

---

## 5. KLIWA-Symposium

am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg

*Fachvorträge*

# Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

---

KLIWA-Berichte

Heft 19

---



**KLIWA**  
Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

---

## 5. KLIWA-Symposium

am 6. und 7. Dezember 2012 in Würzburg

*Fachvorträge*

### Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

---

KLIWA-Berichte

Heft 19



**KLIWA**

Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

# IMPRESSUM

**Herausgeber** Arbeitskreis KLIWA  
LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg  
BLfU – Bayerisches Landesamt für Umwelt  
LUWG – Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft  
und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz  
DWD – Deutscher Wetterdienst

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

**Herausgabedatum** Dezember 2013

**Redaktionelle Bearbeitung** Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU)

Antje Böhmer (BLfU)  
Reinhard Kolb (BLfU)  
Holger Komischke (BLfU)  
Harald Morscheid (BLfU)  
Johann Weber (BLfU)

**Druck** Täuber Druck, 95359 Kasendorf

**Umwelthinweis** Gedruckt auf fsc-zertifiziertem Papier  
aus 100% Altpapier mit dem Blauen Engel

Diese Broschüre ist klimaneutral gedruckt

**Bezug über** LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg  
76231 Karlsruhe

Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Hans-Högn-Straße 12  
95030 Hof

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft  
und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz  
Kaiser-Friedrich-Straße 7  
55116 Mainz

Nachdruck – auch auszugsweise – nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenan-  
gabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.



## Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung .....	7
Zusammenfassung .....	9

### Klimawandel – politische und gesellschaftliche Herausforderungen

Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Bayern <i>Dr. Marcel Huber MdL, Staatsminister für Umwelt und Gesundheit Bayern</i> .....	17
Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Rheinland-Pfalz <i>Dr. Thomas Griese, Staatssekretär für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz</i> .....	21
Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Baden-Württemberg <i>Franz Untersteller MdL, Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg</i> .....	27
Der Deutsche Wetterdienst als Partner in KLIWA <i>Dr. Paul Becker, Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes und Leiter des Geschäftsbereichs Klima und Umwelt, Offenbach</i> .....	33
Klimapolitik nach Doha – Hindernisse in Lösungen verwandeln <i>Prof. Dr. Dr. Franz Josef Radermacher, Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung, Ulm</i> .....	37

### KLIWA – Untersuchungen zum Klimawandel in Süddeutschland

Überblick über das Kooperationsvorhaben KLIWA – Konzeption, Stand, Weiterentwicklung <i>Johann Weber, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof</i> .....	42
Klima-Monitoring – Fakten zum Klimawandel <i>Dr. Bruno Rudolf et. al., Deutscher Wetterdienst, Offenbach</i> .....	60
Regionale Klimaprojektionen bei KLIWA <i>Holger Komischke, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof</i> .....	67
Klimaentwicklung in Süddeutschland – Untersuchungen und Auswertergebnisse des DWD <i>Gerhard Hofmann, Deutscher Wetterdienst, München</i> .....	84





## **KLIWA - Veränderungen des Wasserhaushalts in Süddeutschland**

Hydrologisches Monitoring – Langzeitverhalten der Wasserhaushaltsgrößen <i>Dr. Andreas Meuser, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz, Mainz</i> .....	87
Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen <i>Bernd Katzenberger, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe</i> .....	99
Niedrigwasser – erkennbare Veränderungen und wasserwirtschaftliche Folgen <i>Dr. Michael Altmayer, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, München Dr. Harald Morscheid, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof</i> .....	111
Grundwasser – Veränderungen und fachliche Schlussfolgerungen <i>Dr. Jörg Neumann, Sybille Wendel, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof</i> .....	120

## **Von der Klimaforschung zur wasserwirtschaftlichen Wirkungsmodellierung**

Von der Vergangenheit bis in die Zukunft: Neue Klimasimulationen für Wissenschaft und Gesellschaft <i>Prof. Dr. Jochem Marotzke, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg</i> .....	130
Dynamische regionale Klimamodellierung – Sachstand und weitere Entwicklung <i>Dr. Gerd Schädler, Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe</i> .....	144
Modellierung des Wasserhaushalts unter Verwendung eines Klimaprojektions- Ensembles - methodisches Vorgehen und Ergebnisse <i>Dr. Kai Gerlinger, HYDRON GmbH, Karlsruhe Dr. Andreas Meuser, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, Karlsruhe</i> .....	154

## **Von Klimawandelfolgen zu wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien**

Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserkraftnutzung in der Schweiz <i>Dr. Bruno Schädler, Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe Hydrologie &amp; Oeschger Zentrum für Klimaforschung, David Volken, Bundesamt für Umwelt, Bern</i> .....	168
Das Klima ändert sich – harte Fakten für die österreichische Wasserwirtschaft <i>Reinhold Godina, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien</i> .....	179



---

Niedrigwassermanagement an Neckar und Rhein – Erfahrungen und Schlussfolgerungen <i>Uwe Bergdolt, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe</i> .....	189
Landwirtschaftlicher Beregnungsbedarf in der nördlichen Oberrheinebene <i>Dr. Georg Berthold, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden</i> .....	196
 <b>Von Ergebnissen aus Fallstudien zu konkreten Anpassungsmaßnahmen</b>	
Fallstudie Donauried – Auswirkung des Klimawandels auf die Entwicklung der Nitratbelastung im Grundwasser <i>Thomas Gudera, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe</i> .....	210
Fallstudie Ilz – Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung im Bayerischen Wald <i>Dr. Wolfgang Sprenger et. al., Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof Beate Klöcking, Büro für Angewandte Hydrologie, München</i> .....	227
Kleinräumige Modellierung zur Abschätzung der Bodenerosion infolge von Starkniederschlägen <i>Dr. Tilmann Sauer et. al., Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen, Trippstadt</i> .....	237
Untersuchungen zu Auswirkungen der Klimaveränderung auf die gewässerökologischen Verhältnisse <i>Dr. Folker Fischer, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof</i> .....	250
Verzeichnis der Referenten .....	255
Bisher erschienene KLIWA-Berichte .....	257



## Vorbemerkung

Das Vermeidbare vermeiden – das Unvermeidbare beherrschen: Diese Maxime gilt besonders in Bezug auf den Klimawandel und spiegelt sich in den beiden Handlungsfeldern Klimaschutz und Klimawandel-Anpassung. In den bisherigen IPCC-Berichten ist klar geworden, dass der globale Temperaturanstieg nur bei größten weltweiten Klimaschutz-Anstrengungen auf ein „akzeptables“ Maß von 2°C bis zum Ende des Jahrhunderts zu begrenzen ist. Auch für diesen Fall kommen auf die meisten Länder der Erde weitreichende Veränderungen zu. Eine frühzeitige und vernetzte Anpassung an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels kann in vielen Fällen die Auswirkungen von Naturkatastrophen begrenzen und große wirtschaftliche wie ökologische Schäden vermeiden oder minimieren helfen.

Der Wasserhaushalt und damit in direkter Weise auch die Bewirtschaftung unserer Wasserressourcen sind unmittelbar von den klimatischen Verhältnissen abhängig und reagieren damit besonders empfindlich auf Veränderungen. Hochwasser, Niedrigwasser, Gewässerqualität, Grundwasserstände und Wasserversorgung sind Beispiele für existenzielle Bereiche, die betroffen sein werden.

Aus diesem Grund haben sich wasserwirtschaftliche Fachbehörden frühzeitig mit der Fragestellung nach den Folgen einer Klimaveränderung befasst. Die Komplexität und der hohe Anspruch der Aufgabe fordern auf der Ebene der Bundesländer einen hohen Einsatz, weshalb im Jahr 1999 das Länder-Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft) gegründet wurde. Heute arbeiten hier die Wasserwirtschaftsverwaltungen von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz fachlich eng mit dem Deutschen Wetterdienst zusammen. Das breit angelegte Untersuchungsprogramm von KLIWA orientiert sich dabei an folgenden Leitfragen:

- Wie ist der Kenntnisstand zum bisherigen regionalen Klimawandel und seinen Auswirkungen in Süddeutschland?
- Mit welchen regionalen Veränderungen ist zukünftig zu rechnen und wie belastbar sind die Ergebnisse der Klimamodellierung?
- Welche Erkenntnisse zum regionalen Wandel des Wasserhaushalts können daraus abgeleitet werden?
- Welche wasserwirtschaftlichen Strategien und Vorsorgemaßnahmen können entwickelt werden?

Hierbei werden alle wesentlichen wasserwirtschaftlichen Bereiche in den verschiedenen Arbeitsgruppen abgedeckt, in einer übergreifenden Projektkoordination abgestimmt und vernetzt und in einer Vielzahl von Teilprojekten bearbeitet.

Neben den vielfältigen Veröffentlichungen stellen die KLIWA-Symposien einen elementaren Baustein zur Darstellung der jeweils neuesten Ergebnisse des Kooperationsvorhabens dar. Nach der Bestandsaufnahme durch das 1. Symposium im November 2000 folgten die weiteren Veranstaltungen im Mai 2004, Oktober 2006 und Dezember 2009. Das 5. KLIWA-Symposium im Dezember 2012 konnte einem breit angelegten Fachpublikum aus Politik, Wissenschaft und Verwaltung neben den Fortschritten bei Klima- und Wasserhaushaltsprojektionen auch ein deutlich erweitertes Themengebiet präsentieren.

Der vorliegende Band spiegelt die Vielfalt der Thematik Klimawandel wieder und präsentiert die bisher erreichten Arbeitsergebnisse. Darüber hinaus gibt er einen Überblick über die bestehenden Probleme und Fragestellungen, die es in diesem Bereich noch zu lösen gilt. Aus den bisherigen Ergebnissen wird klar, dass der Klimawandel auch im Süden Deutschlands längst nachweisbar ist und zu weitreichenden Veränderungen führen wird. Durch rechtzeitige Anpassung und Vorsorge sollen die möglichen nachteiligen Auswirkungen, wenn sie nicht zu verhindern sind, zumindest in ihren Auswirkungen begrenzt werden.



## Zusammenfassung

Die Thematik Klimawandel und die damit verbundenen möglichen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft sind Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Forschungsvorhaben. Die aktuellen Veröffentlichungen internationaler Institutionen zum Klimawandel zeigen fortschreitende globale Veränderungen, die auch regionale Konsequenzen haben werden. Umso wichtiger werden daher belastbare Aussagen, die ein Fundament für zielgerichtete Anpassungsmaßnahmen liefern. Der Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der süddeutschen Flussgebiete wird seit 1999 mit dem Untersuchungsprogramm „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) nachgegangen. In KLIWA arbeiten die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst fachlich eng zusammen. Ziel ist die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in Flussgebieten und Grundwasserlandschaften dieser Länder abzuschätzen und wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen gemeinsam abzuleiten. Zusammenfassende fachliche Bestandsaufnahmen zum Ergebnisstand des Vorhabens finden in mehrjährigen Abständen im Rahmen von Fachsymposien statt.

Auf dem 5. KLIWA-Symposium, das am 6. und 7. Dezember 2012 in der Würzburger Residenz stattfand, befassten sich mehr als 200 Experten aus Wissenschaft, Forschung, Verwaltung sowie politische Entscheidungsträger mit den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft in Süddeutschland. Dabei standen Veränderungen zu Niedrigwasser- und Grundwasserständen, Hochwassergefahren und Gewässerökologie im Mittelpunkt. In fünf Themenschwerpunkten mit insgesamt 19 Vorträgen wurden relevante Einzelthemen zu den Fragenkomplexen „Regionale Klimaveränderung, Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserwirtschaft sowie Anpassungskonzepte“ behandelt. Der Tagungsband enthält die schriftliche Fassung der verschiedenen Beiträge und die vorgestellten Erkenntnisse.

### **Klimawandel – politische und gesellschaftliche Herausforderungen**

Die Bedeutung des Kooperationsvorhabens KLIWA wird in den Statements der politischen Vertreter der KLIWA-Partner hervorgehoben. Übereinstimmend wird darauf hingewiesen, dass der Klimawandel als globales Problem auch in Süddeutschland bereits konkrete spürbare Auswirkungen zeigt. Dies erfordert neben den Anstrengungen zum Klimaschutz auch umsetzbare Anpassungsstrategien. Um die Folgen der Klimaveränderung bewältigen zu können, ist ein enger fachlicher Schulterschluss benachbarter Bundesländer zweckmäßig. So können Kapazitäten gebündelt und übergreifende und abgestimmte Anpassungsmaßnahmen für eine adäquate Vorsorge entwickelt werden. Dazu ist auch eine breite Information und Sensibilisierung der Öffentlichkeit erforderlich, um Akzeptanz für Maßnahmen des Klimaschutzes und der Anpassung an den Klimawandel auf allen Skalen zu erreichen. Das Vorhaben KLIWA wird dabei als Vorbild und herausragendes Beispiel für eine länderübergreifende Kooperation auf dem vielleicht wichtigsten Gebiet der Umweltpolitik gesehen. Durch die aktive Mitwirkung des Deutschen Wetterdienstes und die Beteiligung weiterer Fachinstitutionen ergibt sich eine effiziente interdisziplinäre Zusammenarbeit, die für die zielführende Behandlung der komplexen Fragestellungen die notwendigen Voraussetzungen schafft.

Mit übergreifenden Ausführungen zeigt Dr. Radermacher, Professor (für Informatik an der Universität Ulm) und Leiter des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung zu Beginn die globalen Aspekte des Klimawandels auf. Er beleuchtet die bestehenden Fortschrittserwartungen von Entwicklungsländern und die damit verbundenen gesellschaftspolitischen Schwierigkeiten auf globaler Ebene, von denen der Klimawandel we-



sentlicher verschärfender Bestandteil ist. Vor dem Hintergrund der demographischen Entwicklung und der Ressourcenverknappung werden die globalen Treibhausgasemissionen noch weiter zunehmen, damit werden aber auch die Möglichkeiten zum Erhalt oder Erreichen eines vergleichbaren Lebensstandards in den nächsten Jahrzehnten zunehmend fragwürdig. Er weist dabei eindringlich auf die Dringlichkeit eines durchgreifenden globalen Handelns und die derzeit noch machbaren Optionen für eine Begrenzung der globalen Treibhausgasemissionen hin.

### **KLIWA – Untersuchungen zum Klimawandel in Süddeutschland**

Das Vorhaben KLIWA hat eine klare Struktur mit den fünf Arbeitsbereichen A, B, C, D und Ö; die Ermittlung der bisherigen Veränderungen im Klima und Wasserkreislauf (Bereich A) und die Erfassung der fortschreitenden Veränderungen im Sinne eines Monitorings (Bereich C) befassen sich mit der Vergangenheit und gemessenen Daten. Zusammen mit der Abschätzung der künftig möglichen Auswirkungen (Bereich B) ergeben sich daraus hydrologische Handlungsgrundlagen und fallweise eine Anpassung des wasserwirtschaftlichen Handelns mit Vorsorgekonzepten (Bereich D). Die Bereitstellung und Verbreitung der Untersuchungsergebnisse ist schließlich erklärtes Ziel des Bereichs Öffentlichkeitsarbeit (Bereich Ö), zu der auch das Symposium selbst gehört. Jeder dieser Arbeitsbereiche umfasst eine Vielzahl von Teilprojekten, die überwiegend an Fachinstitute und Ingenieurbüros zur Bearbeitung vergeben werden.

Ein grundlegender Projektbereich von KLIWA ist die Untersuchung des Langzeitverhaltens verschiedener relevanter meteorologischer und hydrologischer Kenngrößen, um sich abzeichnende Klimaänderungssignale zu detektieren. Für die meteorologischen Größen Temperatur und Niederschlag fasst der 2. Monitoringbericht von 2011 die aktuellen Untersuchungsergebnisse des DWD für Süddeutschland zusammen. Die mittlere Lufttemperatur weist für die Zeitreihe 1931-2010 im Gesamttrend einen deutlichen Anstieg von im Mittel ca. +1,0°C auf, wobei im hydrologischen Winterhalbjahr dieser insgesamt stärker ausgeprägt ist. Die Trends der mittleren Gebietsniederschlagshöhe (1931-2010) sind im Winterhalbjahr generell positiv ausgeprägt (+7 % bis +28 %), zeigen aber für das Sommerhalbjahr keine eindeutige Entwicklung (-10 % bis +5 %). Die Auswertung der Starkniederschläge (24h) zeigt ein ähnliches Verhalten mit einer ebenfalls eindeutigen Zunahme im hydrologischen Winterhalbjahr, jedoch regional deutlich uneinheitlicher.

Neben der Auswertung des Langzeitverhaltens wesentlicher meteorologischer Kenngrößen wird die zukünftige Entwicklung des Klimas in Süddeutschland mit Hilfe regionaler Klimaprojektionen abgeschätzt, um damit die Folgen auf den Wasserhaushalt sachgerecht ableiten und bewerten zu können. Zugrunde liegen den regionalen Klimaprojektionen Annahmen aus dem naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Bereich, die naturgemäß mit Unsicherheiten behaftet sind. Diese Unsicherheiten führen dazu, dass „die eine Prognose“ für die Zukunft nicht erstellt werden kann. Vielmehr werden mit verschiedenen Regionalmodellen unterschiedliche Projektionen berechnet, die mögliche Entwicklungspfade für die Zukunft aufzeigen und damit auch eine gewisse Ergebnisbandbreite.

Fasst man die in KLIWA aufgrund mehrerer regionaler Klimaprojektionen ermittelten Veränderungen der Temperatur und des Niederschlags für den Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000 zusammen, ergeben sich aus dem verwendeten KLIWA-Ensemble die folgenden Veränderungen:

Die Lufttemperatur wird in Süddeutschland mit bis zu +2,1 °C im Winterhalbjahr in Bayern generell weiter zunehmen. Mit Ausnahme von Rheinland-Pfalz fallen die Temperaturerhöhungen im Winterhalbjahr meist deutlicher aus als im Sommerhalbjahr. Dementsprechend werden sich auch die Zahlen der Kenntage verändern, Kenntage für kalte Verhältnisse werden abnehmen, Kenntage für höhere Temperaturen zunehmen. Für den Niederschlag zeigen



sich im Sommerhalbjahr geringfügige Abnahmen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet ab, während im Winterhalbjahr Zunahmen des Niederschlags im Vordergrund stehen. Je nach Region sind diese Zunahmen deutlicher oder weniger stark ausgeprägt.

### **KLIWA – Veränderungen des Wasserhaushalts in Süddeutschland**

Bei der Betrachtung der Veränderungen des Wasserhaushalts stehen die Abflussregime der Flussgebiete und ihre Hoch- und Niedrigwasserabflüsse sowie Veränderungen im Bereich Grundwasser im Mittelpunkt. Auch hier werden einerseits bereits messbare Veränderungen für die Vergangenheit ermittelt sowie Projektionen für die Zukunft ausgewertet. Ohne entsprechende hydrologische Messungen sind aber Aussagen zur Vergangenheit und Abschätzungen der möglichen weiteren Entwicklung in der erforderlichen Qualität nicht belastbar. Mit Messdaten können Fakten erarbeitet und die Entwicklung und die Auswirkungen des Klimawandels verfolgt werden. Diese aktuellen Untersuchungen zu den Trends von Hoch- und Niedrigwasserabflüssen sowie von Grundwasserständen und Quellschüttungen sind ebenfalls im Monitoringbericht 2011 für Süddeutschland veröffentlicht. Für den betrachteten Zeitraum 1932 bis 2010 zeigen sich im KLIWA-Untersuchungsgebiet überwiegend Trends zu steigenden Hochwasserabflüssen im hydrologischen Winterhalbjahr und in abgeschwächter Form auch für das Sommerhalbjahr. Von den ermittelten Zunahmen sind allerdings im Mittel nur 30 bis 40 % der Trends signifikant.

Die Auswertungen des Langzeitverhaltens der Niedrigwasserabflüsse im Zeitraum 1951 bis 2010 ergeben für das gesamte KLIWA-Untersuchungsgebiet keine klaren Trends. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss jedoch beachtet werden, dass gerade bei geringen Abflüssen häufig eine Beeinflussung durch Nutzungen und wasserwirtschaftliches Management vorliegt. Eine systematische Auswertung zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen der wichtigsten Grundwasserleiter in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz hat gezeigt, dass in zahlreichen Fällen bereits saisonale Veränderungen 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.

Um die zukünftige Entwicklung des Wasserhaushalts genauer zu untersuchen, wird in KLIWA methodisch auf hoch aufgelöste Wasserhaushaltsmodelle und im Bereich Grundwasser auf Bodenwasserhaushaltsmodelle, angetrieben mit regionalen Klimaprojektionen zurückgegriffen. Diese erlauben Aussagen zu der Entwicklung der Hochwasser- und Niedrigwasserverhältnisse in den süddeutschen Flussgebieten oder zum Bodenwasserhaushalt und der Grundwasserneubildung. Aufbauend auf der Änderung hydrologischer Kenngrößen können bestehende Anpassungsoptionen genutzt, neue Anpassungsmöglichkeiten entwickelt sowie Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft formuliert werden. Mittlerweile liegen Ergebnisse von Wasserhaushaltsmodellierungen mit verschiedenen regionalen Klimaprojektionen bis zum Jahr 2050 vor, einzelfallbezogen auch bis 2100.

Bei der Betrachtung der simulierten Hochwasserabflüsse für das Rheingebiet ergibt sich eine Tendenz zu einer Hochwasserverschärfung, die allerdings bei den Pegeln mit nivalem Abflussregime deutlich geringer ausfällt als bei den Pegeln mit pluvialem Regime. Weitere untersuchte Flussgebiete zeigen im Winterhalbjahr ebenfalls Zunahmen. Die relativ große Bandbreite der ermittelten Ergebnisse erfordert bei der Anpassung unter Berücksichtigung des Vorsorgeprinzips eine hohe Flexibilität, was sich auch in der bisherigen Anpassungsstrategie von Baden-Württemberg und Bayern mit der Festlegung von Hochwasseränderungsfaktoren widerspiegelt.

Häufigere und länger andauernde Trockenperioden in Folge des Klimawandels werden zu vermehrtem Auftreten von Niedrigwasserphasen in den oberirdischen Gewässern und im Grundwasser führen. Für die mittleren sommerlichen Niedrigwasserabflüsse ergeben sich zukünftig fast im gesamten Untersuchungsgebiet Abnahmen, die in Teilen von Baden-





Württemberg und Nordbayern zwischen -10 und -20 % liegen, für bestimmte Klimaprojektionen gebietsweise aber auch noch deutlich stärker ausfallen können. Eine wichtige Herausforderung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel wird die Koordination bereits bestehender und zukünftiger Maßnahmen unter Berücksichtigung verschiedener Interessen bei sich verschärfenden Niedrigwassersituationen sein.

Zur Abschätzung möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasser wurden Simulationsrechnungen für die Vergangenheit (1951-2010) sowie erste Szenariosimulationen für die nahe und ferne Zukunft (2021-2100) durchgeführt und ausgewertet. Dabei wurde deutlich, dass die bereits in der Vergangenheit beobachteten Entwicklungstendenzen sich in Zukunft meist weiter verstärken werden. So wird sich die veränderte Niederschlagsverteilung – weniger Regen im Sommer, mehr Niederschlag in den Wintermonaten – auch auf den Bodenwasserhaushalt noch stärker als bisher auswirken: Im Sommer wird zukünftig weniger, im Winter dagegen mehr Sickerwasser gebildet. Im Zusammenhang damit wird während der Vegetationsperiode auch die Wasserverfügbarkeit im Boden weiter abnehmen. Während sich für den Zeitraum 2021-2050 in den meisten Teilen Süddeutschlands nur geringe Veränderungen der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserneubildung ergeben, können die Änderungen im Jahresgang regional jedoch spürbare Auswirkungen nach sich ziehen. In entsprechenden Problemgebieten sind deshalb bereits verschiedene Fallstudien zu möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt worden, weitere Studien sind derzeit noch in Bearbeitung bzw. Vorbereitung. Die gesammelten Erkenntnisse dienen unmittelbar zur Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen, insbesondere im Hinblick auf die Trinkwasserversorgung.

### **Von der Klimaforschung zur Wirkungsmodellierung**

Neben den bisherigen Ergebnissen der Modellierungen und Auswertungen sind in KLIWA auch das abgestimmte methodische Vorgehen nach aktuellem Forschungs- und Wissensstand sowie die Berücksichtigung der aktuellen Datenlage von großer Bedeutung. Zukünftige Veränderungen sind nur über eine „Modellkette“ (Antriebsszenario – Globales Klimamodell – Regionales Klimamodell – Impaktmodell) sinnvoll abzuschätzen. Der aktuelle Wissensstand zu den einzelnen Modellkettengliedern ist in verschiedenen Vorträgen genauer beleuchtet. Ausgehend von neuen Antriebsszenarien, sogenannte RCPs (Representative Concentration Pathways), welche die bisher verwendeten SRES-Szenarien ablösen werden, sind im Rahmen des CMIP5-Projektes (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) seit kurzem neue globale Klimaprojektionen verfügbar. Diese werden bereits als Antrieb für neue regionale Klimaprojektionen im mitteleuropäischen Raum und somit auch für weitere Untersuchungen in KLIWA zur Verfügung stehen. Die Ergebnisse aus dem CMIP5-Projekt sollen zudem auch in den 5. IPCC-Sachstandsbericht einfließen, der 2013/2014 erscheinen soll. Das Vorhaben KLIWA wird die neuen Projektionen des 5. IPCC Berichts prüfen und die daraus ermittelbaren Veränderungen für das Klima und den Wasserhaushalt den bisherigen Ergebnissen gegenüberstellen.

Ein Beispiel für die in KLIWA verwendeten regionalen Klimamodelle ist COSMO-CLM4.8(A1B)/ECHAM5. Derzeit werden drei Läufe basierend auf dem „alten“ Emissionsszenario A1B verwendet. Für die Nutzung der Klimaprojektionen von dynamischen Klimamodellen sei hier nur allgemein auf die Frage nach dem sachgerechten Umgang mit Bias-Korrekturen als Voraussetzung für die wasserwirtschaftliche Wirkungsmodellierung hingewiesen.

Für die Modellierung des Wasserhaushalts in der oben genannten Modellkette werden im Rahmen des KLIWA-Projekts die Modellsysteme LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie WaSiM-ETH in Bayern eingesetzt. Diese Wasserhaushaltsmodelle decken die Landesflächen sowie angrenzende Quelleinzugsgebiete des Rheins und des Inns flächendeckend räumlich hoch aufgelöst ab, in der Regel mit 1 x 1 km Rasterzellen. Plausibili-

tätsprüfung und Auswertung der Ergebnisse erfolgen unter anderem durch Analyse der Regimekurven der mittleren monatlichen Abflüsse für die hydrologischen Kenngrößen (MNQ(m), MQ(m) und MHQ(m)). Ebenso werden zur Analyse des extremen Abflussverhaltens Dauerlinien erstellt sowie extremwertstatistische Untersuchungen durchgeführt.

### **Von Klimawandelfolgen zu Anpassungsstrategien- methodisches Vorgehen**

Mit zwei Beiträgen aus der Schweiz und Österreich wird der regionale Blickwinkel erweitert und Parallelen zum Vorgehen und zu den Erkenntnissen in KLIWA aufgezeigt. Im Projekt CCHydro haben mehrere Forschungsinstitute gemeinsam die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung der Schweiz bis zum Jahre 2100 untersucht. Ähnlich wie in Süddeutschland ist eine Veränderung der Abflussregime mit einer jahreszeitlichen Umverteilung der Abflüsse zu erwarten, auch wenn sich das Wasserdargebot in der Schweiz in Abhängigkeit vom mittleren Niederschlag zukünftig nur wenig ändern wird. Insbesondere Niedrigwasserphasen dürften aber - wie auch aus den Ergebnissen in KLIWA für Süddeutschland ableitbar - häufiger und teilweise intensiver in den nicht alpinen Landesteilen auftreten.

Aus der Studie „Anpassungsstrategie an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft“ ergeben sich insgesamt moderate Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und die Wasserverfügbarkeit in Österreich. Ähnlich den Ergebnissen in KLIWA zeigt sich, dass die bestehenden Unsicherheiten noch sehr groß sein können. Als Fazit sollten auch hier robuste Maßnahmen gewählt werden. In fachlicher Übereinstimmung mit KLIWA werden zudem die bestehenden Monitoringsysteme als unverzichtbar für belastbare Analysen der Veränderungen der hydro(meteoro)logischen Kenngrößen angesehen. Die Beiträge zeigen auch, wie wichtig der Austausch der ermittelten Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels zwischen den verschiedenen Institutionen über die Landesgrenzen hinweg ist.

Anpassungsstrategien liefern eine gemeinsame Ausgangsbasis, auf der ein zielgerichtetes Handeln für die betrachteten Flussgebiete ermöglicht wird. Basierend auf den Erkenntnissen über Ausmaß und Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt werden im Projektbereich D in KLIWA die Anfälligkeit der bestehenden wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen und die mögliche Beeinträchtigung der wasserwirtschaftlichen Nutz- und Schutzfunktionen untersucht. Zur Abmilderung negativer Auswirkungen sollen daraus in fachlicher Abstimmung Handlungsempfehlungen für sachgerechte Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Regionale Fallstudien sind dabei ein wichtiges Instrument, um länderbezogene Anpassungsstrategien zu verfeinern und problemspezifisch regional zu konkretisieren. Bestehende Managementsysteme können hierzu ebenfalls bedeutende Hinweise und Ansätze liefern um Handlungsempfehlungen konkret weiter zu entwickeln. Ein Beispiel hierfür ist das Niedrigwassermanagement an Neckar und Rhein der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz in Baden-Württemberg. Es wird im akuten Fall neben der generellen Niedrigwasservorsorge eingesetzt, um die nachteiligen Auswirkungen von Niedrigwasserereignissen bei Hitzeperioden abzumildern. Dieses Beispiel eines flussgebietspezifischen Niedrigwassermanagements zeigt ein mögliches Vorgehen, um sich den regionalen Herausforderungen von in Zukunft ausgedehnteren und häufiger auftretenden Trockenperioden anzupassen.

Im Ernstfall kann dabei der Zwang sehr groß sein, die Interessen verschiedener konkurrierender Wassernutzungen mit den wasserwirtschaftlichen Anforderungen im Niedrigwasserfall angemessen auszugleichen. Dies ist erst möglich, wenn man die potentiellen Wassernutzungen ermittelt und quantifiziert hat und diese Ergebnisse möglichst auch um Abschätzungen für die Zukunft erweitern kann. Ein Beispiel hierfür ist die Ermittlung des landwirtschaftlichen Beregnungsbedarfs in der nördlichen Oberrheinebene, dessen mögliche zukünftige Entwicklungen und Restriktionen in einem Projekt vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie untersucht und zur Diskussion gestellt werden.



## Von Ergebnissen aus Fallstudien zu konkreten Anpassungsmaßnahmen

Im Rahmen der Thematik Grundwasser konnten zuletzt in KLIWA verschiedene Fallstudien durchgeführt werden, um in ausgewählten Problemgebieten mögliche regionale Auswirkungen des Klimawandels zu quantifizieren. Zwei Beispiele zeigen exemplarisch Herangehensweise und Ergebnisse auf. Daneben werden zudem die KLIWA-Arbeitsschwerpunkte „Klimawandel und Boden“ sowie „Klimawandel und Gewässerökologie“ beleuchtet.

Am Beispiel des Langenauer Donaurieds wurde anhand einer komplexen Modellkette untersucht, wie sich die Grundwasserbeschaffenheit bei sich verändernden klimatischen Verhältnissen entwickeln kann. Zielsetzung war zunächst die Beschreibung der quantitativen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse; darauf setzten dann die Abschätzung des Nitrataustrags aus dem Boden, die Nitratkonzentrationsentwicklung im Grundwasser und die Konsequenzen für die Grundwassernutzung der öffentlichen Wasserversorgung im Untersuchungsgebiet auf. Die Fallstudie kam zum Schluss, dass sich klimatisch bedingt keine signifikante Änderung des Nitratintrags bei tendenziell sinkenden Grundwasserständen bis 2050 ergeben wird; dabei wird aber vorausgesetzt, dass die landwirtschaftliche Bewirtschaftung in bisheriger Weise fortgeführt wird und auch aus anderen Nutzungen kein erhöhter Nitratintrag erfolgt.

Eine weitere Fallstudie untersuchte die Auswirkungen für das Einzugsgebiet der Ilz im Bayerischen Wald. Im dortigen kristallinen Untergrund fehlen großräumig zusammenhängende Grundwasserleiter, so dass die lokale Wasserversorgung primär auf Quellwasser basiert. Für die Wasserversorgung ist daher die zukünftige Entwicklung der Quellschüttungen vor dem Hintergrund des Klimawandels von entscheidender Bedeutung. Die Fallstudie ergänzt makroskalige Wasserhaushaltssimulationen sowie Grundwasserstands- und Quellschüttungsanalysen auf regionaler Ebene für dieses Flussgebiet. Aufgrund projizierter Rückgänge der Abflüsse bzw. Quellschüttungen in den Sommermonaten zu den Spitzenbedarfszeiten und der Hauptvegetationsperiode, ist in Zukunft häufiger mit Engpässen in der Trinkwasserversorgung zu rechnen. Aus den Untersuchungen kann eine Reihe von Handlungsempfehlungen abgeleitet werden, mit denen die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung abgemildert werden können.

Wie sich das Risiko von Bodenerosion durch Starkregen zukünftig verändern könnte, wird im KLIWA-Teilprojekt „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ anhand ausgewählter Kleineinzugsgebiete untersucht. In dem noch laufenden Teilprojekt dienen die Ergebnisse eines ausgewählten regionalen Klimamodells (COSMO-CLM4.8(A1B)/ECHAM5) in sehr hoher räumlichen Auflösung von max. 1 x 1 km und einer angestrebten zeitlichen Auflösung von 15 Minuten als Eingangsdaten für ein Bodenerosionsmodell (LISEM). Erste Validierungsergebnisse sind sehr vielversprechend, in einem weiteren Schritt sollen Modellierungen für die Zukunft durchgeführt werden. Mit diesem Teilprojekt, in dem die Erstellung und Nutzung von hoch aufgelösten Klimaprojektionsdaten weiter vorangetrieben wird, können auch Auswirkungen des Klimawandels auf Starkregenergieereignisse untersucht werden und ggf. darauf aufbauend ihre Bedeutung für die Siedlungswasserwirtschaft in weiteren Teilprojekten geprüft werden.

Ein relativ neuer Projektschwerpunkt im Vorhaben KLIWA ist die Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökologie. Die im Zusammenhang mit dem Klimawandel prognostizierten Veränderungen der Lufttemperatur, der Niederschlagsverteilung und die daraus resultierenden Abflussverhältnisse haben auf die Hydromorphologie, die Wassertemperatur und den Chemismus und damit auch auf die Lebensgemeinschaften in Gewässern einen entscheidenden Einfluss. Allerdings ist das Wissen über konkrete regionale Auswirkungen auf die Gewässerökologie bisher gering. Erste Untersuchungen wurden mit der Studie „KLIWA - Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturauswertung und erste Vulnerabilitätsabschätzung“ durchgeführt. Sie zeigen unter anderem in

Wirkungsketten die Zusammenhänge zwischen Klimawandel und Fließgewässerqualität im regionalen Maßstab der Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz. Aus den umfangreichen Literaturlauswertungen und modellhaften Sensitivitätsanalysen ergibt sich, dass mit Veränderungen in der Fließgewässerqualität gerechnet werden muss, aber derzeit noch große Wissenslücken existieren. Teilweise sollen diese Wissensdefizite im aktuellen Projekt „Anforderungen an ein gewässerökologisches Klimamonitoring“ verringert werden.

### **Fazit und Ausblick**

Mit dem Fachsymposium ist es gelungen, die aktuellen KLIWA-Ergebnisse zu den konkreten regionalen Auswirkungen des Klimawandels für Süddeutschland einem breiten fachlich interessierten Teilnehmerkreis zu präsentieren. Mit dem Schwerpunkt auf die Bereiche Grundwasser und Niedrigwasser werden besonders betroffene wasserwirtschaftliche Einflussgrößen beleuchtet und Erkenntnisse für eine zielgerichtete und zeitnahe Anpassung erstellt. Der Tagungsband gibt einen guten Überblick über das methodische Vorgehen, die aktuellen Aktivitäten und Untersuchungsergebnisse des Kooperationsvorhabens KLIWA. Gegenüber dem vorausgegangenen Symposium von 2009 konnten die Ergebnisse größtenteils auf eine breitere Basis von regionalen Klimaprojektionen und Wirkungsmodellen gestellt werden. Dies eröffnet erstmals die Möglichkeit, die Belastbarkeit von Zukunftsprojektionen besser einschätzen zu können und robuste Aussagen für notwendige Anpassungsmaßnahmen zu ermitteln.

Deutlich wurden auch die verschiedenen zukünftigen Arbeitsschwerpunkte in KLIWA. Eine wichtige Aufgabe für KLIWA soll es weiterhin sein, wie bisher die Entwicklung in der Klimamodellierung zu begleiten, aktuelle Klimaprojektionen in das bestehende Ensemble von KLIWA einzuordnen und damit die Belastbarkeit der ermittelten Aussagen zu den wasserwirtschaftlichen Veränderungen zu erweitern. Hierbei ist auch der weitere Umgang mit Modellunsicherheiten und den daraus resultierenden Bandbreiten zu nennen. Die Spannweite möglicher zukünftiger Veränderungen zeigt deutlich, dass die Kommunikation eines einzigen „klaren“ Ergebnisses nicht sachgerecht ist, dies aber gleichzeitig auch die Kommunikation von Ergebnissen für eine notwendige Anpassung erschwert.

Vorrangiges Ziel des Vorhabens KLIWA ist es aber insbesondere, basierend auf den Erkenntnissen über Ausmaß und Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt gezielt Handlungsempfehlungen für die Wasserwirtschaft abzuleiten. Damit sollen nachhaltige und integrale Vorsorgekonzepte zur rechtzeitigen Anpassung der vorhandenen wasserwirtschaftlichen Systeme an die zu erwartenden Veränderungen für die verschiedenen betroffenen Bereiche entwickelt werden. Die angesprochenen Untersuchungen zu den Schwerpunkten Hochwasser, Niedrigwasser und Grundwasser müssen daher fortgeführt und bei Bedarf mit Fallstudien vertieft werden, um verbesserte Erkenntnisse für Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen zu erhalten. Unter Berücksichtigung der in einer Modellkette auch künftig vorhandenen Unsicherheiten müssen durch KLIWA konkrete Anpassungsmaßnahmen soweit möglich als „no/low-regret“ Maßnahmen für die einzelnen Bereiche der Wasserwirtschaft konzipiert werden. Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerökologie und Qualität von Gewässern noch weitgehend unbekannt sind. Dazu werden zunächst weitere Grundlagen im Rahmen einer Konzepterstellung für ein fließgewässerökologisches Klimamonitoring sowie eine Literaturstudie im Bereich stehender Gewässer zu erarbeiten sein.

KLIWA als breit angelegtes Untersuchungsprogramm leistet mit der Bearbeitung aller durch den Klimawandel betroffenen hydrologischen Bereiche insgesamt einen wichtigen Beitrag für eine nachhaltige und zukunftsfähige Wasserwirtschaft. Mit dem stetigen Fortschreiten der Erkenntnisse der Klimaforschung werden die künftigen Klimawandelauswirkungen auch eine ständige wasserwirtschaftliche Fragestellung darstellen.





## Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Bayern

Dr. Marcel Huber MdL  
Staatsminister für Umwelt und Gesundheit Bayern

Sehr verehrte Damen und Herren,  
lieber Kollege Untersteller,  
sehr geehrter Herr Dr. Griese, Herr Dr. Becker, Herr Oberbürgermeister,  
sehr geehrte Damen und Herren!

Willkommen in Bayern, Willkommen im schönen Würzburg.

Bereits in der Einführung haben wir es gehört: der Klimawandel ist keine abstrakte These irgendeines Wissenschaftlers, sondern spürbare Realität. Und der Klimawandel ist kein bayerisches, baden-württembergisches oder rheinland-pfälzisches Problem, sondern eine globale Herausforderung, der wir uns alle stellen müssen, auch und gerade mit Blick auf das Thema Wasserwirtschaft. Deswegen ist es extrem wichtig, sich regelmäßig zu treffen und die Erkenntnisse, die man gewonnen hat, zu spiegeln, zu vergleichen und miteinander zu diskutieren. So wie heute hier im Rahmen des 5. KLIWA-Symposiums.

Internationale Zusammenarbeit ist zwingend erforderlich, denn Klimawandel kennt keine Grenzen. Umso unerfreulicher ist es, wenn Theorie und Praxis, wenn Absichtserklärungen und weltweite Bemühungen nicht übereinstimmen bzw. Schritt halten.

Gerade tagt der Weltklimagipfel in Doha. Von dort erwarte ich mir klare Weichenstellungen und Meilensteine, um zu einem wirklich umfassenden Klimaschutzabkommen zu gelangen. Unerlässlich sind dabei praktikable Werkzeuge - insbesondere Zertifikate. Der Emissionshandel, wie er sich momentan gestaltet, ist so nicht funktionsfähig. Wenn das Werkzeug „Zertifikat“ stumpf wird, muss man es eben nachschleifen. Diese Aufgabe müssen wir dringend in Angriff nehmen.

Es ist erforderlich zu handeln. Wir alle vergessen das immer wieder - vor allem bei „normalen“ Wetterbedingungen. Aber ab und zu wird man sehr eindringlich daran erinnert: etwa 2003 der Hitzesommer mit 40.000 Toten in Europa. Oder 2011: eines der fünf wärmsten Jahre seit 1881. Übrigens: auch in den Medien hat man sich schon an derartige Formulierungen gewöhnt. Es schreckt einen gar nicht mehr so besonders, wenn von dem wärmsten, niederschlagsreichsten, trockensten Jahr, Tag, Monat etc. seit Beginn der Wetteraufzeichnung die Rede ist. Man hört das allenthalben und die dahinter steckende Dramatik flacht ab.

Wir müssen uns darüber im Klaren sein, dass wir hinsichtlich der Auswirkungen des Klimawandels in einer sehr begünstigten Zone dieser Welt leben. Es gibt Regionen, die müssen sich ganz andere Gedanken machen. Länder, bei denen die Erhöhung des Meeresspiegels drastische Folgen hat. Länder, bei denen eben nicht alles wächst und gedeiht. Wenn hier in Würzburg aufgrund zwei, drei Grad Temperaturplus vielleicht zukünftig Palmen oder sonstige exotische Pflanzen gedeihen, so ist das ein angenehmer Effekt. Aber in anderen Landstrichen der Welt muss man zuschauen, wie landwirtschaftlich nutzbare Fläche nicht mehr zur Verfügung steht, sukzessive öde und wüst wird.

Aber man muss gar nicht so weit in die Ferne schweifen, auch in Bayern finden wir Spuren des Klimawandels. Vor Kurzem habe ich darüber berichtet, dass unsere Gletscher in Bayern nicht mehr lange existent sein werden. Wir haben zur Zeit nur noch fünf, soweit man diese überhaupt noch als Gletscher bezeichnen kann. Der Blaueisgletscher war ein großes Glet-



schermassiv hinter der Blaueshütte in den Berchtesgadener Alpen. Wenn man heute von der Hütte zum Blau-eis-schneefeld gehen will, muss man schon eine Stunde marschieren. Und in zwanzig Jahren werden wir auch auf Bayerns höchstem Berg, der Zugspitze, vielleicht nur noch einen Restgletscher vorfinden. Eine weitere Folge: Der Permafrost geht zurück. Mit allen Auswirkungen wie z. B. Bergstürzen.

Hier in Würzburg sind die Berge nicht ganz so hoch. Stattdessen ist der Wasserhaushalt von Flussgebieten ein großes Thema. Innerhalb des Freistaats bestehen zwischen Nord- und Südbayern markante regionale Unterschiede: In Nordbayern Trockenperioden und in Südbayern Unwetter, wie unser aktueller Klimabericht aufzeigt. Gemäß einem Szenario werden wir bis 2050 deutliche Veränderungen erleben - und zwar Temperaturerhöhungen zwischen + 0,8 und + 1,9 Grad. Tage mit Temperaturen von über 30 Grad werden im Mittel um 5 Tage pro Jahr zunehmen. Im Vergleich zum Zeitraum 1971 bis 2000 entspricht dies einer Verdoppelung. Dagegen reduzieren sich Tage mit Frost im Schnitt um 20 Tage. Freilich sind die Auswirkungen nicht so eklatant, dass man befürchten müsste, unsere Lebensbedingungen verändern sich hin zu einem untragbaren Zustand. Aber die Veränderungen sind spürbar und ziehen weitere Konsequenzen nach sich.

Die Bayerische Staatsregierung reagiert auf den Klimawandel. Bestes Beispiel sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen. Bis 2020 wollen wir die CO<sub>2</sub>-Emission pro Bürger auf deutlich unter 6 Tonnen im Jahr reduzieren. Man muss sich im Klaren sein, was es bedeutet, die Energieversorgung einer kompletten Wirtschaft umzustellen. Auf der Basis des letzten Jahres mit 56 % der CO<sub>2</sub>-freien Stromerzeugung aus Kernenergie nehmen wir jetzt bis 2022 unsere noch vier in Betrieb befindlichen Kernkraftwerke vom Netz. Diese Leistung müssen wir dann CO<sub>2</sub>-neutral kompensieren. Es ist alles andere als einfach, an den unter anderen Rahmenbedingungen gesteckten Klimazielen festzuhalten. Wir wollen aber unsere Spitzenposition in Deutschland mit etwa 6 Tonnen CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Bürger und Jahr behaupten. Deshalb haben wir für den Zeitraum 2012 bis 2016 1 Mrd. € in die Haushalte eingestellt, um in den Segmenten Energie, Klimaschutz und Innovationen zu investieren.

Drei Handlungsfelder haben wir uns besonders vorgenommen:

Erstens: den CO<sub>2</sub>-Ausstoß zu senken – mit allem, was dazugehört.

Zweitens: Folgenabschätzung des Klimawandels und Einleitung adäquater Maßnahmen. Das heißt ganz konkret: Hochwasserschutz-Aktionsprogramm, Niedrigwassermanagement, Renaturierung von CO<sub>2</sub>-Senken, z. B. Moore und Auen.

Und Drittens: Forschung und Entwicklung voranbringen, damit uns Anpassung, Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung gelingen.

Um dies zu erreichen, bedarf es kompetenter Partner. Deshalb haben wir uns mit Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst im Kooperationsvorhaben KLIWA zusammengeschlossen, um für die Wasserwirtschaft gemeinsam Antworten zu finden und die Klimaforschung voranzubringen. Die südlichen Bundesländer haben ähnliche Strukturen und vergleichbare Klima- und Wasserhaushalte. Gute Gründe also, länder- und fachübergreifend zusammen zu arbeiten.

Schließlich ist die Wasserwirtschaft die Fachdisziplin, die vom Klimawandel besonders betroffen ist. Die Zunahme von Hochwasserereignissen und Trockenperioden führt bei uns zu merklichen Veränderungen. Wir müssen uns um Hochwasserschutz kümmern. Wir müssen uns um die Sicherung der Wasserressourcen kümmern. Und wir müssen uns darum kümmern - das ist vor allem ein nordbayerisches Thema - die Versorgungssicherheit mit Trinkwasser sicherzustellen. Wir können hier nicht auf dem Status quo verharren. Deshalb haben wir uns im Jahr 2000 mit dem Hochwasserschutzaktionsprogramm 2020 auf den Weg gemacht. Bis dorthin wollen wir in Bayern 2,3 Mrd. Euro in den Hochwasserschutz investieren. Bis heute sind bereits Maßnahmen für 1,5 Mrd. € umgesetzt. Mit einem Haushaltsansatz von



115 Mio. € für 2012 werden wir diese Investitionen fortsetzen. Unser Ausbaustandard ist heute:  $HQ_{100} + 15\%$  Klimazuschlag. Diese Gelder sind bestens angelegt. Würzburg merkt das jetzt schon. Der Praxistest - Sie haben darauf hingewiesen, Herr Oberbürgermeister - hat uns Recht gegeben. Beim Augusthochwasser 2005 hatten wir deutlich höhere Abflüsse als beim Pfingsthochwasser 1999. Die Schäden waren jedoch nur halb so groß. Wir sind aber noch lange nicht fertig. Es stehen noch etliche Maßnahmen an, die es bis 2020 zu erledigen gilt.

Eine neue Herausforderung, die bis dato noch nicht im Fokus stand, die sich aber deutlich herauskristallisiert, ist die Trockenheit. Trockenheit in Phasen mit geringeren Abflüssen macht es erforderlich, dass wir die Strukturen der Wasserversorgung anpassen. Insbesondere kommunale Wasserversorgungsanlagen sind gefährdet, wenn sie solitär stehen. Wir müssen sie vernetzen und eine Sicherung einbauen, damit nicht eine einzelne Region trocken fällt. Auch die Schifffahrt ist betroffen. Ein Niedrigwasserinformationsdienst wurde bereits eingerichtet, um denen, die vom Abfluss abhängig sind, frühzeitig zu helfen, sich auf Niedrigwasser einzustellen.

Warnen allein reicht jedoch nicht. Es braucht ein koordiniertes Vorgehen bei der Maßnahmenumsetzung. Dazu haben wir das neue Instrument eines Gewässerqualitätswarndienstes initiiert. Der Alarmplan für den bayerischen, staugeregelten Main - Gewässerökologie ist bislang bundesweit einmalig in dieser Form und regelt nach festen Melde- und Einsatzwegen effektive Gegenmaßnahmen.

Abschließend noch ein Gedanke: Dem Klimawandel entgegenzutreten ist nichts, was ein einzelnes Amt, eine einzelne Disziplin tatsächlich alleine schaffen kann. Es ist eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Alle Bereiche müssen zusammen helfen. Und es ist auch nicht eine regional begrenzte Aufgabe hier in Bayern. Deshalb suchen wir die Kooperation und den Schulterschluss mit Ihnen, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und dem Deutschen Wetterdienst im Rahmen von KLIWA.

Das 5. KLIWA-Symposium ist eine gute Plattform, sich auf den neuesten Stand der regionalen und lokalen Aktivitäten zu bringen. Dadurch werden Forschung und Entwicklung weiter vorgebracht. Ich bin mir sicher, aus dieser Fachtagung werden wichtige neue Impulse entstehen. Ihnen allen wünsche ich gute Gespräche, hoch interessante Informationen und eine gute Zeit hier im schönen Würzburg!





## Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Rheinland-Pfalz

Dr. Thomas Griese

Staatssekretär für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz

Sehr geehrte Damen und Herren,

im Programm haben Sie gelesen, dass Ministerin Ulrike Höfken aus unserem Bundesland angekündigt war.

Ich bitte sehr um Verständnis, dass unsere Ministerin Ulrike Höfken heute aufgrund eines kurzfristig angesetzten Termins innerhalb der Landesregierung nicht teilnehmen kann. Sie bittet um Verständnis dafür und lässt Sie herzlich grüßen. Und zugleich ist das für mich natürlich Freude und Ehre, hier die Vertretung übernehmen zu dürfen und hier in der schönen Residenz in Würzburg an dieser Tagung teilnehmen zu dürfen.

Meine Damen und Herren,

die Folgen des Klimawandels, des wahrscheinlich sogar dramatischen Klimawandels, sind eine der größten ökonomischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen.

Sie sind in vielen Regionen dieser Erde mit dramatischen Veränderungen verbunden. Herr Minister Dr. Huber hat es vorhin bereits erläutert.

Ein aktuelles Beispiel, das erst wenige Tage zurückliegt, will ich hier nochmal nennen, nämlich den Wirbelsturm Sandy in den USA. Er hat gezeigt, was Extremwetterereignisse, von denen wir bei den dramatischen Folgen des Klimawandels reden, bewirken können und was dies für Folgen hat, nämlich nicht nur den Wirbelsturm selbst, sondern auch die durch ihn verursachten nachfolgenden Überschwemmungen. Noch jetzt erinnern wir uns an die Bilder von mit Wasser vollgelaufenen U-Bahn-Schächten in New York, was vorher niemand für möglich gehalten hätte. Dies zeigt, mit welchen dramatischen Veränderungen wir es zu tun haben.

Gegenwärtig findet die Klimakonferenz in Doha statt. Sie erinnert daran, dass es eine globale Verantwortung dafür gibt, den Klimawandel zu bekämpfen und so klein wie möglich zu halten. Dabei wissen wir alle, dass es schon gar nicht mehr darum geht, den Klimawandel zu vermeiden, sondern es nur noch darum geht, ihn zu minimieren und die Folgen zu bewältigen und sich daran anzupassen.

Ich möchte dazu anmerken, dass mir in der ganzen Debatte ein Ton oder Unterton, den ich immer wieder höre, nicht gefällt. Der lautet, dass sich vor allem die Anderen bewegen müssen wie die Chinesen und Inder. Da wird schnell zusammengerechnet, wer die Hauptverantwortlichen des Klimawandels seien und dass die sich doch bewegen müssten und dass die Bundesrepublik oder die EU doch irgendwie auch ein Stück als Musterknaben gelten können. Ich glaube, wir müssen uns gemeinsam von dieser Illusion befreien.

Denn gerade wenn wir uns den CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro Kopf der Bevölkerung ansehen, dann stellen wir nach wie vor fest, dass die Industriestaaten einen wesentlich höheren Ausstoß haben. Da ist nicht nur die USA, mit bald 20 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Einwohner zu nennen, sondern auch die EU mit ungefähr 10 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Einwohner.

Demgegenüber steht China mit 3 Tonnen CO<sub>2</sub> und Indien etwa mit 1 ½ bis 2 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Einwohner. Das macht doch deutlich, dass es hier bei uns in den Industriestaaten eine Verantwortung gibt und dass es nicht reicht zu sagen, die Anderen müssen sich bewegen. Über die Tonnagezahlen hinaus gibt es eine weitere Verantwortung, die ich hier auch ansprechen möchte: Was lösen wir eigentlich mit dem Export unserer Produkte aus? Es reicht nicht zu



sagen, dass wir hier gute CO<sub>2</sub>-Tonnenwerte pro Einwohner haben, wenn wir Produkte exportieren, die dann an anderer Stelle die CO<sub>2</sub>-Belastung auslösen. Dazu nur zwei Beispiele: Es reicht nicht, ineffiziente Kohlekraftwerke in China bauen zu lassen und sich dann darüber zu erregen, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoß in China steigt, wenn wir dafür verantwortlich sind, dass dieser Export stattfindet.

Das 2. Beispiel ist die Automobilindustrie. Es reicht nicht, sich darüber zu erregen, dass in China oder auch in Indien die CO<sub>2</sub>-Werte ansteigen, wenn wir doch mitverantwortlich sind, dass aus unseren Ländern, auch aus der Bundesrepublik Deutschland, Autos exportiert werden, die einen CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro 100 Kilometer von 160 Gramm, von 180 Gramm, von 200 Gramm, ja sogar von 280 Gramm pro Kilometer haben. Dieser CO<sub>2</sub>-Ausstoß ist ebenfalls in unserer Verantwortung, die durch den Export weit über das hier im Lande stattfindende hinaus reicht. Darüber hinaus liegt ebenfalls in unserer Verantwortung, was wir an CO<sub>2</sub>-Ausstoß auch gerade durch die Art und Qualität der Produkte, die wir exportieren, an anderer Stelle noch zusätzlich mit auslösen.

Meine Damen und Herren,

die jüngsten Veröffentlichungen des Deutschen Wetterdienstes besagen, (dies wird ja gleich von Herrn Dr. Becker im Einzelnen vorgetragen werden,) dass in den letzten 130 Jahren die Durchschnittstemperaturen bei uns in Rheinland-Pfalz, in meinem Bundesland, das ich hier vertrete, um 1,3 ° Celsius angestiegen sind. Damit liegen wir noch etwas über dem Bundesdurchschnitt, der bei 1,2 ° Celsius liegt.

Regional verzeichnen wir unterschiedliche Temperatursteigerungen, die höchsten liegen im Oberrheingraben, aber auch im Neuwieder Becken bei Koblenz, wobei man wissen muss, dass diese Region bereits jetzt zu den wärmsten in Deutschland zählt. Sowohl im Sommer als auch im Winter ist es in Rheinland-Pfalz im Mittel wärmer geworden und nach allen vergleichbaren Betrachtungen bestätigen die regionalen Klimamodelle, dass wir in Zukunft mit einer größeren Variabilität des Klimas und der Witterungsverhältnisse rechnen müssen. Dazu gehört auch die Veränderung bei den Niederschlägen.

Niederschläge sind ein bestimmender Faktor für die Wasserwirtschaft, aber nicht nur für die Wasserwirtschaft sondern auch für alles, was bei der Flächenbewirtschaftung von der Wasserwirtschaft und damit von Niederschlagsmenge abhängig ist. Wir haben in Rheinland-Pfalz, aufgrund unserer geographischen Lage deutlich häufiger Westwetterlagen und müssen deshalb auch gerade in den Mittelgebirgen mit mehr und höheren Starkniederschlägen rechnen.

Wir müssen damit rechnen, dass die Häufigkeit kleinerer und mittlerer Hochwasser in Rheinland-Pfalz zunimmt. Sie hat bereits nachweislich zugenommen und nach den aktuellen Berechnungen müssen wir davon ausgehen, dass es für die 100jährigen, aber auch für die 200jährigen Hochwasser am Oberrhein nach der Untersuchung in KLIWA eine Zunahme der Hochwasserspitzen um 5 % geben wird. D. h. also, meine Damen und Herren, extreme Niederschläge im Sommer werden zu einem erheblichen Problem, auch und gerade für die Böden.

Das ist für unsere Landwirtschaft wichtig und das ist natürlich auch für den Weinbau wichtig. Die Starkniederschläge werden einhergehen oder sich abwechseln mit längeren Trockenperioden, die unsere Böden zusätzlich unter Stress setzen werden. Wenn man wissen will, was sich durch den Klimawandel im Land in den letzten 30 Jahren verändert hat, dann ist es besonders interessant den Weinbau zu betrachten, was dort für eine Veränderung bereits stattgefunden hat.

Wir sind in Rheinland-Pfalz, das Weinbaugebiet Nr. 1. Viele von Ihnen werden sich an den „Glykol-Skandal“ erinnern, der rd. 30 Jahre her ist. Dieser Skandal hat zu einem grundlegenden Umdenken im Weinanbau geführt. Ausgangspunkt war damals, dass der Wein in natürli-

cher Anbauweise zu sauer war. Ich könnte auch vornehm sagen zu trocken. Deshalb meinten überschlaue Winzer den Wein nachsüßen zu müssen. Das wäre alles, unter gesundheitlichen Gesichtspunkten nicht so schlimm gewesen, wenn sie dazu Zucker genommen hätten. Da es nicht so auffallen sollte, aber auch aus Kostengründen, hat man aber Glykol genommen. Dadurch gab es gesundheitlich ein erhebliches Problem, was zu den bekannten Folgen geführt hat.

Der Wein musste also vor 30 Jahren, nachgezuckert werden. Was machen wir heute bzw. was haben wir in diesem Sommer gemacht? Der Wein wurde nachgesäuert. Da sich die natürliche Vegetationsperiode erheblich verlängert hat, ist der Wein, für den Geschmack der Verbraucherinnen und Verbraucher, zu süß geworden. Deswegen ist eine Nachsäuerung zugelassen worden. Diese Vorgehensweise ist gesundheitlich unbedenklich. Man nimmt ein bisschen Essig und die Sache ist gut.

Man säuert Wein oder lässt es zu, dass Wein nachgesäuert wird. Jetzt werden sie sagen: Die Rheinland-Pfälzer die sind ja wohl verrückt! Das kann ich nicht bestätigen, vor allem nicht, weil wir das nicht alleine und schon gar nicht als Erste gemacht haben. Die beiden anderen hier vertretenen Länder, nämlich Bayern und Baden-Württemberg handhaben das genauso. Das war nicht nur dieses Jahr sondern das war im letzten Jahr auch schon so. Wenn die Witterungsentwicklung so weiter geht, wird es auch in zukünftigen Jahren so sein, dass wir die Nachsäuerung zulassen.

Das zeigt eindrucksvoll die Veränderungen durch den Klimawandel innerhalb der letzten 30 Jahre. Diese Auswirkungen sind nicht weit weg, sondern sie finden auch hier statt. Unsere Winzerinnen und Winzer bestätigen außerdem, dass sie plötzlich mit bisher unbekanntem Schädlingen zu tun haben z. B. mit Zikaden Arten.

Die Folge des Klimawandels ist, dass wir uns mit ganz neuen Dingen auseinander setzen müssen. Sie zeigen, was sich durch den geänderten Wetternormalzustand teilweise dramatisch verändert hat und weiter verändern wird. Vor dem Hintergrund, das will ich an dieser Stelle deutlich sagen, halte ich es für unverantwortlich, wenn immer noch versucht wird, den Klimawandel und seine Ursachen zu leugnen. Die praktischen Auswirkungen sind da. Sie sind nicht mehr wegzudiskutieren. Wenn ich zum Beispiel leider aus unserem Bundeswirtschaftsministerium Stellungnahmen höre oder auch Aktivitäten sehe, die in die Richtung gehen, nach wie vor zu leugnen, dass es diesen dramatischen Klimawandel gibt, dann kann ich das nur mit einer gewissen Fassungslosigkeit aufnehmen. Diese Fassungslosigkeit habe ich auch zu der Frage, dass es auch und gerade von dort immer noch opportun erscheint, Klimaschutzmaßnahmen zu blockieren und zu verzögern.

Es war einmal so, dass Deutschland Vorreiter im Klimaschutz war, ein Stück die Dinge vorangetrieben hat. Auch die EU hatte eine Vorreiterrolle, aber diese Rolle ist ein Stück verloren gegangen. Auch hier müssen wir der Wahrheit ins Gesicht sehen. Ich kann nicht verstehen, dass es inzwischen politische Kräfte gibt, die sagen, die Energiewende läuft zu schnell. Wir kriegen zu viel erneuerbare Energie, zu viel Windkraft oder zu viel Photovoltaik. Wir müssen das begrenzen oder deckeln. Das ist eine abstruse Diskussion, die wir schnellstens hinter uns lassen müssen.

Jetzt komme ich zu den Anpassungsmaßnahmen:

Welche Anpassungsmaßnahmen benötigen wir in Rheinland-Pfalz und was machen wir bereits?

Bei der Wasserwirtschaft heißt das, wir brauchen, bezogen auf den Hochwasserschutz, ein angepasstes Schutzkonzept. Das haben wir in Rheinland-Pfalz.

Das heißt, wir werden die europäische Hochwasserrisikomanagementrichtlinie umsetzen.



Wir müssen verstärkt in den Hochwasserschutz investieren, in einen höheren Schutz. Wir haben schon in den vergangenen 20 Jahren rd. 800 Mio. Euro investiert, das ist sehr viel für ein kleines Bundesland. Es sind weitere 500 Mio. Euro bereits derzeit absehbar.

Wir werden als zweites den Wasserrückhalt in der Fläche weiter ausbauen, gerade wegen der zum Teil zunehmenden Niederschläge und der extremer auftretenden Starkregenfälle. Das bedeutet konkret Renaturierungsmaßnahmen. Für diese haben wir in den vergangenen Jahren seit 1995 schon rd. 200 Mio. Euro investiert und wir werden das jetzt im Rahmen der Aktion Blau plus fortsetzen.

Wir haben gemeinsam mit Baden-Württemberg einen Leitfaden Starkregen für die Kommunen und die kommunale Wasserwirtschaft entwickelt, zusammen mit den kommunalen Spitzenverbänden und der Universität Kaiserslautern.

Ein wichtiger Baustein für ein effizientes Hochwasserrisikomanagement ist und bleibt die Hochwasservorsorge. Deswegen haben wir auch inzwischen über 20 kommunale Hochwasserpartnerschaften mit kommunalen Mitträgern in Rheinland-Pfalz, aber auch, und das ist mir wichtig, länderübergreifend und die Bundesrepublik übergreifend nach Luxemburg und Frankreich, gegründet. Bausteine unseres umsetzungsorientierten Hochwasserrisikomanagements sind neben dem technischen Hochwasserschutz die Vernetzung von Hochwasserinformationen, das hochwasserangepasste Bauen, Planen und Sanieren und schließlich der Ausbau des Katastrophenschutzes bis hin zu einer Kampagne, die wir für die Elementarschadenversicherung starten wollen.

Wichtiger Punkt ist weiterhin die Umsetzung des mit den Nachbarländern abgestimmten Hochwasserschutzkonzeptes am Oberrhein, wo wir natürlich besonders eng mit Baden-Württemberg, aber auch mit Frankreich, zusammen arbeiten. Sichere Deiche und eine zügige Umsetzung der Retentionsräume am Oberrhein sind deshalb ein wichtiger Schwerpunkt.

Am Oberrhein wollen wir weiterhin, auch als Reaktion auf den Klimawandel, zwei zusätzliche Reserveräume für extreme Hochwasser mit rd. 60 Mio. Kubikmeter Rückhaltevolumen bauen.

Auch die Grundwasserbewirtschaftung erfordert Anpassungsmaßnahmen, z. B. in der rheinland-pfälzischen Vorderpfalz. Wir haben bereits in eine angepasste Gewässerbewirtschaftung investiert, um einerseits die Wasserversorgung sicherzustellen, andererseits aber die geringeren Wasserstände jeweils zu regulieren und nicht zuletzt, da kann ich anknüpfen an das, was Herr Staatsminister Huber bereits gesagt hat, geht es um die Sicherung der Trinkwasserversorgung. Auch da müssen wir - und wir tun es bereits - die Probleme identifizieren und mit Verbundsystemen die möglichen Mangelsituationen bei extremen Trockenphasen überwinden und bewältigen.

Wasser hat aber nicht nur Auswirkungen unmittelbar durch Hochwasser bzw. Wirkungen oder Mangelerscheinungen im Bereich des Trinkwassers zur Folge. Es prägt auch die Landwirtschaft und den Weinbau wie auch die Forstwirtschaft. Über den Weinbau habe ich schon gesprochen. Ich will hier die Landwirtschaft etwas näher in den Blick nehmen.

Die Landwirtschaft ist ebenfalls auch Mitverursacher des Klimawandels. Wir dürfen nicht vergessen, dass eine Tonne Stickstoff 3 Tonnen Öl bedeutet und damit den entsprechenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß. Das heißt, es geht auch darum, die Landwirtschaft einzubeziehen in eine Strategie der Minderung der Klimabelastung. Dafür bietet die gemeinsame Neuausrichtung der gemeinsamen EU-Agrarpolitik ab 2014 eine ganz wichtige Weichenstellung. Nach den Vorschlägen der EU soll die Förderung, insbesondere in der Struktur für die ländliche Entwicklung in ELER, zukünftig zu mindestens 25 % für klimaschonende Maßnahmen eingesetzt werden. Das ist ebenso zu befürworten wie das Greening. Das heißt, dass in der ersten Säule in der Agrarpolitik Zahlungen nur noch erfolgen dürfen, wenn auch in besonderer Weise umweltfreundlich gewirtschaftet wird. Das bedeutet zum Beispiel, dass wir Düngestra-



tegien in der Landwirtschaft überdenken müssen. Wir können mit dem Stickstoffeinsatz auch aus Klimaschutzgründen nicht mehr so weiter machen wie bisher. Deshalb ist es unsere Strategie, zum Beispiel unter anderem zukünftig auf Leguminosen zu setzen. Das sind Pflanzen, die über die grandiose Eigenschaft verfügen, Luftstickstoff zu binden. Damit wird der Einsatz von künstlichem Mineraldünger, der ölbasiert zum Klimaproblem beiträgt, überflüssig.

