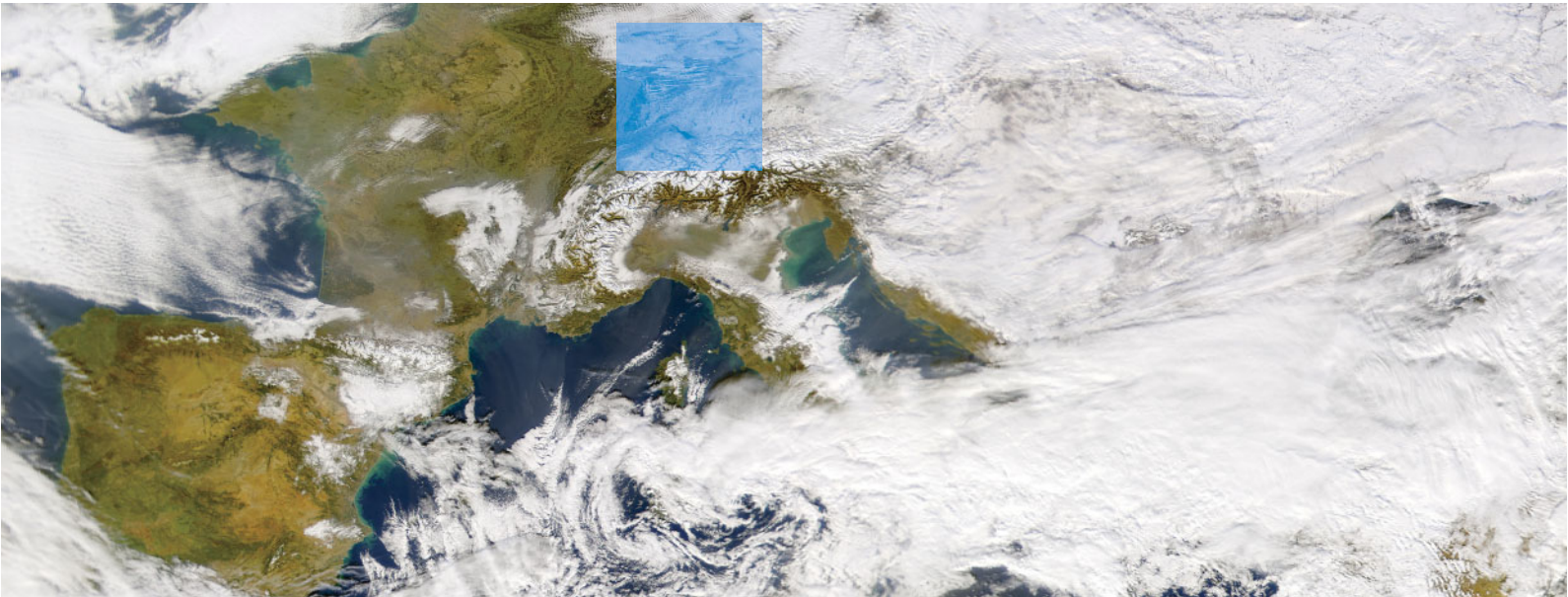
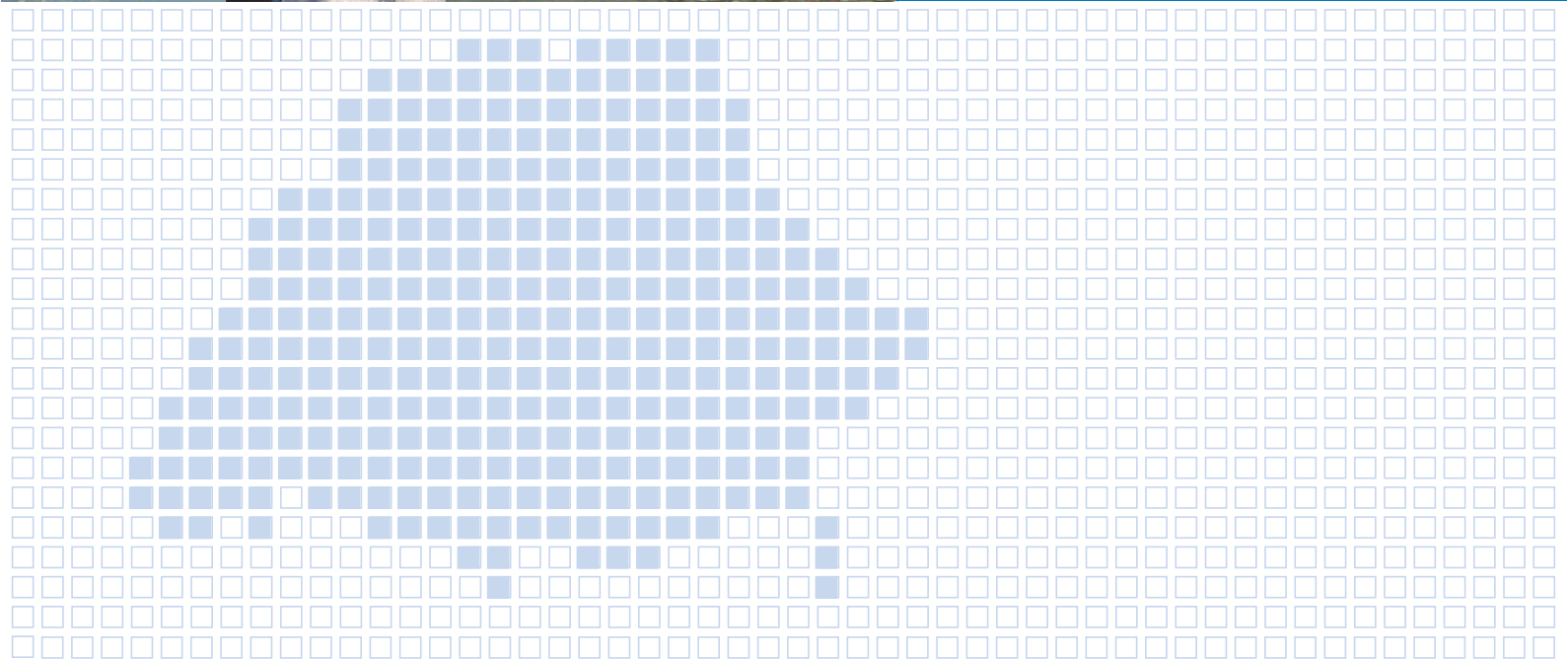


# Unser Klima verändert sich **Folgen – Ausmaß – Strategien**



**AUSWIRKUNGEN AUF DIE WASSER-  
WIRTSCHAFT IN SÜDDEUTSCHLAND**





**Tanja Gönner**  
Umweltministerin  
des Landes Baden-Württemberg



**Dr. Werner Schnappauf**  
Bayerischer Staatsminister für Umwelt,  
Gesundheit und Verbraucherschutz



**Wolfgang Kusch**  
Präsident des  
Deutschen Wetterdienstes

Das Sachverständigen-Gremium „Intergovernmental Panel on Climate Change“ der Vereinten Nationen geht davon aus, dass sich infolge des anthropogen verursachten „Treibhauseffektes“ die mittlere globale Temperatur in den nächsten Jahrzehnten deutlich erhöhen wird. Damit einhergehen wird eine signifikante Änderung des globalen Klimas. Diese Klimaänderung wird Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt haben. Verlässliche Aussagen über die Folgen des Klimawandels auf Länderebene waren bisher jedoch nicht möglich. Es mangelte an Daten und Fakten, wie die künftige Entwicklung des Wasserhaushaltes und seiner Komponenten abzuschätzen und zu bewerten ist.

Mit dem Kooperationsvorhaben KLIWA haben sich die Länder Baden-Württemberg und Bayern zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst das Ziel gesetzt, mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt süddeutscher Flussgebiete herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen abzuleiten. Zunächst lieferte die Analyse und Bewertung von meteorologischen und hydrologischen Daten des 20. Jahrhunderts die Grundlage für die Abschätzung bereits eingetretener Klimaänderungen. Die Entwicklung neuartiger regionaler Klimaszenarien erlaubte erstmals in Deutschland Aussagen über regionale Klimafolgen. Die Übertragung dieser Ergebnisse auf die in den Ländern vorhandenen Wasserhaushaltsmodelle machen so insbesondere Aussagen über die Entwicklung des Hochwassergeschehens in den nächsten 50 Jahren möglich.

