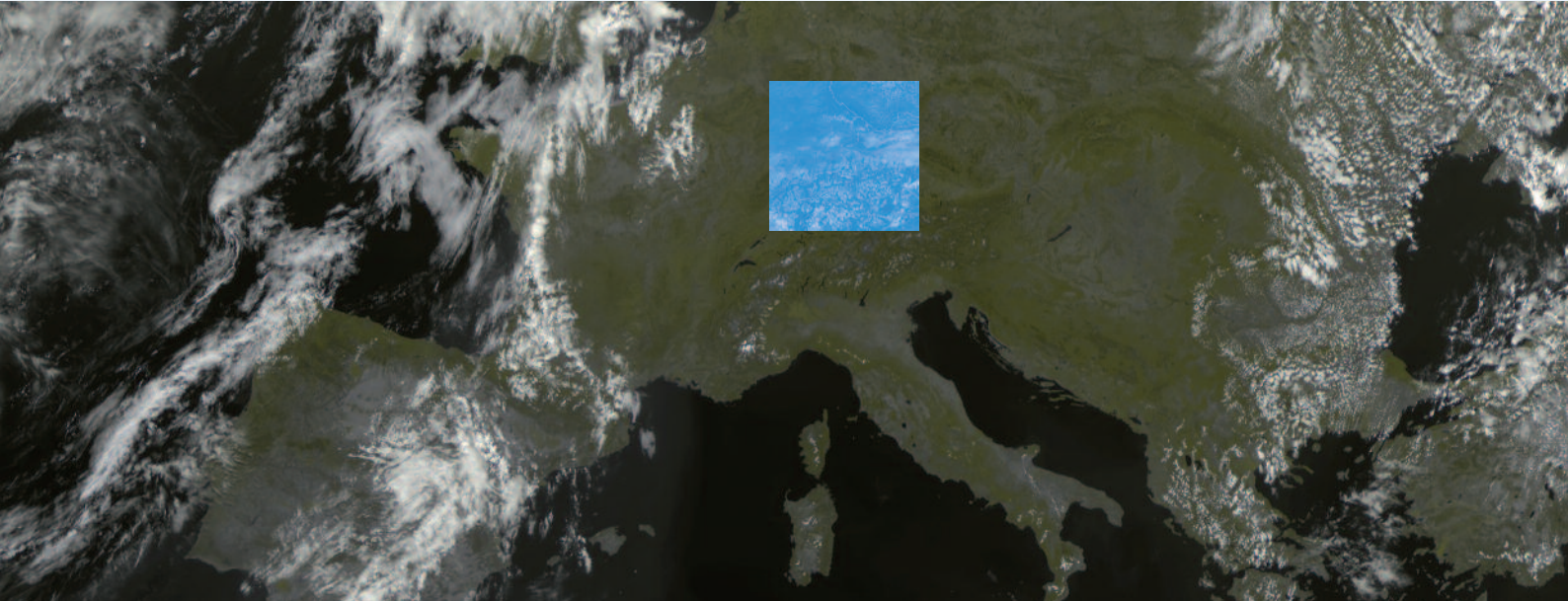
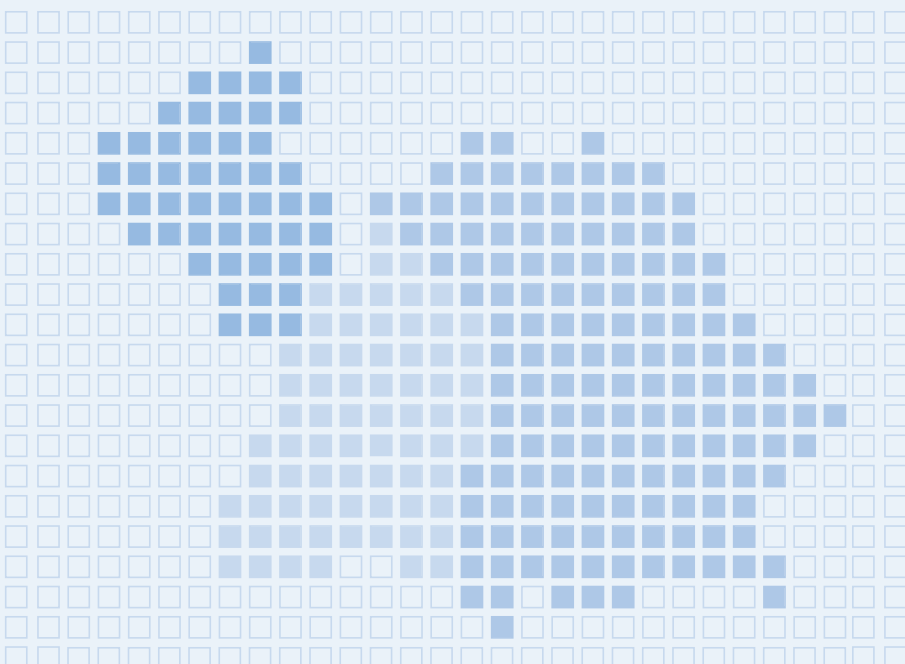


# Klimawandel im Süden Deutschlands

## **Ausmaß – Auswirkungen – Anpassung**



### FOLGEN FÜR DIE WASSERWIRTSCHAFT



**Baden-Württemberg**

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



**Rheinland-Pfalz**

MINISTERIUM FÜR  
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,  
ERNÄHRUNG, WEINBAU  
UND FORSTEN

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



## INHALT

<b>1</b>	<b>DAS KLIMA DER ERDE</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REGIONALE KLIMAVERÄNDERUNGEN</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>INSTRUMENTE DER KLIMAFORSCHUNG</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>DAS KLIMA VON MORGEN</b>	<b>10</b>
<b>5</b>	<b>WASSERHAUSHALTSMODELLE</b>	<b>12</b>
<b>6</b>	<b>GRUNDWASSER</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>NIEDRIGWASSER</b>	<b>16</b>
<b>8</b>	<b>HOCHWASSER</b>	<b>18</b>
<b>9</b>	<b>STARKREGEN</b>	<b>20</b>
<b>10</b>	<b>GEWÄSSERÖKOSYSTEME/AUSBLICK</b>	<b>22/23</b>

## IMPRESSUM HERAUSGEBER

### **LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg**

Griesbachstraße 1  
76185 Karlsruhe

### **Bayerisches Landesamt für Umwelt**

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160  
86179 Augsburg

### **Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz**

Kaiser-Friedrich-Straße 7  
55116 Mainz

### **Deutscher Wetterdienst**

Frankfurter Straße 135  
63067 Offenbach

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

Im Auftrag des  
**Bayerischen Staatsministeriums  
für Umwelt und Gesundheit**

Im Auftrag des  
**Ministeriums für Umwelt, Landwirtschaft,  
Ernährung, Weinbau und Forsten  
Rheinland-Pfalz**

### **Weitere Informationen**

[www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)  
[www.um.baden-wuerttemberg.de](http://www.um.baden-wuerttemberg.de)  
[www.stmug.bayern.de](http://www.stmug.bayern.de)  
[www.mulewf.rlp.de](http://www.mulewf.rlp.de)  
[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)  
[www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)  
[www.dwd.de](http://www.dwd.de)  
[www.luwg.rlp.de](http://www.luwg.rlp.de)

### **Konzept und Realisation**

ÖkoMedia GmbH, Stuttgart

### **Titelseite Satellitenbild:**

Deutscher Wetterdienst/EUMETSAT

**Stand: November 2012**

Diese Broschüre ist klimaneutral gedruckt

**ClimatePartner**  
**klimaneutral**

Druck | ID: 53203-1211-1010



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR  
UMWELT, LANDWIRTSCHAFT,  
ERNÄHRUNG, WEINBAU  
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.

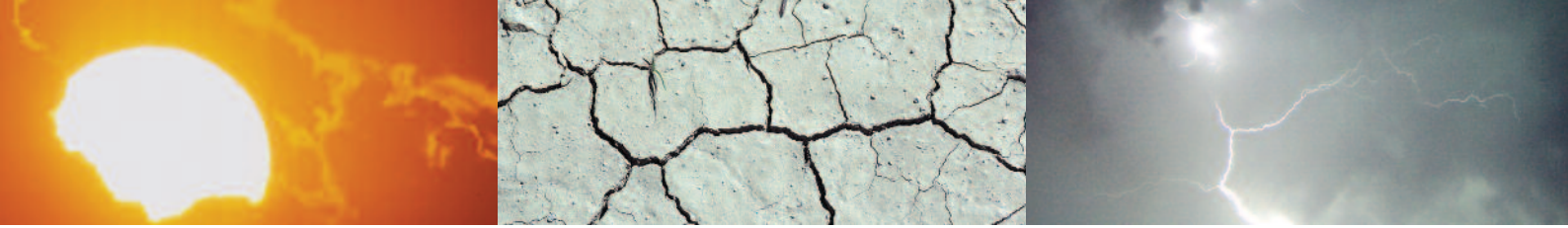
Aber der Wasserkreislauf ist im Wandel. Mit der Veränderung des Klimas ändert sich auch der Wasserhaushalt in Deutschland. Wir wissen heute, dass die mittlere Temperatur auf der Erde infolge des Treibhauseffekts weltweit bereits deutlich zugenommen hat und weiter zunehmen wird. Die Menschheit wird diese 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 Starkregeneignisse 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 von 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.

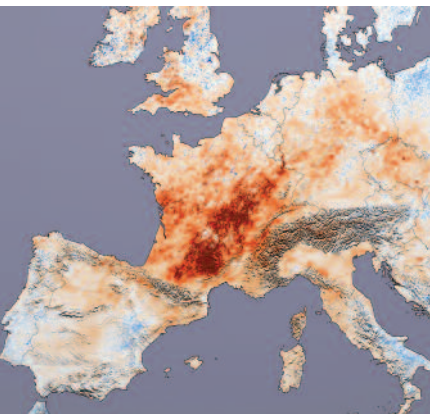




# Häufung extremer Wetterereignisse

## Das Klima der Erde

Mit Beginn der 1990er Jahre haben die Wetterextreme bei uns deutlich zugenommen: 2003 ächzte Europa wochenlang unter Temperaturen bis zu 40°C; im August 2005 meldete das Alpenvorland wegen extremen Dauerregens „Land unter“. Dem Winter 2007/2008 mit zeitweilig frühlingshaften Temperaturen folgten dann schneereiche Wintermonate mit strengem Frost wie der Dezember 2010. Im Jahr 2011 war der November buchstäblich niederschlagsfrei. Ist diese Häufung ungewöhnlicher Witterungsereignisse Zufall?



Extremsommer 2003: Hitzewelle in Mitteleuropa (besonders in den rot gekennzeichneten Gebieten)

### ... ODER IST DER KLIMAWANDEL SCHON IN VOLLEM GANGE?

Das Erdklima war im Laufe der Jahrmillionen schon immer natürlichen Schwankungen unterworfen. Mal war Europa tropisch, mal lasteten mächtige Eispanzer auf dem Land. 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 150 Jahren die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1°C erhöht hat. Das scheint keine große Veränderung zu sein – stimmt aber nachdenklich, wenn man in Betracht zieht, dass der mittlere Temperaturunterschied zwischen süddeutschem und mediterranem Klima etwa 2 bis 3°C beträgt.

### 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 390 ppm gemessen. Dieser vom Menschen verursachte Treibhauseffekt beeinflusst den Wasserkreislauf global, aber auch regional.

### DAS VORHABEN KLIWA

Sind die extremen Wetterlagen und Hochwasserereignisse der letzten zwei Jahrzehnte bereits Vorboten des Klimawandels? Wie werden sich das Klima und der Wasserhaushalt bei uns ändern – und wie lässt sich darauf reagieren?