Wir haben ein Förderprogramm aufgelegt, in dem genau dieser Anbau von Leguminosen gefördert wird. Deswegen fordern wir, dass das im Rahmen der EU-Agrarreform als besondere Umweltmaßnahme anerkannt wird und treiben ebenfalls voran, dass Leguminosen zukünftig verstärkt in der Tierhaltung zur Tierfütterung eingesetzt werden.

Die Leguminosen haben allerdings nicht nur den wunderbaren Vorteil, Luftstickstoff zu binden, sondern sind als Tierfutter in der Lage, Soja zu ersetzen und damit auch an anderer Stelle ein Klimaproblem zu minimieren, das durch den exzessiven Import von Soja nach Europa ausgelöst wird. Übrigens ist auch Soja ein Beispiel für unsere Klimaverantwortung. Was wir durch den Import von Soja an anderer Stelle an Klimabelastung auslösen, wird bei den CO<sub>2</sub>-Bilanzen bei uns nicht mit berücksichtigt.

Beim Weinbau, ich sagte es schon, sind dringende Anpassungen erforderlich. Das wird möglicherweise auch dazu führen, dass sogar Standorte aufgegeben werden und wir uns mit ganz neuen Schädlingen auseinandersetzen müssen. Natürlich kann man sagen, es ist doch schön, wenn durch eine verlängerte Vegetationsperiode auch mehr Wein angebaut werden kann. Das ist einerseits richtig. Die Winzer sagen mir auch, dass wir, infolge der verlängerten Vegetationsperiode, mit unserem Spätburgunder jetzt mit den Franzosen mithalten können. Diese Vorteile werden mehr als aufgewogen und wieder konterkariert durch die Nachteile infolge des Klimawandels.

Letzter Bereich, den ich ansprechen will, auch dafür sind wir in unserem Haus zuständig, ist der Forstbereich. Durch die Veränderungen im Klima und in den Vegetationsbedingungen, die wir schon jetzt haben, haben wir zu konstatieren, das muss ich klar und hart sagen, dass die Fichte bei uns in Rheinland-Pfalz, abgesehen von einigen Westhöhenlagen, keine Zukunft mehr hat. Die Fichtenbestände brechen zusammen, da sie das Wechselspiel von extremer Trockenheit, Trockenstress und andererseits hoher Feuchte nicht aushalten.

Die Fichtenbestände, das merken wir dann bei jedem kleineren oder größeren Sturm, brechen dann einfach zusammen und sind nicht mehr da. Nun gibt es ökologisch vielleicht Schlimmeres, das gebe ich zu, als die Fichte zu verlieren. Hierdurch wächst ein höherer Laubwaldanteil, auch in unserem Bundesland. Aber ich möchte hier auch das Ökonomische anführen und die Frage in den Raum stellen, was dieses eigentlich in zeitlicher Hinsicht bedeutet. Wenn es sich hierbei um einen lange laufenden Prozess handeln würde, wäre das tragbar. Die Problematik des Klimawandels ist aber, dass sich die Zeitabläufe immer mehr beschleunigen und dadurch dramatisch werden: Denn die Fichte ist der Baum, der von unserer Sägeindustrie verlangt wird. Es gibt praktisch keine „Laubholzsäger“ in Rheinland-Pfalz, sondern ausschließlich recht große Sägewerke, die die Fichten verarbeiten. Was das heißt, wenn die Fichtenbestände Stück für Stück nicht mehr da sein werden, das möchte ich im Klartext ansprechen: Denn es heißt eben auch Insolvenzen, Arbeitsplatzverluste sowie eine dramatische ökonomische Folge für die jeweilige Region.

Meine Damen und Herren,

auch in Rheinland-Pfalz wird derzeit ein Gesamthandlungskonzept zum Klimawandel erarbeitet. Basis hierfür sind auch und gerade die Erkenntnisse, die im Vorhaben KLIWA erarbeitet worden sind. An dieser Stelle möchte ich mich sehr herzlich für die verdienstvolle Arbeit bedanken, die in KLIWA geleistet wurde und weiterhin geleistet wird.





Ich hoffe, dass aus meinen Ausführungen deutlich geworden ist, dass der Klimawandel auch hier bei uns in Deutschland dramatische Auswirkungen haben wird und dass es ganz falsch wäre, immer nur über die Kosten des Klimaschutzes zu reden. Wenn jemand jetzt mitgerechnet hätte, was die Anpassungsmaßnahmen, die ich vorhin aufgezählt habe bzw. die Verwerfungen kosten werden, in der Landwirtschaft, in der Forstwirtschaft aber auch für Investitionen im Hochwasserschutz sowie beim Ausbau der Trinkwasserversorgung, dann würde sehr leicht erkennbar, dass die dramatischen und auch ökonomischen Folgen, die wir hier schon haben, weit größer sind, als das, was in Klimaschutzmaßnahmen investiert wird und investiert werden müsste.

Das ist zum Schluss mein Appell, dass wir nicht immer nur über die Kosten des Klimaschutzes, sondern auch über die Kosten dessen reden, was passiert, wenn wir nichts oder zu wenig tun. Wenn das in das Blickfeld der Öffentlichkeit mehr als bisher gerückt wird, dann wird es auch leichter sein, die Menschen davon zu überzeugen, dass Klimaschutz unsere erste, unsere vordringlichste Aufgabe ist.

Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

## Anpassung an den Klimawandel - Strategie in Baden-Württemberg

Franz Untersteller MdL

Minister für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Baden-Württemberg

Lieber Herr Ministerkollege aus Bayern, Herr Dr. Huber,  
Lieber Herr Dr. Griese, Staatssekretär aus Rheinland Pfalz,  
sehr geehrter Herr Oberbürgermeister Rosenthal,  
sehr geehrter Herr Kumutat, Frau Präsidentin Barth,

meine sehr geehrten Damen und Herren Fachleute aus den Bereichen Wasserwirtschaft, Meteorologie, Hydrologie und den verschiedenen anderen Fakultäten,

Ich freue mich heute die Möglichkeit zu haben, bei diesem Symposium einige Bemerkungen aus baden-württembergischer Sicht machen zu dürfen. Meine sehr geehrten Damen und Herren, bei den Fragen des Klimawandels – dies ist auch bei den beiden Vorrednern bereits angeklungen – ist globales Denken, wie bei kaum einem anderen Thema, angesagt. Ich stehe im Moment noch unter dem Eindruck einer Reise. Ich komme gerade vom Flughafen Frankfurt und bin heute Nacht aus Delhi zurück geflogen. Gemeinsam mit Abgeordneten des baden-württembergischen Landtags hatte ich in den letzten Tagen die Gelegenheit, dort verschiedene Gespräche zu führen, unter anderem mit der Staatssekretärin des Umweltministeriums, des Energieministeriums aber beispielsweise auch mit dem "Energy and Resources Institute". Wir reden bei Indien über ein Land, das derzeit, was die CO<sub>2</sub>-Emissionen betrifft, da ist, wo wir in Europa hin müssen, nämlich bei 1,2 Tonnen pro Einwohner und Jahr. Und Indien müsste zur Eindämmung des Klimawandels bei den CO<sub>2</sub>-Emissionen da bleiben, wo es zurzeit steht. Aber dort herrscht z. T. extremste Armut. Millionen haben keine Stromversorgung, keine Wasserversorgung, keine Abwasserentsorgung. Daher stellt sich die Frage, ob eine Verbesserung dieser Zustände gelingt, ohne dass in diesem Land die „Fehler“ gemacht werden, die wir gemacht haben? Wird man dort eine Entwicklung ohne einen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Emissionen schaffen? Das ist die Aufgabe, um die es geht. Und da wird in Indien genau geschaut. Was machen die Europäer? Was machen die Amerikaner? Was machen die Japaner? Was machen also die Länder, die verantwortlich sind für die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Atmosphäre, das wir heute haben. Es wird auch sehr genau registriert, wie Europa in Doha auftritt, besser gesagt, wie es nicht auftritt. Und das führt dann natürlich zu Fragen, wieso Europa es sich erlaubt, an Indien und andere Länder Forderungen zu stellen, wenn man sich selbst nicht einig ist. Und es wird einem in solch einem Land auch klar, dass unsere Aktivitäten in Deutschland bei der Energiewende und dem Klimaschutz ausstrahlen, weil von den Fachleuten in Indien und anderen Ländern registriert wird, welche Chancen in der Technologieentwicklung bei den Erneuerbaren stecken. Diese Entwicklung mit ihren Kostensenkungen gibt diesen Ländern erst die Möglichkeit, auf solche Technologien zuzugreifen. Und auch das, glaube ich, übersieht man leicht, wenn man in Deutschland die Debatten der letzten Wochen führt, Stichwort EEG. Ich denke, es lohnt sich, hin und wieder über den Tellerrand, über das eigene Land hinaus zu blicken z. B. nach Indien. Wenn der Klimawandel kommt – und er wird kommen, er ist ja bereits da – trifft er Länder wie Indien in wesentlich drastischerem Umfang als Europa. Wenn sie sich den Küstenverlauf dieses Subkontinents ansehen, wenn sie sich ansehen, wie abhängig Indien von den Monsunregen ist, wie abhängig vom Wasserdargebot im Himalaya, wie abhängig von der Wettersituation in Bezug auf die Frage, ob sie ihre Bürger ernähren kann, dann wird uns sehr drastisch vor Augen geführt, was es bedeutet, wenn sich in den nächsten Jahren das Klima so verändern wird, wie wir es vermuten müssen.





Meine Damen und Herren, unsere Zeit steht im Zeichen des Wandels, Veränderungen sind auf verschiedenen Ebenen angesagt und, ich denke das haben wir in aller Ausführung deutlich gemacht, global betrachtet alle Mal. Globalisierung der Wirtschaft, der Finanzmärkte, des Wissens, Bevölkerungsanstieg auf bis zu 10 Milliarden, in unseren Breitengraden Nord-Süd-Gefälle und einsetzende Wanderungsbewegungen, Ende des fossilen Zeitalters und schließlich – hoffentlich – die Umstellung auf regenerative Energien. Nicht zuletzt erhebliche umweltpolitische Herausforderungen, bei denen der Klimawandel mit all seinen Zusammenhängen schließlich im Fokus steht. Vermutlich nie zuvor in der Menschheitsgeschichte musste innerhalb kürzester Zeit auf solch gewaltige globale Veränderungen reagiert und neue nachhaltige Strategien entwickelt werden. Gerade auf dem Feld des Klimawandels besteht ein enormer Handlungsdruck, um die angestrebte Begrenzung des weltweiten Temperaturanstiegs auf 2°C zu erreichen. Ob dies noch gelingt? Die Skepsis der Fachleute nimmt jedenfalls von Tag zu Tag zu. Ich selbst gehöre mittlerweile auch zu denjenigen, die, wenn sie die Analyse lesen, eher glauben, dass es sehr schwierig werden dürfte, die Klimaveränderung und die damit einhergehenden negativen Folgen für die Umwelt und das Leben auf der Erde in Grenzen zu halten. Aktuell haben wir seit Anfang des Jahres 1900 einen Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur von rund 0,7°C. Alle Szenarien führen zu einem weiteren Anstieg. Wenn wir nicht deutlich gegensteuern, könnten wir sogar im schlechtesten Fall, das ist auch in den letzten Wochen schon mehrfach publiziert worden, bis zum Jahre 2100 bei einem Plus von 6°C landen.

Meine Damen und Herren, der Klimawandel und seine Folgen sind in aller Munde und den meisten ist er als ein globales Problem mittlerweile durchaus bewusst. Weit weniger bewusst ist, dass der Klimawandel auch regionale Konsequenzen in Deutschland hat. Je nach Szenario werden die Auswirkungen bei uns moderater sein als in vielen anderen Teilen der Welt – Stichwort Indien. Dennoch müssen wir mit den Folgen umgehen und regionale Anpassungsstrategien in den kommenden Jahren verstärkt entwickeln. Das Vorhaben KLIWA hat in diesem Zusammenhang, wie ich finde, wichtige Pionierarbeit geleistet. Bereits seit Ende der 90er Jahre werden hier die Veränderungen des Klimas und die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft betrachtet und Konzepte für notwendige Anpassungsmaßnahmen entwickelt. Heute können wir auf fundiertes Grundlagenwissen zurückgreifen und konkrete Maßnahmen werden umgesetzt. An dieser Stelle meinen herzlichen Dank allen Akteurinnen und Akteuren, die hier seit vielen Jahren, wie ich finde, hervorragende Arbeit geleistet haben und hervorragende Arbeit weiter leisten.

Lassen sie mich einige Ergebnisse für Baden-Württemberg herausgreifen. In Baden-Württemberg ist die Jahresmitteltemperatur seit 1900 bis heute von rund 8°C auf über 9°C angestiegen und diese scheinbar geringe Änderung führt z. B. dazu, dass in Karlsruhe heute die gleichen Temperaturen herrschen wie im französischen Lyon vor rund 75 Jahren. Entsprechend der globalen Entwicklung wird auch bei uns die Temperatur weiter ansteigen. Im Betrachtungszeitraum bis 2050 rechnen wir mit einem weiteren Anstieg der durchschnittlichen Temperatur um 0,8°C bis 1,7°C. Im Winterhalbjahr kann das Thermometer sogar um bis zu weitere 2°C ansteigen. Hitzetage im Sommer werden doppelt so häufig auftreten, dagegen rechnen wir für die Gipfellagen des Schwarzwaldes mit einem Rückgang der Schneetage von 25 bis 40 %. Kurzum: warme Sommer und milde Winter werden die Regel sein. Veränderungen, die auch an unseren großen Trinkwasserspeicher aus dem 4,5 Mio. Menschen in Baden-Württemberg ihr tägliches Trinkwasser beziehen, nämlich dem Bodensee, nicht spurlos vorbeigehen: Infolge milder Winter kann die Oberflächenwassertemperatur nicht stark genug abkühlen. Das hat wiederum die Folge, dass die Schichtung des Sees auch im Winter erhalten bleibt mit entsprechend negativer Auswirkung auf die Durchmischung. Der wichtige Sauerstoffeintrag in das Tiefenwasser wird so zukünftig wohl beeinträchtigt. Dieser ist für die dort lebenden Organismen jedoch sehr wichtig und beeinflusst die Rücklösung von Nährstoffen aus dem Sediment. Rückblickend waren so die erheblichen Investitionen in die Abwasserreinigung, die zu einer drastischen Reduzierung des Nährstoff-

eintrags in den See geführt haben, ein vorausschauender Beitrag zur Klimaanpassung. Bei den Niederschlägen müssen wir mit einer deutlichen Zunahme im Winter, in einzelnen Regionen um bis zu 35 % rechnen. Trockenperioden im Sommer werden wahrscheinlich häufiger auftreten und länger andauern. Das Thema Starkregen und damit verbundene Sturzfluten werden uns wohl vermehrt beschäftigen und entsprechend entwickeln sich die Abflüsse in unseren Gewässern. Die Perioden mit Niedrigwasser werden länger dauern, die Häufigkeit und die Höhe von Hochwasserabflüssen werden ansteigen. Für den Neckar wurde z. B. ermittelt, dass ein statistisches Jahrhunderthochwasser bis zu 15 % mehr Wasser führen könnte, als dies bislang der Fall war. Insgesamt werden also die Extreme in einem erheblichen Umfang zunehmen.

Meine Damen und Herren, auf diese Entwicklung müssen wir reagieren. Entsprechend den Kollegen in Bayern und in Rheinland-Pfalz tun wir dies mit den zwei Bausteinen nämlich Klimaschutz auf der einen Seite aber auch Anpassung auf der anderen Seite. Der Klimaschutz soll in Baden-Württemberg, das haben wir im Koalitionsvertrag vereinbart, Gesetzesrang erhalten. Wir haben vor wenigen Wochen im Kabinett den Entwurf eines Klimaschutzgesetzes verabschiedet, in dem wir die Ziele festgelegt haben. Dieses befindet sich derzeit in der Anhörungsphase. Der Anteil Baden-Württembergs an den weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen ist eigentlich, wenn man genau hinschaut, überschaubar, nämlich 0,3 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen, d. h. wir emittieren in unserem Land in einem Jahr so viel wie global an einem Tag emittiert wird. Jetzt könnte man sagen, auf uns kommt es nicht an. Ich bin aber der Meinung, man muss genau andersherum ran gehen, nämlich nur wenn hoch entwickelte Länder wie Deutschland vorangehen und zeigen, wie es geht in Richtung 80 % oder 90 % CO<sub>2</sub>-Minderung zu gehen, und trotzdem auch eine wirtschaftliche Entwicklung damit zu verbinden, nur dann kann man Vorbild für andere sein und nur dann werden wir eine Chance haben auch andere Regionen der Welt von einem solchen Weg zu überzeugen und dazu zu bringen, diesen Weg mitzugehen. Und damit verantwortet unsere Region wie andere Industrieregionen einen, wie ich finde, sehr wichtigen Beitrag in Zusammenhang mit der Politik gegen den Klimawandel.

Dieser Verantwortung will Baden-Württemberg gerecht werden, und wie bereits erwähnt, wollen wir die Energie- und Klimaschutzpolitik auf Basis eines Klimaschutzgesetzes mit verbindlichen Zielen zur Treibhausgasreduzierung betreiben. Bis zum Jahre 2020 wollen wir demnach die CO<sub>2</sub>-Emissionen um 25 % mindern – was für ein Land, das bislang zu 50 % im Stromversorgungsbereich von der Kernenergie abhängig war, ein sehr ambitioniertes Ziel ist – und bis zum Jahr 2050 schließlich um 90 % gegenüber dem Basisjahr 1990 reduzieren. Wichtig dabei wird sein, dass es uns gelingt, das Wirtschaftswachstum und die Emissionen bei den Treibhausgasen in Zukunft zu entkoppeln. Ambitionierte Ziele werden Sie denken – ich kann nur sagen, Sie haben Recht. Es bleibt aber nicht bei diesen Zielen. Aufbauend auf dem Entwurf zum Klimaschutzgesetz haben wir ein integriertes Energie- und Klimaschutzkonzept erarbeitet, das die notwendigen Strategien und Maßnahmen enthält, mit denen wir dann auch diese Ziele in den kommenden Jahren erreichen wollen. Den Entwurf dieses integrierten Energie- und Klimaschutzkonzeptes werden wir noch in diesem Jahr der Öffentlichkeit vorlegen. Wesentliche Stellschrauben sind dabei zum einen die Reduzierung des Energieverbrauchs und zum anderen aber auch der Ausbau der erneuerbaren Energien. Für alle Emittenten-Gruppen, also für den Verkehr, die Industrie, private Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und die Landwirtschaft werden Maßnahmen und Strategien zur Energieeinsparung, zu mehr Energieeffizienz sowie zur Nutzung erneuerbarer Energien, in diesem integrierten Energie- und Klimaschutzkonzept enthalten sein. Das sind, wie gesagt, sehr ambitionierte, aber wir sind davon felsenfest überzeugt, durchaus machbare Ziele. Ich bin zugleich davon überzeugt, dass Baden-Württemberg den hierfür notwendigen Strukturwandel letztendlich mit einem wirtschaftlichen Erfolg verbinden kann.

Meine Damen und Herren aktiver Klimaschutz ist wie gesagt die eine Seite, Vorsorge und kluge Anpassung die andere. Beides gehört aus meiner Sicht zusammen. Die erforderliche



Anpassung an den Klimawandel wird deshalb auch als Ziel in das Klimaschutzgesetz einfließen. Und in diesem Zusammenhang haben wir begonnen, eine Anpassungsstrategie an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels für Baden-Württemberg zu entwickeln. Derzeit werden für die verschiedenen vom Klimawandel betroffenen Handlungsfelder Vulnerabilitätsanalysen, also Untersuchungen zur Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel durchgeführt. Darauf aufbauend wollen wir einen Handlungsrahmen mit Anpassungszielen und entsprechenden Maßnahmen erarbeiten. Bereits bestehende Anpassungsmaßnahmen sollen in dieser Strategie berücksichtigt und eingebunden werden. Für das Handlungsfeld Wasserwirtschaft war und ist KLIWA eine wichtige Basis. Als Ausfluss von KLIWA haben wir unter anderem für die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen schon seit Jahren einen sogenannten Lastfall Klima eingeführt. Und gerade auch unter dem Gesichtspunkt des Klimawandels hat Hochwasserschutz an unseren großen Flüssen dem Rhein, der Donau und dem Neckar aber auch in der Fläche für uns eine hohe Priorität. Die Mittel für den Hochwasserschutz werden aus diesem Grunde in den beiden kommenden Haushaltsperioden 13 und 14 in erheblichem Umfang anwachsen, trotz des Sanierungsdrucks, den auch wir in Baden-Württemberg im Haushaltsbereich haben. Neben den wichtigen Maßnahmen im Rahmen des Integrierten Rheinprogramms sanieren und ertüchtigen wir insbesondere unsere Hochwasserschutzdeiche entlang des Rheins.

Nicht zuletzt zu nennen ist die konsequente Umsetzung der Hochwassermanagementrichtlinie, bei der vor allem auch die Bewusstseinsbildung ein wichtiger Faktor ist. Hochwassergefahren müssen erkannt werden. Den Betroffenen und den Akteuren vor Ort muss die Notwendigkeit einer aktiven Hochwasservorsorge und die Betroffenheit aller bewusst gemacht werden. Die Erarbeitung von Hochwassergefahrenkarten an 12.000 Gewässerkilometern und der regelmäßige Austausch in den Hochwasserpartnerschaften sind dabei wichtige Bausteine. Ein Niedrigwasservorhersagesystem mit bis zu 7 Tagen Vorlaufzeit soll die Folgen von Niedrigwasser besser bewältigen helfen. Für Rhein und Neckar liegen Wärmemodelle und entsprechende Wassertemperaturvorhersagen für ein Niedrigwassermanagement u.a. zur Steuerung der großen Kraftwerke vor. Ein weiterer Aspekt ist die Weiterentwicklung der Wasserversorgungsstrukturen. Unsere Stärke ist nach wie vor die ortsnahe Wasserversorgung im Verbund mit unseren Fernwasserversorgungen. Um Engpässe besser überbrücken zu können, fördern wir zusätzlich aktiv Untersuchungen zur Schaffung von regionalen Verbundlösungen. Im Bereich der Siedlungsentwässerung müssen wir praktikable Lösungen im Umgang mit den veränderten Niederschlagsverteilungen entwickeln und auch das Thema Starkregen und Sturzfluten bedarf einer intensiven Betrachtung und konkreter Handlungsstrategien. In diesem Zusammenhang sei auf den, gemeinsam mit Rheinland-Pfalz entwickelten, Leitfaden zum Umgang mit Starkregenereignissen hingewiesen.

Im Rahmen der landesweiten Anpassungsstrategie befassen wir uns neben dem Bereich der Wasserwirtschaft auch mit weiteren Bereichen, ich nenne die Landwirtschaft, die Forstwirtschaft aber auch den Gesundheitsschutz, den Natur- und Artenschutz bis hin zu dem auch für uns, ähnlich wie Bayern, wichtigen Themenfeld des Tourismus:

Für extreme Hitzeereignisse wurde ein Hitzewarnsystem eingerichtet, hier können u.a. für den Bereich des Gesundheitsschutzes rund 1.400 Pflegeeinrichtungen erreicht und gleichzeitig vor entsprechenden Wetterlagen gewarnt werden. Der Umgang mit verstärkter Boden-erosion durch Starkregen und die Verminderung des Humusgehaltes, die Anpassung der Wälder in Baden-Württemberg, vor allem im Schwarzwald, die Umstellung von Anbaumethoden, der Umgang mit Trockenheit und vermehrtem Schädlingsbefall in der Landwirtschaft, der Erhalt von Artenvielfalt und der Umgang mit neuen Arten im Rahmen des Natur- und Gesundheitsschutzes, der Wandel im Tourismus und schließlich Architektur und Bauen im Zeichen des Klimawandels. All dies sind weitere Bereiche, die wir im Fokus haben und unbedingt auch haben müssen. Themen, denen wir uns neben dem Bereich der Wasserwirtschaft durch angewandte Forschungs- und Modellprojekte widmen, um konkrete auf die

regionale Veränderung angepasste Handlungsempfehlung zu entwickeln. Dies ist, denke ich, unabdingbar.

Meine Damen und Herren, lassen sie mich zum Schluss noch eine Frage aufwerfen. Es ist vorhin bereits angeklungen: Klimawandel als Chance? Diese These stellt der Meteorologe und aus Funk und Fernsehen bekannte Wettermoderator Sven Plöger in seinem neuen Buch auf. Und in der Tat, neben allen Herausforderungen auf die wir in Form von Anpassungsstrategien überlegt, zügig und konsequent reagieren müssen, bedarf es eines grundsätzlichen Perspektivenwechsels. Der Klimawandel ist Fakt und der Mensch hat einen wesentlichen Anteil hieran. In diesem Punkt gibt es, denke ich, wirklich nichts mehr zu diskutieren. Wie gehen wir aber unabhängig von rational notwendigen Entscheidungen emotional mit dieser Herausforderung um? Den Kopf in den Sand stecken und darüber lamentieren und vielleicht im Hinterkopf haben, so schlimm wird's dann doch nicht werden und sich nur halbherzig mit dieser Herausforderung auseinandersetzen?

Meine Damen und Herren, es gilt der bekannte Spruch, wo der Wind des Wandels weht, bauen die einen Mauern und die anderen Windmühlen. Wir bauen Windmühlen und wie sie wissen, in Baden-Württemberg endlich auch unter der grün geführten Landesregierung im realen und nicht nur im übertragenen Sinne. Lassen sie uns den Klimawandel deswegen auch als Chance begreifen. Als Chance in dem Sinne, dass wir, wenn auch gezwungener Maßen, erkennen und akzeptieren, dass Veränderung angesagt ist, wir aber die Möglichkeit haben u.a. in den Bereichen der Energieversorgung, der Mobilität, des Bauwesens einen Entwicklungssprung nach vorne zu machen. Wir können es schaffen, nicht nur die Folgen des Klimawandels einzudämmen, sondern auch unser Handeln auf nachhaltige Fundamente zu stellen und dabei neue Märkte zu erschließen. Im Bereich der erneuerbaren Energie arbeiten bereits heute weit mehr als 300.000 Menschen, Tendenz weiter stark steigend. Innovative CO<sub>2</sub>-freie Energietechniken „Made in Germany“ können zukünftig – noch mehr als heute – zum Exportschlager werden. Ich möchte jetzt nicht von Begeisterung sprechen, denn bei nüchterner Betrachtung stehen wir vor gewaltigen Herausforderungen, die gerade weltweit betrachtet das Leben auf unserer Erde nachhaltig negativ beeinflussen können. Dennoch ist die Herausforderung Klimawandel die Chance, eine Zeitenwende einzuleiten und unser Leben und Wirtschaften auf zukunftsfähige Grundlagen zu stellen.

Meine Damen und Herren, lassen sie uns gemeinsam weiter mit Nachdruck an dieser Herausforderung arbeiten. Einerseits durch weiteres intensives Forschen und Beobachten, wie im Projekt KLIWA, um so die regionalen Auswirkungen noch belastbarer abschätzen und passende Anpassungsstrategien entwickeln zu können. Andererseits durch eine aktive Klimaschutzpolitik, die die Ursachen des Klimawandels im Blick hat. Hier kommt dem Ausstieg aus dem fossilen Zeitalter und dem Umstieg in ein Zeitalter, in dem Energieeffizienz und regenerative Energiequellen im Mittelpunkt stehen, mit Sicherheit eine ganz entscheidende Schlüsselrolle zu.

Herzlichen Dank für ihre Aufmerksamkeit.





## Der Deutsche Wetterdienst als Partner beim Vorhaben KLIWA

Dr. Paul Becker,  
Vizepräsident des Deutschen Wetterdienstes

Sehr geehrter Herr Staatsminister Dr. Huber,  
sehr geehrter Herr Minister Untersteller  
sehr geehrter Herr Staatssekretär Dr. Griese,  
meine Damen und Herren.

KLIWA besteht inzwischen seit 13 Jahren. KLIWA ist ein Beispiel für eine enge Kooperation zwischen Bundes- und Landesbehörden. Der Deutsche Wetterdienst hat als Gründungsmitglied das Kooperationsvorhabens KLIWA von Anfang an begleitet. KLIWA war Pionier in der Nutzung von Klimaprojektionen für die Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt. Der Deutsche Wetterdienst hat dazu das vergangene Klima in den süddeutschen Bundesländern analysiert, und dies in mehreren KLIWA Heften publiziert. Daran angeschlossen hat sich ein regelmäßiges Klimamonitoring, dessen aktuellster Bericht den Zeitraum bis 2010 abdeckt. Mit der KLIWA-Internetseite werden alle Ergebnisse der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Auf Basis der Beantwortung klimatologischer und hydrologischer Fragestellungen entwickelt KLIWA konkrete und umsetzbare wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen. Alles das sind typische Klimadienste oder neudeutsch „Climate-Services“. Auf das Thema Klimadienstleistungen werde ich gleich noch näher eingehen.

Zu KLIWAS und dessen Rolle für KLIWA:

Der Bund hat vor einigen Jahren die Bedeutung des Klimawandels für die Bundeswasserstraßen erkannt und im Jahr 2009 das Forschungsprogramm KLIWAS aufgesetzt. In KLIWAS untersucht der Deutsche Wetterdienst zusammen mit dem Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, der Bundesanstalt für Gewässerkunde und der Bundesanstalt für Wasserbau die Auswirkungen des Klimawandels auf die Binnen- und Küstenschifffahrt. Der Deutsche Wetterdienst erstellt dafür klimatologische Referenzdatensätze und bereitet für KLIWAS Regionale Klimaprojektionen auf.

Wir verwenden dazu eine große Zahl von Klimamodellrechnungen. Mit einem Ensemble von Klimamodellen können wir die vorhandenen und wohl auch nie vollständig zu beseitigenden Unsicherheiten in der Klimamodellierung erfassen. Die Ergebnisse für die Zukunft werden dann in Form von Bandbreiten dargestellt. Wir haben im Deutschen Wetterdienst bisher neunzehn Kombinationen aus globalen und regionalen Klimamodellen bearbeitet.

Die Ergebnisse haben wir auch für die interessierte Öffentlichkeit und die Fachöffentlichkeit im Klimaatlas des DWD aufbereitet. In dieser webbasierten Anwendung stellen wir das vergangene, das heutige und die zukünftigen Änderungen des Klimas in Deutschland gegenüber.

Wir erstellen in KLIWAS auch grenzüberschreitende Referenzdatensätze von meteorologischen Größen wie dem Niederschlag, um die für Deutschland relevanten Flusseinzugsgebiete vollständig abzudecken. In KLIWAS sind viele wertvolle Ergebnisse entstanden, die auch KLIWA zur Verfügung stehen und auch schon in KLIWA verwendet werden konnten.

Zur Bedeutung des Klimamonitoring:

Klimamonitoring ist eine wichtige Grundlage für die Beratung zum Schutz vor klimabedingten Risiken. Dies wurde auch auf internationaler Ebene durch die Verabschiedung des Globalen Rahmenwerks für Klimadienste der Weltorganisation für Meteorologie bekräftigt.



Die Umsetzung des Rahmenwerks erfolgt in den fünf Komponenten ‚Beobachtungen und Monitoring‘, ‚Modellierung, Projektionen und Vorhersage‘, ‚Klimainformationen‘, ‚Nutzer-schnittstelle‘ und ‚Aufbau von Kapazitäten‘.

Klimamodelle sind bei Weitem noch nicht perfekt. Gerade für die Bewertung von Klimaprojektionen ist der Vergleich mit Messdaten und Monitoringergebnissen unverzichtbar. Systematische Unterschiede in Temperatur, Niederschlag und Feuchte gilt es zu berücksichtigen, um auswertbare Ergebnisse in der hydrologischen Modellierung zu erzielen. Auch im Bereich der Starkniederschläge gibt es noch Verbesserungspotential.

Fernerkundungsdaten ergänzen das Klimamonitoring:

Für die Erfassung von Starkniederschlägen können Fernerkundungsdaten wie das bodengestützten Niederschlagsradar zukünftig eine größere Rolle spielen.

Der DWD misst den Niederschlag flächendeckend in Deutschland mit einem Verbund aus 16 Radargeräten. Die Radardaten werden mit Niederschlagsmessungen angeeicht und stehen der operationellen Hochwasservorhersage zur Verfügung. Der DWD hat inzwischen mehr als 10 Jahre hochaufgelöste Radardaten für ganz Deutschland vorliegen. Dies ist ein Zeitraum, der diese Daten auch für klimatologische Untersuchungen interessant macht. Wir haben daher begonnen, die Radardaten für die klimatologische Nutzung aufzubereiten. Diese neue Radarklimatologie eröffnet die Möglichkeit, Niederschlagsmengen in Deutschland in stündlicher Auflösung, flächendeckend und in sehr hoher räumlicher Auflösung zu bestimmen und damit insbesondere den Starkniederschlag in seiner zeitlichen und räumlichen Verteilung besser zu erfassen.

Die bestehenden Radarsysteme des DWD werden zurzeit mit hohem finanziellen Aufwand ausgetauscht und durch neue, polarimetrische C-Band Doppler Radarsysteme ersetzt. Diese neuen Radarmessungen des Niederschlags liefern zusätzliche Informationen zur Unterscheidung von Regen, Schnee und Hagel, die über längere Sicht auch der klimatologischen Auswertung der Radardaten zugutekommen, insbesondere der Erstellung von Hagelklimatologien.

Was kann die Meteorologie in den nächsten Jahren zu KLIWA beitragen?

Welche weiteren Entwicklungen gibt es in der Meteorologie, die für KLIWA in den nächsten Jahren von Interesse sein könnten?

Im Bereich des Klimamonitoring habe ich die radarbasierte Niederschlagsklimatologie bereits angesprochen. Eine weitere interessante Forschungsaktivität ist die retrospektive Analyse des regionalen Klimas mit dem Atmosphärenmodell COSMO-DE. Diese Aktivität wird vom Deutschen Wetterdienst im Rahmen des Hans Ertel Zentrums für Wetterforschung gefördert. Dabei entstehen in sich konsistente Datensätze des vergangenen Klimas in Mitteleuropa in einer Auflösung von wenigen Kilometern. Diese Datensätze können zukünftig eine wichtige Rolle für das Klimamonitoring und die Bewertung und Aufbereitung von Klimaprojektionen spielen, insbesondere auch bei der Betrachtung von grenzüberschreitenden Flusseinzugsgebieten.

Ein weiteres interessantes Forschungsprojekt, an dem der Deutsche Wetterdienst im Verbund mit anderen Forschungseinrichtungen beteiligt ist, ist die mittelfristige Klimavorhersage. In dem vom BMBF geförderte Projekt MiKlip wird die Möglichkeit untersucht, dekadische Vorhersagen des Klimageschehens für die wichtigen Planungszeiträume von 10 bis 30 Jahren zu erstellen. Mit der Wettervorhersage schauen wir wenige Tage in die Zukunft, mit den Klimaprojektionen bis zu 100 Jahre. MiKlip kann, neben der Jahreszeitenvorhersage, ein wichtiger Baustein für die dazwischen liegenden Planungszeiträume werden. Die Vorhersage von unterschiedlichen, in der Zukunft liegenden Zeithorizonten von der Kurzfristskala bis zur Klimaprojektion wird unter dem Begriff „nahtlose Vorhersage“ oder in Englisch „seamless prediction“ zusammengefasst.

Im Laufe des nächsten Jahres werden voraussichtlich die ersten Ergebnisse der Regionalen Klimamodelle mit den neuen Klimaszenarien, den sogenannten RCPs, für Nutzer zur Verfügung stehen. Der Deutsche Wetterdienst wird diese, wie schon die Ergebnisse der Szenarien des 4. Sachstandsberichts des Weltklimarats, auswerten und aufbereiten. Eine der wichtigen Fragen wird sein, wie sich diese in die Ergebnisse der bisherigen Szenarien einordnen und wie sich der Fortschritt in der Modellentwicklung auswirkt.

Vernetzung von Klimadienstleistern und Nutzern:

Solche Ergebnisse sind dann aufzubereiten, zu kommunizieren und die Nutzer sind bei Bedarf in der Anwendung der Datensätze und Ergebnisse zu beraten. Dies ist die Aufgabe von Klimadienstleistern, von denen es in Deutschland eine ganze Reihe gibt. Um eine konsequente deutschlandweite Vernetzung von Klimadienstleistern und Nutzern von Klimainformationen zu ermöglichen, entwickelt der Deutsche Wetterdienst das Deutsche Klimaportal. Dieses Klimaportal ist ein Beitrag zum Aufbau des von mir Anfangs erwähnten Globalen Rahmenwerks für Klimadienstleistungen („Global Framework for Climate Services“, GFCS).

Das Deutsche Klimaportal soll Bundesländer und die in der deutschen Anpassungsstrategie identifizierten Handlungsfelder mit maßgeschneiderten Services bedienen. Dies geschieht in enger Partnerschaft mit Anbietern von Klimaservices. Wir laden daher die Landesbehörden und andere Institutionen ein, sich an der Vernetzung im Deutschen Klimaportal zu beteiligen. Verweise auf die Startseite der Anbieter, auf Kontaktpersonen und auf Datenbestände, beim Deutschen Wetterdienst z. B. das Climate Data Center, soll dem Nutzer eine schnelle Orientierung ermöglichen.

Wir planen, das Deutsche Klimaportal am 17. Dezember freizuschalten. Es wird dann unter der Internet Adresse [www.deutschesklimaportal.de](http://www.deutschesklimaportal.de) erreichbar sein.

Meine Damen und Herren, ich hoffe ich konnte ihnen in diesen kurzen Ausführungen einen Einblick in aktuelle Entwicklungen im Bereich der Klimaforschung geben. Da gibt es noch einiges zu tun. Der Transfer des gewonnenen Wissens an die Nutzer ist dann der nächste wichtige Schritt, so wie es im Rahmen von KLIWA schon vielen Jahren praktiziert wird.

KLIWA ist wichtig, und wir werden alles dafür tun, dass es weiterhin eine Erfolgsstory bleibt.

Vielen Dank!





## Klimapolitik nach Doha – Hindernisse in Lösungen verwandeln

Prof. Dr. Dr. Franz Josef Radermacher <sup>1</sup>

### Frust dominiert

Die internationalen Klimaverhandlungen kommen nicht richtig vorwärts. Zehntausende reisende Unterhändler, drängende NGOs und kommentierende Journalisten und allenthalben Frust, da der Umfang an Klimagasemissionen unentwegt wächst. Viele Beobachter haben das Zwei-Grad-Ziel längst aufgegeben und argumentieren nicht mehr für mehr Klimaschutz, sondern für den Schutz der Bevölkerung vor den Folgen einer nicht mehr zu verhindernden Klimakatastrophe.

### Gibt es noch eine Chance?

Es gibt noch eine Chance (Herlyn & Radermacher 2012, Radermacher 2010), aber nicht mehr unter Beibehaltung der bisherigen Verhandlungslogik. Die Zeit ist über sie hinweg gegangen, die Bedingungen haben sich fundamental verändert. Jetzt helfen allenfalls noch neue Ansätze: mehr systemische Intelligenz, die die Weltgemeinschaft aus dem Hamsterrad der bisherigen Verhandlungslogik herausbringt.

### Eine Bilanz hat zwei Seiten

Die bisherige Verhandlungslogik zielt auf die Drosselung der weltweiten Klimagasemissionen auf ein genügend niedriges Niveau, um insgesamt im Rahmen eines sich ständig verringernenden Gesamtbudgets noch zulässiger Emissionen zu verbleiben. Der Gesamtbetrag an akzeptablen CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Quellen bis 2050 ist gegeben durch die sogenannte **WBGU Budgetrestriktion** und beträgt günstigstenfalls noch 750 Milliarden Tonnen, eher weniger (Wissenschaftlicher Beirat 2011, 2012). Gestritten wurde all die Jahre über die Größe des Gesamtbudgets, seine Aufteilung auf die Staaten und begleitende Finanztransfers von Nord nach Süd. Ein tragfähiger Kompromiss kam nie zustande. Heute ist ein Klimaabkommen gemäß dieser Logik sachlich unmöglich, weil die Drosselung mittlerweile so weit gehen müsste, dass sie weltweit den Wohlstand und in den aufholenden Ländern die **legitimen Wachstumsambitionen** verunmöglichen würde. Das kann keine politische Führung gegenüber ihrer Bevölkerung verantworten. Der Wohlstand der Gegenwart ist kurzfristig wichtiger als potenzielle Klimaprobleme in der Zukunft.

Deshalb braucht die Welt einen neuen Verhandlungsansatz und einen starken Joker, verbunden mit der Erkenntnis, dass das Beharren auf dem bisherigen Lösungsansatz zum ultimativen Klimarisiko wird. Eine immer stärkere Drosselung unter Beachtung des immer kleiner werdenden Restbudgets an verkraftbaren Emissionen reicht nicht mehr aus. So viel

---

<sup>1</sup> Prof. Dr. Dr. F. J. Radermacher, Vorstand des Forschungsinstituts für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung/n (FAW/n), zugleich Professor für Informatik, Universität Ulm, Präsident des Senats der Wirtschaft e. V., Bonn/Berlin, Vizepräsident des Ökosozialen Forum Europa, Wien sowie Mitglied des Club of Rome



wie notwendig wäre kann kurzfristig gar nicht gedrosselt werden. Die neue Aufgabe besteht darin, den CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre aktiv zu managen. **Die CO<sub>2</sub>-Bilanz hat zwei Seiten**, nicht nur die Seite der Klimagasemissionen, sondern auch die Seite des Herausholens von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre. Letzteres muss in Zukunft massiv geschehen, um Zeit zu gewinnen für den natürlich nach wie vor unverzichtbaren Umbau der weltweiten Wertschöpfungs-systeme.

## Eine neue Logik

Eine mögliche neue Logik für einen Weltklimavertrag, ein pragmatischer Ansatz, wurde in Kopenhagen in einer Absprache zwischen China und den USA entwickelt. Das gilt es zu würdigen, weiterzuverfolgen und umzusetzen. Ein derartig pragmatischer Vertrag ist auch jetzt noch möglich, auch wenn er zugegebenermaßen unvollständig ist. Die von China und den USA angedachte Kopenhagenformel ist ein realistischer Kompromiss, welcher die Kyotoformel, die in Doha in letzter Minute für die Übergangszeit verlängert wurde, klug fortschreibt und geeignet ist als Basis für einen Weltklimavertrag, der 2015 unterschrieben werden könnte, um 2020 (oder auch früher) in Kraft zu treten. Er würde eine wesentliche Verbesserung der Kyotoformel gemäß folgender Logik bringen:

**Industrieländer** senken ihre Emissionen absolut ab und erklären selber wie viel. **Nicht-Industrieländer** senken ihre Emissionen relativ zu ihrer wirtschaftlichen Wachstumsrate ab und erklären selber wie viel. Freiwillige Zahlungen industrialisierter Länder in einen Klima-fonds zu Gunsten nicht-industrialisierter Ländern sollen diesen helfen, sich zu beteiligen.

Der Kern dieses Kompromisses sind freiwillige Zusagen der Staaten. Das ist politisch tragfähig und erlaubt den Staaten eine Orientierung an ihren je spezifischen Möglichkeiten. Alle Staaten werden eingebunden, wobei den sich entwickelnden Staaten gerechterweise für die nächsten Jahre nur Einschränkungen relativ zu ihrem Wirtschaftswachstum abverlangt werden. Daraus resultiert eine von den Wachstumsraten der Nicht-Industrieländer abhängige dynamische Deckelung der Gesamtemissionen (Herlyn & Radermacher 2012, Radermacher 2010). Das ist bei weitem noch nicht die volle Lösung des Klimaproblems, kann aber intelligent mit weiteren Bausteinen zu einer vollständigen Lösung ausgebaut werden. **Die in ihrer Unvollständigkeit liegende Schwäche der vorgeschlagenen Verhandlungslösung wird zu ihrer Stärke**, da sie (1) **zustimmungsfähig** und (2) **ausbaubar** ist. Alle wichtigen Staaten haben ihre Zustimmung bereits signalisiert. Das erlaubt dann als starken zusätzlichen Hebel die Einbindung von **WTO-konformen Grenzausgleichsabgaben** zur Durchsetzung eines „wasserdichten“ Klimaregimes. Das ist fast wie bei „Münchhausen“. Eine perfekte Lösung ist in Reichweite, weil die erste Hälfte ausreichend „bescheiden“ ist und daher eine breite Zustimmung ermöglicht. Was fehlt, ist die zweite Hälfte. An dieser Stelle werden dringend Joker benötigt.

## Die Joker

Wer sorgt in wohlstandskompatibler Weise für die Stilllegung von Emissionsrechten (Schließen der sog. **Verhandlungslücke**) und wer sorgt anschließend für das Herausziehen der trotz der erfolgten Stilllegungen noch zu hohen Emissionen aus der Atmosphäre (Schließen der sog. **Sequestrierungslücke**)? Mit welchen Mechanismen kann dies erfolgen? Die folgende Abbildung 1 beschreibt die Aufgabenstellung.

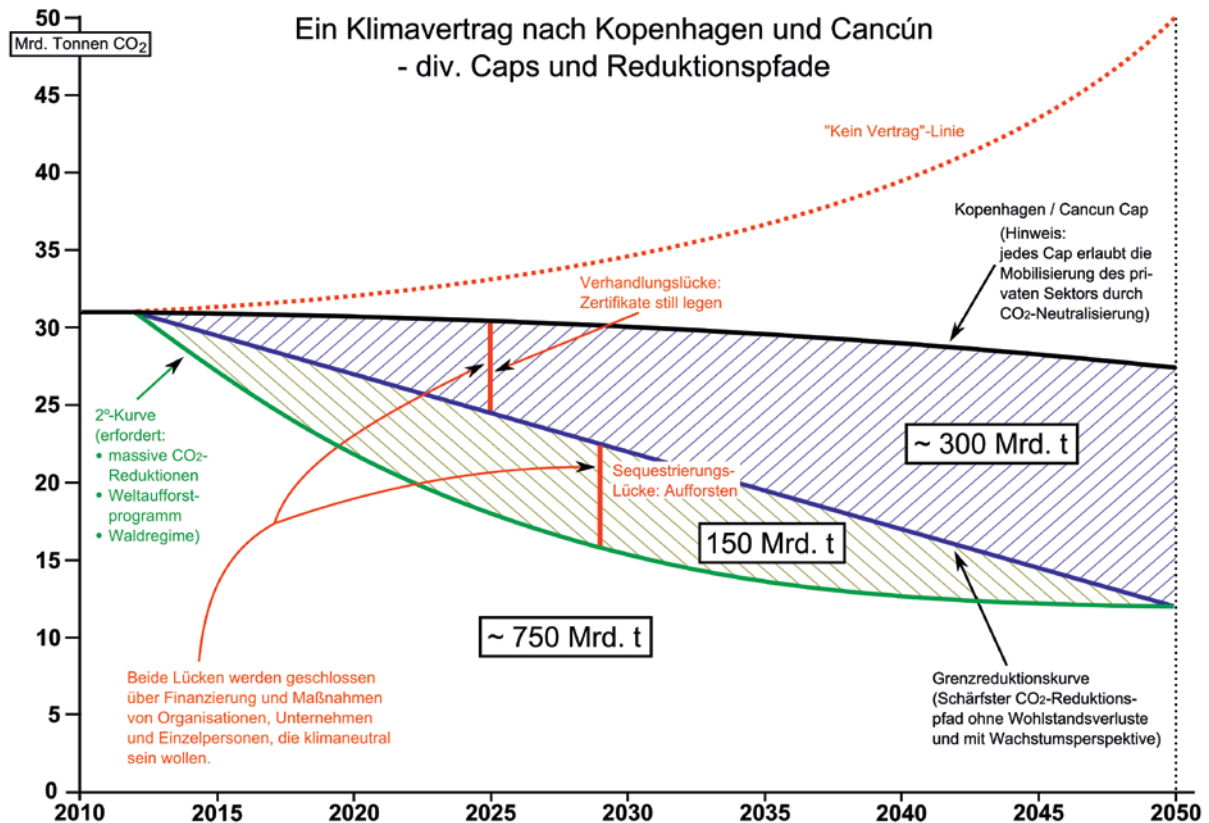


Abb. 1

Abbildung 1 zeigt die **aktuelle Entwicklung** der globalen CO<sub>2</sub> Emissionen aus fossilen Quellen (rote Linie), die völlig unakzeptabel ist, eine (schwarze) **Cap-Linie vom Kopenhagentyp**, wie sie in diesem Text als ausreichend (für die erste Hälfte) für ein tragfähiges Klimaregime vorgestellt wird, den ungefähren Verlauf der sogenannten **Grenzreduktionslinie** (blau), die das schärfste mit Wohlstandsanliegen kompatible Cap darstellt und Jahr für Jahr politisch (auf Arbeitsebene) fixiert werden muss sowie schließlich die (grüne) 2°-Kurve, die erforderlich ist, um die WBGU-Budgetrestriktion zu erfüllen und damit potenziell noch das 2°C-Ziel zu erreichen. Die Fläche zwischen der schwarzen und der blauen Linie veranschaulicht die **Verhandlungslücke**, die Fläche zwischen der blauen und der grünen Linie die **Sequestrierungslücke**. Diese Lücken müssen geschlossen werden.

Zwei Joker liegen auf dem Tisch, um die Lücken zu schließen: (1) Die **Stilllegung von Emissionsrechten** in dem Umfang, wie dies mit weltweiter Wohlstands- und Wachstumsperspektive kompatibel ist. Das für diesen Zweck freigegebene Volumen kann jährlich auf Arbeitsebene (und orientiert an den Erfahrungen der Vorjahre) zwischen den Staaten der Welt fixiert werden. (2) Das Entziehen von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre durch Waldschutz, ein **Weltaufforstprogramm** und die Intensivierung von Grünlandmanagement.

Wer soll die entsprechenden Maßnahmen bezahlen? Die Umsetzung der Joker kostet viel Geld, die Staaten können das nicht leisten. Glücklicherweise drängen viele Akteure des Privatsektors heute schon in diese Lücke - aus **Reputationsgründen**, aus politischen Erwägungen, aus ethischen Motiven. Unternehmen, Organisationen, Privatpersonen - immer mehr Akteure wollen **klimaneutral** sein. Große Unternehmen haben bereits ihre Klimaneutralität angekündigt. So auch das Land Hessen (Hölscher & Radermacher 2012), das bis 2030 klimaneutral sein will und das in dieser Thematik politischer Vorreiter ist. In der Wirtschaft wird unter **CSR-Aspekten** gehandelt, zugleich Druck auf Vorlieferanten ausgeübt. Gut



bezahlende Konsumenten und leistungsstarken Investoren artikulieren entsprechende Anforderungen an Markenhersteller. **Hunderte Akteure** sind heute bereits im Umfeld von **Klimaneutralität** engagiert und **Millionen Dollar** werden dabei bewegt, vgl. exemplarisch viele Beispiele in Hölscher & Radermacher (2012) sowie insbesondere Deutsche Bahn (2012) und DPD (2012). Die Schweiz wird gesetzlich die Neutralisierung des gesamten Energiesektors durchsetzen. In Deutschland sind die deutschen Schornsteinfeger, die Glücksbringer der Nation, die Umwelt- und Klimaexperten, die jedes Haus besuchen, ebenfalls bereits aktiv (Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks). Die Jugendinitiative „Plant for the Planet“ hat bereits hunderttausende Menschen mobilisiert und die Aufforstung von Millionen Bäumen bewirkt (Finkenbeiner 2012). Ferner ist über den Berliner Appell (s. Lit.) jeder Mensch aufgefordert, dies auch individuell zu tun.

Die **Finanzierung von Klimaneutralität** durch den Privatsektor ist der Schlüssel für ein funktionierendes Weltklimaregime. Über den Verkauf von Zertifikaten für Stilllegungszwecke können jährlich auch die 100 Milliarden Dollar erschlossen werden, die für den ebenfalls in Kopenhagen verabredeten **Weltklimafonds** zur Förderung der Zusammenarbeit von Nord und Süd erforderlich sind. Heute weiß noch niemand, wo das Geld für den Fonds herkommen soll. Die Aufgabe der Politik besteht in dem hier beschriebenen Ansatz neben der Fixierung des Kopenhagen-Cap **nur** noch darin, eine Reputationsrisiko-freie, von der bürokratischen wie rechtlichen Seite her „schlanke“ Plattform für den Zertifikatehandel zur Erreichung von Klimaneutralität (Stilllegung; Aufforstung) zu schaffen. Damit wird nicht nur den **Gerechtigkeitsanforderungen** zwischen Nord und Süd Genüge getan, sondern zusätzlich auch den Gerechtigkeitsanforderungen zwischen Premiumkonsumenten und normalen Bürgern (Chakravarty, et al. 2009). In den Golfstaaten, in China und Indien, in Mexiko und Brasilien gibt es mittlerweile ähnlich viele Premiumkonsumenten wie in der reichen Welt.

### „Out of the box“

Was ist das Neue an der beschriebenen zweiten Chance für ein funktionierendes Weltklimaregime, die allerdings auch nur noch für 10-15 Jahre besteht und vielleicht auch nicht genutzt werden wird? Die Regierungen der Welt verstehen, dass sie das Klimaproblem alleine und nach der früher verfolgten Vertragslogik nicht mehr lösen können. Sie verstehen auch, dass mittlerweile eine Drosselung der Emissionen alleine keine tragfähige Option mehr ist. Sie verstehen, dass ein stringentes Cap auf Regierungsebene nicht erreicht werden kann, aber auch, dass dies gar nicht erforderlich ist. Ausreichend ist bereits ein dynamisches Cap gemäß der Kopenhagenformel. Das ist die halbe Lösung. Die zweite Hälfte ist die Eröffnung einer **reputationsrisikofreien und „schlanken“ „Bühne“ für private Akteure**, d. h. für Organisationen, Unternehmen und Privatpersonen, die sich klimaneutral stellen wollen. Das betrifft die beiden verfügbaren Joker, also die Stilllegung von Emissionsrechten und die biologische Sequestrierung. Beides ist teuer und zugleich wirkungsvoll. Mit letzterer wird der Atmosphäre in großem Umfang CO<sub>2</sub> entzogen. CO<sub>2</sub> wird zu einer produktiven Ressource für neuen Wohlstand, vor allem in den ärmeren Teilen der Welt. Dies ermöglicht gleichzeitig Partnerschaften für Klimaschutz zwischen Nord und Süd, ohne die das Weltklimaproblem ohnehin nicht gelöst werden kann.

Ein „wasserdichter“ Vertrag ist bis 2015 ausverhandelbar, ein Grundgerüst für einen solchen Vertrag findet sich in Radermacher (2010). Er kann 2020, aber auch schon früher in Kraft treten. Wenn bis dahin in großem Stil aufgeforstet wird, können sogar die **zusätzlichen Emissionen** neutralisiert werden, die bis dahin deshalb im Übermaß erfolgen werden, weil das Ziel der Weltgemeinschaft, bis 2012 einen Klimavertrag auszuverhandeln, verfehlt wurde.

Es gibt immer noch eine Chance, das Zwei-Grad-Ziel zu erreichen, aber auch dieses Fenster wird sich irgendwann schließen, weil die Flächen für Aufforstung im Süden des Globus mit dem erheblichen Volumen von 500 Mio. Hektar zwar riesig sind, jedoch nicht unerschöpflich (World Resources Institute 2010). Deshalb gilt es, schnell aus der „Box“ herauszukommen, die bisherige Verhandlungslogik aufzugeben und neues Denken zu praktizieren. Wir haben uns in eine so schwierige Lage gebracht, dass nur noch ein massiver Einsatz systemischer Intelligenz ein Fenster zur Lösung des Klimaproblems eröffnet. Fantasie und Agilität werden dabei zu einer entscheidenden Ressource.

## Literatur:

Berliner Appell: Klimaneutral handeln. [www.klimaneutral-handeln.de](http://www.klimaneutral-handeln.de)

Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband: CO2OL - Aufforstung für aktiven Klimaschutz. [www.co2ol.de](http://www.co2ol.de)

Chakravarty, S., Chikkatur, A., de Coninck, H., Pacala, S., Socolow, R. and Tavoni, M. (2009): Sharing global CO2 emission reductions among one billion high emitters. PNAS Published online before print July 6, doi:10.1073/pnas.0905232106; PNAS July 21, vol. 106 no. 29 11884-118882009

Deutsche Bahn (2012): Ab 01.04.2013 Angebot an die Bahncard- und Zeitkarteninhaber, ohne Aufpreis mit 100 Prozent Ökostrom in den ICE-, Intercity- und Eurocityzügen der DB unterwegs zu sein. Bahnberichte November 2012, [www.bahnnews.info/aktuelles/bernov12.htm](http://www.bahnnews.info/aktuelles/bernov12.htm)

Finkbeiner, F. (2010): Baum für Baum. Jetzt retten wir Kinder die Welt. oekom

Herlyn, E.L.A., F. J. Radermacher (2012): Klimaneutralität und 2-Grad-Ziel – Warum globale und regionale Bemühungen miteinander verbunden werden müssen. In: Hölscher, L., F. J. Radermacher (eds.): Klimaneutralität – Hessen geht voran. Springer Vieweg, S. 36-41

Hölscher, L., Radermacher, F. J. (2012): Klimaneutralität – Hessen geht voran. Springer Vieweg Verl.

Paketdienst DPD wird grün. Handelsblatt, 15.02.2012

Radermacher, F. J. (2010): Weltklimapolitik nach Kopenhagen. Umsetzung der neuen Potentiale. FAWn-Report

Radermacher, F. J. (2011): Wege zum 2-Grad-Ziel – Wälder als Joker. Politische Ökologie 127, Bürgerbeteiligung 3.0, S. 128-131

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU; Hrsg.): Kassensturz für den Klimavertrag – Der Budgetansatz. Sondergutachten, 2008

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung für Globale Umweltveränderungen (WBGU; Hrsg.): Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation. Hauptgutachten, 2011

World Resources Institute (2010): Global Map of Forest Landscape Restoration Opportunities. Online at: <http://www.wri.org/map/global-map-forest-landscape-restoration-opportunities>. Washington DC, [www.wri.org/](http://www.wri.org/)

Weitere Informationen finden sich unter:

[www.globalmarshallplan.org/](http://www.globalmarshallplan.org/)

[www.faw-neu-ulm.de](http://www.faw-neu-ulm.de)

[www.senat-deutschland.de/](http://www.senat-deutschland.de/)





## **Überblick über das Kooperationsvorhaben KLIWA - Konzeption, Stand, Weiterentwicklung -**

Johann Weber  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### **1 Veranlassung**

Seit Mitte der 1980er Jahre sind der weltweite Klimawandel und seine möglichen globalen wie regionalen Auswirkungen auf die unterschiedlichen Bereiche der Gesellschaft zu einem Schwerpunkt der internationalen Forschungslandschaft und in der Folge auch ein wichtiges Thema der Weltpolitik geworden. Die Gründung des Weltklimarates (IPCC) war eine erste Reaktion auf die beunruhigenden Ergebnisse der Klimaforschung. Die Erkenntnisse über die künftige Entwicklung des globalen Klimas, aber auch die Fakten aufgrund weltweiter Messungen, sind in den Veröffentlichungen des Weltklimarates (IPCC), zuletzt im 4. Sachstandsbericht von 2007, eindrucksvoll dargestellt; ein fortgeschriebener Bericht ist für Ende 2013/Anfang 2014 angekündigt. Die allgemeine Erwärmung als Folge des zunehmenden Treibhauseffekts ist weltweit bereits deutlich spürbar, ihre Auswirkungen zeigen sich auch regional in unterschiedlicher Ausprägung.

Der Klimawandel und die damit verbundene Veränderung der mittleren Temperaturverhältnisse werden sich wegen der physikalischen Prozesszusammenhänge in der Atmosphäre auf regionaler Ebene auf das Niederschlagsverhalten und die Verdunstungssituation auswirken und somit auch den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten beeinflussen. Die hydrologischen Grundlagen mit ihrer beobachteten natürlichen Variabilität und die bisherige Auftretenshäufigkeit seltener Ereignisse werden deshalb Änderungen erfahren. Die Veränderungen des Wasserhaushalts, sei es bezüglich der Ausprägung in der Fläche oder des bisherigen Abflussregimes von Flüssen, werden zwangsläufig nicht ohne Auswirkungen auf das wasserwirtschaftliche Planen und Handeln bleiben können.

Eine Reihe außergewöhnlicher Naturkatastrophen, auch im mitteleuropäischen Raum, hat dazu beigetragen, die Problematik des Klimawandels auch in unserer Gesellschaft verstärkt ins öffentliche Bewusstsein zu rücken. Das gehäufte Auftreten außergewöhnlicher Hochwasserereignisse in den 1990er Jahren, insbesondere die Rheinhochwasser vom Dezember 1993 und vom Januar 1995, hat für die Wasserwirtschaft die Frage nach den Ursachen sowie den künftig möglichen Auswirkungen des Klimawandels aufgeworfen. Die dahinter erkennbare Komplexität war auch Anlass für diese Thematik fachübergreifend nach Antworten zu suchen.

Wegen der engen Verknüpfung zwischen Klima und Wasserhaushalt haben sich wasserwirtschaftliche Fachbehörden frühzeitig mit der Fragestellung nach den Folgen einer Klimaveränderung befasst. Eine bemerkenswerte Aktivität dafür ist das Kooperationsvorhaben KLIWA, das bereits im Jahr 1999 begonnen wurde. Heute arbeiten hier die Wasserwirtschaftsverwaltungen von Baden-Württemberg, von Bayern und von Rheinland-Pfalz fachlich eng mit dem Deutschen Wetterdienst zusammen, um gemeinsam die Auswirkungen einer Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt der Flussgebiete im Süden Deutschlands zu untersuchen. Weitere wasserwirtschaftliche Fachbehörden sind an den Arbeiten von KLIWA interessiert und besitzen einen Gaststatus.



## 2 Rahmenbedingungen und Vorgehenskonzept

Das Kooperationsvorhaben KLIWA ist als breit angelegtes und längerfristiges Untersuchungsprogramm konzipiert, aus dem sich für die beteiligten Partner Synergieeffekte ergeben. Das Vorgehenskonzept als fachliche Grundlage für KLIWA und seine Umsetzung sind zwischen den beteiligten Institutionen in einer Verwaltungsvereinbarung geregelt. Die Konzeption für das fachliche Vorgehen wird abhängig vom Erkenntnisfortschritt in regelmäßigen Zeitabständen angepasst, ist aber in seiner Anfangsstruktur weiterhin gültig.

Ausgangspunkt für KLIWA waren fehlende Kenntnisse und Fakten zu Umfang und Größe der Auswirkungen des Klimawandels in den Flussgebieten Süddeutschlands, also Wissensdefizite zu konkreten regionalen Folgen. Mit KLIWA sollen Erkenntnisse über die möglichen regionalen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt und die davon abhängigen bzw. beeinflussten wasserwirtschaftlichen Infrastruktureinrichtungen für den Zeithorizont bis 2050, aber auch darüber hinaus gewonnen werden. Die Kenntnis der zu erwartenden Veränderung der quantitativen und qualitativen gewässerkundlichen Grundlagen soll eine rationale Basis für die Entwicklung nachhaltiger Handlungsstrategien liefern. Auf der Grundlage fundierter Ergebnisse sind geeignete Anpassungsmaßnahmen festzulegen und bedarfsweise umzusetzen.

Das Vorgehenskonzept von KLIWA umfasste von Beginn an fünf Arbeitsbereiche mit den nachstehenden Zielsetzungen (siehe auch Abb. 1):

- Ermittlung bisheriger Veränderungen der Klima- und Wasserhaushaltsgrößen durch Untersuchung langer meteorologischer und hydrologischer Beobachtungsreihen (Basisauswertungen als Referenz für Vergleiche – Bereich A)
- Durchführung eines Klimamonitorings durch die regelmäßige Aktualisierung der Messreihenauswertung (Basisauswertungen) zur zeitnahen Erfassung der regionalen Klimaentwicklung (Bereich C)
- Abschätzung der mutmaßlichen regionalen Klimawandelauswirkungen auf den Wasserhaushalt von Flussgebieten mittels Simulation von Klimaprojektionen mit den drei Arbeitsschritten Auswahl regionaler Klimaprojektionen, Aufstellung der flussgebietsbezogenen Wasserhaushaltsmodelle und Abflusssimulationen (Bereich B)
- Analyse der simulierten Veränderungen und Ableitung von Handlungsempfehlungen und Vorsorgekonzepten zur rechtzeitigen Anpassung vorhandener wasserwirtschaftlicher Systeme an zu erwartende Änderungen (Bereich D)
- Bereitstellung von Informationen zum jeweiligen Erkenntnisstand für politische wie fachliche Entscheidungsträger, aber auch die interessierte Öffentlichkeit (Bereich Ö)

Der Projektrahmen mit der fachlichen Unterteilung der Arbeitsbereiche ist aus Anlage 1 ersichtlich; die zugehörigen anspruchsvollen, teilweise forschungsnahen Teilprojekte für den bisherigen, aktuellen und weiteren Untersuchungsumfang sowie der erreichte Bearbeitungsstand sind in den Anlagen 2 bis 5 schematisch dargestellt.

Die Planung, Lenkung und konzeptionelle Anpassung des umfangreichen Untersuchungsprogramms sind Aufgabe der Steuerungsgruppe von KLIWA, der Vertreter der zuständigen Länderministerien, des DWD und des Arbeitskreises KLIWA angehören. Der Arbeitskreis selbst ist mit Fachleuten des DWD und der beteiligten Landesumweltämter besetzt und für die Umsetzung der Einzelprojekte verantwortlich; für spezielle Themen sind ergänzend Arbeitsgruppen eingerichtet. Bei Bedarf werden für die Bearbeitung von Einzelprojekten fachkundige Institute und Ingenieurbüros als externe Experten herangezogen. Damit ist auch die Gewähr für die externe Nutzung des erforderlichen forschungsnahen Knowhows gegeben;



die Fachverwaltungen selbst können keine umfassende wissenschaftliche Expertise auf den weiten und komplexen Feldern von Klimaforschung und Klimawandelanpassung vorhalten.

