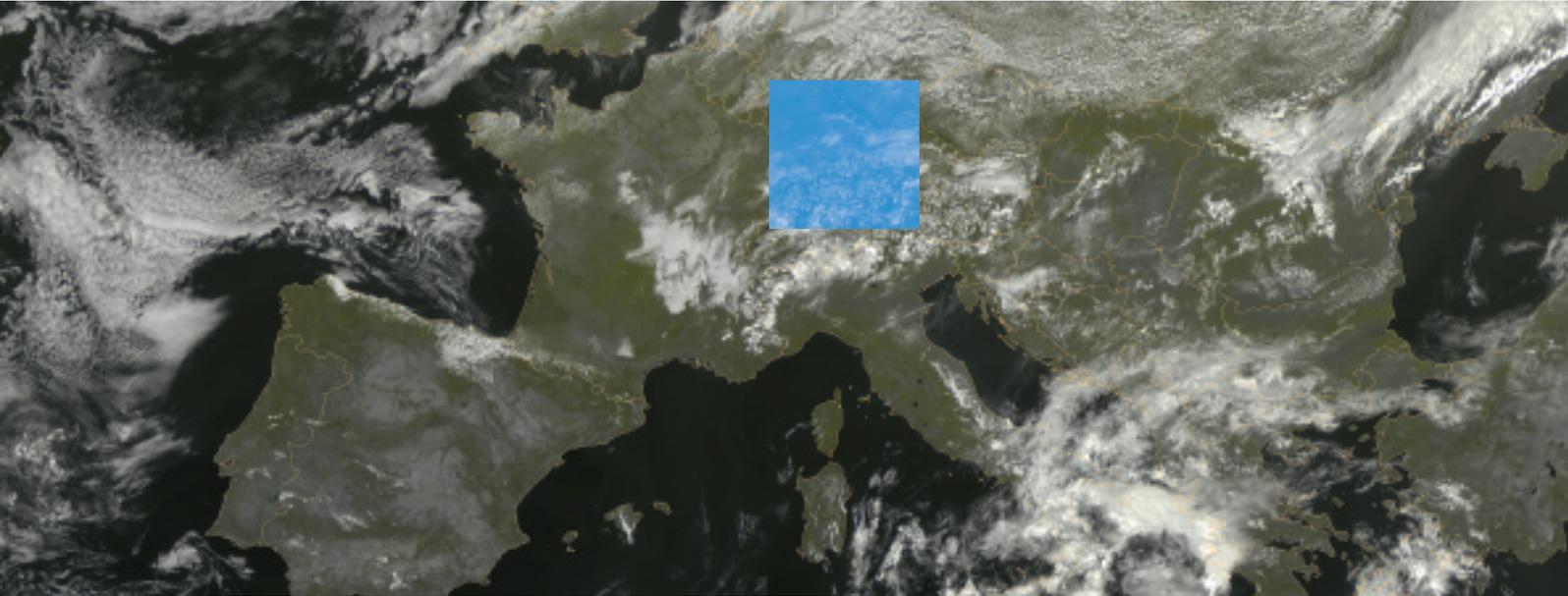
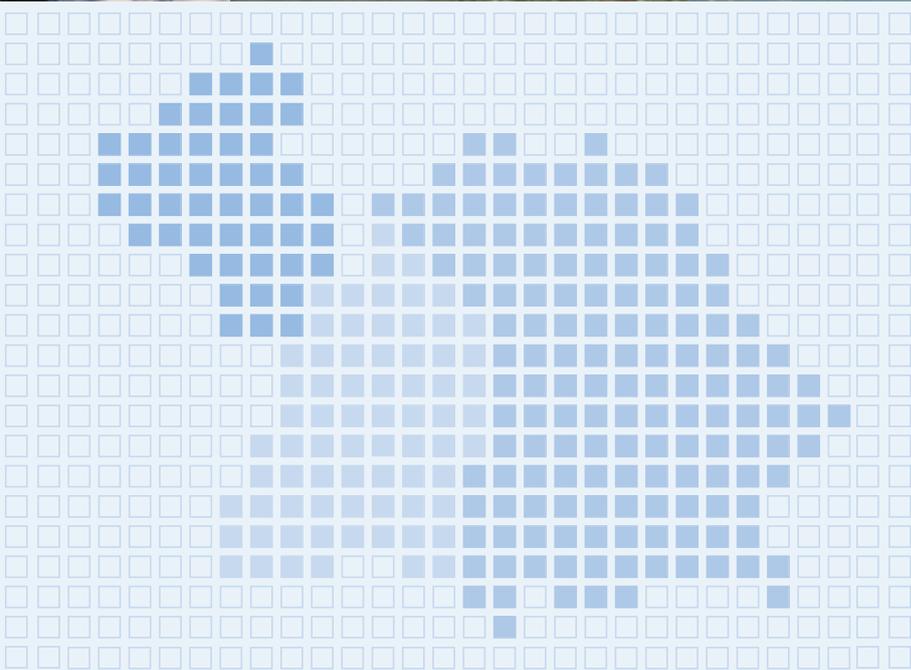


Klimawandel im Süden Deutschlands

Ausmaß – Folgen – Strategien



AUSWIRKUNGEN AUF DIE WASSERWIRTSCHAFT



Baden-Württemberg
UMWELTMINISTERIUM

Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Gesundheit



Deutscher Wetterdienst



INHALT

1 SPIELT DAS KLIMA VERRÜCKT?	4
2 KLIMAVERÄNDERUNGEN BIS HEUTE	6
3 GLOBALE UND REGIONALE KLIMAMODELLE	8
4 WERKZEUGE FÜR ABFLUSSSIMULATIONEN	10
5 DAS KLIMA VON MORGEN	12
6 WIE REAGIERT DAS GRUNDWASSER?	14
7 NIEDRIGWASSER MACHT SICH BREIT	16
8 SCHUTZ VOR HOCHWASSER / AUSBLICK	18/19

IMPRESSUM HERAUSGEBER

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

Kaiser-Friedrich-Straße 7
55116 Mainz

Im Auftrag des
**Ministeriums für Umwelt, Forsten und
Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz**

Deutscher Wetterdienst

Frankfurter Straße 135
63067 Offenbach

Stand: November 2009

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

Griesbachstraße 1
76185 Karlsruhe

Im Auftrag des
Umweltministeriums Baden-Württemberg

Diese Broschüre ist klimaneutral gedruckt



Konzept und Realisation
ÖkoMedia PR, Stuttgart

Bayerisches Landesamt für Umwelt

Bürgermeister-Ulrich-Str. 160
86179 Augsburg

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

Weitere Informationen

www.kliwa.de
www.um.baden-wuerttemberg.de
www.stmug.bayern.de
www.mufv.rlp.de
www.lubw.baden-wuerttemberg.de
www.lfu.bayern.de
www.dwd.de
www.luwg.rlp.de



Tanja Gönner
Umweltministerin des
Landes Baden-Württemberg



Dr. Markus Söder
Bayerischer Staatsminister
für Umwelt und Gesundheit



Margit Conrad
Staatsministerin für Umwelt,
Forsten und Verbraucher-
schutz Rheinland-Pfalz



Wolfgang Kusch
Präsident des
Deutschen Wetterdienstes

VORWORT

Wasser ist eines der wertvollsten Geschenke der Natur. Wir alle leben von und mit Wasser. Die Wasserwirtschaft trägt die hohe Verantwortung, die Lebensgrundlage Wasser 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 Millionen in den Hochwasserschutz.

Aber der Wasserkreislauf ist im Wandel. Mit der Veränderung des Klimas ändert sich auch unser Wasserhaushalt. Wir wissen heute, dass sich die Temperatur auf der Erde infolge des Treibhauseffekts weltweit erwärmt und weiter erwärmen wird. Wir werden diese Entwicklung auch nicht mehr verhindern können, aber wir müssen das Ausmaß der Veränderungen durch einen konsequenten und wirksamen Klimaschutz beherrschbar halten.