Um diesen Fragen nachzugehen, bearbeiten die Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst das längerfristig angelegte Untersuchungsprogramm „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserrwirtschaft“ (KLIWA) gemeinsam. Begonnen wurden die Untersuchungen Anfang 1999.

Ziel dieser länder- und fachübergreifenden Zusammenarbeit ist es, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt der Flussgebiete im Süden Deutschlands herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen zu erarbeiten.

Zunächst wurden langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten analysiert und Trends ermittelt. Gestützt auf diese Daten erfolgt eine Abschätzung des künftigen Klimas mit ausgewählten regionalen Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (2021-2050). Diese Klimadaten sind Grundlage für die Simulationen mit engmaschigen Modellen für den Wasserhaushalt einzelner Flussgebiete. Die Untersuchungen umfassen bisher folgende wasserwirtschaftliche Handlungsfelder: Hochwasser, Niedrigwasser, Grundwasser, Bodenerosion und Gewässerqualität. Für diese Handlungsfelder sollen konkrete Anpassungsempfehlungen abgeleitet werden.

### KLIWA IM WEB

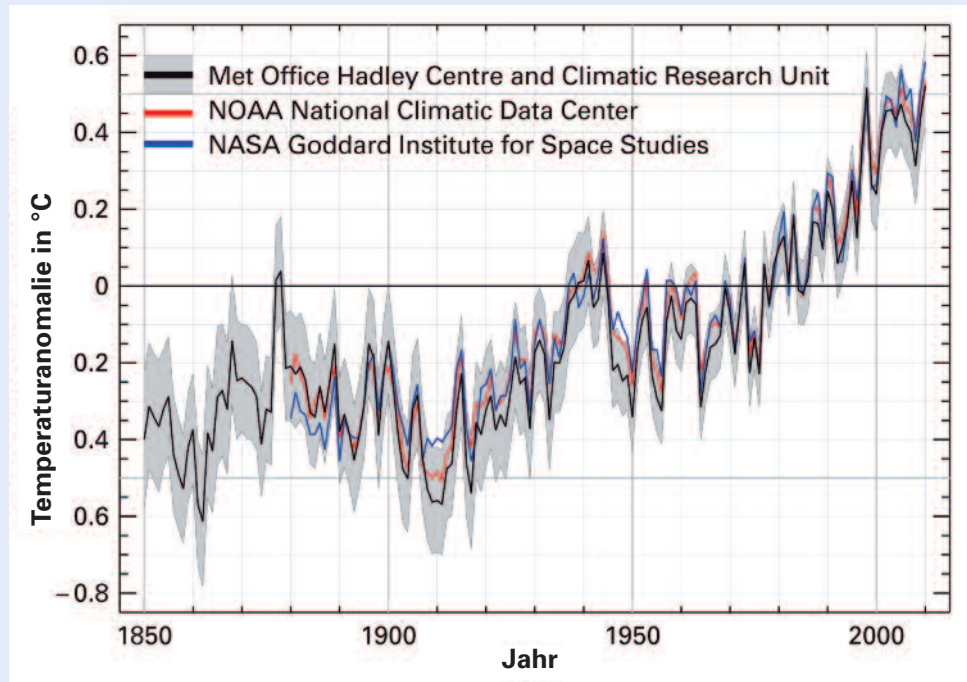
Weitere Informationen über das Vorhaben **KLIWA** können auf der Homepage unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) abgerufen werden. Im Download-Bereich stehen umfassende Berichte und Publikationen über Ergebnisse und Arbeitsweisen bereit.



### GLOBALER TEMPERATURVERLAUF VON 1850 BIS 2010

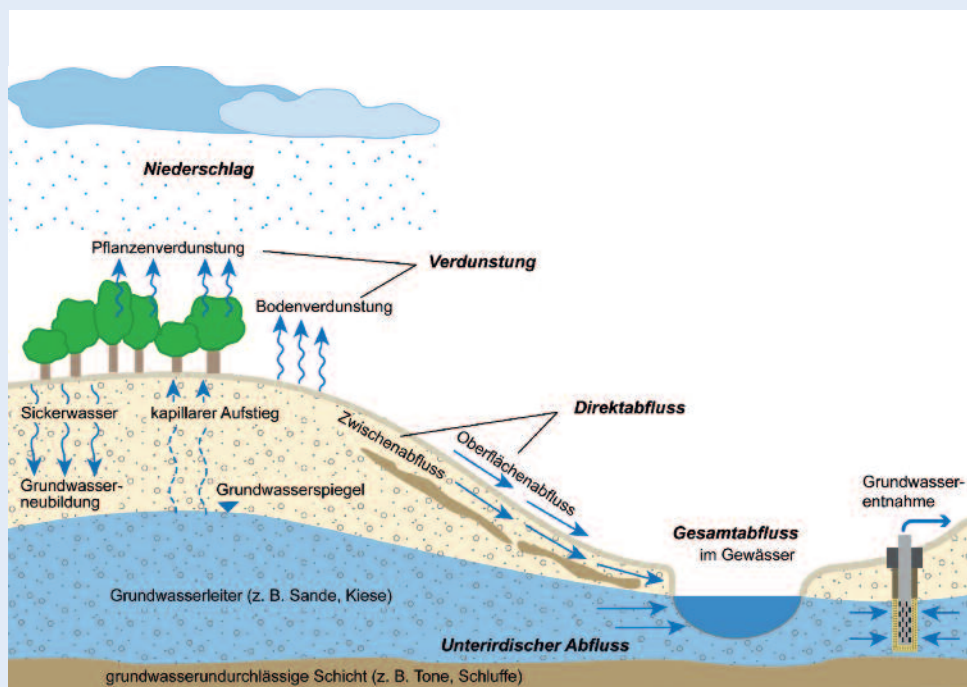
Die Grafik zeigt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur der Bezugsperiode 1961-1990. Mit Beginn des 20. Jahrhunderts setzte eine deutliche Klimaerwärmung ein, die sich in den letzten Jahrzehnten deutlich beschleunigt hat.

Quelle: Met Office Hadley Centre, UK, und Climatic Research Unit, Universität von East Anglia, UK



### 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.







# Im Fokus der Untersuchungen von KLIWA Regionale Klimaveränderung

**Der Klimawandel ist keine Zukunftsmusik. Der durch den Menschen verursachte Klimawandel hat längst schon begonnen – auch bei uns. Um die bisherige Klimaentwicklung einschätzen zu können, werden zuerst die Daten aus der Vergangenheit untersucht. Aus der Untersuchung langjähriger Messreihen lassen sich die natürliche Schwankungsbreite der Wetterdaten bestimmen und auch Trends erkennen. Für KLIWA wurden rd. 400 Temperatur- und Niederschlagsstationen im Süden Deutschlands ausgewertet, um eine einheitliche Datengrundlage für die weitere Klimaentwicklung zu haben.**



*Auf der Zugspitze ist der Rückgang der Gletscher aufgrund der Erwärmung deutlich sichtbar.*

## **ES IST WÄRMER GEWORDEN**

Die durchschnittliche Jahrestemperatur im Süden Deutschlands ist im Zeitraum von 1931-2010 um 0,9 bis 1,2°C gestiegen. Dabei ist der stärkste Anstieg ab den 1990er Jahren zu verzeichnen. Im Mittel ist die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr (November bis April) größer als im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober).

## **WEISSE WEIHNACHT – ERINNERUNG AUS KINDERTAGEN**

Mildere Winter bedeuten im Allgemeinen weniger Schnee. Auch hier ist der Trend aus den vieljährigen Messreihen klar erkennbar. Vor allem in den tiefer gelegenen Gebieten bis 300 m ü. NN und in den westlichen Landesteilen nahm seit 1951/52 die Schneedeckendauer um 30 bis 40 Prozent ab, in den mittleren Lagen um 10 bis 20 Prozent. Lediglich in den Hochlagen fiel teilweise sogar mehr Schnee. Tendenziell ist vor allem seit Anfang des 21. Jahrhunderts ein verstärkter Rückgang der Tage mit Schneebedeckung zu erkennen. Die Schneebedeckung ist eine wichtige Größe im Wasserhaushalt, z.B. für die Wasserführung in den Gewässern und die Grundwasserneubildung.

## **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 manchen Regionen um bis zu ca. 30 Prozent 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 trockener geworden; insbesondere in den Monaten Juni bis August.

## **WESTLAGE ZYKLONAL: DAS WETTER, DAS DEN REGEN BRINGT**

Die vermehrten Niederschläge im Winter sind auf die Zunahme bestimmter Großwetterlagen über Mitteleuropa zurückzuführen. Zeitreihenanalysen seit 1881 ergaben, dass sich insbesondere in den Monaten Dezember bis Februar die so genannten zonalen Zirkulationen häuften. Eine für die Wasserwirtschaft bedeutsame Großwetterlage ist die „Westlage zyklonal“, die von einem Azorenhoch und einem Islandtief angetrieben wird. Diese vom Atlantik nach Westeuropa reichende Strömung bringt oft ergiebige Niederschläge mit sich – im Flachland durch die mildere Meeresluft meist in Form von Regen. Zonale Großwetterlagen sind aber auch für heftige Winterstürme verantwortlich. Traurige Beispiele sind der Sturm „Lothar“, der im Dezember 1999 eine Schneise der Verwüstung durch Westeuropa schlug, ähnlich wie „Kyrill“ im Januar 2007 und „Xynthia“ Ende Februar 2010.

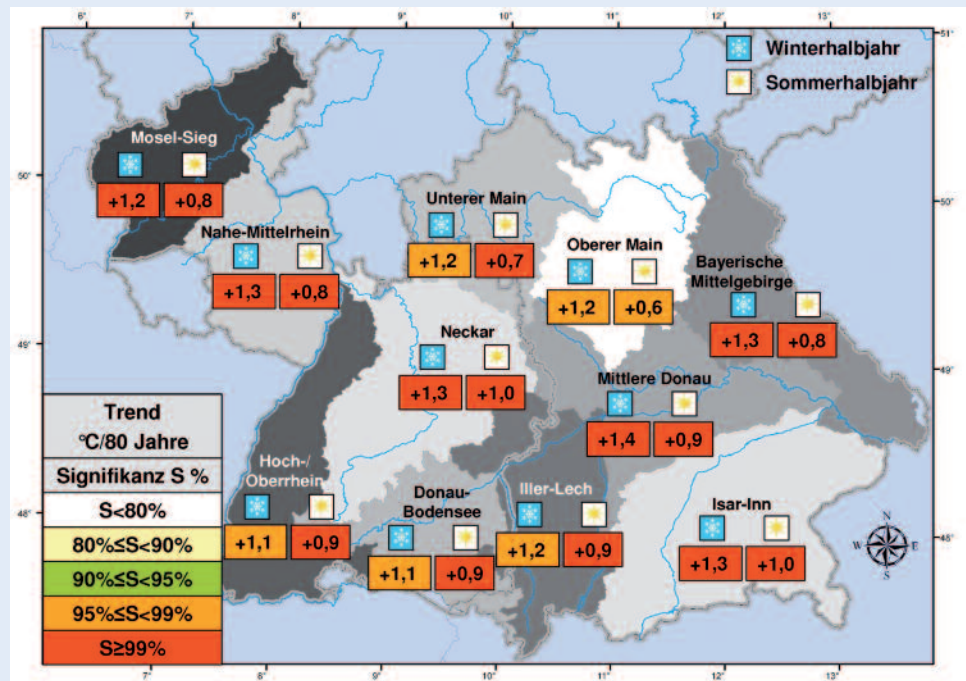
## **MONITORING IN KLIWA**

Eine wichtige Aufgabe in KLIWA ist die Erfassung von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen, um die Variabilität bzw. die Veränderung festzuhalten. Dies dient als Basis für alle weiteren Vergleichsbetrachtungen. Dazu wird alle 5 Jahre ein Monitoringbericht (letzte Aktualisierung 2011) unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht.