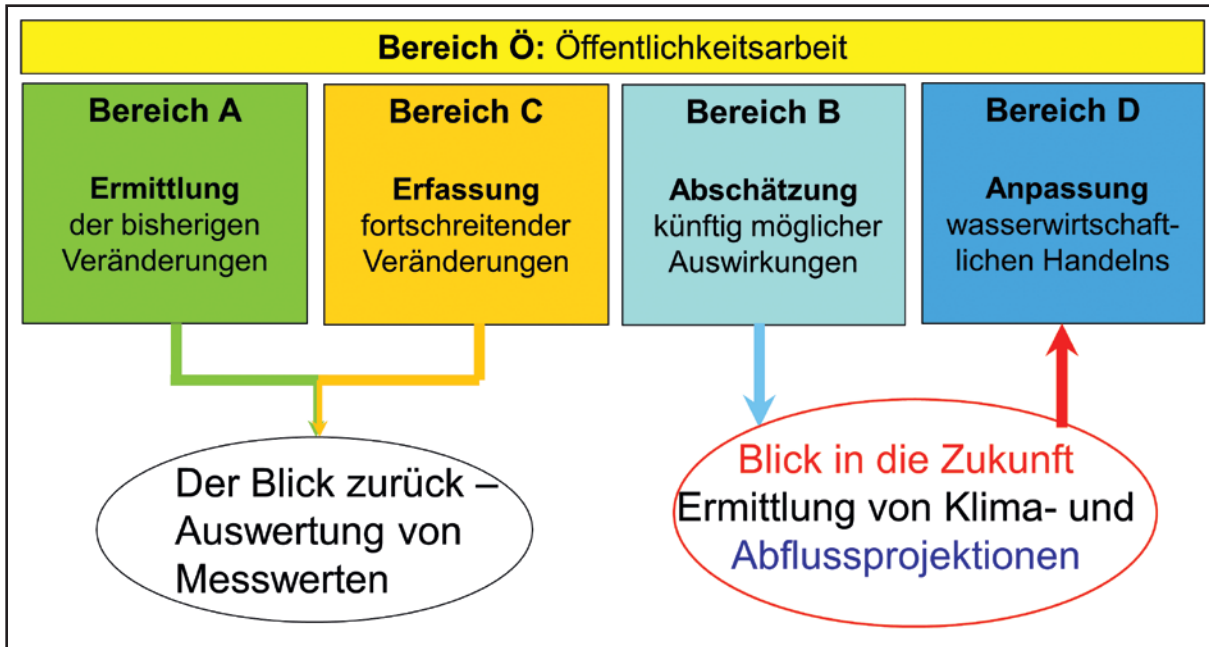


Abb. 1: Vorgehenskonzept von KLIWA - Untersuchungsprogramm mit fünf Arbeitsbereichen

### 3 Darstellung der Arbeitsbereiche

Die einzelnen Arbeitsbereiche von KLIWA umfassen jeweils eine Reihe von Teilprojekten; diese werden im Einklang mit dem Vorgehenskonzept, nach dem aktuellen Kenntnisstand sowie den weiteren Fragestellungen und Bearbeitungsmöglichkeiten regelmäßig weiterentwickelt und angepasst. Bei der Fortschreibung wird darauf geachtet, dass die einzelnen Untersuchungsprojekte der Arbeitsbereiche fachlich aufeinander abgestimmt sind. Nachstehend werden die Zielsetzungen der einzelnen Bereiche, der bisher erreichte Bearbeitungsstand sowie die anstehenden Untersuchungen in Kürze dargestellt. Einzelne wichtige Ergebnisse sind dabei exemplarisch durch Abbildungen hervorgehoben; ausführliche fachliche Erläuterungen der zuletzt bearbeitenden Fragestellungen und erzielten Ergebnisse enthalten die einzelnen KLIWA-Fachbeiträge, die im Rahmen des Symposiums präsentiert werden.

#### 3.1 Der Blick zurück - Langzeitverhalten von Messzeitreihen

##### 3.1.1 Basisauswertung von Klimavariablen und Wasserhaushaltsgrößen (Bereich A)

Die Ermittlung der Variabilität und der eventuellen trendhaften Veränderung von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen in den vergangenen Jahrzehnten ist eine wesentliche fachliche Basis für alle weiteren Untersuchungen und für Vergleichsbetrachtungen. Dazu waren lange Messzeitreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Kenngrößen hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens statistisch zu analysieren. Die interessierenden Einflussgrößen zum Wasserkreislauf sind in Abbildung 2 zusammengefasst dargestellt. Für repräsentative Aussagen wurden möglichst viele Zeitreihen herangezogen; ein Auswahlkriterium war außerdem, dass die Messungen möglichst über einen längeren Zeitraum und in plausibler Güte vorliegen. Die berücksichtigte Zeitreihenlänge für die Basisauswertung, die auch als Referenz für nachfolgende Veränderungen dient, ist bei KLIWA üblicherweise 1931(bzw.1951)-2000; vereinzelt mussten hilfsweise auch kürzere Messreihen herangezogen werden.

Die Analyse dieser langen Messzeitreihen liefert die Grundlage zur Beschreibung des Wasserhaushaltes unter den bisherigen Klimaverhältnissen. Sie gibt einmal Aufschluss über die zeitliche Variabilität, d. h. über vorhandene natürliche Schwankungen sowie über eventuelle systematische Veränderungen (Trends), und darüber hinaus über die Bandbreite der bisherigen Veränderungen. Weiterhin erhält man auch Aussagen über die räumliche Variabilität der untersuchten Kenngrößen, d. h. über die spezifischen Verhältnisse in den einzelnen Teilgebieten, die stark von den topographischen Randbedingungen beeinflusst sind.

Die Basisauswertungen zu den (quantitativen) Wasserhaushaltsgrößen sind zum größten Teil abgeschlossen. Für die betrachteten Kenngrößen wurden zumeist deutliche Klimaänderungssignale ermittelt, die bestätigen, dass der Klimawandel auch bei uns in Süddeutschland bereits im Gange ist. Dies gilt insbesondere für die mittleren Jahrestemperaturen, teilweise für verschiedene mittlere Monatstemperaturen und für das Verhalten der mittleren Halbjahresniederschläge mit den innerjährlichen Verschiebungen. Auch die Jahresserien der jährlichen Höchstabflüsse an den Pegeln in Süddeutschland zeigen in der Mehrzahl deutliche Zunahmen. Die Ergebnisse zu den untersuchten Kenngrößen sind in verschiedenen, bisher 18 KLIWA-Heften veröffentlicht. Eine Fortschreibung der Betrachtung ausgewählter Kenngrößen findet mit dem Klimamonitoring von KLIWA statt.

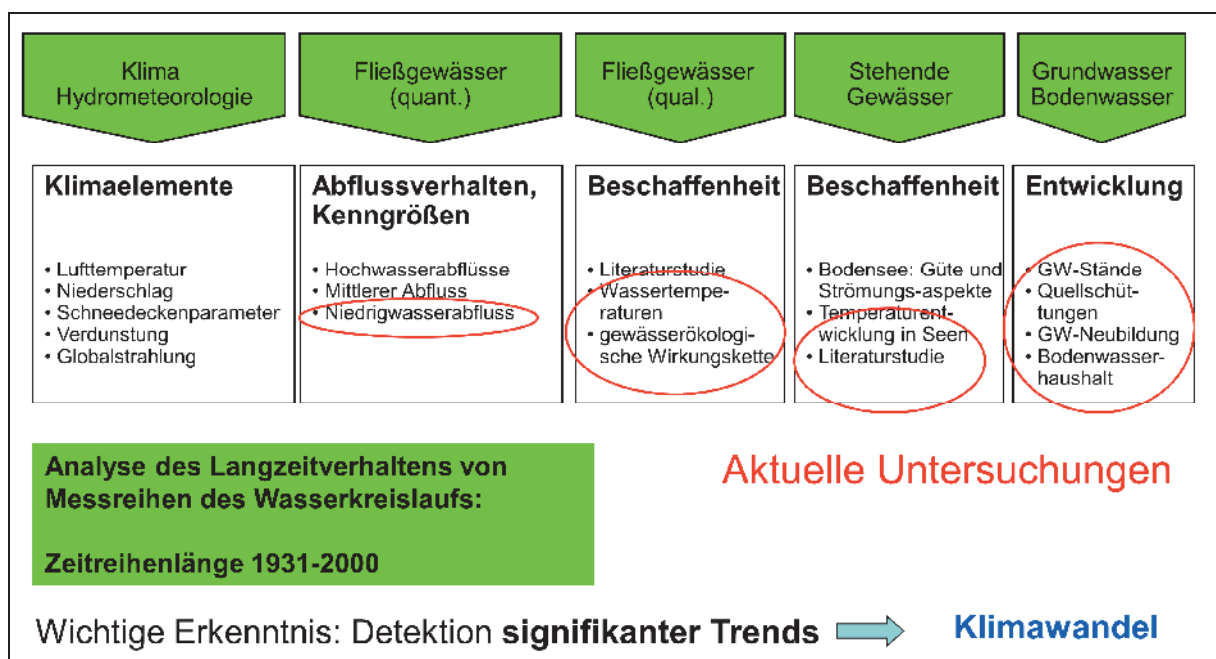


Abb. 2: Einflussgrößen zum Wasserhaushalt - Ermittlung bisheriger Veränderungen bis 2000

Aktuelle bzw. konzipierte Untersuchungen widmen sich verstärkt der Frage, inwieweit auch Änderungen der Beschaffenheit der stehenden und fließenden Gewässer bereits feststellbar sind. Dies betrifft die Fließgewässerqualität einschließlich der Wassertemperatur sowie der Niedrigwasserperioden, die Temperaturentwicklung in Seen und den damit verknüpften Stoffhaushalt und schließlich die Langzeitentwicklung der Grund- und Bodenwasserverhältnisse. Diese Fragestellungen sind auch in engem Zusammenhang mit der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie zu sehen.

Die vorhandenen Messungen der hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen und die Auswertung ihres statistischen Verhaltens stellen wichtige Eckwerte und Randbedingungen für Szenarienrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen dar.



### 3.1.2 Monitoring zur Erfassung fortschreitender Veränderungen (Bereich C)

Mit den grundlegenden Untersuchungen zum Langzeitverhalten sind zunächst retrospektiv die geeigneten hydro(meteoro)logischen Messzeitreihen dahingehend analysiert worden, ob bereits nachweisbare Klimaänderungssignale statistisch detektierbar sind. Diese Basisauswertungen konnten dabei zunächst nur die Messzeitreihen bis zum Jahr 2000 berücksichtigen. Mit einem Klimamonitoring sollen aktuelle Veränderungen des regionalen Klimas und Wasserhaushalts im Vergleich zu und in Fortführung der ersten Langzeituntersuchungen regelmäßig zeitnah erfasst und bewertet werden. Dieses Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland, das auf einem „integrierten Messnetz KLIWA“ mit ausgewählten Messstationen des DWD und der beteiligten Bundesländer aufsetzt, gewährleistet damit ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen. Dadurch können die relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung in regelmäßigen Abständen zeitnah für das Gebiet der KLIWA-Partner erfasst werden. Die Informationen zum Klima von Deutschland und Europa, die z. B. der DWD im jährlichen Klimastatusbericht publiziert, werden so regional ergänzt und verfeinert aufbereitet.

Der erste Bericht zum Klimamonitoring umfasste die bis 2005 verlängerten ausgewählten KLIWA-Messreihen, die für Baden-Württemberg und Bayern auszuwerten waren. Im zweiten Monitoringbericht, der 2011 unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht wurde, sind die wesentlichen Ergebnisse der aktualisierten Auswertungen für das Gebiet der drei beteiligten Bundesländer dargestellt. Wesentliche Ergebnisse des ersten Monitoringberichts waren eine Verstärkung der Trends für den Temperaturanstieg sowie der Niederschlagszunahmen im Winterhalbjahr und mehrheitlich der Zunahme der Hochwasserabflüsse im gleichen Zeitraum; der zweite Monitoringbericht hat diese Tendenzen deutlich bestätigt. Die Ergebnisse unterstreichen die Wichtigkeit von Messnetzen und deren regelmäßige und zeitnahe Auswertung im Rahmen eines Monitorings. Die Abbildung 3 zeigt ein exemplarisches Ergebnis für die Veränderung des mittleren halbjährlichen Gebietsniederschlags. Hervorzuheben ist, dass mit diesen Auswertergebnissen in allgemein verständlicher Weise die Auswirkungen des regionalen Klimawandels vermittelbar werden, da es sich um konkrete Messungen, also Fakten handelt.

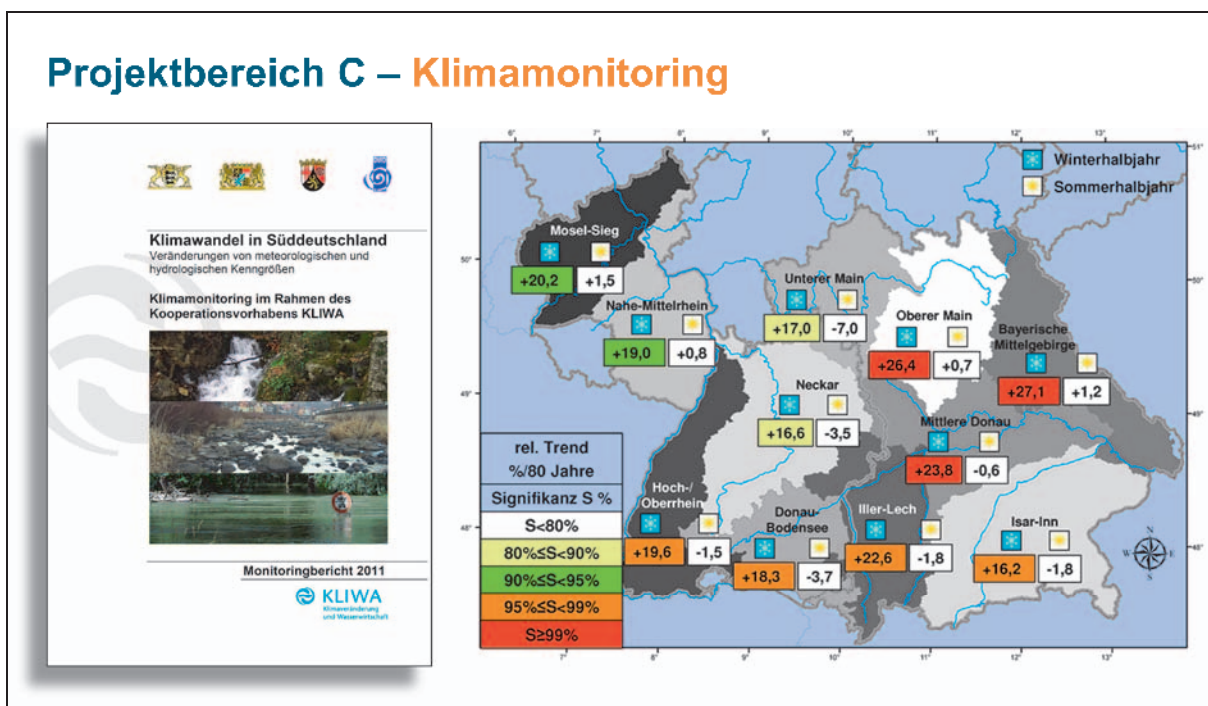


Abb. 3: Entwicklung der mittleren Gebietsniederschlagshöhen für die hydrologischen Halbjahre: linearer Trend im Zeitraum 1931-2010 als Änderung (in % / 80 a) des Mittelwerts 1931/2010



### 3.2 Der Blick in die Zukunft - Abschätzungen mit Szenario-Simulationen

Mit den Untersuchungen des Projektbereichs B wird versucht, eine Vorstellung des möglichen Wasserhaushalts der Zukunft zu erhalten. Aufgrund pragmatischer wasserwirtschaftlicher Überlegungen wird dafür vorrangig der Zeitraum 2021-2050 als die nahe Zukunft betrachtet, daneben aber auch als die fernere Zukunft noch die Zeit bis 2100 gesehen. Der mögliche Klimawandel mit seinen Auswirkungen auf den Wasserkreislauf wird durch Emissionsszenarien und die Klimaprojektionen von globalen Klimamodellen vorgegeben. Diese globalen Projektionen sind über geeignete Verfahren zu regionalisieren, um räumlich verfeinerte Datensätze und damit konkretere Aussagen für den Süden Bayerns zu erhalten. Die regionalisierten Klimaprojektionen sind der notwendige Input, um mit einem hydrologischen Modell das künftige Abflusskontinuum an ausgewählten Pegelstellen simulieren zu können. Abbildung 4 verdeutlicht die notwendige Modellabfolge. Es muss hier aber angemerkt werden, dass derzeit und wohl auch für künftige Jahre weiterhin eine große wissenschaftliche Herausforderung für die weltweite Klimaforschung darin besteht, verbesserte regionale Klimaprojektionen zu erzeugen; dies gilt insbesondere für die dynamischen Klimaprojektionen, die bisher noch regelmäßig bei der Simulation der Gegenwart deutliche Abweichungen vom mittleren (gemessenen) Referenzklima aufweisen. Gleichwohl sind aber zielgerichtet Szenarienrechnungen zur Abschätzung der künftigen Entwicklung in den süddeutschen Flussgebieten möglich, um so Klimaänderungssignale entsprechend dem derzeitigen Wissensstand detektieren zu können. Die Vorgehensweise, eine Abfolge von Modellierungsschritten (Modellkette), ist nachstehend schematisch aufgezeigt.

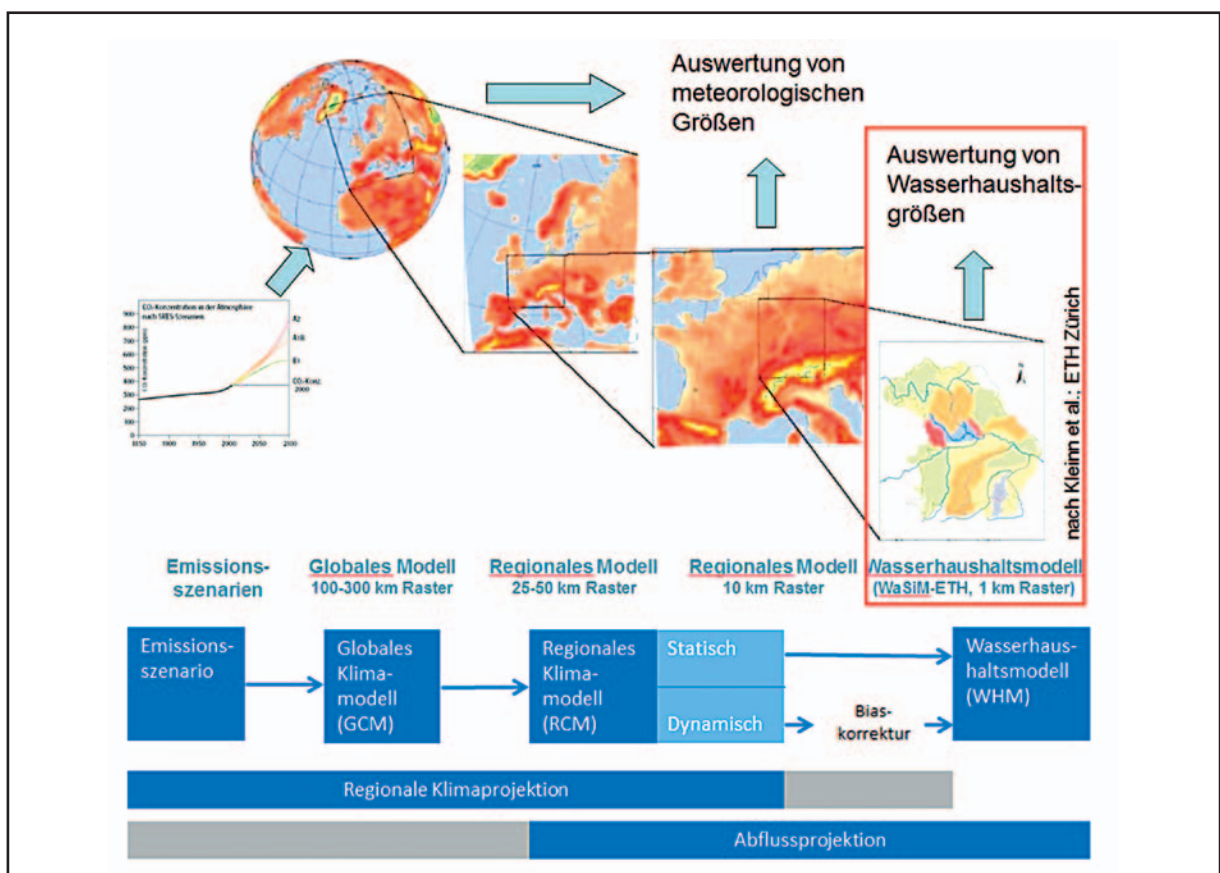


Abb. 4: Abschätzung der Klimawandelauswirkungen auf den Wasserhaushalt über eine Modellkette – Schematische Darstellung der Vorgehensweise

### 3.2.1 Abschätzung der regionalen Klimaentwicklung – regionale Klimaprojektionen

Nachdem zu Beginn des Vorhabens KLIWA für Süddeutschland noch keine geeigneten regionalen Klimaszenarien für die wasserwirtschaftliche Wirkungsmodellierung zur Verfügung standen, wurden zunächst auf der Basis des Globalmodells ECHAM4 für das Emissionsszenario B2 regionale Klimaprojektionen mit drei unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren als Ensemble-Ansatz entwickelt und anschließend mit Hilfe einer regionsspezifischen Auswertung vergleichend bewertet. Die betrachteten Simulationszeiträume der Klimaprojektionen umfassten die Perioden 1971-2000 und 2021-2050. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in KLIWA-Heft 9 dargestellt. Die nach Plausibilitätsaspekten ausgewählte Klimaprojektion diente bei KLIWA für die ersten Wasserhaushaltssimulationen.

Seit 2007 stehen eine ganze Reihe neuerer regionaler Klimaprojektionen für Deutschland basierend auf dem Globalmodell ECHAM5 zur Verfügung, die teilweise in KLIWA untersucht und für weitere Wasserhaushaltssimulationen bewertet wurden; exemplarisch seien hier die statistischen Klimaprojektionen mit den verschiedenen Varianten des WETTREG-Verfahrens genannt. Hinzu kamen regionale dynamische Klimaprojektionen, die über zwei umfangreiche EG-Forschungsprojekte nach und nach verfügbar waren. KLIWA hat sich hier zuletzt vor allem mit den COSMOCLM-Projektionen befasst. Die durchgeführten Auswertungen unterschiedlicher Regionalprojektionen verdeutlichten, dass die verschiedenen Klimaszenarien eine Bandbreite der möglichen Klimaveränderung und damit unterschiedliche Klimaänderungssignale aufzeigen; dies muss bei zukünftigen Aussagen berücksichtigt werden. Generell aber lässt sich folgern, dass künftig die Winterhalbjahre feuchter, die Sommerhalbjahre dagegen trockener werden; beispielhaft ist dies in Abbildung 5 mit einer flächenhaften Auswertung einer Klimaprojektionen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet gezeigt. Die nachfolgende Umsetzung ausgewählter Klimaprojektionen in Abflusszeitreihen mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen steht bei den Untersuchungen im Rahmen von KLIWA am Ende der Modellkette, letztlich aber fachlich im Vordergrund.

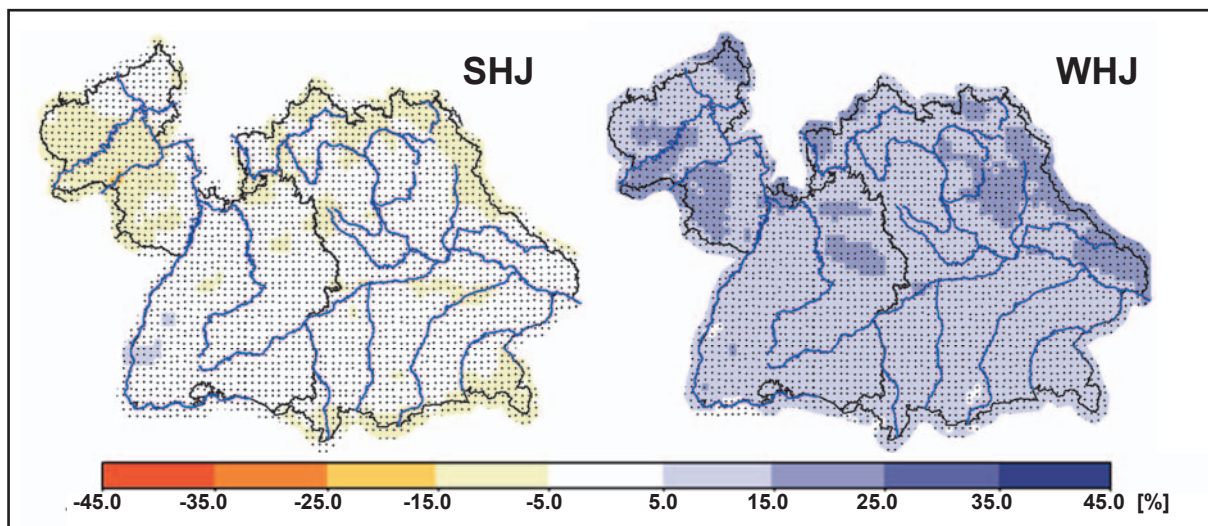


Abb. 5: Auswertung der regionalen Klimaprojektion COSMOCLM 4.8, Lauf 1 - Änderungssignal: projizierte Änderung der mittleren Halbjahresniederschläge zwischen den Zeiträumen 2021-2050 (nahe Zukunft) und 1971-2000 (Referenzzeit)

### 3.2.2 Abschätzung der Änderungen des Wasserhaushalts - Abflussprojektionen

Die künftigen Veränderungen im Wasserkreislauf von Flussgebieten können mit Simulationsrechnungen abgeschätzt werden. Wasserhaushaltsmodelle beschreiben und quantifizieren die räumliche und zeitliche Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten in den jeweiligen Flussgebieten. Sie simulieren Abflussganglinien für den Projektions- und Referenzzeitraum

an den festgelegten Pegelstandorten und ermöglichen damit quantitative Aussagen zu statistischen Abflusskennwerten (z. B. Niedrig-, Mittel-, Hochwasser), zur Verdunstung und zur flächenhaften Grundwasserneubildung. In Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz wird für die Simulation von Wasserhaushalt und Abfluss das Modell LARSIM, in Bayern das Modell WaSiM-ETH eingesetzt. Beide Wasserhaushaltsmodelle sind für die einzelnen Flussgebiete rasterbezogen implementiert; die räumliche Auflösung ist üblicherweise 1 x 1 km, die Abflussreihen werden aus Tageswerten errechnet. Erwähnt werden muss, dass die Aufstellung der flussgebietsbezogenen Wasserhaushaltsmodelle sehr aufwendig war und auch Weiterentwicklungen notwendig sind.

Zur Abschätzung der Veränderungen der flächenhaften Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag wurde für das KLIWA-Untersuchungsgebiet einheitlich das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BWH genutzt. Die berechneten Verhältnisse für den Referenzzeitraum 1971-2000 und eine simulierte Veränderung der möglichen Entwicklung für die nahe Zukunft sind aus Abbildung 6 ersichtlich. Die bisherigen Simulationsrechnungen auf Grundlage von WETTREG-2006/A1B lassen nur geringe mittlere Abweichungen bei der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserneubildung bis 2050 erwarten. Diese Ergebnisaussage wird für die Grundwasserproblematik mit Hilfe von Pilotuntersuchungen für eine Reihe sensibler Grundwassergebiete verfeinert, um daraus gebietsbezogene Handlungsempfehlungen ableiten zu können. Die Fragestellung „Veränderung der GWN“ ist weiterhin mit anderen Regionalprojektionen zu untersuchen. Die Ergebnisse aus verschiedenen Fallstudien sind in nachfolgenden Beiträgen ausführlich dargestellt.

In KLIWA wurden für die Abflusssimulationen bisher vorrangig statistische Klimaprojektionen herangezogen. Erst seit rund drei Jahren finden zur Abschätzung von zukünftigen Änderungen mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen auch dynamische Klimaprojektionen als Modellantrieb Verwendung; eine Voraussetzung dafür ist die zufriedenstellende Lösung der Bias-Problematik der Klimaantriebsgrößen für die Wasserhaushaltsmodellierung; so hat sich beispielsweise kürzlich bei bayerischen Modellierungsarbeiten herausgestellt, dass neben den Klimavariablen Lufttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung auch die relative Luftfeuchte zu korrigieren ist, um mit dem WH-Modell WASIM plausible Simulationsergebnisse zu erhalten.

Der Schwerpunkt der Auswertung der Abflusssimulationen mit den ausgewählten Klimaprojektionen war in den zurückliegenden Jahren zunächst das Verhalten bzw. die Veränderung der Hochwasserabflüsse; diesbezüglich konnten auch bereits entsprechende wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Ausgelöst durch den Hitzesommer 2003, aber auch weitere kurzzeitige Niedrigwasserperioden wie 2006 in verschiedenen Flussgebieten ist die mögliche Veränderung der Niedrigwasserverhältnisse infolge des Klimawandels bei KLIWA ein neuer Untersuchungsschwerpunkt geworden. Inzwischen liegen auch Ergebnisse für Niedrigwasserabflüsse aufgrund von Klimaprojektionen bis 2050 vor. Auswertungen zeigen, dass bezogen auf den Jahresgang der durchschnittlichen monatlichen Niedrigwasserabflüsse, im Sommer in den meisten bisher modellierten Flussgebieten ein deutlicher Rückgang der Monatsmittel des Niedrigwasserabflusses festgestellt werden kann. Weiterhin ergeben sich vielfach auch Hinweise auf eine längere Andauer der abflussschwachen Perioden.



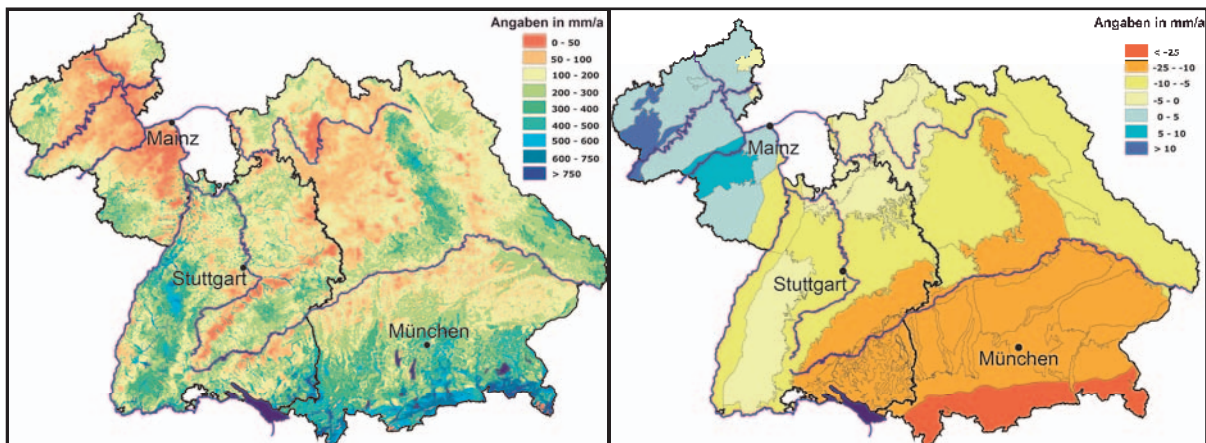


Abb. 6: Mittlere jährliche Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Zeitraum 1971-2000 (links) - Veränderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag in der Zukunft (2021-2050) im Vergleich zu heute (1971-2000) unter den Verhältnissen der Klimaprojektion WETTREG2006/A1B (rechts)

### 3.2.3 Weitere Untersuchungen

Im Projektbereich B sind noch weitere Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels vorgesehen. Orientierende Untersuchungen zum Einfluss der Vegetationsänderung (Phänologie) sowie eine erste Machbarkeitsstudie zu Ermittlung der Bodenerosion unter Berücksichtigung des Klimawandels wurden bereits exemplarisch durchgeführt. Letztere hatte im Rahmen des Bodenschutzes die Konzeption weiterer Untersuchungen zum Ziel: es sollen die Auswirkungen auf den Bodenabtrag vor dem Hintergrund erhöhter bzw. intensiverer Niederschläge betrachtet werden. Untersuchungen zur möglichen Veränderung der Wassertemperaturen und zu den Auswirkungen auf den ökologischen Zustand der Fließgewässer sowie der Seen infolge zunehmender Wärmebelastung sind konzipiert und teilweise auch schon in Bearbeitung.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die Frage nach einer Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen kurzer Dauer, die überwiegend kleinräumig auftreten. Dazu liegen aber bisher kaum längere Messzeitreihen vor, so dass fundierte, auf Messungen basierende Aussagen schwierig sind. Verschiedene Auswertergebnisse aus KLIWA haben aber den DWD schon veranlasst, den KOSTRA-Atlas als Bemessungsgrundlage für wasserbauliche Anlagen zu aktualisieren. Für die künftige Entwicklung können regionale Klimaprojektionen modellbedingt hier bisher nur sehr eingeschränkt weiterhelfen, so dass neue Methoden erarbeitet werden müssen.

## 3.3 Bereich D – Anpassung wasserwirtschaftlichen Handelns

Basierend auf den Erkenntnissen über Ausmaß und Auswirkungen des regionalen Klimawandels auf den Wasserhaushalt werden im Projektbereich D die Anfälligkeit der bestehenden wasserwirtschaftlichen Infrastrukturen und die mögliche Beeinträchtigung der wasserwirtschaftlichen Nutz- und Schutzfunktionen untersucht. Zur Abminderung negativer Auswirkungen sollen daraus in fachlicher Abstimmung Handlungsempfehlungen für sachgerechte Anpassungsmaßnahmen entwickelt werden. Einen Überblick über die in KLIWA zu betrachtenden wasserwirtschaftlichen Nutz- und Schutzfunktionen zeigt Abbildung 7.

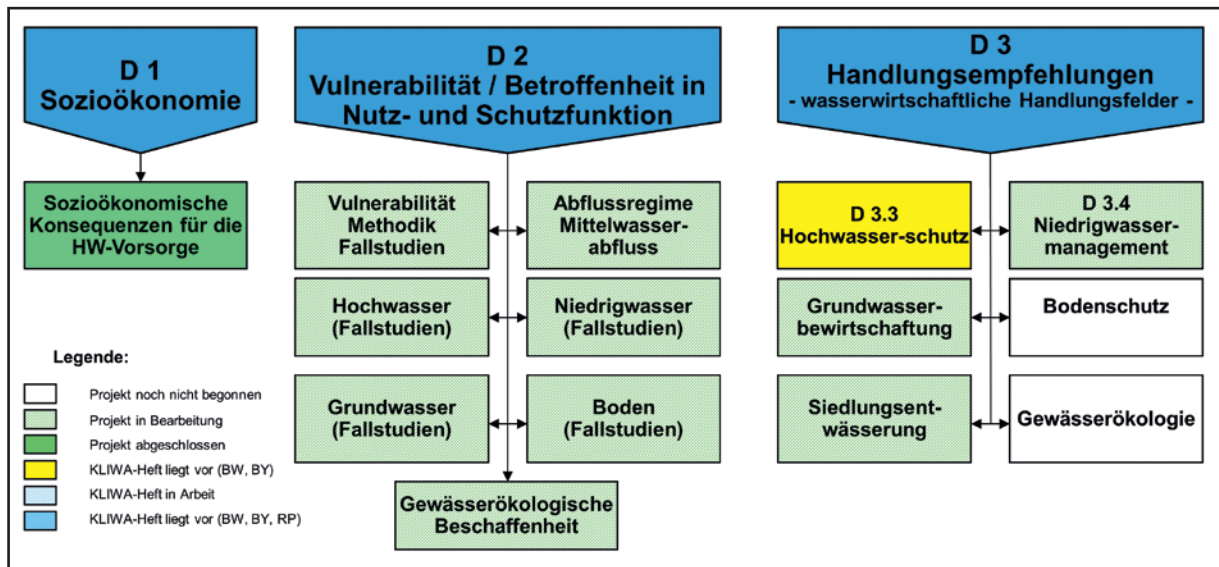


Abb. 7: Projektbereich D –Ableitung von Handlungsempfehlungen für die wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder zur Anpassung

### Hochwasserschutz

Die Abflusssimulationen unter Berücksichtigung des Klimawandels sind bei KLIWA zunächst vorrangig hinsichtlich der Auswirkungen für den Hochwasserschutz analysiert worden. Ein exemplarisches Ergebnis ist in Abbildung 8 für den Pegel Wolfsmünster an der Fränkischen Saale gezeigt: die Auswertungen der Abflussmodellierung mit der Klimaprojektion WETTREG-2003/B2 lassen eine deutliche Zunahme der Hochwasserabflüsse, besonders für die Ereignisse niedriger Jährlichkeit erwarten. Der Grund für die eingehenden Betrachtungen für den Hochwasserschutz waren die in den zurückliegenden zwei Jahrzehnten (scheinbar) gehäuft aufgetretenen großen Hochwasser, die erhebliche wirtschaftliche Schäden zur Folge hatten. Dazu sollten die Untersuchungen eine systematische Analyse der sozioökonomischen Konsequenzen liefern, die Vulnerabilität des Hochwasserschutzes beleuchten und auf dieser Basis zur Entwicklung angepasster, längerfristiger Handlungskonzepte beitragen. Eine konkrete Anpassungsmaßnahme ist hier die erstmalige Einführung des Lastfalls „Klimawandel“ bei der Planung von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen und eines konkreten Klimazuschlagsfaktors auf die statistischen Bemessungsabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern; Abbildung 8b verdeutlicht den Klimaänderungsfaktor. Dieses Vorgehen trägt bereits jetzt dem Vorsorgegedanken Rechnung und erhöht für neue Hochwasserschutzanlagen den Sicherheitsgrad. Insofern ist diese Anpassungsstrategie zukunftsweisend.

### Niedrigwassermanagement

Die bisherigen Auswertungen einzelner Abflussprojektionen lieferten Hinweise, dass sich die Niedrigwasserverhältnisse in verschiedenen Flussgebieten hinsichtlich Niedrigabfluss und Andauer künftig verschärfen dürften. Diese Veränderungen im Abflussregime wirken auf die Gewässerökologie und auch infrastrukturelle Anlagen zur Wassernutzung künftig zeitweilig nachteilig ein. Abhängig von der jeweiligen Vulnerabilität ist im Einzelfall von erheblichen sozioökonomischen Konsequenzen auszugehen; dies gilt insbesondere im Fall von längeren Trockenperioden, die auch in Süddeutschland häufiger auftreten dürften.

Daher liegt ein derzeitiger Schwerpunkt der Untersuchungen von KLIWA auf der Prüfung und ggf. Ableitung von Handlungsempfehlungen in Abhängigkeit von den Erkenntnissen zur langfristigen Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse und der flächenhaften Grundwasserneubildung.

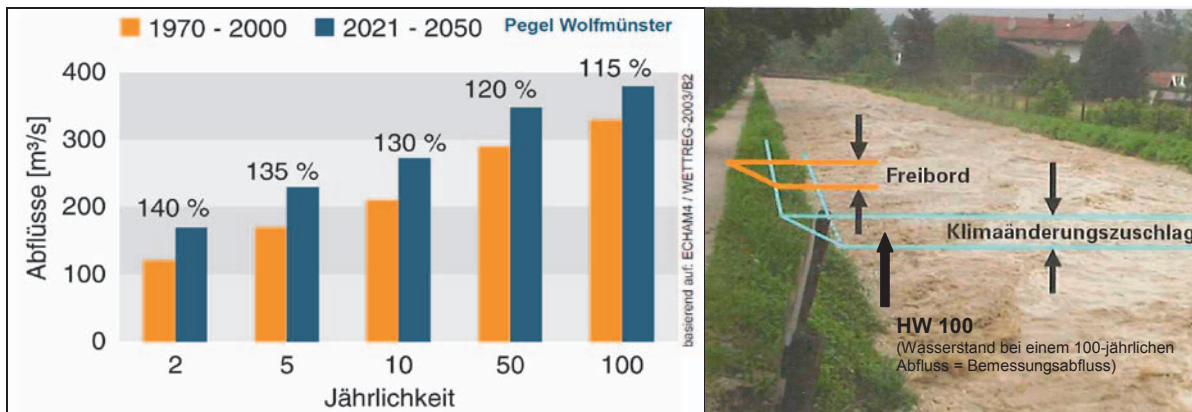


Abb. 8: Links: Zukünftig mögliche Veränderung der Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten am Pegel Wolfmünster/Fränk. Saale; rechts: Schematische Verdeutlichung des Klimaänderungsfaktors - Zuschlag auf ein hundertjähriges Hochwasser zur vorsorglichen Berücksichtigung einer HW-Verschärfung infolge des Klimawandels

## Wasserversorgung

Obwohl die bisherigen Simulationsrechnungen für Süddeutschland insgesamt noch keine ausgeprägten Änderungen der mittleren Grundwasserneubildung zeigen, können lokal dennoch temporär Engpässe bei den Grundwasserressourcen bei längeren Trockenperioden auftreten. Dies bedeutet, dass es sinnvoll sein wird, in der Folge für die Wasserversorgung möglichst redundante Versorgungseinrichtungen aufzubauen, um die Versorgungssicherheit auch bei künftigen Trockenperioden, die mutmaßlich zunehmen werden, zu gewährleisten. Für eine zukunftssichere Wasserbereitstellung sind weiterhin großräumige Versorgungsunternehmen vielfach unverzichtbar; als Beispiel aus Bayern sei hier das Nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem erwähnt, von dessen Leistungsfähigkeit auch kleinere örtliche Unternehmen profitieren. Zu berücksichtigen ist außerdem, dass der Wasserbedarf in längeren und wärmeren Trockenphasen zunehmen wird. Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserressourcen in besonders sensiblen Gebieten werden daher in Fallstudien konkret vertieft untersucht.

## Gewässerschutz

Im Gewässerschutzbereich ergibt sich in Folge des Klimawandels sicherlich ein Anpassungsbedarf in der Kanal- und Kläranlagenplanung, da von einer Zunahme der Intensität von Starkregen auszugehen ist. Die Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen muss sich verändernden Niederschlagsverhältnissen anpassen; dies kann zum Beispiel eine sachgerechte Modifizierung für die Regenwasserableitung auf Grund zunehmender Starkregenereignisse sein. Andererseits kann auch die Beaufschlagung von Kläranlagen in Zukunft eine erhöhte Variabilität aufweisen, bedingt durch ausgedehntere Trocken-/Niedrigwasserperioden sowie durch ein verändertes Verbraucherverhalten. Dies kann insgesamt notwendige Anpassungen in der abwassertechnischen Infrastruktur und der Abwasserreinigung zweckmäßig machen.

## Großräumige Gewässerbewirtschaftung

In verschiedenen Flussgebieten sind in der Vergangenheit vielfach wasserbauliche Anlagen errichtet worden, um die Gewässer mit bestimmten Zielrichtungen bewirtschaften zu können. Es sei hier besonders auf Talsperren und Rückhaltebecken, aber auch GewässerAusleitungen hingewiesen, um ungünstige natürliche Abflussverhältnisse abzumildern. Neben der Hochwasserrückhaltung haben hier insbesondere die Niedrigwasseraufhöhung und die Wasserkraftnutzung eine besondere Bedeutung. Diese dazu errichteten Anlagen werden

nach bestimmten Reglements bewirtschaftet, die auf den bekannten Abflussverhältnissen aufsetzen. Die Abflussregime der Fließgewässer dürften sich in der Zukunft deutlich ändern, insbesondere wegen der Verschiebungen im Niederschlagsverhalten mit zunehmenden Winterniederschlägen verbunden mit geringerem Schneerückhalt und abnehmenden mittleren Sommerniederschlägen.

Die Untersuchung der Klimawandelauswirkungen auf die großräumige Bewirtschaftung von Flussgebieten in der Zukunft stellt eine besondere Herausforderung dar, mit der sich die KLIWA-Partner ebenfalls auseinandersetzen müssen. Diese Thematik wird zweckmäßigerweise für einzelne betroffene Flussgebiete im Rahmen wissenschaftlicher Pilotstudien in den einzelnen Ländern ergänzend zu den KLIWA-Aktivitäten behandelt. Beispielhaft sei hier aus Bayern das Vorhaben „Klimawandel und Flussgebietsmanagement“ erwähnt, mit dem die Überleitung von Altmühl- und Donauwasser in das Regnitz-Maingebiet sowie die Bewirtschaftung der Oberen Isar derzeit unter den künftigen Randbedingungen des Klimawandels untersucht werden.

### **Verbesserung des Kenntnisstandes**

Für ein gesellschaftspolitisch angepasstes Handeln im Sinne des Vorsorgeprinzips sind fundierte Informationen über mögliche Folgewirkungen von zentraler Bedeutung. Erst die Kenntnis von Art und Umfang dieser Folgen der Klimaveränderung macht die Entwicklung nachhaltiger und integraler wasserwirtschaftlicher Vorsorge-Konzepte und ihre angepasste Umsetzung für die Gesellschaft vermittelbar. Die angesprochenen Untersuchungen zu den Schwerpunkten Hochwasser, Niedrigwasser und Grundwasser müssen daher fortgeführt und bei Bedarf mit Fallstudien vertieft werden, um verbesserte Erkenntnisse für Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen zu erhalten. Die Weiterentwicklung der für diese Betrachtungen notwendigen Klimaprojektionen wird fortlaufend beobachtet, neue Klimaprojektionen hinsichtlich der Verwendbarkeit für die Klimafolgenmodellierung in KLIWA untersucht und gegebenenfalls in die Auswertungen mit einbezogen. Die mit der Klimafolgenmodellierung verbundenen Unsicherheiten in der Modellkette und resultierende Bandbreiten werden zukünftig in KLIWA eine stärkere Berücksichtigung finden müssen.

### **3.5 Bereich Ö – Öffentlichkeitsarbeit**

Ziel des Vorhabens KLIWA war es von Beginn an, die interessierte Öffentlichkeit, die Fachwelt und die politischen Verantwortlichen über das Vorhaben sowie seine Ziele und Ergebnisse regelmäßig zu informieren. Durch die zunächst zunehmende Wahrnehmung der Problematik des Klimawandels seit dem 4. Sachstandsbericht des IPCC (ab 2007) durch die Öffentlichkeit bestand und besteht weiterhin ein großes Informationsbedürfnis, auch wenn in letzter Zeit die Thematik medial und politisch durch andere gesellschaftliche Fragen überlagert wurde; dies dürfte aber nur vorübergehend sein, da sich die Problematik des Klimawandels weltweit zunehmend verschärfen dürfte. Mit seiner Öffentlichkeitsarbeit will KLIWA neben der nachvollziehbaren Darstellung der Ergebnisse aber vor allem auch das Problembewusstsein wecken. Dies wird als Voraussetzung für die Umsetzung notwendiger Anpassungsmaßnahmen wie auch für die Akzeptanz des Klimaschutzes gesehen. Einen Überblick der Teilprojekte gibt Abbildung 9.



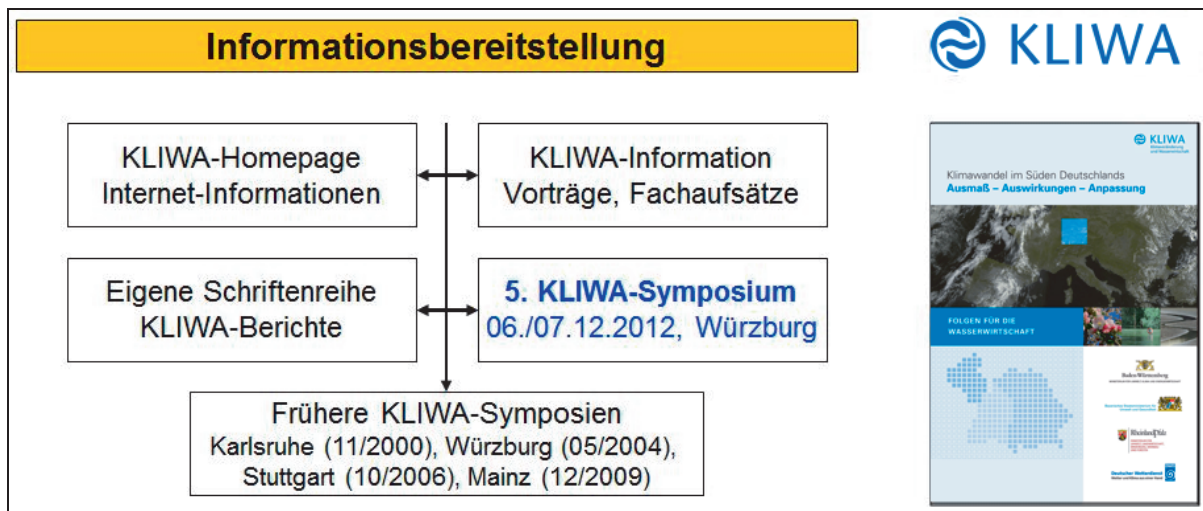


Abb. 9: Projektbereich Ö – Aktivitäten im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit von KLIWA

Die verschiedenen Möglichkeiten wie Internet, Presse, Fachzeitschriften, Verwaltungsberichte sowie Fachkolloquien und Workshops werden bisher bereits ausführlich genutzt, um über das Kooperationsvorhaben KLIWA und seine Teilergebnisse zu informieren. Besonders hervorzuheben sind die alle 2-3 Jahre stattfindenden wissenschaftlichen Symposien, die KLIWA-Broschüren sowie die Veröffentlichung der Arbeitsergebnisse mit den KLIWA-Heften in einer eigenen Fachschriftenreihe. Das Kooperationsvorhaben präsentiert sich ebenfalls im Internet unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de), dort werden die Untersuchungsergebnisse von KLIWA umfassend dokumentiert sowie allgemeine Informationen zu KLIWA zugänglich gemacht. Dieses Informationsangebot wird laufend fortgeschrieben. Die neu aufgelegte KLIWA-Broschüre „Klimawandel im Süden Deutschlands – Ausmaß, Auswirkungen, Anpassung“ ist hierfür sicherlich ein gutes Beispiel, mit dem interessierte Bürgerinnen und Bürger objektiv und ohne Panikmache über den Wissensstand zum Klimawandel und seinen Auswirkungen bei uns informiert werden sollen.

#### 4 Ausblick

Der Klimawandel als globale Erscheinung betrifft die Menschheit in ihrer Gesamtheit. Auch der Süden Deutschlands ist in vielen Bereichen und Sektoren davon nicht ausgenommen. Dem Wasser als einer unverzichtbaren Lebensgrundlage kommt hier eine fundamentale Bedeutung zu. In KLIWA stehen daher die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen bezüglich der Veränderungen des Wasserhaushalts unter Einfluss des Klimawandels im Vordergrund. Zur Betrachtung der hydrologischen Kenngrößen für Untersuchungen zum Hochwasser, Niedrigwasser und Grundwasser sind dabei die regionalen Klimaprojektionen, wesentliche Ergebnisse der globalen Klimaforschung, als eine wichtige Randbedingung selbst von entscheidender Bedeutung.

Während der letzten zehn Jahre haben sich die Kenntnisse zum globalen und regionalen Klimawandel erheblich erweitert und auch die zugrunde liegenden Klimaprojektionen sowie die damit verbundenen verfügbaren Daten selbst vervielfacht. Dieser Entwicklung muss auch KLIWA Rechnung tragen und der Nutzung weiterer globaler sowie regionaler Klimaprojektionen offen gegenüber stehen. KLIWA wird weiterhin, soweit möglich, mit Beiträgen aus der Erfahrung der Impactmodellierung auf eine Verbesserung der Klimamodelle hinwirken. Eine zunehmende Herausforderung in KLIWA wird damit sein: einerseits der Umgang mit den vorhandenen Ergebnisbandbreiten (siehe dazu Abb. 10), die Ausdruck der Unsicherheiten in den jeweiligen Modellketten sind, andererseits das Erarbeiten von konkreten Aussagen trotz

der Unterschiede aus verschiedenen Klimaprojektionen. Auch für eine nachvollziehbare Darstellung und Kommunikation dieser Ergebnisse für die unterschiedlichen Entscheidungsträger, aber auch die Öffentlichkeit müssen sachgerechte Wege und Mittel gefunden werden.

Die Quantifizierung der künftig zu erwartenden Änderungen der hydrologischen Grundlagendaten infolge des Klimawandels als Voraussetzung für konkrete Anpassungsmaßnahmen wird weiterhin hochkomplex bleiben, auch wenn die Wissenschaft und Forschung im Verstehen der Wechselwirkungen und des Einflusses des Weltklimas sowie bei der Modellierung dieser Naturvorgänge auf den unterschiedlichen Skalen ständig weitere Fortschritte erzielt. Im Rahmen weiterer Untersuchungen sind daher auch die bisher in KLIWA in den verschiedenen Arbeitsbereichen verwendeten Methoden einer regelmäßigen Überprüfung zu unterziehen und neue Erkenntnisse zu berücksichtigen.

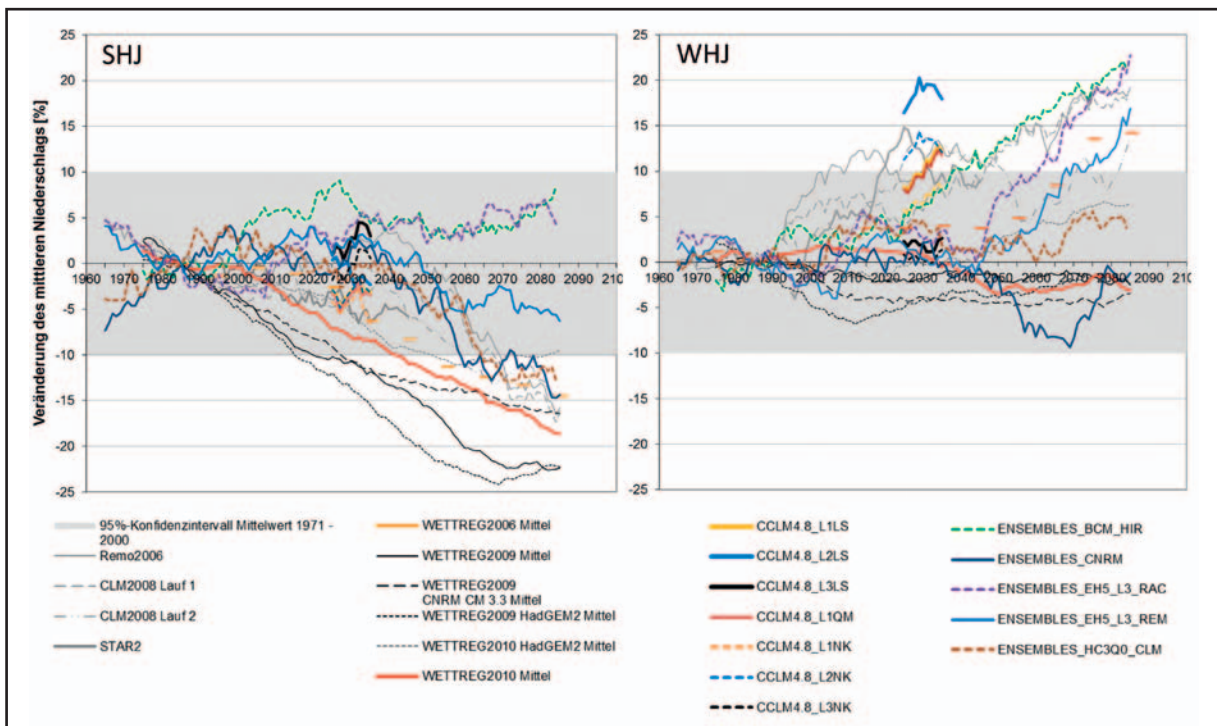


Abb. 10: Vergleichende Auswertung von regionalen Klimaprojektionen für Bayern – Änderungssignale der mittleren Halbjahresniederschläge (30 jähriges gleitendes Mittel) bezogen auf die Referenzperiode 1971-2000

Die bereits bestehenden Kenntnisse aus den jüngsten Untersuchungen zu Niedrigwasser und der Grundwasserneubildung durch die bisherigen Wirkungsmodellierungen sollen vertieft sowie die Vulnerabilität der betrachteten Systeme eingehend analysiert werden. Eine für KLIWA geeignete allgemein verwendbare Methodik zur Vulnerabilitätsabschätzung sollte entwickelt und zielgerichtet angewandt werden. Nur mit fundierten Aussagen lassen sich die benötigten wirksamen Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen für die Zukunft erarbeiten. Unter Berücksichtigung der in einer Modellkette auch künftig vorhandenen Unsicherheiten müssen durch KLIWA konkrete Anpassungsmaßnahmen soweit möglich als „no/low-regret“ Maßnahmen für die einzelnen Bereiche der Wasserwirtschaft konzipiert werden.

Für den Fragenkomplex „Klimawandel und Gewässerbeschaffenheit“ werden die ersten Untersuchungen in Form einer Literaturstudie ebenfalls fortgeführt und vertieft. Besonders die zukünftigen Veränderungen in Bezug auf die Gewässerbeschaffenheit sind für KLIWA ein wichtiges neues Arbeitsfeld, in dem sich auch wichtige Verknüpfungen zu der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie ergeben können.





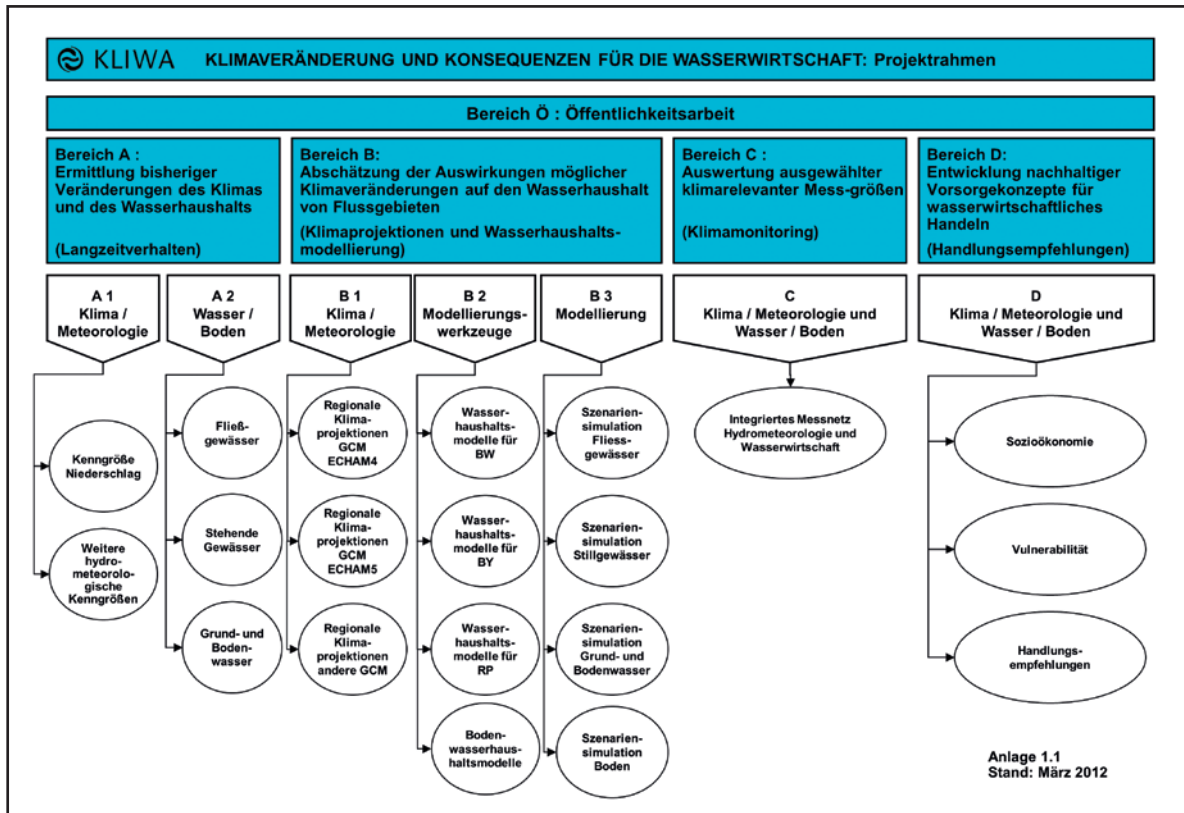
Abb. 11: Projektrahmen von KLIWA im allgemeinen Kontext „Klimawandel und Gesellschaft“

Die in KLIWA durchzuführenden Untersuchungen können nicht ohne eine intensive Zusammenarbeit zwischen Forschung und Verwaltung geleistet werden, diese Zusammenarbeit ist in Zukunft noch weiter zu intensivieren. Auch die Einbeziehung der Forschungsergebnisse nationaler und internationaler Institutionen in die Arbeit von KLIWA ist unabdingbar; die Begleitung von anstehenden Arbeiten zu Adaptionsmaßnahmen auf EU- und Bundesebene sowie die Zusammenarbeit und der Erfahrungsaustausch mit anderen Bundesländern bleiben eine notwendige Aufgabe in den nächsten Jahren. Wie Abbildung 11 zeigen soll, haben die Untersuchungen nicht nur Bedeutung für den Bereich „Anpassung“, sondern auch für die Handlungsfelder „Klimaschutz“ und „Klimaforschung“. Für die bei KLIWA beteiligten wasserwirtschaftlichen Fachbehörden wird letztlich die Thematik „Klimawandel und Wasserwirtschaft“ eine Daueraufgabe werden. Abschließend ist festzustellen, dass KLIWA in den mehr als 10 Jahren seiner Kooperation wichtige Erkenntnisse geliefert hat. Mit KLIWA sind die Kooperationspartner auch für die Zukunft gut aufgestellt, um den Herausforderungen des fortschreitenden Klimawandels durch angepasste Handlungsempfehlungen im Bereich der Wasserwirtschaft im Sinne des Vorsorgegrundsatzes und einer nachhaltigen Wasserwirtschaft bestmöglich gerecht zu werden.

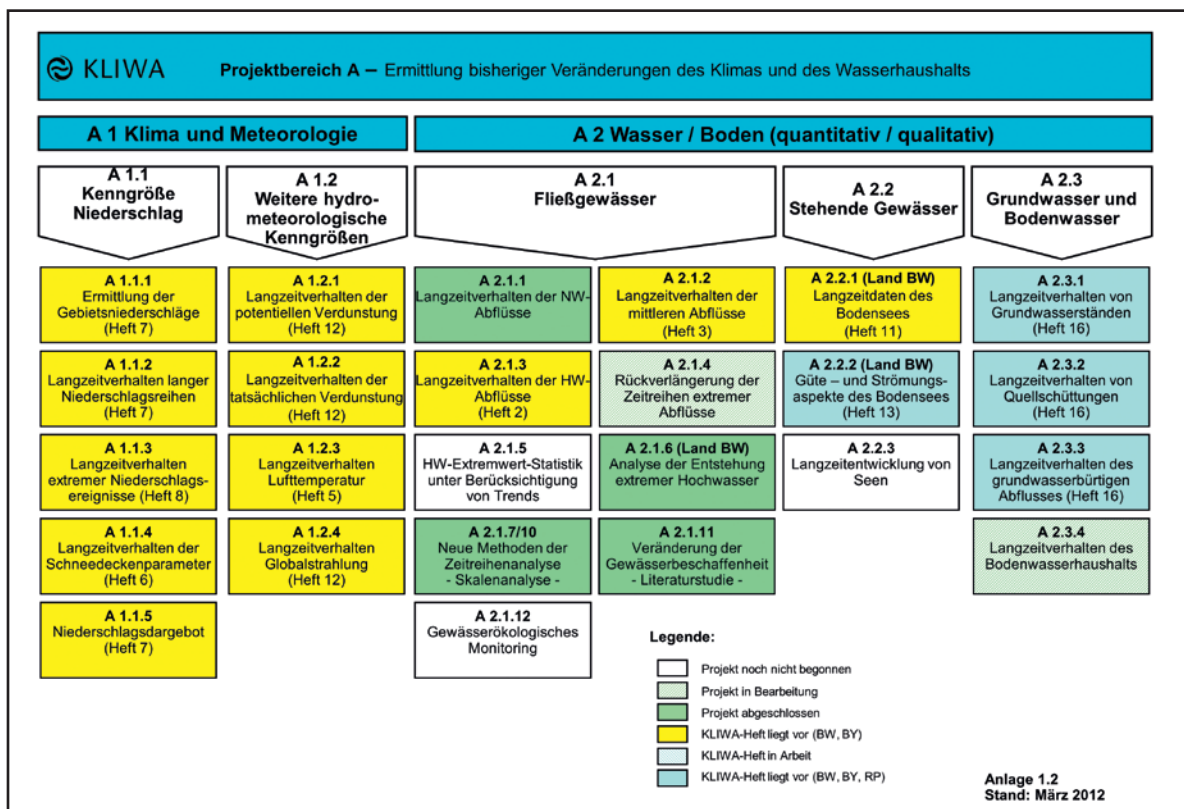
Anlagen:

- Anlage 1: Übersicht - Projektrahmen von KLIWA
- Anlage 2: Übersicht Projektbereich A
- Anlage 3: Übersicht Projektbereiche C, D und Ö
- Anlage 4: Übersicht Projektbereich B - Teile B 1 und 2
- Anlage 5: Übersicht Projektbereich B - Teil B 3

Anlage 1: Fachlicher Projektrahmen des Untersuchungsprogramms KLIWA mit seinen fünf Arbeitsbereichen

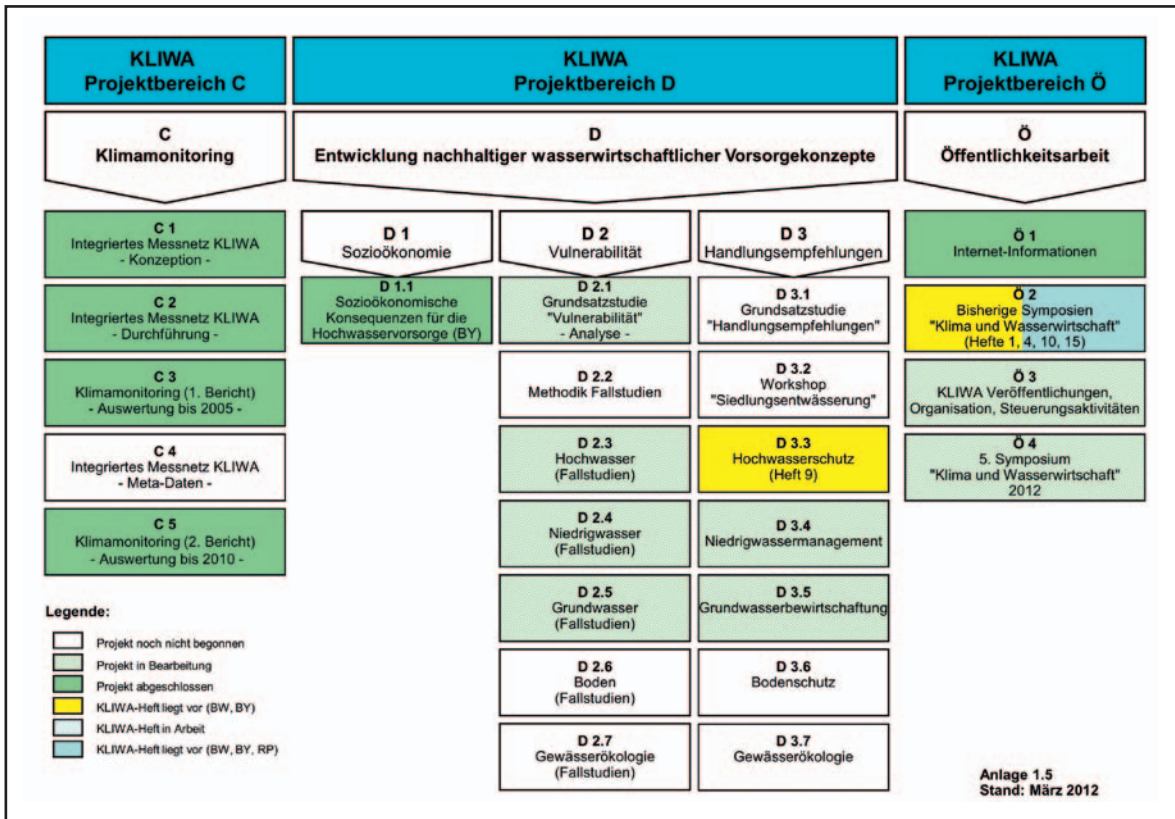


Anlage 2: Teilprojekte des Projektbereichs A

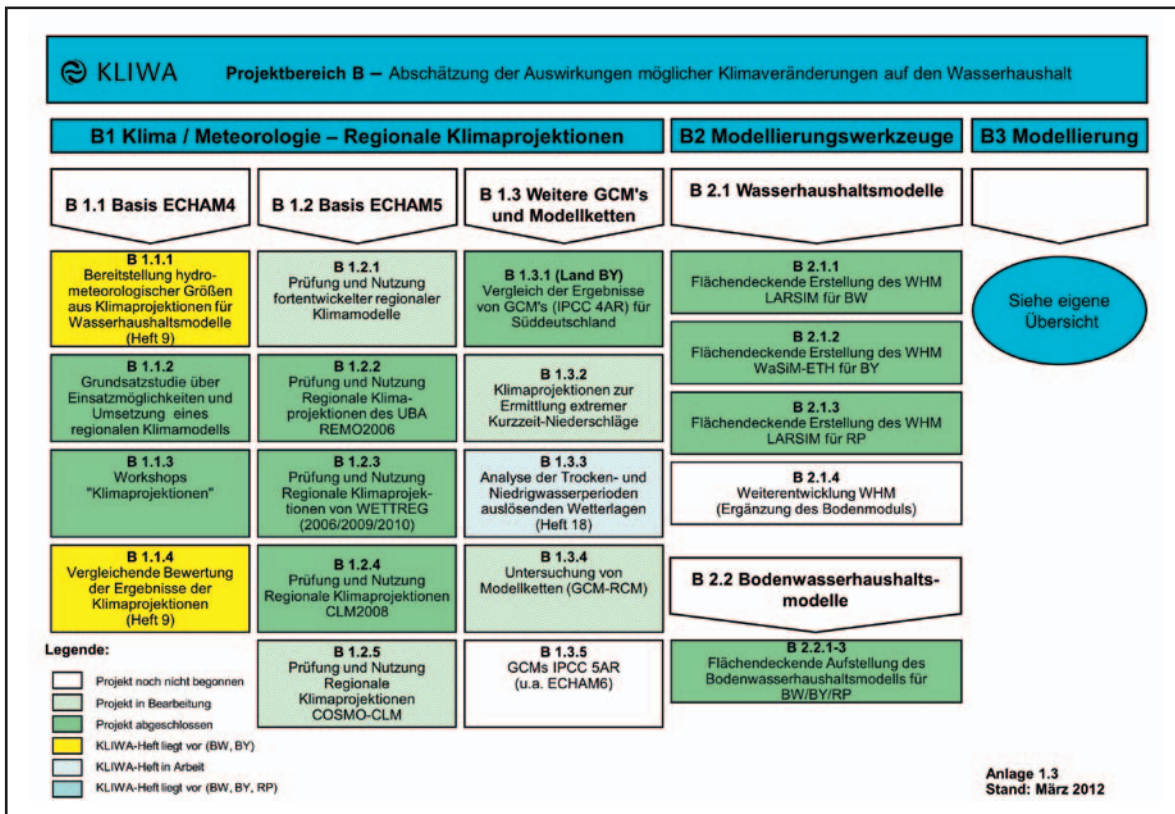




Anlage 3: Teilprojekte der Arbeitsbereiche C, D und Ö

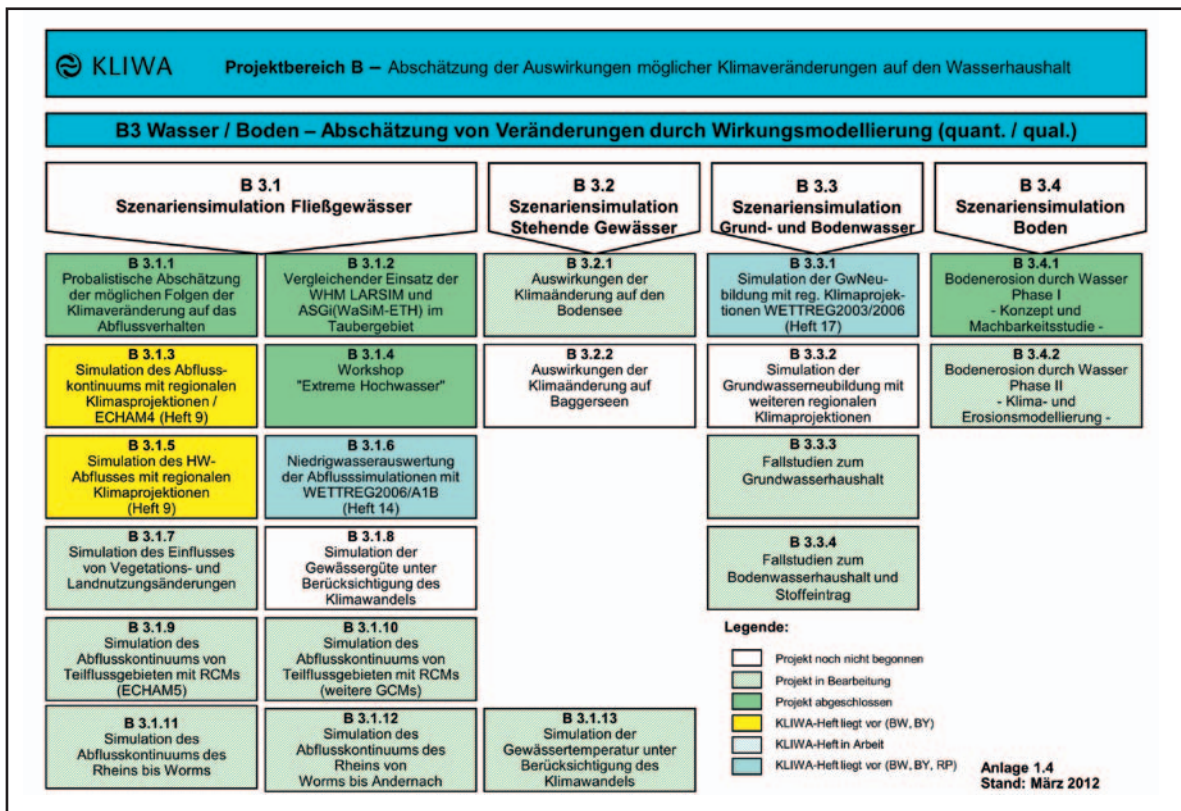


Anlage 4: Projektbereich B - Teilprojekte der Arbeitsfelder Klimaprojektionen und Modelle





## Anlage 5: Projektbereich B - Teilprojekte der wasserwirtschaftlichen Wirkungsmodellierung





## Klimamonitoring – Fakten zum Klimawandel

Dr. Bruno Rudolf, Dr. Annegret Gratzki, Dr. Monika Rauthe, Dr. Gabriele Malitz, Dr. Andreas Becker, Deutscher Wetterdienst

### 1 Einleitung

Klimamonitoring ist eine Kernaufgabe des Deutschen Wetterdienstes. Es ist eine wichtige Grundlage für die Beratung zum Schutz vor klimabedingten Risiken. Auf internationaler Ebene wurde die Bedeutung des Klimamonitorings durch die Verabschiedung des Globalen Rahmenwerks für Klimaservices der Weltorganisation für Meteorologie bekräftigt (GFCS, Global Framework for Climate Services). Die Umsetzung des Rahmenwerks erfolgt in den fünf Komponenten „Beobachtungen und Monitoring“, „Modellierung, Projektionen und Vorschau“, „Klimainformationen“, „Nutzerschnittstelle“ und „Aufbau von Kapazitäten“.