Infolge des Klimawandels müssen wir uns auf eine Zunahme extremer Wetterereignisse einstellen. Aller Voraussicht nach wird es in Zukunft mehr Starkregenereignisse geben, aber auch mehr Hitzeperioden und Trockenphasen. Für die Wasserwirtschaft heißt das, sie muss sich anpassen und Wege finden, mit diesen Veränderungen umzugehen.

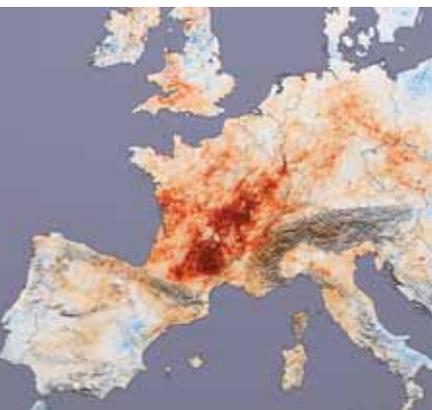
Dank KLIWA können wir heute ungefähr abschätzen, wie sich der Klimawandel auf Hochwasser, Niedrigwasser oder die Grundwasservorräte auswirkt. Unsicherheiten gibt es natürlich. Diese richtig einzuschätzen und die Weichen für die Zukunft dennoch richtig zu stellen, ist eine große Herausforderung. Aber auch bei der Grundlagenarbeit besteht noch Handlungsbedarf: Wie wirkt sich der Klimawandel auf die Wasserqualität unserer Bäche und Flüsse aus? Welche Anpassungen sind gegebenenfalls notwendig?

Mit konsequentem Klimaschutz auf globaler, nationaler und regionaler Ebene können wir die Folgen des Klimawandels kalkulierbar halten. 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 sowie das bestehende Fachwissen zum Klimawandel und seinen Folgen konsequent zu erweitern. Das Kooperationsvorhaben KLIWA leistet hierzu einen wichtigen Beitrag.



Häufung extremer Wetterereignisse: Spielt das Klima verrückt?

Mit Beginn der 1990er Jahre haben die Wetterextreme bei uns stark 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 folgte dann der Winter 2008/2009 mit strengem Frost – trotzdem war das Jahr 2008 eines der zehn wärmsten Jahre seit Beginn der Klimaaufzeichnungen. Ist diese Häufung Zufall oder ein Hinweis dafür, dass der Klimawandel schon in vollem Gange ist?



Extremsummer 2003: Hitzewelle in Mitteleuropa (besonders in den roten Gebieten)

... ODER SIND DIES GANZ NORMALE WETTERKAPRIOLEN?

Das Erdklima war im Laufe der Jahrtausende 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 bedenklich, wenn man in Betracht zieht, dass es während der letzten Eiszeit auf der Erde nur 4-5 °C kühler war als heute.

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 385 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 Jahre 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, beschlossen die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst im Dezember 1998 das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA). Seit 2007 ist Rheinland-Pfalz ein weiterer Partner bei KLIWA.

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

Inzwischen kann das Vorhaben KLIWA eine Vielzahl von Ergebnissen vorweisen. Zunächst wurden langjährige meteorologische und hydrologische Messdaten im Süden Deutschlands analysiert und Trends ermittelt. Gestützt auf diese Daten erfolgt eine Abschätzung des künftigen Klimas mit ausgewählten regionalen Klimaprojektionen für den Zeitraum 2021-2050. Mit den zukünftigen Klimadaten wurden wiederum engmaschige Modelle für den Wasserhaushalt der einzelnen Flussgebiete „gefüttert“. Die Untersuchungen umfassen: Hochwasser, Grundwasser, Niedrigwasser, Bodenerosion und Gewässerqualität. Zum Teil werden schon konkrete Handlungsempfehlungen ausgesprochen.

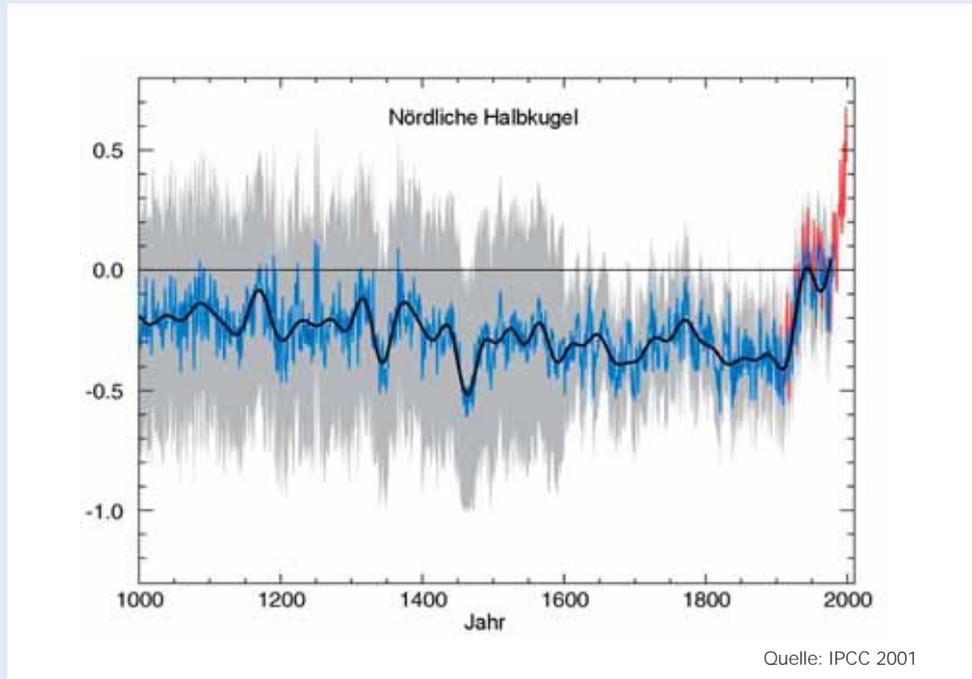
KLIWA IM WEB

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



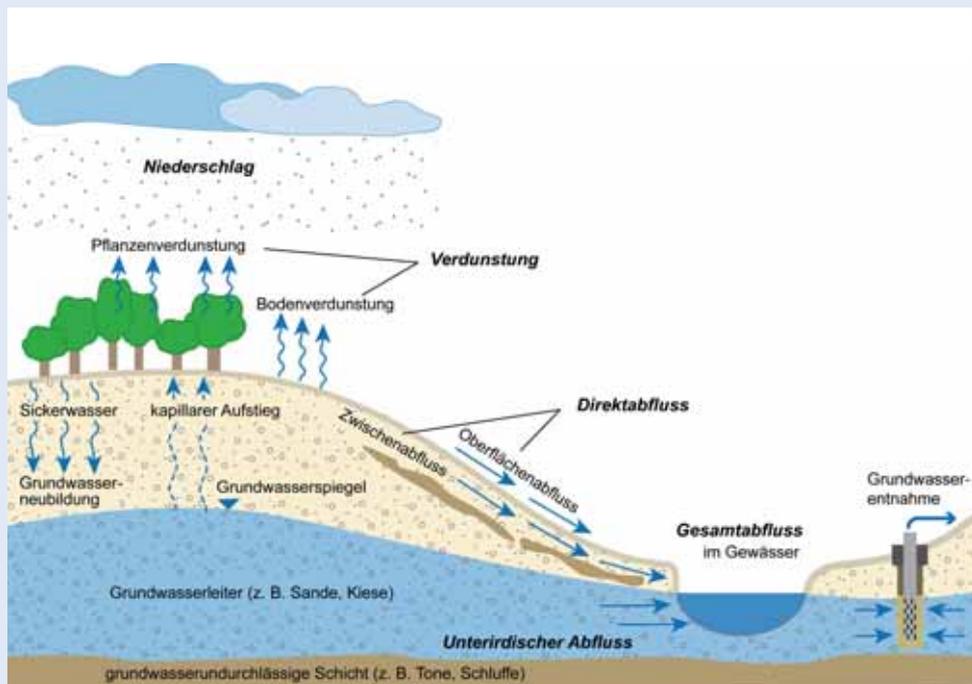
TEMPERATURVERLAUF DER NORDHALBKUGEL

Die Grafik zeigt die Abweichung der Jahresmitteltemperatur von der Durchschnittstemperatur aus dem langjährigen Mittel 1961–1990. Mit Beginn des 20. Jahrhunderts setzte eine deutliche Klimaerwärmung auf der Nordhalbkugel ein, die sich in den letzten Jahrzehnten deutlich beschleunigt hat.