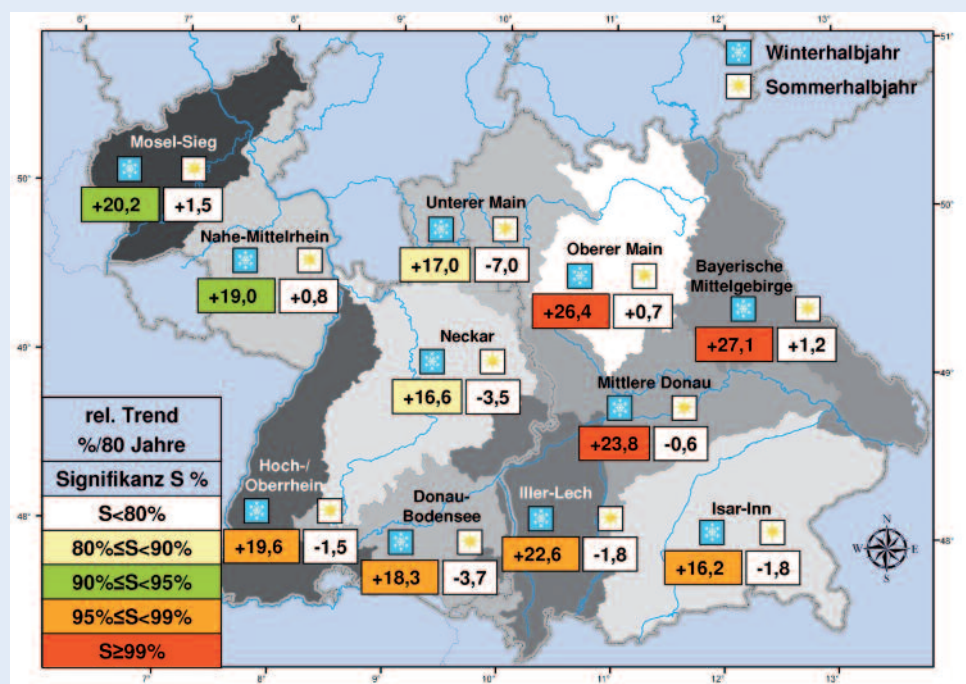
### ZUNAHME DER LUFT- TEMPERATUR IM ZEITRAUM 1931 BIS 2010

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsmittelwerte der Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren. Zunahmen sind in Winter mit +1,1 bis +1,4°C stärker als im Sommer mit +0,6 bis +1,0°C in der Periode 1931 bis 2010.

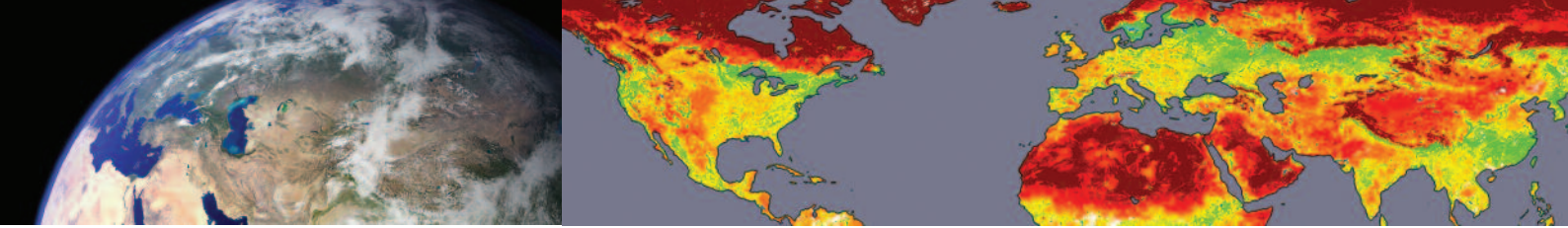


### ÄNDERUNG DER GEBIETS- NIEDERSCHLÄGE IM ZEITRAUM 1931 BIS 2010

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsniederschläge in den hydrologischen Halbjahren. Es zeigen sich deutliche jahreszeitliche Unterschiede: Im Sommerhalbjahr sind die Veränderungen uneinheitlich, im Winterhalbjahr zeigen sich generell deutliche Zunahmen von +17 bis +27% in der Periode 1931 bis 2010.







# Globale und regionale Klimamodelle

## Instrumente der Klimaforschung

Es gibt keine Zweifel mehr, der globale Klimawandel schreitet fort. Ein sichtbares Zeichen für das „global warming“ ist der Rückgang vieler Gletscher in den Alpen. Selbst schnelle und effektive Klimaschutzmaßnahmen können die sich abzeichnende weitere Klimaveränderung nicht verhindern, denn das heute in die Atmosphäre abgegebene Kohlendioxid wird dort noch mehrere Jahrzehnte wirksam sein und zur Erwärmung beitragen. Selbst wenn man den Ausstoß der Treibhausgase auf null setzen könnte, was bei dem derzeitigen Energiehunger der Welt utopisch ist, würde der Klimawandel in abgeschwächter Form fortschreiten. Daher sind Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.

### WETTER UND KLIMA

**WETTER** ist ein augenblicklicher Zustand der Atmosphäre,... aber nicht nur, denn auch die Beschaffenheit der Erdoberfläche beeinflusst das Wetter.

**KLIMA** ist dagegen das mittlere großräumige Verhalten der Witterung für einen längeren Zeitraum, üblicherweise 30 Jahre oder auch länger.

### Zwei Beispiele:

- Das für seinen Breitengrad relativ warme Europa verdankt sein mildes Klima dem Golfstrom, einer warmen Meeresströmung.
- Schnee- und Eisflächen sorgen für kühleres Klima, da sie das Sonnenlicht reflektieren.

### GLOBALE KLIMAMODELLE

Wettervorhersagen sind oft schwierig. Wer hat nicht schon einmal einen Ausflug geplant und stand bei vorhergesagtem Sonnenschein buchstäblich im Regen? Eine zuverlässige Wettervorhersage ist 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, die sich gegenseitig beeinflussen, in den Rechenmodellen berücksichtigt werden müssen. Diese Wechselwirkungen sind nur in Teilen genau bekannt. Globale Klimamodelle basieren jeweils auf einem atmosphärischen Modell, das durch ein Ozean-, ein Schnee- und Eis- sowie ein Vegetationsmodell ergänzt wird. Das führt zu einem sehr hohen Rechenaufwand, der nur von Hochleistungscomputern bewältigt werden kann. Die anthropogenen Einflüsse (der „Faktor Mensch“) werden dabei durch die verschiedenen Annahmen zur Freisetzung von Treibhausgasen (IPCC-Szenarien) berücksichtigt.

Für die globale Klimamodellierung wird die Erde in Raster aufgeteilt. Die Rechenleistung der heutigen Computer lässt momentan eine Rasterweite von etwa 150 km zu. Durch die Unsicherheiten über die anzunehmenden Entwicklungen der Weltbevölkerung, des wirtschaftlichen Wachstums, des Energieverbrauchs usw., aber auch durch die Ungenauigkeiten in den Modellen bewegen sich die Ergebnisse für Temperatur oder Niederschlag in einer bestimmten Bandbreite (Grafik rechts oben). So erklärt sich auch die bisherige Aussage des Weltklimarats, dass bis 2100 die globale Temperatur um 1,1 bis 6,4°C ansteigen könnte.

### REGIONALE KLIMAMODELLIERUNG

Die Rasterweite eines globalen Klimamodells ist für eine regionale Klimaabschätzung zu grob. Regionale Besonderheiten wie Gebirgszüge oder Flusstäler würden dabei durch das Modellgitter fallen. Für die Ableitung regionaler Klimaaussagen in der notwendigen kleinräumlichen Auflösung gibt es verschiedene Verfahren mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen, um die mögliche Entwicklung des Klimas durch regionale Klimaprojektionen aufzuzeigen.

### BANDBREITE REGIONALER KLIMAPROJEKTIONEN

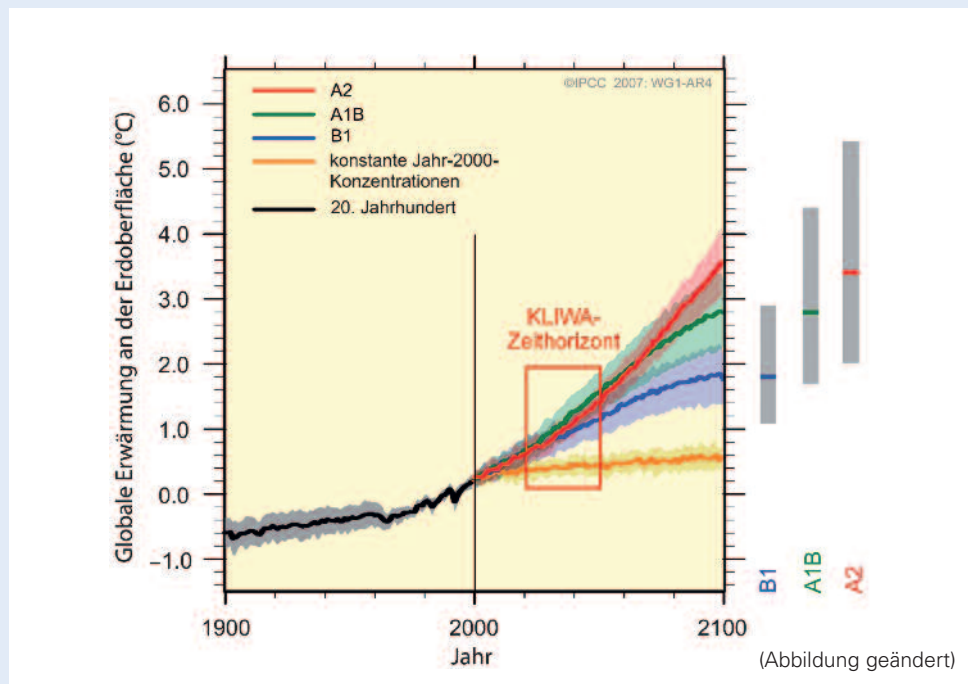
Grundsätzlich stehen unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die kombiniert als Modellkette (siehe Darstellung rechts unten) bezeichnet werden. Durch eine Betrachtung mehrerer belastbarer Klimaprojektionen (Ensembleansatz) ergibt sich eine Bandbreite des möglichen zukünftigen Klimas, die es erlaubt, dessen Variabilität und vorhandene Unsicherheiten besser zu beurteilen. Die zunächst in KLIWA verwendeten statistischen regionalen Projektionen (WETTREG) wurden zuletzt durch dynamische erweitert (COSMO-CLM). Neue Klimaprojektionen auf Basis weiterentwickelter Klimamodelle sind demnächst zu erwarten. Das Ausmaß des Klimawandels lässt sich aus einem Vergleich von Klimagrößen der Ist-Zeit (Periode 1971-2000) mit denen der Zukunft ableiten. In KLIWA wird die nahe Zukunft (Periode 2021-2050) für die hydrologische Modellierung verwendet. Für die ferne Zukunft (Periode 2071-2100) werden derzeit nur die Änderungen der Klimagrößen betrachtet.



