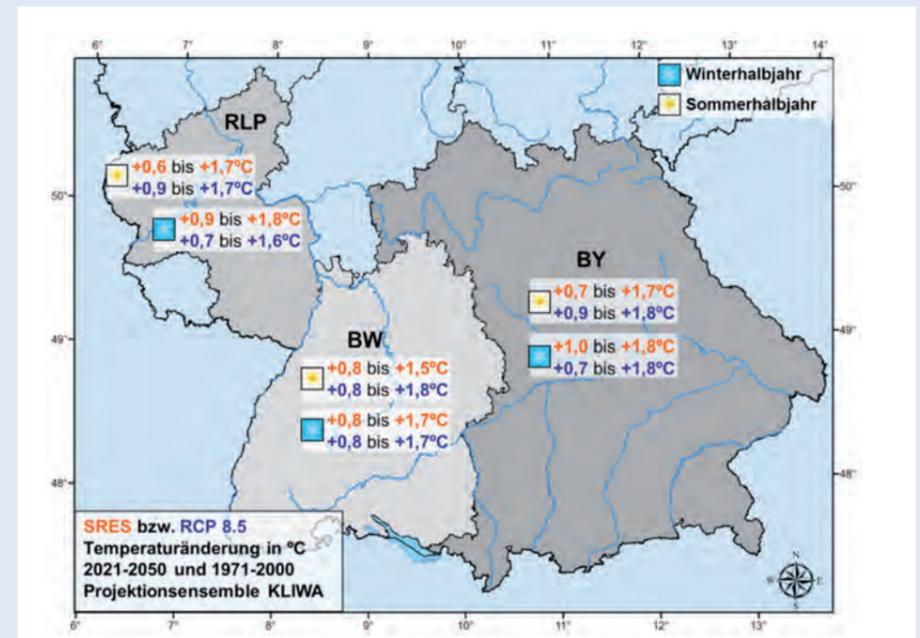
### ANPASSUNGSSTRATEGIEN

Nachdem KLIWA in den Anfangsjahren vor allem die Hochwasserabflüsse untersucht hat, rücken inzwischen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse, die Grundwasserneubildung und auch auf die Gewässerökologie in den Mittelpunkt der Untersuchungen. Auch die mögliche Zunahme von Starkniederschlagsereignissen mit damit einhergehender vermehrter Bodenerosion ist in den Untersuchungen eingeschlossen.

Die Folgen des Klimawandels stellen die Länder, Kommunen und letztendlich auch jeden Bürger 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 hydrologischen auch politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte berücksichtigen. Die Prinzipien der Nachhaltigkeit und der Umweltverträglichkeit spielen dabei ebenso eine große Rolle wie Unsicherheiten und auch Wechselwirkungen zwischen Klimaschutz und -anpassung.

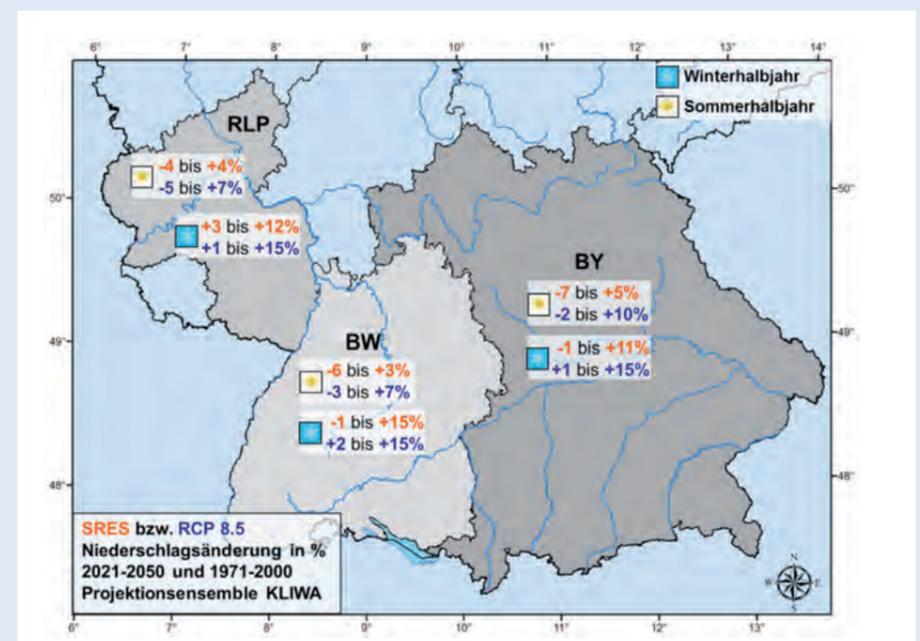
### ZUNAHME DER LUFTEMPERATUR BIS 2050

Die Darstellung zeigt die Änderung der Lufttemperatur im Vergleich der beiden Perioden 2021-2050 und 1971-2000. Die Zahlenangaben stellen die bisherige Grundlage in KLIWA dar, mit Veränderungen basierend auf SRES A1B gegenüber den Veränderungen der neueren Klimaprojektionen basierend auf RCP8.5 (15. und 85. Perzentil) dar. Die Temperatur nimmt im Winter und Sommer weiter zu. Die Änderungen sind im Sommer meist etwas geringer als im Winter.



### ÄNDERUNG DER GEBIETSNIEDERSCHLÄGE BIS 2050

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsniederschläge im Vergleich der beiden Perioden 2021-2050 und 1971-2000. Die Zahlenangaben stellen die bisherige Grundlage in KLIWA dar, mit Veränderungen basierend auf SRES A1B gegenüber den Veränderungen der neueren Klimaprojektionen basierend auf RCP8.5 (15. und 85. Perzentil) dar. 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.



Noch sprudeln unsere Quellen und die Grundwasserspeicher sind reichlich gefüllt.