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 von KLIWA: Klimaveränderungen bis heute

Der Klimawandel ist keine Zukunftsmusik. 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 Trends erkennen. Für KLIWA wurden über 350 Wetterstationen und rund 100 Flusspegel im Süden Deutschlands ausgewertet.



Auf der Zugspitze ist der Rückgang des Gletschers aufgrund der Erwärmung deutlich sichtbar.

ES IST WÄRMER GEWORDEN

Die durchschnittliche Jahrestemperatur im Süden Deutschlands ist im Zeitraum von 1931–2005 um 0,8–1,3°C gestiegen. Dabei ist der stärkste Anstieg ab den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts zu verzeichnen. Im Mittel ist die Temperaturzunahme im Winterhalbjahr (November bis April) größer als im Sommerhalbjahr.

WEISSE WEIHNACHT – ERINNERUNG AUS KINDERTAGEN

Mildere Winter bedeuten weniger Schnee. Auch hier ist der Trend aus den vieljährigen Messreihen klar erkennbar. Vor allem in den tiefer gelegenen Gebieten bis 300m 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 um 10–20 Prozent. Lediglich in den Hochlagen fiel teilweise sogar mehr Schnee. 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 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 sowie in Rheinland-Pfalz die Eifel und der Westerwald.

WESTLAGE ZYKLONAL: DAS WETTER, DAS DEN REGEN BRINGT

Die vermehrten Niederschläge im Winter sind auf die Zunahme bestimmter Großwetterlagen über Mitteleuropa zurückzuführen. Eine Zeitreihenanalyse von 1881 bis 2004 ergab, 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, und jüngst „Kyrill“ im Januar 2007 und „Emma“ Anfang März 2008.

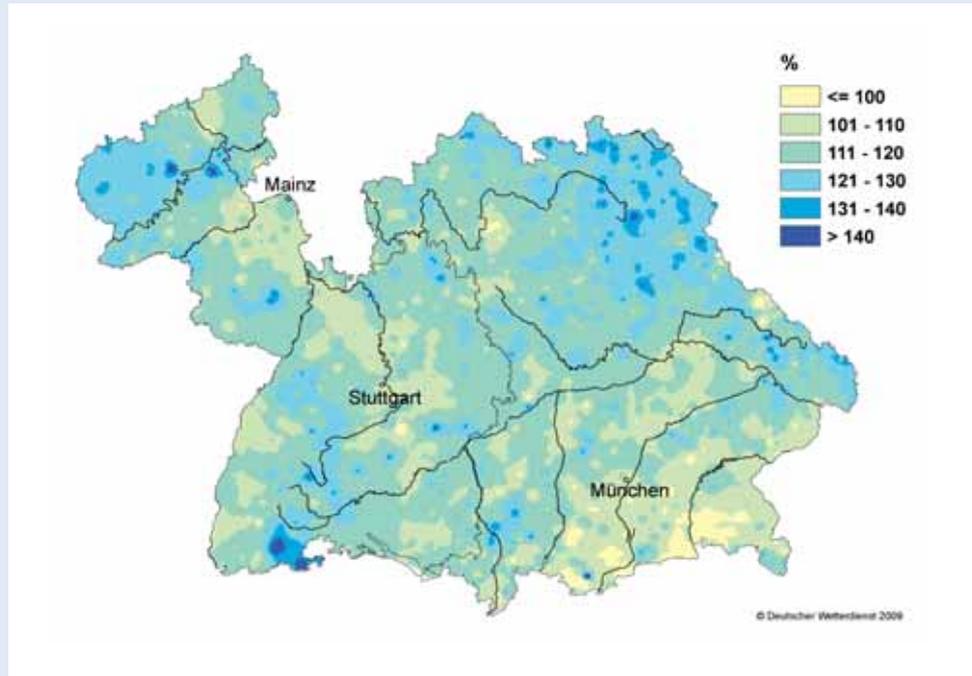
WO FLIESST ALL DER REGEN HIN?

Die Langzeitmessungen an ausgewählten Flusspegeln zeigen, dass in den letzten 30 Jahren die Zahl der Hochwasserereignisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz vor allem im Winterhalbjahr zugenommen hat.



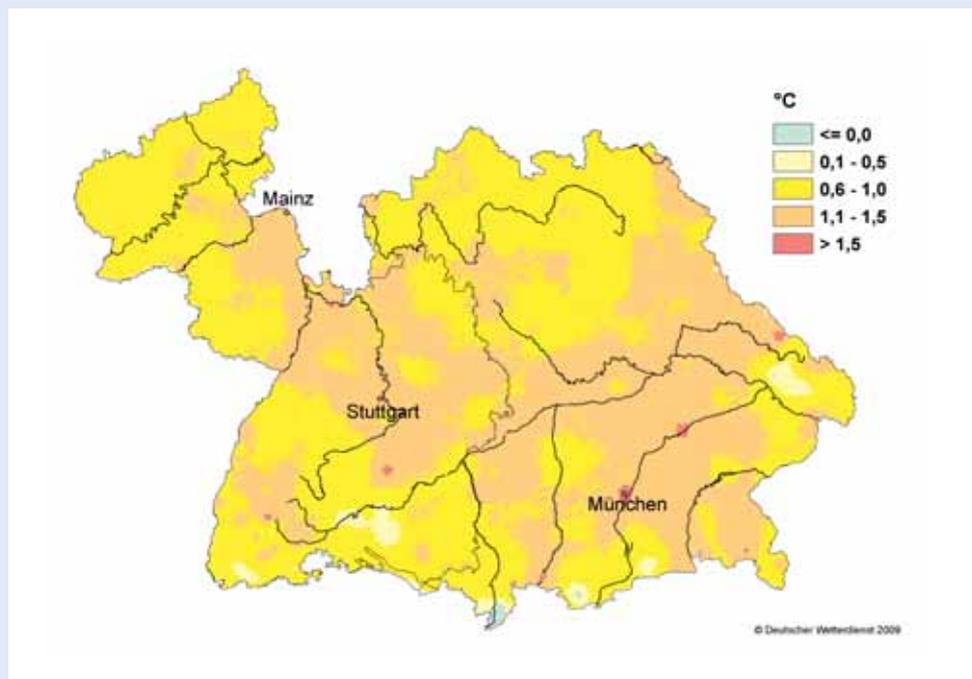
ZUNAHME DER NIEDERSCHLÄGE IM WINTER

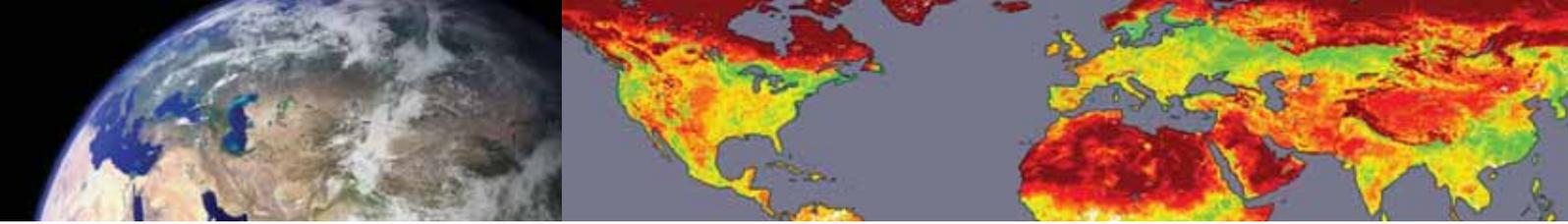
Die Darstellung zeigt das Verhältnis der durchschnittlichen Niederschlagshöhe der Wintermonate (Dezember bis Februar) 1978/1979 bis 2007/2008 zum Mittel der Winterniederschläge in der Periode 1931 bis 1960.