### Globale Erwärmung an der Erdoberfläche

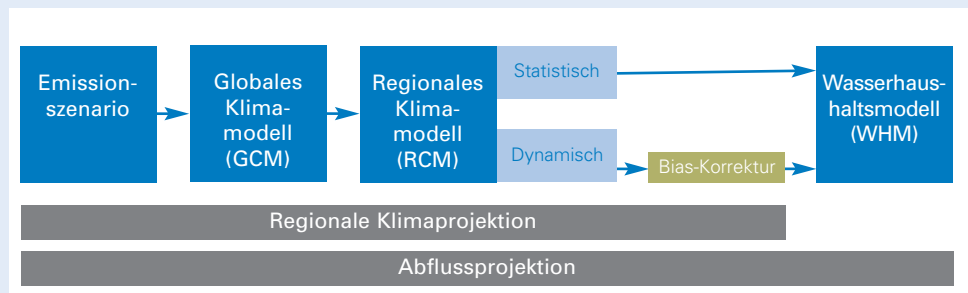
Modellierungsergebnisse auf der Grundlage der vom Weltklimarat (IPCC) 2007 entwickelten Emissionsszenarien zeigen die möglichen Entwicklungen einer globalen Erwärmung auf unserer Erde.

Als mögliches Zukunftsklima wird für regionale Simulationsrechnungen bei KLIWA bisher das Emissionsszenario A1B (grüne Linie) herangezogen. Das Szenario A1B setzt voraus, dass in der Zukunft bei der technologischen Entwicklung im Energiebereich der Schwerpunkt auf einer zukünftig ausgeglichenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen liegt.



### 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

## Das Klima von morgen

Für die Zukunftssimulation stehen verschiedene Klimamodelle zur Verfügung. Die damit erzeugten Klimaprojektionen führen zu einer Bandbreite der potentiell möglichen Temperatur- und Niederschlagswerte. Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulationen 2021-2050 unterscheiden sich zwar regional im Detail, der generelle Trend geht jedoch in dieselbe Richtung: Es wird allgemein wärmer und dabei im Winter feuchter, und im Sommer hingegen trockener.



Aufgrund der Klimaveränderung werden in manchen Regionen die Apfelbäume bis zu zwei Wochen früher blühen.

### EHER HEISS UND WENIGER EIS

Die bisher im Rahmen von KLIWA betrachteten regionalen Klimasimulationen für Süddeutschland zeigen, dass die Temperatur bis 2050 im Durchschnitt um 0,8 bis 1,7°C zunehmen kann. Dabei fallen die Zunahmen im Jahresmittel leicht unterschiedlich aus. Als Folge der starken Erwärmung werden im Winter mehr Regen und weniger Schnee fallen. Die Darstellungen auf der rechten Seite zeigen exemplarisch die Ergebnisse der zuletzt verwendeten Klimaprojektionen mit einem dynamischen regionalen Klimamodell. Diese Simulationsergebnisse liegen innerhalb der Bandbreite der bisherigen KLIWA-Untersuchungen.

Die Zahl der Sommertage (Tage über 25°C) wird im Vergleich zu heute deutlich zunehmen. Die Anzahl der heißen Tage (über 30°C) wird sich fast überall verdoppeln. Demgegenüber wird es weniger Frosttage (Tiefsttemperatur unter 0°C) und Eistage (Dauerfrost) geben. Letztere werden sich zumeist halbieren. Die sogenannten Eisheiligen werden sich nach vorne verschieben: Der letzte Spätfrost wird im Schnitt früher auftreten, in manchen Regionen werden z.B. die Apfelbäume bis zu zwei Wochen früher blühen.

### WESTLICHE WETTERLAGEN

Die für ergiebige Niederschläge sorgenden Westwetterlagen, insbesondere die „Westlage zyklonal“, werden auch in Zukunft im Winterhalbjahr häufiger unser Wetter bestimmen. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit für Hochwasserereignisse.

### MEHR NIEDERSCHLAG IM WINTER

Je höher die Lufttemperatur desto stärker ist die Verdunstung. Das wiederum beeinflusst den Wasserkreislauf maßgeblich.

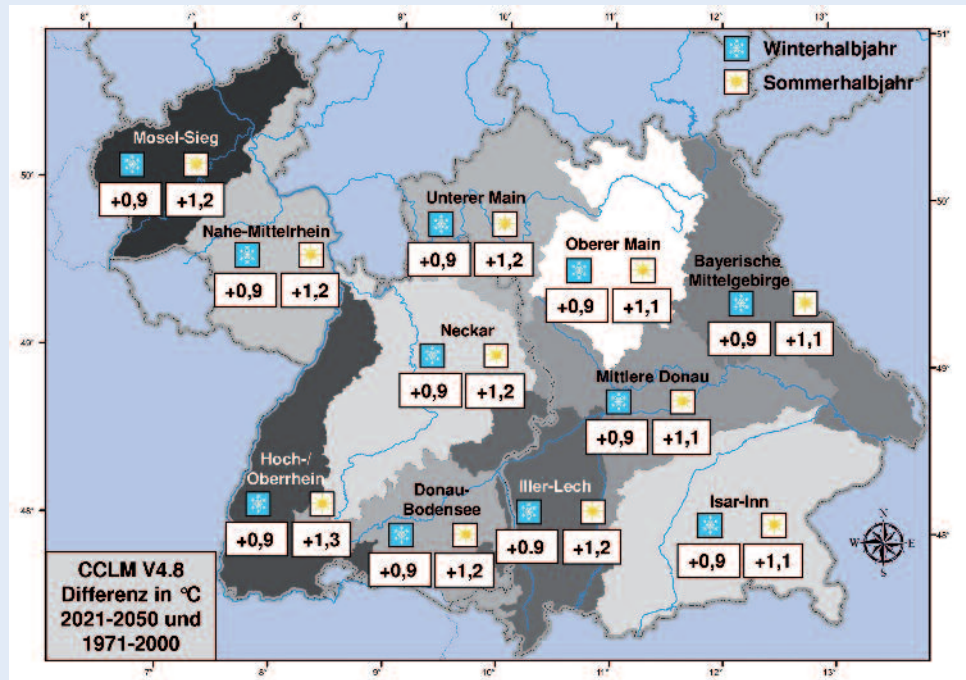
Die betrachteten Klimasimulationen zeigen, dass sich der bisherige Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern fortsetzt: Während es im Sommer gegenüber heute bis zu 10 Prozent weniger regnet, wird es im Winter erheblich mehr Niederschläge geben – in manchen Regionen bis zu 30 Prozent. Am meisten Niederschlag bekommen die Staulagen der aus dem Westen angeströmten Untersuchungsregionen ab. Zudem werden im Winter die Tage mit starken Niederschlägen (über 25 mm) deutlich zunehmen, in manchen Regionen wird sich die Zahl verdoppeln. Dagegen wird es mehr Tage geben ohne Niederschlag: Trockenperioden im Sommer werden länger andauern. Für die ferne Zukunft (bis zum Jahr 2100) zeigen die Klimaprojektionen überwiegend eine Abnahme der mittleren Jahresniederschläge auf.

### FAZIT: DER TREND SETZT SICH FORT

- Es wird generell wärmer, sowohl im Sommer als auch im Winter.
- Die Sommer werden etwas trockener, die Winter dagegen wesentlich feuchter.
- Die Westwetterlagen, die höhere Niederschläge im Winter bringen können, werden zunehmen. Im Sommer werden Trockenwetterlagen zunehmen.

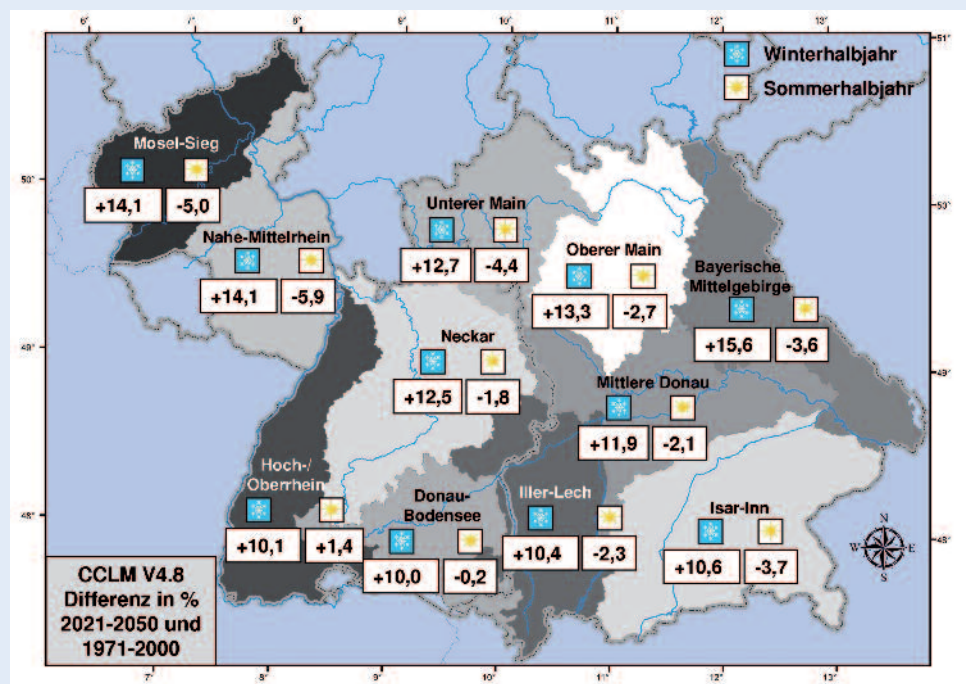
### ZUNAHME DER LUFTTEMPERATUR BIS 2050

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsmittel-Lufttemperatur im Vergleich der beiden Perioden 2021-2050 und 1971-2000. Die Zahlenangaben stellen beispielhaft das Ergebnis der regionalen Klimaprojektion CCLM Version 4.8 für die hydrologische Halbjahre dar. Die Temperatur nimmt weiter zu, dabei sind die Änderungen im Winter mit ca. +0,9°C etwas geringer als im Sommer mit ca. +1,2°C.



### ÄNDERUNG DES GEBIETS-NIEDERSCHLAGS BIS 2050

Die Darstellung zeigt die Änderung der Gebietsniederschläge im Vergleich der beiden Perioden 2021-2050 und 1971-2000. Die Zahlenangaben stellen beispielhaft das Ergebnis der regionalen Klimaprojektion CCLM Version 4.8 für die hydrologische Halbjahre dar. Die Änderungen sind jahreszeitlich unterschiedlich. Es sind deutliche Zunahmen im Winter bis +15% zu sehen, im Sommer hingegen leichte Abnahmen bis -6%.







# Werkzeuge für Abflusssimulationen

## Wasserhaushaltsmodelle

Mit globalen und regionalen Klimaprojektionen allein können noch keine Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft getroffen werden. Deshalb müssen mit den Ergebnissen aus regionalen Klimamodellen hoch aufgelöste Wasserhaushaltsmodelle „gefüttert“ werden. Nur so lassen sich die Änderungen im Abflussverhalten, insbesondere die Verschärfung von Hochwasserereignissen oder die Veränderung der Niedrigwassersituation, infolge des Klimawandels im Süden Deutschlands ermitteln.



Durch die zunehmenden milderen Winter steigt vor allem im Winterhalbjahr die Hochwassergefahr im Süden Deutschlands.