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern haben damit bundesweit als erste den Klimaänderungsfaktor bei der Bemessung von technischen Hochwasserschutz-einrichtungen eingeführt. So kann bereits bei der Planung die prognostizierte Erhöhung von Hochwasserabflüssen berücksichtigt werden.

Mit KLIWA verfolgt die Klimaschutzpolitik in den Ländern Baden-Württemberg und Bayern einen wichtigen Baustein einer vorausschauenden Daseinsvorsorge.

INHALT	SEITE
<b>1</b> DAS KLIMA DER ERDE	<b>4</b>
<b>2</b> KLIWA – KLIMAVERÄNDERUNG UND WASSERKREISLAUF	<b>6</b>
<b>3</b> KLIWA – VERÄNDERUNGEN IM 20. JAHRHUNDERT	<b>8</b>
<b>4</b> KLIMAFORSCHUNG MIT MODELLEN	<b>10</b>
<b>5</b> WASSERHAUSHALTS- MODELLE	<b>12</b>
<b>6</b> KLIWA – UNSER KLIMA VON MORGEN	<b>14</b>
<b>7</b> ANPASSUNGSSTRATEGIEN FÜR DIE ZUKUNFT	<b>16</b>

## IMPRESSUM

### Herausgeber

LUBW Landesanstalt für Umwelt,  
Messungen und Naturschutz  
Baden-Württemberg  
Referat 43  
Hydrologie und Hochwasservorhersage  
Griesbachstr. 1  
76185 Karlsruhe

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Referat 81  
Klimawandel, Klimafolgen und  
Wasserhaushalt  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg

im Auftrag des Umweltministeriums  
Baden-Württemberg und des  
Bayerischen Staatsministeriums für  
Umwelt, Gesundheit und Verbraucher-  
schutz und des Deutschen Wetterdienstes

### Konzept und Realisation

ÖkoMedia PR, Stuttgart

**Stand: August 2006**

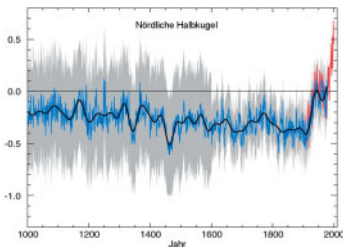
## WEITERE INFORMATIONEN

[www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)  
[www.um.baden-wuerttemberg.de](http://www.um.baden-wuerttemberg.de)  
[www.stmugv.bayern.de](http://www.stmugv.bayern.de)  
[www.lubw.baden-wuerttemberg.de](http://www.lubw.baden-wuerttemberg.de)  
[www.bayern.de/lfu](http://www.bayern.de/lfu)  
[www.dwd.de](http://www.dwd.de)



# Spielt das Klima verrückt...

2002 setzte das Jahrhunderthochwasser an Elbe und Donau weite Landstriche unter Wasser, 2003 folgte der Jahrhundertssommer mit Temperaturen bis zu 40°C. 2005 war weltweit das wärmste Jahr seit Beginn der Wetteraufzeichnungen. Im Winter 2005/2006 lag der Schnee in manchen Regionen so hoch, dass selbst Schneepflüge kapitulierten und Hallendächer einstürzten, weil sie den außergewöhnlich hohen Schneemassen nicht standhalten konnten. Ist diese Häufung der Wetterextreme Zufall oder ein Hinweis dafür, dass der Klimawandel schon in vollem Gange ist?



Abweichung der Jahresmitteltemperatur (°C) von der Durchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel 1961 – 1990.

Wie die Grafik zeigt, fand mit Beginn des 20. Jahrhunderts eine deutliche Klimaerwärmung auf der Nordhalbkugel statt.

## ...ODER SIND DAS GANZ NORMALE WETTERKAPRIOLEN?

Im Laufe der Jahrtausende war das Erdklima immer wieder größeren natürlichen Schwankungen unterworfen. Mal war Europa tropisch, mal lasteten mächtige Eispanzer auf dem Land. Sedimentbohrkerne, Pollenanalysen und Baumringe geben Aufschluss über die frühen Klimaschwankungen der Erde. Seit etwa 1860 werden Wetterdaten regelmäßig und systematisch erfasst. Deren Auswertung weltweit zeigt, dass sich seit Beginn der Klimaaufzeichnungen die globale Durchschnittstemperatur um etwa 1 °C erhöht hat. Das scheint keine große Veränderung zu sein – stimmt aber bedenklich, wenn man in Betracht zieht, dass es während der letzten Eiszeit, die vor rund 10.000 Jahren zu Ende ging, auf der Erde nur 4–5 °C kühler war als heute.

## TREIBHAUS ERDE

Die angenehme globale Durchschnittstemperatur von momentan +15 °C haben wir dem natürlichen atmosphärischen Treibhauseffekt zu verdanken. Die Erdatmosphäre, die die Erde wie eine wärmende Hülle umgibt, besteht aus 78 Prozent Stickstoff, 21 Prozent Sauerstoff und einem Prozent Edelgasen. Dazu kommen die Gase Wasserdampf, Kohlendioxid und Methan, die nur 0,1 Prozent der Atmosphäre ausmachen. Diese Spurengase 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 der Erde bei lebensfeindlichen –18 °C liegen.

Die historischen Klimaschwankungen sind auf natürliche Ursachen wie eine veränderte Sonnenaktivität sowie auf die Erdrotation zurückzuführen – und spielten sich in Zeiträumen von 10.000 oder 100.000 Jahren ab. Doch seit Beginn der Industrialisierung steigt der Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre, der während des letzten Jahrtausends relativ konstant bei etwa 280 ppm (parts per million) lag, an. Mittlerweile (2006) werden 377 ppm gemessen, die jährliche Steigerungsrate liegt bei etwa 1,5 ppm. Dieser anthropogene (vom Menschen verursachte) Treibhauseffekt lässt die Temperatur der Erde ansteigen. Die Treibhausgasgehalte der Atmosphäre beeinflussen maßgeblich die globale Temperatur. Daher ist es für die Vorhersage des Erdklimas wichtig, durch realitätsnahe Annahmen von Treibhausgaskonzentrationen, die Bandbreite der künftigen Globaltemperatur zu kennen.

## MENSCH, WAS MACHST DU DENN FÜR EIN KLIMA!

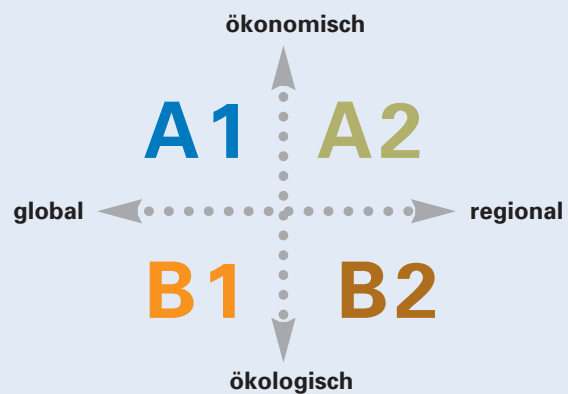
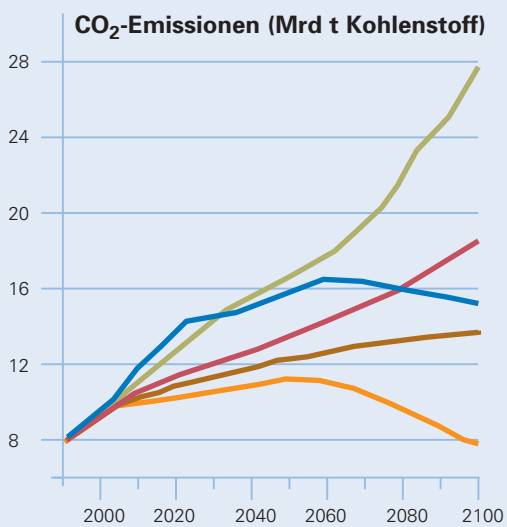
Um die Entwicklung des Erdklimas realistisch abschätzen zu können, muss daher neben den natürlichen Klimafaktoren der „Faktor Mensch“ berücksichtigt werden. Dazu wurden von dem Sachverständigen-Gremium „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) der Vereinten Nationen sogenannte Emissions-Szenarien entwickelt. In diese Szenarien fließt ein, wie sich die Weltbevölkerung entwickeln wird, welchen Lebensstandard sie anstrebt, welche Energieträger sie verwenden und wieviel Energie sie verbrauchen wird. Die Szenarien reichen von einer „Wir machen weiter wie bisher“-Gesellschaft bis zu einer sich vom Materialismus abkehrenden, umweltbewussten Weltbevölkerung.