## MESSWERTE ZEIGEN VERÄNDERUNGEN AUF

Die Grundwasserstände und Quellschüttungen werden 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 von Messzeitreihen aus den wichtigsten Grundwasserleitern von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz hat gezeigt, dass an etwa 2/3 der untersuchten Messstellen sinkende Grundwasserstände bzw. 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 süddeutschen Raum methodisch vergleichbare Berechnungen für die Periode 1951-2015 vor, anhand derer Veränderungen in der Vergangenheit aufgezeigt werden können. Die durchschnittliche Grundwasserneubildung in Süddeutschland (Abb. rechts oben) betrug im Gesamtzeitraum 185 mm. Bei Betrachtung der Einzeljahre zeigt sich, dass in der jüngeren Vergangenheit allenfalls noch durchschnittliche Neubildungsjahre auftraten (Abb. rechts unten). So betrug die mittlere Grundwasserneubildung seit 2003 lediglich 157 mm. Für die nahe Zukunft (2021-2050) werden als Ergebnis der Projektion WETTREG2010 mittlere Grundwasserneubildungsraten von 144 mm erwartet. WETTREG2010 gilt auf Grund deutlicher Temperaturzunahmen und ganz-

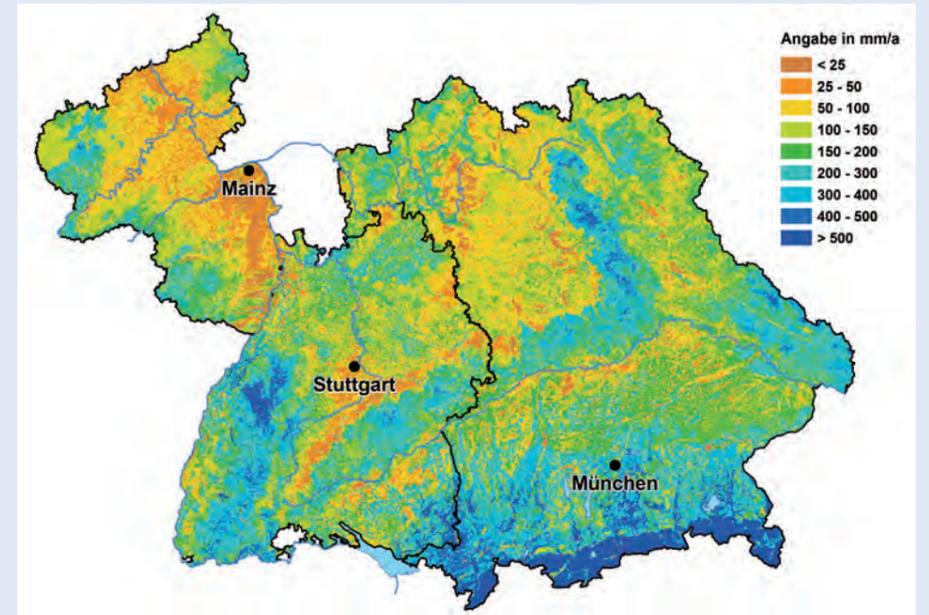
jährig abnehmender Niederschläge, als „worst-case“ Szenario. Auch anhand des Trockenheitsindex zeigt sich eine Zunahme von Trockenperioden. Der Trockenheitsindex beschreibt die Anzahl an Tagen im Jahr, an denen eine 30%ige Füllung des Bodenwasserspeichers unterschritten wird. In dieser Zeit erfolgt keine Versickerung und die Vegetation steht unter Trockenstress. Während im Gesamtzeitraum an durchschnittlich 52 Tagen im Jahr ein Bodenwasserdefizit auftrat, stieg die Anzahl seit 2003 auf 61 Tage. In der nahen Zukunft werden im Mittel 70 Tage pro Jahr erwartet (WETTREG2010).

## 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 Wasserversorgung 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. 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 potenziell verlässungsgefährdeten Gebieten zu berücksichtigen.

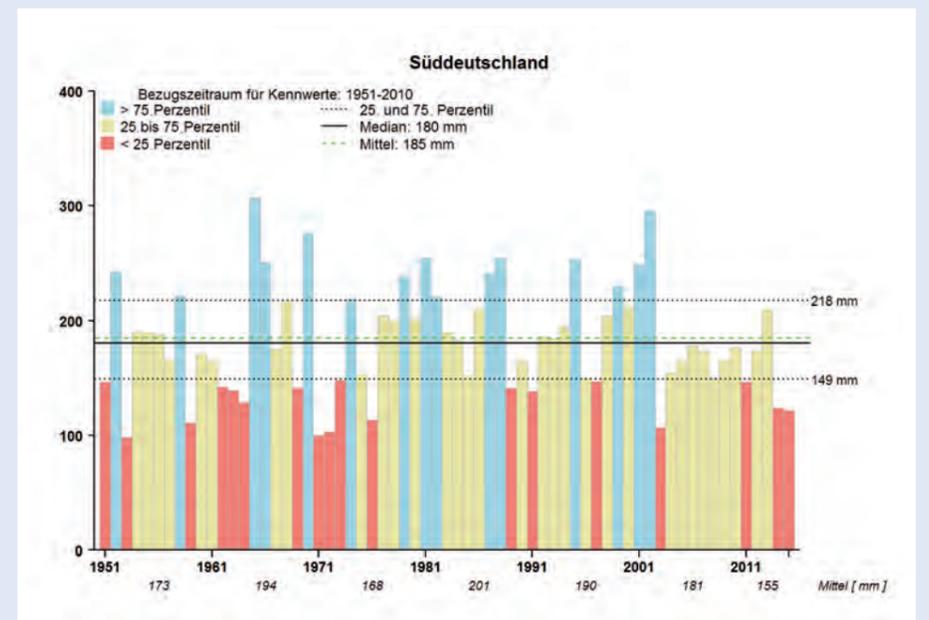
## MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG – LANGJÄHRIGES MITTEL (1951-2015)

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 1951-2015 für die drei Bundesländer mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet.



## MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG (1951-2015)

Entwicklung der jährlichen Grundwasserneubildung aus Niederschlag in Süddeutschland (Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz) im Zeitraum 1951-2015. Zum Vergleich sind die langjährigen Kennwerte des Zeitraums 1951-2015 aufgetragen.