ZUNAHME DER TEMPERATUR IM WINTER

Die Darstellung zeigt die Veränderung der durchschnittlichen Temperaturen der Wintermonate (Dezember bis Februar) 1978/1979 bis 2007/2008 zum Mittel der Wintertemperaturen in der Periode 1931 bis 1960.





Instrumente der Klimaforschung: Globale und regionale Klimamodelle

Es gibt keine Zweifel mehr, der globale Klimawandel schreitet fort. Selbst schnelle und effektive Klimaschutzmaßnahmen können die sich abzeichnende 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 auf Null setzen könnte, was bei dem derzeitigen Energiehunger der Welt utopisch ist, würde der Klimawandel weiter fortschreiten.

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.

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 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 Hochleistungscomputern bewältigt werden kann.

Globale Klimamodelle basieren jeweils auf einem atmosphärischen Modell, das durch ein Ozean-, ein Schnee- und Eis- sowie ein Vegetationsmodell ergänzt wird. Die anthropogenen Einflüsse (der „Faktor Mensch“) werden durch die verschiedenen 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 Variabilität der anzunehmenden Entwicklungen der Weltbevölkerung, des wirtschaftlichen Wachstums, des Energieverbrauchs usw., aber auch durch die Unsicherheiten in den Modellen bewegen sich die jeweiligen Ergebnisse beispielsweise für Temperatur oder Niederschlag in einer bestimmten Bandbreite. So kommt es auch zu der Aussage, dass bis 2100 die globale Temperatur um 1,1–6,4 °C ansteigen könnte.

Der Teufel steckt im Detail: Regionale Klimamodelle

Die Rasterweite eines globalen Klimamodells ist für eine regionale Klimaabschätzung natürlich zu unsharp. Regionale Besonderheiten wie Gebirgszüge oder Flusstäler würden dabei buchstäblich durch das Modellgitter fallen. Für die Ableitung regionaler Klimaprojektionen aus globalen Klimamodellen in der notwendigen kleinräumlichen Auflösung gibt es aber bis heute noch kein optimales Verfahren.

Ableitung regionaler Klimaprojektionen

Grundsätzlich stehen dafür unterschiedliche Methoden zur Verfügung, die jedoch verschiedene Schwächen haben, so dass hier noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

- statistische Verfahren (z.B. STAR, WETTREG)
- dynamische Klimamodelle (z.B. REMO, CLM)

Für das KLIWA-Gebiet sind verschiedene regionale Klimaprojektionen auf der Basis der Globalmodelle ECHAM 4 und ECHAM 5 verfügbar. Daraus hat KLIWA folgende Projektionen ausgewählt:

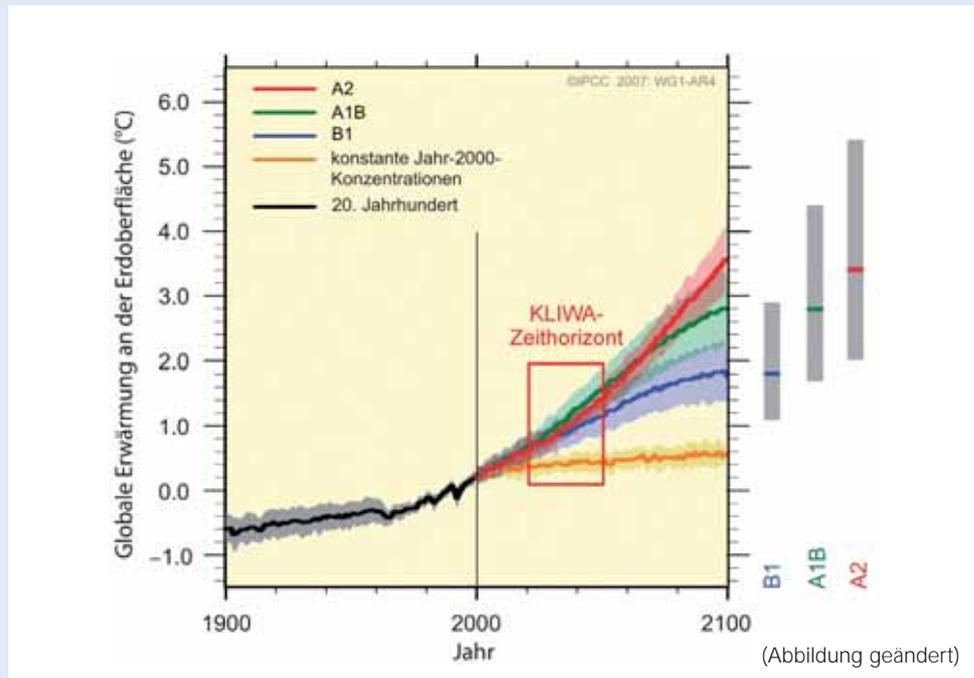
- WETTREG-2003/B2
- WETTREG-2006/A1B

Ein Vergleich der Klimagrößen der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 gibt Aufschluss über das Ausmaß des Klimawandels.

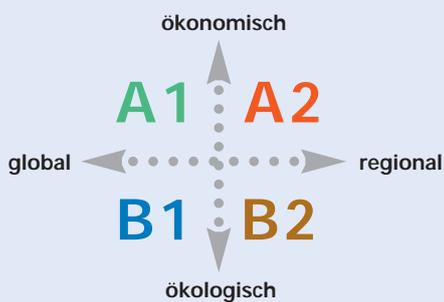
Globale Erwärmung an der Erdoberfläche

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

Als mögliches Zukunftsklima wird für regionale Simulationsrechnungen das weniger gemäßigte Emissionsszenario A1B (grüne Linie) herangezogen. Das Szenario A1B liegt innerhalb der Szenarienfamilie A1; bei der technologischen Entwicklung im Energiebereich liegt der Schwerpunkt des Szenarios auf einer zukünftig ausgeglichenen Nutzung von fossilen und nicht-fossilen Brennstoffen.



(Abbildung geändert)



- A1** Eine Welt mit schnellem Wirtschaftswachstum und schneller Einführung neuer und effizienter Technologien.
- A2** Eine heterogene Welt mit einem Schwerpunkt auf traditionelle Werte.
- 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.



Wasserhaushaltsmodelle: Werkzeuge für Abflusssimulationen

Mit globalen und regionalen Klimasimulationen allein können noch keine zahlenmäßigen Aussagen über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft getroffen werden. Deshalb müssen mit den Ergebnissen aus regionalen Klimamodellen hoch aufgelöste Wasserhaushaltsmodelle gefüttert werden, um die Änderungen der hydrologischen Komponenten des Wasserkreislaufs, insbesondere die Verschärfung von Hochwasserabflüssen oder die Veränderung der Niedrigwasserabflüsse, infolge der Klimaerwärmung im Süden Deutschlands zu ermitteln.