## ANTHROPOGENE TREIBHAUSGASE UND IHRE WESENTLICHEN EMISSIONSQUELLEN

<b>Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>)</b>	→ Verbrennung fossiler Brennstoffe
<b>Methan (CH<sub>4</sub>)</b>	→ Reisanbau, Viehzucht, Müllfäulnis
<b>Distickstoffoxid (N<sub>2</sub>O)</b>	→ Verbrennungsvorgänge, Verkehr
<b>Fluorkohlenwasserstoffe (FCKW)</b>	→ Spraydosen, Kühlschränke

## IPCC-EMISSIONS-SZENARIEN



**A1** Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer und effizienter Technologien.

**A2** Eine heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionelle Werte (family values and local traditions).

**B1** Eine sich vom Materialismus abkehrende Welt und die Einführung sauberer Technologien.

**B2** Eine Welt mit Schwerpunkt auf lokale Lösungen für ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit.

**IS92a** „Wir machen so weiter wie bisher“- Szenarium (1992)



# Mit **KLIWA** dem süddeutschen Klima auf der Spur

**Aufgrund der Ergebnisse der Klimamodellierung mit unterschiedlichen Modellen und den IPCC-Szenarien gehen die führenden Forschungsinstitute von einer globalen Erwärmung von 1,4 °C bis 5,8 °C in den nächsten hundert Jahren aus. Dieser Temperaturanstieg wird Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben, was sich in stärkerer Verdunstung, vermehrter Wolkenbildung, höheren Niederschlägen und veränderter Wasserführung in den Gewässern äußern kann.**

Das Kooperationsvorhaben KLIWA ist in mehrere aufeinander aufbauende Bereiche aufgeteilt

## **PROJEKTBEREICHE VON KLIWA**

### **Bereich A:**

Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts

### **Bereich B:**

Abschätzung der möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

### **Bereich C:**

Erfassung künftiger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts

### **Bereich D:**

Anpassung des wasserwirtschaftlichen Handelns

Für gezielte regionale Hochwasserschutzmaßnahmen muss man wissen, welche Flussgebiete besonders hochwassergefährdet sind. Dazu ist auch eine regionale Klimaprognose notwendig. Bislang wurden Klimamodelle jedoch nur global oder für großräumige Gebiete wie z.B. Nord-europa erstellt.

## **HAT DER KLIMAWANDEL SCHON EINGESETZT?**

Angesichts der Häufung von Hochwasserereignissen in den letzten Jahren stellt sich die Frage, ob dies nun schon Vorboten des Klimawandels sind oder nicht. Alles ganz normal? Oder werden wir in Zukunft vermehrt mit solchen extremen Wetterlagen und Hochwassern leben müssen? Wenn ja, kann man in diesem Fall voraussagen, wie sich das Klima und der Wasserhaushalt bei uns ändern werden und wie man geeignet darauf reagieren kann?

## **DAS PROJEKT KLIWA**

Um dieser Frage konkret nachzugehen, kamen die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst überein, in dem Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (**KLIWA**) längerfristig gebiets- und fachübergreifend zusammenzuarbeiten. Ziel von **KLIWA** ist es, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt süddeutscher Flussgebiete herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen zu entwerfen.

## **EINFLÜSSE AUF DEN WASSERHAUSHALT – VORGEHENSWEISE**

Inzwischen kann das Projekt KLIWA eine Vielzahl von Ergebnissen aufweisen. Zunächst wurden langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten bayerischer und baden-württembergischer Wetterstationen analysiert und Trends ermittelt. Diese Stationen dienen als Grundlage für die Simulation mit regionalen Klimamodellen für

den Zeitraum 2021–2050. Mit den zukünftigen Klimadaten wurden wiederum engmaschige Modelle für den Wasserhaushalt der einzelnen Flussgebiete gefüttert. Zum Teil werden schon konkrete Handlungsempfehlungen ausgesprochen. Zunächst konzentrieren sich die Untersuchungen noch auf die Hochwasserproblematik. Im Weiteren sollen auch andere Auswirkungen auf den Wasserhaushalt wie Niedrigwasser oder veränderte Grundwasserneubildung beleuchtet werden.

## **DONNERWETTER, UNSER KLIMA**

Unter Klima versteht man das langjährige mittlere Verhalten von meteorologischen Größen, insbesondere Temperatur und Niederschlag, während mit Wetter der aktuell herrschende Zustand dieser meteorologischen Größe gemeint ist. Mit der Wettervorhersage wird versucht, das Wetter der nächsten Tage in seinem zeitlichen Ablauf möglichst genau vorherzusagen. Die langfristige Änderung des Klimas wird dagegen durch Klima-Szenarien abgebildet, d.h. hier werden möglichst zukünftige Klimazustände beschrieben, abhängig von den sie beeinflussenden künftigen gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technischen Entwicklungen. Klima-Szenarien beziehen sich immer auf längere Zeitabschnitte in der Zukunft – mindestens 30 Jahre.

## **KLIWA IM WEB**

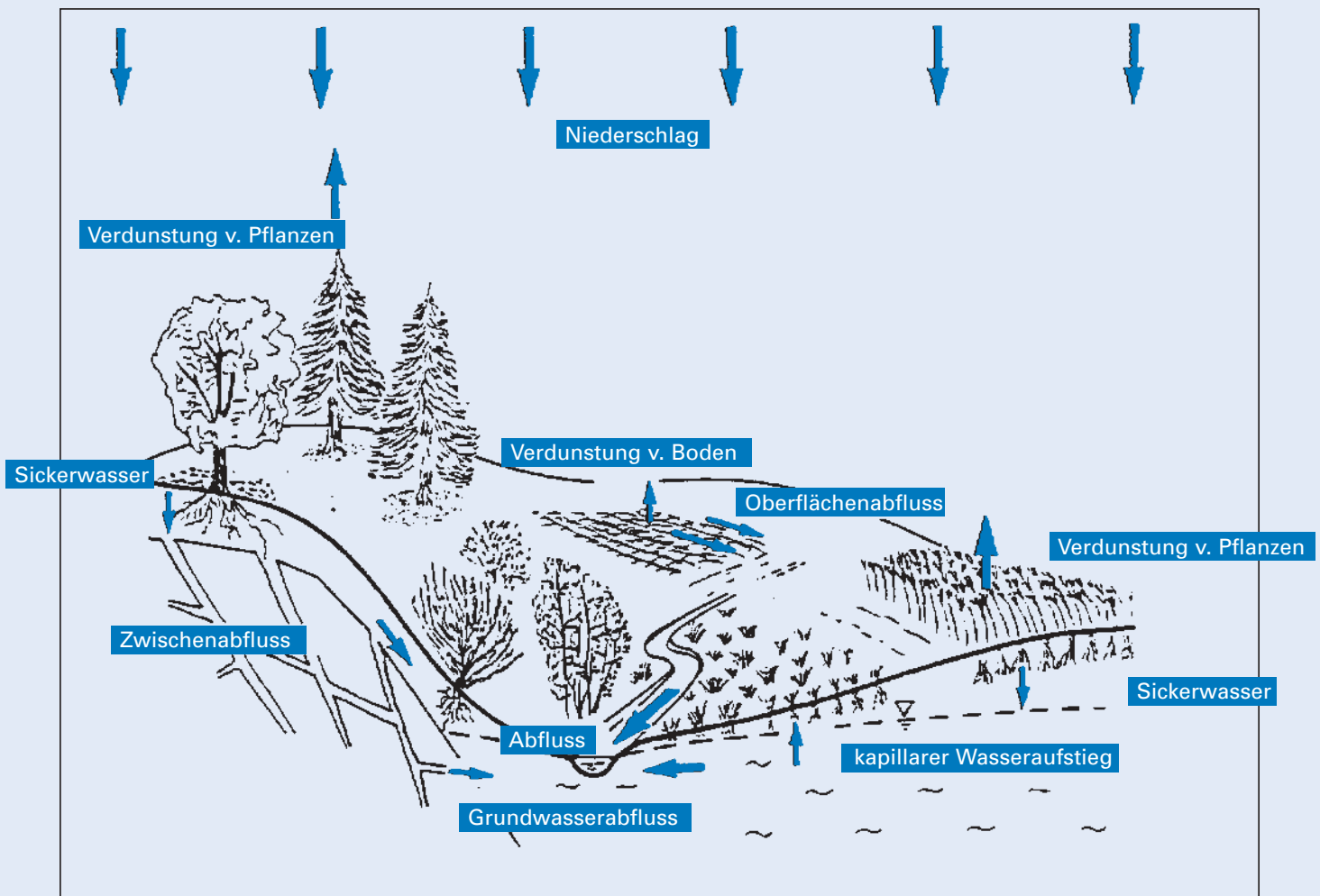
Weitere Informationen über das **KLIWA**-Projekt können auf der Homepage [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) abgerufen werden. Im Download-Bereich stehen umfassende Berichte und Publikationen über Ergebnisse und Arbeitsweisen bereit.