# Öfter und länger trocken Niedrigwasser

Die trockeneren und wärmeren Sommer in der Zukunft lassen die Wasserstände sinken. Diese Niedrigwasserphasen setzen nicht nur der Binnenschifffahrt zu, sondern auch der Landwirtschaft, der Energiewirtschaft, der Trinkwasserversorgung sowie gewerblichen und industriellen Betrieben, die für ihre Produktionsprozesse Wasser benötigen (z. B. Papierindustrie). 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 sind.



Niedrigwasser am Altrhein im November 2015.

## 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. Die Sturzfluten des Jahres 2016 mit zu viel Wasser an einem Ort und in kurzer Zeit lagen in einem Zeitraum, in dem es in einem deutlich größeren Raum und über längere Zeit zu wenig Wasser gab: Schon vor dem Hitzesommer 2015 waren die Grundwasserstände sehr niedrig und konnten sich durch trockene Winter auch danach kaum erholen. Als Folge führen auch die Bäche und Flüsse wenig Wasser in Zeiten, in denen sie normal gut gefüllt sein sollten. Auf solche Situationen muss sich die Wasserwirtschaft künftig einstellen.

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

In den Sommermonaten zeigen die meisten Pegel in Baden-Württemberg, im Süden Bayerns sowie an einzelnen rheinland-pfälzischen Pegeln Abnahmen im langjährigen Trend (1951-2015). Diese Veränderungen äußern sich besonders in den Monaten Juni bis Oktober, je nach Region allerdings unterschiedlich stark ausgeprägt. Im Gegenzug änderte sich an den nordbayerischen und Teilen der rheinland-pfälzischen Pegel wenig oder es traten sogar höhere Niedrigwasserabflüsse auf.

In Hinblick auf das gemeinsame KLIWA-Ensemble von Abflussprojektionen für Süddeutschland ergeben sich im Sommer-

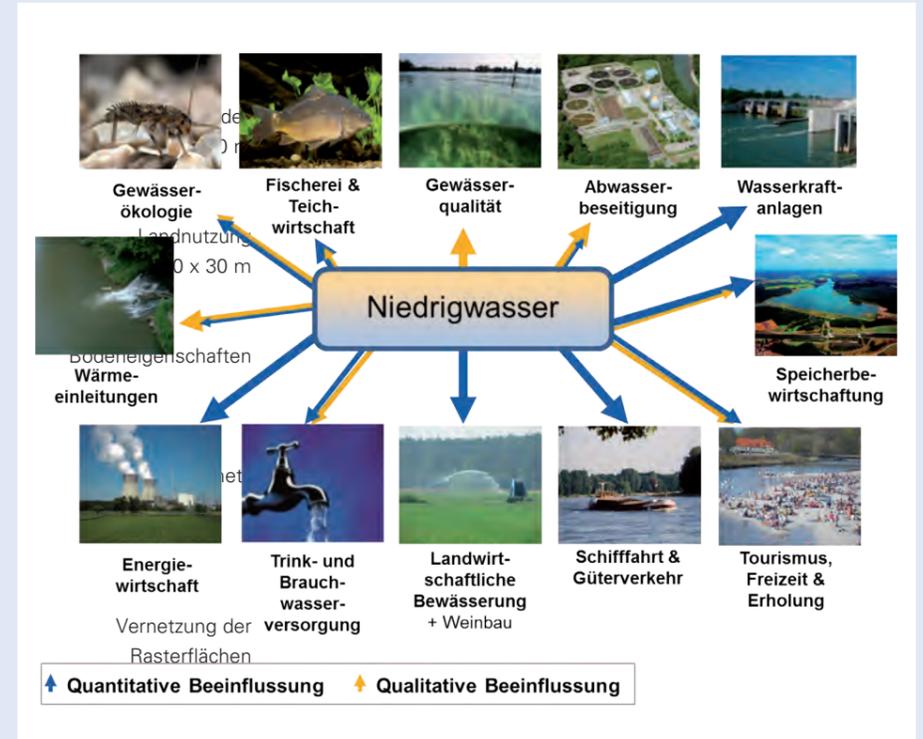
halbjahr aufgrund des Klimawandels regional unterschiedliche Entwicklungen der Niedrigwassersituation, exemplarisch dargestellt an ausgewählten Pegeln: Die Mehrzahl der Pegel tendiert zu schwachen Abnahmen der sommerlichen Niedrigwasserabflüsse bis etwa 15%. Aber auch Pegel ohne eindeutige Änderungen oder vereinzelt auch schwache Abflusszunahmen sind möglich. Für das Winterhalbjahr zeigt sich in der nahen Zukunft überwiegend keine Änderung der Niedrigwasserlage. Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts ist für ganz Süddeutschland mit einer Verschärfung der Niedrigwassersituation im Sommerhalbjahr zu rechnen, d. h. mit niedrigeren Abflüssen sowie mit häufigeren Niedrigwasserphasen.

## 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 der Erhöhung des Wasserrückhaltes in der Fläche, die bei zukünftigen Niedrigwasserereignissen vorbeugend wirken. Hier ist die Abstimmung mit allen betroffenen Akteuren wichtig, um Nutzungskonflikte weitestmöglich 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.