Gerade für die Bewertung von Klimaprojektionen ist der Vergleich mit Messdaten und Monitoringergebnissen unverzichtbar. Systematische Unterschiede in Temperatur, Niederschlag und Feuchte gilt es zu berücksichtigen, um auswertbare Ergebnisse in der hydrologischen Modellierung zu erzielen. Auch im Bereich der Starkniederschläge gibt es in den Modellen noch Verbesserungspotential.

### 2 Klimamonitoring des DWD für Deutschland

Das Klimamonitoring im DWD beruht auf den Messungen und Beobachtungen von rund 500 Wetter- und Klimastationen, etwa 1.600 zusätzlichen Niederschlagsstationen sowie auf speziellen Daten (z. B. aerologische Messwerte und phänologische Beobachtungen). Eine stark wachsende Bedeutung haben auch die Satelliten- und Radardaten. Über das Climate Data Centre ([www.dwd.de/cdc](http://www.dwd.de/cdc)) des Deutschen Wetterdienstes und den zentralen Datenkatalog des CDC kann auf Klimadaten aus Deutschland, aber auch auf Datenbestände mit europäischem und globalem Bezug zugegriffen werden. Die aus den Messdaten des DWD abgeleiteten Monitoringprodukte für Deutschland stehen für die interessierte Öffentlichkeit z. B. im Klimaatlas Deutschland (Abb. 1, [www.dwd.de/klimaatlas](http://www.dwd.de/klimaatlas)) zur Verfügung. Abbildung 2 zeigt die prozentuale Änderung der Niederschlagshöhe des Zeitraums 1981-2010 gegenüber dem Zeitraum 1961-1990. Während sich im Winter fast flächendeckend eine Zunahme zeigt, finden sich im Sommer große Gebiete mit einer Abnahme der mittleren Niederschläge. Für die Temperatur zeigt sich im Vergleich der beiden Zeiträume eine generelle Zunahme (ohne Abbildung).

### 3 Flussgebietsbezogene Analysen für Süddeutschland

In KLIWA wurden Untersuchungen zum Langzeitverhalten verschiedener meteorologischer Größen in Süddeutschland durchgeführt und die Ergebnisse in KLIWA-Heften publiziert. In regelmäßigen Zeitabständen erfolgt ein Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland. Das Klimamonitoring in KLIWA fokussiert sich, neben den hydrologischen Kenngrößen, auf die meteorologischen Größen Temperatur und Niederschlag. Die Ergebnisse werden in Klimamonitoringberichten auf der KLIWA-Internetseite [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht. Mit dem aktuellen Klimamonitoringbericht von 2011 werden Veränderungen des regionalen Klimas in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz bis zum Jahre 2010 verfolgt und bewertet. Es wurden die Kenngrößen mittlere Temperatur und Niederschlag sowie Starkniederschlag

# Deutscher Klimaatlas

## Niederschlag

Dezember 2012

Emissionsszenario: A1B

Zeitfenster: 2071 - 2100

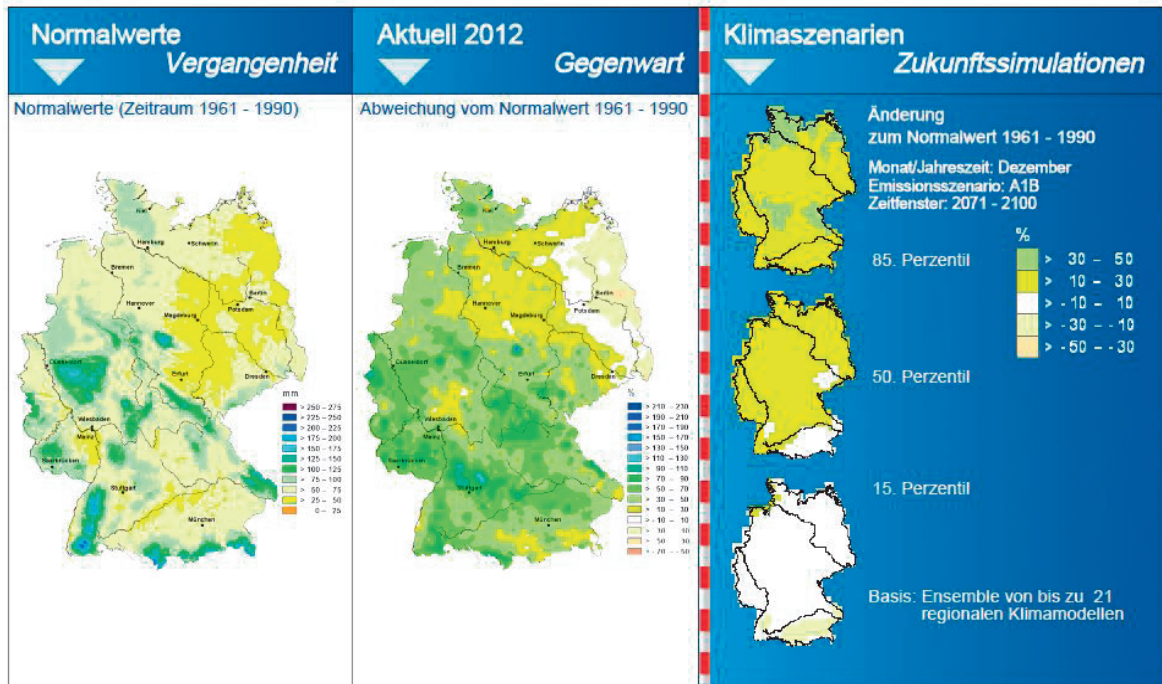


Abb. 1: Monitoringprodukte im Deutschen Klimaatlas und Zukunftssimulationen ([www.dwd.de/klimaatlas](http://www.dwd.de/klimaatlas))

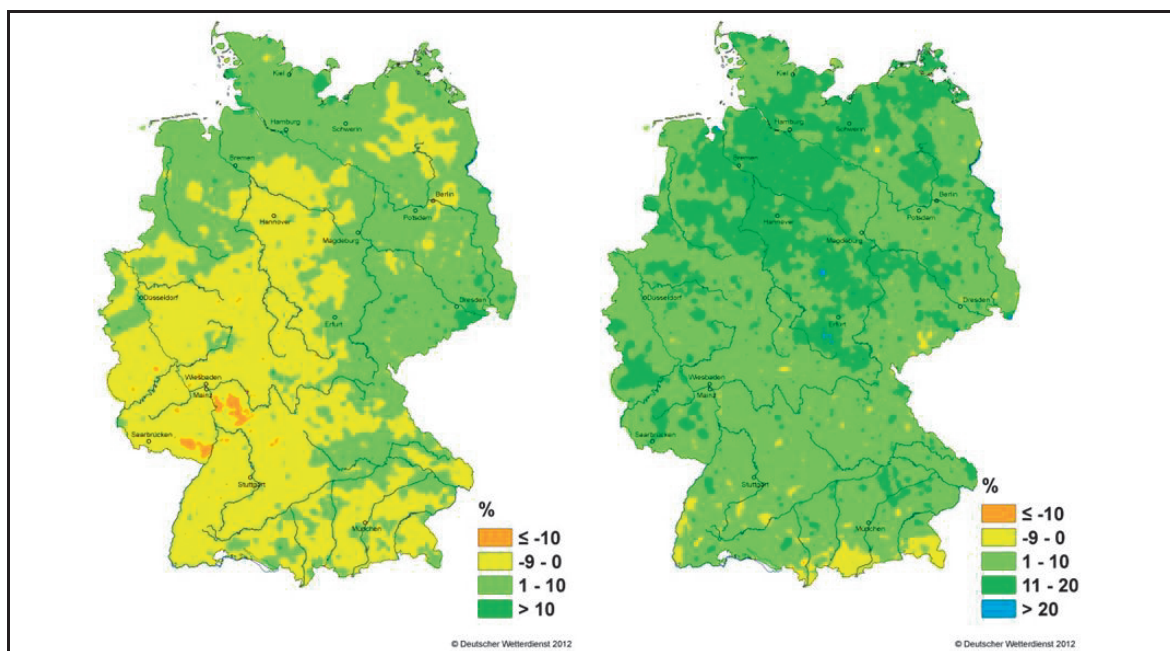


Abb. 2: Prozentuale Änderung der Niederschlagshöhe 1981-2010 gegenüber 1961-1990, links Sommer, rechts Winter.





auf der Basis maximaler ein- und fünftägiger Gebietsniederschläge untersucht. Die Trendauswertungen erfolgten auf flussgebietsbezogenen Einheiten und für das hydrologische Sommer- und Winterhalbjahr. Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

## Lufttemperatur

- In den Jahren 2006 bis 2010 hat sich der Anstieg der Lufttemperatur im Jahresmittel in Süddeutschland weiter fortgesetzt. Für den Zeitraum 1931 bis 2010 ist eine Zunahme des Gesamttrends auf durchschnittlich ca.  $+1,1$  °C sowie eine Verstärkung der Trendsignifikanz festzustellen (Abb. 3).
- Im Vergleich zwischen Winter- und Sommerhalbjahr setzt sich das schon im letzten Monitoringbericht beschriebene Verhalten weiter fort: Die Erwärmungszunahme fällt in den letzten Jahren im Sommerhalbjahr stärker aus als im Winterhalbjahr. Dennoch ist der Gesamttrend im Winterhalbjahr bisher insgesamt immer noch stärker ausgeprägt (Winterhalbjahr:  $+1,1$  bis  $+1,4$  °C/80 a; Sommerhalbjahr:  $+0,6$  bis  $+1,0$  °C/80 a).
- Für fast alle Monate zeigen sich Zunahmen der mittleren Lufttemperatur. Die stärksten positiven Trends im Jahresverlauf sind dabei in den Monaten Dezember, Januar, Februar, Mai und August zu finden. Nur im Monat September sind über den Gesamtzeitraum leicht negative Trends zu beobachten, die aber nicht signifikant sind.

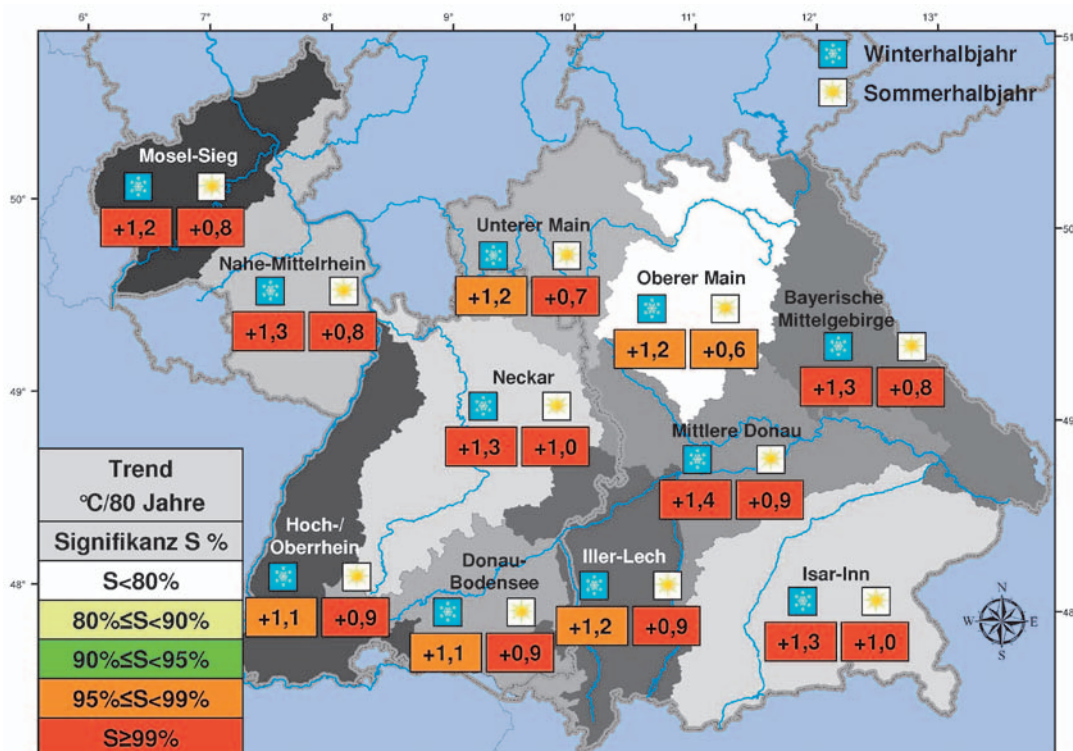


Abb. 3: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren/ Trends mit Signifikanz für den Zeitraum 1931-2010 (Trend in °C/80 a)

## Niederschlag

- Die Trends (1931 bis 2010) der mittleren Gebietsniederschlagshöhe sind insgesamt schwächer und weniger signifikant als im letzten ausgewerteten Zeitraum (1931 bis 2005), wobei es generell positive Trends im Winterhalbjahr ( $+7$  % bis  $+28$  %) und

keine eindeutige Entwicklung im Sommerhalbjahr (-10 % bis +5 %) in den 44 KLIWA-Untersuchungsgebieten gibt. In den letzten 10 Jahren sind eine Tendenz zu positiven Trends im Sommerhalbjahr und eine Verringerung der positiven Trends im Winterhalbjahr zu beobachten. Abb. 4 zeigt die Entwicklung der Gebietsniederschlagshöhe in den hydrologischen Halbjahren für die 11 KLIWA-Regionen.

- Bei den Trends der maximalen fünftägigen Gebietsniederschlagshöhen findet man im hydrologischen Winterhalbjahr (Abb. 5) insgesamt etwas höhere Signifikanzwerte als bei den eintägigen Starkniederschlägen (ohne Abbildung). Das Trendverhalten ist ähnlich (-1 % bis +35 %), wobei es nur ein Gebiet mit geringer Abnahme gibt. In der räumlichen Verteilung sind hohe Zunahmen im Gebiet Nordost- und Mittelbayern zu finden. Außerdem sind noch signifikante Zunahmen in den östlichen Moselgebieten und im Süden von Baden-Württemberg vorhanden.
- Im Sommerhalbjahr (Abb. 6) sind die Trends der maximalen fünftägigen Gebietsniederschlagshöhe von Gebiet zu Gebiet sehr unterschiedlich (-18 % bis +13 %), ähnlich wie bei den eintägigen Starkniederschlagshöhen, wobei die Trendrichtung beim ein- und fünftägigen maximalen Gebietsniederschlag nicht gleich sind. Signifikante Trends gibt es generell weniger als bei den eintägigen Werten.

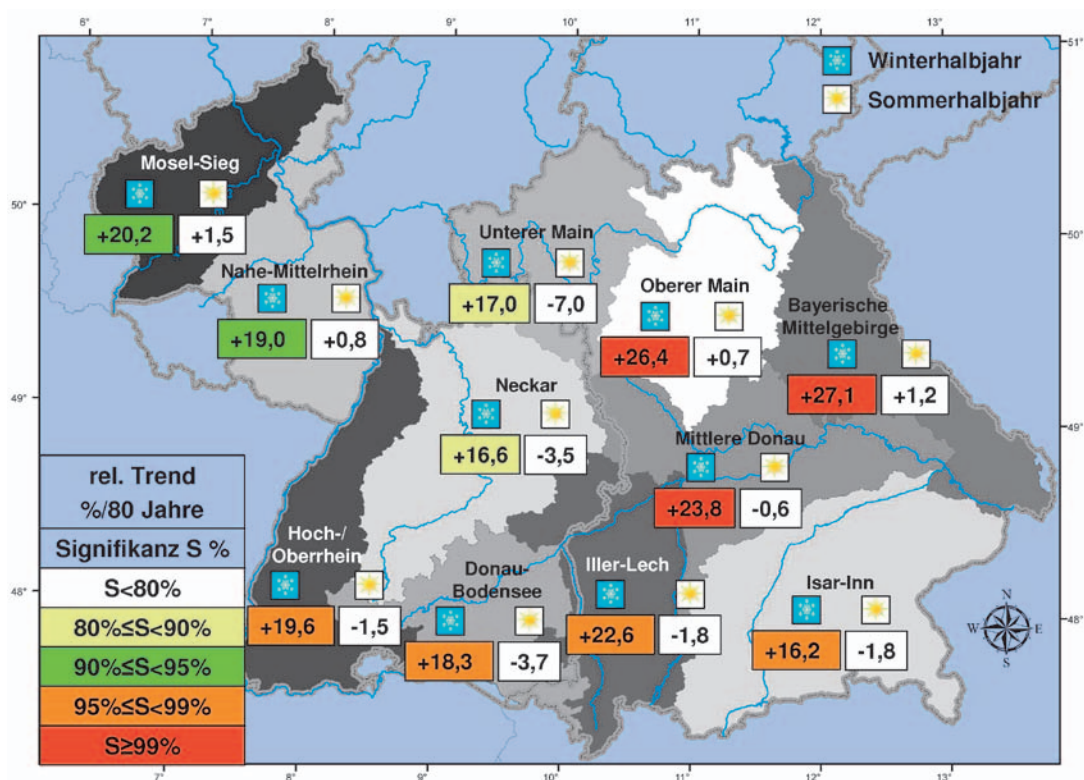


Abb. 4: Entwicklung der Gebietsniederschlagshöhe in den hydrologischen Halbjahren/relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931-2010)

#### 4 Berechnung hydrometeorologischer Kenngrößen im Rahmen von KLIWAS

Im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS (KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen) erstellt der Deutsche Wetterdienst u.a. Referenzdatensätze auf Tagesbasis für Deutschland und nach Deutschland entwässernde Flusseinzugsgebiete für den Zeitraum 1951 bis 2006. Die Datensätze umfassen die hydrologisch relevanten Größen Niederschlag, Temperatur,

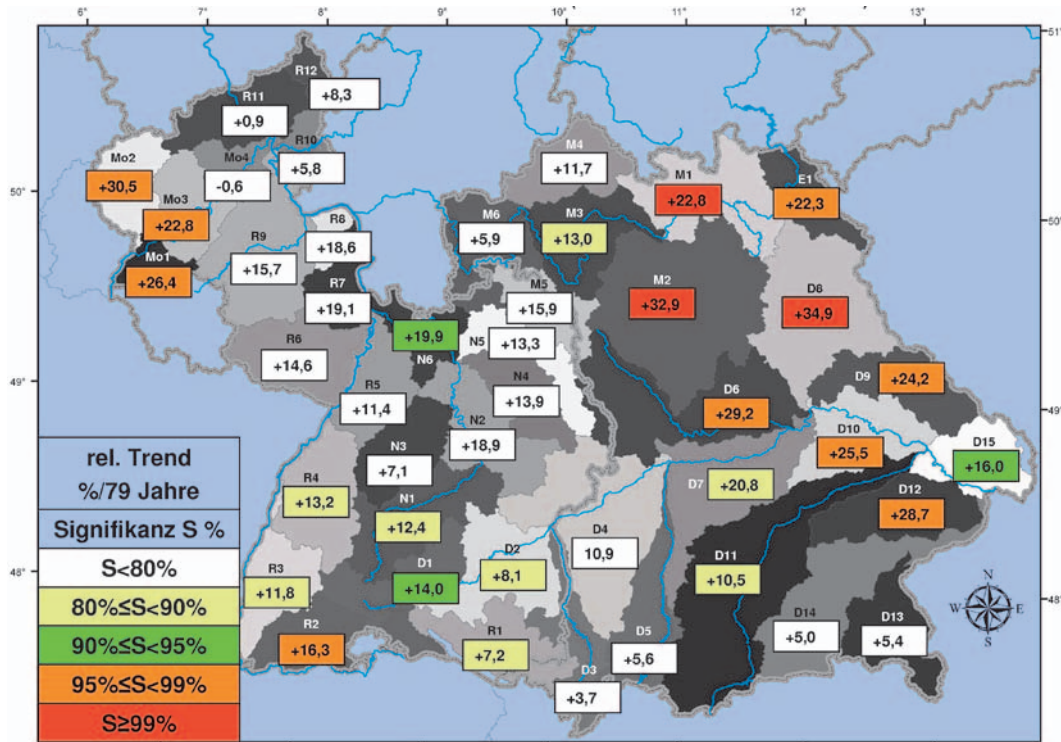


Abb. 5: Entwicklung der max. 5-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931-2010)

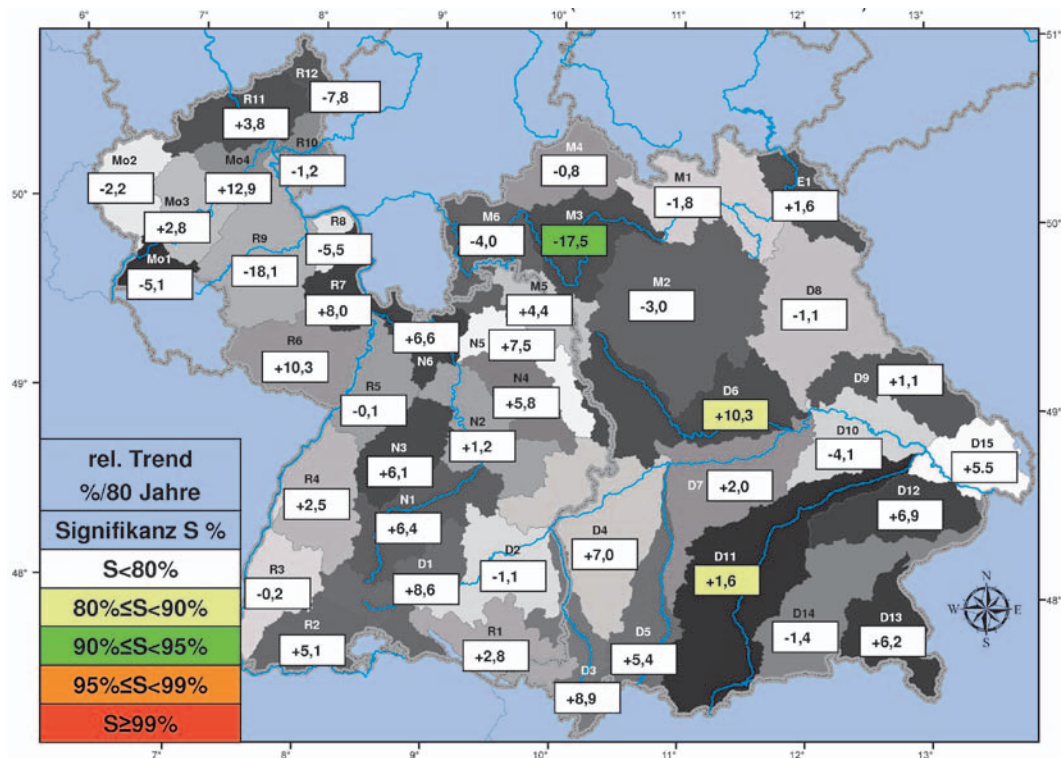


Abb. 6: Entwicklung der max. 5-tägigen Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Sommerhalbjahr, relativer Trend (Änderung in Prozent vom Mittelwert 1931-2010)



Feuchte, Globalstrahlung und Windstärke. Die Messdaten der Nachbarländer wurden von den jeweiligen Messnetzbetreibern bereitgestellt. Die Größen werden zur Bewertung und Bias-Korrektur von Szenarienrechnungen regionaler Klimamodelle verwendet und für die hydrologische Modellierung in KLIWAS benötigt. Für den Niederschlag wurden detaillierte Untersuchungen zu der Genauigkeit der gerasterten Datensätze durchgeführt (Rauthe et al., 2012). Des Weiteren wurden verschiedene Kenngrößen berechnet, sowohl auf einer Skala von 5 km x 5 km als auch für Flusseinzugsgebiete. Ein Beispiel zeigt Abb. 7 für Deutschland. Dort ist die Anzahl der Tage mit Niederschlag kleiner 1 mm für zehnjährige Zeiträume, unterteilt nach Sommer und Winter, aufgetragen. Eine deutliche Zunahme der Trockentage sieht man in der letzten Dekade des betrachteten Zeitraums, in der Zeit von 1995 bis 2004. In den davor liegenden Jahren ist eine dekadische Variabilität ausgeprägter als ein genereller Trend.

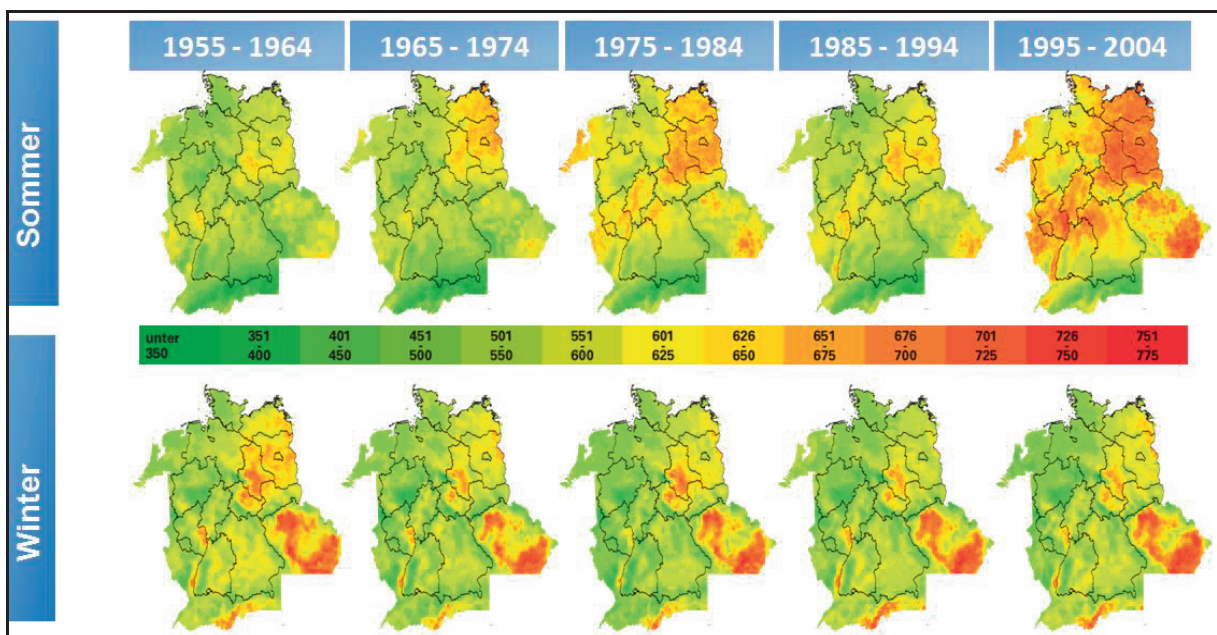


Abb. 7: Häufigkeit von Trockentagen (Tage mit Niederschlag < 1 mm)

## 5 Aktuelle Untersuchungen im Deutschen Wetterdienst zu Starkniederschlägen

In KOSTRA („Koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertung“, Bartels et al., 2005) werden Starkniederschläge unterschiedlicher Dauerstufen betrachtet. Die extremwertstatistischen Auswertungen von KOSTRA-DWD-2000 basieren auf dem Basiszeitraum 1951 bis 2000. Zurzeit werden im DWD Untersuchungen zur Veränderung von Starkniederschlägen bis zum Jahr 2010 durchgeführt. Bei der Auswertung der Niederschläge kleiner Dauerstufen liegt eine besondere Problematik derzeit in der zurückgehenden Anzahl von Niederschlagsschreibern und den noch recht kurzen Zeitreihen der v.a. in den neunziger Jahren eingeführten automatischen Niederschlagsmessungen, die aber inzwischen in großer Anzahl vorhanden sind (ca. 1000 Stationen, aber teilweise an anderen Standorten). Dort wo vorhandene Datenreihen mit Niederschlagsschreibern fortgesetzt werden konnten, wurden die Daten digitalisiert, um sie für die Auswertungen der KOSTRA-Fortschreibung zugänglich zu machen. Für einen Teil der Stationen wurden inzwischen zwei 30-jährige Zeiträume verglichen (1951-1980 zu 1981-2010). Dabei ist zu berücksichtigen, dass Starkniederschlag zeitlich und räumlich stark variabel ist. Stationsbezogene Resultate können daher nur ein eingeschränktes Bild der Veränderungen ergeben. Dennoch lassen sich einige Tendenzen erken-



nen. Die Messungen zeigen ein uneinheitliches Bild der Trends mit stärkeren Zunahmen im Süden Deutschlands und tendenziell weniger starken Änderungen bzw. Abnahmen im Osten. Weitere Untersuchungen werden durchgeführt, um die Ergebnisse abzusichern.

Für die Erfassung von Starkniederschlägen können Fernerkundungsdaten wie das bodengestützte Niederschlagsradar zukünftig eine größere Rolle spielen. Der DWD misst den Niederschlag flächendeckend in Deutschland mit einem Verbund aus 16 Radargeräten. Die Radardaten werden im Deutschen Wetterdienst mit Niederschlagsmessungen angeeicht (Verfahren „RADOLAN“, Winterrath et al., 2012). Die daraus gewonnen flächendeckenden, einstündigen quantitativen Niederschlagverteilungen werden der operationellen Hochwasservorhersage zur Verfügung gestellt. Der DWD hat inzwischen mehr als 10 Jahre hochaufgelöste Radardaten für ganz Deutschland vorliegen. Dies ist ein Zeitraum, der diese Daten auch für klimatologische Untersuchungen interessant macht. Es wurde daher im Deutschen Wetterdienst begonnen, die angeeichten Radardaten für die klimatologische Nutzung aufzubereiten. Diese neue Radarklimatologie eröffnet die Möglichkeit, Niederschlagsmengen in Deutschland in stündlicher Auflösung, flächendeckend und in sehr hoher räumlicher Auflösung zu bestimmen und damit insbesondere den Starkniederschlag in seiner zeitlichen und räumlichen Verteilung besser zu erfassen. Eine Machbarkeitsstudie zur Analyse von Starkniederschlägen mittels angeeichter Radardaten wird zurzeit für den Großraum Köln im DWD durchgeführt. Dieses Gebiet wurde ausgewählt, weil dort die Radardaten vergleichsweise geringe Störsignale zeigen. Die ersten vorläufigen Ergebnisse, basierend auf einer kurzen Zeitreihe, zeigen plausible Resultate der extremwertstatistischen Auswertungen. Die Analysen werden zunächst auch für andere Metropolregionen durchgeführt. Das Ziel ist die Reanalyse der archivierten Radardaten mit der aktuellsten Aneichsoftware und die Anwendung verbesserter Qualitätskontrollverfahren, um Störsignale besser herauszufiltern. Aufbauend auf dem so gewonnen deutschlandweiten Datensatz sollen klimatologische Auswertungen inklusive extremwertstatistischer Untersuchungen durchgeführt werden.

## 6 Literatur

- Bartels, H., B. Dietzer, G. Malitz, F. M. Albrecht, J. Guttenberger (2005): KOSTRA-DWD-2000, Starkniederschlagshöhen für Deutschland (1951 – 2000) – Fortschreibungsbericht, Offenbach am Main ([www.dwd.de/kostra](http://www.dwd.de/kostra))
- KLIWA (2011): Monitoringbericht "Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, 40 S.
- Rauthe, M., H. Steiner, U. Riediger, A. Mazurkiewicz and A. Gratzki (2012): A precipitation climatology covering Germany and neighbouring river basins – Part I: Generation of a high-resolution gridded daily precipitation data set (HYRAS) and first results, *Meteorolog. Z.*, submitted.
- Winterrath, T., W. Rosenow and E. Weigl (2012): On the DWD quantitative precipitation analysis and nowcasting system for real-time application in German flood risk management, *Weather Radar and Hydrology*, Proceedings of a symposium held in Exeter, UK, April 2011, IAHS Publ. 351.

## Regionale Klimaprojektionen bei KLIWA

Holger Komischke, Christian Ebert  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### 1 Einleitung

Auch in Deutschland ist der Klimawandel spürbar, dies belegen Messungen des Langzeitverhaltens verschiedener klimatischer Messgrößen. Aber es treten bereits auch merkliche Veränderungen im Wasserkreislauf und dem Wasserhaushalt der Flussgebiete auf, wie die bisherigen KLIWA-Monitoringberichte (z. B. KLIWA 2011) bestätigen. Damit stellen sich zunehmend Fragen nach den Folgen, z. B. wie sich der weitere Klimawandel regional auswirken wird oder welche Veränderungen von Klima und Wasserhaushalt Süddeutschland in der Zukunft zu erwarten hat. Die Beantwortung dieser Fragen ist Kernbestandteil des Kooperationsvorhabens KLIWA. Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt in den Flussgebieten herauszuarbeiten, Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen abzuleiten, ist es allerdings zuallererst notwendig, die mögliche Klimaänderung mit geeigneten Klimamodellen zu simulieren und regional zu quantifizieren. Die dazu erforderlichen regionalen Klimaprojektionen können anschließend für die weitere Modellierung von Auswirkungen, z. B. auf den Wasserhaushalt, herangezogen werden.

Der Beitrag stellt das in KLIWA gewählte Vorgehen zur Identifizierung und Auswertung geeigneter regionaler Klimaprojektionen für Süddeutschland und für die Impactmodellierung vor. Zudem wird ein Überblick über die bisher in KLIWA betrachteten Klimamodelle gegeben und die ermittelten Klimaveränderungen für die drei Bundesländer zusammengefasst. Diese Ergebnisse spiegeln die Ergebnisbandbreite und damit auch einen Teil der möglichen Modellunsicherheiten wieder. Anhand zweier Beispiele werden die Ergebnisse der aktuellsten Klimaprojektion in KLIWA (COSMO-CLM4.8/ECHAM5-A1B) und die mögliche Ergebnisbandbreite bei der Betrachtung verschiedener in KLIWA bisher verfügbaren Klimaprojektionen vertieft dargestellt.

### 2 Methodisches Vorgehen

In diesem Kapitel wird das in KLIWA genutzte methodische Vorgehen für den Umgang mit den verschiedenen regionalen Klimaprojektionen näher erläutert: Aufbauend auf der Modellkette und den verschiedenen Arten der regionalen Klimamodelle werden die verfügbaren Klimaprojektionen geprüft, bevor sie in einer Impactmodellierung wie der Wasserhaushaltsmodellierung weiter genutzt werden können. Zudem wird kurz dargestellt, wie die dargestellten Klimaveränderungen ermittelt werden und warum bei diesem Vorgehen eine Ergebnisbandbreite unvermeidbar ist.

#### 2.1 Die Modellkette in der Klimamodellierung

Zukünftige Veränderungen des Klimas können mit Hilfe einer Modellkette (Emissionsszenario – Globale Klimamodelle – Regionale Klimamodelle – Impactmodelle) abgeschätzt werden. Das erste Glied in der Modellkette sind die von der Klimaforschung als Randbedingung festgelegten und auch vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate change) bisher genutzten (SRES-) Emissionsszenarien (vgl. Abb. 1). Sie beschreiben in Abhängigkeit der angenommenen Entwicklung der Weltwirtschaft zukünftig mögliche Treibhausgas-Konzentrationen in der Atmosphäre. Damit können Globale Klimamodelle (General Circulation Models – GCM) die weltweite Klimaentwicklung von Jetztzeit und Zukunft in einem globalen Raster simulieren. Die räumliche Auflösung der Rasterzellen eines GCM liegt bisher in





einer Größenordnung von ca. 200 x 200 km, weshalb sich GCM-Ergebnisse nicht unmittelbar für regionale Auswertungen eignen. Um dennoch die regionale Klimaentwicklung auch für Gebiete von der Größe eines Bundeslandes (Rheinland-Pfalz rund 20.000 km<sup>2</sup>; Bayern rund 70.000 km<sup>2</sup>) oder für Flusseinzugsgebiete (z. B. Naab ca. 5.200 km<sup>2</sup>) abschätzen zu können, bedient man sich Regionaler Klimamodelle (Regional Climate Models - RCM), die mit den Ergebnissen eines GCM angetrieben werden. Die RCM liefern Klimagrößen für ein ausgewähltes Gebiet in höher aufgelösten Rastern mit ca. 7–50 km Seitenlänge bzw. punktuell für meteorologische Messstationen.

Die Ergebnisse der Modellkette bis zu den regionalen Klimamodellen werden als regionale Klimaprojektionen bezeichnet (vgl. Abbildung 1). Die darauf aufbauenden Impactmodelle, z. B. hydrologische Modelle, werden dabei in KLIWA mit diesen regionalen Klimaprojektionen angetrieben. Diese sind somit aus naturwissenschaftlichen Zusammenhängen abgeleitete, mögliche Entwicklungen des Klimas. Ihre Aussagen weisen damit grundsätzlich Unsicherheiten auf. Durch die Berücksichtigung verschiedener Ausgangsbedingungen und Klimamodelle ergibt sich dabei eine Bandbreite an denkbaren Entwicklungen.

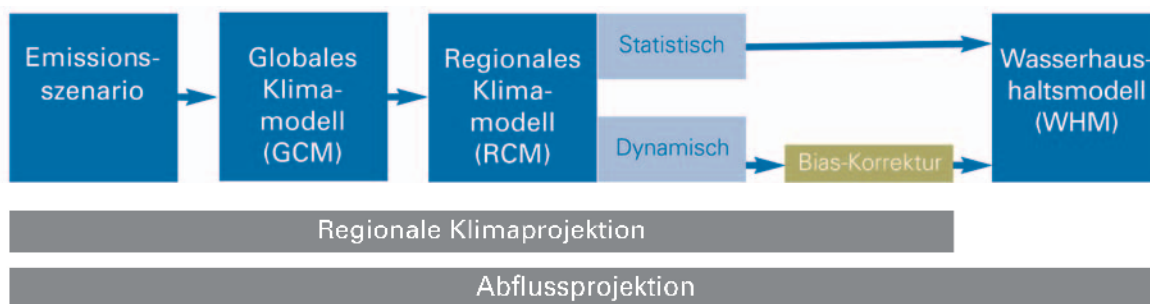


Abb. 1: Allgemeines Schema der Modellkette zur Betrachtung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt (KLIWA2012)

Die Ergebnisse der RCM sind weder zeitlich noch räumlich als punktgenaue Vorhersagen zu verstehen, vielmehr charakterisieren sie einen szenarioabhängigen, möglichen mittleren Zustand des Klimas über einen langen Zeitraum (Klimastatistik). Bei den RCM lassen sich prinzipiell zwei Herangehensweisen unterscheiden:

- Statistische Methoden nutzen zur regionalen Klimadarstellung statistische Zusammenhänge zwischen großräumigen atmosphärischen Mustern (z. B. Großwetterlagen, Druck, Temperatur) und den Klimadaten vorhandener Messstationen. Mit diesen Zusammenhängen kann über die Modellergebnisse eines GCM eine mögliche zukünftige Entwicklung des Klimas an den Stationspunkten abgeleitet werden. Für weitergehende Untersuchungen müssen diese Punktwerte regionalisiert, d. h. auf die Fläche des Untersuchungsgebiets übertragen werden. Ein Beispiel ist das in KLIWA häufig genutzte Regionale Klimamodell WETTREG.
- Dynamische RCM sind ähnlich wie die GCM aufgebaut, beschreiben also physikalische Zusammenhänge von Atmosphäre, Ozean und Landoberfläche, dies aber nur für Gebietsausschnitte der Erdoberfläche. Für das entsprechende Gebiet wird das genutzte RCM in das GCM eingebettet, und von diesem angetrieben. Typische Vertreter im bisher betrachteten KLIWA-Ensemble sind zum Beispiel REMO oder COSMO-CLM4.8.

Aus methodischen Gründen eignen sich statistische RCM vor allem zur Ableitung von Klimaprojektionen bis etwa zur Mitte dieses Jahrhunderts. Darüber hinaus werden die Ergebnisse vor allem als orientierende Aussagen betrachtet, dies ist bei der Interpretation der Veränderungen zu beachten. Dynamische Modelle sind dagegen prozessorientiert und damit für die Simulation der in fernerer Zukunft ablaufenden Prozesse vom Grundsatz her besser geeignet.

Da derzeit nicht alle Prozesse des Klimasystems voll verstanden und in den Klimamodellen abgebildet werden können, befinden sich die angewandten Verfahren zur Erzeugung der regionalen Klimaprojektionen in ständiger Weiterentwicklung. Generell sind in jedem der genannten Modellschritte (vgl. Abb. 2) Annahmen aus dem naturwissenschaftlichen und gesellschaftlichen Bereich getroffen, die stets mit Unsicherheiten behaftet sind. Daher bestehen Unterschiede im Aufbau der verschiedenen, von einer Reihe von internationalen Forschungsinstitutionen aufgestellten Klimamodelle. Hinzu kommen aber auch Unsicherheiten im Hinblick auf die zukünftige Entwicklung z. B. der Treibhausgasemissionen, des Bevölkerungswachstums, der Landnutzungsänderung oder des Wirtschaftswachstums, die summarisch durch die unterschiedlichen Emissionsszenarien beschrieben werden.

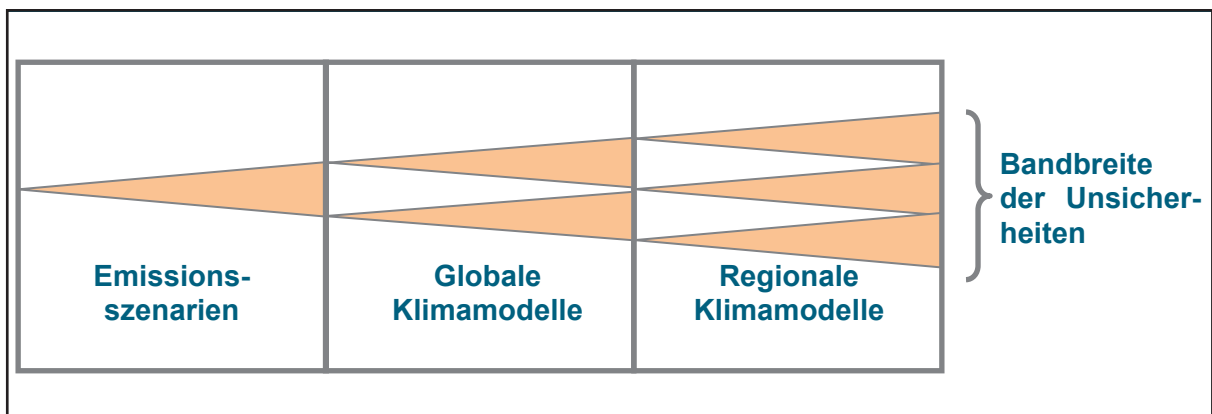


Abb. 2: Schema für die Zunahme von Unsicherheiten in der Modellkette

Die vorhandenen Unsicherheiten führen dazu, dass „die eine Prognose“ für die Zukunft nicht erstellt werden kann. Vielmehr werden mit verschiedenen Regionalmodellen unterschiedliche Projektionen berechnet, die mögliche Entwicklungspfade für die Zukunft aufzeigen. Es ist also fachlich geboten, mögliche Klimaänderungen für Süddeutschland anhand mehrerer Klimaprojektionen zu betrachten. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, durch Bündelung und Kombination von unterschiedlichen Modellen und Annahmen zu einer plausiblen Bandbreite von Aussagen und Ergebnissen zu kommen (Ensemble-Technik). Dieses Vorgehen ermöglicht es auch, bei übereinstimmenden Aussagen belastbare Ergebnisse herauszufiltern und Unsicherheiten einzugrenzen. Die ermittelte Ergebnisbandbreite ergibt einen Korridor, in dem die zukünftige klimatische Entwicklung unter den getroffenen Annahmen voraussichtlich liegt.

## 2.2 Untersuchungen zur Plausibilität von Klimaprojektionen in KLIWA

Die möglichen Unsicherheiten in den Klimaprojektionen spiegeln sich teilweise auch bereits bei der Betrachtung des Referenzzeitraums einer Klimaprojektion wieder. Im Vorhaben KLIWA werden alle Klimaprojektionen für den Zeitraum 1971-2000 auf ihre Plausibilität geprüft. Dies bedeutet, dass die Klimaprojektion das mittlere monatliche Regime der meteorologischen Größen, wie der Temperatur oder des Niederschlags, ausreichend gut wiedergeben muss, sowohl im Gebietsmittel als auch in der flächenhaften Verteilung. Gerade im Hinblick auf die weitere Anwendung in Wasserhaushaltsmodellen ist eine hohe Plausibilität notwendig, da es ansonsten nicht möglich ist, den Wasserhaushalt in diesen Modellen richtig abzubilden. Dieser im Vorhaben KLIWA sehr wichtige Prüfungsschritt ermöglicht eine gezielte Auswahl, welche der verfügbaren Klimaprojektionen in KLIWA für weitere Untersuchungen des Wasserhaushalts einsetzbar und auswertbar sind.

Eine Möglichkeit, die Plausibilität von Klimaprojektionen zu erhöhen, ist die Anwendung einer Bias-Korrektur. Mit verschiedenen Methoden ist hiermit eine Korrektur der regionalen Klimaprojektionen möglich, bevor diese in der hydrologischen Modellierung verwendet werden (vgl. Abb. 1). Hiermit können zum Beispiel generell zu hohe oder zu niedrige Temperaturen



oder Niederschläge angepasst werden. Die möglichen Methoden sind dabei vielfältig in Ihrer Wirkung und Komplexität. In diesem Beitrag soll darauf nicht weiter eingegangen werden, weitere Informationen zur Bias-Korrektur bietet zum Beispiel Teutschbein & Seibert. Die Anwendung einer Bias-Korrektur wirft dabei natürlich weitere Fragen, zum Beispiel zur Konsistenz der korrigierten Daten oder dem erlaubten Umfang einer Korrektur. Diese sind zum Beispiel in Ehret et al. beschrieben.

### 2.3 Ermittlung von Klimaänderungssignalen

Ein wesentliches Ergebnis von regionalen Klimaprojektionen ist das Klimaänderungssignal. Dafür werden die modellierten Klimakenngrößen eines zukünftigen Zeitraums mit dem Simulationsergebnis einer Referenz für die Vergangenheit (Kontrolllauf) verglichen und die Differenz bzw. das Verhältnis angegeben. Mögliche systematische Fehler eines Modells werden damit weitgehend umgangen, da die modellierte Zukunft mit der modellierten und nicht mit der gemessenen Vergangenheit verglichen wird. Auf diese Weise können auch Klimaprojektionen, welche Schwächen in der Nachbildung des beobachteten Klimas aufweisen, aussagekräftige Klimaänderungssignale liefern und somit für diese Auswertung genutzt werden. Dies sagt aber nichts über die Eignung für die Wasserhaushaltsmodellierung aus. Zur Ermittlung der Referenz (Kontrolllauf) werden in KLIWA die Jahre 1971–2000 und als Schwerpunkt für den Blick in die Zukunft die Jahre 2021–2050 gewählt. Für die Abschätzung langfristiger Tendenzen wird in KLIWA teilweise der Zukunftszeitraum bis zum Jahr 2100 ausgedehnt. In dieser fernen Zukunft sind die Aussagen statistischer Modelle allerdings schon mit hohen Unsicherheiten behaftet und ihre Aussagekraft ist folglich stark eingeschränkt.

Für die Änderungen der Temperatur werden die Tageswerte, für Änderungen des Niederschlags die Tagessummen über den 30-jährigen Zeitraum gemittelt. Ebenso werden in KLIWA unter anderem Kenntage wie Tagesminima und -maxima der Temperatur analysiert. Die Ergebnisse verschiedener Klimaprojektionen werden in der Regel zusammengefasst dargestellt und zeigen damit auch deren Spannweite auf. Dieses Ensemble an Klimaprojektionen ermöglicht eine Einordnung der Ergebnisse und liefert die Grundlage für sachgerechte Anpassungsmaßnahmen.

## 3 Verfügbare Klimaprojektionen in KLIWA

Inzwischen sind zahlreiche regionale Klimaprojektionen mit verschiedenen Emissionsszenarien verfügbar. In KLIWA konnten daher verschiedene statistische und dynamische Verfahren der regionalen Klimamodellierung ausgewertet und besonders im Hinblick auf die weitere Anwendbarkeit in der Wasserhaushaltsmodellierung bewertet werden.

Eine im Jahr 2000 im Auftrag von KLIWA erstellte Grundsatzstudie der ETH Zürich zog zu Beginn des Projekts das Fazit, dass es noch kein optimales Verfahren für die Erstellung regionaler Klimaszenarien aus den globalen Klimamodellen gibt. Daher beschlossen die KLIWA-Partner, unterschiedliche Verfahren anzuwenden, um eine Bandbreite möglicher Entwicklungen zu erhalten.

Es wurden verschiedene statistische und dynamische Verfahren der regionalen Klimamodellierung ausgewählt, ausgewertet und bewertet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden in den Aufträgen an die Klimamodellierer weitgehend identische Randbedingungen vorgegeben und zwar: Messdaten des Zeitraums 1951-2000, globales Klimamodell ECHAM4, Verifikationszeitraum 1971-2000, IPCC-Emissionsszenario B2 für den Projektionszeitraum 2021-2050 (nahe Zukunft). Die Ergebnisse sind im Heft 9 der KLIWA-Reihe veröffentlicht (KLIWA 2006). Für die weiteren Untersuchungen in KLIWA wurde die regionale Klimaprojektion WETTREG2003 genutzt.

Im Jahr 2006 stellte das Umweltbundesamt (UBA) weitere Klimaprojektionen (WETTREG 2006 & REMO2006) für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik zur Verfügung, diesmal mit dem globalen Klimamodell ECHAM5 und den IPCC-Emissionsszenarien B1, A1B und A2 (Spekat et al. sowie Jacob et al.). Auch diese Projektionen wurden unter den oben genannten vorgegebenen Randbedingungen ausgewertet. Allgemein verlaufen die Emissionsszenarien bis zum Jahr 2050 ziemlich ähnlich und gleichen dem Emissionsszenario B2. Daher wurde in KLIWA im Weiteren das Emissionsszenario A1B als Schwerpunkt betrachtet.

Auch im weiteren Verlauf beobachtete das Vorhaben KLIWA die Entwicklung bei der Klimamodellierung und wertete zum Beispiel die Modellläufe von CLM2008 (Hollweg H.-D. et al.) basierend auf dem Globalmodell ECHAM5 und den SRES-Szenarien A1B und A2 für eine weitere Verwendung aus. Die Ergebnisse sind in einem Kurzbericht von KLIWA verfügbar (KLIWA 2009).

Ab dem Jahr 2010 wurden Klimaprojektionen mit dem dynamischen regionalen Klimamodell COSMO-CLM4.8 (CCLM4.8) ausgewertet und bewertet (auf Basis des Globalmodells ECHAM5 und des Emissionsszenarios A1B). Dieses Klimamodell stellt die aktuellste Erweiterung des KLIWA-Ensembles dar. CCLM4.8 ist ein Regionales Klimamodell, das vom Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Rahmen des baden-württembergischen Forschungsvorhabens "Herausforderung Klimawandel" weiterentwickelt wurde. Im Rahmen von KLIWA wurden hierbei erstmals auch bias-korrigierte Klimaprojektionsdaten genutzt. Unter Punkt 5 wird näher auf diese in KLIWA genutzten Klimaprojektionen eingegangen. Auch der Beitrag von Schädler (dieser Band) befasst sich unter anderem mit dem Klimamodell CCLM4.8 und seinen Projektionen.

Zusätzlich beschäftigen sich die einzelnen KLIWA-Partner auch mit regionalen Klimaprojektionen, die nicht im gesamten KLIWA-Gebiet eingesetzt werden. Dies sind vor allem weitere Versionen des statistischen Modells WETTREG. Hierfür liegt für Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz eine andere Version von WETTREG2009 als für Bayern vor (WETTREG2009-BW/RLP bzw. WETTREG2009/BY). Auch findet WETTREG2010 (Kreienkamp et al.) bisher nur in Bayern Anwendung. Diese Projektionen werden in Ergänzung zu den gemeinsamen Klimaprojektionen in KLIWA genutzt, um auf regionale Besonderheiten eingehen zu können.

Bei der Betrachtung der Plausibilität der untersuchten Klimaprojektionen zeigte sich, dass mit den statistischen Modellen wie WETTREG die Vergangenheit erwartungsgemäß gut wiedergegeben wird, da diese Verfahren gemessene Stationsdaten für die Erstellung der Klimaprojektionen verwenden. Dagegen nimmt ihre Aussagekraft in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts methodisch bedingt ab. Ursache hierfür sind die dem Modell zugrundeliegenden statistischen Zusammenhänge zwischen großräumigen atmosphärischen Gegebenheiten und Messdaten vorhandener Klimastationen, die sich im Zuge des Klimawandels zukünftig aber durchaus ändern können. Aufgrund der hohen Übereinstimmung der Kontrollläufe mit den Messungen sind die statistischen Modelle allerdings gut für weitere Modellierungen z. B. des Wasserhaushalts bis etwa Mitte des Jahrhunderts geeignet. Dynamische Klimaprojektionen wie zum Beispiel REMO2006 oder CLM2008 wiesen ohne eine Bias-Korrektur bei den Untersuchungen in KLIWA Abweichungen auf (KLIWA 2009), die bisher eine Nutzung in der Wasserhaushaltsmodellierung nur eingeschränkt zuließen.

Daraus ergibt sich für KLIWA ein Ensemble an Klimaprojektionen, das einerseits dazu dient, die möglichen Veränderungen des Klimas, zum Beispiel von Temperatur oder Niederschlag zu beschreiben. Andererseits ermöglicht es mit vorher plausibilisierten, ausgewählten Klimaprojektionen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt zu ermitteln. Diese Ergebnisse werden in anderen Beiträgen in diesem Tagungsband präsentiert.



## 4 Klimaveränderungen für Süddeutschland

Anhand des in KLIWA genutzten Ensembles verschiedener regionaler Klimaprojektionen lassen sich für Süddeutschland und die einzelnen KLIWA-Partner Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern die nachfolgend beschriebenen Veränderungen in Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum 2021-2050 ermitteln. Die Veränderungen beziehen sich dabei auf den Zeitraum 1971-2000. Während die ermittelten Änderungen der Temperatur bei allen Projektionen ansteigende Tendenzen signalisieren, sind die Änderungssignale des Niederschlags vor allem im Winter regional aber auch bezogen auf das Ensemble an Klimaprojektionen weniger einheitlich. Abbildung 3 fasst die ermittelten Veränderungen für die KLIWA-Partner zusammen. Alle hier dargestellten Ergebnisse von Klimaprojektionen basieren auf dem Emissionsszenario A1B.

### 4.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur wird in Süddeutschland auch in der Zukunft (bis 2050) weiter deutlich ansteigen. Die Erwärmung fällt in Baden-Württemberg im hydrologischen Winter (November bis April / WHJ) je nach Region mit bis zu ca.  $+1,7\text{ °C}$  stärker aus als im hydrologischen Sommer (Mai bis Oktober / SHJ) mit Zunahmen bis zu ca.  $+1,4\text{ °C}$ . Die Temperaturerhöhung ist auch bei den einzelnen Monaten zu erkennen, und zwar nicht nur bei den mittleren, sondern auch bei den maximalen und minimalen Tagestemperaturen. Sie ist in den Monaten Dezember bis Februar am höchsten. Zu beachten ist hierbei, dass dies Mittelwerte für die einzelnen Bundesländer sind. Regional können größere oder auch kleinere Veränderungen auftreten.

In Bayern betragen die Zunahmen im WHJ zwischen  $+0,7\text{ °C}$  und  $+2,1\text{ °C}$  und im SHJ zwischen  $+0,5\text{ °C}$  und  $+1,8\text{ °C}$ . Auch die monatlichen Änderungen zeigen hier generell einen deutlichen Trend zu einer signifikant höheren Durchschnittstemperatur, lediglich in den Monaten März und April sind bei einigen wenigen Projektionen kaum signifikante Änderungen vorhanden.

### Projizierte Änderung von Temperatur und Niederschlag bis 2050

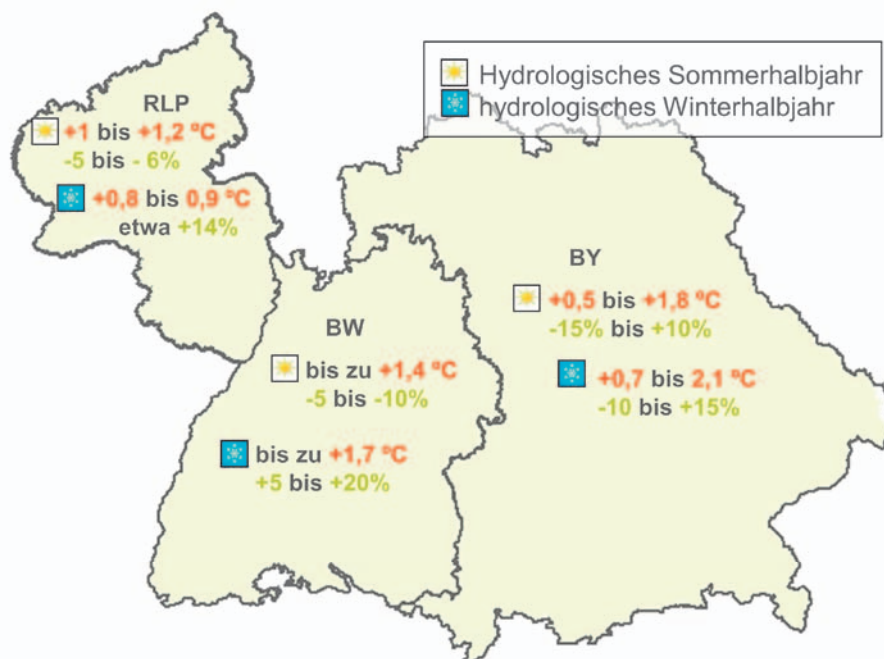


Abb. 3: Veränderungen von Temperatur und Niederschlag im Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000 für Süddeutschland



Für Rheinland-Pfalz ergeben sich Temperaturerhöhungen im SHJ von +1,0 °C und +1,2 C. Im WHJ fällt die Temperaturerhöhung von +0,8 °C und +0,9 C geringer aus. Dies ist ein Unterschied gegenüber den Regionen in Baden-Württemberg und Bayern, in denen die Temperaturveränderung im Winterhalbjahr stärker ausfällt.

Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist von besonderer Bedeutung, da die Temperatur vor allem im Alpenraum großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann. Es ist anzunehmen, dass künftig im Winter aufgrund der höheren Temperaturen weniger Schnee und vermehrt flüssiger Niederschlag fallen wird.

#### 4.2 Kenntage der Lufttemperatur

Die Zahl der Sommertage (Tage mit einer Maximaltemperatur von mehr als +25 °C) wird im Vergleich zu heute deutlich zunehmen. Auch die Zahl der heißen Tage (Tage mit einer Maximaltemperatur von mehr als +30 °C) wird steigen, je nach regionaler Klimaprojektion mancherorts teilweise um nahezu das Doppelte. Infolge der Klimaerwärmung wird abhängig von den betrachteten Klimaprojektionen zudem die Zahl der Frosttage (Tage mit einer Minimaltemperatur kleiner als 0 °C) und auch die Zahl der Eistage (Tage mit einer Maximaltemperatur von weniger als 0 °C) deutlich abnehmen, letztere teilweise um mehr als die Hälfte. Insgesamt ist damit von einer Verlängerung der Vegetationsperiode auszugehen. In Kapitel 6 ist in Abb. 10 die mittlere Veränderung der Kenntage beispielhaft für die Region Unterer Main dargestellt.

#### 4.3 Niederschläge

Die Niederschlagssummen werden sich im Sommer in Baden-Württemberg wenig verändern (je nach Projektion überwiegend geringfügige Abnahmen in der Größenordnung von ca. -5 % bis -10 %). Die Winterniederschläge werden jedoch deutlich zunehmen. Je nach Region und Modell beträgt die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme im Allgemeinen von +5 % bis +20 %, in manchen Regionen sogar bis zu +35 %. Ebenfalls steigen wird die Zahl der Tage mit hohen Niederschlägen (mehr als 25 mm pro Tag) im Winter. In den Hochlagen des Schwarzwalds wird in den Monaten Dezember bis Februar im Mittel etwa eine Verdoppelung erwartet.

Die Niederschläge in Bayern zeigen bis 2050 für das hydrologische Sommerhalbjahr bei einigen WETTREG Versionen geringfügige Abnahmen bis ca. -15 %. Der überwiegende Teil der Klimaprojektionen, darunter sämtliche dynamischen Modelle, verzeichnen nur schwache Änderungen des Niederschlags die innerhalb von  $\pm 10$  % liegen und damit innerhalb der (natürlichen) Niederschlagsvariabilität im Vergleichszeitraum. Bis Ende des Jahrhunderts ist allerdings übereinstimmend bei allen Modellen eine stärkere Abnahme des Niederschlags im SHJ erkennbar.

Im WHJ sind nur bei wenigen Modellen leichte Anstiege knapp über +10 % erkennbar (Ausnahme CCLM4.8 mit Zunahmen teilweise über +15%). Bei der Mehrzahl der Projektionen fallen die Änderungen mit weniger als  $\pm 10$  % daher statistisch nicht belastbar aus. Auch bis Ende des Jahrhunderts stellt sich kein übereinstimmender Trend aller Projektionen ein. Hauptsächlich die dynamischen Klimamodelle zeigen ansteigende Niederschläge, die nur in Nordbayern deutlich über +10 % hinausgehen.