## DER KREISLAUF DES WASSERS

Die Erdoberfläche ist zu zwei Dritteln mit Wasser bedeckt. Dieses Wasser ist natürlich nicht ortsfest, sondern 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 Niederschlag – Regen oder

Schnee – wieder auf die Erde. Der Niederschlag fließt über Gewässer ab oder versickert im Boden und trägt so zur Grundwasserneubildung bei. Das meiste Wasser jedoch verdunstet wieder. Die einzelnen Komponenten des natürlichen Wasserkreislaufes werden durch den Klimawandel verändert.



Schematische Darstellung von Komponenten des Wasserhaushaltes  
(Nach Wohlrab et al. 1992, verändert)



# Im Fokus: Das Klima im 20. Jahrhundert

**Der Klimawandel ist keine Zukunftsmusik. Klimawandel hat längst schon begonnen. Um die bisherige Klimaentwicklung einschätzen zu können, müssen zuerst die Daten aus der Vergangenheit untersucht werden. Aus der Untersuchung langjähriger Messreihen lässt sich die natürliche Schwankungsbreite der Wetterdaten bestimmen und eventuell ein Trend ablesen. Für das KLIWA-Projekt wurden Messwerte von über 350 süddeutschen Wetterstationen herangezogen.**



## ES IST WÄRMER GEWORDEN

Die durchschnittliche Lufttemperatur in Süddeutschland ist im Zeitraum von 1931–2000 um 0,5–1,2 °C gestiegen. Dabei ist der stärkste Anstieg ab den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen. Am ausgeprägtesten war die mittlere monatliche Temperaturzunahme im Monat Dezember mit 1,8 – 2,7 °C, vor allem im Westen und in den tieferen Lagen bis 500 m über NN.

## WEISSE WEIHNACHT – ERINNERUNG AUS KINDERTAGEN

Mildere Winter bedeuten weniger Schnee. Auch hier ist der Trend aus den langjährigen Messreihen klar erkennbar. Vor allem in den tiefer gelegenen Gebieten bis 300 m ü. NN und in den westlichen Landesteilen nahm in den Jahren ab 1951/52 die Schneedeckendauer um 30–40 Prozent ab, in den mittleren Lagen (300–800 m ü. NN) um 10–20 Prozent. Lediglich in den Hochlagen fiel teilweise sogar mehr Schnee. Da Schnee nichts anderes ist als zeitweise festgesetztes Wasser, ist die Schneebedeckung eine wichtige Größe im Wasserhaushalt, z.B. für die Wasserführung in den Gewässern.

## TROCKENE SOMMER, VERREGNETE WINTER

Die jährliche Niederschlagsmenge ist in den meisten Gebieten im Untersuchungszeitraum etwa gleich geblieben. Verändert hat sich aber die Niederschlagsverteilung: Das Winterhalbjahr ist feuchter, das Sommerhalbjahr trockener geworden.

Die Niederschläge haben vor allem im Winter in manchen Regionen um bis zu 35 Prozent zugenommen. Besonders betroffen sind in Baden-Württemberg der Schwarzwald und der Nordosten, in Bayern Franken und Teile des Bayerischen Waldes.

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

Die vermehrten Niederschläge im Winter sind auf die Zunahme bestimmter Großwetterlagen über Europa zurückzuführen. Eine Zeitreihenanalyse von 1881 bis 1989 ergab, dass sich besonders in den Monaten Dezember und Januar die sogenannten zonalen Zirkulationen häuften. Die hydrologisch bedeutsamste 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. Trauriges Beispiel ist der Sturm „Lothar“, der im Dezember 1999 eine Schneise der Verwüstung durch Westeuropa schlug.

## WO FLIESST ALL DER REGEN HIN...

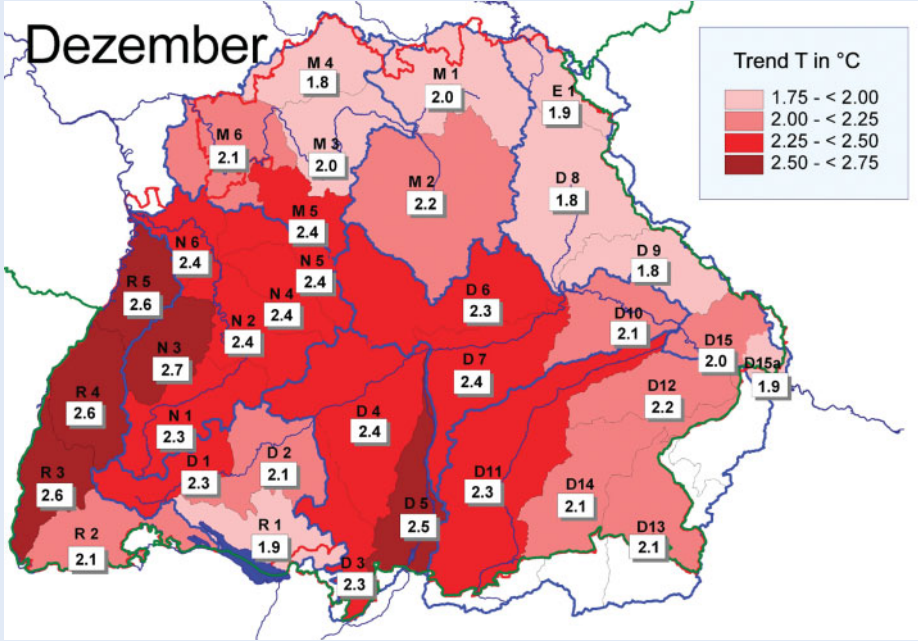
... in der Regel an den Pegel. Die Langzeitmessungen an ausgewählten Flusspegeln zeigen, dass in den letzten 30 Jahren die Hochwasserereignisse in Baden-Württemberg und Bayern vor allem im Winterhalbjahr zugenommen haben.