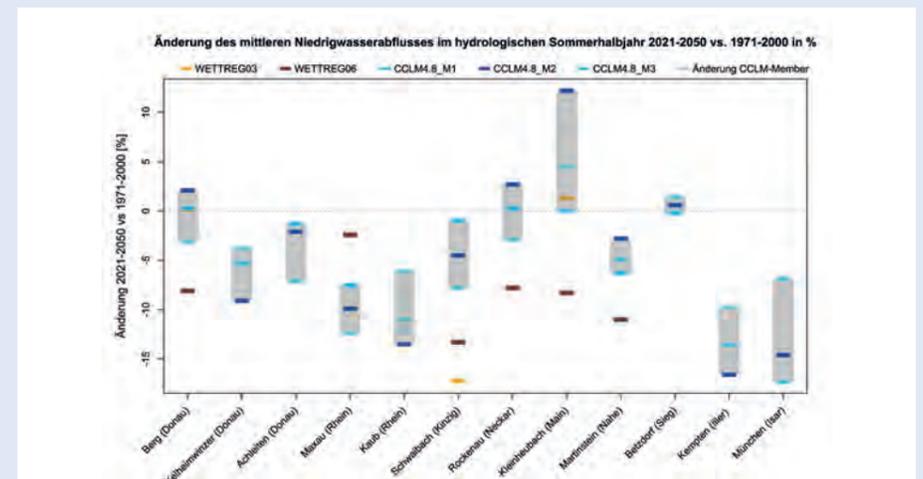
## EINFLUSS VON NIEDRIGWASSER AUF ÖKOLOGIE UND ÖKONOMIE

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.



## ÄNDERUNG DES MITTLEREN NIEDRIGWASSERABFLUSSES IN DER NAHEN ZUKUNFT

Änderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im hydrologischen Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) im Vergleich der nahen Zukunft (2021-2050) zur Referenz (1971-2000). Dargestellt sind ausgewählte Pegel in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz.





# „flexible and no regret“-Strategie Hochwasser

Der Ausblick auf mögliche Entwicklung des Klimas in den nächsten Jahrzehnten ist mit Unsicherheiten behaftet. Allerdings weisen alle bisherigen Hochwasseruntersuchungen darauf hin, dass in Zukunft vermehrt mit Hochwasserereignissen zu rechnen ist. Flexibilität und Vorsorgeprinzip sind angesichts der Bandbreite möglicher Ergebnisse im Hinblick auf Anpassung angebracht. Anpassung heißt aber nicht, dass überall hohe Schutzmauern errichtet werden. Es sind Maßnahmen des Hochwasser-Risikomanagements zu bevorzugen, die langfristig zweckmäßig sind, ein weites Spektrum abdecken und möglichst auch für andere Aspekte von Nutzen sind.



## STEIGENDE ABFLÜSSE, MEHR HOCHWASSEREREIGNISSE

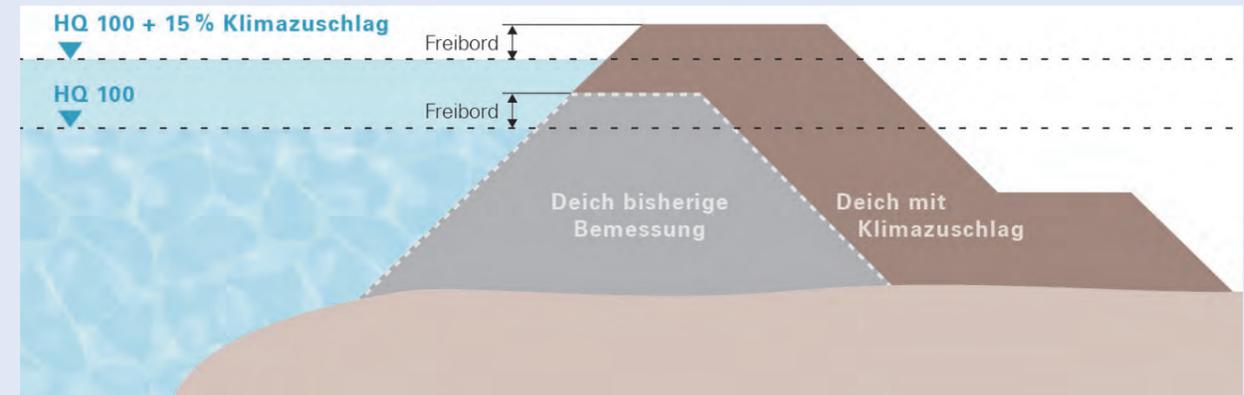
Der Klimawandel ist seit etwa Mitte der 1970er Jahre auch bei den Hochwasserabflüssen statistisch nachweisbar. Die Simulationen des Wasserhaushalts für die Flussgebiete in den drei KLIWA-Bundesländern zeigen, dass die Hochwasserabflüsse auch zukünftig besonders im Winter in fast allen Regionen zunehmen werden. Seit Anfang der 2000er Jahre sind daher bei der Planung von neuen Hochwasserschutzanlagen Strategien und Festlegungen getroffen worden, wie die Auswirkungen des Klimawandels bereits bei der Anlagenbemessung berücksichtigt werden sollen. Beispielsweise soll fortan im Neckar der Wert für ein hundertjähriges Hochwasser (HQ<sub>100</sub>) z.B. mit einem Klimaänderungsfaktor von 1,15 multipliziert werden, d.h. die Anlagen werden künftig auf einen um 15% gegenüber dem heutigen Bemessungswert höheren Wasserführung dimensioniert oder so geplant, dass bei Bedarf nachgerüstet werden kann. HQ<sub>100</sub> ist der Hochwasserabfluss, der statistisch betrachtet in 100 Jahren einmal überschritten wird (siehe Bild rechte Seite oben).

## ANPASSUNGSMASSNAHMEN – DER LASTFALL KLIMAÄNDERUNG

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse sind regional sehr unterschiedlich. So wurde beispielsweise in Baden-Württemberg für den Bereich der Oberen Donau ein Klimaänderungsfaktor von 1,25 ermittelt. Auch die kleineren und mittleren Hochwasser werden zunehmen. Der Abfluss HQ<sub>5</sub> für ein Hochwasserereignis, das heute im Mittel etwa alle fünf Jahre auftritt, steigt an der Oberen Donau um

67%. Für die Zukunft muss also der aktuelle HQ<sub>5</sub>-Wert der Oberen Donau mit dem Klimaänderungsfaktor 1,67 multipliziert werden. Im Bereich der Zuflüsse des Hochrheins beträgt der Klimaänderungsfaktor für das HQ<sub>5</sub> zum Beispiel 1,45. Am geringsten ist er im Gebiet Oberschwaben-Bodensee mit 1,24.