Für Rheinland-Pfalz zeigen sich für die Niederschlagssumme geringe Veränderungen im räumlichen Mittel von -6 bis -5 % für das hydrologische Sommerhalbjahr. Insbesondere südlich des Hunsrücks ergeben sich regional auch höhere Abnahmen der Niederschläge. Im Gegensatz dazu zeigen sich im hydrologischen Winterhalbjahr größere flächenhafte Zunahmen von bis zu +14 %.



Bei der Betrachtung des Niederschlags ist nicht nur die Niederschlagsmenge sondern auch die Verteilung der Niederschlagsereignisse eine wesentliche Größe. Gerade länger anhaltende niederschlagsfreie Perioden in den warmen Sommermonaten verstärken den Wasserbedarf. In Baden-Württemberg werden aus heutiger Sicht übers Jahr betrachtet die Anzahl der Trockenperioden (mindestens 11 aufeinander folgende Tage mit einem Niederschlag von weniger als 1 mm pro Tag) künftig zwar abnehmen, im Sommer allerdings die Trockenperioden voraussichtlich länger andauern. In Bayern zeigt sich im Jahresmittel kaum eine Änderung der Anzahl der Trockentage (d. h. weniger als 1 mm Niederschlag pro Tag), im SHJ nehmen diese allerdings deutlich zu. Dies betrifft die längeren Trockenereignisse über 7 Tage, während die kurzen Trockenphasen < 7 Tagen im SHJ sogar seltener werden. Im WHJ zeichnet sich dabei ein gegenteiliger Verlauf ab.

## 5 Die Klimaprojektionen des regionalen Klimamodelles CCLM4.8

Die regionalen Klimaprojektionen von CCLM4.8 des IMK-IFU sind die aktuellsten Klimaprojektionen im KLIWA-Ensemble. Basierend auf dem Globalmodell ECHAM5 und dem SRES-Szenario A1B sind dies drei Läufe, die sich nur im Globalmodellantrieb von ECHAM5 geringfügig unterscheiden. Der Unterschied besteht in unterschiedlichen Initialisierungen des Globalmodells ECHAM5, die ausreichen, um unterschiedliche Klimaverläufe zu erzeugen (Schädler et al.). Mit den so erzeugten Läufen 1, 2 und 3 von ECHAM5 wurde je ein Lauf von CCLM4.8 erzeugt. Ersichtlich wird dabei auch, welche Bandbreite der Ergebnisse bereits einem einzigen regionalen Klimamodell mit verschiedenen Läufen des gleichen Globalen Klimamodells innewohnen kann.

Zudem stellen diese Projektionen für KLIWA die ersten dar, die mit Hilfe einer Bias-Korrektur (siehe 2.2) bezüglich verschiedener Größen wie Temperatur und Niederschlag korrigiert wurden. Als Referenz wurden dazu vor allem die HYRAS-Datensätze des DWD (Rauthe et al.) genutzt. Für die Ergebnisdarstellung in diesem Beitrag werden für die Größen Temperatur und Niederschlag nur die mit der Methode „linear-scaling“ bias-korrigierten Daten verwendet. Dies ist insofern zu beachten, da bei einer Bias-Korrektur das Änderungssignal nicht zwingend erhalten bleibt. Weitere Informationen zu den Klimaprojektionen von CCLM4.8 sind ebenfalls bei Schädler et al. zu finden. In diesem Beitrag sollen beispielhaft aktuelle Ergebnisse dieser Projektionen für Temperatur und Niederschlag dargestellt werden. Für die Nutzung der regionalen Klimaprojektionen in der Wasserhaushaltsmodellierung sind zudem noch die weiteren meteorologischen Eingangsgrößen relative Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit sowie Luftdruck von Bedeutung. Die Veränderungen dieser Größen in der Zukunft sind bei CCLM4.8 nur geringfügig, daher soll in diesem Beitrag nicht näher darauf eingegangen werden.

### 5.1 Veränderungen der Lufttemperatur

Wie auch die anderen in KLIWA ausgewerteten Klimaprojektionen zeigen die drei Läufe von CCLM4.8 Zunahmen der Lufttemperatur. Im SHJ liegen diese Zunahmen für das gesamte KLIWA-Untersuchungsgebiet im Mittel bei 0,8 bis 1,2 °C im Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000. Im WHJ sind diese meist stärker ausgeprägt, mit Zunahmen von 0,9 bis 1,4 °C. Regional bestehen dabei nur geringe Unterschiede (siehe aktuelle KLIWA-Broschüre KLIWA 2012).

### 5.2 Veränderungen des Niederschlags

In Abbildung 4 sind die flächenmäßigen Veränderungen des Niederschlags aller drei CCLM-Läufe im WHJ für das KLIWA-Untersuchungsgebiet dargestellt. Alle Läufe ergeben im Zeitraum 2021-2050 gegenüber 1971-2000 Zunahmen, in der Höhe des Änderungssignals sind allerdings Unterschiede festzustellen. Der Lauf 2 zeigt nahezu flächendeckend eine höhere Zunahme des Niederschlags als Lauf 1. Im Gegensatz dazu verzeichnet Lauf 3 geringere

Veränderungen, im Südosten von Bayern treten hier im WHJ sogar regional Abnahmen auf. Im Mittel ergibt sich für das KLIWA-Untersuchungsgebiet eine Zunahme von +12 % bei Lauf 1, von +17 % bei Lauf 2 und von nur +5 % bei Lauf 3. Abb. 4 verdeutlicht damit zusätzlich, wie regional unterschiedlich das Änderungssignal sein kann. Hierbei sei aber auch noch einmal darauf hingewiesen, dass die Unsicherheit der Aussage wächst, je kleinräumiger man einen Ausschnitt betrachtet.

Für das SHJ werden von allen drei CCLM4.8 Läufen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet im Mittel geringe Veränderungen von -3 bis +2 % modelliert. Regional treten hier zwischen den 3 Läufen nur unwesentliche Unterschiede auf, daher wird auf eine Darstellung verzichtet.

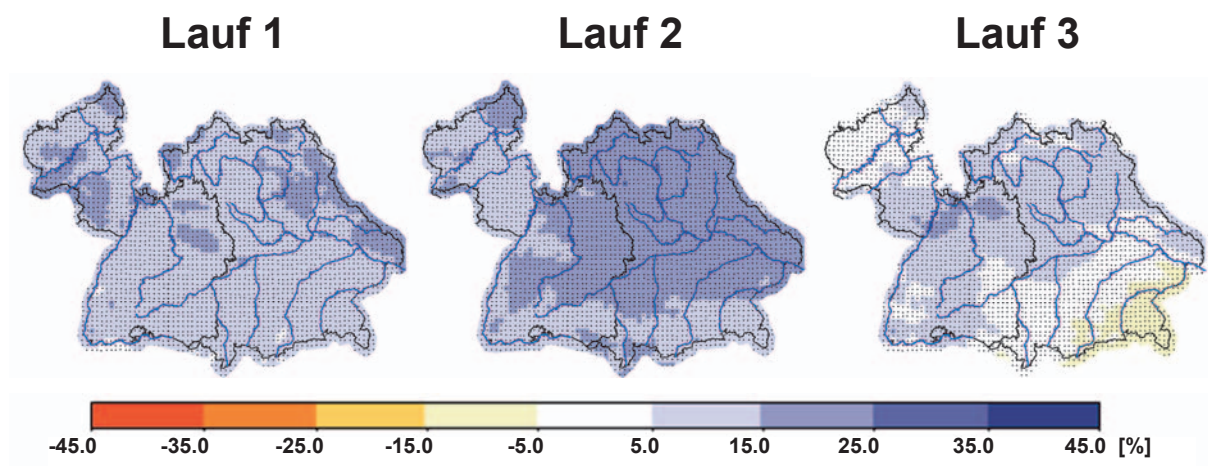


Abb. 4: Vergleich der 3 CCLM4.8 Läufe – Flächenhafte Änderungssignale des Niederschlags im Winterhalbjahr 2021-2050 vs. 1971-2000

Im Rahmen von KLIWA werden verschiedene Flussgebiete zu KLIWA-Regionen aggregiert. So ist es möglich, Veränderungen in den einzelnen Projektionen für verschiedene Flussgebiete im KLIWA-Untersuchungsraum darzustellen und zu vergleichen, um regionale Schwerpunkte zu identifizieren. Dies ist auch im Hinblick auf die in KLIWA häufig folgende Wasserhaushaltsmodellierung interessant, da hier unter Umständen bereits Regionen mit möglichen hohen Veränderungen im Wasserhaushalt identifiziert werden können. Abbildung 5 fasst beispielhaft die mittleren Veränderungen des Niederschlags von CCLM4.8 Lauf 1 für beide Halbjahre für die KLIWA-Regionen zusammen.

Es zeigen sich innerhalb des Laufs 1 leicht stärkere Zunahmen (+12,7 % bis +15,6 %) des Niederschlags im WHJ im Norden des KLIWA-Gebiets sowie relativ einheitliche geringe Veränderungen im SHJ (+1,4 bis -5,9 %). Dabei ist allerdings auch zu beachten, dass diese Art der Darstellung nur ein Ausschnitt aus dem KLIWA-Ensemble von mehreren Klimaprojektionen ist. Die in Abbildung 5 dargestellten Veränderungen des Niederschlags sind in das KLIWA-Ensemble einzuordnen und sind Bestandteil einer Bandbreite, die es zu berücksichtigen gilt. Wie aus Abbildung 4 ersichtlich, können die modellierten Veränderungen bei einem anderen betrachteten Lauf bereits sehr unterschiedlich sein.

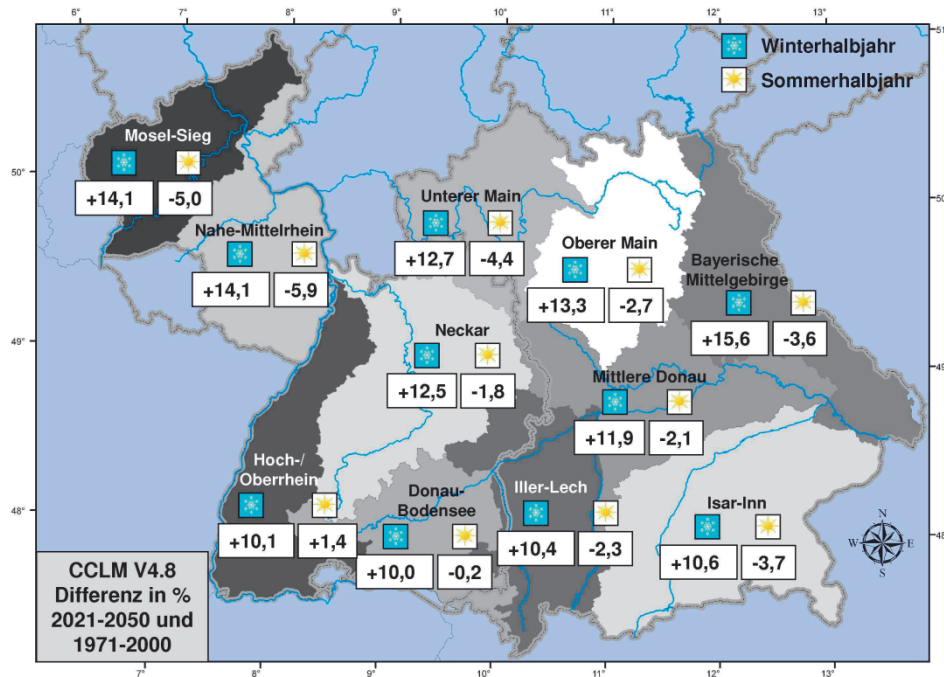


Abb. 5: Änderung des Gebietsniederschlags in % am Beispiel CCLM4.8 Lauf 1 für Sommer und Winter für die Zeiträume 2021-2050 vs. 1971-2000

## 6 Bandbreite der Klimaprojektionen am Beispiel der Region Unterer Main

Wie bereits beschrieben, ist es notwendig, mehrere Klimaprojektionen zu betrachten, um die möglichen Klimaveränderungen in der Zukunft zu erfassen. Mit einem Ensemble verschiedener regionaler Klimaprojektionen wird eine Bandbreite möglicher Veränderungen für die Zukunft aufgespannt. Da der Tagungsort des 5. KLIWA-Symposiums im Würzburg liegt, sollen die im Rahmen von KLIWA in Bayern durchgeführten Auswertungen für die Region Unterer Main hier beispielhaft präsentiert werden. Die dargestellten Auswertungen sind Bestandteil der Klimaberichte für Bayern (LfU 2012), die neben Aussagen für Gesamtbayern auch Untersuchungen für die verschiedenen Wasserrahmenrichtlinienregionen (vgl. Abb. 7). enthalten. Sie wurden für diesen Beitrag um die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen aus CCLM4.8 ergänzt.



Abb. 7: WRRL-Regionen für die Auswertungen im Rahmen von KLIWA in Bayern



Die für die Region Unterer Main ausgewerteten 13 Klimaprojektionen stellen nur eine Auswahl von vielen möglichen Realisationen von Modellketten dar. Einen Überblick zu den betrachteten Modellkombinationen gibt Abb. 8. Als Antrieb der sieben RCMs sind für Bayern bei den vorliegenden Auswertungen drei unterschiedliche GCMs unter Annahme des Emissionsszenarios A1B verwendet worden. Die nachstehenden regionalen Klimaprojektionen sind - sofern nicht anders angegeben - mit dem Globalmodell ECHAM5 angetrieben. Deren Bezeichnungen orientieren sich im Folgenden an den Namen der RCMs. Die Projektionen zeigen somit Ergebnisse unterschiedlicher Kombinationen der oben vorgestellten GCMs und RCMs unter dem gemeinsamen Emissionsszenario A1B.

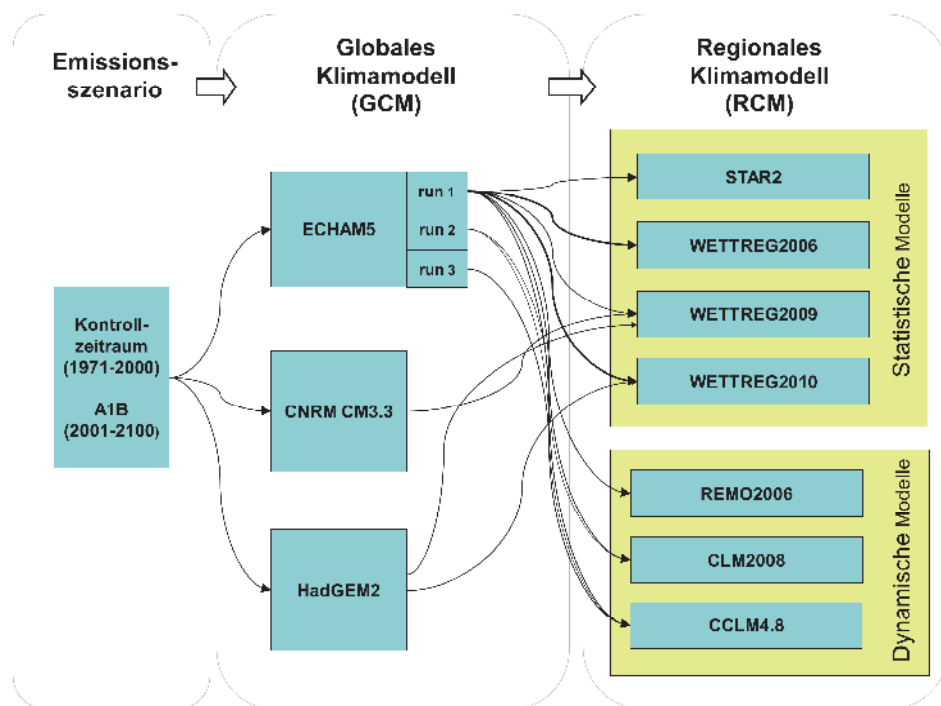


Abb. 8: Darstellung der Modellketten der bayernweit ausgewerteten Klimaprojektionen ergänzt um CCLM4.8

Im Weiteren werden die Ergebnisse der Klimaprojektionen beispielhaft herausgehoben, die auf den statistischen Regionalmodell WETTREG2006 (orange) und dem dynamischen Regionalmodell CCLM4.8 (blau-grün) beruhen. Beide Klimamodelle wurden im Vorhaben KLIWA für Untersuchungen in ganz Süddeutschland genutzt.

## 6.1 Temperaturänderung

Allgemein zeigt die Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur für die nahe Zukunft (2021–2050) eine deutliche Erwärmung für das Gebiet Unterer Main. Da die Jahreswerte entsprechend der natürlichen Variabilität stark schwanken, sind die Entwicklungen als 30-jährige gleitende Mittel in Abb. 9 dargestellt. Der hellgrau markierte Bereich von  $\pm 0,3$  °C berücksichtigt die Variabilität der Temperatur im Kontrollzeitraum 1971–2000, d. h. erst wenn ein Änderungssignal diesen Bereich verlassen hat, kann von einer deutlichen Änderung ausgegangen werden. Der dunkelgraue markierte Bereich ab 2065 stellt aus Sicht von KLIWA den Bereich dar, ab dem bei statistischen Klimaprojektionen die Unsicherheit sehr stark zunimmt, so dass nur noch orientierende Aussagen möglich sind.

Allen regionalen Klimaprojektionen ist übereinstimmend ein klar signifikanter Anstieg der mittleren Jahrestemperatur gemeinsam, d. h. die Zunahmen fallen deutlicher aus als aufgrund der natürlichen Variabilität der Jahrestemperatur im Kontrollzeitraum zu erwarten





wäre. Das Änderungssignal der ausgewerteten 13 Klimaprojektionen reicht von  $+0,8\text{ °C}$  bis  $+2,0\text{ °C}$ , wobei die Hälfte der Klimaprojektionen einen Anstieg über  $+1,2\text{ °C}$  verzeichnet. Die drei Läufe von CCLM4.8 ordnen sich dabei in die Hälfte der Klimaprojektionen mit einem geringeren Anstieg ein. Die Temperaturänderung im Untersuchungsgebiet fällt insgesamt ähnlich hoch aus wie im bayerischen Durchschnitt. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist in der Region mit einem weiteren deutlichen Anstieg der mittleren Temperatur zu rechnen.

Neben der mittleren Jahrestemperatur ist auch die innerjährliche Entwicklung der Temperatur von Interesse um z. B. Änderungen der Vegetationsperiode abschätzen zu können. Diese Veränderungen werden für die meteorologischen Jahreszeiten ausgewertet und sind im Klimabericht für den Unteren Main dargestellt (LfU 2012). Allen Jahreszeiten gemein ist eine Temperaturzunahme, die im Frühjahr leicht geringer ausfällt als in den anderen Jahreszeiten. Ein Großteil der Bandbreite der Veränderungen liegt in allen Jahreszeiten im Bereich von  $+0,5$  bis  $+2,0\text{ °C}$ . Im Winter und Frühjahr ist sie deutlich ausgeprägter als im Sommer und Herbst, wo insgesamt eine etwas bessere Übereinstimmung der Projektionen vorliegt.

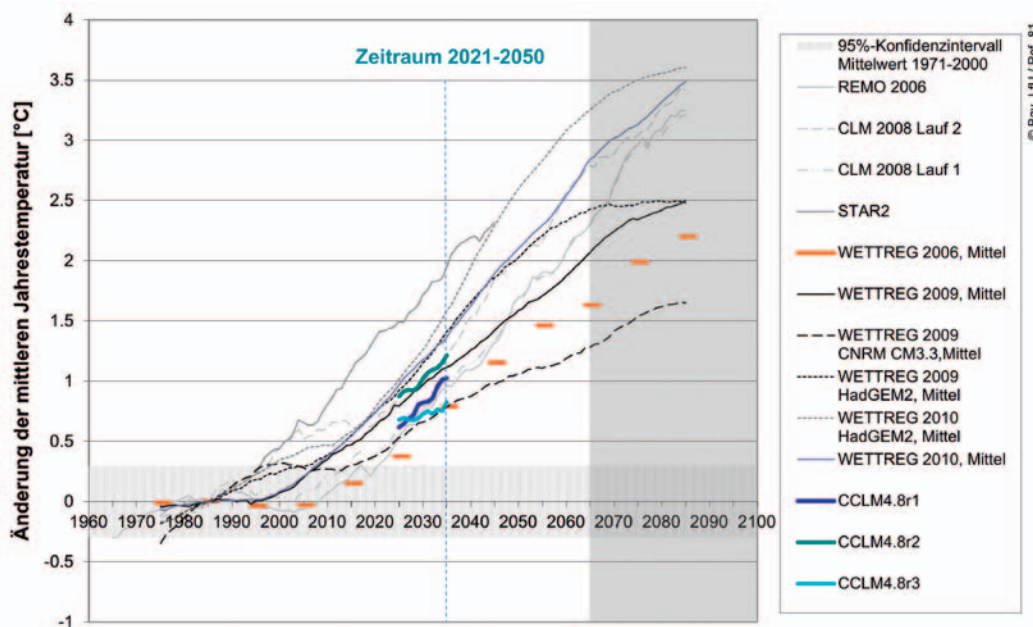


Abb. 9: Änderung des 30-jährigen, gleitenden Mittelwerts der Jahrestemperatur gegenüber 1971–2000 (schwarzer Punkt) für Klimaprojektionen des Emissionsszenarios A1B; beispielhaft für die Region Unterer Main (die graue Linie um die x-Achse gibt die Variabilität der Temperatur im Kontrollzeitraum 1971–2000 an; der graue Bereich rechts beschreibt den Zeitraum, ab dem gemäß KLIWA statische Modelle nur noch orientierende Aussagen liefern können; der gestrichelte Linie greift die Veränderung für den Zeitraum 2021–2050 heraus)

Zusätzlich zur Betrachtung der mittleren Temperatur eignen sich Kenntage der Temperatur um zukünftige Veränderungen des Klimas zu charakterisieren. In Abb. 10 ist die mittlere Veränderung der Häufigkeit der Kenntage pro Jahr dargestellt sowie als Zahlenwerte die durchschnittliche Anzahl an Kenntagen der Vergangenheit. Wie bereits bei der innerjährlichen Temperaturverteilung angedeutet, führt die starke Erwärmung auch zu Änderungen bei den Tagesmaxima und Tagesminima – deutlich ablesbar an der Abnahme der jährlichen Anzahl an Eis- und Frosttagen (Tageshöchst- bzw. Tagestiefsttemperatur unter  $0\text{ °C}$ ) und der Zunahme der jährlichen Anzahl an Sommer- und Heißen Tagen (Tageshöchsttemperatur über  $+25\text{ °C}$  bzw.  $+30\text{ °C}$ ).

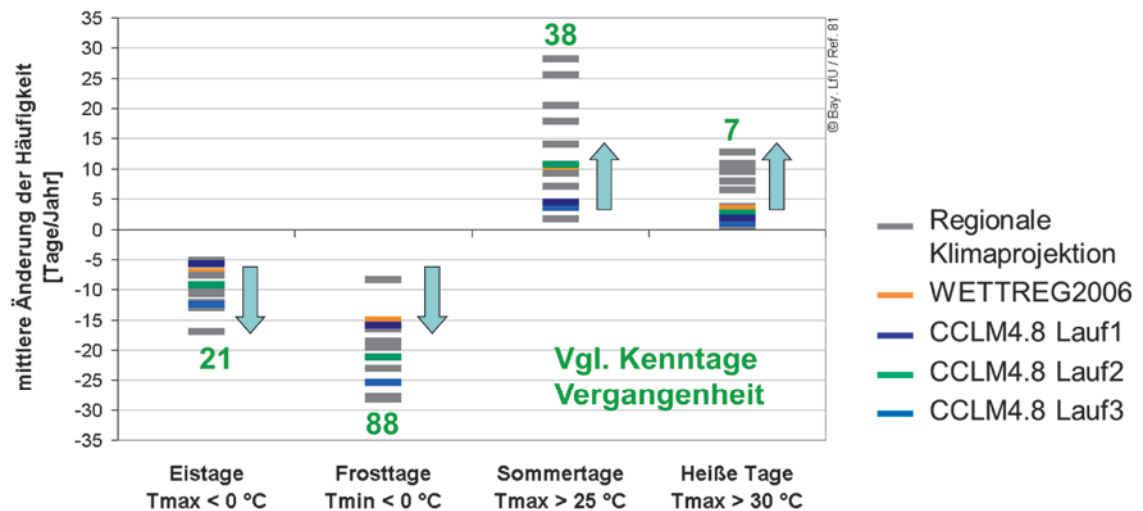


Abb. 10: Mittlere Veränderung der Kenntage pro Jahr 2021–2050 gegenüber 1971–2000 beispielhaft für die Region Unterer Main

## 6.2 Veränderung des Niederschlags

Die zu erwartende zukünftige Niederschlagsentwicklung lässt für die Region Unterer Main bei den 13 betrachteten Projektionen nur bedingt übereinstimmende Tendenzen erkennen. Im hydrologischen Winterhalbjahr sind bei einigen Projektionen deutliche Zunahmen des Niederschlags vorhanden, etwa bei der Hälfte der regionalen Klimaprojektionen ändern sich die Niederschlagshöhen nur geringfügig. Trotzdem fällt im Gebiet Unterer Main das Änderungssignal insgesamt etwas stärker aus als im bayerischen Durchschnitt. Wie in ganz Bayern ist auch hier im hydrologischen Sommerhalbjahr mit Abnahmen des Gebietsniederschlags zu rechnen, die allerdings erst in der zweiten Jahrhunderthälfte deutlicher werden.

Die Aufteilung in hydrologische Halbjahre in Abb. 11 und Abb. 12 zeigt die unterschiedlichen Charakteristiken der Änderungssignale des Niederschlags an. Analog der Temperatur berücksichtigt der markierte, hellgrau Bereich von  $\pm 10\%$  die Variabilität des halbjährlichen Niederschlags im Kontrollzeitraum 1971–2000, d. h. erst wenn ein Änderungssignal diesen Bereich verlassen hat, kann von einer deutlichen Änderung ausgegangen werden. Aufgrund der sehr hohen natürlichen Variabilität des Niederschlags sind die Entwicklungen analog der Temperatur als 30-jährige gleitende Mittel dargestellt.

Im WHJ ist bis 2050 teilweise ein Anstieg des Gebietsniederschlags erkennbar, der bei mehreren Projektionen außerhalb des Bereichs von  $\pm 10\%$  liegt (vgl. Abb. 11). Dabei ist bei den Klimaprojektionen eine Zweiteilung zu beobachten: während einige Projektionen eine deutliche Zunahme des Niederschlags bis 2050 aufzeigen, sind bei den übrigen nur sehr geringe Veränderungen erkennbar. Deutliche Zunahmen im Zeitraum 2021–2050 zeigen unter anderem auch 2 Läufe von CCLM4.8, verschiedene Projektionen basierend auf dem statischen Klimamodell WETTREG weisen dagegen nur geringe Veränderungen auf. Da in der Vergangenheit bereits ein deutlicher Anstieg des Niederschlags im WHJ beobachtet wurde, erscheint eine weitere Niederschlagszunahme durchaus plausibel. Dies zeigt auch die allgemeine Tendenz bis 2100, bei der alle Klimaprojektionen Zunahmen des Niederschlags zeigen, auch wenn in deutlich unterschiedlicher Ausprägung.

Ähnlich wie im WHJ sind gemäß Abb. 12 im SHJ die Änderungen im Zeitraum 2021–2050 bezogen auf den Kontrollzeitraum nur gering. Die Tendenz ist jedoch eindeutiger als beim Winterhalbjahr: eine leichte Abnahme des Niederschlags ist erkennbar, die erst in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts stärker als  $-10\%$  ausfällt. Die CCLM4.8 Projektionen sind ebenfalls uneinheitlich und zeigen im verfügbaren Zeitraum Änderungen von ca.  $\pm 5\%$ .

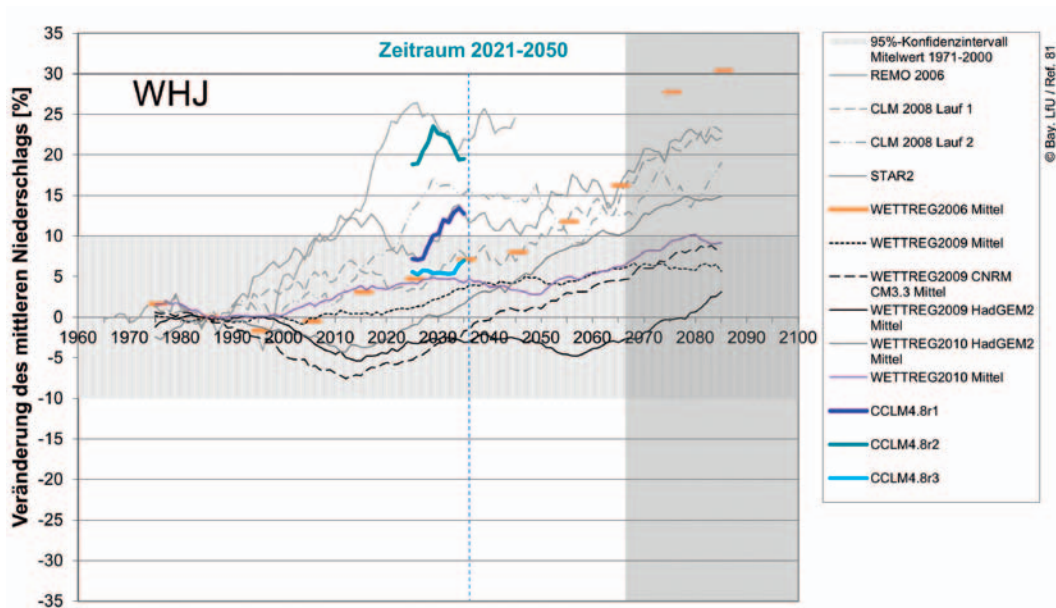


Abb. 11: Änderung des 30-jährigen, gleitenden Mittelwerts des Niederschlags im WHJ gegenüber 1971–2000 (schwarzer Punkt) für Klimaprojektionen des Emissionsszenarios A1B; beispielhaft für die Region Unterer Main (die graue Linie um die x-Achse gibt die Variabilität des Niederschlag im Kontrollzeitraum 1971–2000 an; der graue Bereich rechts beschreibt den Zeitraum, ab dem gemäß KLIWA statische Modelle nur noch orientierende Aussagen liefern können; der gestrichelte Linie greift die Veränderung für den Zeitraum 2021–2050 heraus)

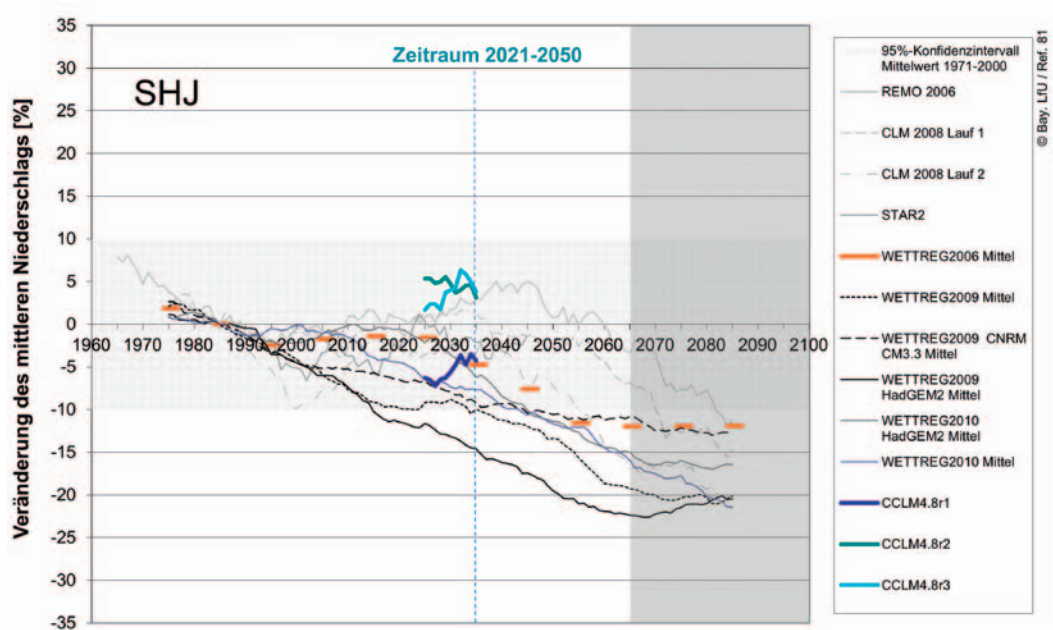


Abb. 12: Änderung des 30-jährigen, gleitenden Mittelwerts des Niederschlags im SHJ gegenüber 1971–2000 (schwarzer Punkt) für Klimaprojektionen des Emissionsszenarios A1B; beispielhaft für die Region Unterer Main (die graue Linie um die x-Achse gibt die Variabilität des Niederschlag im Kontrollzeitraum 1971–2000 an; der graue Bereich rechts beschreibt den Zeitraum, ab dem gemäß KLIWA statische Modelle nur noch orientierende Aussagen liefern können; der gestrichelte Linie greift die Veränderung für den Zeitraum 2021–2050 heraus)

Die hier für den Unteren Main betrachteten Klimaprojektionen zeigen eine Bandbreite für das zukünftige Klima im untersuchten Flussgebiet auf. Diese ist letztlich Ausdruck der Unsicherheiten in den genutzten Modellketten, so dass sich robuste Aussagen nur aus übereinstimmenden Signalen der Projektionen ableiten lassen. Weitergehende Auswertungen z. B. hinsichtlich der Veränderung von Starkniederschlägen, der Länge der Vegetationsperiode oder der Dauer von Trockenperioden liegen gegenwärtig noch nicht vor, werden aber im Rahmen von KLIWA sukzessive durchgeführt.

## 7 Fazit/Ausblick

Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt abschätzen zu können, ist es notwendig, regionale Klimaprojektionen zu nutzen. Aufgrund der mit den einzelnen Modellschritten verbundenen Unsicherheiten ist es jedoch geboten, mehrere Klimaprojektionen zu betrachten. Hierfür stehen verschiedenen Modellketten von Globalen und Regionalen Klimamodellen zur Verfügung. Spannweite und Richtung der daraus resultierenden Ergebnisbandbreite lassen für die betrachteten Klimavariablen Rückschlüsse auf das Ausmaß der Unsicherheiten und damit letztlich die Sicherheit der getroffenen Aussagen über die projizierte Klimaentwicklung zu. Beispielsweise können dort wo sich gemeinsame Tendenzen in den regionalen Klimaprojektionen zeigen, belastbare Aussagen für ein weiteres Vorgehen ermitteln.

Steht nur eine begrenzte Auswahl an Klimaprojektionen zur Verfügung, ist dies bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen und gegebenenfalls deren Aussagekraft entsprechend einzuschränken. Dennoch lassen sich auch in diesem Fall gleichgerichtete Aussagen herausfiltern, die eine fundierte Wahl ermöglichen, an welchen Bereich der Bandbreite sich eine Anpassung orientieren soll - je nach betroffener Nutzung und erforderlichen Sicherheitsmaßstäben.

Die bisherigen Auswertungen der Klimaprojektionen im KLIWA-Ensemble für 2021-2050 zeigen deutlich, dass die Lufttemperatur in Süddeutschland weiter zunehmen wird. Mit Ausnahme von Rheinland-Pfalz fallen die Temperaturerhöhungen im Winterhalbjahr meist deutlicher aus als im Sommerhalbjahr. Dementsprechend werden sich auch die Zahlen der Kenntage verändern, Kenntage für kalte Verhältnisse werden abnehmen, Kenntage für höhere Temperaturen zunehmen. Für den Niederschlag zeichnen sich im Sommerhalbjahr geringfügige Abnahmen für das KLIWA-Untersuchungsgebiet ab, während im Winterhalbjahr Zunahmen des Niederschlags im Vordergrund stehen. Je nach Region sind diese Zunahmen deutlicher oder weniger stark ausgeprägt.

Bereits für die nachgehende Nutzung in der Wasserhaushaltsmodellierung bei KLIWA sind nicht alle verfügbaren regionalen Klimaprojektionen gleich gut anwendbar. Daher wird in KLIWA die Plausibilität der Klimaprojektionen geprüft und nur geeignete Projektionen werden weitergehend genutzt. Eine Möglichkeit, eine größere Anzahl von Klimaprojektionen nutzbar zu machen, ist dabei die Bias-Korrektur. Hiermit hat KLIWA mit den drei aktuellen COSMO-CLM4.8 Läufen des IMK-IFU in Karlsruhe erste Erfahrungen gesammelt, die in Zukunft weiter vertieft werden.

Es ist notwendig, ein Bewusstsein für die vorhandenen Unsicherheiten in dem genutzten Ensemble von Klimaprojektionen zu entwickeln und dennoch die gegebene Notwendigkeit der Anpassung im Blick zu behalten. Dies ist sicherlich eine Herausforderung, der auch KLIWA gegenübersteht. Einerseits stellt sich die Frage, wie belastbar die bisherigen Ergebnisse und Aussagen sind, wenn man das auszuwertende Ensemble größer aufspannt und weitere, aktuellere Projektionen hinzunimmt. Andererseits ist die Kommunikation der ermittelten Bandbreite der Veränderungen mit einer gezielten Interpretation für die Anpassung nötig.





Gleichzeitig ergibt sich daraus auch die Aufgabe für KLIWA, die weitere Entwicklung in der Klimamodellierung zu begleiten, neue Forschungserkenntnisse zu berücksichtigen und aktuelle Klimaprojektionen in das bestehende Ensemble von KLIWA einzuordnen. Zudem besteht das Ziel, mit aktuellen Klimaprojektionen Unsicherheiten in den ermittelten zukünftigen Veränderungen zu verringern oder einzugrenzen. Leider ist dies nicht immer möglich.

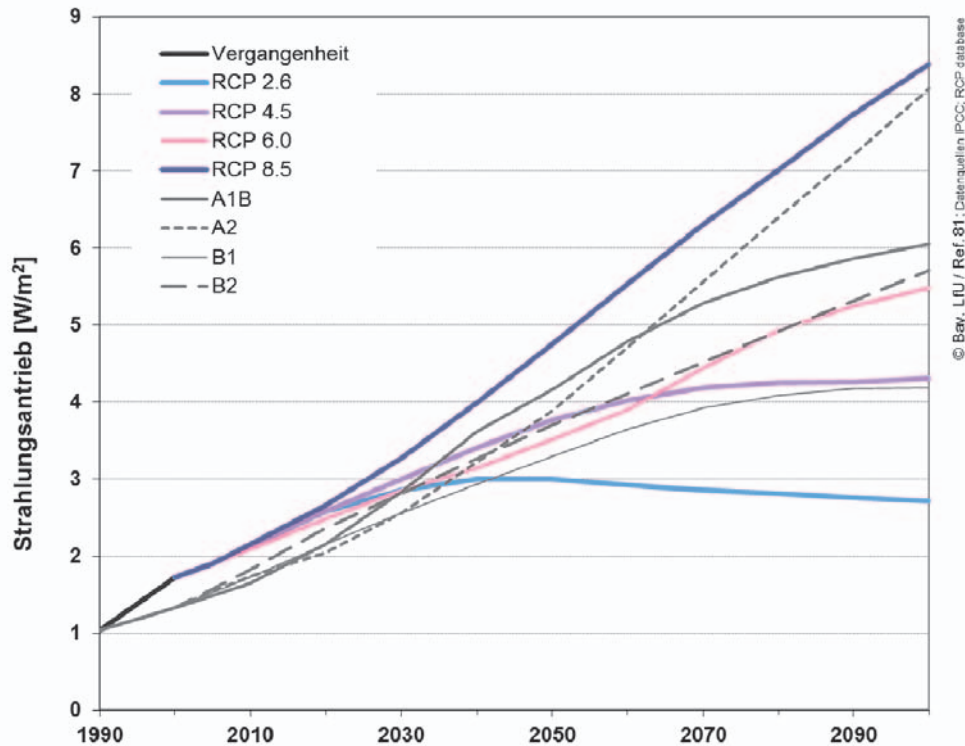


Abb. 13: Weltweiter anthropogen verursachter Strahlungsantrieb in SRES- und RCP-Szenarien

Dies betrifft vor allem auch die neuen Ergebnisse, die im Rahmen des 5. IPCC Bericht zu erwarten sind. Basierend auf einer überarbeiteten Herangehensweise werden demnächst neue Globale und Regionale Klimaprojektionen zur Verfügung stehen. Grundlage hierfür sind nicht mehr die bisher verwendeten SRES-Emissionsszenarien sondern sogenannte Representative Concentration Pathways (RCPs) (für weitere Informationen siehe Van Vuuren et al.). Der Nachteil der bisher verwendeten SRES-Szenarien besteht darin, dass die zugrundeliegenden sozioökonomischen Annahmen nur schwer oder überhaupt nicht vorhersagbar sind. Die neu entwickelten RCP-Szenarien gehen daher nicht mehr von einer vermutlichen Menschheitsentwicklung und deren Emissionen aus. Stattdessen definieren sie direkt mehrere festgelegte abgestufte Energiezunahmen (Strahlungsantrieb), welche die Erde durch die Verstärkung des Treibhauseffekts zusätzlich bekommen könnte. Abbildung 13 zeigt die Verläufe des Strahlungsantriebs der SRES-Szenarien und RCPs im Vergleich. Der Beitrag von Herrn Marotzke in diesem Band geht näher auf die zu erwartenden neuen Klimasimulationen ein. Das Vorhaben KLIWA wird die neuen Projektionen des 5. IPCC Berichts prüfen und die daraus ermittelbaren Veränderungen für das Klima und den Wasserhaushalt seinen bisherigen Ergebnissen gegenüberstellen. Mit diesen neuen Klimaprojektionen kann auf aktueller wissenschaftlicher Grundlage das bisherige KLIWA-Ensemble erweitert und die Bandbreite der zu erwartenden Veränderungen klarer bestimmt werden. Damit wird der Bereich möglicher Veränderungen aufgezeigt, innerhalb dem wir handeln müssen.



## 8 Literatur

- Ehret U. et al. (2012): HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 9, 5355–5387
- Hollweg H.-D. et al (2008): Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios; Technical Report No.3, Gruppe Modelle & Daten, Hamburg, 152 S.
- Jacob D. et al (2008): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland, UBA Forschungsbericht 204 41 139, ISSN: 1862-4359, 159 S.
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, KLIWA-Heft 9, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe
- KLIWA (2009): Regionale Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierung - Ergebnisse der regionenspezifischen Auswertungen von Klimaprojektionen im Vorhaben KLIWA, Kurzbericht des Vorhaben KLIWA, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de), 8. Seiten
- KLIWA (2011): Monitoringbericht 2011, Vorhaben KLIWA, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de), 40 S.
- KLIWA (2012): Klimawandel im Süden Deutschlands / Ausmaß – Auswirkungen – Anpassung, Vorhaben KLIWA, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de), 24 S.
- Kreienkamp F. et al. (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010, im Auftrag des UBA, 60 S.
- LfU (2012): Auswertung regionaler Klimaprojektionen - Klimabericht Bayern, Herausgeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt Klimaberichte Bayern und Regionalbericht Unterer Main, [www.bestellen.bayern.de](http://www.bestellen.bayern.de)
- Rauthe, M. et al. (2012): Hydrologisch relevante Rasterdatensätze (HYRAS) für das Bundesgebiet und die internationalen Flussgebietsanteile von Rhein, Donau und Elbe; Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Beitrag in: Wasser ohne Grenzen, Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März 2012 an der Albert-Ludwigs-Universität in Freiburg, Herausgeber: Weiler M.; S. 249 - 253
- Schädler G. et al. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate, Project Report des Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology; 86 S.
- Spekat A. et al (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2, UBA Forschungsbericht 204 41 138, 149 S.
- Teutschbein C., Seibert J. (2012): Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods, *Journal of Hydrology* (456–457) S. 12–29
- Van Vuuren D.P. et al. (2011), The representative concentration pathways: an overview, *Climatic Change*, 109, Seiten 5-31



## Klimaentwicklung in Süddeutschland - Untersuchungen und Auswertergebnisse des Deutschen Wetterdienstes

Gerhard Hofmann  
Deutscher Wetterdienst

In der folgenden Abbildung werden die Veränderungen der Klimaparameter dargestellt, jeweils auf der Basis mehrerer, in diesem Fall 19 Klimamodelle. Es wird in Fortsetzung des jetzt schon deutlich erkennbaren Trends zur Erhöhung der Temperatur (seit 1881 in Deutschland zwischen 0,5 und 1,5 K) ein weiterer Anstieg prognostiziert, der bis zu den letzten Jahrzehnten dieses Jahrhunderts in Deutschland etwa 3 bis 4 K ausmacht. Im Mittel, also mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 %, steigt die Temperatur schon bis 2050 um noch mal 1 bis 1,5 K an, die Werte des 85. Perzentils zeigen sogar rund 2,5 K an. Die genannten 3 bis 4 K bis zum Ende des Jahrhunderts entsprechen der zu erwartenden mittleren Erwärmung, einige Modelle jenseits des 85. Perzentils sagen sogar eine Temperaturzunahme von bis zu 5 K gerade im Alpenraum voraus.

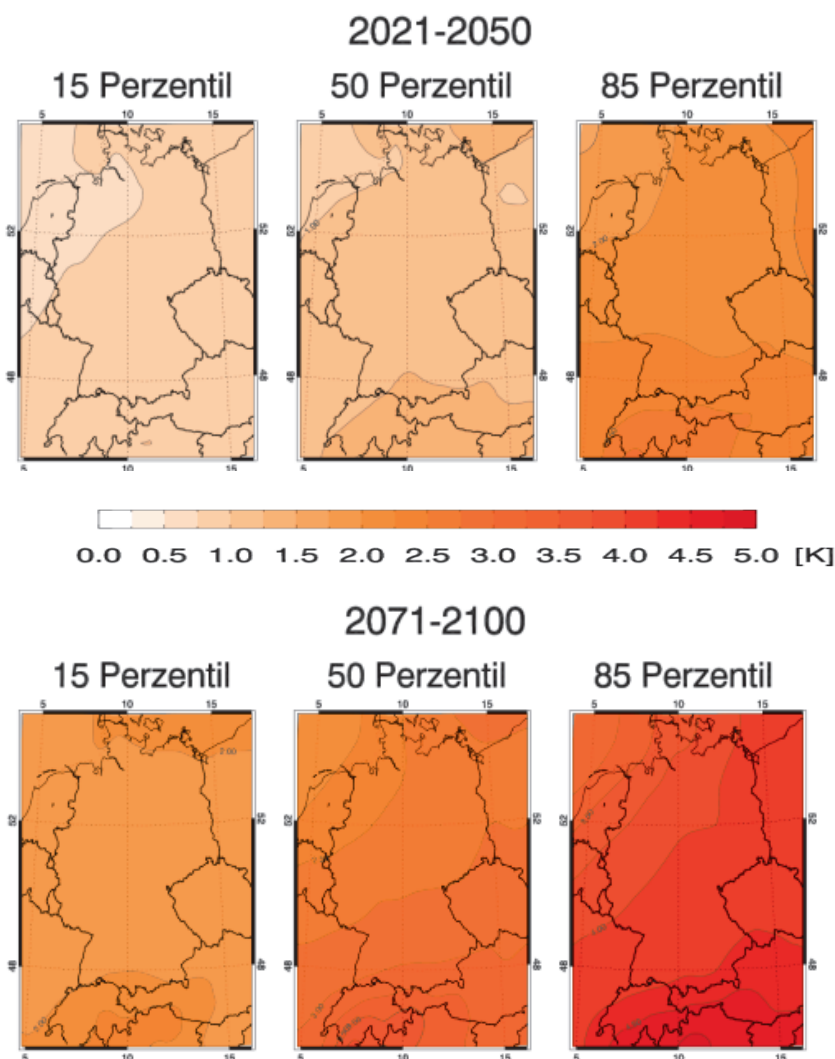


Abb. 1: Änderung der Jahresmitteltemperatur auf Basis von 19 Klimaprojektionsläufen

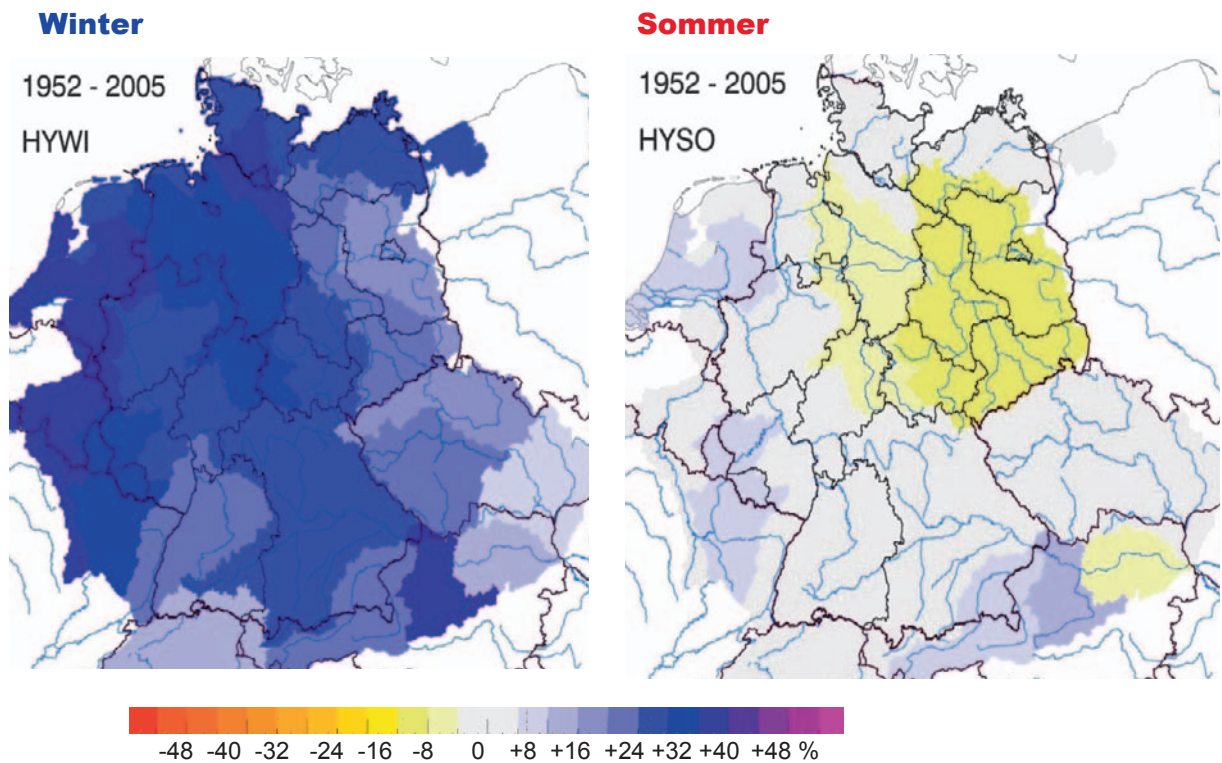


Abb. 2: Schon in den vergangenen Jahrzehnten zeigt sich eine Zunahme des Niederschlags im Winter und eine überwiegend geringe Abnahme in Sommer

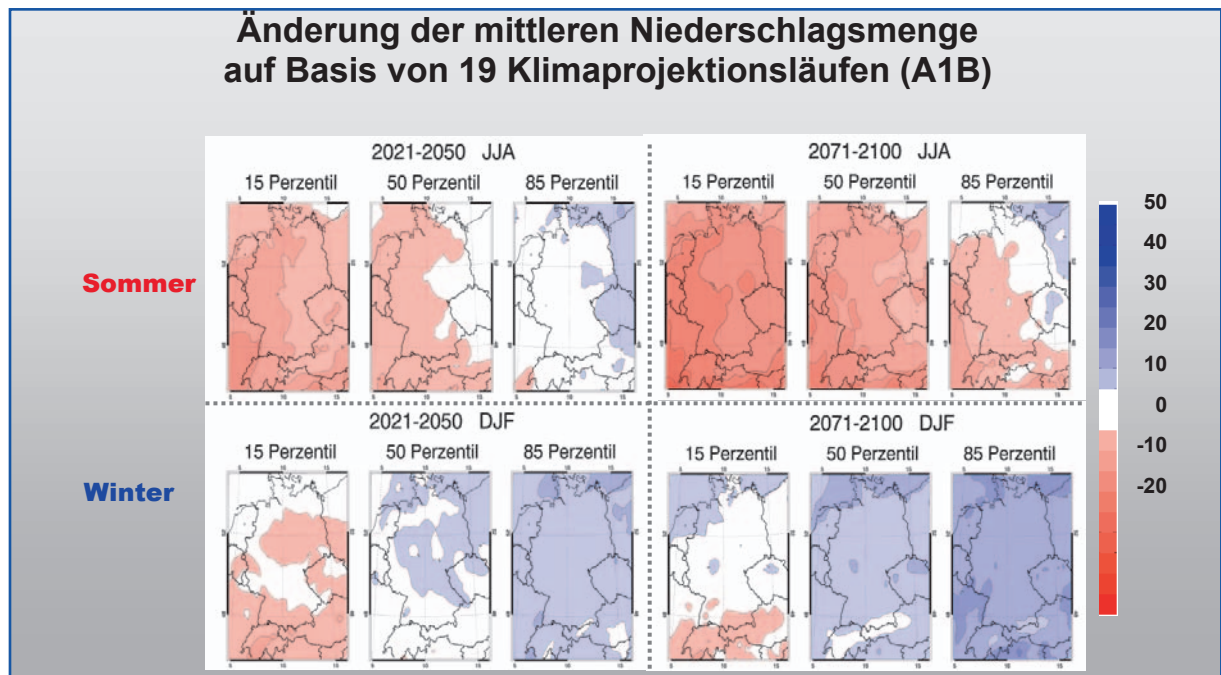


Abb. 3



Auch die Zahl der heißen Tage wird sich deutlich steigern und damit den Trend der letzten 30 Jahre fortsetzen. Bis zum Ende des Jahrhunderts ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass es an der Nordseeküste 10, an den Alpen bis zu 30 Tage mehr werden.

Der Niederschlag tendiert in Süddeutschland bereits in den vergangenen Jahrzehnten zu einer Abnahme im Sommer und einer Zunahme im Winter. Diese Veränderungen verstärken sich nach den Prognosen vor allem nach 2050 und führen zu einer gravierenden Abnahme des Niederschlags vor allem im Südwesten Deutschlands.

Von 6 für die Niederschlagsprognose geeigneten Projektionen wird die Zunahme der Starkregen für die Wintermonate berechnet, sie zeigen für Süddeutschland eine eher geringe Änderung, eine überwiegend deutliche Erhöhung dagegen für den Norden.

Zu den Extremwerten: bei der Temperatur ergibt sich bis zum Ende dieses Jahrhunderts eine deutliche Zunahme sehr hoher Werte, dies vor allem im südlichen Deutschland und in den Alpen. Dafür ist der Süden bei der Entwicklung von Starkregen im Winter begünstigt; während hier die Häufigkeit sich kaum verändert, verdoppelt sie sich im Norden. Trotz Rückgangs der Niederschlagsmenge im Sommer erhöht sich der Anteil der Starkregen, allerdings wiederum im Süden weniger spürbar als im Norden.

Spitzenböen nehmen im gleichen Zeitraum an Häufigkeit ebenso deutlich zu, allerdings lässt sich an Hand der ausgewerteten 6 Projektionen keine regionale Unterscheidung treffen, die räumlichen Strukturen stimmen nicht überein.

Die Globalstrahlung unterliegt im Winter keinen größeren Veränderungen, im Sommer jedoch wird eine Zunahme berechnet.

## Hydrologisches Monitoring – Langzeitverhalten der Wasserhaushaltsgrößen

Dr. Andreas Meuser

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz

Im Allgemeinen versteht man unter einem Monitoring die Überwachung und Protokollierung eines Sachverhaltes. Das Monitoring dient häufig dazu die Veränderung der Situation zu ermitteln und einer bestimmten Ursache zuzuordnen. Der Verursacher kann dann zur Wiederherstellung des ursprünglichen Zustandes oder eines Ausgleichs angehalten werden. Als Beispiel in der Wasserwirtschaft kann die Flutung eines Retentionspolders angeführt werden. So zeigt dort das Monitoring der Bodenbeschaffenheit, ob eine Entschädigung für betroffene Landwirte erfolgen muss oder nicht. Der Unterschied zum hydrologischen Monitoring im Umfeld der Klimaänderung besteht vor allem darin, dass vielleicht der anthropogene Treibhausgasausstoß als verursachendes Agens -und damit der Mensch als Verursacher- ausgemacht werden kann. Ein Ausgleich oder im besten Falle eine Entschädigung wird dadurch aber kaum zustande kommen. Gerade aus diesem Grunde ist das Klimamonitoring zur Feststellung der Klimaänderungsprozesse wichtig, insbesondere wenn man die Langzeitfolgen der Prozesse bedenkt.

Im Rahmen des Vorhabens KLIWA ist als ein wichtiger Projektbereich die (retrospektive) Untersuchung des Langzeitverhaltens hydro(meteoro)logischer Messzeitreihen vorgesehen (vgl. Abb. 1), um sich bereits abzeichnende Klimaänderungssignale zu detektieren. Erste Auswertungen zu den Messgrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss wurden in den ersten Jahren des Vorhabens KLIWA im Projektbereich A (Abb.1) durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in der Reihe „KLIWA-Berichte“ veröffentlicht. Allerdings konnten dabei zunächst nur die Messzeitreihen bis längstens 2000 berücksichtigt werden. Die Ergebnisse unter Berücksichtigung einer Verlängerung der Messreihen bis 2005 wurden in einem ersten Monitoringbericht (KLIWA 2008) dargestellt. Nun liegen die Ergebnisse der weiteren Verlängerung der Messreihen bis 2010 im neuen Monitoringbericht vor (KLIWA 2011). Dessen wesentliche Auswertungsergebnisse sind in diesem Kurzbericht im Sinne eines Klimamonitorings dargestellt, erstmals auch für den KLIWA-Partner Rheinland-Pfalz.

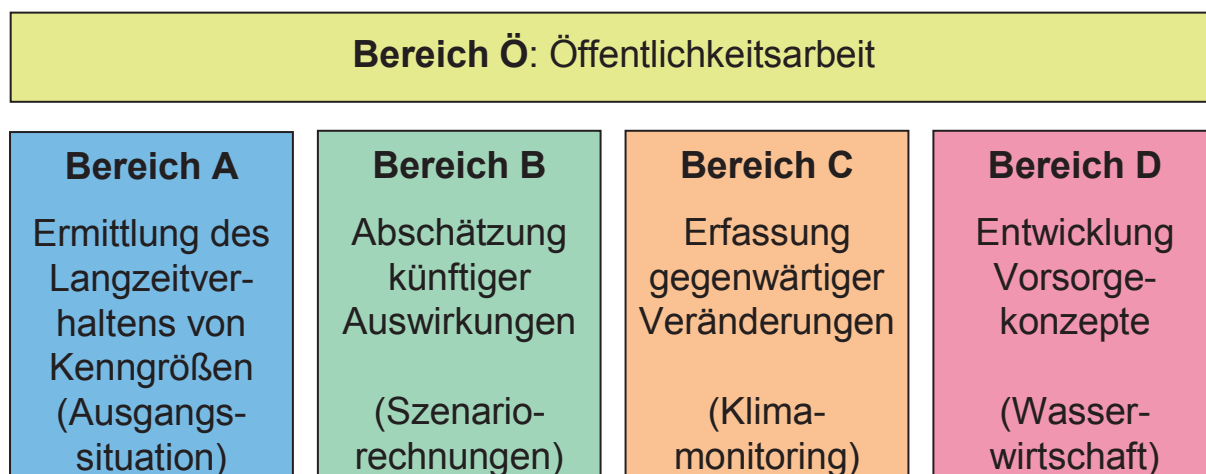


Abb. 1: Struktur des Vorhabens KLIWA – Projektbereiche





Dieses Monitoring zum Klimawandel in Süddeutschland, ist ein eigener Projektbereich C (Abb.1) des Vorhabens KLIWA. Damit ist ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen beabsichtigt, durch das die relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah ausgewertet werden sollen. In den folgenden Ausführungen werden die Monitoringergebnisse lediglich der hydrologischen Kenngrößen für Hoch- und Niedrigwasser erläutert. Hierzu wurde neben den Ausführungen im Monitoringbericht bis 2010 (KLIWA 2011) eine von KLIWA beauftragte Studie zur statistischen Auswertung dieser Kenngrößen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) herangezogen (Ihringer 2011) und teilweise wörtlich übernommen.

Für die statistische Analyse des Langzeitverhaltens der Hochwasser- und Niedrigwasserabfluss-Kennwerte dienten Beobachtungszeitreihen an ausgewählten Pegeln der Wasserwirtschaftsverwaltungen in Baden-Württemberg (BW), Bayern (BY) und Rheinland-Pfalz (RP). Für die Analyse der Hochwasserabfluss-Kennwerte (HW-Kennwerte) waren dies die Monatshöchstwerte HQ(m) der Jahre 1932 bis 2010 von insgesamt 115 Pegeln (30 Pegel aus BW, 60 Pegel aus BY und 25 Pegel aus RP; Abb. 2) und für die Analyse der Niedrigwasserabfluss-Kennwerte (NW-Kennwerte) die Tageswerte des Abflusses MQ(d) der Jahre 1951 bis 2010 von insgesamt 30 Pegeln (jeweils 10 Pegel aus BW, BY und RP; Abb. 6).

## Hochwasser

Es wurden die Zeitreihen für 115 Pegel ab 1932 bzw. Beobachtungsbeginn bis 2010 betrachtet, ausgewertet und mit dem Zeitraum 1932 bis 2000 verglichen. Für die statistische Betrachtung des Langzeitverhaltens der jährlichen und halbjährlichen Abflusshöchstwerte eines Pegels wurden die vorhandenen monatlichen Höchstwerte des Abflusses zu Jahresserien für das hydrologische Jahr, das Sommer- und das Winterhalbjahr zusammengefasst. Für diese Serien wurde anschließend jeweils die langjährige Veränderung in Form von linearen Trends und deren statistischer Signifikanzen (nach Mann-Kendall) ermittelt. Zusätzlich wurde der mittlere Jahresgang der Monatshöchstwerte der Abflüsse betrachtet. Um eventuelle Veränderungen in den Monatswerten zu erkennen, wurde die verfügbare Zeitreihe basierend auf vorherigen Auswertungen im Jahre 1974 geteilt und für das hydrologische Jahr und die Halbjahre getrennt ausgewertet.

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen sind für alle 115 Pegel in Tabelle 1 zusammengefasst. Die durchgeführte Trendanalyse der Hochwasserabflüsse 1932 bis 2010 zeigt für 84 Pegel und damit den überwiegenden Teil der 115 Pegel bezogen auf das Gesamtjahr einen ansteigenden Trend (ca. 73 %), nur 31 Pegel (ca. 27 %) weisen eine Abnahme auf. Bei der Bewertung der Ergebnisse muss jedoch berücksichtigt werden, dass die an den Pegeln ermittelten, zunehmenden Trends nur zu einem Drittel signifikant sind (Signifikanzniveau von  $\alpha \geq 80\%$ ), an den Pegeln mit abnehmenden Trends sind lediglich 20 % signifikant. Das hydrologische Winterhalbjahr zeigt mit zunehmenden Trends an 75 % der Pegel bezüglich der Trends und Signifikanzen ein dem hydrologischen Jahr weitgehend ähnliches Verhalten, mit signifikant zunehmenden Trends an 38 % aller Pegel. Im hydrologischen Sommerhalbjahr zeigen nur 59 % der Pegel ansteigende Trends der Hochwasserabflüsse, davon ungefähr die Hälfte (ca. 47 %) mit signifikanten Zunahmen. Bezogen auf die 115 betrachteten Pegel ist insgesamt im Mittel der Anteil von Pegeln mit signifikant zunehmenden Trends (ca. 30 %) höher, als von Pegeln mit abnehmendem Trend (ca. 5 %).

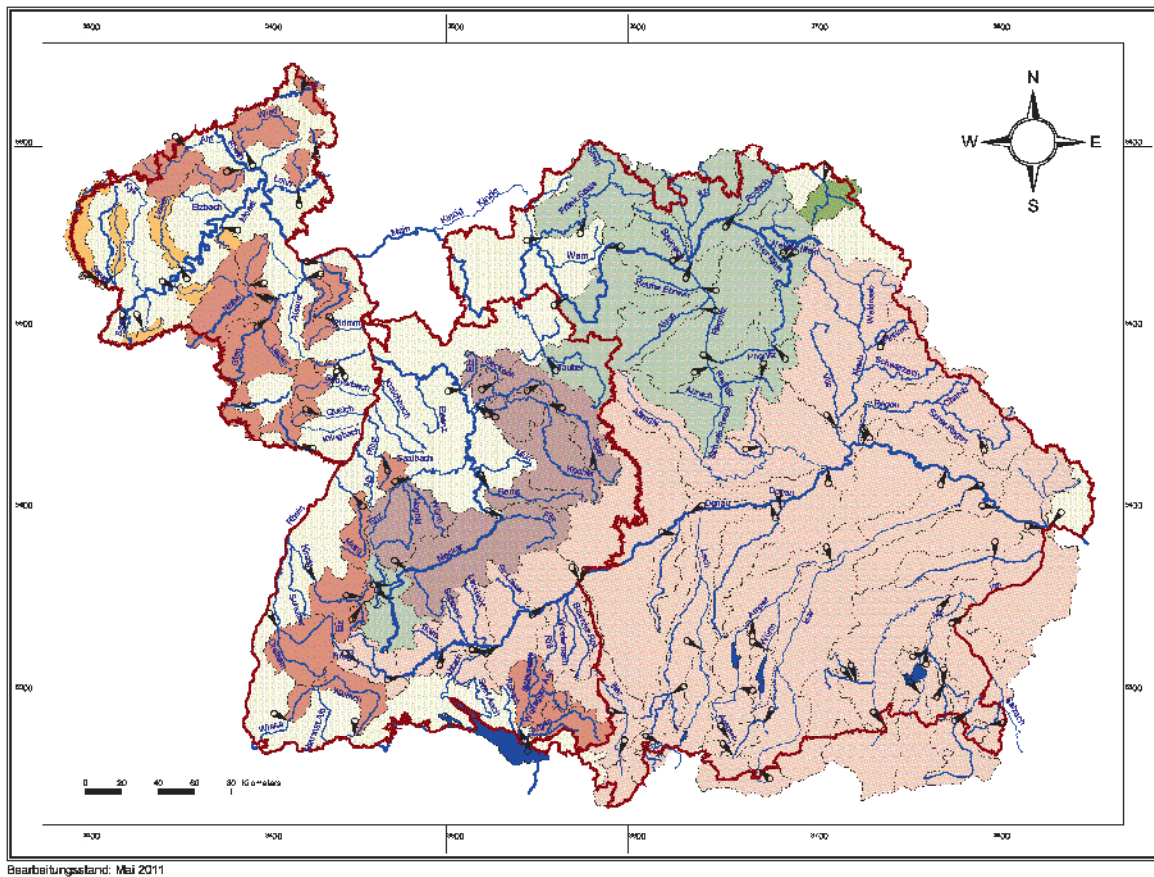


Abb. 2: Lage der betrachteten Abflussmessstellen (115 Pegel) für Untersuchungen zum Trendverhalten der Hochwasserabflüsse

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse für die Zeiträume 1932 bis 2000 und 1932 bis 2010 zeigt bei beiden Zeiträumen eine Tendenz hin zu steigenden Hochwasserabflüssen. Infolge der Datenverlängerung bis zum Jahr 2010 ist die zunehmende Tendenz in den Hochwasserabflüssen allerdings abgemindert, analog sind geringfügig mehr fallende Trends zu beobachten. Das Sommerhalbjahr tendiert dabei bereits leicht zu abnehmenden Hochwasserabflüssen, allerdings mit weniger signifikant abnehmender Tendenz.