### GANZ KLEIN KARIERT – TOOLBOX WASSERHAUSHALTSMODELL

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen zu quantifizieren sind Wasserhaushaltsmodelle derzeit das Mittel der Wahl. Eine Quantifizierung der zu erwartenden Änderungen ist Voraussetzung für die Konzeption und Bewertung von Anpassungsmaßnahmen. Mit Wasserhaushaltsmodellen wird die räumliche und zeitliche Verteilung wesentlicher Komponenten des Wasserhaushaltes wie Niederschlag, Verdunstung, Versickerung, Wasserspeicherung und Abfluss berechnet. Mit ihrer Hilfe können die Auswirkungen von Veränderungen auf das Gesamtsystem „Wasserhaushalt“ dargestellt und bewertet werden.

In den Wasserhaushaltsmodellen werden mit einem feinen Raster u.a. (siehe Darstellung rechte Seite oben) folgende hydrologische Prozesse beschrieben: Verdunstung, Schneeanhäufung, -verdichtung, -schmelze, Bodenwasserspeicherung sowie die Fließbewegung in den Gewässern und der Rückhalt in den Seen.

Die Unsicherheiten der einzelnen Modelle in der Modellkette Globalmodell > Regionalmodell > Wasserhaushaltsmodell verursachen im Endergebnis eine Bandbreite möglicher Veränderungen.

Anwendungen für Wasserhaushaltsmodelle:

- Abschätzung der Auswirkungen von Umweltveränderungen, vor allem des Klimawandels oder Landnutzungsänderungen, auf den Wasserhaushalt (wie Abfluss, Versickerung und Verdunstung).

- Kontinuierliche Abflussvorhersage für Niedrig-, Mittel- und Hochwasser im operationellen Betrieb als Werkzeug des Risikomanagements, u.a. zur Verbesserung der Niedrigwasserbewirtschaftung und zur Verbesserung der Hochwasservorsorge (Hochwasservorhersage, -frühwarnung).
- Regionale Untersuchungen des Wasserhaushalts auf der Basis von Flusseinzugsgebieten im Sinne der EG-Wasserrahmenrichtlinie.
- Bereitstellung von hydrologischen Eingangsgrößen für Gewässergüte- und Grundwassermodelle (z. B. für Wärme- und Sauerstoffhaushalt, Grundwasserströmung und -transport usw.).

### FLUSSGEBIETE IM RASTERFORMAT

Um die Auswirkung der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt abzuschätzen, wurden Wasserhaushaltsmodelle im 1 x 1 km-Raster für die KLIWA-Flussgebiete erstellt. Bei der Modellierung ging es KLIWA zunächst darum, eine durch den Klimawandel zu erwartende Hochwasserverschärfung zu untersuchen.

Inzwischen stehen Untersuchungen der Niedrigwasserverhältnisse im Fokus. Für diese Fragestellungen werden für die KLIWA-Flussgebiete die täglichen Abflüsse für die Gegenwart (siehe Graphik rechte Seite unten) und die Zukunft berechnet. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung werden ergänzend spezielle Bodenwasserhaushaltsmodelle eingesetzt.

### DATENGRUNDLAGEN VON WASSERHAUSHALTS-MODELLEN

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.

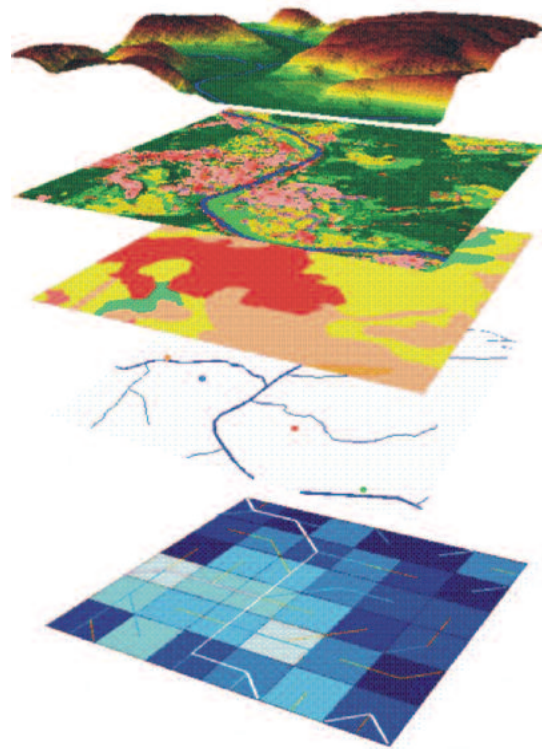
Höhenmodell  
30 x 30 m

Landnutzung  
30 x 30 m

Bodeneigenschaften

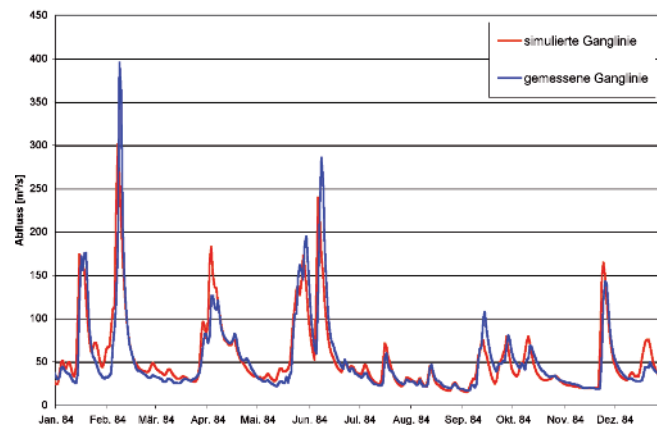
Flussnetz

Vernetzung der Rasterflächen



### ERGEBNIS EINER WASSERHAUSHALTS-MODELLIERUNG

Beispielhafte Gegenüberstellung einer gemessenen und einer mit einem Wasserhaushaltsmodell simulierten Abflussganglinie an einem Pegel für das Jahr 1984.





# Unser wichtigstes Trinkwasserreservoir Grundwasser

Im Süden Deutschlands werden etwa 80 Prozent des Trinkwassers den unterirdischen Grundwasserspeichern entnommen. Die Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt sind für die Wasserwirtschaft daher von besonderer Bedeutung. Bei veränderten Klimabedingungen muss die Trinkwasserversorgung auch in der Zukunft sichergestellt werden.



Noch sprudeln unsere Quellen und die Grundwasserspeicher sind reichlich gefüllt.

## ERSTE VERÄNDERUNGEN IN DEN MESSWERTEN BEOBACHTET

Die Grundwasserstände und Quellschüttungen werden bereits seit mehreren Jahrzehnten, in Einzelfällen sogar seit über 100 Jahren, beobachtet. Die an Messstellen gewonnenen Datenreihen geben Aufschluss über die Langzeitentwicklung der Grundwasserstände und Quellschüttungen. Eine systematische Auswertung ausgewählter Messreihen aus den wichtigsten Grundwasserleitern von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz hat gezeigt, dass in zahlreichen Fällen bereits Änderungen im Jahresgang festzustellen sind. So tritt mittlerweile der jährliche Höchstwert im Jahresgang vielfach früher ein als zu Beginn der Beobachtungen – als direkte Folge der Änderungen im jährlichen Temperatur- und Niederschlagsverlauf. Daneben ist vielfach eine Verstärkung der Amplitude zwischen Minimum und Maximum des Jahresgangs erkennbar.

## TENDENZEN BEI DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Die veränderte Niederschlagsverteilung – weniger Regen im Sommer, mehr Niederschlag in den Wintermonaten – wird sich auf den Bodenwasserhaushalt spürbar auswirken: Im Sommer wird zukünftig noch weniger, im Winter dagegen mehr Sickerwasser gebildet als bisher. Während der Vegetationsperiode wird daher die Wasserverfügbarkeit im Boden (Darstellung rechts oben) in der Zukunft abnehmen. Dies zeigt sich für die drei Bundesländer an einer deutlichen Zunahme des Trockenheitsindex von fast 14 Tagen pro Jahr im Zeitraum 2021-2050. Die Grundwasserneubildung (Darstellung rechts unten) beträgt heute in Baden-Württemberg und Bayern im Jahresmittel

etwas mehr als 200 mm, in Rheinland-Pfalz gut 100 mm. Zum Vergleich: Die mittlere Niederschlagshöhe liegt in Baden-Württemberg bei etwa 960 mm, in Bayern bei etwa 930 mm und beträgt in Rheinland-Pfalz etwa 780 mm. Anders als beim Trockenheitsindex werden für den Zeitraum 2021-2050 nur geringe Veränderungen der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserneubildung erwartet. Die Bodenwasserhaushaltsberechnungen mit dem Klimaszenario WETTREG 2006 (ECHAM5/A1B) ergeben in Rheinland-Pfalz leichte Zunahmen der Grundwasserneubildung bis zu 15 mm/a, für Baden-Württemberg und Bayern eher Abnahmen von bis zu 30 mm/a.

## HANDLUNGSEMPFEHLUNGEN

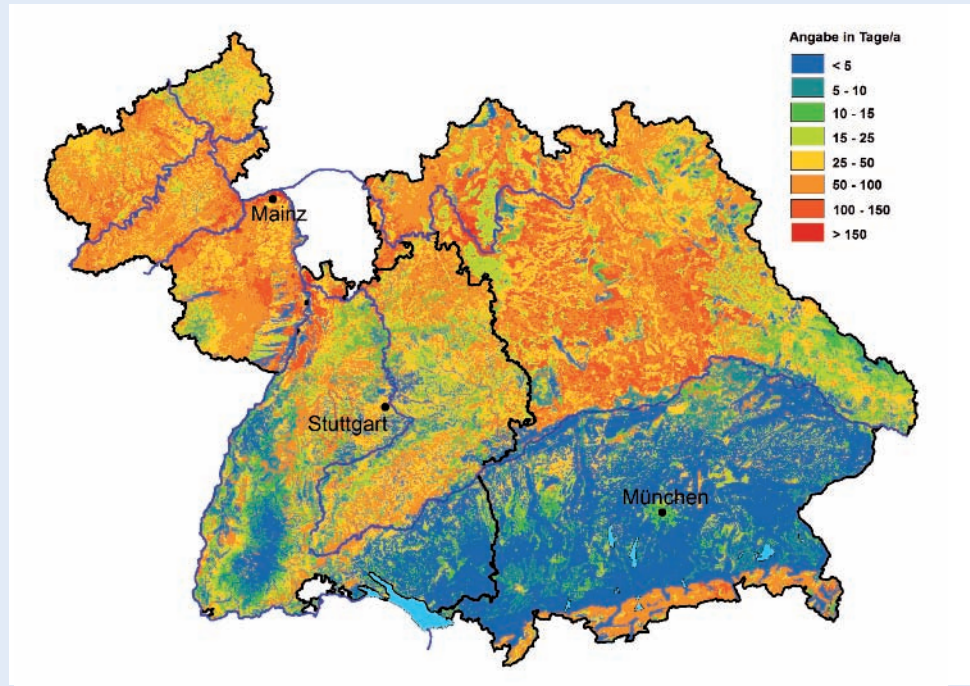
Basis einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung ist die regelmäßige Beobachtung der Grundwassermenge und -beschaffenheit. Im Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels ist der Messnetzbetrieb daher konsequent fortzuführen. Längere sommerliche Trockenperioden können auch heute schon zu einem örtlich und zeitlich begrenzten Wassermangel führen. Um bei der Wasserversorgung mögliche Engpässe zu vermeiden, müssen unter anderem regionale und überregionale Verbundlösungen ausgebaut werden. Für den Beregnungsbedarf bei landwirtschaftlicher Nutzung sind effizientere Methoden zu entwickeln. Neben ausgedehnten Trockenphasen im Sommer kann es zukünftig auch längere Perioden mit ergiebigen Niederschlägen insbesondere im Winter geben, die lokal zu erhöhten Grundwasserständen führen können. Dies ist etwa bei der Ausweisung von Baugebieten in potenziell vernässunggefährdeten Gebieten zu berücksichtigen.