In Bayern wurde auf der Grundlage der ersten Untersuchungsergebnisse in KLIWA 2004 ebenfalls ein Klimaänderungsfaktor von pauschal 15 Prozent auf den statistischen Wert von HQ<sub>100</sub> eingeführt. Damit werden bereits jetzt die erwarteten Auswirkungen des Klimawandels bei der Planung neuer staatlicher Hochwasserschutzmaßnahmen in der Regel berücksichtigt. Die Grundlagen für den Klimaänderungsfaktor werden durch weitere Untersuchungen fortlaufend überprüft und fortentwickelt. Bisher bestätigten diese Ergebnisse die 2004 getroffenen Vorgaben. In Rheinland-Pfalz richtet sich die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen grundsätzlich nach den Randbedingungen des Einzelfalls. Dabei orientiert sich diese an der gefährdeten Bevölkerung, den Hochwasserschadenspotentialen sowie der Wirtschaftlichkeit. In den vergangenen Jahren wurden flächendeckend für Rheinland-Pfalz sowie für den Mittelrhein Abflussuntersuchungen durchgeführt. Erste Ergebnisse zeigen für den rheinland-pfälzischen Oberrhein in der „nahen Zukunft“ (2021 bis 2050), dass kleinere Hochwasserabflüsse, das sind Abflüsse mit einer häufigen Eintrittswahrscheinlichkeit, deutlich zunehmen werden. Diese zu erwartenden häufigeren Abflüsse sind in den von Deichen geschützten Gebieten bereits heute in einem Bereich, der durch den Einsatz von Hochwasserrückhalteanlagen und technischem Hochwasserschutz verkräftbar ist.



## 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.



## SONDERFALL OBERRHEIN

Wegen der besonderen Problematik des Rheins durch die Abflussbildung in der Schweiz, den Oberrheinausbau usw. wurde bei den ersten Abflussuntersuchungen im Rahmen von KLIWA der Rheinschlauch ausgeklammert. Inzwischen liegen belastbare Klimaprojektionen für das gesamte Rheineinzugsgebiet – also auch für die Schweiz – vor. Zudem gibt es geeignete Wasserhaushaltsmodelle, die u.a. die Retentionswirkung des Bodensees und der großen Alpenrandseen enthalten und das gesamte Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms (Einzugsgebiet ca. 69.000 km<sup>2</sup>) berücksichtigen. Die Wasserführung des Rheins bis zum Pegel Worms ist insbesondere durch die Abflussbildung in den Schweizer Alpen, also durch den jahreszeitlichen Verlauf von Schneeaufbau und Schneeschmelze, beeinflusst. Somit treten die höchsten Wassermengen im hydrologischen Sommerhalbjahr Mai bis Oktober auf. Analysen der relativen Änderungen zwischen Zukunftsszenario 2021-2050 und Ist-Zustand 1971-2000 für die Rheinpegel zeigen, dass für die mittleren Hochwasserabflüsse keine wesentlichen Änderungen zu erwarten sind. Im Sommerhalbjahr, in dem die höchsten

Abflüsse auftreten, ist mit Ausnahme der Monate Mai und Oktober sogar mit geringen Abnahmen der mittleren Hochwasserabflüsse zu rechnen. Im Winterhalbjahr November bis April werden Zunahmen von weniger als 10% simuliert. Aus heutiger Sicht sind also an den Rheinpegeln keine Verschärfungen der mittleren Hochwasserabflüsse in der nahen Zukunft bis zum Jahr 2050 zu erkennen. Die extremen Hochwasserabflüsse zeigen eine Tendenz zu höheren Werten, die allerdings bei den Pegeln mit nivalem (d. h. von Schneeschmelze beeinflusstem) Regime deutlich geringer ausfällt als bei den Pegeln mit pluvialem (d. h. von Regen beeinflusstem) Regime. Die Zunahme liegt z.B. beim HQ<sub>100</sub> bei den Pegeln am Oberrhein mit nivalem Regime bei +3% bis +5% (Basel, Maxau, Worms) und fällt somit deutlich geringer aus als bei den Pegeln mit pluvialem Regime, wie etwa beim Pegel Rockenau am Neckar mit +12%. Am Mittelrhein (Mainz, Kaub) setzen sich die Tendenzen aus dem Oberrhein weitestgehend fort, unterhalb der Moselmündung können größere Zunahmen allerdings nicht ausgeschlossen werden.

# Eine zunehmende Gefahr? Starkregen

Starkregenereignisse sind gekennzeichnet durch hohe Niederschlagsmengen in kurzer Zeit. Sie haben eine geringe räumliche Ausdehnung und stellen ein schwer zu kalkulierendes Überschwemmungsrisiko dar. Mit dem Klimawandel und der für die Zukunft projizierten Erwärmung steigt grundsätzlich das Potenzial für höhere Niederschlagsmengen und damit auch das Risiko für häufigere und extremere Niederschlagsereignisse. Allerdings gibt es auch dem entgegenstehende meteorologische Faktoren, wie z. B. die Veränderung der Wetterlagen.



Starkregen in Braunsbach, 29.05.2016

## STARKNIEDERSCHLÄGE

Um mögliche langfristige Trends in Häufigkeit und Intensität bei Starkniederschlägen zu untersuchen und von der natürlichen Variabilität zu unterscheiden, werden Messungen aus vielen Jahrzehnten benötigt. Erschwert werden Trendanalysen dadurch, dass Starkniederschläge nicht immer durch das vorhandene Niederschlagsmessnetz erfasst werden. In KLIWA wurden die maximalen eintägigen Gebietsniederschlagshöhen untersucht. Für den Zeitraum 1931–2015 haben sie in fast ganz Süddeutschland zugenommen, wenn auch die statistische Sicherheit und Stärke (max. +33%) regional sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Im Sommerhalbjahr ist keine eindeutige Entwicklung zu erkennen. Auslöser für Sturzfluten und Bodenerosion sind aber zumeist Ereignisse von kurzer Andauer, die zwar in den untersuchten Tagesniederschlägen mit enthalten sind, aber nicht klar trennbar.