Die deutliche Tendenz zu zunehmenden Hochwasserabflüssen in Folge der Datenverlängerung bis 2005 im ersten Monitoringbericht (KLIWA 2008) zeigt sich nun nicht mehr. Die Auswertungen zeigen somit, dass sich nach 2000 das Hochwasserabflussverhalten verändert hat. Die bis zum Jahr 2000 vorhandenen Hochwassertrends sind rückläufig und stellen sich deutlich abgemindert dar. Deutlicher als die Gesamtzahl der Pegel reduziert sich dabei die Anzahl der Pegel mit einer signifikanten Trendzunahme. Die Trends werden im Allgemeinen durch die Zeitreihenverlängerung also schwächer.



Tab. 1: Überblick über das Trendverhalten der Hochwasserabflüsse an den 115 untersuchten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich der beiden Zeiträume 1932-2000 und 1932-2010

<i>Tendenzen</i>	<i>Untersuchungszeit- raum 1932–2000*</i>	<i>Untersuchungszeit- raum 1932–2010*</i>
<b>Hydrologisches Gesamtjahr (Nov. – Okt.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	26 / 7	31 / 6
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	89 / 41	84 / 28
<b>Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – Apr.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	24 / 4	28 / 6
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	91 / 43	87 / 36
<b>Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	42 / 8	47 / 6
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	73 / 29	68 / 32

\* Gesamtzahl Pegel mit vorliegendem Trend / Anzahl Pegel mit signifikanten Trend  $\alpha \geq 80\%$

Als Beispiel sei das Trendverhalten der beiden Reihen mit den Jahreshöchstabflüssen am Pegel Stein/Kocher mit einem Einzugsgebiet von knapp 2000 km<sup>2</sup> angeführt (Abb. 3). Während die Reihe 1932 bis 2000 einen auf dem 80 % Niveau signifikanten ansteigenden Trend aufweist, ist dieser bei der um 10 Jahre verlängerten Reihe bis 2010 nur noch auf dem 70 % Niveau signifikant und wird damit konventionell als nicht mehr signifikant angesehen. Auch die Steigung der Ausgleichsgerade ist bei der verlängerten Reihe geringer.

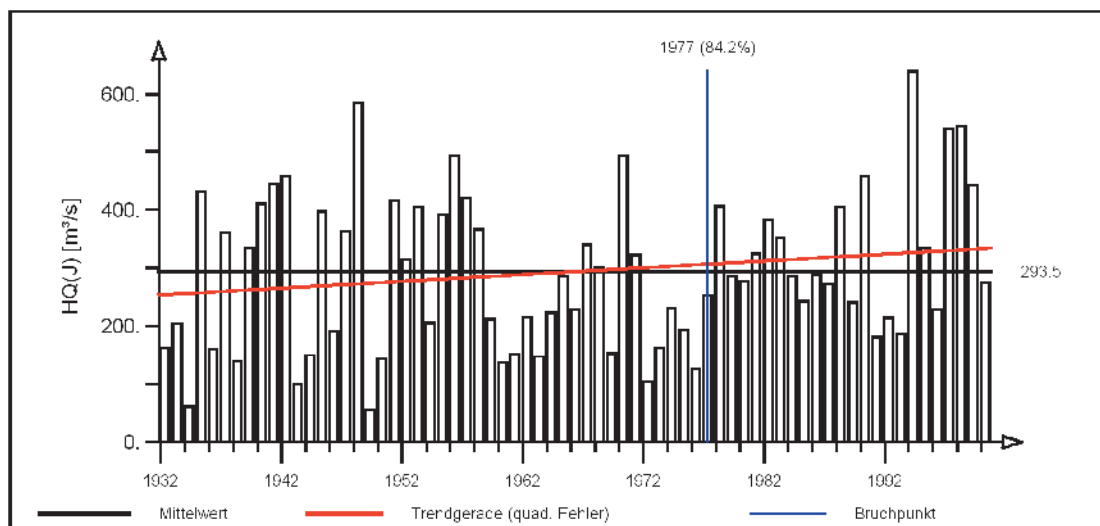
Die drei Bundesländer zeigen im Vergleich folgende Unterschiede:

Bei den langen Zeitreihen ab 1932 weisen die 60 Pegel aus BY infolge der Datenverlängerung bis zum Jahr 2010 sowohl bei den Scheitelwerten des Jahres als auch der beiden Halbjahre keine wesentlichen Änderungen auf. Ca. 75% der Pegel zeigen bei den Werten des Jahres und des Winterhalbjahres eine steigende Tendenz. Im Sommerhalbjahr sind Zunahmen an ca. 55% vorhanden.

Die 30 Pegel aus BW zeigen bei den Zeitreihen ab 1932 für die Jahres- und Halbjahreswerte an ca. 90% der Pegel Zunahmen in den Scheitelwerten. Infolge der Datenverlängerung bis zum Jahr 2010 bleibt die Anzahl der Pegel mit Zunahmen nahezu gleich, die Steigungen gehen jedoch deutlich zurück.

## Pegel Stein/Kocher

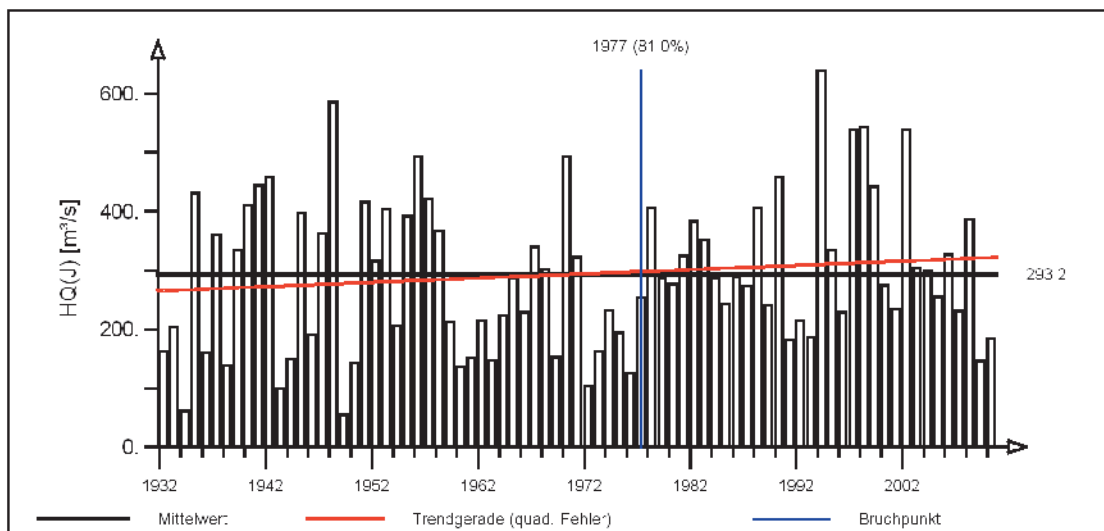
(Pegel-Nr. 3465)

**Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1932-2000 (hydrologisches Jahr)**


Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend:  $1.165 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$   
 (Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 80%)

## Pegel Stein/Kocher

(Pegel-Nr. 3465)

**Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1932-2010 (hydrologisches Jahr)**


Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend:  $0.717 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$   
 (Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 70%)

Abb. 3: Vergleich der Trendverhalten der beiden Reihen mit den Jahreshöchstabflüssen am Pegel Stein/Kocher für die Zeiträume 1932 - 2000 und 1932 - 2010



Die 25 Pegel aus RP weisen bei den langen Zeitreihen ab 1932 bei der Auswertung des Jahres und des Winterhalbjahres an knapp 70% der Pegel steigende Scheitelwerte auf. Im Sommerhalbjahr sind davon etwa die Hälfte betroffen. Infolge der Datenverlängerung von 2000 bis 2010 gehen hier die Steigungen sehr stark zurück, die Anzahl der betroffenen Pegel bleibt jedoch nahezu erhalten.

Verdeutlichen lässt sich dieser Sachverhalt z. B. durch die klassenweise Darstellung der Steigungen der Trendgeraden, aufgeschlüsselt nach den drei Bundesländern. Auch hier zeigt sich, dass im Vergleich zum Zeitraum 1932 bis 2000 (Abb. 4a) die Veränderung durch das Hinzufügen weiterer zehn Jahre (Abb. 4b) insbesondere für Rheinland-Pfalz und Baden Württemberg gilt. Zusätzlich zeigte sich eine Abminderung der großen Trendsteigungen durch die Datenreihenverlängerung bis 2010.

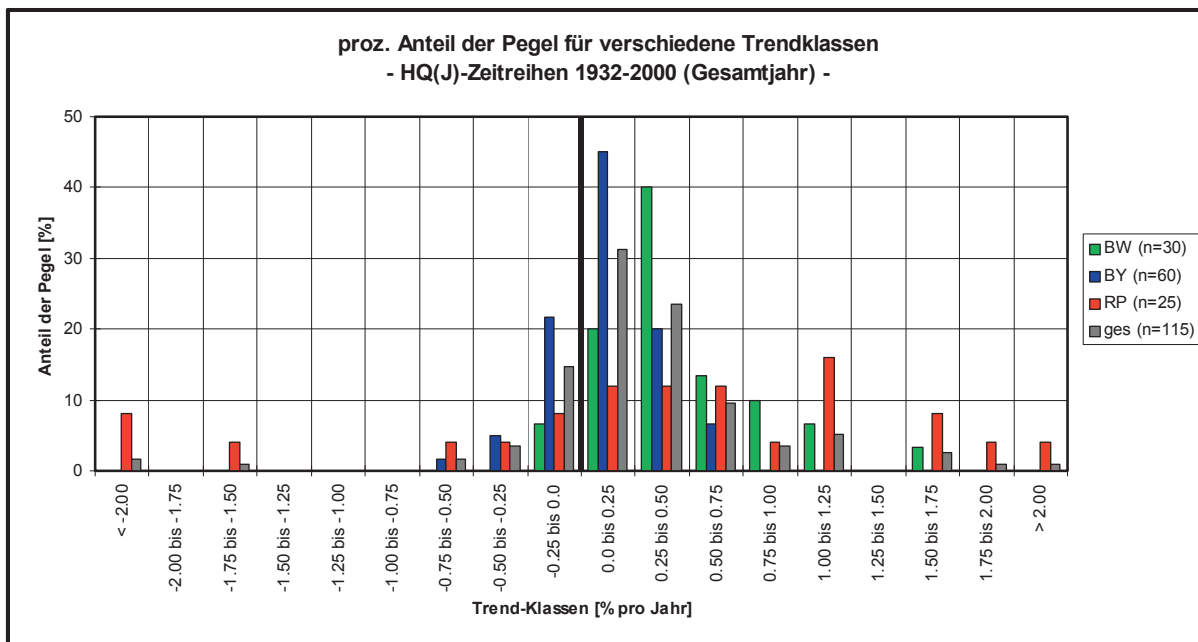


Abb. 4a: Verteilung der Steigungen der Trendgeraden für die untersuchten Pegel der drei Bundesländer für den Zeitraum 1932 bis 2000



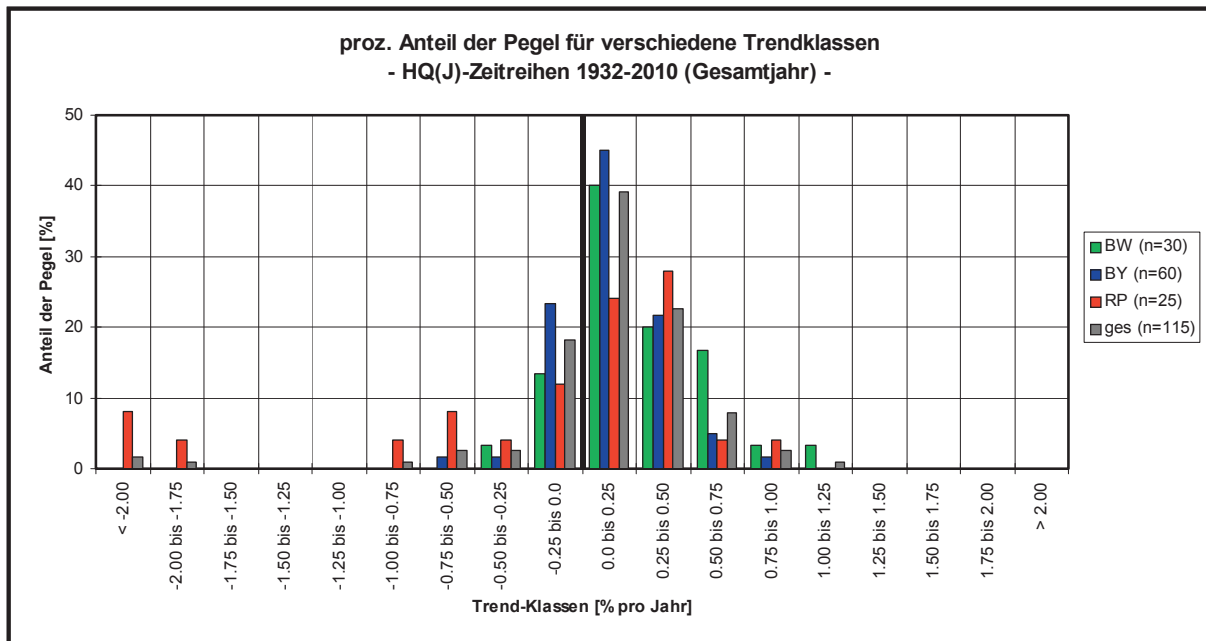


Abb. 4b: Verteilung der Steigungen der Trendgeraden für die untersuchten Pegel der drei Bundesländer für den Zeitraum 1932 bis 2010

Das beobachtete Ergebnis der Entwicklung bei den Jahres- und Halbjahreswerten wird auch durch die Auswertung des Jahresganges der monatlichen Abflusshöchstwerte und der feststellbaren Veränderungen unterstützt. In Abb. 5 sind exemplarisch für die Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 der Jahresgang bezogen auf die einzelnen Monate und die Mittelwerte für die beiden hydrologischen Halbjahre aufgetragen. Zusätzlich wurde die Zeitreihe im Jahr 1974 geteilt. Dies ermöglicht Rückschlüsse auf mögliche Veränderungen der monatlichen Höchstwerte, insbesondere in den abflusstarken Zeiten. Die mittleren Hochwasserabflüsse (MHQ) der Zeitperiode von 1974 bis 2010 (blaue Linie) liegen deutlich über dem Mittelwert der gesamten Zeitreihe (schwarze Linie) und der früheren Periode bis 1973 (rote Linie). Diese Zunahme wird überwiegend durch eine Erhöhung der Hochwasser im hydrologischen Winterhalbjahr hervorgerufen, während im Sommerhalbjahr geringere Veränderungen auftreten.

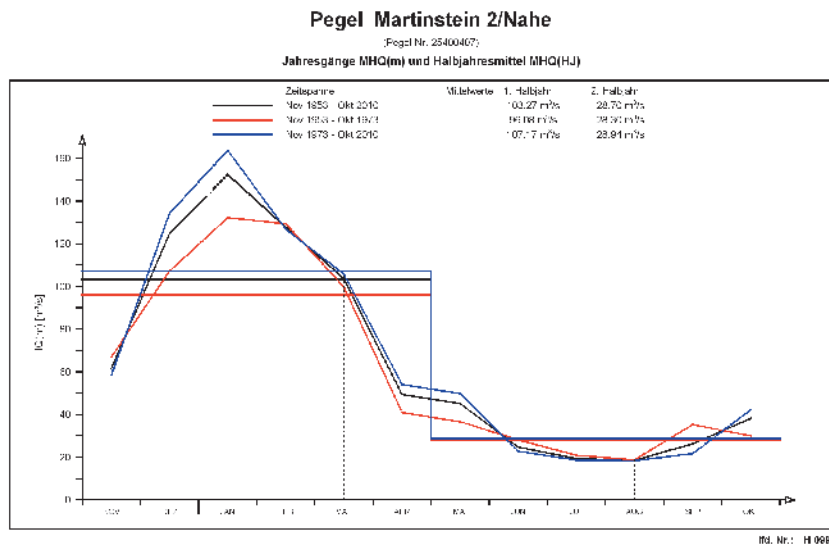
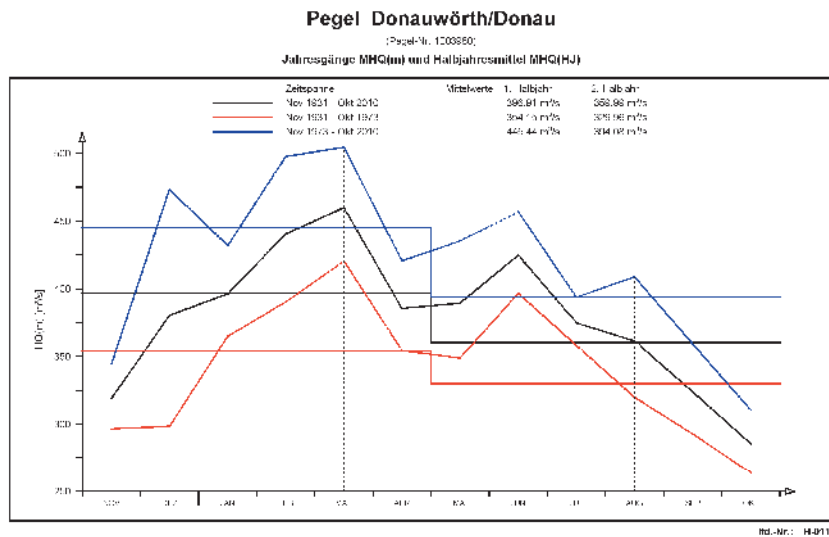
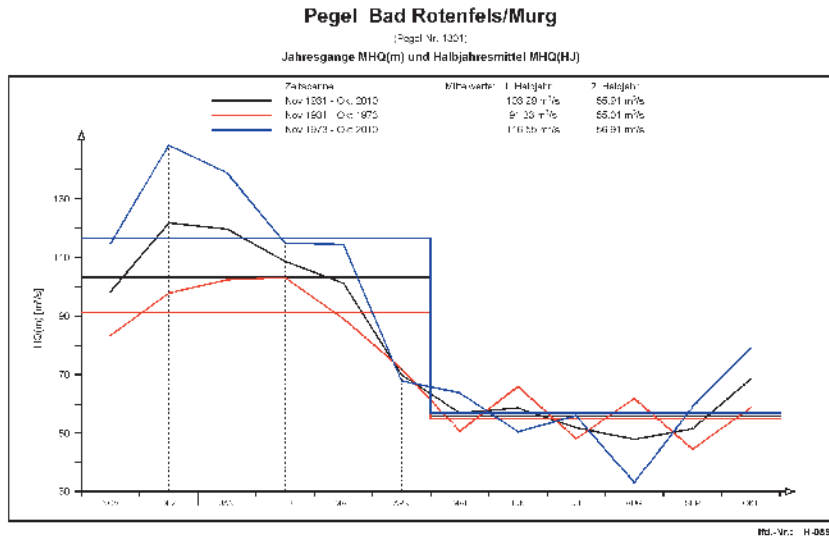


Abb. 5: Jahresgang des monatlichen mittleren Höchstabflusses und Halbjahresmittel am Beispiel der Pegel Donauwörth, Rotenfels und Martinstein 2 für die gesamte Zeitreihe und die beiden Teilzeitreihen 1931 bzw. 1953 bis 1974 und 1974 bis 2010

## Niedrigwasser

Die Datengrundlage für die Auswertung von Niedrigwasserkennwerten bestand aus jeweils 10 Pegeln aus BW, BY und RP (insgesamt 30 Pegel, Abb. 6) mit der Beobachtungszeitreihe 1951 bis 2010. Dabei ist zu beachten, dass in Rheinland-Pfalz einige Pegelaufzeichnungen erst nach 1951 beginnen. Deshalb wurden diese Pegel ab dem jeweiligen Datenbeginn entsprechend ausgewertet. Aus den mittleren Tageswerten des Abflusses wurden monatliche Niedrigabflüsse NQ abgeleitet. Nach einer gleitenden Mittelung über jeweils sieben Tage konnten aus den gemittelten Tageswerten die monatlichen Niedrigabflüsse NM7Q abgeleitet werden. Weiterhin wurde die jährliche Dauer des Abflussdefizits QD bezogen auf den mittleren jährlichen Niederwasserabfluss der jeweiligen Pegelzeitreihe bestimmt. Die jährliche Dauer des Abflussdefizits wird aus den mittleren Tageswerten abgeleitet: Unterschreitet die Abfluss-Zeitreihe den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss, erfolgt eine fortlaufende, tägliche Bilanzierung der Abflussdifferenzen zwischen dem Abflusstageswert und dem Schwellenwert. Die hieraus abgeleiteten täglichen Abflussdefizite und Abflussüberschüsse werden so lange addiert, bis in der fortlaufenden Summe das Abflussdefizit verschwindet. Die jährliche Dauer des Abflussdefizits ergibt sich aus der größten zusammenhängenden Zeitspanne eines Jahres, in der ein Abflussdefizit vorhanden ist.

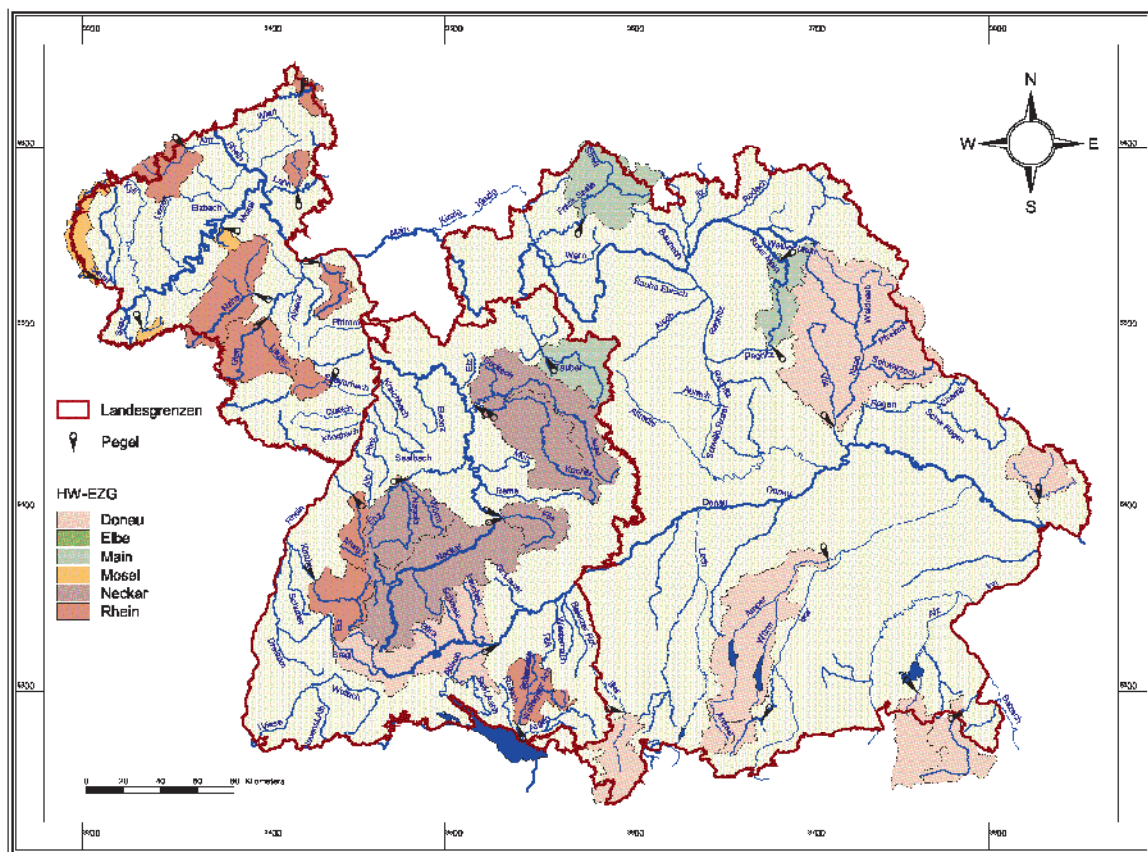


Abb. 6: Lage der betrachteten Abflussmessstellen (30 Pegel) für Untersuchungen zum Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse



Neben der schwierigen Ermittlung von Niedrigwasserabflüssen (Verkrautung, hohe Varianz bei der Abflussmessung) ist auch deren Zuordnung zum Niedrigwasserregime nicht einfach. Die Niedrigwasserwerte sind häufig beeinflusst durch Entnahmen oder Ableitungen, durch Kläranlagenzuflüsse und Speicherbewirtschaftungen. Teilweise erfolgt eine gezielte Niedrigwasseraufhöhung aus Talsperren oder Überleitungen wie durch das Überleitungssystem Donau – Main in Bayern. Dementsprechend ist bei der Interpretation der Kennwerte Vorsicht geboten. Während die NQ – Werte daher mit den größten Unsicherheiten behaftet sind, sind die NM7Q einigermäßen stabil, zumindest gegen wöchentlich periodisch wiederkehrende Störungsprozesse. Die jährliche Dauer der Abflussdefizite lässt dagegen schon recht verlässliche Interpretationen zu. Ganz störunanfällig sind aber auch diese nicht.

Tab.2: Überblick über das Trendverhalten der Niedrigwasserabflüsse an den 30 untersuchten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz im Vergleich

Tendenzen	Untersuchungszeit- raum 1951–2000*	Untersuchungszeit- raum 1951–2010*
<b>NQ(J) / Hydrologisches Gesamtjahr</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	13 / 3	12 / 2
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	17 / 8	18 / 8
<b>NM7Q(J) / Hydrologisches Gesamtjahr</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	16 / 5	14 / 4
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	14 / 4	16 / 8
<b>QD(J) / Hydrologisches Gesamtjahr</b>		
↘ Pegel mit abnehmendem Trend / signifikant	26 / 7	25 / 11
↗ Pegel mit zunehmendem Trend / signifikant	4 / 2	5 / 2

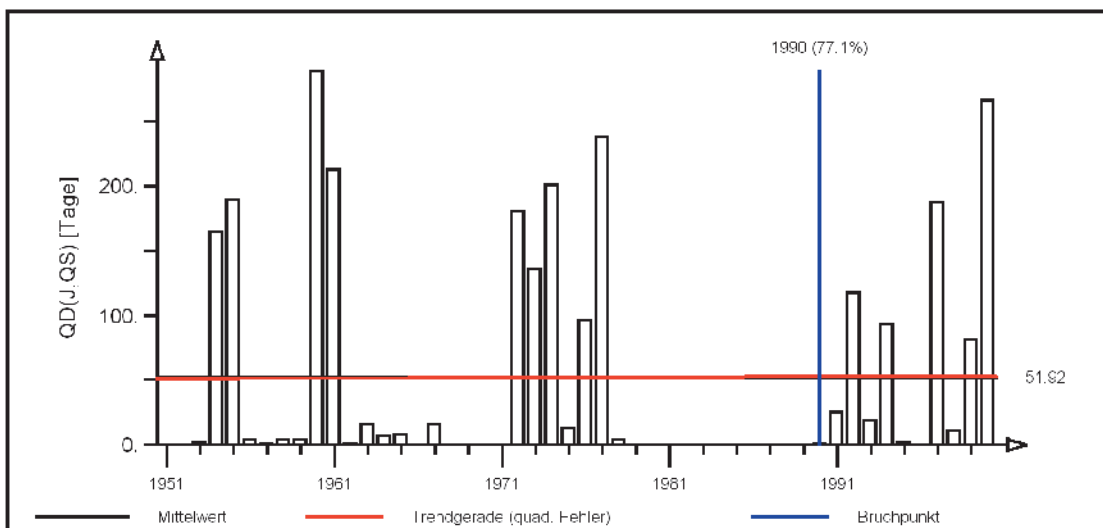
\* Gesamtzahl Pegel mit vorliegendem Trend / Anzahl Pegel mit signifikanten Trend  $\alpha \geq 80\%$

Die Ergebnisse der Trenduntersuchungen sind für alle 30 Pegel in Tabelle 2 für verschiedene Niedrigwasserkennwerte zusammengefasst aufgeführt. Insgesamt zeigt sich für NQ(J) und NM7Q(J), dass die Anteile der Pegel mit zunehmenden und abnehmenden Trends für den Zeitraum 1951 bis 2000, aber auch für den Zeitraum 1951 bis 2010 relativ ausgeglichen sind. Eine deutliche Tendenz ist daraus nicht abzulesen. Lediglich für NQ(J) ist eine geringe Mehrheit von zunehmenden Trends zu konstatieren. Von den ermittelten Veränderungen ist insgesamt nur ca. ein Drittel signifikant, Pegel mit zunehmenden Trends sind dabei häufiger vertreten. Die einzelnen Bundesländer weisen dabei Unterschiede auf. Bei den Zeitreihen ab 1951 zeigen die Pegel aus BW und BY, dass zwischen 60% bzw. 80% der Pegel zunehmende Niedrigwasserabflüsse vorhanden sind. Infolge der Datenverlängerung bis 2010 ergeben sich nur geringe Veränderungen. Die Trendsteigungen sind bei diesen beiden Bundesländern sehr vergleichbar. In RP zeigen nur 30% der langen Pegelzeitreihen zunehmende Niedrigwasserabflüsse. Die Mehrzahl der Pegel tendiert somit zu einer Abnahme im Niedrigwasserbereich. Die Datenverlängerung bis 2010 beeinflusst diese Anteile nicht.

## Pegel Neustadt Weinstraße/Speyerbach

(Pegel-Nr. 23780500)

Jährliche Dauer des Abfluss-Defizits QD(J) 1951-2000 (Jun-Mai)

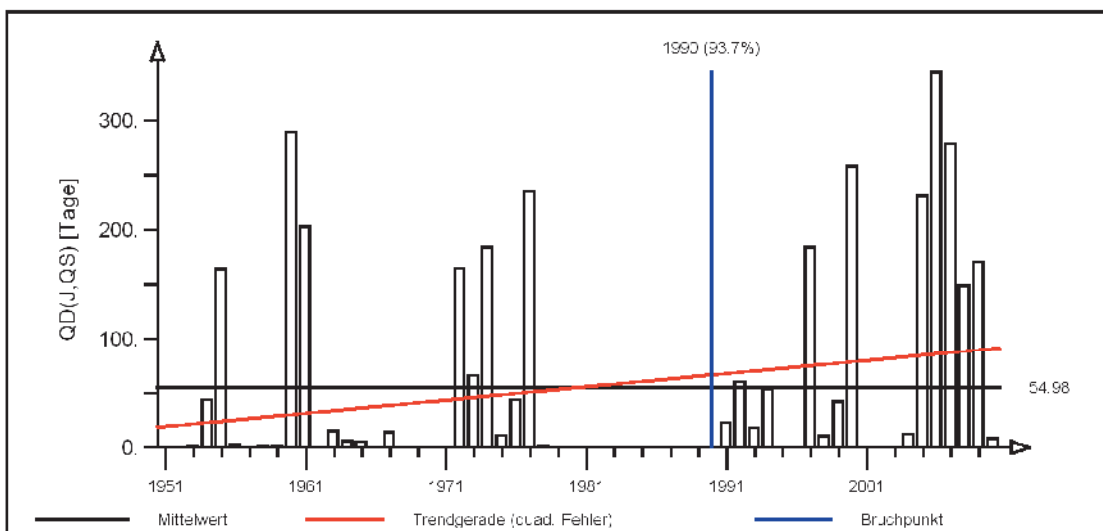


Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: 0.050 Tage/Jahr  
(Trend nicht signifikant nach Mann-Kendall)

## Pegel Neustadt Weinstraße/Speyerbach

(Pegel-Nr. 23780500)

Jährliche Dauer des Abfluss-Defizits QD(J) 1951-2010 (Jun-Mai)



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: 1.223 Tage/Jahr  
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 70%)

Abb. 7: Vergleich der Trendverhalten der beiden Reihen mit den jährlichen Dauern der Abflussdefizite für den Pegel Neustadt an der Weinstraße für die Zeiträume 1951 bis 2000 und 1951 bis 2010





Im Langzeitverhalten der Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$  weisen etwa 80 % der untersuchten Pegel abnehmende Trends auf. Das bedeutet, dass die maximalen Dauern der Niedrigwasserperioden abnehmen. Das gilt sowohl für die Zeitreihe 1951 bis 2000 als auch für die um 10 Jahre verlängerte Zeitreihe. Die Anzahl der Pegel mit signifikant abnehmenden Trends steigt von rund einem Viertel der Pegel auf etwa ein Drittel. Bei der räumlichen Betrachtung ist festzustellen, dass vor allem die Pegel aus BW und BY abnehmende Trends aufweisen. In RP dagegen zeigen 40% der Pegel Zunahmen der Dauern der Niedrigwasserperioden, wenn auch nur bei rund einem Fünftel der Pegel eine signifikante Zunahme festzustellen ist. Die Datenverlängerung bis zum Jahr 2010 beeinflusst dieses Langzeitverhalten nur unwesentlich. In Abbildung 7 ist beispielhaft die Entwicklung der Dauer des Abflussdefizits für die beiden Zeiträume 1951 bis 2000 und 1951 bis 2010 für den Pegel Neustadt an der Weinstraße (Pfalz) dargestellt. Für beide Zeiträume ist eine positive Tendenz festzustellen, die für den erweiterten Zeitraum bis 2010 deutlich ansteigt. Allerdings sind diese Tendenzen hier nicht signifikant. Deutlich zu erkennen sind die nicht nur für Weinkenner bekannten Trockenperioden Ende der fünfziger, Mitte der siebziger und Anfang der neunziger Jahre bis zum Ende der Untersuchungsperiode.

KLIWA (2008): Klimawandel in Süddeutschland (Veränderung der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss) - Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 24 S., veröffentlicht auf der Internetseite [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

KLIWA (2011): Klimawandel in Süddeutschland (Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen) - Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, 40 S., veröffentlicht auf der Internetseite [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

IHRINGER, J. (2011): Langzeitverhalten von Abfluss-Kennwerten an ausgewählten Pegeln in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (KIT), Karlsruhe

# Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen

Bernd Katzenberger

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

## 1 Einleitung

Bereits zu Beginn der KLIWA-Untersuchungen stand die Frage nach den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserabflüsse im Vordergrund. Die damaligen Untersuchungen ergaben deutliche Hinweise auf eine Hochwasserverschärfung in der Zukunft.

Aus Vorsorgegründen wurden daraufhin im Jahr 2005 in Baden-Württemberg und Bayern sogenannte Klimaänderungsfaktoren für Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit festgelegt (z. B. Zunahme um 15 % für HQ<sub>100</sub>) und entsprechende Regelungen zur Anwendung bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen getroffen (z. B. LfU, 2005).

In Baden-Württemberg beispielsweise wurden Klimaänderungsfaktoren für den Neckar, die baden-württembergische Donau, die Tauber und für die Zuflüsse des Hoch- und Oberrheins festgelegt, jedoch nicht für den Rheinschlauch selbst. Mittlerweile liegen weitere KLIWA-Ergebnisse von Wasserhaushaltssimulationen mit verschiedenen weiteren Klimaprojektionen vor. Zudem konnten Simulationen auch für weitere, bis dahin noch nicht berücksichtigte Gewässer durchgeführt werden. Insbesondere liegen nunmehr auch aktuelle Ergebnisse für das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms vor. Aktuelle Ergebnisse aus dem Main- und Donaueinzugsgebiet werden ebenfalls vorgestellt.

## 2 Ergebnisse aus verschiedenen Flussgebieten

### 2.1 Rheineinzugsgebiet bis Worms

#### 2.1.1 Ausgangslage

Die Zusammenhänge der Hochwasserentstehung am Oberrhein sind infolge des alpinen Einflusses und des voralpinen Bereichs, des Oberrheinausbaus sowie weiterer Einflussfaktoren sehr komplex.

Für das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms ( $A_E$  rd. 69.000 km<sup>2</sup>) stehen mehrere hochaufgelöste Wasserhaushaltsmodelle (1x1 km- Modellraster) im Modellsystem LARSIM zur Verfügung (Abb. 1). Für den Flusslauf des Oberrheins zwischen Basel und Worms ist das Synoptische Rheinmodell verfügbar.

Das Abflussregime des Oberrheins ist nival geprägt (Abflussmaximum in Folge der Schneeschmelze im Sommer), die Zuflüsse z. B. aus dem Schwarzwald sind hingegen pluvial geprägt (Abflussmaximum infolge der Niederschläge als Regen im Winter).

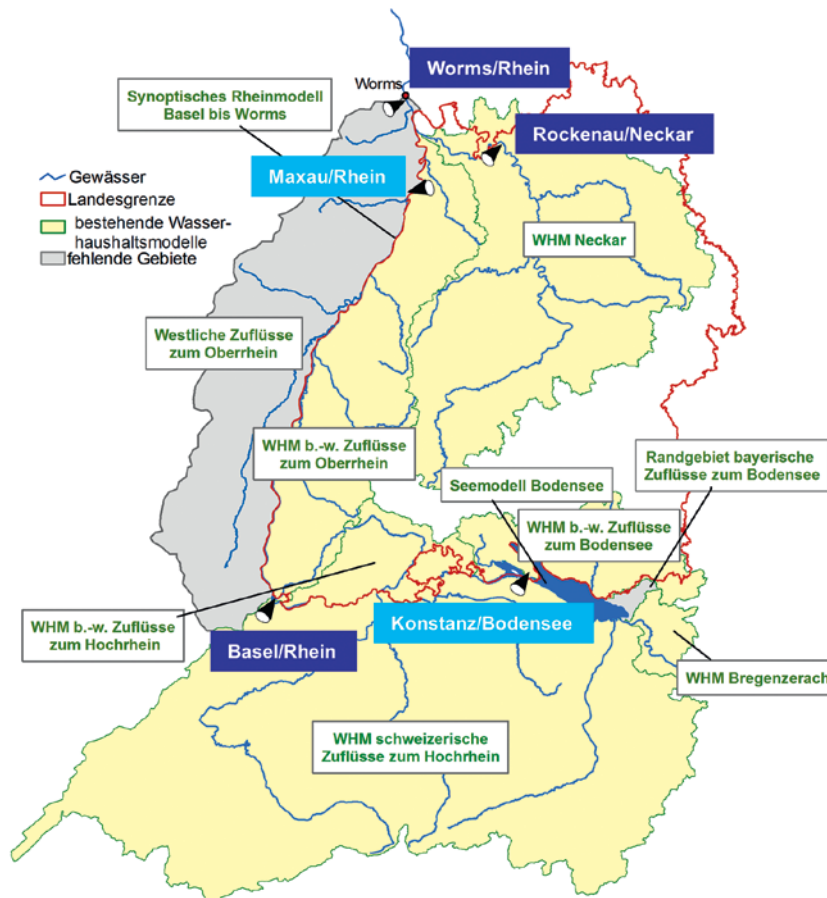


Abb. 1: Rheineinzugsgebiet bis Pegel Worms, Modellstruktur

### 2.1.2 Verwendete Klimaprojektionen

Als Eingangsdaten für die Wasserhaushaltssimulation wurden die Berechnungsergebnisse aus dem dynamischen regionalen Klimamodell COSMO-CLM Version 4.8 (CCLM 4.8) verwendet, die das Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im 7x7 km-Raster zur Verfügung stellte (IMK, 2011).

Als Antrieb für das Regionalmodell wurden drei Läufe (run 1 bis 3) des Globalmodells ECHAM5 mit dem Emissionsszenario A1B verwendet. Die Niederschlags-, Temperatur- und Globalstrahlungsdaten wurden zuvor für jeden der 3 Läufe durch das IMK einer Bias-Korrektur unterzogen, um die Abweichung zwischen den CCLM-Daten des Ist-Zustands (1971-2000) und den Messdaten zu verringern. Alle drei Läufe wurden jeweils mit der Methode Linear Scaling Single (LSS) bias-korrigiert, der Lauf 1 zusätzlich noch mit der Methode Quantile Mapping Single (QMS).

In Tabelle 1 sind die ermittelten Klimasignale (Temperatur, Niederschlag) für das betrachtete Rheineinzugsgebiet bis 2050 für die 4 CCLM-Realisationen dargestellt. Es ergibt sich eine Niederschlagsabnahme im Sommerhalbjahr und eine Niederschlagszunahme im Winterhalbjahr. Der Lauf 1 zeigt zwischen den zwei unterschiedlichen Bias-Korrekturverfahren kaum Unterschiede.

Tab. 1: Veränderung von Temperatur und Niederschlag im Rheineinzugsgebiet bei Vergleich der Zukunft (2021-2050) mit dem Ist-Zustand (1971-2000) auf Basis CCLM 4.8

ECHAM 5, A1B, run1-3, CCLM 4.8	Sommerhalbjahr (Mai-Okt)		Winterhalbjahr (Nov-April)	
	Temperatur (°C)	Niederschlag (%)	Temperatur (°C)	Niederschlag (%)
run1 QMS	+ 1.2	- 4.2	+ 1.0	+ 7.1
run1 LSS	+ 1.3	- 3.8	+ 0.9	+ 7.6
run2 LSS	+ 1.2	- 6.1	+ 1.3	+ 11.4
run3 LSS	+ 0.9	- 2.2	+ 0.9	+ 3.1

### 2.1.3 Ergebnisse Wasserhaushaltssimulation

Die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen auf Tageswertbasis für das Rheineinzugsgebiet unter Verwendung der korrigierten CCLM-Daten für den Ist-Zustand (1971-2000) wurden zunächst mit den Simulationsergebnissen unter Verwendung von Messdaten (Niederschlag, Temperatur etc.) verglichen und überprüft, wie gut auf Basis der CCLM-Daten die realen Abflussbedingungen wiedergegeben werden können. In Abb. 2 ist dies am Pegel Basel ( $A_E$  ca. 36.000 km<sup>2</sup>) exemplarisch für die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MoMHQ) dargestellt (HYDRON, 2012).

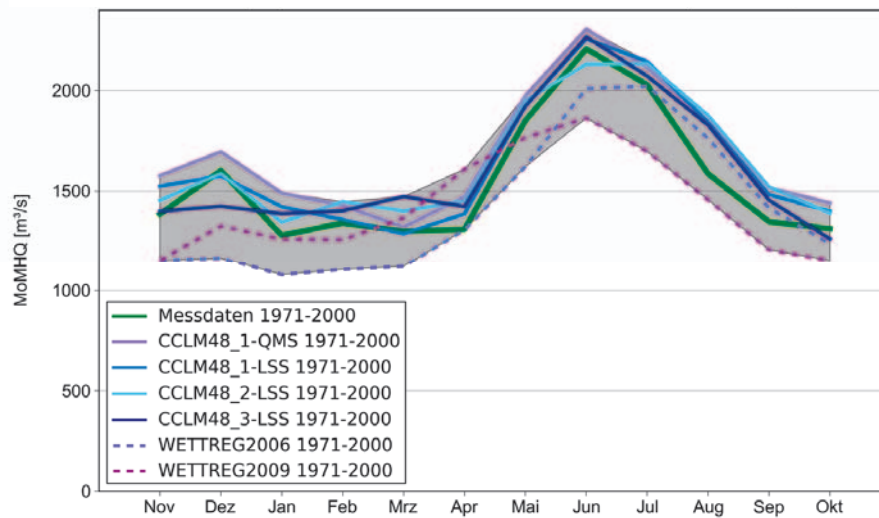


Abb. 2: Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ am Pegel Basel/Rhein beim Ist-Zustand (1971-2000); Klimaprojektions-Ensemble und Messdaten-Simulation



Die grüne Linie in Abb. 2 zeigt die unter Verwendung der Messdaten (Niederschlag, Temperatur etc.) simulierte Regimekurve für den Ist-Zustand. Die mit den CCLM- Projektionen ermittelten Regimekurven geben recht gut den Ist-Zustand wieder. Das nival geprägte Abflussregime mit den höchsten Monatswerten im Sommer wird sehr gut wiedergegeben. Mit eingetragen in Abb. 2 sind auch die Ergebnisse von früheren Wasserhaushaltssimulationen auf Basis des statistischen regionalen Klimamodells ECHAM5/WETTREG2006 (HYDRON, 2007) und ECHAM5/WETTREG2009 (HYDRON, 2010), ebenfalls für das Emissionsszenario A1B. Diese Simulationen weisen größere Abweichungen auf. Insgesamt werden die mit den korrigierten CCLM-Daten ermittelten Regimekurven des Abflusses an den betrachteten Pegeln im Rheineinzugsgebiet gut wiedergegeben. Dies betrifft auch die Abflussdauerlinien.

Die Ergebnisse der MoMHQ aus den Simulationen mit CCLM-Klimaprojektionen für das Zukunftsszenario (2021-2050) werden exemplarisch für folgende Pegel dargestellt: Für Basel/Rhein (Abb. 3), für Rockenau am Neckar, dem wichtigsten Zufluss des Oberrheins (Abb. 4), und für Worms/Rhein (Abb. 5).

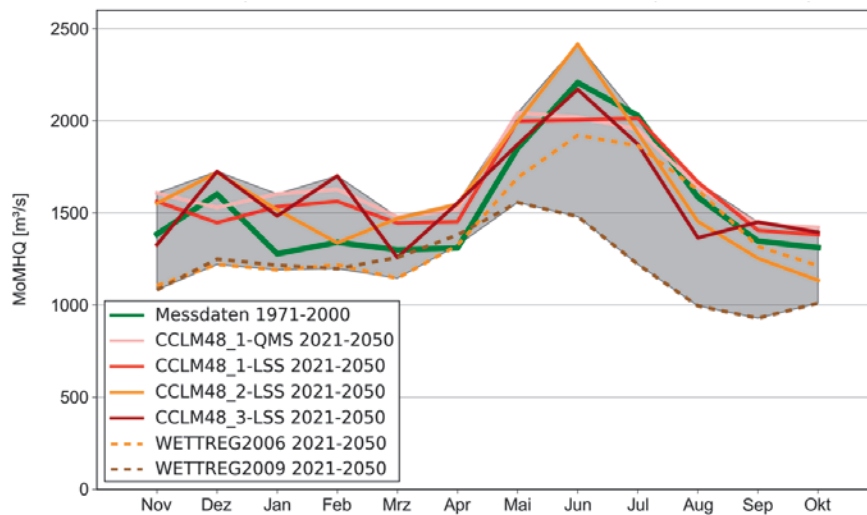


Abb. 3: Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ am Pegel Basel/Rhein beim Zukunftsszenario (2021-2050); Klimaprojektions-Ensemble und Messdaten-Simulation

In Abb. 3 sind für den Pegel Basel/Rhein die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse, simuliert für den Zeitraum 2021-2050, dargestellt. Aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit ist als Vergleich anstelle des jeweils simulierten Ist-Zustands der mit Messdaten simulierte Ist-Zustand eingetragen (grüne Linie).

Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Realisationen von CCLM sind teilweise ausgeprägt. Vergleicht man die Werte der simulierten Zukunft mit dem simulierten Ist-Zustand, so zeigt sich generell bei Verwendung der CCLM-Läufe im Sommerhalbjahr eher eine Abnahme der MoMHQ-Werte (im Mittel um  $-7\%$ ), im Winterhalbjahr eine Zunahme (im Mittel um  $+5\%$ ).



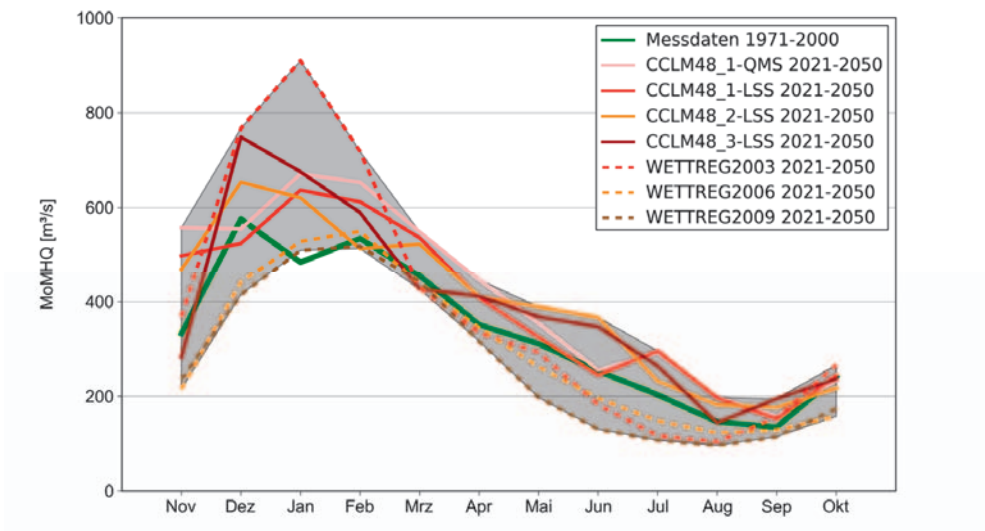


Abb. 4: Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ am Pegel Rockenau/Neckar beim Zukunftsszenario (2021-2050); Klimaprojektions-Ensemble und Messdaten-Simulation

Der Pegel Rockenau/Neckar mit einem  $A_E$  von rd.  $12.700 \text{ km}^2$  hat ein pluvial geprägtes Abflussregime, d. h. die höchsten Abflüsse treten im Winter auf. Bei den Simulationen des Zukunftsszenarios (Abb. 4) ergibt sich bei Verwendung der verschiedenen CCLM- Projektionen eine deutliche Erhöhung der Abflüsse im Winterhalbjahr (im Mittel um + 15 %), im Sommerhalbjahr betragen die Zunahmen im Mittel + 4 %.

Beim Rheinpegel Worms macht sich der Einfluss des Neckars bemerkbar. Dies zeigt sich beim Zukunftsszenario (Abb. 5) an den höheren Abflüssen im Winterhalbjahr, die auf Basis der CCLM-Klimaprojektionen ermittelt wurden: Im Winterhalbjahr eine Zunahme im Mittel um + 8 %, im Sommerhalbjahr eine Abnahme um – 4 %.

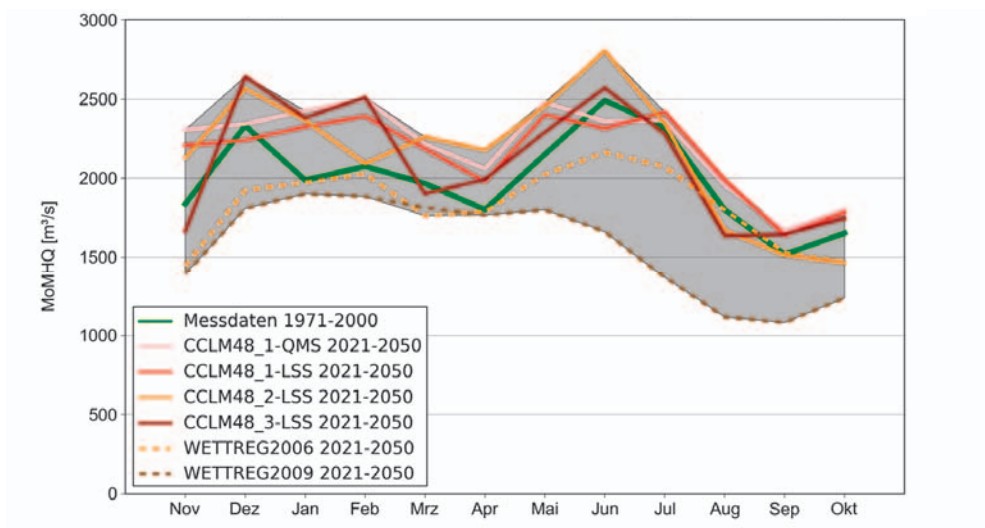


Abb. 5: Mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ am Pegel Worms/Rhein beim Zukunftsszenario (2021-2050); Klimaprojektions-Ensemble und Messdaten-Simulation



### 2.1.4 Extremwertstatistische Auswertungen

Die auf Basis der CCLM Klimaprojektionen mit den Wasserhaushaltsmodellen simulierten Hochwasserabflüsse bis 2050 wurden vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des KIT extremwertstatistisch ausgewertet und dem simulierten Ist-Zustand gegenüber gestellt (IWG, 2012). In Abb. 6 sind für Hochwasserabflüsse unterschiedlicher Jährlichkeit an verschiedenen Gewässerstellen im Rheineinzugsgebiet die rechnerisch ermittelten Veränderungen von simulierter Zukunft (2021-2050) zum simulierten Ist-Zustand (1971-2000) dargestellt.

Es ergibt sich eine Tendenz zu höheren Abflüssen, die allerdings bei den Pegeln mit nivalem Regime deutlich geringer ausfällt als bei den Pegeln mit pluvialem Regime: Die Zunahme liegt z. B. beim HQ<sub>100</sub> bei den Pegeln am Oberrhein mit nivalem Regime bei + 3 % bis + 5 % (Basel, Maxau, Worms) und fällt somit deutlich geringer aus als bei den Pegeln mit pluvialem Regime wie etwa beim Pegel Rockenau/Neckar mit + 12 %.

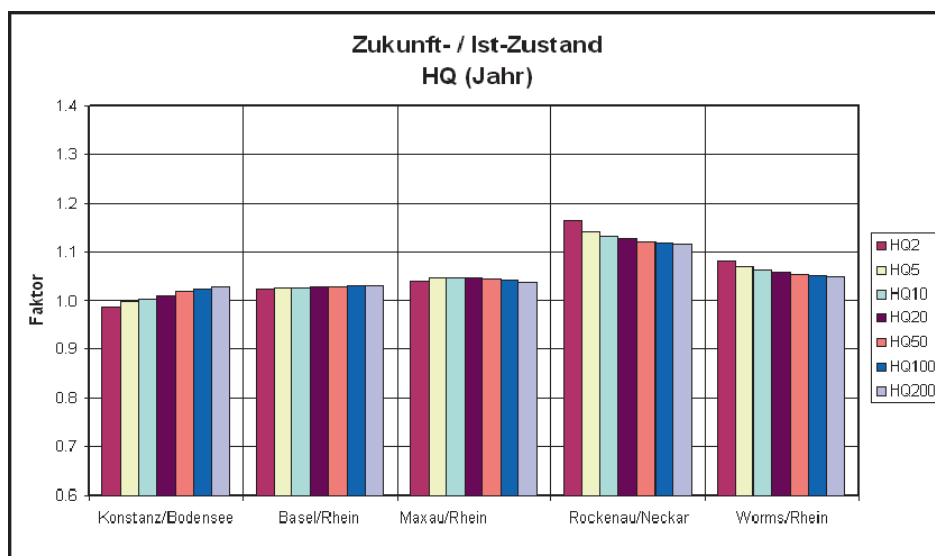


Abb. 6: Extremwertstatistische Hochwasser-Auswertungen bis Worms

Insgesamt kann man festhalten, dass im Zukunftsszenario an den Pegeln mit pluvialem Regime (z. B. Rockenau/Neckar) die monatlichen MHQ-Werte im Winterhalbjahr zunehmen, ebenso auch die hohen Abflüsse.

An den Pegeln mit nivalem Regime (z. B. Rheinpegel Basel, Maxau, Worms) werden beim Zukunftsszenario die Unterschiede der MoMHQ-Regimekurve zwischen Winter- und Sommerhalbjahr geringer. Bei den hohen Abflüssen zeigen sich kaum Veränderungen.

Die Ergebnisse müssen noch verifiziert werden, weitere Untersuchungen (z. B. mit Stundenwerten) sind vorgesehen.

## 2.2 Main Einzugsgebiet bis Pegel Kleinheubach

### 2.2.1 Ausgangslage

Das Main Einzugsgebiet bis zum Pegel Kleinheubach umfasst rd. 21.500 km<sup>2</sup> (Abb. 7). Es herrscht ein pluviales Abflussregime (Abb. 8), d. h. die höchsten Abflüsse im Jahresgang sind im Winterhalbjahr.



Abb. 7: Main Einzugsgebiet bis Pegel Kleinheubach

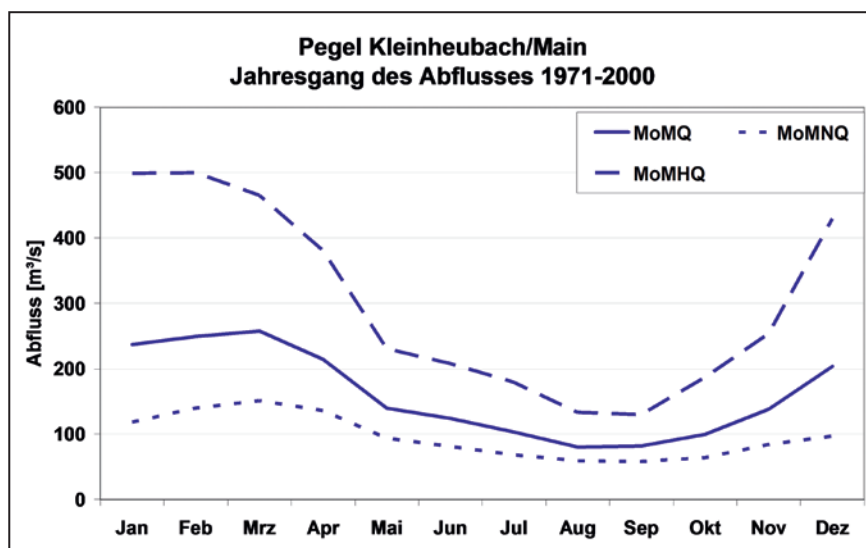


Abb. 8: Jahresgang des Abflusses (1971-2000) am Pegel Kleinheubach/Main



### 2.2.2 Klimaprojektionen

Die Wasserhaushaltssimulation wurde mit 6 Klimaprojektionen (bis 2050) durchgeführt. Vier erscheinen plausibel (ECHAM4/WETTREG2003-B2, ECHAM5/WETTREG2006-A1B, ECHAM5/WETTREG2009-A1B, ECHAM5/WETTREG2010-A1B).

Zwei Projektionen (ECHAM5/REMO2006-A1B, HadGEM2/WETTREG2009-A1B) erweisen sich jedoch als unplausibel (z. B. beim simulierten Ist-Zustand).

### 2.2.3 Ergebnisse Wasserhaushaltssimulation

Die Veränderungen der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse bis 2050 (Abb. 9) sind im Winterhalbjahr uneinheitlich (Zunahmen, Abnahmen) und zeigen im Sommer geringe Veränderungen bis hin zu einem Rückgang (Bayerisches Landesamt für Umwelt).

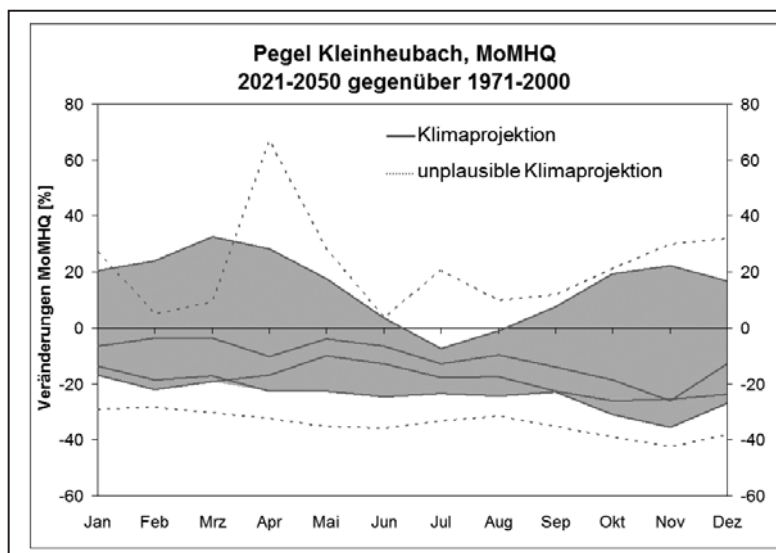


Abb. 9: Veränderung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse am Pegel Kleinheubach/Main beim Zukunftsszenario (2021-2050)

Zur Erhöhung der Belastbarkeit der Aussagen sind ergänzende Modellierungen mit dynamischen Klimamodellen (z. B. CCLM4.8) vorgesehen.

## 2.3 Inneinzugsgebiet bis Pegel Passau-Ingling

### 2.3.1 Ausgangslage

Das Inneinzugsgebiet bis zum Pegel Passau-Ingling umfasst rd. 26.000 km<sup>2</sup> (Abb. 10). Das Abflussregime ist nival geprägt (Abb. 11).

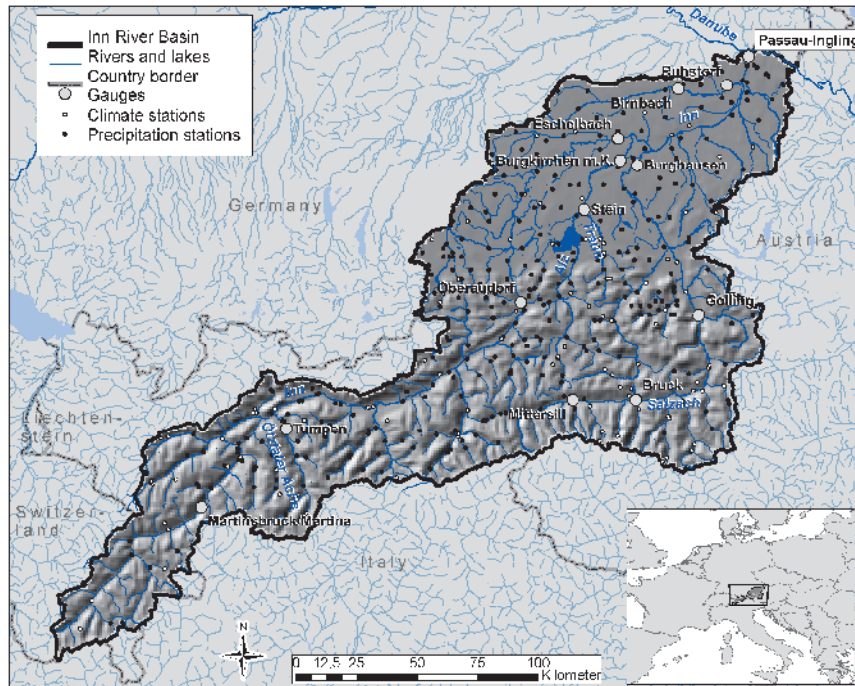


Abb. 10: Inneinzugsgebiet bis Pegel Passau-Ingling

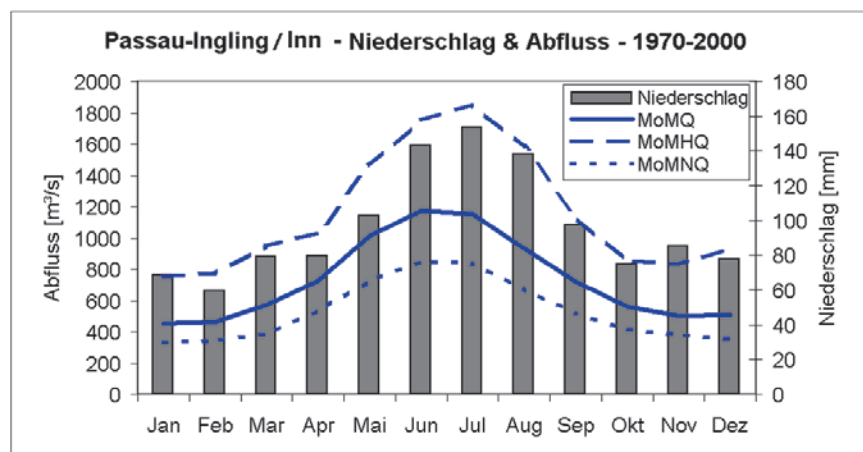


Abb. 11: Jahresgang des Abflusses (1970-2000) am Pegel Passau-Ingling/Inn

Die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des Inn erfolgten im Projekt AdaptAlp (Anpassung an den Klimawandel im Alpenraum) sowie in KLIWA (BLfU, 2011).





### 2.3.2 Klimaprojektionen

Es wurde ein Ensemble aus 16 regionalen Klimaprojektionen ausgewertet (Kombination aus vier Globalmodellen und 4 Regionalmodellen, Emissionsszenario A1B). In Abb. 12 (Temperaturveränderung) und in Abb. 13 (Niederschlagsveränderung) sind diese Klimaprojektionen für die „nahe Zukunft“ (2021-2050) und die „ferne Zukunft“ (2071-2100) dargestellt. Daraus wurden 10 Klimaprojektionen für die Impactmodellierung am Inn verwendet.

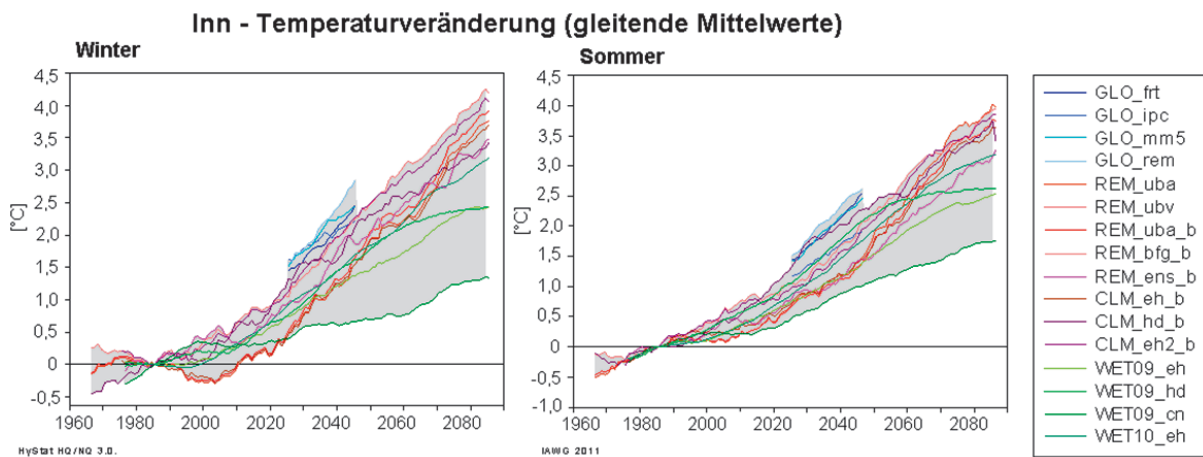


Abb. 12: Veränderung der Lufttemperatur im Zukunftsszenario

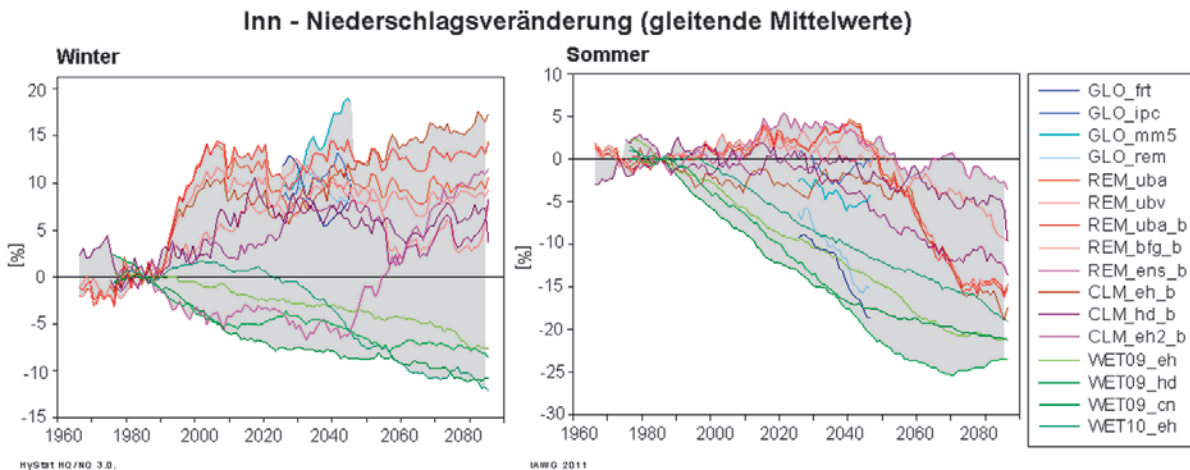


Abb. 13: Veränderung des Niederschlags im Zukunftsszenario

### 2.3.3 Ergebnisse Wasserhaushaltssimulation

Die Wasserhaushaltsmodellierung wurde für 10 Klimaprojektionen durchgeführt. Bei den mittleren monatlichen Hochwasserabflüssen am Pegel Passau-Ingling/Inn (Abb.14) ergeben sich im Zukunftsszenario teils starke Zunahmen im Winterhalbjahr, ein überwiegend robustes Signal. Im Sommer zeigen sich starke Abnahmen erst in der „fernen Zukunft“.