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

FLUSSGEBIET IM RASTERFORMAT

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 beurteilt werden. In den Wasserhaushaltsmodellen werden mit einem 1 x 1 km-Raster u.a. folgende hydrologische Prozesse beschrieben: Verdunstung, Schneeanhäufung, -verdichtung, -schmelze, Bodenwasserspeicherung sowie die Fließbewegung in den Gewässern und der Rückhalt in den Seen.

Anwendungen für Wasserhaushaltsmodelle:

- Abschätzung der Auswirkungen von Umweltveränderungen, wie z. B. möglicher Klimaveränderungen 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.)

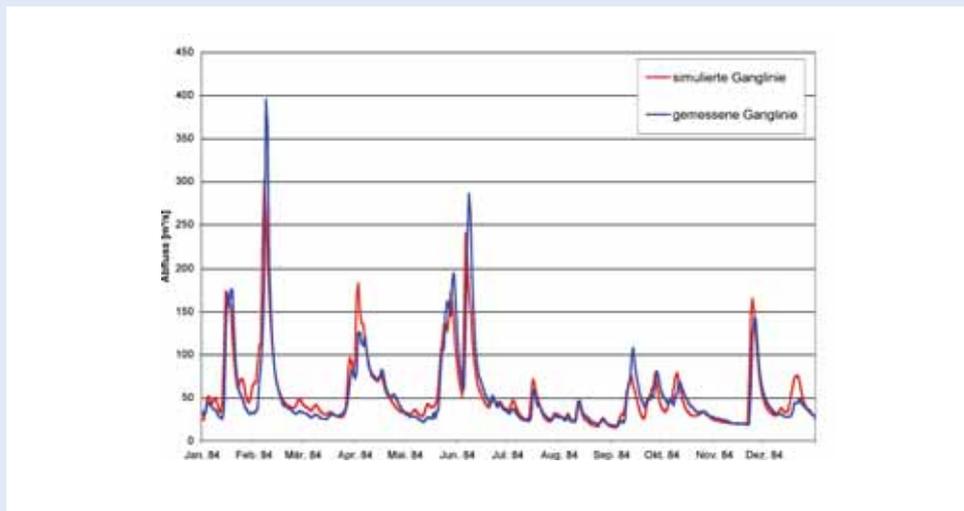
GANZ KLEIN KARIERT – TOOLBOX WASSERHAUSHALTSMODELL

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. Heute stehen Untersuchungen der Niedrigwasserverhältnisse im Fokus. Dazu werden für die KLIWA-Flussgebiete die täglichen Abflüsse für die Gegenwart und die Zukunft berechnet. Zur Ermittlung der Grundwasserneubildung werden ergänzend spezielle Bodenwasserhaushaltsmodelle eingesetzt.



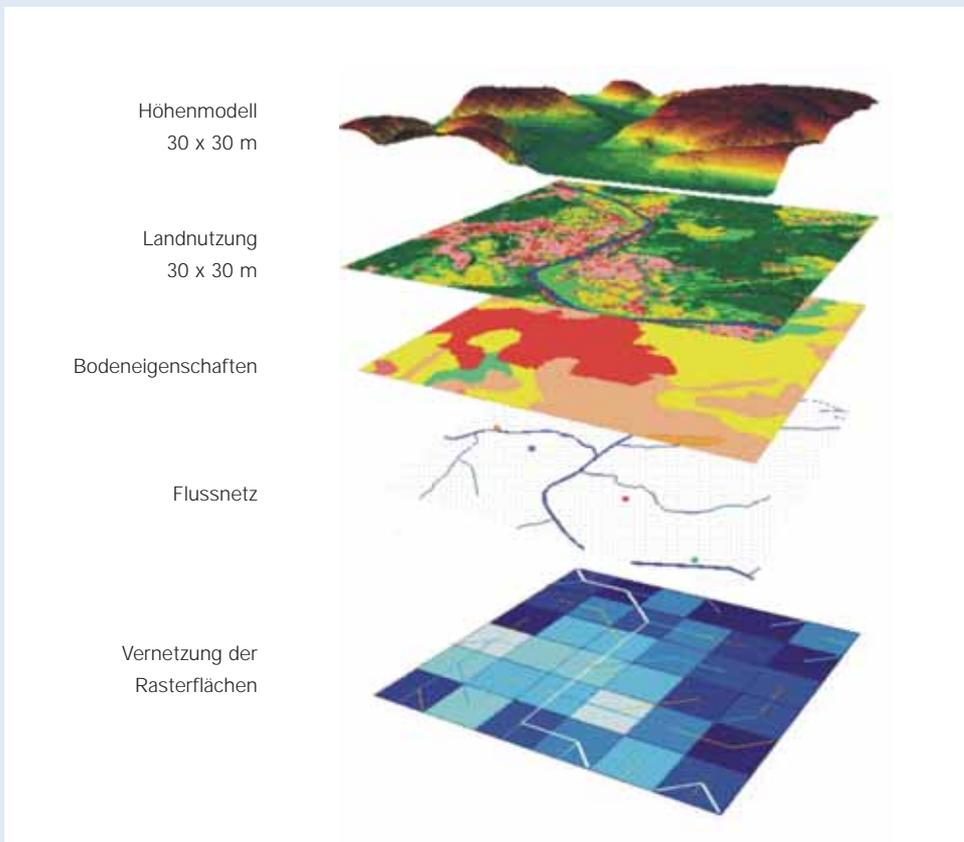
GANGLINIEN-DIAGRAMM

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



DATENGRUNDLAGEN VON WASSERHAUSHALTSMODELLEN

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





Zukunftssimulationen 2021–2050: Das Klima von morgen

Für die Zukunftssimulation dienen verschiedene Klimamodelle. Die dabei verwendeten Klimaprojektionen führen zu einer Spannweite bei den Temperatur- und Niederschlagswerten. Die Ergebnisse der regionalen Klimasimulation 2021-2050 unterscheiden sich zwar mancherorts, der generelle Trend geht jedoch in dieselbe Richtung: Im Winter wird es wärmer und feuchter, im Sommer dagegen trockener.



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

EHER HEISS UND WENIGER EIS

Die Klimasimulationen zeigen, dass die Temperatur bis 2050 im Durchschnitt um 0,8 - 1,7 °C zunehmen kann. Im Sommer steigt die mittlere Tagestemperatur um bis zu 1,4 °C. Im Winter fällt die Temperaturzunahme um bis zu 2 °C höher aus. Am stärksten wird wohl die Temperatur in den Monaten Dezember bis Februar steigen. Als Folge wird mehr Regen und weniger Schnee fallen. Daher kann es im Winter vermehrt zu Hochwassern kommen.

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 früher kommen, in manchen Regionen werden z.B. die Apfelbäume bis zu zwei Wochen früher blühen.

WEITERHIN 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 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 bisherige Trend mit feuchteren Wintern und trockeneren Sommern fortsetzen: 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 35 Prozent. Am meisten Niederschlag bekommen die Staulagen der im Westen gelegenen Untersuchungsregionen ab.