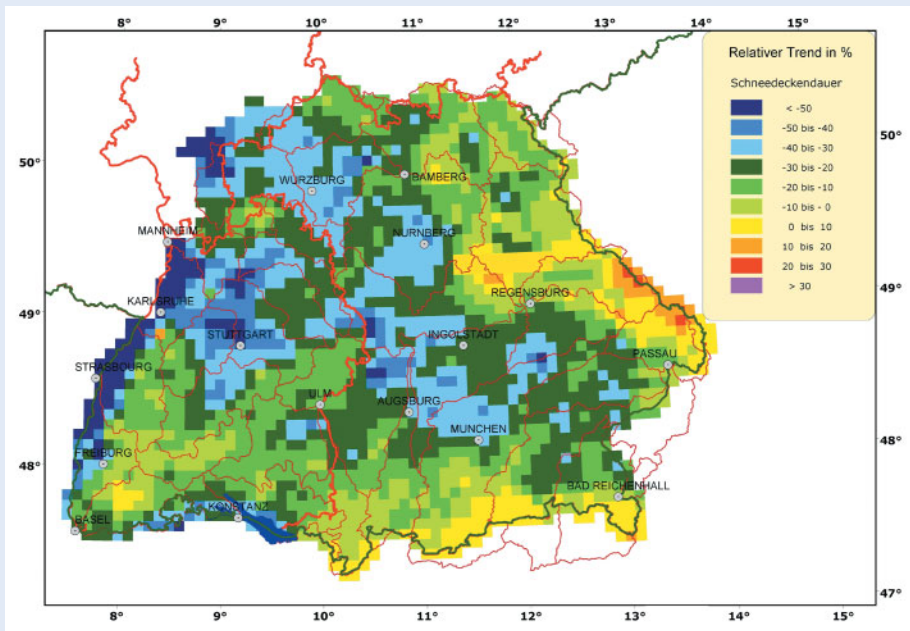
LUFTEMTEMPERATUR

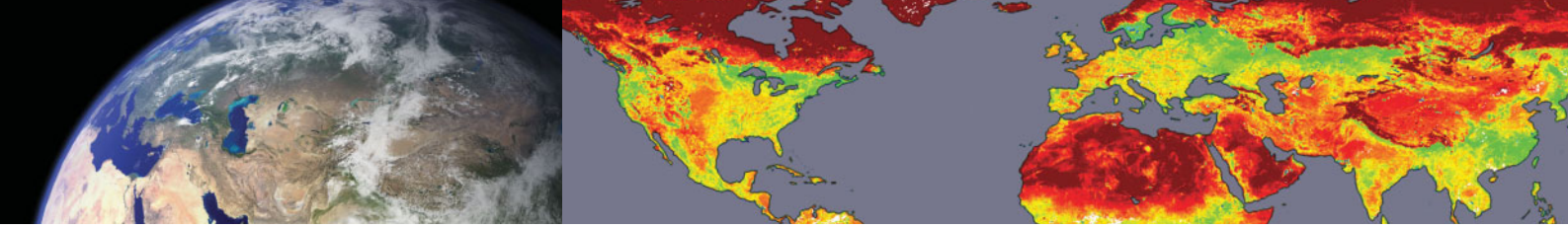
Mittlere Temperaturzunahme  
im Monat Dezember im  
langjährigen Mittel von  
1931–2000.



SCHNEEDECKENDAUER

Rückgang der mittleren  
Schneedeckendauer im  
Zeitraum 1951/52–1995/96.





# Instrumente der **Klimaforschung**

**Fast alle führenden Forschungsinstitute gehen mittlerweile von einem globalen Klimawandel aus. Selbst schnelle und effektive Klimaschutzmaßnahmen können die sich abzeichnende Klimaänderung nicht verhindern, denn das heute in die Atmosphäre abgegebene Kohlendioxid wird dort noch 30–40 Jahre wirksam sein und zur Erwärmung beitragen. Zudem ist es beim derzeitigen Energiehunger der Welt unmöglich, die Emissionen auf Null zu setzen, da bei jedem Verbrennungsprozess weiteres CO<sub>2</sub> entsteht.**

## WETTER – EINE FOLGE DES KLIMAS

... aber nicht nur, denn auch die Beschaffenheit der Erdoberfläche beeinflusst das Klima. Einige 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.
- Regen, der über Waldgebieten niedergeht, verdunstet zumeist wieder, während Regen auf versiegelten Flächen wie z.B. in Städten hauptsächlich im Gully verschwindet und über die Kanalisation ins nächste Gewässer geleitet wird.

## WIE VERLÄUFT DIE FIEBERKURVE? GLOBALE KLIMAMODELLE

Schon die Wettervorhersage ist oft ein schwieriges Unterfangen. Wer hat nicht schon einmal einen Ausflug geplant und stand bei prognostiziertem Sonnenschein buchstäblich im Regen? Eine zuverlässige Wetterprognose ist mit den heutigen Mitteln für maximal 5–7 Tage möglich. Die langfristige Vorhersage des Erdklimas ist eine ungleich komplexere Aufgabe, da viele Parameter und Größen berücksichtigt werden müssen, die sich gegenseitig beeinflussen. Das führt zu einer schier unüberschaubaren Datenflut und einem Rechenaufwand, der nur von Supercomputern bewältigt werden kann.

Globale Klimamodelle basieren wie die Wettervorhersage auf einem atmosphärischen Modell, werden aber durch ein Ozean-, ein Schnee- und Eis- sowie ein Vegetationsmodell ergänzt, da diese Faktoren erheblich auf das Klima einwirken. Die anthropogenen Einflüsse (der "Faktor Mensch") werden in den verschiedenen IPCC-Szenarien berücksichtigt.

Für die globale Klimamodellierung wird die Erde in ein bestimmtes Raster aufgeteilt. Die Rechenleistung der heutigen Computer lässt momentan einen Gitterabstand von etwa 250 x 250 km<sup>2</sup> zu. Durch die Variabilität der Faktoren kann ein globales Klimamodell keine festen Werte angeben, sondern nur eine Bandbreite, in der sich beispielsweise die Temperatur oder der Niederschlag bewegen. So kommt es auch zu der Aussage, dass bis 2100 die globale Temperatur um 1,4–5,8 °C ansteigen wird.

## DER TEUFEL STECKT IM DETAIL – REGIONALE KLIMAMODELLE

Die Gitterweite eines globalen Klimamodells ist für eine regionale Klimaprognose natürlich zu unscharf. Regionale topographische Besonderheiten wie kleinere Gebirgszüge oder Flussniederungen fallen dabei buchstäblich durchs Raster.

Da es derzeit noch kein optimales Verfahren für die Erstellung regionaler Klimaszenarien aus dem globalen Klimamodell gibt, wurden für KLIWA drei verschiedene Verfahren zur Simulation des regionalen Klimas ausgewählt. Dadurch erhält man eine gewisse Bandbreite denkbarer Entwicklungen und Vergleichsmöglichkeiten.

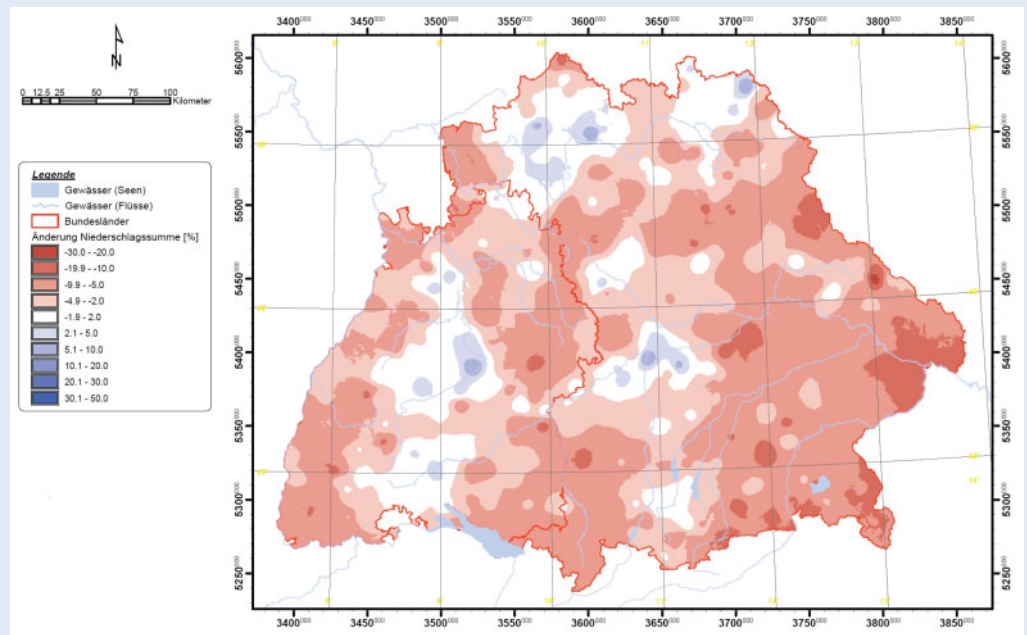
### Drei Verfahren zur regionalen Klimamodellierung