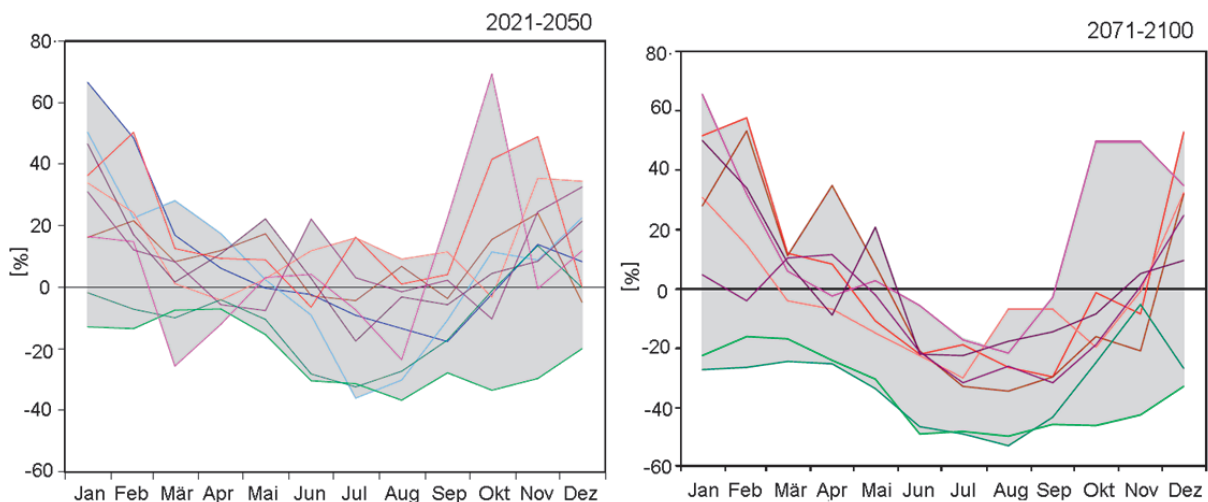


Abb. 14: Veränderung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse MoMHQ am Pegel Passau-Ingling/Inn beim Zukunftsszenario

## 3 Aspekte zur Anpassung

Flexibilität und Vorsorgeprinzip sind im Umgang mit den bestehenden Unsicherheiten und angesichts der Bandbreite an möglichen Ergebnissen angebracht. Die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte in den unterschiedlichen Regionen muss berücksichtigt werden, aber ebenso auch die nach wie vor bestehenden Unsicherheiten.

Kosten-Nutzen-Analysen sind ein notwendiges Instrument zur Entscheidungsfindung bei der Wahl der Anpassungsmaßnahme. Anpassungsmaßnahmen sind zu bevorzugen, die möglichst ein weites Spektrum abdecken, robust und nachrüstbar sind und auch möglichst noch für andere Aspekte von Nutzen sind.

Bereits im Jahr 2005 wurde in Baden-Württemberg und Bayern für den technischen Hochwasserschutz eine Anpassungsstrategie entwickelt, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den Unsicherheiten Rechnung trägt, die es zwangsläufig bei jeder Abschätzung für die Zukunft gibt („flexible and no regret“-Strategie).

Die in 2005 in Baden-Württemberg und Bayern eingeführten Klimaänderungsfaktoren und die damals getroffenen Regelungen bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen entsprechen dem Vorsorgegrundsatz und behalten weiterhin ihre Gültigkeit (z. B. LfU, 2005).

Neben dem Technischen Hochwasserschutz steht für die Anpassung an den Klimawandel das gesamte Instrumentarium des Hochwasserrisikomanagements zur Verfügung. Dies betrifft insbesondere Maßnahmen im Bereich der Hochwasservorsorge und im Bereich des Hochwasserflächenmanagements wie z. B. Hochwassergefahrenkarten, Überschwemmungsgebiete, Alarm- und Einsatzpläne, Eigenvorsorge.



Die Europäische Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie fordert eine Berücksichtigung des Klimawandels. Mit dieser Richtlinie, die insbesondere auf Maßnahmen der Hochwasservorsorge, des Flächenmanagements und der Gefahrenabwehr abhebt, steht auch für die Zukunft ein geeignetes Instrument zur Anpassung an den Klimawandel im Hochwasserbereich zur Verfügung.

#### 4 Literatur

- Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU, 2011): „Untersuchung zum Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für das Inneinzugsgebiet mittels verschiedener Klimaszenarien“, AdaptAlp technical report basierend auf einem Bericht von Willems, W. und Stricker, K., [www.adaptalp.org](http://www.adaptalp.org), 2011
- HYDRON (2007): „Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen unter Verwendung der WETTREG-Daten (2006) im Rheineinzugsgebiet von Baden-Württemberg und der Schweiz“. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- HYDRON (2010): „Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten (Version 4.2) und mit WETTREG-Daten (2009) für das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms“. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- HYDRON (2012): „Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten Version 4.8 für das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms“. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des KIT (2012): „Einfluss der Klimaänderung auf Abflüsse und Wasserstände – Rhein zwischen Alpenrhein und Oberrhein bis Pegel Worms“. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des KIT (2011): „Bereitstellung von am KIT berechneten CCLM-Antriebsdaten, Version 4.8, für Abflussmodelle“. Unveröffentlichte Berichte im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz und des Bayerischen Landesamts für Umwelt
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU, 2005): „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“, Karlsruhe, ISBN 3-88251-288-1

## **Niedrigwasser – erkennbare Veränderungen und wasserwirtschaftliche Folgen**

Dr. Michael Altmayer<sup>1</sup>, Dr. Harald Morscheid<sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz;

<sup>2)</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt

### **1 Einleitung**

Die mit dem Klimawandel einhergehenden Veränderungen der atmosphärischen Zirkulationssysteme, verbunden mit einer Zunahme der Häufigkeit und Intensität von extremen Wetterlagen stellen die Wasserwirtschaft vor neue Herausforderungen. Die im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA ausgewerteten Klimaszenarien belegen die klimatischen Veränderungen auch für den Süddeutschen Raum und deuten auf eine Verschärfung der Trends hin. Die Trockenereignisse im November 2011, aber auch der Herbst 2012 und insbesondere die Trockenjahre 1976 und 2003 sind den meisten noch gut im Gedächtnis geblieben. Die klimatisch bedingten Veränderungen erfordern von den betroffenen Akteuren in Politik, Wirtschaft und Verwaltung ein vorausschauendes Handeln.

In Folge der breit gefächerten Wirkungsbeziehungen klimatischer Extremereignisse sind insbesondere durch Trockenheit und Niedrigwasser viele Bereiche betroffen: die Gewässer als Lebensraum selbst und wasserwirtschaftlich bedeutende Handlungsfelder wie Wasserversorgung, Wasserkraft, Speicher- und Talsperrenbewirtschaftung, Energiewirtschaft, Schifffahrt und Abwasserbeseitigung. Direkte oder indirekte Auswirkungen werden auch für die Landwirtschaft sowie für Fischerei und Tourismus erwartet. Konkurrierende Nutzungsansprüche, wirtschaftliche Einbußen und Beeinträchtigungen der Gewässerqualität sind eine Auswahl von Problemen, die sich in diesem Zusammenhang ergeben können.

### **2 Niedrigwasser in der Vergangenheit**

#### **Das Niedrigwasserjahr 2003**

Die Auswertung vergangener Niedrigwasserperioden liefert eine gute Grundlage, Wirkungsbeziehungen und Probleme zu erkennen und daraus für die Zukunft zu lernen. Der Vergleich mit dem Jahr 2003 ist deshalb interessant, weil er als Ereignis, das bisher statistisch höchstens alle 10.000 Jahre auftreten sollte (Schönwiese et al. 2003), einen Blick in eine mögliche Zukunft gewährt hat. Durch die Veränderung des mittleren Klimas und seiner Variabilität könnte nämlich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts durchaus jeder zweite Sommer ähnliche Temperaturen aufweisen (Schär et al. 2004). Das Niedrigwasserjahr 2003 hat uns trotz einer guten Ausgangsposition mit einem feuchten Winter 2002/2003 eindrücklich die Auswirkungen auf verschiedene Sektoren gezeigt. Wie trocken das Jahr z. B. in Bayern tatsächlich war, zeigt Abb. 1 mit dem sommerlichen Niederschlagsdefizit und zwei Beispielen für die mittleren monatlichen Abflüsse dieses Jahres.

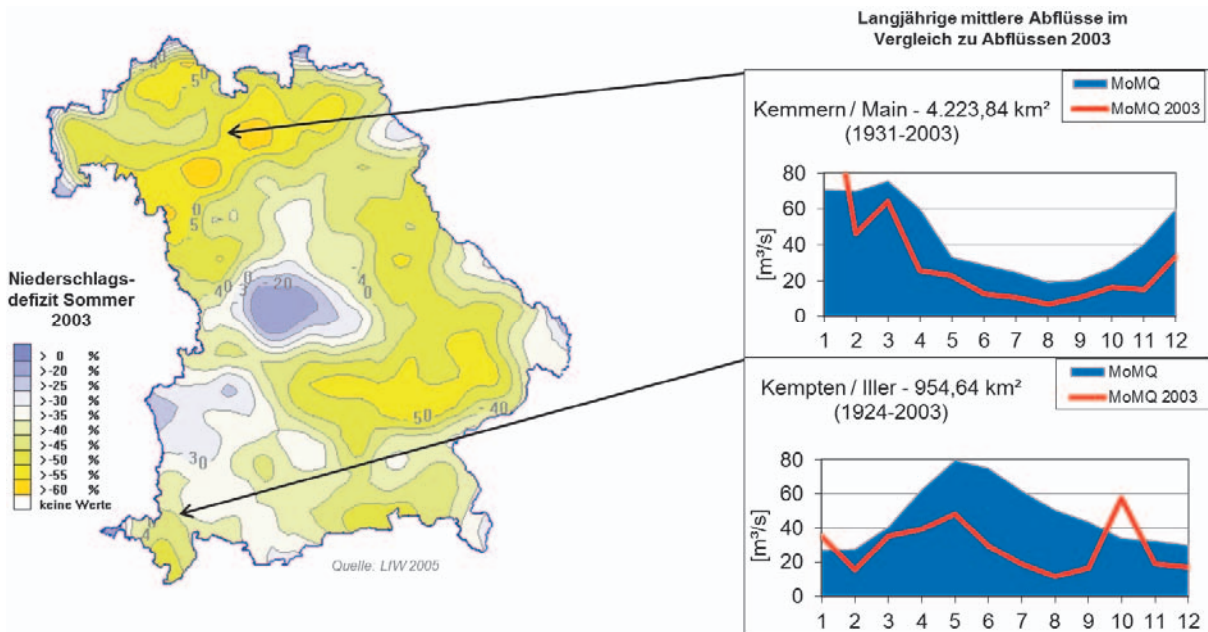


Abb. 1.: Niederschlagsdefizit (Jun – Aug; Abweichung vom Mittelwert 1961-1990) und mittlere monatliche Abflüsse (MoMQ) 2003 sowie zum Vergleich das langjährige Mittel 1993-2003 für die Pegel Kempten/Main und Kempten/Iller

Im Folgenden werden einige Beispiele von betroffenen Sektoren mit wasserwirtschaftlichem Bezug des Jahres 2003 herausgegriffen und dargestellt.

**Schifffahrt und Güterverkehr:** Sinkende Wasserstände führen zu geringen Abladetiefen der Schiffe, was 2003 zu einem reduzierten Frachtbetrieb um ca. 20 % und daraus resultierenden Verlusten im Gütertransport allein auf dem Rhein von ca. 90 Mio. € geführt hat (BMVBS, 2007).

**Trinkwasserversorgung:** Durch sinkende Grundwasserstände sind vereinzelt Einschränkungen bei der Entnahme von Wasser aus Brunnen und Quelfassungen möglich. Dank des hohen Ausgangsniveaus im Winter 2002/2003 waren in Bayern nur wenige Engpässe in der Trinkwasserversorgung aus Quellen in den Mittelgebirgen und am Alpenrand zu verzeichnen

**Wärmeeinleitung:** Sinkende Wasserstände und steigende Wassertemperaturen verringern die Verfügbarkeit von Kühlwasser drastisch. 2003 führte der Einsatz von Kühltürmen statt der üblichen Durchlaufkühlung zu einer Reduktion der Reaktorleistung des AKW Isar I um 40 %.

## Allgemeine Entwicklung

Die unterschiedliche Niederschlagsverteilung in Süddeutschland führt zu einem differenzierten Auftreten von Niedrigwasserereignissen im Norden und Süden: während die geringsten Jahresabflüsse in pluvial geprägten Einzugsgebieten z. B. von Mosel, Neckar- und Main verstärkt im Sommer und Herbst auftreten, ist dies in den nival geprägten Gewässern südlich der Donau oder im Oberrhein vor allem im Winter der Fall. Kritisch aus wasserwirtschaftlicher aber auch ökologischer Sicht sind vor allem Niedrigwassersituationen im Sommerhalbjahr, wenn langanhaltende Trockenperioden mit geringen Niederschlägen, hohen Temperaturen und starker Verdunstung zusammenfallen.



Wie wirken sich hier die meteorologischen Veränderungen der letzten Jahrzehnte aus? Der KLIWA-Monitoringbericht belegt, dass die mittlere Jahrestemperatur in Süddeutschland zwischen 1931 und 2010 um etwa 1 °C gestiegen ist, wodurch auch die Verdunstungsrate ansteigt. Bezüglich der Niederschlagsverteilung wurde in diesem Zeitraum in den Sommermonaten nur eine leichte Niederschlagsabnahme registriert (-2 %) mit den größten Defiziten im Rheingebiet und an den Alpen. In den Wintermonaten hingegen ist eine deutliche Zunahme (+21 %) feststellbar. Auswertungen zum Auftreten großräumiger Trockenwetterlagen belegen für den Zeitraum 1881 - 2006 einen hochsignifikanten Anstieg seit den siebziger Jahren. Dies führte bereits zu einer Verdoppelung der Wahrscheinlichkeit eines trockenen, heißen Sommers oder einer extrem trockenen Vegetationsperiode im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren (KLIWA 2012). Dennoch konnten die Auswertungen von Pegelzeitreihen nur an zwei Pegeln in Rheinland Pfalz eine signifikante Zunahme oder Verschärfung von Niedrigwasserphasen belegen (KLIWA 2011). Die meisten süddeutschen Pegel zeigten dagegen weitgehend unveränderte oder signifikant ansteigende Niedrigwasserabflüsse (s. auch Beitrag „Hydrologisches Monitoring“). Hier macht sich in nahezu allen untersuchten Gewässern der Einfluss wasserwirtschaftlicher Maßnahmen zur Aufhöhung von Niedrigwasserabflüssen bemerkbar.

Grundwasserstände und Quellschüttungen sind sensible Anzeiger für Wasserdefizite unabhängig von markanten Einzelereignissen. So zeigen Ergebnisse von Langzeituntersuchungen aus Rheinland-Pfalz zuletzt eine signifikante Abfolge von Trockenjahren, (Abb. 2), die für zahlreiche Nutzungen (z. B. Wasserversorgung, landwirtschaftliche Bewässerung) den Handlungsrahmen vorgibt. Detailaussagen zur Entwicklung der Grundwasserhältnisse in Süddeutschland liefert der anschließende Beitrag „Grundwasser“.

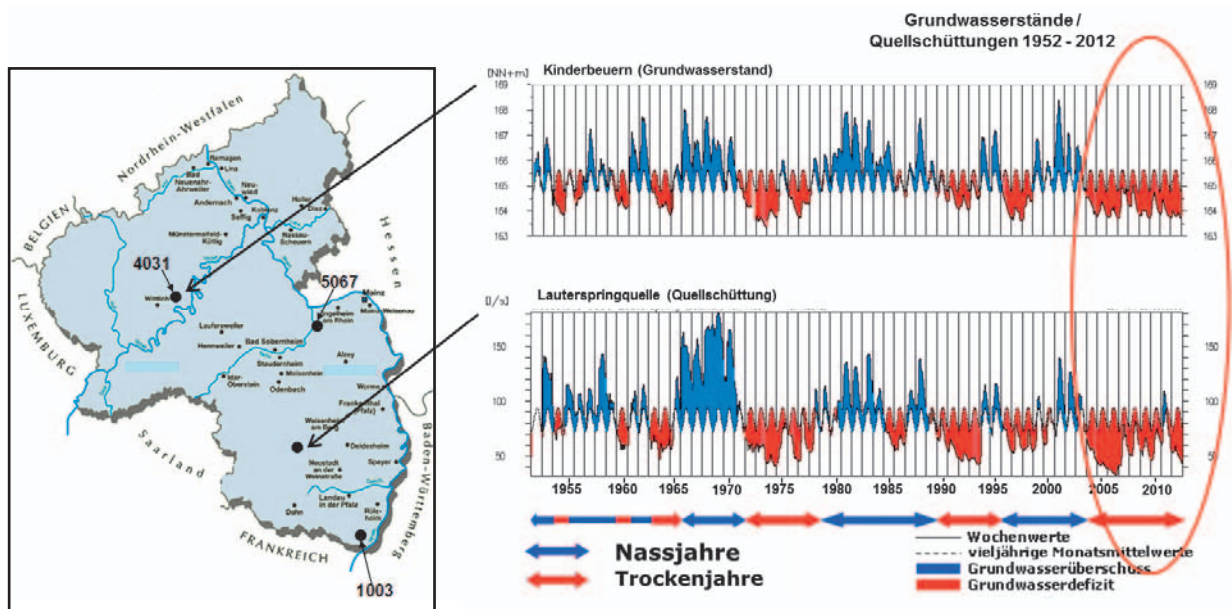


Abb. 2: Einfluss von Trocken- und Nassjahren auf Grundwasserstände und Quellschüttungen in Rheinland-Pfalz im Zeitraum 1950 – 2012 an zwei repräsentativen Beispielen (Grafik: LUWG RP).



### 3 Niedrigwasser in der Zukunft

Regionale Klimaprojektionen geben einen Ausblick auf weitergehende Entwicklungen. So wird sich die mittlere Jahrestemperatur je nach Region und Jahreszeit bis Mitte des 21. Jahrhunderts nach den bislang ausgewerteten Klimasimulationen um weitere 1 °C bis 2 °C erhöhen (s. Beitrag „Regionale Klimaprojektionen“). Die Niederschläge werden im Winterhalbjahr voraussichtlich weiter steigen oder gleich bleiben, im Sommerhalbjahr jedoch deutlich stärker abnehmen als bisher in den Langzeitauswertungen nachgewiesen. Diese Veränderungen haben wiederum unmittelbare Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt, der in Trockenphasen das natürliche Abflussgeschehen in den Fließgewässern steuert. Die in KLIWA (2012) durchgeführte Auswertung zur Veränderung der Häufigkeit von Trockenwetterslagen in verschiedenen Klimaprojektionen kommt zudem zu dem Schluss, dass in Süddeutschland insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts mit einem deutlichen zusätzlichen Anstieg der Trocken- und Niedrigwasserperioden im Sommer gerechnet werden muss.

In Folge der zu erwartenden klimatischen Veränderungen sinken die Niedrigwasserabflüsse und Niedrigwasserphasen treten häufiger und länger auf. Abbildung 3 zeigt beispielhaft das Ergebnis verschiedener Ensembles von Klimaprojektionen aus Bayern (6 Projektionen, 4 RCM, 3 GCM) und Baden-Württemberg (8 Projektionen, 4 RCM, 1 GCM). Dargestellt ist die Veränderung des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses an vier ausgewählten Pegeln (2021-2050 vs. 1971-2000). Deutlich zu erkennen sind die überwiegend übereinstimmenden Abnahmen der Niedrigwasserabflüsse im Sommer/Herbst und zumeist Zunahmen im Winter/Frühjahr. Die Gebiete sind von den Veränderungen jedoch je nach vorherrschendem Regime unterschiedlich betroffen, die größten Niedrigwasserverschärfungen ergeben sich im pluvialen Regime, wo die Abnahmen mit der saisonalen Niedrigwasserphase zusammentreffen. Im nivalen Regime wird der saisonale (Niedrigwasser-) Abfluss dagegen eher ausgeglichen.

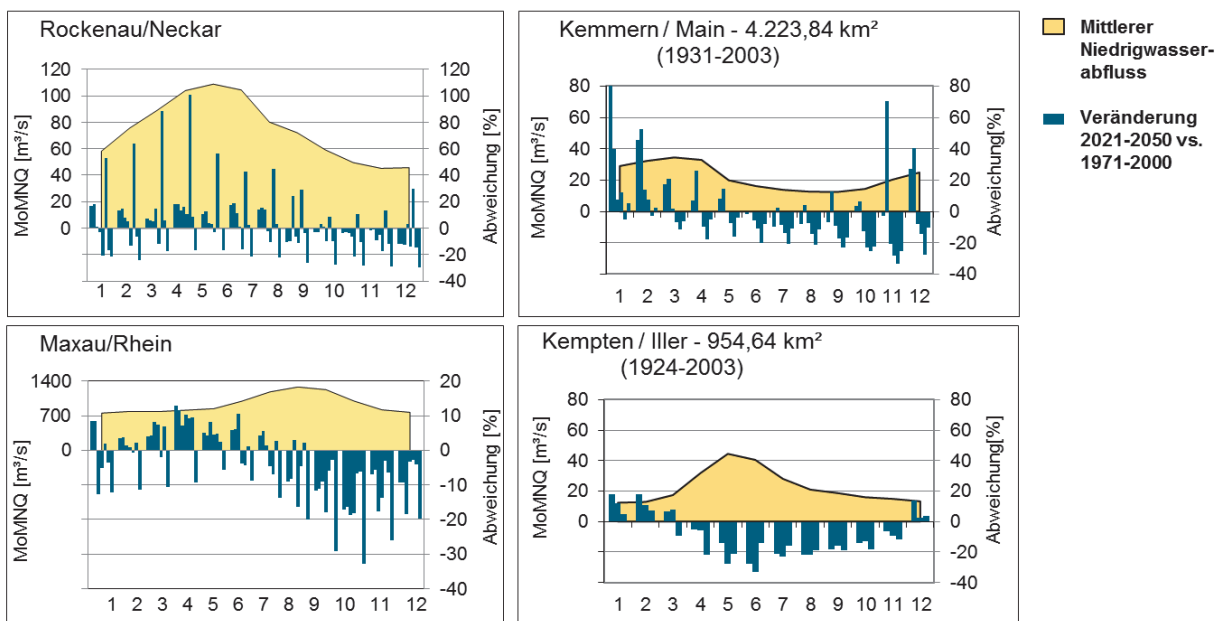


Abb. 3: Veränderungen des mittleren monatlichen Niedrigwasserabflusses MoMNIQ (2021-2050 vs. 1971-2000) an den Pegeln Rockenau, Maxau, Kemmern und Kempten

Einen guten Hinweis auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf nahezu das gesamte KLIWA-Gebiet gibt Abb. 4, in dem die Veränderung des mittleren Niedrigwassers für das Sommerhalbjahr in der nahen Zukunft mit den Projektionen WETTREG2006 und WETTREG2010/ECHAM5 berechnet wurde. Mit Ausnahme von Rheinland-Pfalz zeigen alle weiteren ausgewerteten Pegel in Bayern und Baden-Württemberg zumeist deutliche Abnahmen zwischen 10 - 20 %. Dabei fallen die Änderungen in der Projektion WETTREG2010 durchweg stärker aus als in der Projektion WETTREG2006.

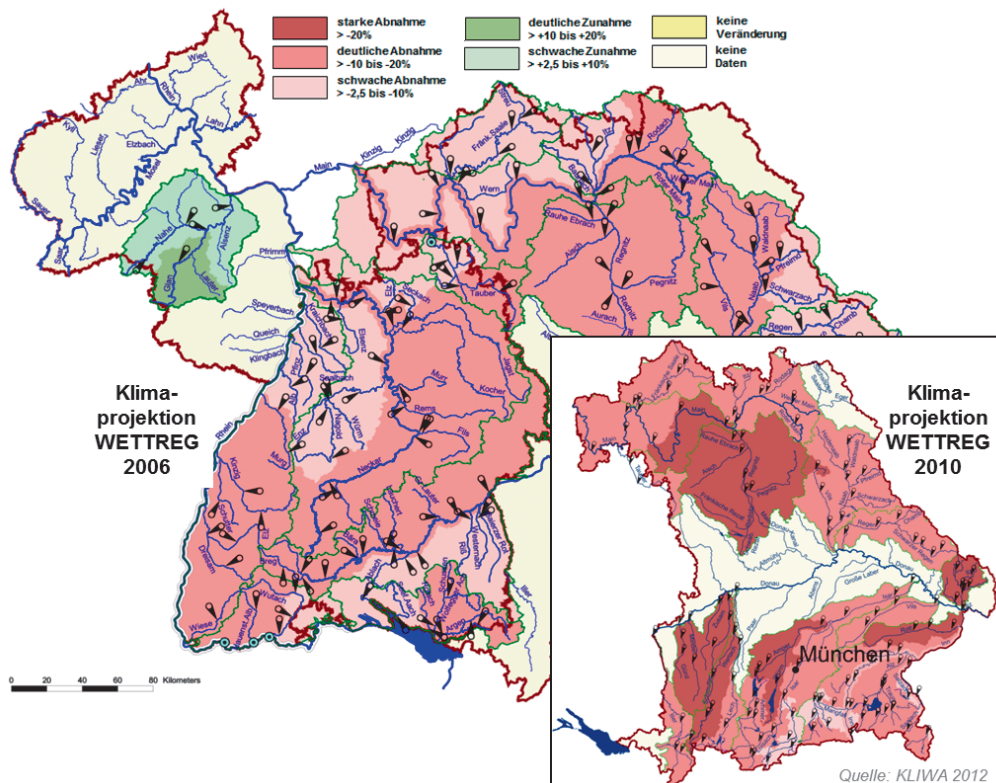


Abb. 4: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses für das hydrologische Sommerhalbjahr (Jun. – Nov.) im Zeitraum 2021-2050 vs. 1971-2000 mit den Projektionen WETTREG2006/ECHAM5 und WETTREG2010/ECHAM5

#### 4 Ausgewählte Anpassungsbeispiele

Bereits heute gibt es eine Vielzahl von Anpassungsmaßnahmen an Niedrigwasserbedingungen, die als Beispiel für andere Flussgebiete auch im Zuge der Anpassung an die Folgen des Klimawandels übernommen werden können. Hierzu gehören sowohl kurzfristige operationelle Maßnahmen, die während konkreter Niedrigwassersituationen ergriffen werden können, als auch langfristige Maßnahmen, die bei zukünftigen Niedrigwasserereignissen vorbeugend wirken und damit mögliche Nutzungskonflikte mindern können. Die folgenden Beispiele geben einen kleinen Querschnitt aus der breiten Palette bereits erfolgreich praktizierter Möglichkeiten wieder.



Alarmplan für den bayerischen staugeregelten Main (AMÖ): Der im November 2012 neu gestaltete Alarmplan regelt die Zuständigkeiten und Maßnahmen für den Main bei wetterbedingt kritischen Situationen. Bei Erreichen der festgesetzten Schwellenwerte für Sauerstoffkonzentration, Wassertemperatur, pH oder Abfluss in entsprechenden Meldestufen wird eine Informations- und Meldekette in Gang gesetzt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet. So sind z. B. neben intensiveren Beobachtungen und Messungen ggf. die Einleitungen von Abwärme oder Abwasser zu beschränken, Umsiedlungen oder Bergungen von Gewässerorganismen und Turbinenbelüftungen durch Wasserkraftwerke vorzunehmen.

### Wärmelastrechnungen und Wärmemodellierung

Anthropogene Wärmeeinleitungen können Gewässer erheblich belasten und zu ökologischen Schäden führen. Die Vorgaben nach EG-WRRL und den landesrechtlichen Regelwerken beschränken Wärmeeinleitungen auf festgelegte Aufwärmspannen und Maximaltemperaturen. Um ein Überschreiten zu verhindern, können mit Wärmemodellierungen bzw. sog. Wärmelastrechnungen die noch zulässigen Wärmeeinleitungen ermittelt werden. Entsprechende Modellierungen existieren z. B. für verschiedene Fließgewässer Bayerns (Abb. 5 li) sowie für den Neckar und Rhein (s. Beitrag „Niedrigwassermanagement Neckar/Rhein“).

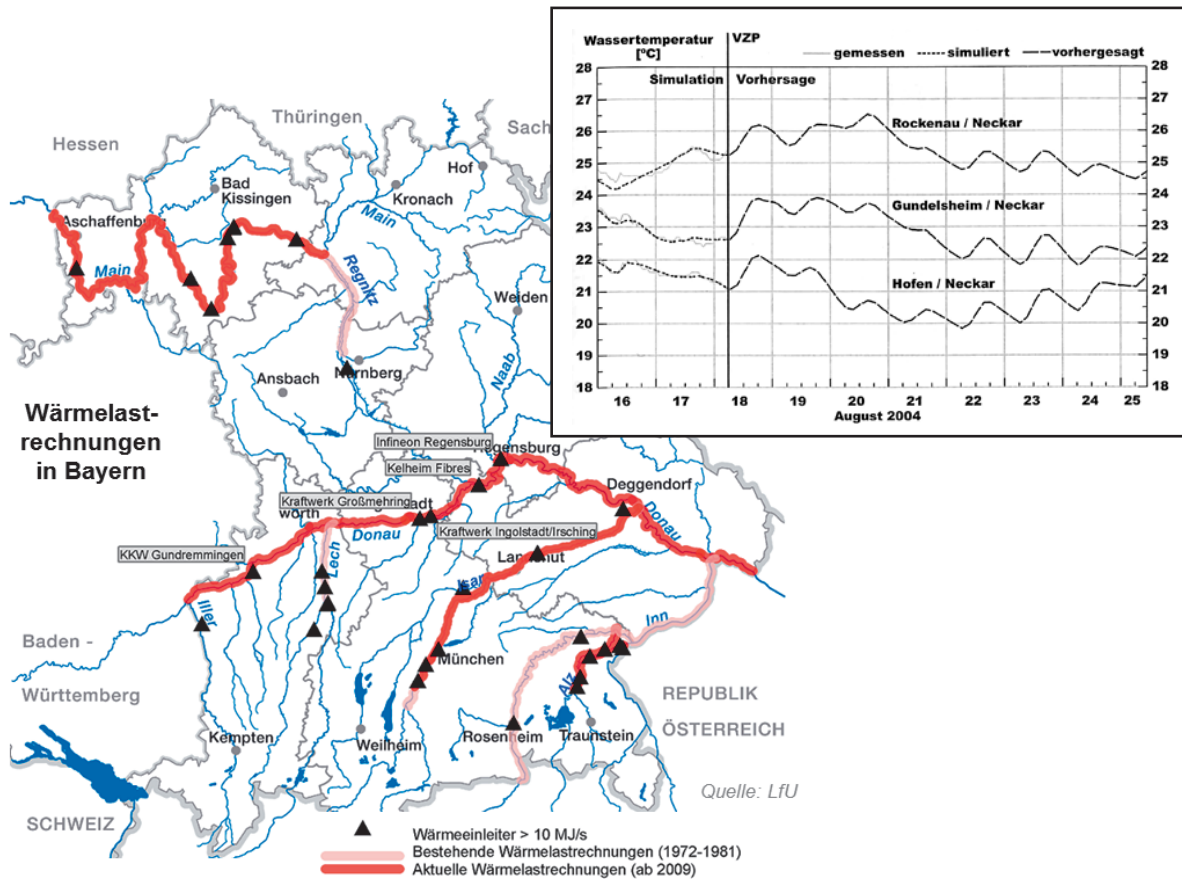


Abb. 5: Bereiche mit Wärmelastrechnung und Wärmeeinleitern > 10 MJ/s in Bayern (li.) und Ausgabe der Wassertemperaturvorhersagen im operationellen Testbetrieb des Wärmemodells Neckar (re. oben)



### Niedrigwasseraufhöhung

Eine sehr wirkungsvolle Maßnahme gegen Niedrigwasser ist die Niedrigwasseraufhöhung von Fließgewässern aus Speichern. Abb. 6 zeigt am Beispiel Bayerns das bereits bestehende Netz an 25 staatlichen Wasserspeichern, von denen 15 primär der Niedrigwasseraufhöhung dienen. Wie erfolgreich diese Systeme funktionieren, konnte 2003 am Wasserstand der Regnitz beobachtet werden. Das Überleitungssystem vom Donau-Einzugsgebiet (Altmühl, Donaukanal) in das Maingebiet (Rednitz, Regnitz) konnte am Regnitz-Pegel Hüttendorf über den gesamten Sommer hinweg den angestrebten Abfluss von rund 22 m<sup>3</sup>/s aufrecht erhalten. In der Trockenperiode 1976 vor Inbetriebnahme der Überleitung sank der Abfluss dagegen mehrmals unter 10 m<sup>3</sup>/s.

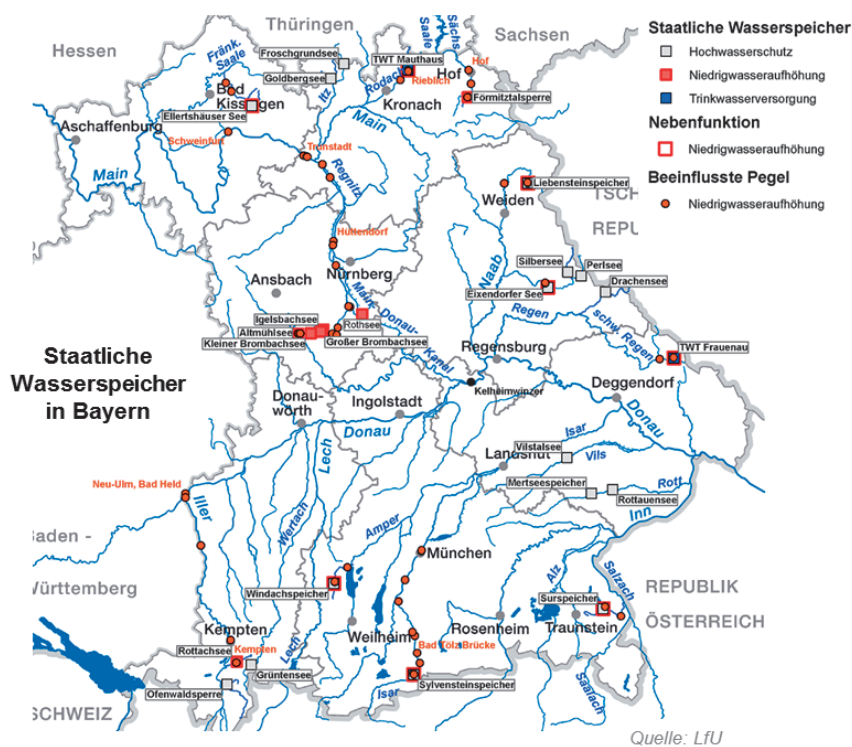


Abb. 6: Staatliche Wasserspeicher sowie durch Niedrigwasseraufhöhung beeinflusste Pegel in Bayern

Über die angeführten Beispiele hinaus gibt es eine Reihe weiterer Anpassungsmöglichkeiten aus den verschiedenen betroffenen Bereichen, wie z. B. der Wasserversorgung (2. Standbein, Verbundsysteme), Gewässerökologie (Beschattung, Durchgängigkeit, Vernetzung), Wasserkraft (angepasste Wirtschaftlichkeitsanalysen) oder Teichwirtschaft (reichhaltigere Wasserbemessung), die zukünftige Nutzungskonflikte entschärfen oder mildern können.





## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Der Großteil der aktuell gültigen Klimaprojektionen geht von einer zukünftigen Temperatur- und damit Verdunstungszunahme sowie einer Abnahme der Niederschläge im Sommer aus. Damit verbundene häufigere und länger andauernde Trockenperioden werden zum vermehrten Auftreten von Niedrigwasserphasen in den oberirdischen Gewässern und im Grundwasser führen. Die Trockenperioden der jüngsten Vergangenheit machen deutlich, dass die Gewässer in ihrer Funktion als Lebensraum von derartigen Extremereignissen stark beeinträchtigt werden können. Auswirkungen sind auch für wasserwirtschaftlich bedeutende Handlungsfelder wie Trinkwasserversorgung, Schifffahrt oder Speicherbewirtschaftung zu erwarten. Auch die Energiewirtschaft ist im Bereich der Wasserkraft oder bei der Nutzung von Kühlwasser aus Gewässern in Niedrigwasserphasen betroffen. Konkurrierende, sich verschärfende Nutzungsansprüche und wirtschaftliche Einbußen sind mögliche Folgen.

Als Konsequenz aus diesen Erkenntnissen soll einerseits mit weiteren Modellrechnungen und neuen Emissionsszenarien des IPCC das Wissen über die künftige klimatische Entwicklungen verbessert und unsere Aussagen abgesichert werden. Andererseits wurden bereits in der Vergangenheit und werden auch künftig Maßnahmen seitens der Wasserwirtschaft ergriffen, um eine zielgerichtete Anpassung im Bereich Niedrigwasser zu ermöglichen. Hierzu liefern die bereits ausgewerteten Messdaten sowie die Klima- und Abflussprojektionen schon heute eine gute Wissensgrundlage.

Dabei haben die Erfahrungen vergangener Niedrigwasserereignisse gezeigt, dass zwar eine Reihe von Anpassungsmaßnahmen bereits bestehen, sie müssen jedoch noch stärker gebündelt, koordiniert und ggf. erweitert werden, um der Verschärfung zukünftiger Niedrigwassersituation begegnen zu können. Wichtige Bausteine hierzu sind ein belastbares Niedrigwassermonitoring, eine Niedrigwasservorhersage sowie ein kurz- und langfristig angelegtes Niedrigwassermanagement. Bereits jetzt existiert in Bayern mit dem Niedrigwasserinformationssdienst ein Instrument zum Monitoring von Niedrigwasserereignissen und zur Information der Öffentlichkeit; Vorhersage und Management sind die nächsten Schritte. In Baden-Württemberg ist eine Niedrigwasservorhersage bereits an 90 Pegeln umgesetzt.

Wichtig bei der Planung aller langfristig wirkenden Maßnahmen ist, dass die möglichen Veränderungen durch den Klimawandel im Rahmen einer „No-Regret-Strategie“ berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass sie so ausgeführt werden, dass die Veränderungen entweder bereits berücksichtigt sind, oder zukünftig leicht noch mit einbezogen werden können. Häufig können dabei Win-Win-Situationen erreicht werden, bei denen die Anpassungsmaßnahmen auch in anderen Bereichen positive Auswirkungen haben.

Die Verschärfung von Niedrigwassersituationen stellt eine wichtige wasserwirtschaftliche Herausforderung im Rahmen der Anpassung an den Klimawandel dar. Die Verbesserung des Kenntnisstandes über Art und Umfang künftiger Ereignisse sowie das rechtzeitige Ergreifen der notwendigen Maßnahmen hilft, künftige Interessenskonflikte zu entschärfen oder gar nicht erst entstehen zu lassen.

## 6 Literatur

- BMVBS (2007): Schiffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels. S. 56, Berlin.
- KLIWA (2001): Monitoringbericht 2011: Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, 40 S.
- KLIWA (2009): Heft 14: Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S.
- KLIWA (2012): Heft 18: Die Entwicklung von trockenen Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S.
- Schär C., Vidale P.L., Lüthi D., Frei C., Häberli C, Liniger M.A, and Appenzeller C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves, *Nature* 427, 332-336
- Schönwiese C.-D., Staeger T., Trömel S., Jonas M. (2003): Statistisch- klimatologische Analyse des Hitzesommers 2003 in Deutschland, in: Deutscher Wetterdienst: Klimastatusbericht 2003, 123-132



## **Grundwasser – Veränderungen und fachliche Schlussfolgerungen**

Dr. Jörg Neumann & Sybille Wendel  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### **1 Einleitung**

In Süddeutschland wird der überwiegende Teil des Trinkwassers aus Grundwasser gewonnen. Einer nachhaltigen Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Die Kenntnis über mögliche langfristige Entwicklungen der regionalen Grundwasserverhältnisse ist deshalb auch zur Ableitung von wasserwirtschaftlichen Anpassungsmaßnahmen von grundlegendem Interesse. Vor diesem Hintergrund wird der Bereich Grundwasser im Rahmen von KLIWA seit 2006/2007 als eigenständiges Thema bearbeitet. Teilergebnisse wurden bereits 2006 und 2009 beim 3. und 4. KLIWA-Symposium präsentiert (KLIWA, 2007 und 2009). Im Fokus des Interesses stehen sowohl die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das Grundwasserdargebot als auch auf die Beschaffenheit. Methodisch erfolgt analog der übrigen KLIWA-Arbeitsgebiete eine retrospektive Betrachtung auf Basis von Messdaten („Langzeitsimulation“) sowie der Blick in die Zukunft mit Hilfe von regionalen Klimaprojektionen („Szenariosimulationen“). Zur Ableitung von Handlungsempfehlungen, speziell für die Wasserversorgung, werden zusätzlich Fallstudien zu den regionalen Auswirkungen des Klimawandels in Problembereichen durchgeführt. Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse bereits durchgeführter KLIWA-Untersuchungen vorgestellt und erste fachliche Schlussfolgerungen gezogen.

### **2 Statistische Auswertung von Messdaten**

Für insgesamt 127 Messstellen im KLIWA-Untersuchungsraum von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz wurden die Ganglinien der Grundwasserstände (82 Messstellen) bzw. der Quellschüttungen (45 Messstellen) detailliert untersucht. Die betrachteten Zeitreihen beginnen in den meisten Fällen Anfang der 1950er Jahre. Von ausgewählten Messstellen liegen aber auch historische Zeitreihen vor, die teilweise schon mehr als 100 Jahre zurück reichen. Ergänzend wurden an 96 Abflusspegeln die zugehörigen Ganglinien ausgewertet und daraus der grundwasserbürtige Anteil bestimmt. Das methodische Vorgehen und die detaillierten Ergebnisse sind in KLIWA-Heft 16 (KLIWA, 2011) ausführlich beschrieben. Im weiteren Verlauf werden einige wesentliche Inhalte kurz zusammengefasst.

Neben den o.g. grundwasserspezifischen Messreihen wurden auch exogene (= äußere, nicht unmittelbar mit dem Grundwasser in Verbindung stehende) Variablen in die Auswertung einbezogen, um mögliche statistische Zusammenhänge aufzuzeigen. Als solche wurden insbesondere lange Zeitreihen der Klimaparameter Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer, relative Luftfeuchte, Niederschlag und Wasserabgabe aus Schnee (Wasserdargebot) betrachtet. All diese Größen zeichnen sich durch ihren Einfluss auf die Verdunstung bzw. die Neubildungsrelevante Wassermenge und die damit verbundenen direkten Auswirkungen auf den Grundwasserhaushalt aus.

Die in diesem Kontext durchgeführten statistischen Untersuchungen beziehen sich vor allem auf

- sich verändernde Periodizitäten und Trends in den Grundwasserständen und Quellschüttungen,
- sich verändernde Periodizitäten, Phasen und Trends in den exogenen Variablen,
- Abweichungen vom mittleren Verhalten des grundwasserbürtigen Abflusses (und damit der Grundwasserneubildung).

Die klassische statistische Methodik der linearen Regressionsanalyse wurde dabei durch weitere, zum Teil komplexe Verfahren ergänzt, um den statistischen Eigenschaften der untersuchten Zeitreihen besser gerecht zu werden. Dabei kamen u. A. zum Einsatz:

- Zirkular-lineare Regression zur Untersuchung von Veränderungen im Jahresgang,
- segmentierte Regression und heuristische Zeitreihensegmentierung zur Aufdeckung und Darstellung von mittel- und langfristigen Veränderungen,
- lokale Trends, ermittelt mittels lokal gewichteter Regressionen sowie anschließender Clusteranalyse, zur Ermittlung möglicher Zusammenhänge mit hydrogeologischen Merkmalen,
- Trenddreiecke (Mann-Kendall-Trendtest), um signifikante Änderungen der Grundwasserstände und Quellschüttungen zusammenfassend darzustellen,
- Wavelet- und Spektralanalyse zur Untersuchung von Periodizitäten,
- Verfahren der segmentierten, instationären Extremwertanalyse zur Beschreibung des Wahrscheinlichkeitsverhaltens der Extremwertserie,
- zirkular-lineare Regression und Regression der Defizitdauer auf die Zeit zur Untersuchung der Veränderung von Defiziten und Defizitauern,
- bi- und multivariate Betrachtungen als Grundlage von Prognosemodellen und daran anschließende Aufstellung von SARIMAX-Modellen (seasonal auto-regressive integrated moving average) unter Berücksichtigung exogener Komponenten zur synthetischen Generierung von Grundwasserstandsdaten.

Als wichtigste Ergebnisse der statistischen Untersuchungen von Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessreihen ist erstens festzuhalten, dass etwa 2/3 der Messstellen in Bezug auf ihr mittleres Verhalten eine signifikante, langfristige Entwicklung hin zu niedrigeren Werten aufweisen. Zweitens sind bei vielen Messstellen signifikante Änderungen der Saisonalität, d. h. innerjährliche Verschiebungen, festzustellen. So tritt das jährliche Maximum immer früher im Jahr auf. Im Mittel konnte an Hand der untersuchten Zeitreihen bereits eine Verschiebung des Maximums um etwa 0,6 d/a (also einer Verschiebung von 4 bis 6 Wochen seit 1950) beobachtet werden. Darüber hinaus geht diese Veränderung oft einher mit einer Verstärkung der Amplitude und damit einer höheren Variabilität. Diese Effekte sind vermutlich auf Änderungen des Niederschlagsregimes zurückzuführen. Drittens finden sich die in den Niederschlägen und im Wasserdargebot aufgedeckten großskaligen Periodizitäten (4- und 8-Jahreszyklen) auch in den oberflächennahen Grundwassermessstellen und Quellmessstellen wieder.

Hinsichtlich der Veränderungen von Extremwerten und der Veränderungen von Defiziten und Defizitauern sind demgegenüber noch keine eindeutigen Tendenzen feststellbar. Die auf Basis von signifikanten Korrelationen zwischen exogenen Variablen und Grundwasserständen bzw. Quellschüttungen entwickelten Prognosemodelle bilden die stochastischen Eigenschaften der gemessenen Daten zutreffend ab.

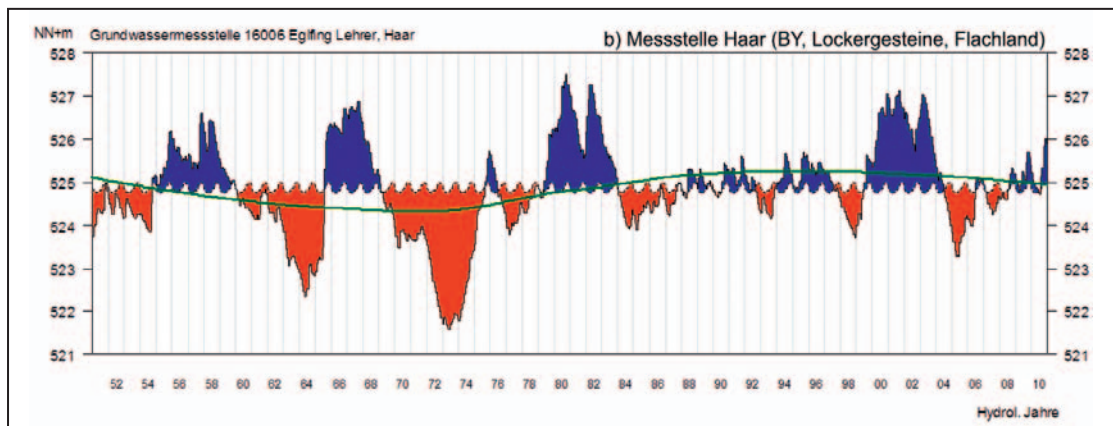


Abb. 1: Langzeitverhalten von Grundwasserständen am Beispiel der Messstelle Eglfing Lehrer (Quartär, Münchner Schotterebene). Dargestellt ist die vieljährige Überschuss-Defizitentwicklung des Grundwasserleiters in Verbindung mit dem gleitenden Mittel der Zeitreihe.

### 3 Simulation von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung

Zur Beurteilung der Entwicklung von Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in der Vergangenheit und der Zukunft wird seitens der drei KLIWA-Länder ein gemeinsames Bodenwasserhaushaltsmodell (GWN-BW) betrieben. Auf diese Weise kann der Bodenwasserhaushalt und die Grundwasserneubildung länderübergreifend konsistent simuliert werden. Ausgehend vom Niederschlag als zentraler Antriebsgröße liegen mit den Ergebnissen der Szenariosimulationen flächendifferenzierte Aussagen für folgende Wasserhaushaltsgrößen vor, die allesamt in enger Beziehung zur Grundwasserneubildung stehen:

- Lufttemperatur als verdunstungsrelevante, regionalisierte Modelleingangsgröße,
- Niederschlagshöhe als regionalisierte Modelleingangsgröße und wichtigste Wasserbilanzkomponente,
- Tatsächliche Verdunstung als zentrales Simulationsergebnis und wichtigste Verlustgröße der Wasserbilanz,
- Gesamtabflusshöhe als Wasserbilanzkomponente, welche der Differenz zwischen Niederschlag und tatsächlicher Verdunstung entspricht,
- Sickerwasserrate als vertikale Sickerung aus dem Bodenspeicher,
- Grundwasserneubildung als Bilanzkomponente, welche der Differenz zwischen Gesamtabfluss und Direktabfluss entspricht,
- Wasseräquivalent der Schneedecke als Zustandsgröße zur Beschreibung des mittleren Schneedeckenverhaltens und damit von Änderungen des Niederschlags- und Temperaturregimes,
- Trockenheitsindex als Zustandsgröße zur Beschreibung der Bodenwasserhältnisse, insbesondere hinsichtlich der Anzahl von Tagen mit geringer Füllung des Bodenwasserspeichers während Trockenperioden.

#### 3.1 Szenariosimulationen

Für die drei Bundesländer Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz wurden Szenariosimulationen auf Basis von WETTREG2006 für die Zeiträume 1971-2000 (Ist-Zustand), 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2071-2100 (ferne Zukunft) durchgeführt und hinsichtlich vieljähriger Mittelwerte und mittlerer Monatswerte, bezogen auf die drei Bundesländer und 25



Naturräume, ausgewertet. Das verwendete Modell GWN-BW und die detaillierten Ergebnisse sind in KLIWA-Heft 17 (KLIWA, 2012) beschrieben. Nachfolgend werden daraus einige ausgewählte Ergebnisse der Szenariosimulationen (WETTREG2006) für die nahe Zukunft 2021-2050 kurz zusammengefasst:

#### *Veränderung der Lufttemperatur*

Die mittlere Lufttemperatur steigt im Szenario für die nahe Zukunft gegenüber dem Vergleichszeitraum räumlich einheitlich um knapp 1° C an.

#### *Veränderung des Niederschlags*

Für die nahe Zukunft werden verhältnismäßig geringe Änderungen des mittleren Jahresniederschlags in einer Größenordnung von maximal 50 mm/a prognostiziert. Bei Betrachtung der hydrologischen Halbjahre fallen die Unterschiede deutlicher aus. In den drei Bundesländern werden steigende Niederschläge im Winter und sinkende Niederschläge im Sommer projiziert, d. h. es erfolgt eine innerjährliche Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in das Winterhalbjahr. Bezogen auf einzelne Länder fällt die Zunahme der Winterniederschläge in Rheinland-Pfalz (plus 35 mm, entspricht 9 %) sowie die Abnahme der Sommerniederschläge in Bayern besonders auf (minus 35 mm, entspricht 6 %). Dem stehen geringe Änderungen der Sommerniederschläge in Rheinland-Pfalz (minus 15 mm, entspricht 4 %) und Winterniederschläge in Bayern (plus 15 mm, 4 %) gegenüber.

#### *Veränderung der tatsächlichen Verdunstung*

Die projizierten Veränderungen der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe sind für weite Teile Süddeutschlands vergleichsweise gering gegenüber dem Ist-Zustand. Markante Zunahmen der Verdunstung bis 20 mm/a ergeben sich in Zukunft hingegen für Eifel und Westerwald, wo auch die deutlichsten Niederschlagszunahmen auftreten. Die höheren Werte im südlichen Oberrheingraben und im Bereich der fluvioglazialen Schotter (Rhein und Donau mit südlichen Zuflüssen) sind in einer ähnlichen Größenordnung und gehen hier auf ergiebige Bodenspeicher zurück, durch die erhöhte Verdunstungsraten begünstigt werden. Die erwartete Zunahme der mittleren Verdunstung von bis zu 25 mm/a in Schwarzwald, Alpenvorland und Alpen ist ausschließlich auf die Temperaturzunahme zurückzuführen, da in diesen Regionen die Verfügbarkeit von Wasser, unabhängig von der Niederschlagsentwicklung, keinen limitierenden Faktor für die Verdunstung darstellt. Im Jahresgang nimmt die Verdunstung zukünftig von Dezember bis Mai temperaturbedingt auffällig zu. Im Gegensatz dazu zeigen die Sommermonate Juli und August im Zusammenhang mit Niederschlagsdefiziten einheitlich abnehmende Verdunstungsraten. In Bayern und Baden-Württemberg werden die höheren Winterniederschläge durch eine erhöhte Verdunstung nahezu kompensiert.

#### *Veränderung von Gesamtabfluss und Sickerwasserrate*

Für die Gesamtabflusshöhe und Sickerwasserrate ergeben sich auf Länderebene im Jahresmittel Abnahmen für Bayern und Baden-Württemberg (etwa 20 mm/a), während für Rheinland-Pfalz leichte Zunahmen von ca. 10 mm/a zu verzeichnen sind. Dies entspricht für alle drei Länder einer Änderung von 4 bis 5 % im Jahresmittel. Bei Betrachtung der Änderungssignale in den hydrologischen Halbjahren zeigen sich in allen drei Bundesländern viel deutlichere Auswirkungen. Während im Sommerhalbjahr auf Grund der dann geringeren Wasserverfügbarkeit eine Tendenz zu spürbar geringeren Werten festgestellt werden kann (Bayern und Baden-Württemberg: über 20 mm, Rheinland-Pfalz: rd. 7 mm), treten im Winterhalbjahr vor allem in Folge der erhöhten Niederschläge auch etwas höhere Gesamtabflüsse und Sickerwasserraten auf (Bayern und Baden-Württemberg: kleiner 4 mm, Rheinland-Pfalz: rd. 17 mm).



### Veränderung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Leichten Zunahmen von rd. 15 mm/a im Nordwesten (Eifel / Rheinland-Pfalz) des KLIWA-Untersuchungsraums stehen Bereiche mit geringen Abnahmen von maximal 30 mm/a im Südosten (insbesondere am Alpenrand) gegenüber. Die restlichen Gebiete zeigen kein eindeutiges Änderungssignal bzw. weisen nur sehr geringe Abnahmen auf. Insgesamt kann man somit von einer Nordwest-Südost-Differenzierung sprechen. Bereiche, in denen großräumig bisher die geringsten Neubildungsraten zu verzeichnen waren, könnten zukünftig einen leichten Anstieg ihrer durchschnittlichen Grundwasserneubildung erfahren. Entscheidend für die Grundwasserbewirtschaftung ist letztlich die innerjährliche Dargebotsentwicklung. In Folge der beschriebenen Veränderungen bei Niederschlag und Sickerwasserrate sind hier auch Auswirkungen des Klimawandels auf den Jahresgang der Grundwasserneubildung zu erwarten.

### Veränderung des Trockenheitsindex

Für die drei Bundesländer ergibt sich ein vergleichsweise einheitliches Bild mit einer Zunahme des Trockenheitsindex in der Größenordnung von etwa 11 bis 14 Tagen pro Jahr. Damit steigen die Tage, an denen die „kritische“ nFKWe unterschritten wird auf 43 bis 75 Tage pro Jahr in der nahen Zukunft an. Der Anstieg ist nahezu ausschließlich auf zusätzliche Tage im Sommerhalbjahr rückführbar (Abb. 2). Bezogen auf einzelne Naturräume wird eine Zunahme von etwa 2 (Nordalpen) bis knapp 20 (Osttaunus) Tagen im Jahr projiziert, wobei in der Mehrzahl der Gebiete eine Zunahme des Trockenheitsindex von ca. 12 bis 16 Tagen für die nahe Zukunft erwartet wird.

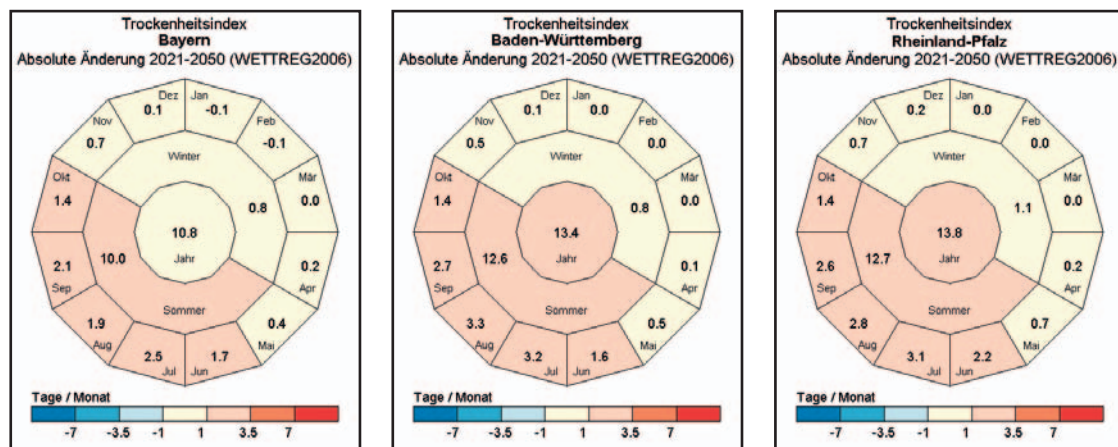


Abb. 2: Mittlere innerjährliche Änderung des Trockenheitsindex in den drei Bundesländern. Vergleich der Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 auf Basis von WETTREG2006 (ECHAM5/A1B). Angaben als Tage über den jeweiligen Zeitraum, die Farben entsprechen stets den mittleren Monatssummen.

### Veränderung des Wasseräquivalents der Schneedecke

Auf Ebene der Naturräume (Abb. 3) ergeben sich nennenswerte absolute Abnahmen (mittlere Änderung von Dezember bis März) bis max. 40 mm nur für wenige Mittelgebirgsregionen und die Alpen. Die bisher bereits schneearmen Naturräume fallen auf Grund der geringen Absolutwerte hier nicht mehr besonders auf.

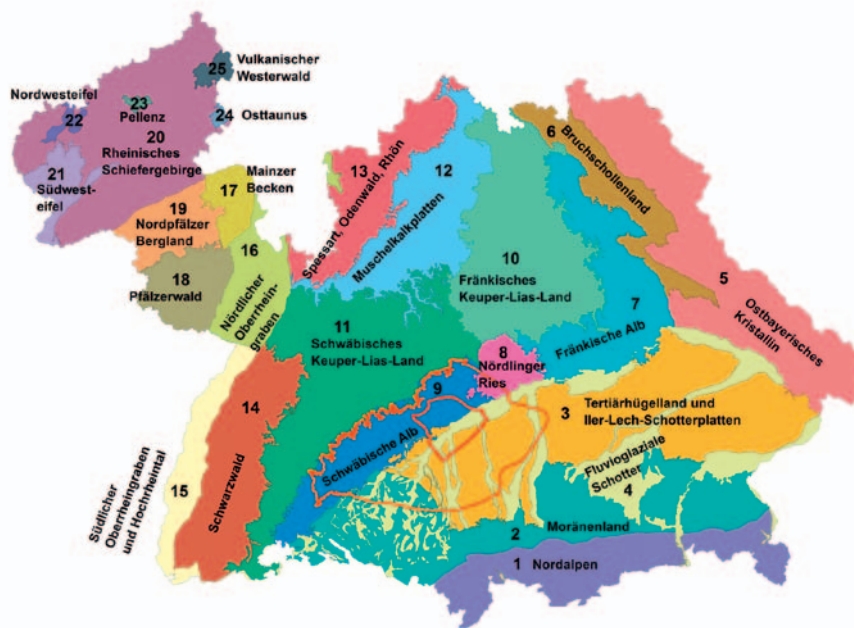


Abb. 3: Naturräumlich-hydrogeologische Einheiten für die räumliche Auswertung der Simulationsergebnisse

### 3.2 Ergebnisse der Langzeitsimulation – Bodenwasserhaushalt

Neben den regionalen Klimaprojektionen für die Zukunft wurde eine Langzeitsimulation auf Basis gemessener Modelleingangsdaten für die Vergangenheit (Zeitraum 1951-2010) durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, sowohl die Entwicklung der letzten 6 Dekaden und mögliche Trends während dieser Zeit aufzuzeigen, als auch die natürlichen Bandbreiten der verschiedenen Wasserhaushaltsgrößen herauszuarbeiten. Die ermittelten Tendenzen in der Langzeitsimulation wurden im Sinne einer Gesamtbetrachtung des Zeitraums 1951-2100 gemeinsam mit den Entwicklungen auf Basis der Szenariosimulation ausgewertet.

Als Resultat der Untersuchungen kann festgehalten werden, dass die vergangenen 60 Jahre für einzelne Größen bereits deutliche Tendenzen aufweisen. So spiegelt sich in den Ergebnissen für die Temperatur, trotz deutlicher Unterschiede zwischen einzelnen Jahren, der bekannte Temperaturanstieg wieder. Im Zusammenhang mit der Szenariosimulation kann beispielsweise festgestellt werden, dass das für die nahe Zukunft erwartete Klimasignal von 1° C bereits für die letzte Dekade 2001-2010 eingetreten ist. Die bisher erfolgte Erwärmung wirkt sich wiederum spürbar auf die Neubildungsrelevanten Wasserhaushaltsgrößen Verdunstung und Gesamtabflusshöhe bzw. die Sickerwasserrate aus.

Für den Niederschlag als wichtigste Steuergröße ergeben sich über den Gesamtzeitraum von 60 Jahren für das Winterhalbjahr tendenziell Zunahmen, während die Entwicklung für das Sommerhalbjahr noch nicht eindeutig ist. Unabhängig davon ergeben sich temperatur- und verdunstungsbedingt für die letzten beiden Dekaden 1991-2000 bzw. 2001-2010 geringere simulierte Gesamtabflusshöhen und Sickerwasserraten als für den Gesamtzeitraum die wiederum zu einem Anstieg des Trockenheitsindex, insbesondere in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz führen. Hinsichtlich der jährlichen Grundwasserneubildung sind dagegen noch keine deutlichen Tendenzen ersichtlich. Hier scheinen sich potentielle Zunahmen im Winter und Abnahmen im Sommer gegenseitig weitgehend auszugleichen. Betrachtet man zusätzlich die WETTREG-Simulationen, so kann festgehalten werden, dass in den letzten 10 Jahren nicht nur bezüglich der Temperaturentwicklung bereits das Niveau der nahen Zukunft erreicht wurde. Die folgende Abbildung zeigt die Gesamtentwicklung von 1951 bis 2100 exemplarisch für die Sickerwasserrate in Bayern.

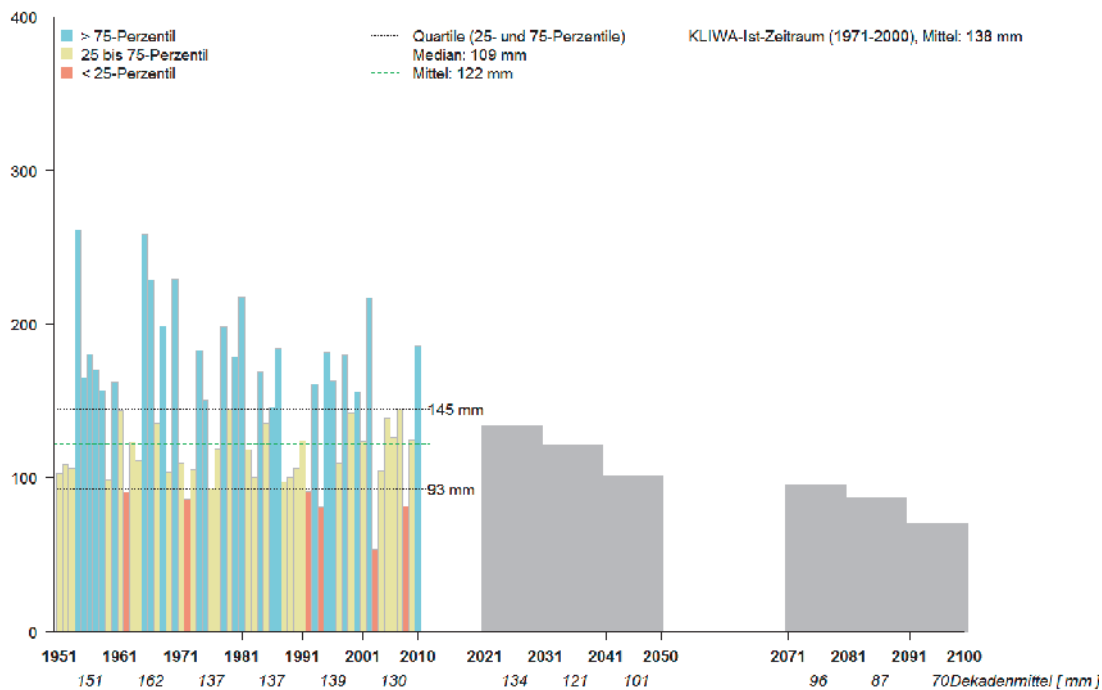


Abb. 4: Gesamtentwicklung der Sickerwasserrate in Bayern im Sommerhalbjahr für den Zeitraum 1951 bis 2100 (aus Mess- und Szenariodaten WETTREG2006)

#### 4 Fallstudien zu regionalen Auswirkungen

Neben den länderübergreifenden Untersuchungen und Modellrechnungen wurden und werden in potentiellen Problembereichen Fallstudien zu möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels durchgeführt. Auf diese Weise sollen Grundlagen zur Ableitung von Handlungsempfehlungen, z. B. im Hinblick auf die Sicherstellung der örtlichen Wasserversorgung, erarbeitet werden (vgl. Symposiumsbeitrag von Sprenger et al. zur Fallstudie Ilz). Einen Schwerpunkt stellen dabei vor allem die Bereiche mit vergleichsweise wenig ergiebigen Grundwasservorkommen dar. Dies betrifft insbesondere Mittelgebirgsregionen wie das Rheinische Schiefergebirge, den Südschwarzwald oder den gesamten ostbayerischen Raum (Fichtelgebirge, Bayerischer Wald). Ähnliches gilt auch für das süddeutsche Moränenland. Im Gegensatz zu vielen Lockergesteinsregionen mit ihren meist ergiebigen Grundwasservorkommen zeichnen sich die genannten Bereiche durch ihr geringes nutzbares Dargebot aus. Die örtliche Wasserversorgung stützt sich hier oft auf lokale Quellen, die bei verlängerten Trockenperioden Gefahr laufen, trocken zu fallen. Die Vulnerabilität dieser Quellen gegenüber dem Klimawandel wird im Rahmen von Fallstudien untersucht. Auch mögliche Auswirkungen auf die Grundwasserbeschaffenheit werden untersucht (vgl. Beitrag Gudera zur Fallstudie Donauried).