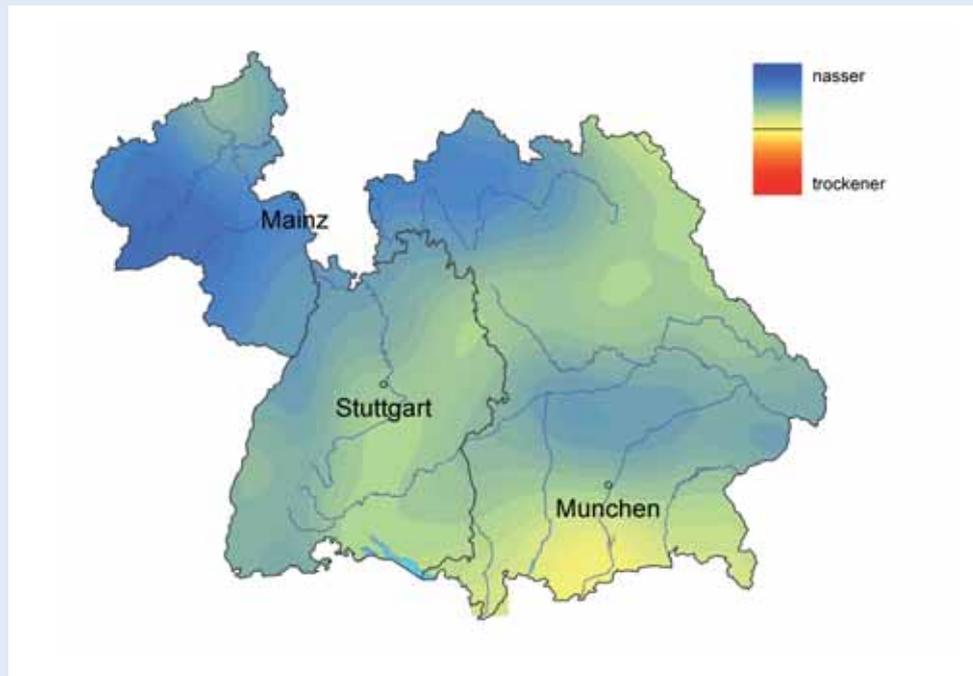
Zudem werden im Winter die Tage mit starken Niederschlägen (über 25 mm) deutlich zunehmen, in manchen Regionen wird sich die Zahl verdoppeln. Dagegen wird es mehr Tage geben, an denen überhaupt nichts von oben kommt: Trockenperioden im Sommer werden länger andauern.

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.

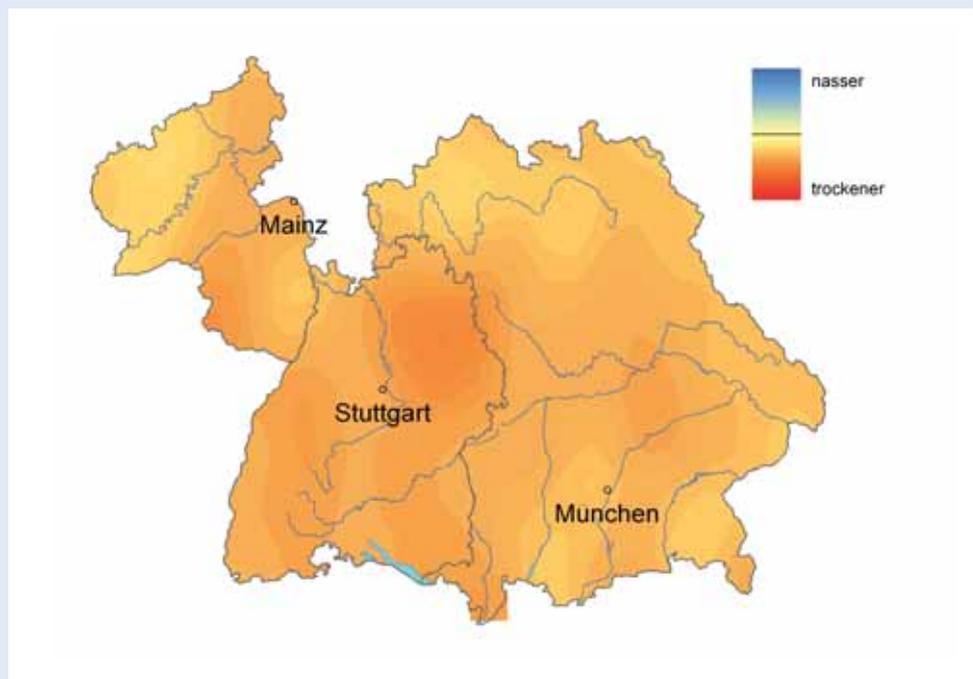
ZUNAHME DER NIEDERSCHLÄGE IM WINTER

Die Darstellung zeigt die Veränderung des Niederschlags im Winterhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000.



ABNAHME DER NIEDERSCHLÄGE IM SOMMER

Die Darstellung zeigt die Veränderung des Niederschlags im Sommerhalbjahr für die Zukunft (Projektion 2021-2050, WETTREG-2006/A1B) im Vergleich zum Ist-Zustand 1971-2000.





Unser wichtigstes Trinkwasserreservoir: Wie reagiert das 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. Trotz veränderter Klimabedingungen muss die Trinkwasserversorgung auch in der Zukunft sichergestellt werden.



Noch sprudeln unsere Quellen und die Grundwasserspeicher sind reichlich gefüllt.

BISHER NUR GERINGE VERÄNDERUNGEN

Die Grundwasserstände und Quellschüttungen werden bereits seit mehreren Jahrzehnten, zum Teil sogar seit über 100 Jahren, beobachtet. Die an speziellen 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 deutliche Änderungen im Jahresgang festzustellen sind. So tritt mittlerweile der Höchstwert im Jahresgang vielfach früher ein als zu Beginn der Beobachtungen – als Folge der Änderungen im jährlichen Temperatur- und Niederschlagsverlauf. Darüber hinaus lassen sich derzeit aus den Messdaten noch keine allgemein gültigen Aussagen zu einem „Klimasignal“ im Grundwasserbereich ableiten.

VORAUSSICHTLICHE ENTWICKLUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG

Die Grundwasserneubildung beträgt heute im Jahresmittel etwas mehr als 200 mm in Baden-Württemberg und Bayern, in Rheinland-Pfalz etwas mehr als 100 mm. Zum Vergleich: Die Niederschlagshöhe beträgt in Baden-Württemberg etwa 960 mm, in Bayern etwa 920 mm und in Rheinland-Pfalz etwa 760 mm. Für den Zeitraum 2021-2050 werden nur geringe Abweichungen bei der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserneubildung erwartet. Die Bodenwasserhaushaltsberechnungen mit dem Klimaszenario WETTREG-2006/A1B ergeben für Rheinland-Pfalz eine leichte Zunahme der Grundwasserneubildung um 4 mm, für Baden-Würt-

temberg und Bayern eher eine Abnahme (9 bzw. 13 mm). Der deutlichste Rückgang ist im Süden zu erwarten, im Nordwesten des KLIWA-Gebietes dagegen die größte Zunahme. Die veränderte Niederschlagsverteilung – weniger Regen im Sommer, mehr Niederschläge in den Wintermonaten – wird sich auch auf die Sickerwasserbildung auswirken: Im Sommer wird weniger, im Winter dagegen mehr Sickerwasser gebildet werden als bisher.

WAS IST ZU TUN?

Grundlage einer nachhaltigen Grundwasserbewirtschaftung ist die regelmäßige Beobachtung der Grundwassermenge und -beschaffenheit. Zu diesem Zweck werden in den drei Bundesländern seit vielen Jahren Grundwassermessnetze betrieben. Vor allem im Hinblick auf mögliche Auswirkungen des Klimawandels ist eine konsequente Fortführung des Messnetzbetriebs unerlässlich.