- eine statistische Methode
- ein statistisches dynamisches Verfahren
- ein regionales dynamisches Klimamodell

Alle drei Verfahren setzen auf dem globalen Klimamodell ECHAM 4 auf. Der "Faktor Mensch" ging mit dem Emissions-Szenario B2 – einer kontinuierlich steigenden Weltbevölkerung, die nachhaltige lokale Lösungen auf ökonomische, soziale und Umweltprobleme findet – mit ein. Damit wurde der Zeitraum 2021–2050 simuliert. Für die weiteren Abschätzungen wurden dann die Ergebnisse herangezogen, die sich mit dem statistisch dynamischen Verfahren ergeben haben. Dessen Veränderungen des Niederschlagsgeschehens sind nebenstehend für das Sommer- und das Winterhalbjahr dargestellt.

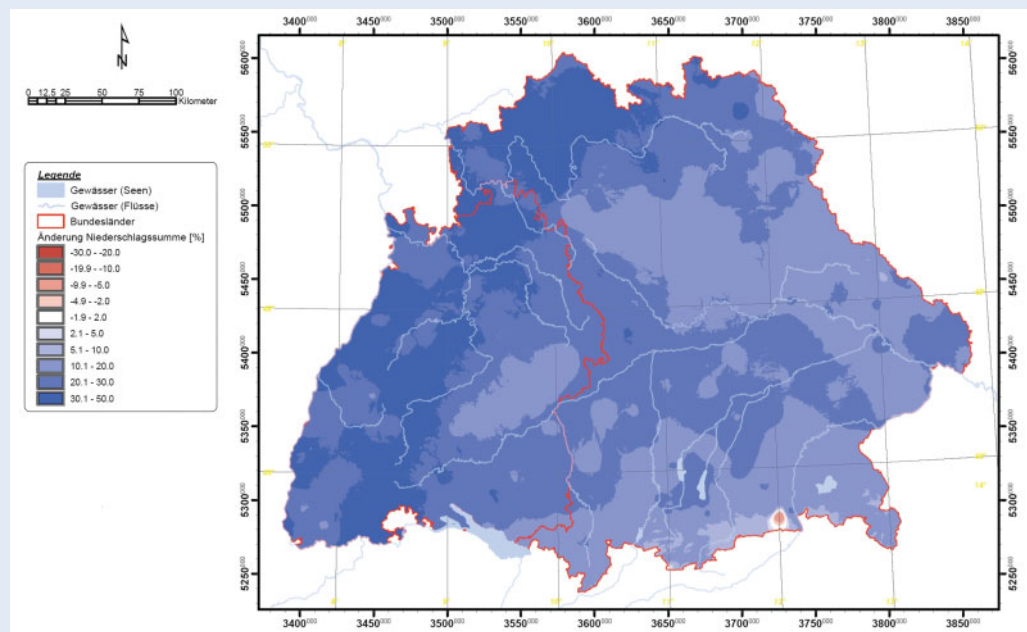
**PROZENTUALE ÄNDERUNG DER MITTLEREN NIEDERSCHLAGSSUMME  
(MAI-OKT.) SZENARIO ZUKUNFT GEGENÜBER IST-ZUSTAND**

*Im hydrologischen Sommerhalbjahr sind nur geringere Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Niederschlagsveränderung festzustellen; es treten überwiegend kleine Abnahmen des Niederschlags auf.*



**PROZENTUALE ÄNDERUNG DER MITTLEREN NIEDERSCHLAGSSUMME  
(NOV.-APR.) SZENARIO ZUKUNFT GEGENÜBER IST-ZUSTAND**

*Im Winterhalbjahr wird die jährliche Niederschlags-summe dagegen deutlich zunehmen. Davon betroffen werden vor allem der Schwarzwald, der Odenwald, der Spessart und die Rhön sein. Mehr Niederschläge wird es auch entlang der Donau geben.*





# Wasserhaushaltsmodelle als Instrument für Abflussprognosen

Mit globalen und regionalen Klimasimulationen können jedoch noch keine Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft getroffen werden. Deshalb müssen mit den Ergebnissen der regionalen Klimamodelle feinrastrige Wasserhaushaltsmodelle gefüttert werden, um die Änderungen der hydrologischen Komponenten des Wasserkreislaufes insbesondere die Verschärfung von Hochwasserabflüssen infolge der Klimaerwärmung in Süddeutschland zu ermitteln.

## AUS DER VERGANGENHEIT LERNEN – IN DIE ZUKUNFT SEHEN

Auf der Grundlage der meteorologischen und hydrologischen Messdaten aus den Jahren 1951 bis 2000 wurden mit allen drei Verfahren Klima-Szenarien für den Ist-Zustand und Zukunftsszenarien ermittelt. Die Güte der Simulationen wurde mit den Messdaten von 1971 bis 2000 geprüft, d.h. die Simulation des Ist-Zustands wurde mit den tatsächlichen Wetterdaten verglichen. Dadurch können systematische Fehler des globalen Klimamodells zum Teil ausgeglichen werden. Die so gewonnenen Zukunftsszenarien erstrecken sich über einen Zeitraum von 2021–2050.

Um genaue regionale Daten liefern zu können, wurden die Länder Baden-Württemberg und Bayern in 33 Untersuchungsgebiete – überwiegend nach topographischen und wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten – aufgeteilt. Diese Gebiete wurden wiederum in neun Regionen zusammengefasst.



## WASSERHAUSHALTSMODELLE

Um die Auswirkung der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt abzuschätzen, wurden hochaufgelöste Wasserhaushaltsmodelle (WHM) im 1 x 1 km<sup>2</sup>-Raster für große Teile des KLIWA-Gebiets erstellt. Für Baden-Württemberg liegen diese Modelle flächendeckend vor. In Bayern sind bisher für die Flussgebiete nördlich der Donau, insbesondere das Main-Gebiet, Wasserhaushaltsmodelle angepasst. Dabei ging es zunächst vor allem darum, die Hochwasserverschärfung zu untersuchen.

Dazu wurden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien als Eingangsdaten verwendet. Mit einem Wasserhaushaltsmodell können alle Komponenten des Wasserhaushalts berechnet werden.

### Komponenten des Wasserhaushalts

- Niederschlag
- Wasserführung
- Verdunstung
- Bodenfeuchte
- Grundwasserneubildung
- Wasseräquivalent der Schneedecke



## RASTER VON EINEM QUADRATKILOMETER

Wasserhaushaltsmodelle sind mathematische Rechenverfahren zur Beschreibung und Quantifizierung der räumlichen und zeitlichen Verteilung wesentlicher Komponenten des Wasserhaushaltes wie Niederschlag, Verdunstung, Versickerung, Wasserspeicherung und Abfluss. Mit ihrer Hilfe können die Wirkungen von Veränderungen der eingehenden Komponenten auf das Gesamtsystem „Wasserhaushalt“ dargestellt und beurteilt werden. In den Wasserhaushaltsmodellen wer-

den bei einer rasterbasierten Flächenauf-  
lösung von  $1 \times 1 \text{ km}^2$  der Untersuchungs-  
gebiete u.a. folgende hydrologische Teil-  
prozesse beschrieben: Blattbenetzung,  
Verdunstung, Schneeanhäufung, -verdich-  
tung und -schmelze, Bodenwasserspeiche-  
rung, Speicherung und Wassertransport in  
der Fläche sowie die Fließbewegung in den  
Gerinnen und den Rückhalt in den Seen.  
Hinzu kommen Verfahren zur Korrektur und  
Umrechnung meteorologischer Messgrößen.