Die Datenbasis für Niederschlagsanalysen mit Dauern unterhalb von 24 Stunden ist deutlich schlechter. Die seit 15 Jahren vorliegenden Radardaten in Deutschland deuten regional auf eine Zunahme von Starkniederschlägen kurzer Dauer hin. Jedoch sind diese Ergebnisse aufgrund der geringen Zeitreihenlänge klimatologisch noch nicht aussagekräftig. Sie können jedoch Stationsdatenauswertungen sinnvoll ergänzen, z. B. für einen Abgleich für eine Teilperiode. Für belastbare Ergebnisse besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Dies gilt auch für Klimaprojektionsdaten. Hier sollten für Kurzfristeniederschläge unbedingt konvektionserlaubende Modelle herangezogen werden. Es existieren zwar bereits erste derartige Projektionen, die Datengrundlage für Ensemble-Auswertungen wird gerade erst sukzessive geschaffen.

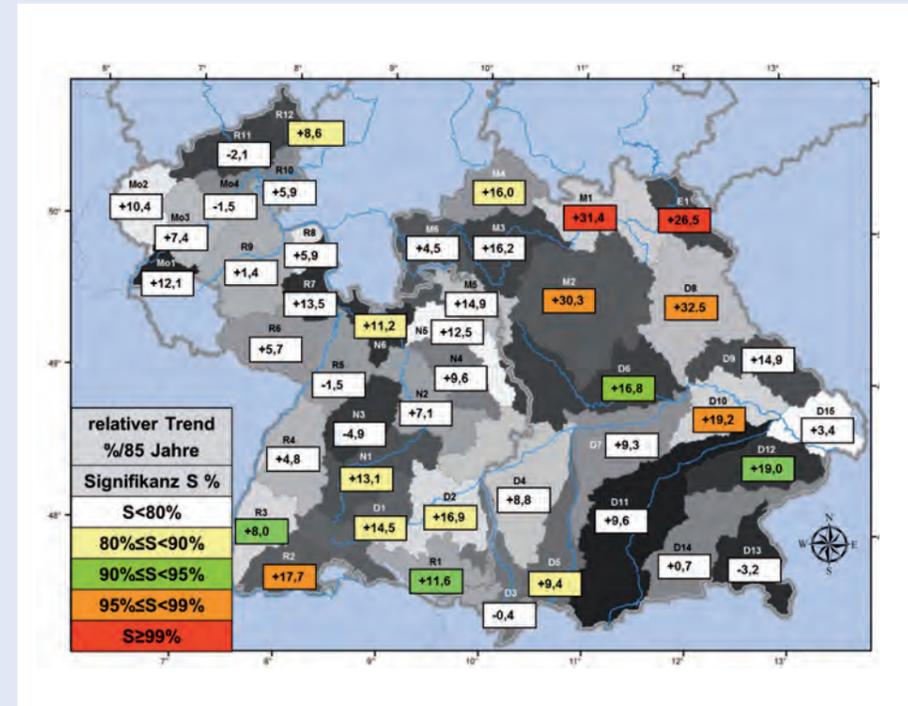
## ANPASSUNG – WAS KÖNNEN KOMMUNEN TUN?

Bedingt durch die Kleinräumigkeit der konvektiven Niederschlagsereignisse und ihre eingeschränkte Vorhersagbarkeit kann prinzipiell jede Gemeinde von Starkregenereignissen betroffen sein. Die Kommunen sollten daher mögliche Gefährdungen von Menschen sowie Schäden an Objekten und Infrastruktur durch Starkregen in Betracht ziehen und geeignete Vorsorgemaßnahmen treffen. Dazu gibt es auf Länderebene diverse Aktivitäten: Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz haben gemeinsam einen Leitfaden „Starkregen – Was können Kommunen tun?“ veröffentlicht. Eine angepasste Landnutzung hilft, auf erosionsgefährdeten Standorten das Erosionsrisiko und dessen Folgen so weit wie möglich zu minimieren (siehe auch die „Gute fachliche Praxis“ für ackerbaulich genutzte Flächen).

In Baden-Württemberg wurde ein weiterer 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.

## ÄNDERUNG DER MAXIMALEN GEBIETSNIEDERSCHLÄGE IM ZEITRAUM 1931 BIS 2015

Entwicklung der max. 1-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent, Abweichung vom Mittelwert 1931-2015).



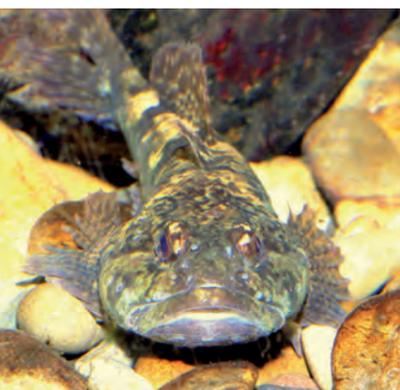
## STARKREGEN UND BODENEROSION

Das Risiko für Bodenerosion ist aufgrund vieler Einflussfaktoren (Niederschlag, Gelände- und Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung) lokal sehr unterschiedlich. Häufigkeit und Intensität von Starkniederschlägen sind jedoch die auslösenden Faktoren. Ändern sich diese in Zukunft, wird auch eine Zunahme des Bodenerosionsrisikos und der damit verbundenen Gefährdungen erwartet. Bodenerosion 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. In KLIWA werden Veränderungen der Niederschlagsintensitäten in zeitlich hochaufgelösten Datenreihen und Klimamodellen untersucht.



# Auswirkungen auf die Gewässerqualität Gewässerökosysteme

Wenn sich das Klima verändert, dann wirkt sich dieses auch auf die Gewässer mit ihren Tieren und Pflanzen aus. Ansteigende Temperaturen und sinkende Abflüsse bzw. Wasserstände belasten den Sauerstoffhaushalt und verändern die Zusammensetzung der Lebensgemeinschaften im Wasser. Der gute Zustand unserer Gewässer könnte so nachteilig beeinflusst werden. Doch was hat sich bereits verändert und was ist in der Zukunft zu erwarten? Vielschichtige Wirkungszusammenhänge zwischen Gewässereigenschaften und Ökosystemen und eine geringe spezifische Datengrundlage erschweren die Antworten.