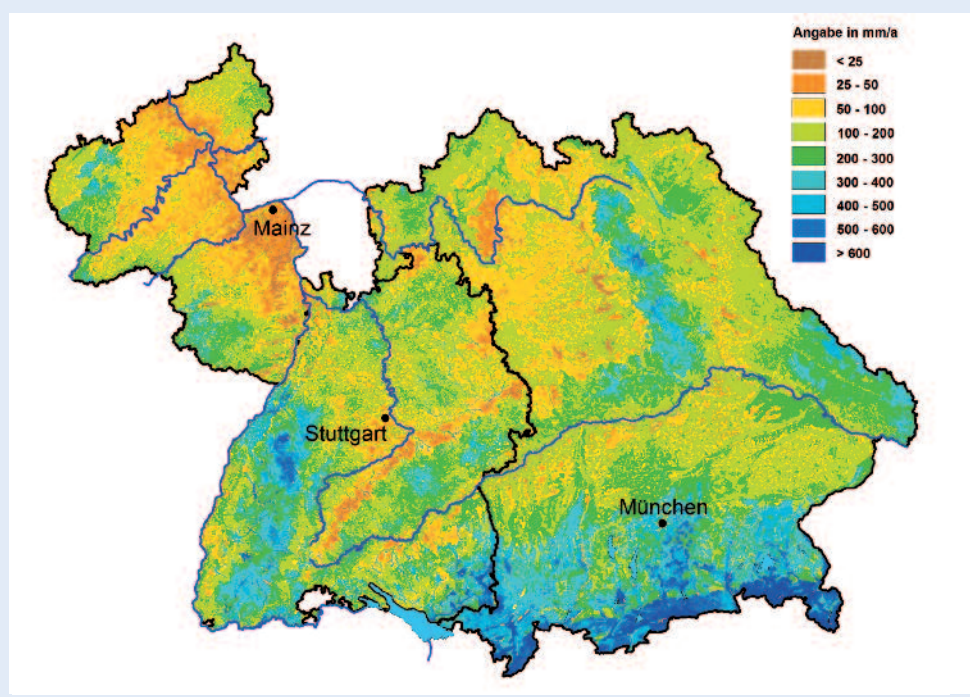
**MITTLERER JÄHRLICHER TROCKENHEITSINDEX HEUTE (1971-2000)**

Im Rahmen von KLIWA wurde der Trockenheitsindex der Periode 1971-2000 für die drei Bundesländer mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet. Der Trockenheitsindex beschreibt den Zeitraum in dem eine 30%ige Füllung des Bodenspeichers unterschritten wird. In dieser Zeit erfolgt keine Versickerung und die Vegetation steht unter Trockenstress.



**MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSER-NEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG HEUTE (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 1971-2000 für die drei Bundesländer mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell berechnet.





# 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 und der Trinkwasserversorgung. Die wirtschaftlichen Folgen können gravierend sein: So verursachte die lang andauernde Trockenperiode 2003 größere volkswirtschaftliche Schäden in Deutschland als eine der Hochwasserkatastrophen an Rhein, Oder oder Elbe der letzten Zeit. Hinzu kommt, dass neben den wasserwirtschaftlichen Nutzungen auch Flora und Fauna mit weitreichender Wirkung von Niedrigwasser betroffen sind.**



*Wenn in der Vegetationsperiode der Niederschlag für längere Zeit ausbleibt, trocknet der Boden aus. Für die Landwirtschaft können Ernteeinbußen die Folge sein.*

## **SINKENDE WASSERSTÄNDE TROTZ EXTREMER WETTEREREIGNISSE**

Der Klimawandel mit höheren Temperaturen führt zu einer Intensivierung im Wasserkreislauf. In der Folge werden extreme Witterungsereignisse häufiger auftreten. Die Wasserwirtschaft wird sich auf die Veränderungen einstellen müssen: Trockenperioden wie der Hitzesommer 2003, in dem Bäche und kleinere Flussläufe trocken fielen, mancherorts die Binnenschifffahrt eingestellt werden musste und die Grundwasserspiegel stark sanken, stehen Starkregenereignisse mit Überflutungen gegenüber.

## **WENIGER REGEN UND MEHR VERDUNSTUNG = WENIGER ABFLUSS IM SOMMER**

Für die Zukunft sagen die Klimamodelle eine Zunahme der Niederschläge im Winter voraus, und eine Abnahme im Sommer – das Niederschlagsregime im Jahresverlauf verändert sich. Gleichzeitig wird die Verdunstung durch eine höhere Lufttemperatur zunehmen. So hat beispielsweise die Wahrscheinlichkeit einer ausgeprägt trockenen Vegetationsperiode in Süddeutschland schon seit 1985 deutlich zugenommen.

Die vorliegenden Abflusssimulationen zeigen in den Monaten Juni bis November erhebliche Abnahmen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse in den untersuchten Flussgebieten in Süddeutschland. Die mittleren Abnahmen liegen dabei in vielen Flussgebieten bei mehr als 10 Prozent. Lediglich im Einzugsgebiet der Nahe (Rheinland-Pfalz) werden auch Zunahmen ermittelt. Dennoch wird eine einheitliche abnehmende Tendenz deutlich (Darstellung rechts oben). Die stärk-

sten Rückgänge werden in den Herbstmonaten September bis November zu verzeichnen sein. Mit um 21 Prozent geringeren Niedrigwasserabflüssen im Monat September ist der Rückgang im Südwesten und Südosten von Baden-Württemberg bei den Rheinzufüssen besonders ausgeprägt (Grafik rechts unten). Für die Niedrigwasserabflüsse des Rheins selbst zeigt sich die Tendenz, dass die Jahreswerte im Zukunftsszenario höher sind. Aus heutiger Sicht ist also an den Rheinpegeln keine Verschärfung der mittleren Niedrigwasserabflüsse in der nahen Zukunft bis zum Jahr 2050 zu erwarten. Als nächstes wird das Verhalten der extremen Niedrigwasserabflüsse untersucht. Die Niedrigwasserperioden werden in den meisten Regionen länger andauern; südlich einer Linie Karlsruhe – Coburg größtenteils um mehr als 50 Prozent, nördlich dieser Linie einschließlich dem Einzugsgebiet der Nahe um 25 bis 50 Prozent. Die Ursache hierfür sehen Experten in immer häufiger auftretenden großräumigen „Trockenwetterlagen“.

## **WORST CASE NICHT INBEGRIFFEN**

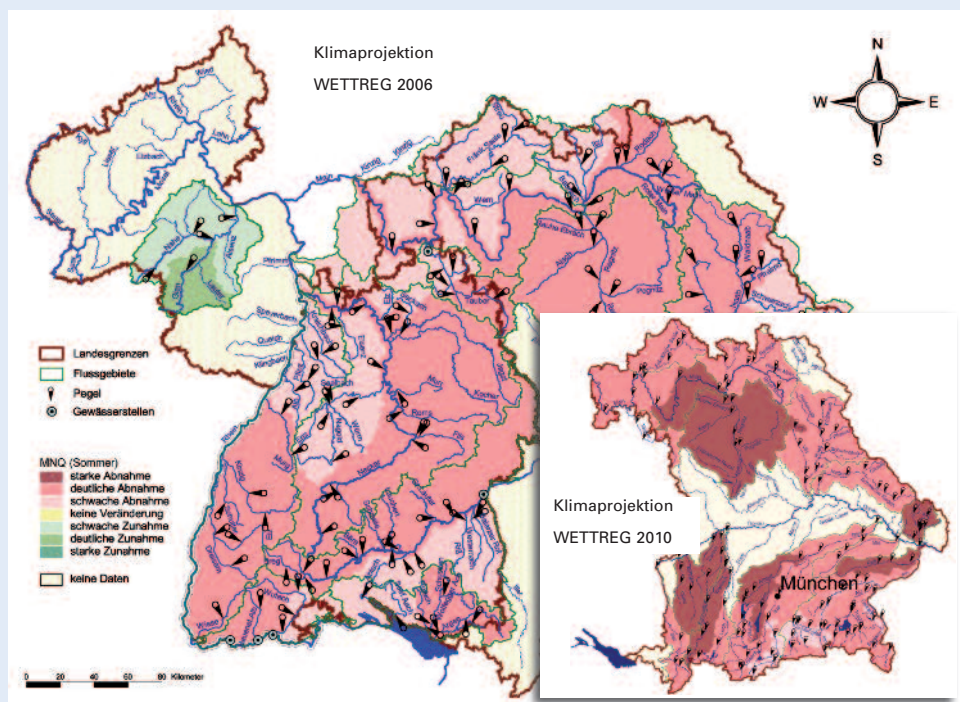
Die Abflusssimulationen zeigen, dass die Niedrigwasserverhältnisse stark von dem zukünftigen Verlauf der mittleren Lufttemperatur und des Niederschlags beeinflusst werden. Die regionalen Klimaprojektionen können jedoch je nach Emissionsszenario und Klimamodell stark variieren (zwischen 1,0 und 1,8°C). Die Niedrigwasserabflüsse und -perioden könnten sich somit auch noch weitaus ungünstiger entwickeln. Eine Aufgabe von KLIWA ist, die künftige Entwicklung für den Niedrigwasserbereich abzuschätzen, um sachgerechte Anpassungsempfehlungen vorschlagen zu können.





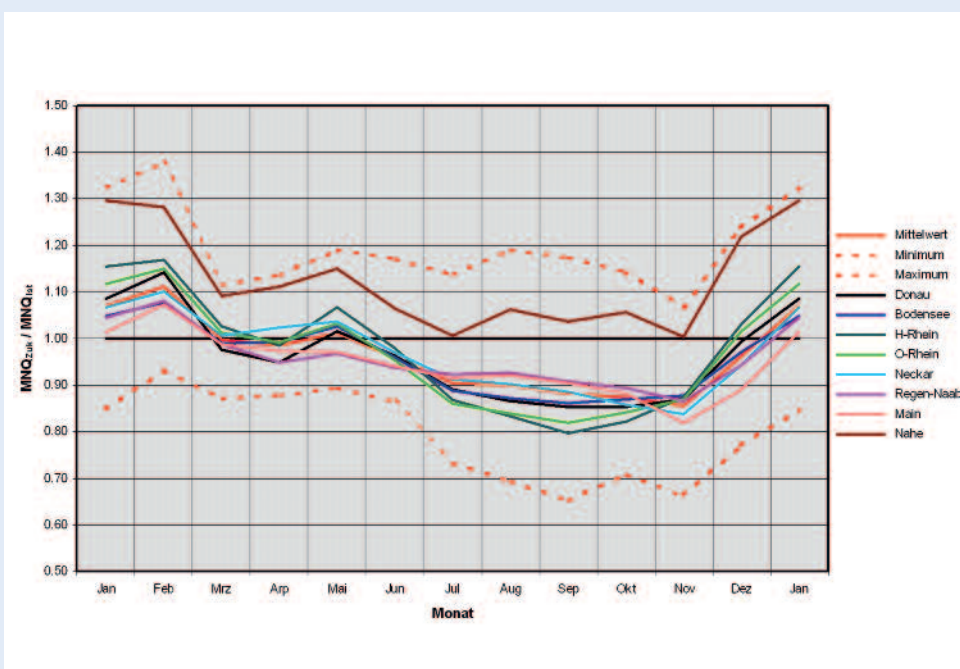
### VERÄNDERUNG DER SOMMERLICHEN NIEDRIGWASSERABFLÜSSE IN DER ZUKUNFT

Die beiden Karten zeigen die räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommerhalbjahr (Juni bis November), abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen der untersuchten Flussgebiete. Die unterschiedlichen Farben verdeutlichen die prozentuale Veränderung im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000. Hierbei sind Ergebnisse von zwei verschiedenen Klimaprojektionen dargestellt: die Ergebnisse der "linken" Karte beruhen auf dem Modell WETTREG 2006, die der "rechten" Karte auf dem Modell WETTREG 2010 für Bayern.