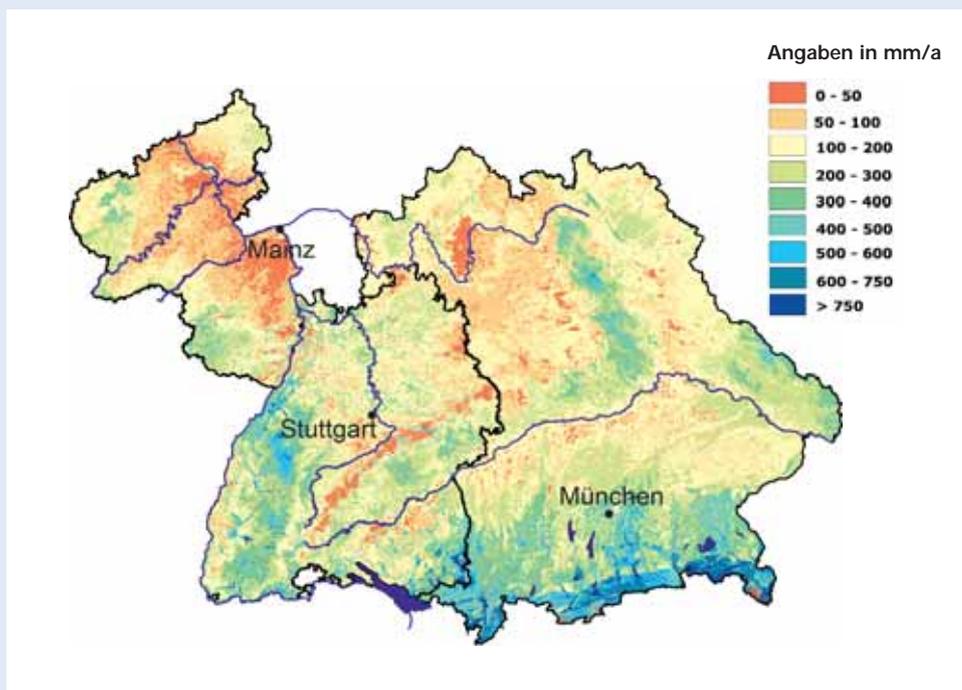
Längere sommerliche Trockenperioden können auch heute schon zu örtlich und zeitlich begrenzten Engpässen in der Wasserversorgung führen. Um diesen Versorgungsengpässen begegnen zu können, sind eine Reihe von Maßnahmen erforderlich. Dazu zählen der weitere Ausbau regionaler und überregionaler Verbundlösungen und effizientere Methoden zur Beregnung bewässerungswürdiger Flächen.

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 vernässungsfährdeten Gebieten zu berücksichtigen.



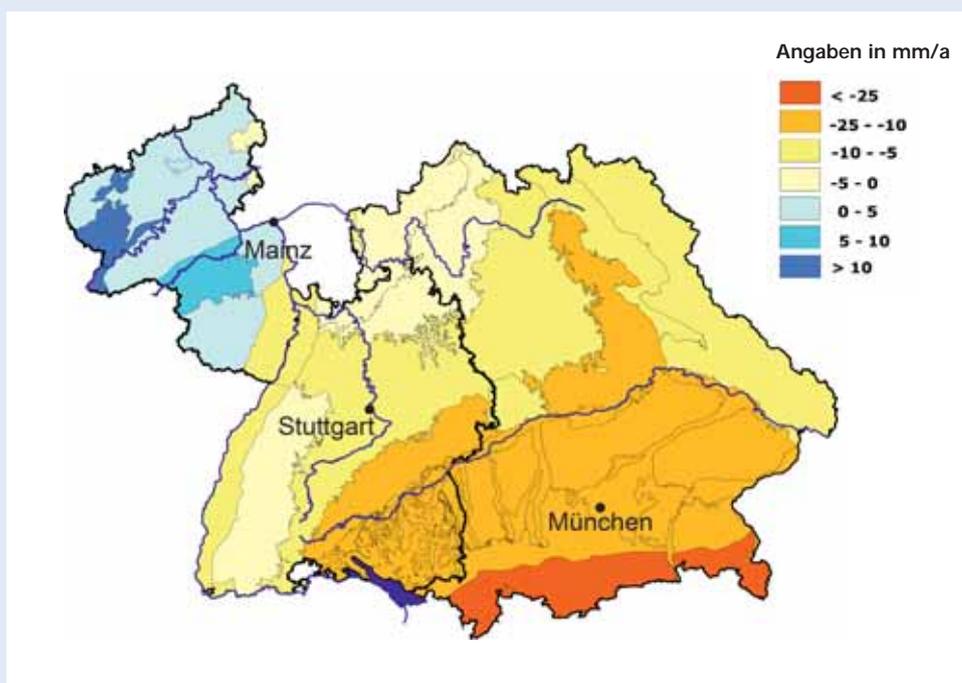
MITTLERE JÄHRLICHE GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG HEUTE (1971-2000)

Im Rahmen von KLIWA wurde die Grundwasserneubildung der Periode 1971-2000 für die drei Bundesländer mit einem einheitlichen Verfahren flächendeckend berechnet.



VERÄNDERUNG DER GRUNDWASSERNEUBILDUNG AUS NIEDERSCHLAG IN DER ZUKUNFT (2021-2050) IM VERGLEICH ZU HEUTE (1971-2000)

Darauf aufbauend wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung für den Zukunftszeitraum 2021-2050 unter Verwendung der regionalen Klimaprojektion WETTREG-2006/A1B untersucht.





Öfter und länger trocken: Niedrigwasser macht sich breit

Die trockeneren und wärmeren Sommer in der Zukunft lassen die Wasserstände sinken. Unter Niedrigwasser leidet jedoch nicht nur die Binnenschifffahrt. Auch der Landwirtschaft oder der Energiewirtschaft setzen die Trockenperioden zu. Niedrigwasserextreme sind wirtschaftlich gravierend: Die volkswirtschaftlichen Schäden in Deutschland waren in Folge der lang andauernden Trockenperiode 2003 größer als die einer der Hochwasserkatastrophen an Rhein, Oder und Elbe der letzten Zeit. Durch Trockenheit sind vor allem viel größere Landesflächen, und damit neben dem Wasserhaushalt auch Flora und Fauna, mit längerer Wirkung betroffen als durch ein Hochwasserereignis.



Lange Trockenperioden machen dem Boden zu schaffen und verursachen Ernteeinbußen.

SINKENDE WASSERSTÄNDE TROTZ EXTREMER WETTEREREIGNISSE

Höhere Temperaturen führen zu mehr Regen im Winter, dafür weniger im Sommer – die Wasserwirtschaft wird sich auf eine Änderung des Niederschlagsregimes einstellen müssen. Extremwetterlagen werden häufiger auftreten: 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 extremen Hochwasserereignissen durch Dauer- und Starkregen gegenüber. Jüngste Beispiele sind das Hochwasser am Oberrhein im August 2007 oder die Überschwemmungskatastrophe auf der Schwäbischen Alb im Juni 2008, als der kleine Bach Starzel binnen Minuten anschwellte und in mehreren Orten schwere Schäden anrichtete.

WENIGER REGEN UND MEHR VERDUNSTUNG = NIEDRIGERE PEGELSTÄNDE IM SOMMER

Für die Zukunft sagen die Klimamodelle eine weitere Abnahme der sommerlichen Niederschläge voraus. Gleichzeitig wird die Verdunstung durch eine höhere Lufttemperatur zunehmen. Die Wahrscheinlichkeit einer ausgeprägt trockenen Vegetationsperiode hat seit 1985 um das Sechsfache zugenommen.

Die Szenarien zeigen in den Monaten Juni bis November deutliche bis starke Abnahmen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse in den untersuchten Flussgebieten in Baden-Württemberg und Bayern. Die

stärksten 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 besonders ausgeprägt. Lediglich im Einzugsgebiet der Nahe (Rheinland-Pfalz) werden schwache bis deutliche Zunahmen ermittelt (siehe Graphik rechts oben). Der Jahresgang der Veränderungen ist auf der rechten Seite unten dargestellt.

Die Niedrigwasserperioden werden in den meisten Regionen länger andauern; südlich einer Linie Karlsruhe – Coburg um mehr als 50 Prozent, nördlich dieser Linie einschließlich dem Einzugsgebiet der Nahe um 25 bis 50 Prozent.