### Anwendungsmöglichkeiten von Wasserhaushaltsmodellen

- Abschätzung der Auswirkungen von Um-  
weltveränderungen, wie z.B. möglicher  
Klimaveränderungen oder Landnutzungsän-  
derungen 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 Ver-  
besserung der Niedrigwasserbewirt-  
schaftung und zur Verbesse-  
rung der Hochwasservorsorge,
- regionale Untersuchungen  
des Wasserhaushalts auf der  
Basis von Flusseinzugsgebieten  
im Sinne der EU-Wasserrahmen-  
richtlinie,
- Prognosen und Szenarien für die Gewässer-  
entwicklungsplanung,
- Bereitstellung von hydrologischen Eingangs-  
größen für Gewässergüte- und Grundwas-  
sermodelle (z.B. für Wärme- und Sauerstoff-  
haushalt, Grundwasserneubildung usw.).

In Baden-Württemberg liegen für die gesamte  
Landesfläche Wasserhaushaltsmodelle vor. Sie  
sind auf der Basis von Tageswerten kalibriert  
und somit für Prognosen- und Szenarienrech-  
nungen einsetzbar. In Bayern liegen bis jetzt  
Modelle für das Main-Gebiet und die nördlichen  
Donauzuflüsse vor.

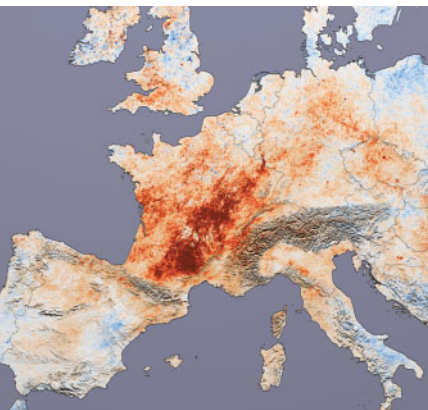
	Acker		großflächig versiegelte Bereiche
	Brachfläche		baumbestandene Bereiche
	Extensives Grünland		Laubwald
	Intensives Grünland		Mischwald
	Intensivobstbau		Nadelwald
	Weinbau		unversiegelte Flächen
	Siedlung, locker		Feuchtfläche
	Siedlung, dicht		Wasserfläche





# Das Klima von morgen – die Zukunftsszenarien 2021–2050

Die Ergebnisse der drei Verfahren zur regionalen Klimamodellierung unterscheiden sich zwar mancherorts, aber der Trend geht in dieselbe Richtung. Die ermittelten Werte wurden verglichen, auf ihre Plausibilität geprüft und zu regionalen Klimaszenarien zusammengefasst.



Extremsommer 2003:  
Hitzewelle (in den roten Gebieten)  
in Europa

## EHER HEISS UND WENIGER EIS

Die Klimasimulationen zeigen, dass die Temperatur bis 2050 im Durchschnitt um 1,7 °C zunehmen wird. Im Sommer steigt die mittlere Tagestemperatur um 1,4 °C und beträgt 15 °C. Im Winter fällt die Temperaturzunahme mit 2 °C auf 4,5 °C höher aus. Am stärksten steigt die Temperatur in den Monaten Dezember bis Februar. Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist, dass dadurch mehr Regen und weniger Schnee fällt. Daher kann es vermehrt zu kleineren und mittleren Hochwassern im Winter kommen.

Die Zahl der Sommertage (Tage über 25 °C) wird im Vergleich zu heute an allen Klimastationen 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 früher kommen, in manchen Regionen können die Tomaten bis zu zwei Wochen früher ausgepflanzt werden.

## MEHR NIEDERSCHLAG IN DEN WINTERMONATEN

Je höher die Lufttemperatur desto stärker ist die Verdunstung des Wassers. Das wiederum beeinflusst das Niederschlagsverhalten maßgeblich.

Im Simulationszeitraum wird sich der gefundene Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern fortsetzen.

Doch während es im Sommer gegenüber jetzt bis zu 10 Prozent weniger regnet, wird es im Winter erheblich mehr Niederschläge geben – in manchen Regionen bis zu 35 Prozent. Am meisten bekommen die im Westen gelegenen Untersuchungsregionen ab. Absoluter Spitzenreiter in Sachen Niederschlag wird der Schwarzwald sein.

Zudem werden im Winter die Tage mit starken Niederschlägen (über 25 mm) deutlich zunehmen, an manchen Messstationen wird sich die Zahl verdoppeln. Dagegen wird es mehr Tage geben, an denen überhaupt nichts von oben kommt: Trockenperioden im Sommer werden länger ausfallen.

## WEITERHIN WESTLICHE WETTERLAGEN

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

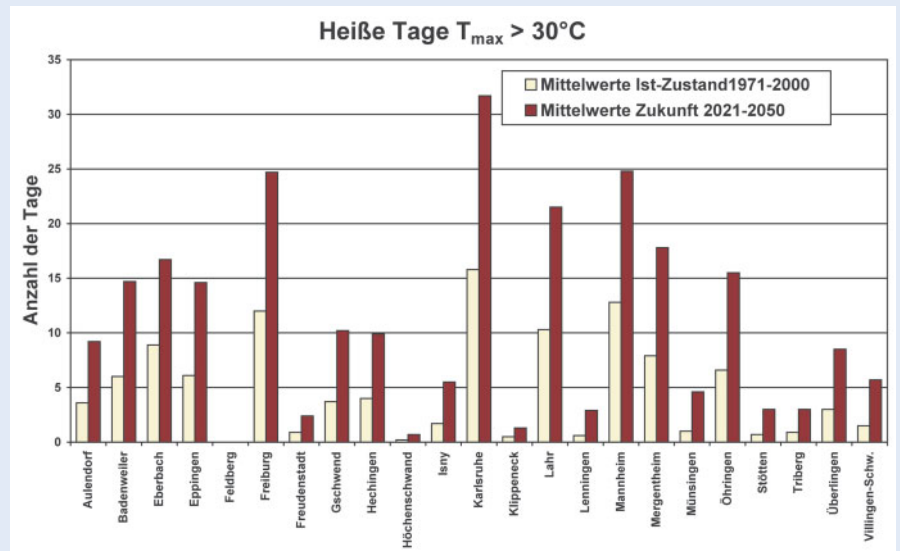
## FAZIT : DER TREND SETZT SICH FORT

- Es wird wärmer, vor allem im Winter.
- Die Sommer werden etwas trockener, die Winter dagegen wesentlich feuchter.
- Die Westwetterlagen, die höhere Niederschläge bringen können, werden zunehmen. Daraus ist abzusehen, dass die Hochwassergefahr im Winterhalbjahr steigt. Vor allem die mittleren Hochwasser werden zunehmen, da sich in den zukünftig milderen Wintern die Schneedecke mehrfach auf- und abbauen kann.