### JAHRESGANG DES NIEDRIGWASSERABFLUSSES

Die Grafik zeigt die Veränderungen des Verlaufs der durchschnittlichen monatlichen Niedrigwasserabflüsse über das Jahr in verschiedenen Flussgebieten, sowie den Mittelwert sämtlicher einbezogenen Pegel und das jeweils ermittelte Minimum und Maximum der Veränderungen. Gezeigt wird jeweils die prozentuale Veränderung der Monatsmittelwerte im Zeitraum 2021-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1971-2000. Die Ergebnisse beruhen hierbei auf der Klimaprojektion WETTREG 2006.







# „flexible and no regret“-Strategie Hochwasser

**Auch wenn die Modellkette Globales Modell – Regionales Modell – Wasserhaushaltsmodell mit Unsicherheiten behaftet ist, weisen die Ergebnisse darauf hin, dass in Zukunft vermehrt mit Hochwasserereignissen zu rechnen ist. Aus Vorsorgegründen wurde daher eine Hochwasser-Anpassungsstrategie entwickelt. Anpassung heißt nicht, dass jetzt überall neue meterhohe Ufermauern errichtet werden. Vielmehr gilt es, die zu erwartenden Folgen der Klimaveränderung mit Maßnahmen abzufangen, die langfristig zweckmäßig und relativ kostengünstig anpassbar sind. Dabei kommt vor allem der Hochwasservorsorge eine besondere Bedeutung zu.**



## DER KLIMAÄNDERUNGSFAKTOR

Bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen wird meist der Wert  $HQ_{100}$  zugrunde gelegt.  $HQ_{100}$  ist der Hochwasserabfluss, der statistisch betrachtet in 100 Jahren einmal überschritten wird. Die auf diesen Wert berechneten Bauwerke sollen also ein „Jahrhunderthochwasser“ abfangen können. Die Simulationen des Wasserhaushalts für die Flussgebiete in Baden-Württemberg und Bayern zeigen, dass die Hochwasserabflüsse besonders im Winter an fast allen Pegeln zunehmen werden. Daher wurde in beiden Ländern – aus Vorsorgeaspekten – festgelegt, bei der Bemessung neuer Hochwasserschutzanlagen die Auswirkungen des Klimawandels durch einen Klimaänderungsfaktor zu berücksichtigen. Für den Neckar wird beispielsweise simuliert, dass die Wasserführung für ein Jahrhunderthochwasser ( $HQ_{100}$ ) bis zum Jahr 2050 um 15 Prozent steigt. Daher soll fortan der Wert  $HQ_{100}$  mit dem Klimaänderungsfaktor 1,15 multipliziert werden, d.h. die Anlagen werden künftig auf einen um 15 Prozent gegenüber dem heutigem Bemessungswert höhere Wasserführung dimensioniert oder so geplant, dass bei Bedarf nachgerüstet werden kann.

## UNTERSCHIEDLICHE KLIMAFOLGEN UND ANPASSUNGSMASSNAHMEN

In Baden-Württemberg wurden mittlerweile alle Flussgebiete unter die Lupe genommen. Die regionalen Unterschiede des Klimawandels schlagen sich auch in den zu erwartenden Hochwasserabflüssen nieder (siehe Bild rechte Seite oben). So wurde für den Bereich der Oberen Donau ein Klimaänderungsfaktor von 1,25 ermittelt. Auch die klei-

neren und mittleren Hochwasser werden zunehmen. Der Abfluss  $HQ_5$  für ein Hochwasserereignis, das heute im Mittel etwa alle fünf Jahre auftritt, steigt an der Oberen Donau um 67 Prozent. Für die Zukunft muss also der aktuelle  $HQ_5$  Wert der Oberen Donau mit dem Klimaänderungsfaktor 1,67 multipliziert werden. Im Bereich der Zuflüsse des Hochrheins beträgt der Klimaänderungsfaktor für das  $HQ_5$  zum Beispiel 1,45. Am geringsten ist er im Gebiet Oberschwaben-Bodensee mit 1,24.

In Bayern wurde auf der Grundlage der früheren Untersuchungsergebnisse mit WETTREG 2003 ebenfalls ein Klimaänderungsfaktor eingeführt, und zwar von pauschal 15 Prozent auf den statistischen Wert von  $HQ_{100}$ . 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 fortentwickelt. Dies kann zu regionalen Anpassungen führen.

In Rheinland-Pfalz gilt: Die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen richtet sich grundsätzlich nach den Randbedingungen des Einzelfalls und orientiert sich an der gefährdeten Bevölkerung, den Hochwasserschadenspotentialen sowie der Wirtschaftlichkeit. Im Anschluss an die Untersuchungen für den „Sonderfall Oberrhein“ werden flächendeckend für Rheinland-Pfalz sowie für den Mittelrhein Abflussuntersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen sollen aufzeigen, ob weitergehende Anpassungsmaßnahmen für Rheinland-Pfalz erforderlich sind.

## HOCHWASSERSCHUTZ – WAS BEDEUTET DAS IN DER PRAXIS?

### Beispiel Hochwasserdamm:

Der Damm wird gebaut wie geplant, an der Außenseite wird aber ein Streifen freigehalten, sodass bei Bedarf der Damm problemlos erhöht und verbreitert werden kann.

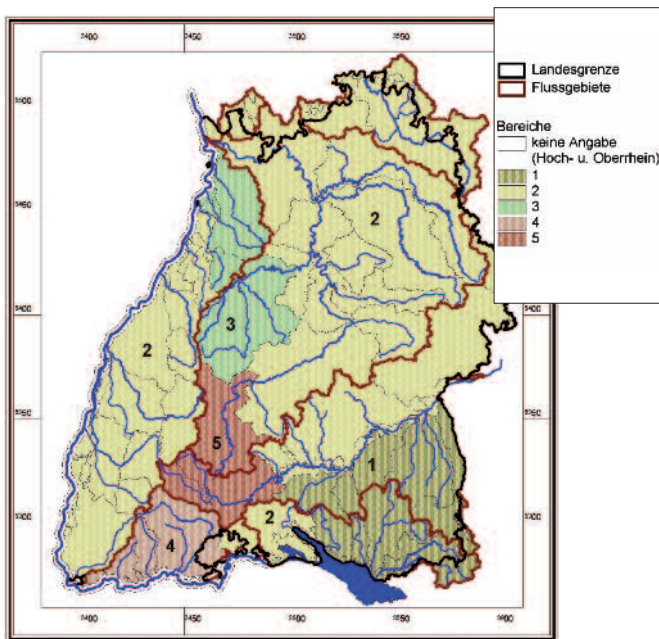
### Beispiel Brücke:

Bei der Planung einer Brücke fließt der regionale Klimaänderungsfaktor schon mit ein, da eine nachträgliche Anpassung oft technisch kaum möglich ist.

### Beispiel Ufermauer:

Bei einer neuen Ufermauer wird die Statik so ausgelegt, dass die Mauer später gegebenenfalls ohne Schwierigkeiten erhöht werden kann.

## KLIMAÄNDERUNGSFAKTOREN IN BADEN-WÜRTTEMBERG



### Klimaänderungsfaktoren $f_{(T,K)}$

T (Jahre)	1	2	3	4	5
2	1,25	1,50	1,75	1,50	1,75
5	1,24	1,45	1,65	1,45	1,67
10	1,23	1,40	1,55	1,43	1,60
20	1,21	1,33	1,42	1,40	1,50
50	1,18	1,23	1,25	1,31	1,35
100	1,15	1,15	1,15	1,25	1,25
200	1,12	1,08	1,07	1,18	1,15
500	1,06	1,03	1,00	1,08	1,05
1000	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Bemerkung: Für Jährlichkeiten  $T > 1000$  a ist der Faktor gleich 1,0

## 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 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.

Erste 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 ist also an den Rheinpegeln keine Verschärfungen der mittleren Hochwasserabflüsse in der nahen Zukunft bis zum Jahr 2050 zu erwarten. Mögliche Veränderungen der extremen Hochwasserabflüsse werden als nächstes untersucht.





# Der Regen wird heftiger Starkregen

**Steigende Lufttemperaturen und zunehmende Verdunstung verstärken den atmosphärischen Wasserkreislauf. In der Folge sind häufiger Starkniederschläge zu erwarten. Die kleinräumigen und kurzzeitigen Ereignisse überfordern immer häufiger Entwässerungsanlagen im Siedlungsbereich. Auf ungeschützte Ackerflächen führen sie zu erhöhter Boden-erosion. Mangels Messungen sind die Änderungen derzeit nur modellmäßig abzuschätzen.**



*Durch Starkregen überlastete Kanalisation (Quelle: itwh)*

## SIEDLUNGSENTWÄSSERUNG

Regenwasser, das nicht versickert oder ortsnah in ein oberirdisches Gewässer einmündet, wird in bebauten Gebieten über Entwässerungseinrichtungen abgeleitet. Die Probleme bei der Siedlungsentwässerung entstehen durch sehr kurze aber heftige Niederschlagsereignisse bzw. Sturzregen die auch zu Überflutungen führen können. Es ist nachgewiesen, dass solche Ereignisse regional häufiger und intensiver werden. Allerdings fehlen lange Messreihen, die flächendeckend repräsentativ sind.

Mit der in der Planungspraxis üblichen Methode "Langzeitsimulation" können bereits jetzt konkrete Aussagen über das Verhalten eines Kanalsystems unter den künftigen Klimabedingungen gewonnen werden. Dazu werden synthetische Regenreihen benötigt. Mit dem Computerprogramm NiedSim können solche synthetische Regenreihen erzeugt werden. Dieses Programm wird von den KLIWA-Partnern eingesetzt.

In der neuesten Entwicklungsstufe NiedSim-Klima wurden die aktuell verfügbaren Ergebnisse der Klimaforschung berücksichtigt. Damit können Regenreihen erzeugt werden, die für die Klimaverhältnisse beliebiger Zieljahre bis 2050 repräsentativ sind. Sobald die Klimaforschung neue Ergebnisse liefert, werden diese in NiedSim-Klima berücksichtigt.

Vergleichende Untersuchungen für die Jahre 2010, 2030 und 2050 über das Verhalten ihrer Entwässerungssysteme werden bereits von einigen Kommunen durchgeführt. Daneben sollen in Grundsatzuntersuchungen allgemeine Aussagen zu den zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die Siedlungswasserwirtschaft abgeleitet werden.

## BODEN UNTER DEN FÜSSEN VERLIEREN

Einzelne, intensive Niederschläge wie bei einem Gewitter können nicht nur Straßen und Keller überfluten, sondern insbesondere bei ungeschützten, vegetationsfreien Böden massive Erosionsschäden verursachen. Dadurch geht nicht nur fruchtbarer Boden verloren, auch außerhalb der eigentlichen Erosionsflächen kommt es zunehmend zu Schäden, zum Beispiel durch verschlammte Wege und Ortslagen. Daher wird in einem KLIWA-Teilprojekt untersucht, wie sich das zukünftige Erosionsrisiko durch Starkregen verändert.