## VIelfÄLTIGE EINFLÜSSE AUF DIE GEWÄSSERÖKOLOGIE

Der Klimawandel verändert in Bächen, Flüssen und Seen grundlegende Faktoren wie die Wassertemperatur und den Abfluss, den Eintrag von Feinsedimenten, die Konzentration von Nährstoffen oder die Durchmischung bei Seen. Dies alles hat eine ganze Kette von Prozessen zur Folge, die sich letztlich auf Pflanzen und Tiere in den Gewässern auswirken können: Manche Arten werden seltener oder verschwinden, andere Arten wandern ein. Die Lebensgemeinschaften der Gewässer und die Funktionsweise des aquatischen Naturhaushalts ändern sich. Während der Einfluss des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in Süddeutschland schon flächendeckend modelliert wird, sind Veränderungen der Gewässerbiologie bisher nur in Teilgebieten bekannt. So konnte lokal bereits eine Tendenz zur Aufwärtswanderung von Lebensgemeinschaften in Fließgewässern belegt werden.

Zwei von KLIWA beauftragte Literaturstudien zeigen in Wirkungsketten die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Gewässerqualität für Fließgewässer und Seen im regionalen Maßstab der drei Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Die Studien belegen mit einer umfangreichen Literatur- und Sensitivitätsanalyse, dass zukünftig mit Veränderungen in der Gewässerqualität in vielen Bereichen gerechnet werden muss, offenbaren aber auch noch bestehende Wissenslücken und zeigen Handlungsbedarf auf.

## MIT MONITORING IN DIE ZUKUNFT

Welchen Einfluss der Klimawandel auf die Gewässerqualität wirklich haben wird, lässt sich heute noch nicht sagen. Damit in diesem Bereich zukünftig belastbare Daten vorliegen, soll das aktuelle Gewässermonitoring mit einem speziellen Klimafolgenmonitoring ergänzt werden. Die Konzeption eines solchen Programms ist für die Fließgewässer weitgehend fertiggestellt. Ziel des Monitorings ist die Schaffung einer Datenbasis, die künftig viele Fragezeichen beseitigen und sachgerechte Anpassungsmaßnahmen ermöglichen soll.

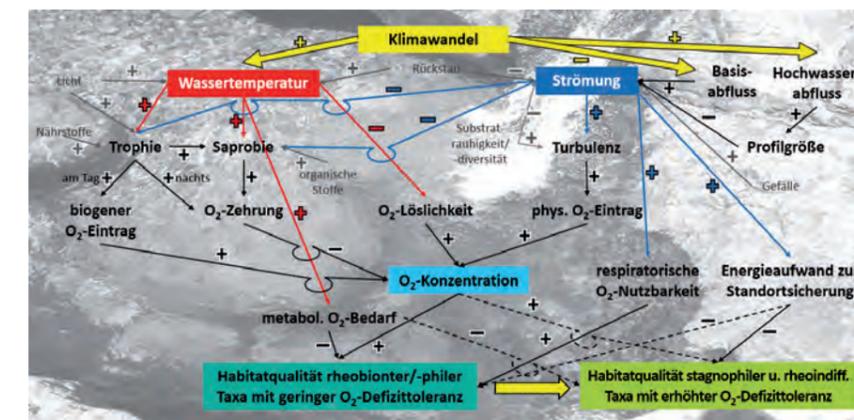
## KLIMAWANDELINDIKATOREN FÜR DIE GEWÄSSERQUALITÄT

Die Schaffung einer guten 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 entwickelt.

Der KLIWA-Index<sub>MZB</sub> scheint geeignet, 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, weil der Klimawandel im Sommer vor allem durch erhöhte Wassertemperaturen und verminderte Fließgeschwindigkeiten eine Verschlechterung der Atmungsbedingungen bewirken wird. Derzeit klärt ein Praxistest die Anwendbarkeit des Indexes.

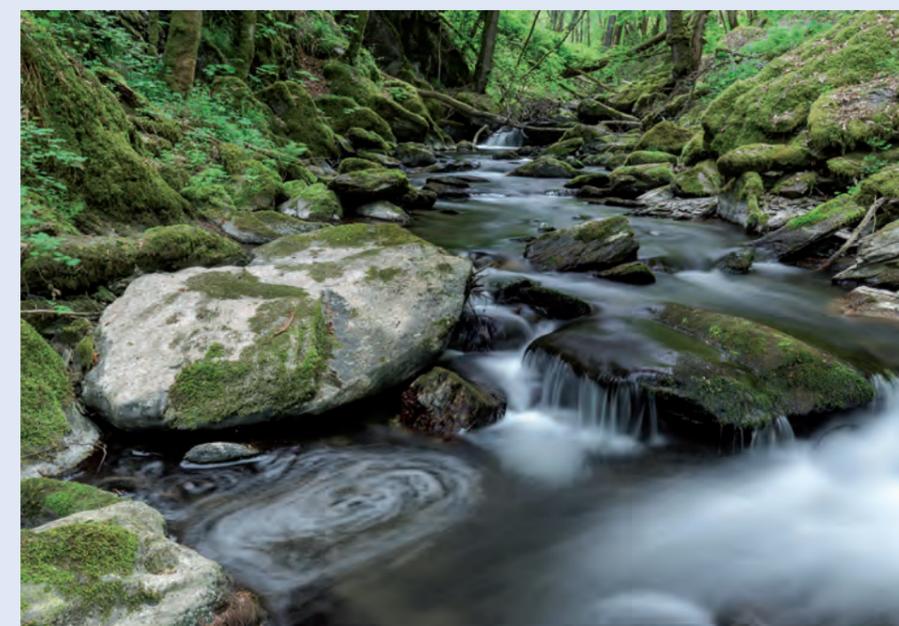
## WIRKUNGSZUSAMMENHÄNGE ZWISCHEN KLIMAWANDEL UND LEBENSBEDINGUNGEN IN FLÜSSEN UND SEEN