WORST CASE NICHT INBEGRIFFEN

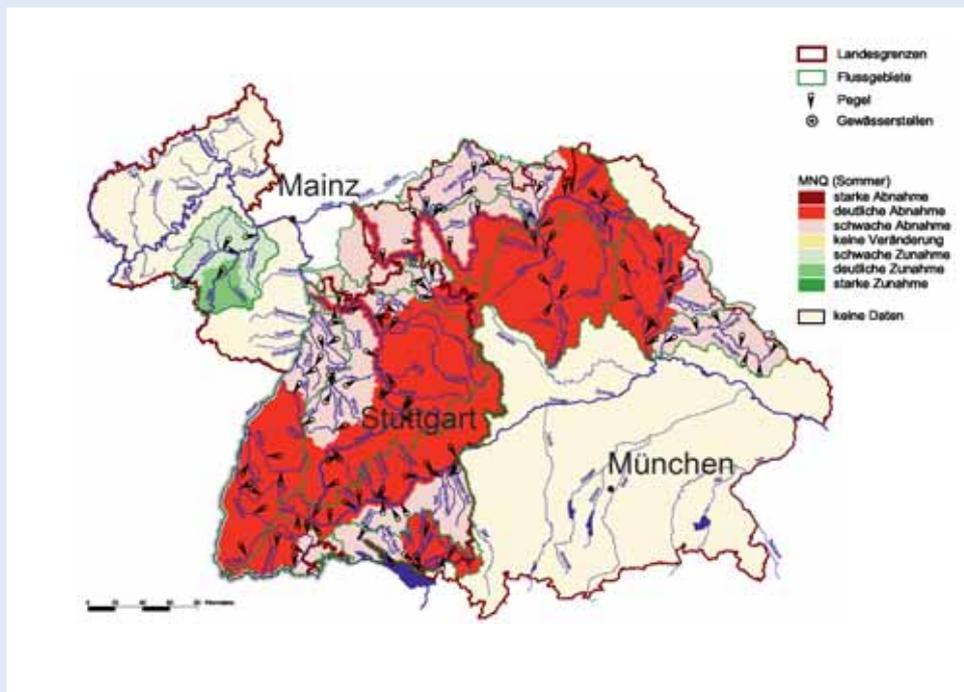
Die betrachteten Abflussprojektionen zeigen, dass die Niedrigwasserverhältnisse stark von der mittleren Lufttemperatur beeinflusst werden. Die Berechnungen setzen auf einem Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um ca. 1,0 °C bis zum Jahr 2050 auf. Da die Projektionen jedoch je nach Klimamodell und Szenario stark variieren (zwischen 1,0 °C und 1,8 °C), könnten sich die Niedrigwasserabflüsse und -perioden noch weitaus ungünstiger entwickeln.

Eine Aufgabe von KLIWA wird es daher sein, auf die Entwicklung noch genauerer regionaler Klimamodelle hinzuwirken, diese zu testen und Anpassungsstrategien zu erarbeiten. Vor allem der Rhein und die bayerischen Alpenflüsse werden Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.



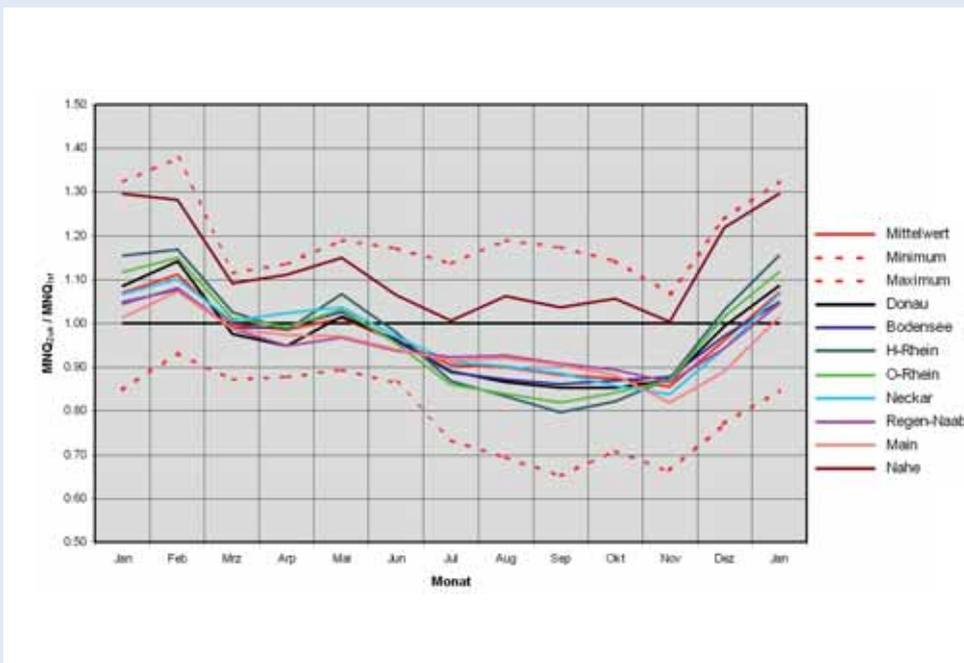
NIEDRIGWASSERABFLUSS IN DER ZUKUNFT

Räumliche Verteilung der zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNO der Monate Juni bis November, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen der untersuchten Flussgebiete.



JAHRESGANG DES NIEDRIGWASSERABFLUSSES

Die Grafik zeigt die Veränderungen des Verlaufs der durchschnittlichen monatlichen Niedrigwasserabflüsse über das Jahr als Verhältnis zukünftiger zu derzeitiger Niedrigwasserabflüsse für die untersuchten Flussgebiete, die in der oberen Abbildung dargestellt sind. Linien unterhalb von 1.0 bedeuten zukünftige Abnahmen, über 1.0 zukünftige Zunahmen der Niedrigwasserabflüsse.





„flexible and no regret“ -Strategie: Schutz vor 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.



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 sie später gegebenenfalls ohne Schwierigkeiten erhöht werden kann.

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 der Wasserhaushaltsmodelle 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 wurde beispielsweise ermittelt, dass der Abfluss für ein Jahrhunderthochwasser (HQ_{100}) bis 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 höheren Abfluss dimensioniert oder so geplant, dass bei Bedarf nachgerüstet werden kann.

UNTERSCHIEDLICHE KLIMAFOLGEN UND KLIMAÄNDERUNGSFAKTOREN

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 Klima-

änderungsfaktor 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. Im Bereich vom Hochrhein 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 damaligen Untersuchungsergebnisse 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.

Für die zuvor genannten Simulationen stehen für Rheinland-Pfalz die Szenarien, die für Baden-Württemberg und Bayern zu den Klimaänderungsfaktoren führten, nicht mehr zur Verfügung. Mit Hilfe neuer Klimaprojektionen sollen weitere Erkenntnisse über die Notwendigkeit von Klimaänderungsfaktoren auch für Rheinland-Pfalz gewonnen werden. Dort richtet sich die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen grundsätzlich nach den Randbedingungen des Einzelfalls und orientiert sich an der gefährdeten Bevölkerung, den Hochwasserschadenspotenzialen sowie der Wirtschaftlichkeit.

KLIMAÄNDERUNGS- FAKTOREN

Ein Zuschlag auf den hundertjährigen 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.



Ausblick

In der Zukunft sind 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. Mittlerweile sind die Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserabflüsse und die Grundwasserneubildung mehr in den Mittelpunkt der Untersuchungen gerückt. Ein veränderter Wasserhaushalt hat unmittelbare Folgen auf die Gewässernutzung – 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 wird ein künftiger Arbeitsschwerpunkt liegen.

Ein weiterer Untersuchungsschwerpunkt ist der erwartete Anstieg heftiger Kurzzeitniederschläge (Gewitter), die lokale Überschwemmungen verursachen können. 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 seinen 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 ■