## KLIMA- UND EROSIONSMODELLIERUNG

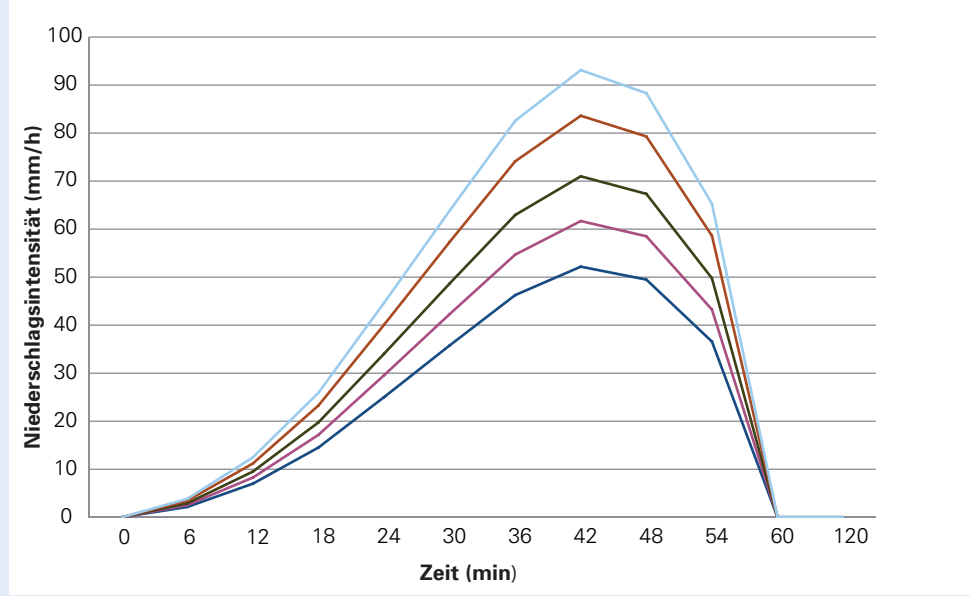
Um das künftige Erosionsrisiko abschätzen zu können, wird ein regionales Klimamodell mit einem Bodenerosionsmodell gekoppelt. Die dafür notwendigen Niederschlagsdaten in räumlich und zeitlich hoher Auflösung werden mit dem regionalen Klimamodell COSMO-CLM erzeugt. Durch das sogenannte „Nesting“ werden dabei die Modelldaten einer gröberen Auflösung als Randbedingung für die feinere Auflösung des regionalen Klimamodells genutzt. So werden stufenweise einzelne Starkniederschläge mit einer Zielauflösung von 1 x 1 km und 15 Minuten simuliert. Diese Niederschlagsdaten dienen als Eingangsparameter für das physikalische Erosionsmodell LISEM (Limburg Soil Erosion Model), mit dem in ausgewählten, erosionsgefährdeten Gebieten die Höhe des Bodenabtrags und Wasserabflusses berechnet wird.





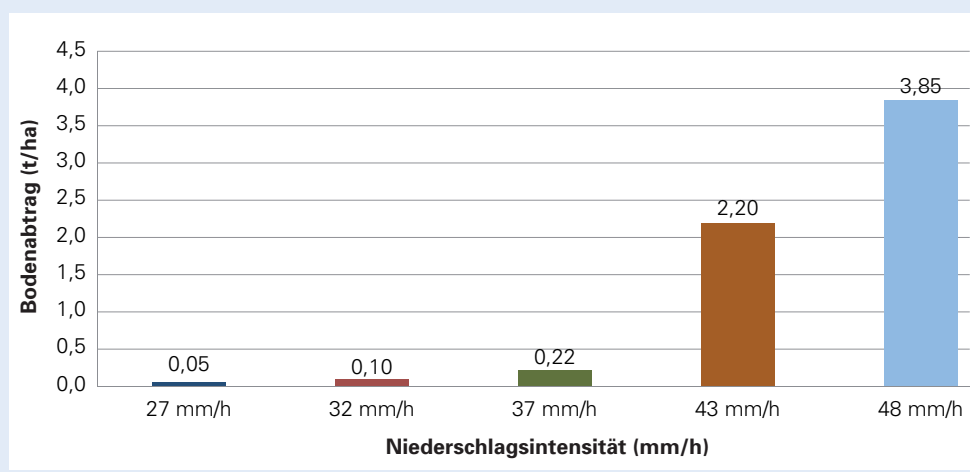
**EINSTÜNDIGE NIEDERSCHLAGSGANGLINIE FÜR UNTERSCHIEDLICHE JÄHRLICHKEITEN (5 BIS 100 JAHRE)**

Neben den Eingabeparametern zu Relief, Boden und der Vegetation benötigt das Erosionsmodell LISEM Daten zur Niederschlagsdauer und -intensität. Auf Basis des KOSTRA-Atlas (DWD, 2005) wurden Niederschlagsganglinien generiert, die als Eingabeparameter für LISEM dienen. Damit wurde geprüft, ab welcher Niederschlagsintensität die Höhe des Bodenabtrags signifikant zunimmt.



**MIT LISEM MODELLIRTER BODENABTRAG AUF DER GRUNDLAGE DER KOSTRA-DATEN IN EINEM EXEMPLARISCHEN LÖSSGEBIET**

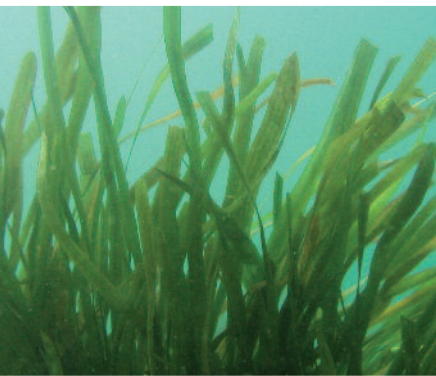
Aus der Darstellung wird deutlich, dass ab einer Niederschlagsintensität größer 37 mm/h die Höhe des Bodenabtrags sprunghaft ansteigt. Obwohl die Niederschlagsintensität nur um 16% auf 43 mm/h zunimmt, erhöht der Bodenabtrag um das Zehnfache. Inwiefern solche kritischen Starkniederschläge künftig zunehmen, wird im Rahmen des KLIWA-Teilprojektes genauer 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 Datengrundlage erschweren die Antworten.



## WASSERSCHRAUBE

Die in Süddeutschland eingebürgerte Wasserschraube (*Vallisneria spiralis*) ist eine beliebte Aquariumpflanze mit Herkunft aus den Tropen und Subtropen. Sie gilt als ein möglicher Profiteur des Klimawandels. In der Mosel bildet sie mittlerweile große Bestände und verdrängt stellenweise den einheimischen Igelkolben.

KLIWA-Studie  
[www.fliessgewaesserbiologie.de](http://www.fliessgewaesserbiologie.de)

## IM WASSER WIRD ES WÄRMER

Erwärmt sich die Luft, dann erwärmen sich auch die Bäche, Flüsse und Seen. Geänderte Niederschläge führen zu geänderten Abflüssen. Doch nicht nur die Gewässerökologie muss sich darauf einstellen. Auch die weitreichenden Nutzungen der Gewässer werden betroffen sein. So wird zum Beispiel das Kühlwasser für Kraftwerke zu warm und verliert an Effizienz.

## VIelfÄLTIGE EinFLÜsse Auf Die GewÄssERÖkologie

Der Klimawandel verändert in Bächen, Flüssen und Seen grundlegende Faktoren wie z. B. die Wassertemperatur, die Abflussverhältnisse, den Eintrag von Feinsedimenten oder auch die Konzentration von Nährstoffen. Dies 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 von Gewässern 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.

Eine von KLIWA beauftragte Literaturstudie mit Fokus auf die Fließgewässer im süddeutschen Raum zeigt in Wirkungsketten die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Fließgewässerqualität im regionalen Maß-

stab der drei Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Die Studie belegt mit einer umfangreichen Literatur- und Sensitivitätsanalyse, dass zukünftig mit Veränderungen in der Fließgewässerqualität in vielen Bereichen gerechnet werden muss, deckt aber auch große Wissenslücken 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, wird das aktuelle Fließgewässermonitoring auf den Prüfstand gestellt und darüber hinaus aussagekräftige Auswerteverfahren und Bewertungsansätze erarbeitet. Welches sind maßgebliche Indikatoren? An welchen Gewässern müssen sie wie häufig untersucht werden? Die Antworten dazu sind die Grundlage zur Schaffung einer Datenbasis, die künftig viele Fragezeichen beseitigen und sachgerechte Anpassungsmaßnahmen ermöglichen soll.

## NEOBIOTA – GEWINNER DES KLIMAWANDELS?

Neobiota sind Arten, die unter direkter oder indirekter Mitwirkung des Menschen eingewandert sind. Vor allem in den letzten zwei Jahrzehnten treten in Deutschland viele neue Arten auf. Dies ist vor allem auf die Vernetzung von Flusssystemen durch Schifffahrtskanäle zurückzuführen. Viele Neobiota sind tolerant gegenüber Temperaturänderungen, Eutrophierung sowie Versalzung und profitieren damit indirekt vom Klimawandel. In einer KLIWA-Studie sind 30 dieser Arten genauer beschrieben.



**VERNETZTE ZUSAMMENHÄNGE**

In kühlen Bächen verändert der Klimawandel die Wassertemperaturen und das jahreszeitliche Abflussmuster. Eine veränderte Schneebedeckung, vermehrte Starkniederschläge oder lange Trockenperioden im Sommer verändern sogar die Gestalt des Bachbettes mit seinen Kleinstlebensräumen. Dadurch können die Lebensgemeinschaften im Bach empfindlich gestört werden.



# Ausblick

**In der Zukunft sind zunehmend wärmere und trockenere Sommer sowie mildere und feuchtere Winter zu erwarten. Die sich verändernde Niederschlagsverteilung wird den regionalen Wasserkreislauf und damit auch den Wasserhaushalt unserer Flussgebiete verändern.**

KLIWA hat sich zunächst vor allem der Hochwasserproblematik angenommen und konkrete Anpassungsmaßnahmen erarbeitet. Die Untersuchung der Auswirkungen auf die Abflüsse in Rhein und Donau sind noch im Gange. Mittlerweile sind auch die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse und die Grundwasserverhältnisse mehr in den Mittelpunkt der Untersuchungen gerückt. Ein veränderter Wasserhaushalt hat unmittelbare Folgen auf die Gewässernutzungen – sei es die direkte Entnahme zur Trinkwasserversorgung und zur landwirtschaftlichen Bewässerung, die Nutzung als Kühlwasser für die Kraftwerke der Energiewirtschaft oder als Verkehrswege für die Schifffahrt. Damit verknüpft ist die Frage nach den Auswirkungen auf die Gewässergüte und den ökologischen Zustand unserer Gewässer; hier liegt zur Zeit einer der KLIWA-Arbeitsschwerpunkte.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist der erwartete Anstieg heftiger Kurzzeitniederschläge (Gewitter). Diese Starkniederschläge können lokale Überschwemmungen oder durch Bodenerosion erhebliche Schäden für die Landwirtschaft verursachen und bedeuten zusätzliche Herausforderungen für den Bodenschutz. Dies stellt auch die kommunalen Entwässerungsnetze vor vermehrte Probleme. Da die Folgenabschätzung des Klimawandels auf Datengrundlagen beruht, die durch Klimamodelle ermittelt werden, ist es wichtig, diese Klimamodelle weiter zu verfeinern und Unsicherheitsfaktoren zu minimieren. Auch hier will KLIWA einen Beitrag leisten.

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 dazu beitragen, damit unsere Nachkommen nicht vor noch größeren Problemen stehen.

Der Klimawandel ist derzeit die größte Herausforderung der Menschheit – und jeder ist davon betroffen ■