Der Klimawandel beeinflusst direkt die Wassertemperatur und die Strömungsverhältnisse von Flüssen und Bächen. Diese beiden Größen steuern eine Vielzahl von Prozessen, die sich maßgeblich auf die Sauerstoffversorgung und damit auf eine entscheidende Lebensbedingung für viele Gewässerorganismen auswirkt. Abbildung: Martin Halle / Andreas Müller



## GEBIGRSBÄCHE SIND EMPFINDLICH

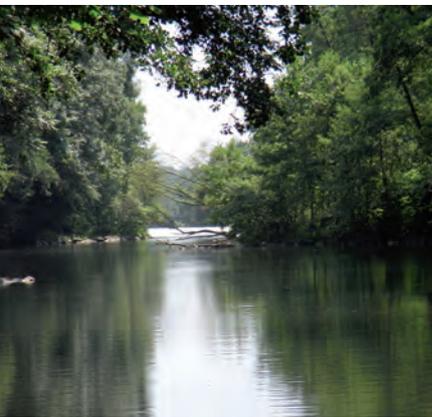
Kleine Kerbtalbäche, wie der Endertbach in Rheinland-Pfalz weisen eine hohe Strömungs- und Substratvielfalt auf. Sie sind kalt und gut mit Sauerstoff versorgt. Ihre artenreiche Wirbellosenfauna könnte besonders empfindlich auf Klimaveränderungen reagieren. Foto: Jochen Fischer





# 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.**



*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 bis 2009 untersucht. Dabei wurde ein Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur um etwa 1,5°C seit 1980 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

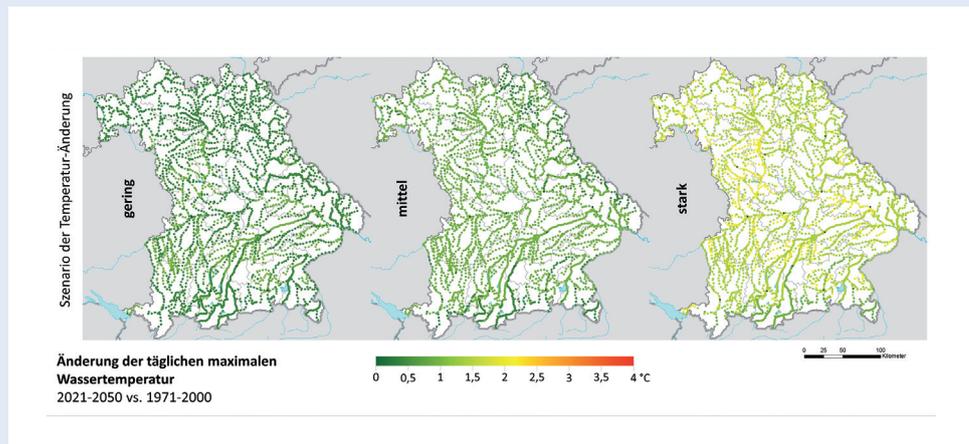
Tagesmaxima von über 29°C. Für den größten Teil der Gewässererwärmung sind saisonale und regionale klimatische Einflüsse verantwortlich. Allerdings ist einzuschränken, dass auch menschliche Eingriffe die Erwärmung zusätzlich verstärken, zum Beispiel Wärmeeinleitungen oder das Errichten von Staustufen. 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 zum Beispiel 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-Wärmemodellen. Die Nutzung von Klimaprojektionen erlaubt in beiden Ansätzen eine erste Aussage, wie sehr sich der Klimawandel auf die Gewässertemperatur zukünftig auswirkt. Sie stellt eine wichtige Grundlage für die weitere Betrachtung der Veränderungen in der Gewässerökologie dar.

### ÄNDERUNG DES TEMPERATURMAXIMUMS DER WASSERTEMPERATUR IN BAYERN

Die Darstellung zeigt die Änderung der mittleren maximalen Jahrestemperatur der Gewässer im Vergleich der beiden Perioden 2021-2050 und 1971-2000 beispielhaft an einer der drei betrachteten Klimaprojektionen dar (mittlere Veränderungen). Die Temperatur nimmt flächendeckend zwischen +0,2 und +1,8°C zu.



## Ausblick

**In Zukunft müssen wir mit zunehmend wärmeren und trockeneren Sommern sowie milderem und feuchteren Wintern rechnen. Besonders die sich verändernde Niederschlagsverteilung wird den regionalen Wasserkreislauf und damit auch den Wasserhaushalt unserer Flussgebiete nachhaltig verändern.**

KLIWA hat sich zunächst vor allem der Hochwasserproblematik angenommen und konkrete Anpassungsmaßnahmen erarbeitet. Mittlerweile sind auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse, das Grundwasser, das Starkregenerisikomanagement und die Gewässerökologie mehr in den Mittelpunkt der Untersuchungen gerückt.

Ein veränderter Wasserhaushalt hat unmittelbare Folgen auf die verschiedensten Gewässernutzungen – 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; hier liegt zurzeit einer der KLIWA-Arbeitsschwerpunkte. Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist der potenzielle Anstieg heftiger Kurzzeitzniederschläge. Diese Starkniederschläge können enorme lokale Überschwemmungen verursachen, die die kommunalen Entwässerungsnetze vor vermehrte Probleme stellen oder durch Bodenerosion zu erheblichen Schäden für die Landwirtschaft und in der Folge zu hohen Stoffeinträgen in unsere Gewässer führen.

Doch noch bedeutsamer als regionale Maßnahmen, die den Klimawandel in seinen Auswirkungen abzufedern versuchen, sind Schritte hin zu einem aktiven Klimaschutz. 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 fortsetzen wird, sollte jeder Einzelne bereits jetzt aktiv dazu beitragen, damit unsere Nachkommen nicht vor noch größeren Problemen stehen.