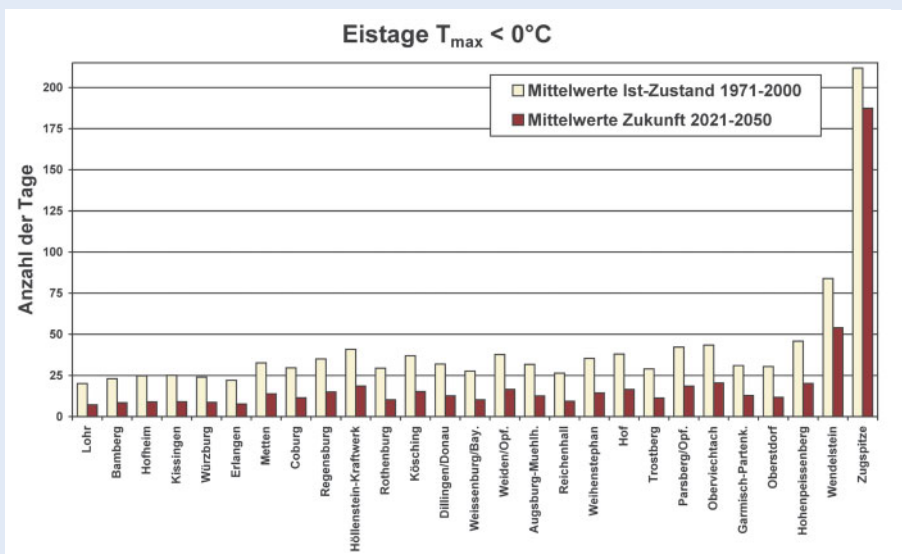
### BADISCHE TOSKANA? DAS BEISPIEL KARLSRUHE

Die mittlere Durchschnittstemperatur, die im Zeitraum 1971–2000 bei 15,1°C lag, wird im Zukunftsszenario 17,4 °C betragen. Statt 16 wird es 32 heiße Tage geben. Das bedeutet, dass sich bei einer Zunahme der Lufttemperatur um 2,3 °C die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Temperaturen über 30 °C verdoppelt. Dagegen gibt es nur noch vier Tage mit Dauerfrost statt wie bisher elf.



### BAYERISCHE WINTER

Auch auf den Bergen friert es weniger – auf der Zugspitze wird es weniger als 180 Eistage geben. Bislang waren es knapp 210 im Jahr.





# Schutz durch die "Flexible and no regret"-Strategie

Auch wenn die Modellkette Globales Modell – Regionale Modelle – Wasserhaushaltsmodelle noch mit einigen 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 bei neuen Bauwerken meterhohe Ufermauern errichtet werden. Vielmehr gilt es, die Folgen der erwarteten Klimaänderung mit Maßnahmen abzufangen, die langfristig zweckmäßig und relativ kostengünstig anpassbar sind.



## DEN KLIMAWANDEL MIT EINRECHNEN: DER KLIMAÄNDERUNGSFAKTOR

Bei der Planung von Hochwasserschutzanlagen wird meist der Wert  $HQ_{100}$  zugrunde gelegt.  $HQ_{100}$  ist der Hochwasserabfluss, der statistisch betrachtet alle 100 Jahre einmal auftritt. Die auf diesem Wert berechneten Bauwerke sollen also ein "Jahrhunderthochwasser" abfangen können. Die Simulationen der Wasserhaushaltsmodelle für die Flussgebiete in Baden-Württemberg und Bayern zeigen, dass die Hochwasserabflüsse besonders im Winter an fast allem Pegeln zunehmen werden. Daher wurde in beiden Ländern – auch aus Vorsorgeaspekten – festgelegt, bei der Bemessung neuer wasserwirtschaftlicher Hochwasseranlagen die Auswirkungen des Klimawandels durch einen Klimaänderungsfaktor zu berücksichtigen.

Für den Neckar wurde beispielsweise ermittelt, dass die Wasserführung für ein Jahrhunderthochwasser ( $HQ_{100}$ ) bis 2050 um 15 Prozent steigt. Daher soll fortan der Wert  $HQ_{100}$  mit dem Klimafaktor 1,15 multipliziert werden, d.h. die Anlagen werden auf einen um 15 Prozent höheren Abfluss dimensioniert oder so geplant, dass bei Bedarf nachgerüstet werden kann.

### Neuer $HQ_{100}$ -Wert für den Neckar:

$$HQ_{100}(\text{neu}) = 1,15 \times HQ_{100}(\text{alt})$$

## UNTERSCHIEDLICHE KLIMAFOLGEN UND KLIMAFAKTOREN

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.

So wurde für den Bereich der Oberen Donau ein Klimaänderungsfaktor von 1,25 ermittelt. Auch die kleineren und mittleren Hochwasser werden zunehmen. Der Abfluss  $HQ_5$  für ein Hochwasserereignis, das heute etwa alle fünf Jahre auftritt, steigt an der Oberen Donau um 67 Prozent. Für die Zukunft muss also der  $HQ_5$ -Wert der Oberen Donau mit dem Klimaänderungsfaktor 1,67 multipliziert werden. Am Hochrhein beträgt der Klimaänderungsfaktor für das  $HQ_5$  beispielsweise 1,45, am geringsten ist er im Einzugsgebiet Oberschwaben-Bodensee mit 1,24.

In Bayern wurde auf der Grundlage der damaligen Untersuchungsergebnisse ebenfalls ein Klimaänderungsfaktor von pauschal 15 Prozent auf den statistischen Wert von  $HQ_{100}$  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 fortentwickelt. Dies kann auch zu einer regionalen Anpassung führen.

## 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 werden kann.

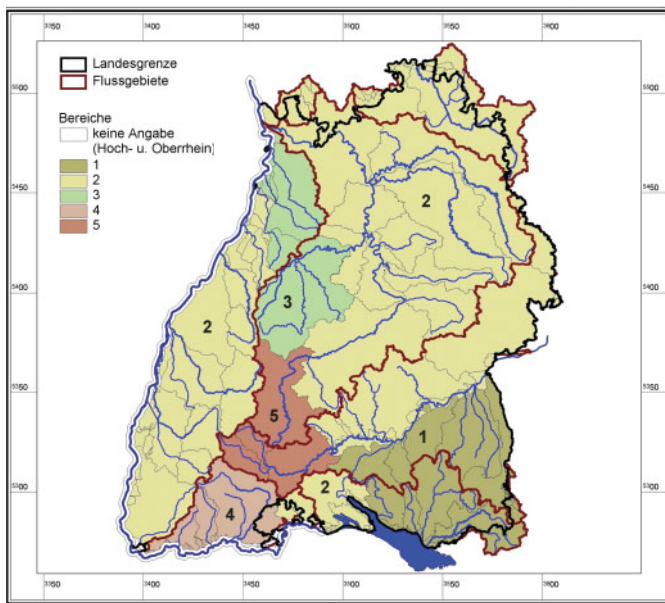
**Beispiel Brücke:** Bei der Planung einer Brücke fließt der regionale Klimaänderungsfaktor mit ein, da eine nachträgliche Anpassung kaum möglich ist.

**Beispiel Ufermauer:** Bei einer neuen Ufermauer wird die Statik so ausgelegt, dass sie 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

## AUSBLICK

Bisher hat sich KLIWA vor allem der Hochwasserproblematik angenommen. Aber die Klimaänderung hat noch andere Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Die prognostizierten trockeneren und wärmeren Sommer können Niedrigwasser mit sich bringen und damit Landwirten und Binnenschiffern Probleme bereiten. Die veränderte Niederschlagsverteilung hat auch Einfluss auf die Grundwasserneubildung und die für die Energiewirtschaft bedeutsame Kraftwerkskühlung. Ein weiteres Themengebiet ist die Entwicklung der Kurzzeitniederschläge (Gewitter), die in kurzer Zeit viel Wasser bringen und damit verstärkt örtliche Überschwemmungen verursachen können. Wichtig ist das z.B. für die kommunalen Entwässerungsnetze.

Mit dem gemeinsam mit dem DWD durchgeführten Projekt KLIWA haben die Länder Baden-Württemberg und Bayern ein wichtiges Instrument an der Hand, um die Notwendigkeit von Anpassungsmaßnahmen zu erkennen und so die Auswirkungen des Klimawandels in regionalem Maßstab abzumildern. Doch ebenso wichtig wie die Anpassung der Hochwasserschutzmaßnahmen ist die allgemeine Verstärkung des Klimaschutzes zur Senkung der Treibhausgasemissionen. Auch wenn sich aufgrund der Trägheit des Klimasystems selbst bei einem sofortigen Emissionsstopp der Temperaturanstieg erst einmal fortsetzt, so kann doch jeder Einzelne dazu beitragen, dass unsere Nachkommen nicht mit noch größeren Problemen zu kämpfen haben werden.