Die nachfolgende Darstellung (Abb. 5) zeigt die Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen in Süddeutschland sowie die Lage der KLIWA-Fallstudien im Bereich Grundwasser mit ihrem jeweiligen fachlichen Schwerpunkt.



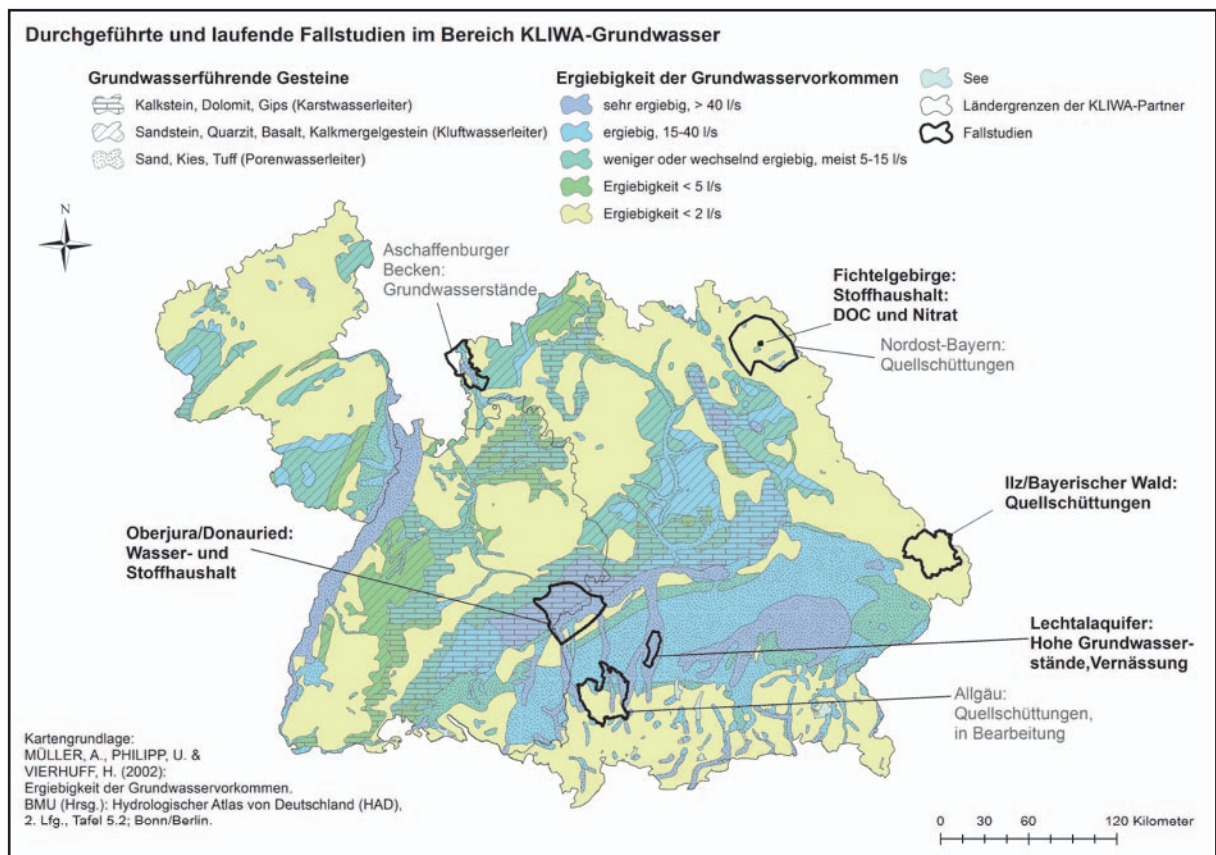


Abb. 5: Abgeschlossene (schwarz, fett) und laufende (grau) Fallstudien zu regionalen Auswirkungen des Klimawandels im Bereich KLIWA-Grundwasser. Kartengrundlage: HAD-Tafel 5.2 Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen (Müller et al., 2002)

In aller Regel werden im Rahmen der Fallstudien kleinräumige Wasserhaushaltsmodelle und/oder Grundwassermodelle eingesetzt. Ziel ist hier eine räumlich und zeitlich höher aufgelöste Simulation, die auf Basis von regionalen Klimaprojektionen Aussagen zur zukünftigen Entwicklung in den Problembereichen ermöglicht. Als Modellinput wurden in den Fallstudien bisher dieselben Regionalmodelle verwendet wie in den landesweiten Modellrechnungen, so dass die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist.

## 5 Erste Schlussfolgerungen für das wasserwirtschaftliche Handeln

Die in den verschiedenen Studien zum Grundwasser gewonnenen Erkenntnisse lassen bereits Entwicklungen erkennen, die für die betroffenen Nutzungen (hier insbesondere die öffentliche Wasserversorgung) von Bedeutung sind. Im Fokus stehen dabei vor allem mögliche Änderungen des nutzbaren Grundwasserdargebots in Regionen, in denen nicht auf ergiebige Grundwasservorkommen zurückgegriffen werden kann. Davon betroffen sind besonders Mittelgebirge ohne großräumig zusammenhängende Grundwasservorkommen wie z. B. Teile des Schwarzwaldes, Bayerischer Wald und Westerwald, aber auch Naturräume wie z. B. der Nördliche Oberrheingraben, die in Folge ihrer klimatischen Gegebenheiten (geringe Niederschläge, warme Sommer) nur geringe Grundwasserneubildungsraten aufweisen.





Die Ergebnisse der statistischen Untersuchungen lassen für einzelne Kennwerte bereits deutliche Tendenzen erkennen, wenngleich die Klimasignale bei den Grundwasserständen (noch) nicht so ausgeprägt sind wie bei anderen Wasserhaushaltsgrößen (z. B. Temperatur, Niederschlag). Dies kann möglicherweise auch auf die Trägheit des Systems „Grundwasser“ zurückgeführt werden. Bemerkenswert ist jedoch der beobachtete frühere Eintritt der maximalen Grundwasserstände und Quellschüttungen im Jahresgang, oft verbunden mit einer größeren Jahresamplitude. So können die nutzbaren Grundwasservorräte kleiner Einzugsgebiete im Sommer stärker als bisher beansprucht werden, wenn sich dieser Trend zukünftig fortsetzt. Um die weitere Entwicklung verfolgen zu können, sind die lückenlose Fortführung des Langzeitmonitorings und regelmäßige Aktualisierungen der derzeit nur bis Ende 2007 ausgewerteten Datenreihen unerlässlich (vgl. KLIWA-Heft 16).

Ausgehend von einer zukünftig abnehmenden Wasserverfügbarkeit im Boden, wie sie sowohl aus den Ergebnissen der Langzeitsimulation (1951-2010), als auch aus den Szenariosimulationen abgeleitet werden kann, sollte bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen, die den Bodenspeicher oder das Grundwasser betreffen, stets bedacht werden, dass mittlere Bilanzwerte u. U. hinsichtlich einer Anpassung an den Klimawandel nicht ausreichend sind. Mit Hilfe der flächendeckenden Bodenwasserhaushaltsmodellierung können Problembereiche (wenig ergiebige Grundwasservorkommen in den Mittelgebirgsregionen) identifiziert werden, in denen vorrangig Fallstudien durchgeführt und regional angepasste Handlungsempfehlungen bzw. Maßnahmen weiter entwickelt werden sollen (vgl. KLIWA-Heft 17).

In Bayern fließen die Ergebnisse der Fallstudien in das vom LfU betreute Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“ als Teil der bayerischen Klimaanpassungsstrategie (StMUG, 2009) ein. Dieses Projekt hat zum Ziel, die Versorgungssicherheit der Wasserversorgungsanlagen zu bewerten und darauf aufbauend den Wasserversorgern bzw. Kommunen Hilfestellung zu geben, Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssituation zu ergreifen, z. B. mittels Anlagenverbund oder Erschließung zusätzlicher Ressourcen. Die zukünftige Entwicklung, die beispielsweise durch demographische Entwicklung, spezifischen Wasserverbrauch, potentielle Großabnehmer und auftretende Wasserverluste, aber eben auch durch die Entwicklung des Grundwasserdargebots infolge des Klimawandels charakterisiert wird, ist hierbei ein zentrales Thema. Das Trockenjahr 2003 kann in einigen Regionen als gutes Praxisbeispiel dienen, wohin die zukünftige Entwicklung geht und welche Probleme dann vermehrt auftreten werden.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen von KLIWA wurde für den Bereich Grundwasser rückblickend die Langzeitentwicklung wesentlicher Wasserhaushaltsgrößen auf der Basis von Messdatenreihen und Modellrechnungen (Langzeitsimulation) untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass für einzelne relevante Größen bereits für die Vergangenheit deutliche Tendenzen erkennbar sind.

Der Blick in die Zukunft erfolgt flächendeckend auf der Basis regionaler Klimaprojektionen mit Hilfe desselben Bodenwasserhaushaltsmodells (GWN-BW), das auch für die Langzeitsimulation verwendet wird. Auch wenn die wenigen bisher verwendeten Modellketten naturgemäß nur einen Ausschnitt aus einer möglichen Bandbreite beschreiben können, lassen sich dennoch einige grundsätzliche Tendenzen aufzeigen. Für den Bereich Grundwasser und die entsprechenden Grundwassernutzungen spielt dabei vor allem die regional unterschiedliche Änderung des Niederschlagsregimes (= Zunahme der Winterniederschläge bei gleichzeitiger Abnahme der Sommerniederschläge) eine wesentliche Rolle. Durch die gleichzeitige Temperaturzunahme und die damit verbundenen Veränderungen der Verdunstung und des Schneedeckenverhaltens können sich durchgreifende Änderungen des gesamten Bodenwasserhaushalts mit unmittelbaren Konsequenzen für das Grundwasser ergeben.

Um die regionalen Auswirkungen des Klimawandels in Problembereichen zu untersuchen, werden räumlich und zeitlich höher aufgelöste Fallstudien durchgeführt. Im Fokus stehen auch hier die möglichen Konsequenzen für die öffentliche Wasserversorgung. Die Ergebnisse werden dann als Grundlage zur Ableitung von Handlungsempfehlungen herangezogen.

## 7 Literatur

- Müller, A., Philipp, U., Vierhuff, H. (2002): Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen. – BMU (Hrsg.): Hydrologischer Atlas von Deutschland (HAD), 2Lfg., Tafel 5.2; Bonn/Berlin.
- KLIWA (2007): Fachvorträge: 3. KLIWA-Symposium am 25. Und 26.10.2009 in Stuttgart. KLIWA-Berichte Heft 10, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 256 S., ISBN 978-3-88251-325-7.
- KLIWA (2009): Fachvorträge: 4. KLIWA-Symposium am 3. Und 4. Dezember 2009 in Mainz. KLIWA-Berichte Heft 15, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz, 312 S., ISBN 978-3-933123-20-6.
- KLIWA (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte Heft 16, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 148 S., ISBN 978-3-88251-362-2.
- KLIWA (2012): Auswirkung des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte Heft 17, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9.
- StMUG (Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit), Hrsg. (2009): Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS), 68 S.



## **Von der Vergangenheit bis in die Zukunft: Neue Klimasimulationen für Wissenschaft und Gesellschaft**

Prof. Dr. Jochem Marotzke<sup>1</sup>  
Max-Planck-Institut für Meteorologie

In meinem Vortrag stelle ich einen neuen umfassenden Satz an Klimasimulationen vor, den wir am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) zusammen mit dem Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) durchgeführt haben. Die Simulationen wurden im Rahmen des internationalen Modellvergleichs CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) des Weltklima-Forschungsprogramms WCRP erstellt und werden in den 5. Sachstandsbericht des IPCC einfließen. Für die Rechnungen wurde das neue Erdsystemmodell MPI-ESM des MPI-M verwendet, bestehend aus dem globalen Atmosphärenmodell ECHAM6, dem Landvegetationsmodell JSBACH, dem globalen Ozeanmodell MPIOM sowie dem ozeanischen Biogeochemiemodell HAMOCC. Das Modell steht allen Klimaforschern für eigene Arbeiten zur Verfügung, die CMIP5-Ergebnisse sind am DKRZ für alle frei verfügbar.

Zwei innovative Aspekte der CMIP5-Simulationen hebe ich besonders hervor:

Durch die Einbeziehung des Kohlenstoffkreislaufs können Klimafolgen wie Ozeanversauerung dargestellt werden. Außerdem ist es dadurch möglich, diejenigen anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu berechnen, die mit bestimmten Klimazielen noch kompatibel wären. Die Einbeziehung eines neuen Szenarios („RCP2.6“) zeigt, dass das Zwei-Grad-Ziel – die Begrenzung der Erderwärmung auf 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Klima – im Prinzip noch erreicht werden könnte. Die Voraussetzung dafür wäre allerdings eine umgehende und drastische Minderung der Kohlendioxid-Emissionen. Diese müssten ab 2020 sinken und zum Ende des 21. Jahrhunderts auf 10% des Niveaus von 2000 reduziert werden.

Erstmals wurden neben Langzeitprojektionen auch detaillierte Klimavorhersagen für die kommenden zehn Jahre durchgeführt. Darin wird außer dem langfristigen Klimawandel auch die kurzfristige Klimavariabilität mit vorhergesagt. Dies wird dadurch möglich, dass die Simulationen vom beobachteten Klimazustand aus gestartet („initialisiert“) werden. In unserem Vorhersagesystem können wir durch die Initialisierung leider keine Verbesserung für die Prognose der globalen Mitteltemperatur erreichen. Allerdings verbessern wir die Vorhersagegüte für die Oberflächentemperatur im Nordatlantik deutlich und sagen für das laufende Jahrzehnt eine Abkühlung voraus.

## Von der Vergangenheit bis in die Zukunft: Neue Klimasimulationen für Wissenschaft und Gesellschaft

Jochem Marotzke

Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M)

Marco Giorgetta, Tatiana Ilyina, Johann Jungclaus,  
Christian Reick (MPI-M)

Michael Böttinger (DKRZ)

und über 30 weitere Mitarbeiter von MPI-M und DKRZ



KLWA 7.12.2012



Max-Planck-Institut  
für Meteorologie

### Simulationen im Rahmen von CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, Phase 5)

- Wie zuverlässig sind Simulationen künftigen Klimas, durchgeführt mit einzelnen Klimamodellen?
  - In welchen Resultaten stimmen verschiedene Modell überein?
  - Modellstreuung ein Mindestmaß für Unsicherheit der Ergebnisse
- Multi-Modell-Experimente
- Internationale Koordination von Klimasimulationen
  - wegen des Umfangs und der Komplexität des Themenbereichs
  - wegen der vielfältigen Interessen
- Koordiniert von WCRP (World Climate Research Programme)
- Zeitplan stark beeinflusst vom IPCC-Prozess: CMIP5-Ergebnisse sollen in den 5. Sachstandsbericht einfließen
- **Viele innovative Elemente in CMIP5**

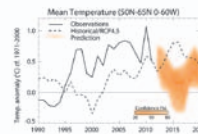
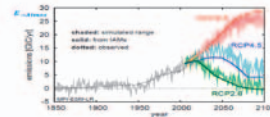
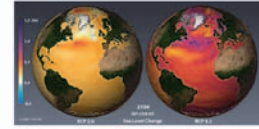


Max-Planck-Institut  
für Meteorologie



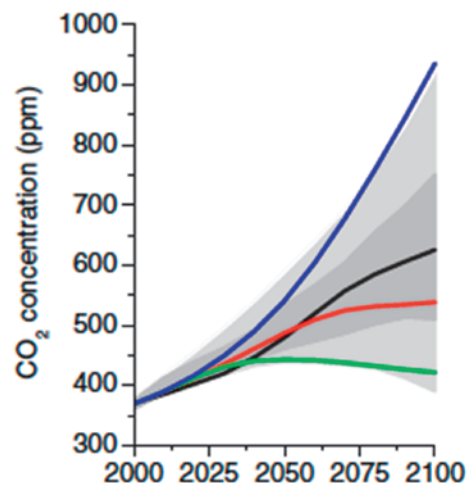
## Übersicht

1. Klimawandel im 21. Jahrhundert: neue Szenarien und Simulationen
2. Der Kohlenstoffkreislauf und anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen
3. Klimawandel im kommenden Jahrzehnt: Vorhersagen
4. Zusammenfassung



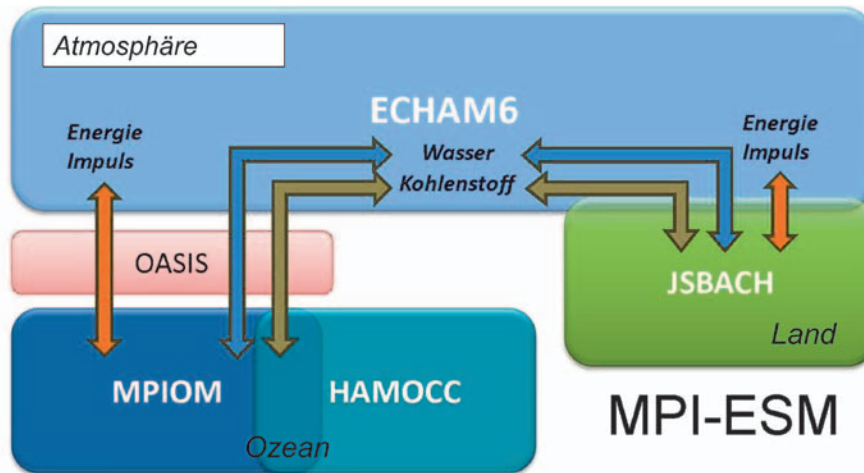
## Charakteristika der neuen Szenarien „Representative Concentration Pathways“ (RCP)

- RCP 8.5: „Strahlungsantrieb“ 8.5 W/m<sup>2</sup> in 2100
  - Verwandt mit SRES A2
- RCP 6.0: Stabilisierung bei 6.0 W/m<sup>2</sup>
- RCP 4.5: Stabilisierung bei 4.5 W/m<sup>2</sup>; entspricht etwa SRES B1
- RCP 2.6: Max. bei 3.0 W/m<sup>2</sup>, dann Reduktion auf 2.6 W/m<sup>2</sup>. (auch RCP3-PD „Peak and Decline“)
  - Bio-Energie, CCS, Landnutzung, Kernenergie



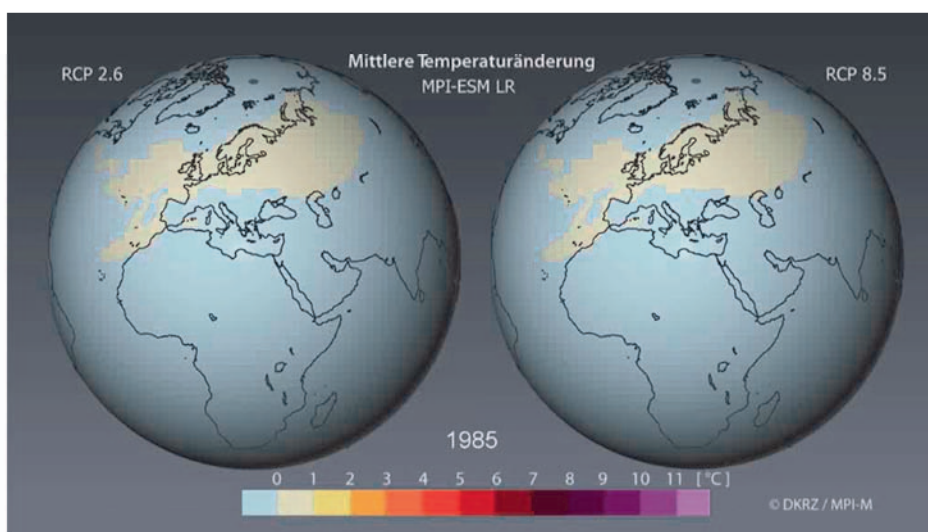


## Modellkomponenten des ErdSystemModells MPI-ESM



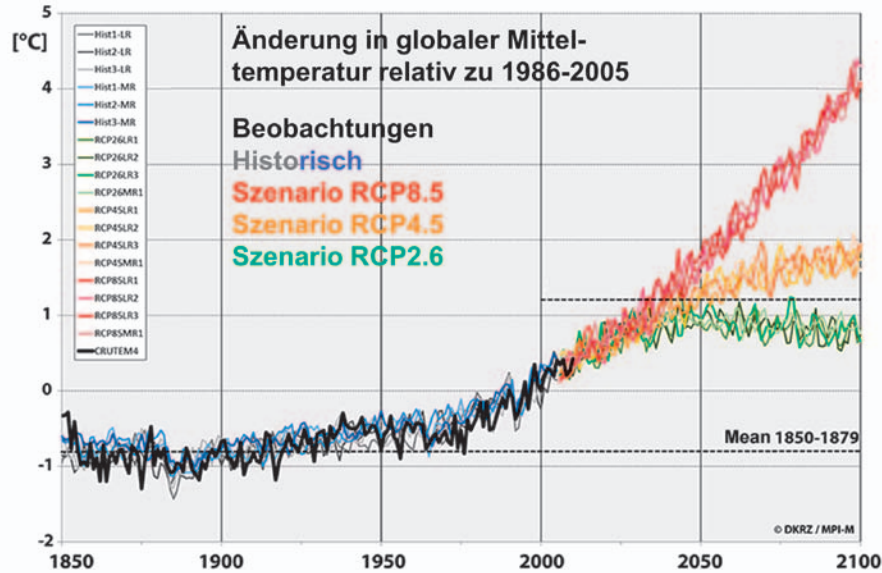
Input: Konzentrationen aus den RCPs, Sonnenschwankungen, Vulkanausbrüche

## Änderung in Oberflächentemperatur hängt vom Szenario ab





## MPI-ESM: In allen Szenarien wird die globale Mitteltemperatur im 21. Jahrhundert weiter steigen



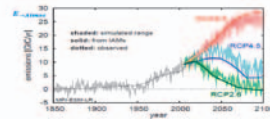
## Erklärung: Änderung der globalen Mitteltemperatur bei Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration

- Treibhauseffekt allein durch CO<sub>2</sub>: 1 °C Erwärmung
  - Treibhauseffekt durch zusätzlichen Wasserdampf in der Atmosphäre: zusätzlich 1 °C Erwärmung
  - Änderung durch Abnahme der Wolkenbedeckung: zusätzlich 0 °C bis 2,5 °C Erwärmung
  - Insgesamt 2 °C bis 4,5 °C Erwärmung bei Verdoppelung der CO<sub>2</sub>-Konzentration (Klimasensitivität)
- Wie hoch ist die Klimasensitivität? Kernfrage der Klimaforschung, große Streuung unter den Modellen
  - Wie hoch ist die künftige CO<sub>2</sub>-Konzentration?



## Übersicht

1. Klimawandel im 21. Jahrhundert: neue Szenarien und Simulationen
2. Der Kohlenstoffkreislauf und anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen
3. Klimawandel im kommenden Jahrzehnt: Vorhersagen
4. Zusammenfassung



## Innovation in CMIP5: Kohlenstoffkreislauf in Szenarienrechnungen

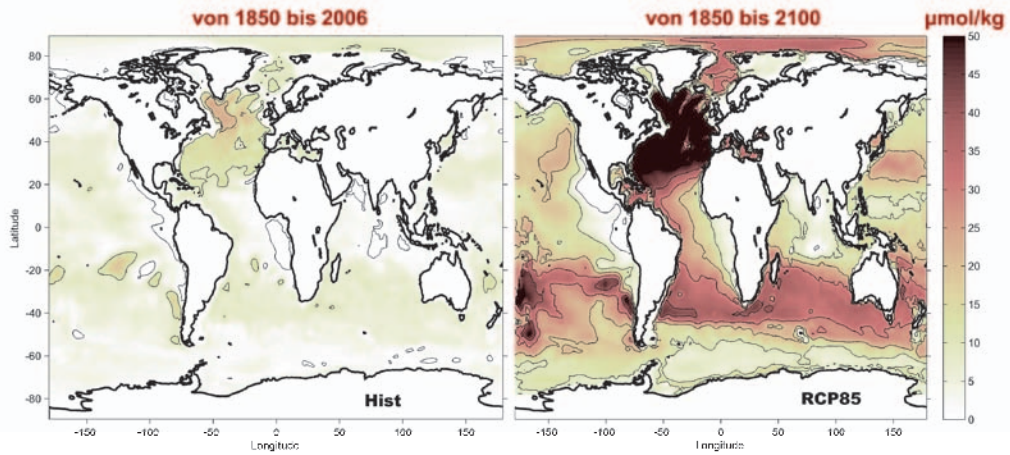
$$C_{Atmos}(yr + 1) = C_{Atmos}(yr) + F_{Atmos \leftrightarrow Ozean} + F_{Atmos \leftrightarrow Land} + E_{\rightarrow Atmos}$$

Szenariovorgabe      C-Austausche aus Simulation      implizierte Emissionen

Interpretation: Implizierte Emissionen = anthropogene Emissionen!



### Simulierte Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Ozean (eine Konsequenz: Ozeanversauerung)



Der Ozean nimmt circa ein Drittel der durch menschliche Aktivitäten freigesetzten Menge an Kohlendioxid auf.

Im Nordatlantik ist die Aufnahme anthropogenen Kohlendioxids am größten

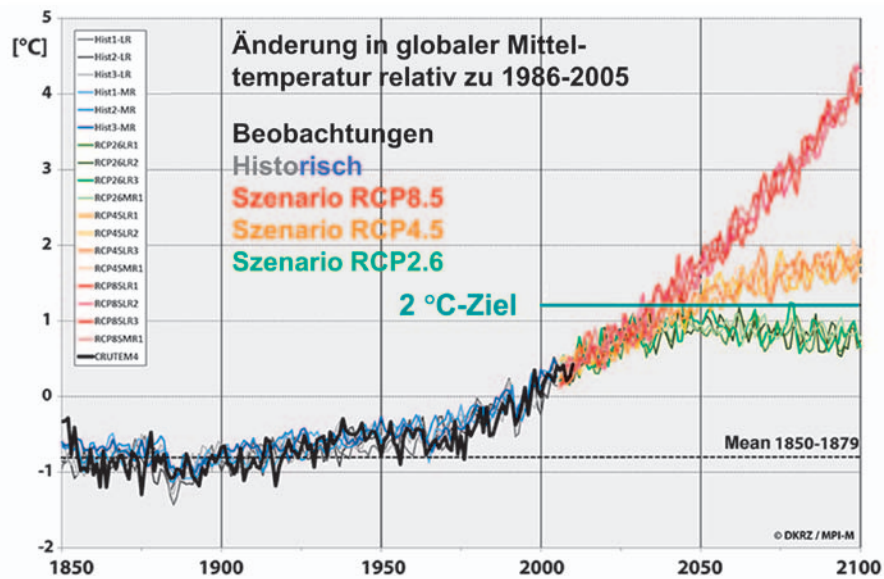


Max-Planck-Institut für Meteorologie

Ilyina et al. 2012

11

### MPI-ESM: Das 2 °C-Ziel kann erreicht werden, wenn wir dem Szenario RCP2.6 folgen ...



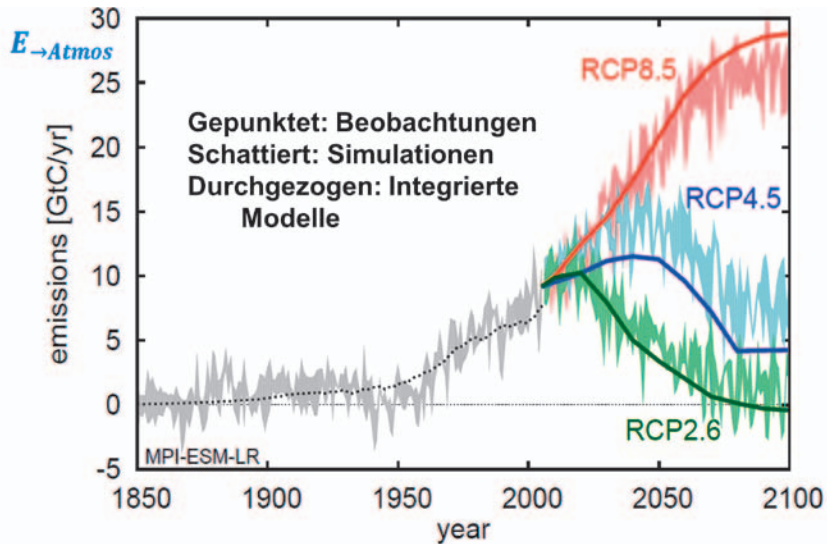
Max-Planck-Institut für Meteorologie

Giorgetta et al. 2012

12

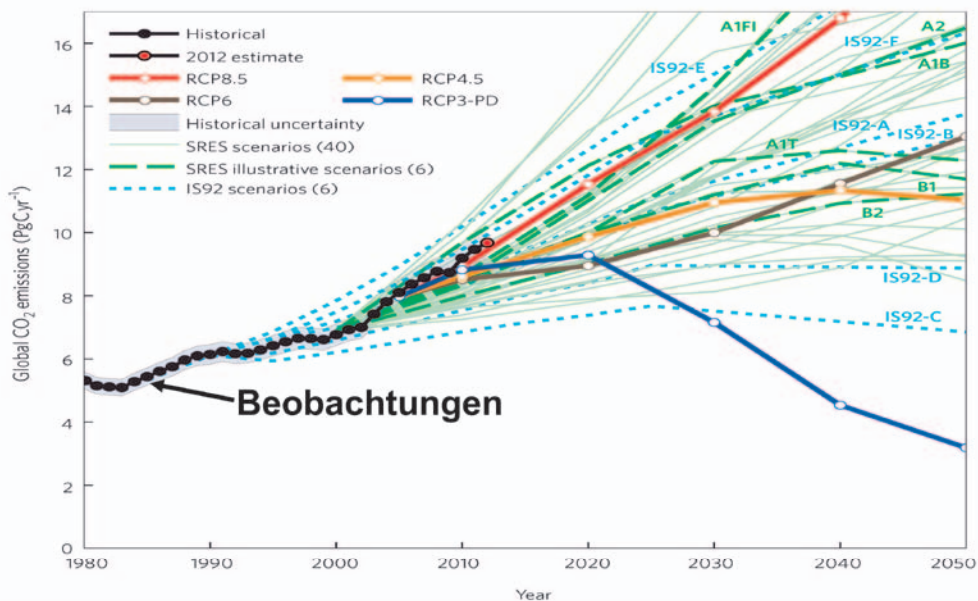


**...aber anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen ab 2020 abnehmen bis 2100 auf 10% der Emissionen des Jahres 2000**



**Erhebliche Modellunsicherheit: in mehreren Modellen wird das 2 °C-Ziel auch im Szenario RCP2.6 verfehlt; oft muss der Atmosphäre netto CO<sub>2</sub> entzogen werden**

**Wo stehen wir? CO<sub>2</sub>-Emissionen aus fossilen Brennstoffen nehmen fast so schnell zu wie im „höchsten“ Szenario**







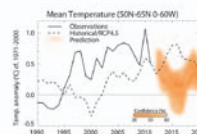
## CO<sub>2</sub>-Emissionen im 21. Jh. und globale Erwärmung

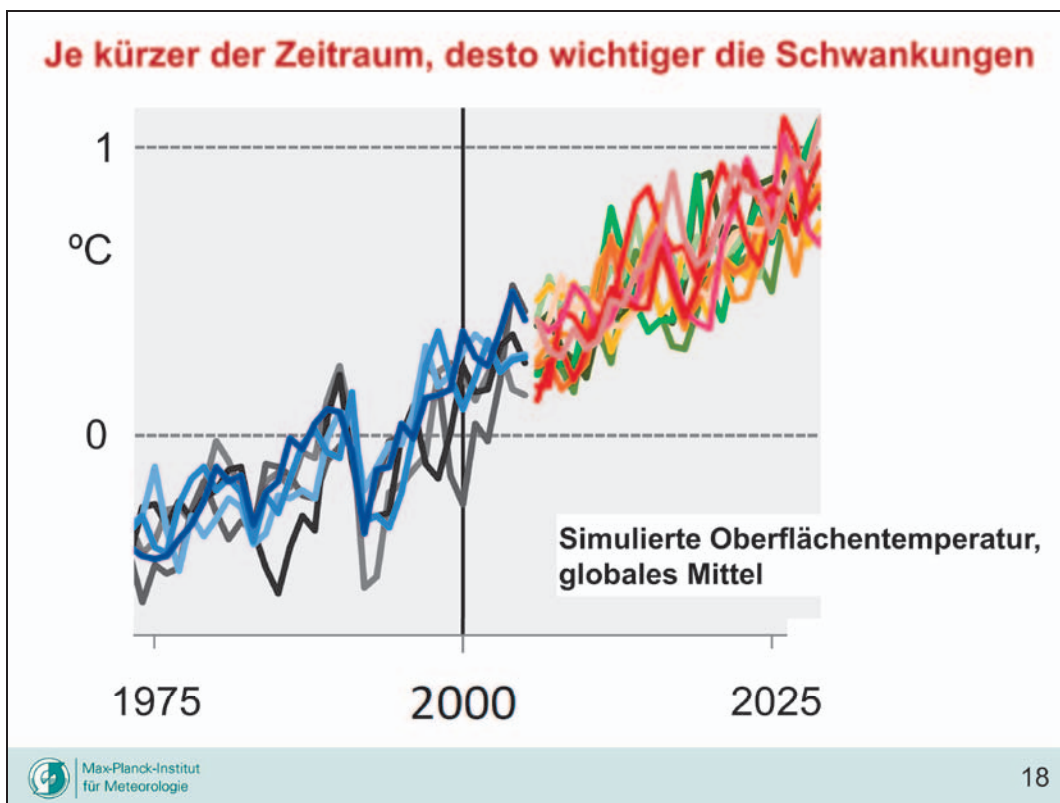
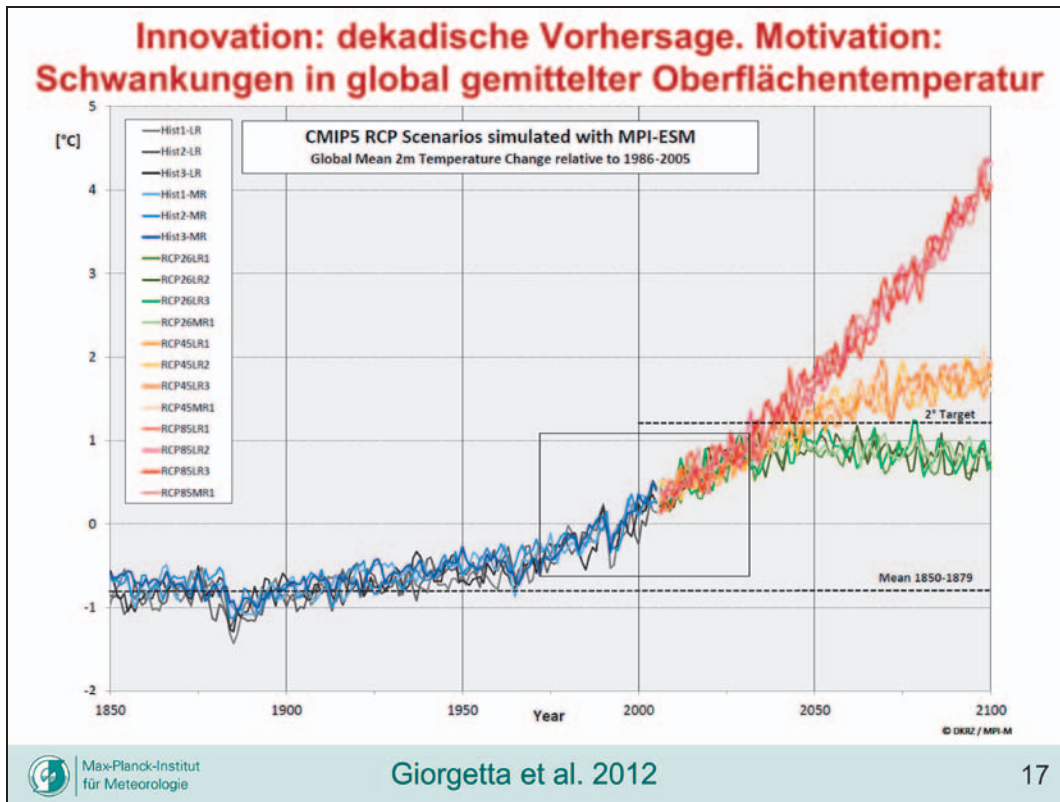
Szenario	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
Kumulierte CO <sub>2</sub> -Emissionen im 21. Jh. (Gt C)	Etwa 500	Etwa 900	Etwa 1900
Erwärmung gegenüber Ende 20. Jh. (MPI-ESM)	Etwa 1 °C	Etwa 2 °C	Etwa 4 °C

- Etwa 1 °C weitere Erwärmung alle 500 Gt C; Ende des 20. Jahrhunderts war 1 °C wärmer als vorindustriell
- Wir haben insgesamt noch 500 Gt C, die wir emittieren „dürfen“, um das 2 °C-Ziel nicht zu verfehlen. Emissionen derzeit: knapp 10 Gt C/Jahr
- **Wir hätten noch 50 Jahre bei heutigen Emissionen, danach „nichts mehr“**
- **Jede Steigerung jetzt erfordert umso drastischer Minderungen später**

## Übersicht

1. Klimawandel im 21. Jahrhundert: neue Szenarien und Simulationen
2. Der Kohlenstoffkreislauf und anthropogene CO<sub>2</sub>-Emissionen
3. **Klimawandel im kommenden Jahrzehnt: Vorhersagen**
4. Zusammenfassung







## Klimavorhersagen sind prinzipiell verschieden von Klimaprojektionen

### ● Klimaprojektion:

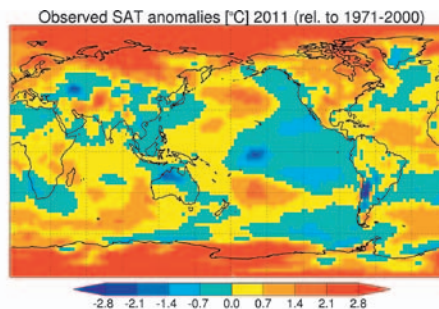
- Eine **mögliche** zukünftige Entwicklung des Klimas
- Anfangszustand wird nicht als wesentlich angesehen

### ● Klimavorhersage:

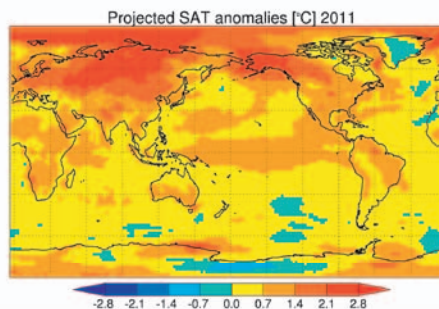
- Eine Abschätzung der **tatsächlichen** Entwicklung des zukünftigen Klimas
- Prognostiziert menschengemachte Erwärmung **und Klimaschwankungen**
- Anfangszustand basiert auf Beobachtungen vor allem des Ozeans („Gedächtnis des Klimasystems“) – **Initialisierung**
- Aus „retrospektiven Vorhersagen“ lässt sich die Qualität der Vorhersagen bestimmen



## Nicht-initialisiertes Modell gibt Muster der 2011 beobachteten Temperaturanomalie nur sehr schlecht wieder



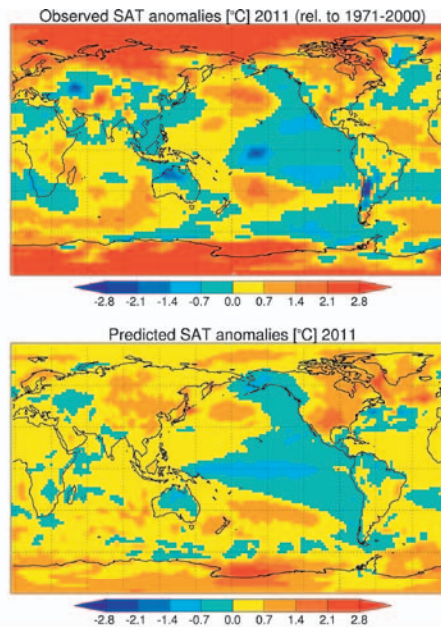
Beobachtet



Modell, nicht  
initialisiert



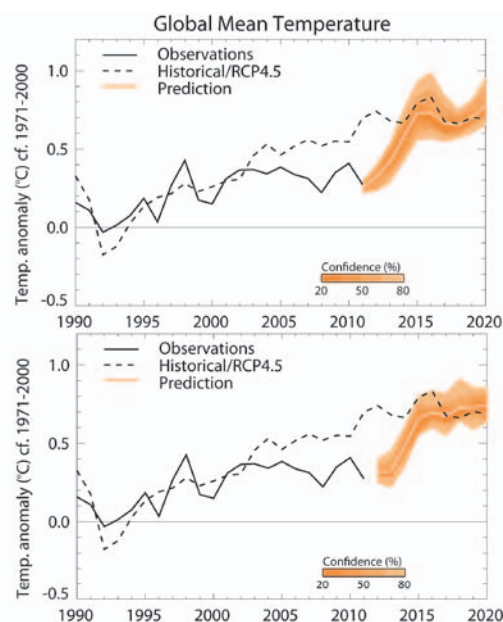
## Im 1. Jahr der initialisierten Vorhersage: gute Wiedergabe der beobachteten Temperaturmuster



Beobachtet

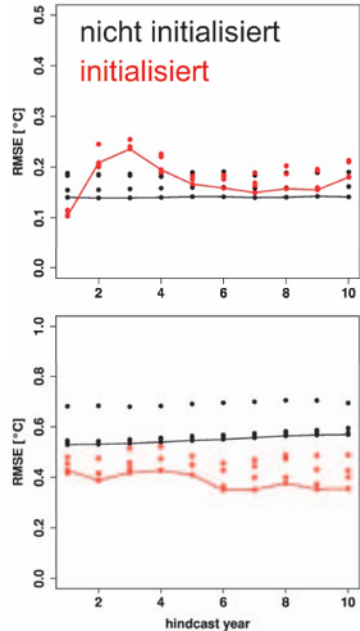
Initialisiert am  
1.1.2011

## Aber wir haben geringes Vertrauen in unsere Vorhersagen der globalen Mitteltemperatur für das gesamte Jahrzehnt

Initialisiert am  
1.1.2011Initialisiert am  
1.1.2012



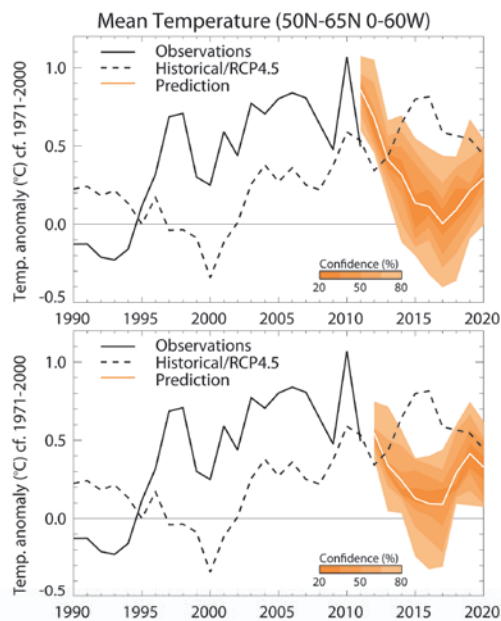
### Oberflächentemperatur im Nordatlantikbereich: deutliche Verbesserung der Vorhersagegüte durch Initialisierung



Mittlerer Fehler in global gemittelter Oberflächentemperatur

Mittlerer Fehler in Nordatlantik-Oberflächentemperatur

### Nordatlantikbereich: robuste Vorhersage einer Abnahme der Oberflächentemperatur in diesem Jahrzehnt



Initialisiert am 1.1.2011

Initialisiert am 1.1.2012



## Zusammenfassung

- CMIP5-Ergebnisse: riesiger Fundus an Information
- Durch Einbeziehung des Kohlenstoffkreislaufs können wir die mit dem 2 °C-Ziel kompatiblen CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnen (Szenario RCP2.6)
  - Emissionen müssen ab 2020 abnehmen
  - Im Jahr 2100: auf 10% des Stands von 2000
- Die globale Gemeinschaft muss entscheiden, welchen Klimawandel sie für akzeptabel ansieht. Kann sie das? Jede Entscheidung impliziert eine bestimmte Emissionsminderung.
- Robuste Vorhersage: Oberflächentemperatur im nördlichen Nordatlantik sinkt bis zum Ende dieses Jahrzehnts
  - Leider keine zufriedenstellende Vorhersagegüte für globale Mitteltemperatur, über das erste Jahr hinaus



## Dynamische regionale Klimamodellierung – Sachstand und weitere Entwicklung

Dr. Gerd Schädler

Institut für Meteorologie und Klimaforschung, Karlsruher Institut für Technologie

### 1 Einleitung

Eine Möglichkeit, die Lücke zwischen der Maschenweite von Globalmodellen (GCMs, zur Zeit meist noch deutlich über 100 km) und der räumlichen Skala regionaler Studien, z. B. für die Analyse und Planung von Anpassungs- und Minderungsmaßnahmen, zu schließen, ist das sogenannte dynamische Downscaling mit Hilfe regionaler Klimamodelle (RCMs). Hierbei werden meteorologische Modelle, welche nur einen Ausschnitt der Erdoberfläche erfassen, an ihren atmosphärischen Randflächen in regelmäßigen Zeitintervallen von einigen Stunden mit Daten des Globalmodells versorgt, welche das Regionalmodell in seinem Ausschnitt unter Verwendung höher aufgelöster Information (Orographie, Landnutzung, Böden) in regionale Information umsetzt (s. Abb. 1). Im Folgenden werden, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einige Aspekte und der aktuelle Stand der Regionalmodellierung kurz dargestellt.



Abb. 1: Prinzip des dynamischen Downscaling. Quelle: Süddeutsches Klimabüro

## 2 Globalmodelle und Emissionsszenarios

Aktuelle Simulationsergebnisse von ca. 30 Globalmodellen, betrieben von ca. 30 Gruppen weltweit, sind in der CMIP5-Datenbank (Coupled Model Intercomparison Project, <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/>) verfügbar. Viele Daten gibt es jedoch nur als Oberflächendaten bzw. in wenigen Schichten und damit nicht in dem zum Antrieb von RCMs benötigten Umfang. Hierfür werden als raumzeitliche Felder (z. B. alle 6 Stunden) die horizontalen Windkomponenten, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Wolkenwassergehalt, Bodendruck, Bodenoberflächentemperatur sowie Schnee- und Eisinformationen benötigt. Hinzu kommen noch Orographie, Boden- und Landnutzungsinformationen (evtl. zeitlich variabel) sowie die Land-Meer-Verteilung in entsprechender Auflösung. Dreidimensionale Felder von Temperatur und Wassergehalt im Erdboden werden zur Modellinitialisierung benötigt, danach werden diese Größen von dem integrierten Bodenvegetationsmodell interaktiv berechnet. Zu den Globalmodellen, die die Antriebsdaten im erforderlichen Umfang zur Verfügung stellen, gehören das MPI-ESM des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg, das CNRM-CM5 des Centre National de Recherche Météorologique in Toulouse, das EC-EARTH-Modell, betrieben vom EC-Earth-Consortium am KNMI sowie das HadGEM2 des Hadley Centre. Alle diese Modelle stellen einen „historical run“ 1950-2005 sowie zwei Projektionen (je RCP4.5 und RCP8.5, 2006-2099) bei einer räumlichen Auflösung von etwa  $1^\circ$  bis  $2^\circ$  zur Verfügung (die Modellauflösung wird oft in  $Tnn$  angegeben, eine näherungsweise Umrechnung in km erhält man mit  $6370 \text{ km} \cdot \pi / nn \approx 20000 \text{ km} / nn$ ).

Seit etwa 2011 stehen auch aktualisierte Emissionsszenarios (RCP, Representative Concentration Pathway) zur Verfügung. Neben der geänderten Bezeichnung (jetzt nach Wert des Strahlungsungleichgewichts in  $W/m^2$ ), aktualisierten Emissionen, und der Berücksichtigung von Minderungsmaßnahmen wurde der Projektionszeitraum bis zum Jahr 2300 erweitert. Näheres ist in van Vuuren et al. (2012) und Peters (2012) zu finden. Eine grobe Zuordnung zwischen alten und neuen Szenarios zeigt Abb. 2. Die meisten Simulationen werden mit RCP4.5 und, im Hinblick auf die aktuelle Emissionsentwicklung, mit RCP8.5 durchgeführt. Weitere Informationen zu Globalmodellen und Emissionsszenarios finden sich im Beitrag von J. Marotzke in diesem Band.

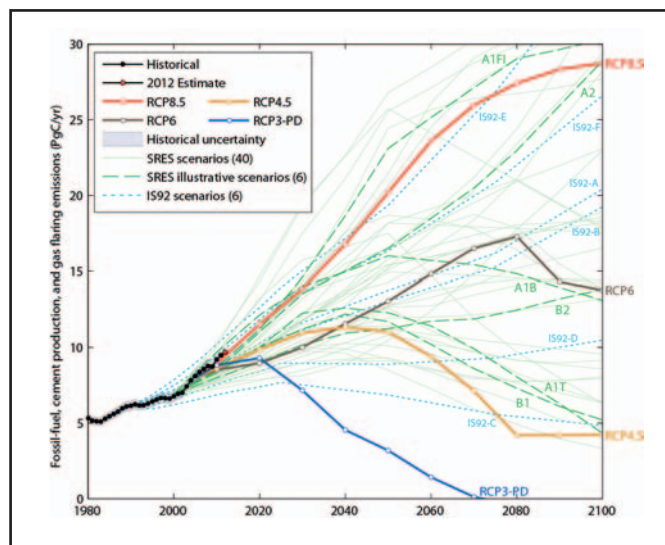


Abb. 2: Alte und neue Emissionsszenarios.  
Quelle: Peters et al., 2012



### 3 Dynamische Regionalmodelle

Die Modelle sind alle ähnlich aufgebaut und bestehen aus mehreren Teilmodellen (Atmosphäre, Landoberflächen, Erdboden, Seen, Meer). Sie beruhen auf physikalischen Transport- und Erhaltungsgleichungen wie z. B. den Navier-Stokes-Gleichungen und der Richards-Gleichung. Sie unterscheiden sich in der Numerik und den verwendeten Parametrisierungen, zum Beispiel für Wolkenphysik, Konvektion und Turbulenz. Durch die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Modellteilen werden die Modelle sowohl von Betrieb als auch von der Interpretation der Ergebnisse her sehr komplex.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über frei verfügbare regionale Klimamodelle (einige Einrichtungen betreiben zusätzlich eigene Modelle); aufgelistet sind nur sogenannte nicht-hydrostatische Modelle, deren räumliche Auflösung im Prinzip beliebig fein gemacht werden kann. Sie werden mit einer Auflösung zwischen etwa 2 und 50 km betrieben. In Europa werden vor allem WRF, MM5, COSMO-CLM und Meso-NH verwendet.

Name	entwickelt in
WRF, MM5	USA
COSMO, COSMO-CLM	Deutschland/COSMO
RAMS	USA
COAMPS	USA
Meso-NH	Frankreich
CRess / Earth Simulator	Japan

Aktuelle Arbeiten im Bereich der COSMO-CLM-Regionalmodellierung befassen sich mit folgenden Themen:

- Verbesserung der Modellergebnisse durch Simulationen mit sehr hoher Auflösung im km-Bereich,
- Verwendung von Software zur Modellkopplung wie z. B. OASIS; hierdurch ist eine flexible interaktive Kopplung von Atmosphärenmodellen mit Ozean- und Boden-Vegetationsmodellen, aber auch Stadtmodellen und hydrologischen Modellen möglich,
- Einbinden weiterer Boden-Vegetationsmodelle,
- Erweiterung in Verbesserung bestehender Parametrisierungen (z. B. Wolkenphysik),
- detailliertere Berücksichtigung von Aerosolen und Chemie,
- Einsatz des Modells in verschiedenen Regionen der Welt (Afrika, Asien).

Es zeigt sich, dass das verwendete Boden-Vegetationsmodell und seine Konfiguration einen wesentlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat und die Simulationsergebnisse verbessern kann (z. B. Meissner et al., 2009, Davin et al., 2011). Abbildung 3 zeigt als Beispiel die Änderungen der 2 m-Temperatur und des Niederschlags, die sich bei Verwendung eines anderen Boden-Vegetationsmodells in COSMO-CLM ergeben.

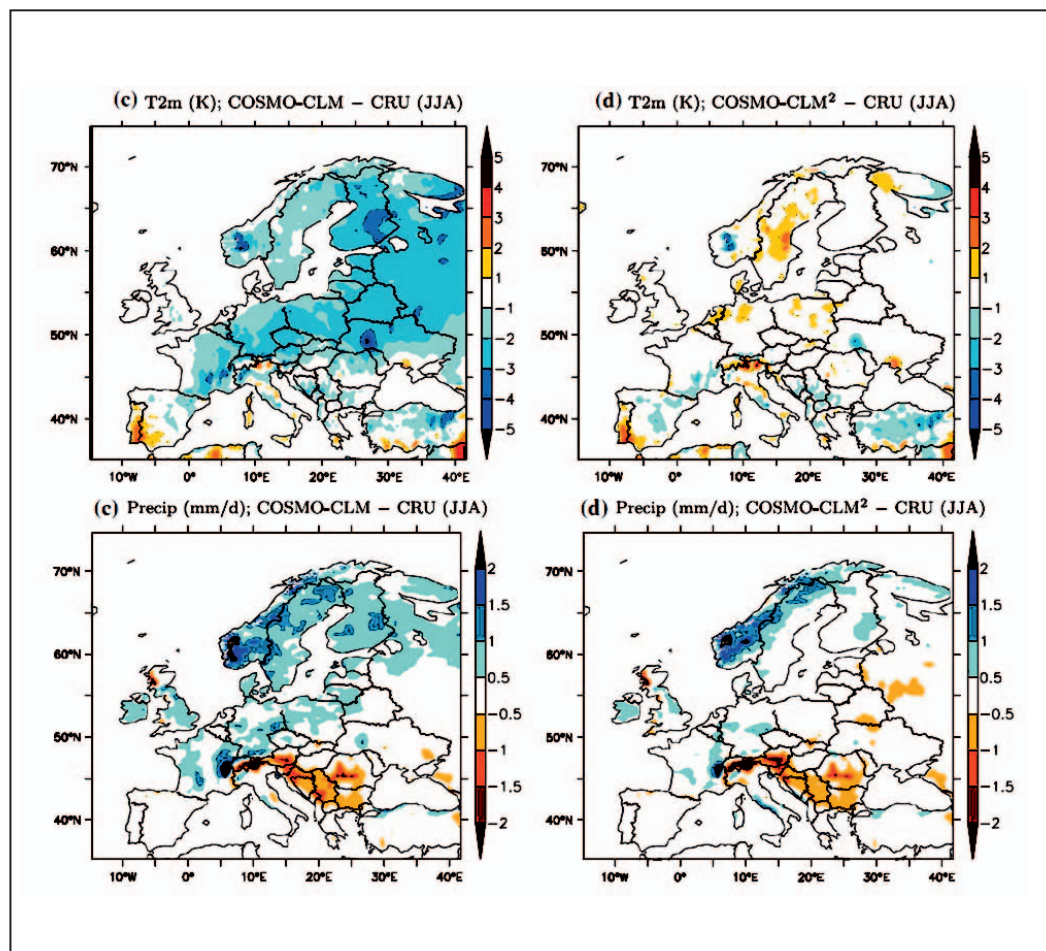


Abb. 3: Einfluss des Boden-Vegetationsmodells auf Temperatur (oben) und Niederschlag (unten). Quelle: Davin et al., 2011

#### 4 Modellvalidierung, Unsicherheit, Bias

Beim Vergleich von Modellergebnissen untereinander und beim Vergleich mit Beobachtungen zeigen sich mehr oder minder große Streuungen der Ergebnisse sowohl in der räumlichen als auch in der zeitlichen Verteilung. Eine nützliche Unterscheidung dieser Unsicherheiten ist die nach der Reduzierbarkeit dieser Unsicherheiten. Demnach unterscheidet man

- aleatorische Unsicherheiten: sie sind eine charakteristische Eigenschaft chaotischer dynamischer Systeme (siehe Kasten „Die logistische Gleichung“ unten) und äußern sich in einer mit dem Prognosezeitraum rasch abnehmenden Vorhersagbarkeit und einer starken Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen. Das Klimasystem gilt als





chaotisches System, und vieles deutet darauf hin, dass die meisten geophysikalischen Systeme zumindest chaotische Komponenten haben. Beim Klimasystem kommt hinzu, dass sich für die Emission von Treibhausgasen und die Änderung der Landnutzung relevante Faktoren wie die demographische und wirtschaftliche Entwicklung der Menschheit, aber auch Vulkanausbrüche nicht oder nur in Form möglicher Szenarien vorhersagen lassen. Aleatorische Unsicherheiten sind prinzipiell nicht reduzierbar.

- epistemische Unsicherheiten rühren von unserer unzureichenden Kenntnis der betrachteten Systeme her. Dies können fehlende oder nicht hinreichend bekannte relevante Prozesse sein (z. B. Eis-Schmelzprozesse), aber auch Modellfehler, unsichere Parametrisierungen oder unzureichende Auflösung. Diese Art von Unsicherheiten ist prinzipiell durch Forschung (neue Konzepte, bessere Datenlage, leistungsfähigere Geräte) reduzierbar.

Bei den Modellen treten systematische Abweichungen untereinander und von den Beobachtungen auf. Ob und in welchem Maß dieser sogenannte Bias auftritt, hängt von der Region, dem Zeitraum und den betrachteten Variablen ab; er lässt sich durch Vergleich von Klimasimulationen, die mit Reanalysedaten angetrieben wurden, mit gerasterten Beobachtungsdaten (z. B. E-Obs oder Hyras) feststellen. Da es sich oft um eine Art „Parallelverschiebung“ der Daten handelt, hat dies bei Klimaänderungsstudien nur einen geringen Einfluss auf das Änderungssignal der Größen selbst, kann aber bei Schwellenwertüberschreitungen, Extremen und der Verwendung der Modellergebnisse zum Antrieb nachgeschalteter Modelle ein Problem werden. Bei hydrologischen Modellen können zum Beispiel durch die Kombination zu viel Niederschlag – zu geringe Verdunstung deutliche Abweichungen von den beobachteten Abflüssen auftreten. Eine Möglichkeit, dem entgegenzuwirken ist die sog. Bias-Korrektur: beim sogenannten linear scaling werden durch Addition bzw. Multiplikation mit den entsprechenden Faktoren die langjährigen Monatsmittel der Kontrollsimulation an die beobachteten langjährigen Mittel angepasst und die gleichen Faktoren dann für die Korrektur der Projektionen verwendet, beim quantile mapping werden die statistischen Verteilungen angepasst und für die Korrektur verwendet.

Die Bias-Korrektur einer meteorologischen Größe setzt demnach voraus, dass für diese Größe langjährige, hoch aufgelöste und flächenhafte Beobachtungen in guter Qualität vorliegen, was bislang nur regionsweise für die bodennahe Temperatur und den Niederschlag der Fall ist. Dieses nur teilweise Korrigieren führt zu Inkonsistenzen in den Modelldaten und ist daher langfristig unbefriedigend. Inwieweit hier Abhilfe geschaffen werden kann, ist Gegenstand einer Reihe von Arbeiten, die bereits weiter oben genannt wurden. Sie konzentrieren sich auf sogenannte Hindcasts, also Simulationen, die auf Reanalysen basieren, um Fehler, die auf das Regionalmodell selbst zurückzuführen sind, zu identifizieren. Ansatzpunkte sind hier die Prozesse und Parametrisierungen, die die Wolken- und Niederschlagsbildung beeinflussen, die Erhöhung der räumlichen Modellauflösung sowie die Verwendung verbesserter Boden-Vegetationsmodelle und der zugehörigen Kataster. Hinsichtlich der zur Modellvalidierung verwendeten gerasterten Beobachtungsdatensätze wie CRU, E-Obs und Hyras ist zu bedenken, dass diese ebenfalls Unterschiede von Datensatz zu Datensatz aufweisen, welche auf die verwendeten Rohdaten, Interpolationsverfahren und Hintergrundklimatologien sowie auf die unterschiedliche räumliche Auflösung zurückzuführen sind.

Insgesamt weisen sowohl Modelle als auch Beobachtungsdaten eine Kombination von aleatorischer und epistemologischer Unsicherheit auf, und es verbleibt auf jeden Fall eine prinzipiell nicht zu beseitigende Restunsicherheit. Die Minimierung und Quantifizierung der Unsicherheit, z. B. mit Hilfe von Ensembles, wird vermutlich zusammen mit der Schaffung von Methoden zum Umgang mit dieser Unsicherheit ein bestimmendes zukünftiges Thema sein.

Die logistische Gleichung ist wohl das meistuntersuchte dynamische System, sicher auch deshalb, weil sich an diesem einfachen System sehr viele Charakteristika chaotischer dynamischer Systeme in übersichtlicher Weise untersuchen lassen. Die logistische Gleichung beschreibt die zeitdiskrete Entwicklung einer Population unter beschränkten Ressourcen und lautet:  $x_{n+1} = r \cdot x_n \cdot (1 - x_n)$

Ausgehend von einem Startwert  $x_0$  können die folgenden Werte durch Einsetzen berechnet werden. Es ist aber nicht möglich, eine geschlossene Formel für die  $x_n$  anzugeben, d. h. eine Voraussage über mehrere Zeitschritte zu machen. Die logistische Gleichung weist in Vielem ein ähnliches Verhalten wie das Lorenz-System auf, welches ebenfalls ein chaotisches dynamisches System ist und in vereinfachter Form konvektive Prozesse in der Atmosphäre beschreibt. Wenn bereits eine vereinfachte Beschreibung eines Aspekts der Atmosphäre chaotisch ist, liegt die Vermutung nahe, dass auch die Atmosphäre als Ganzes chaotisch ist und sich aus der Betrachtung solcher einfachen Modells wichtige Erkenntnisse gewinnen lassen. In unserem Zusammenhang interessiert vor allem ein Aspekt, nämlich die starke Abhängigkeit der Entwicklung des Systems von den Anfangsbedingungen, welche uns in Form der Realisierungen und Ensembles bei den Klimasimulationen wieder begegnet. Zur Illustration zeigt Abb. 4 das zeitliche Auseinanderdriften der Lösung der logistischen Gleichung für  $r = 4$  und zwei verschiedene Startwerte. Eine kleine Änderung des Startwerts bewirkt bereits nach kurzer (dimensionsloser) Zeit einen völlig anderen zeitlichen Verlauf. Bezogen auf das Klima bedeutet das, dass es nicht möglich ist, das tatsächliche Klima genau zu reproduzieren, da die Anfangswerte nie hinreichend genau bekannt sind.

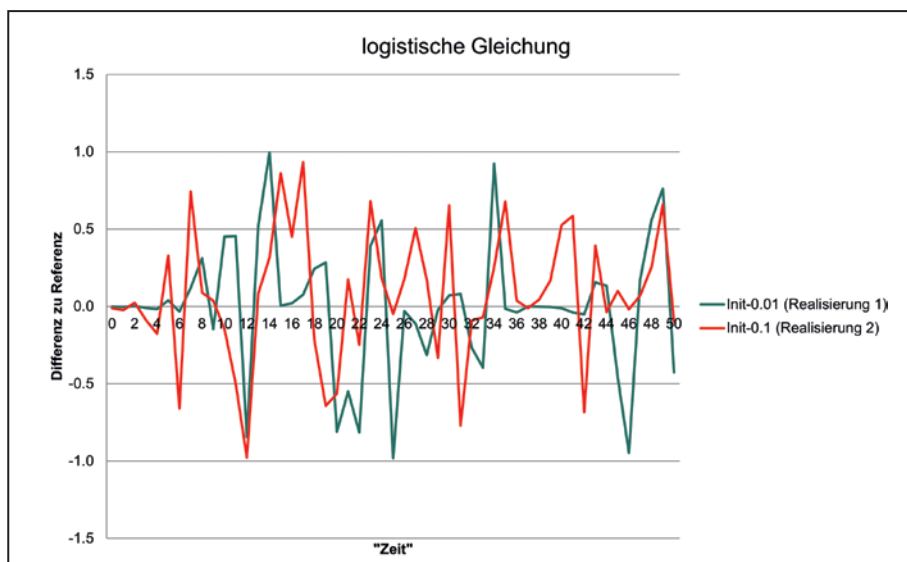


Abb. 4: Abweichung der Lösung der logistischen Gleichung von der Referenz bei geringfügiger Änderung der Anfangswerte.

Einen Eindruck von der Streuung der Modellergebnisse gibt Abb. 5. Sie zeigt den Einfluss von Globalmodell, Realisierung und Regionalmodell auf das Änderungssignal des Jahresniederschlags 1971-2000 gegen 2012-2050 über Europa (Wagner et al., 2012). Die linke Spalte zeigt die Änderungssignale, wie sie mit verschiedenen Realisierungen (E5R1, E5R2, E5R3) des Globalmodells ECHAM5 berechnet wurden. Die mittlere Spalte zeigt, wie die Information dieser ECHAM-Realisierungen von CCLM (Auflösung 7 km) regionalisiert wird. Man sieht, dass alle ECHAM5-Realisierungen die gleiche Grobstruktur aufweisen: Zunahme



der Niederschläge im Norden, Abnahme im Süden, dazwischen ein Bereich ohne wesentliche Änderungen. Man sieht aber auch, dass sich die einzelnen Realisierungen deutlich unterscheiden, sowohl was die räumliche Struktur als auch die Intensität des Signals betrifft. Die Änderungen bei Realisierung 3 sind deutlich geringer als bei den anderen beiden Realisierungen, und in Realisierung 2 hat man eine Zunahme des Niederschlags über Deutschland, während dies bei Realisierung 1 nicht der Fall ist. Die Intensitäten übertragen sich auf die Regionalisierungen, aber es zeigen sich deutliche Unterschiede in den räumlichen Mustern sowohl im Vergleich mit ECHAM als auch innerhalb der Realisierungen. Verschiedene Regionalmodelle setzen die gleiche GCM-Information verschieden um, wie der Vergleich der CCLM-Regionalisierung (CE5R1) mit der WRF-Regionalisierung (WE5R1, oberste Zeile) zeigt. Auch die von verschiedenen Globalmodellen und ihren Regionalisierungen erzeugten Änderungsmuster unterscheiden sich deutlich, wie C3 und CC3 zeigen. Zumindest die Unterschiede bei den Realisierungen fallen in die Kategorie „aleatorische Unsicherheiten“ und lassen sich daher prinzipiell nicht beheben. Das hat die Konsequenz, dass die Ergebnisse einzelner Klimaprojektionen wenig repräsentativ sein können und man Ensembles von Simulationen benötigt, um Wahrscheinlichkeitsaussagen machen zu können.

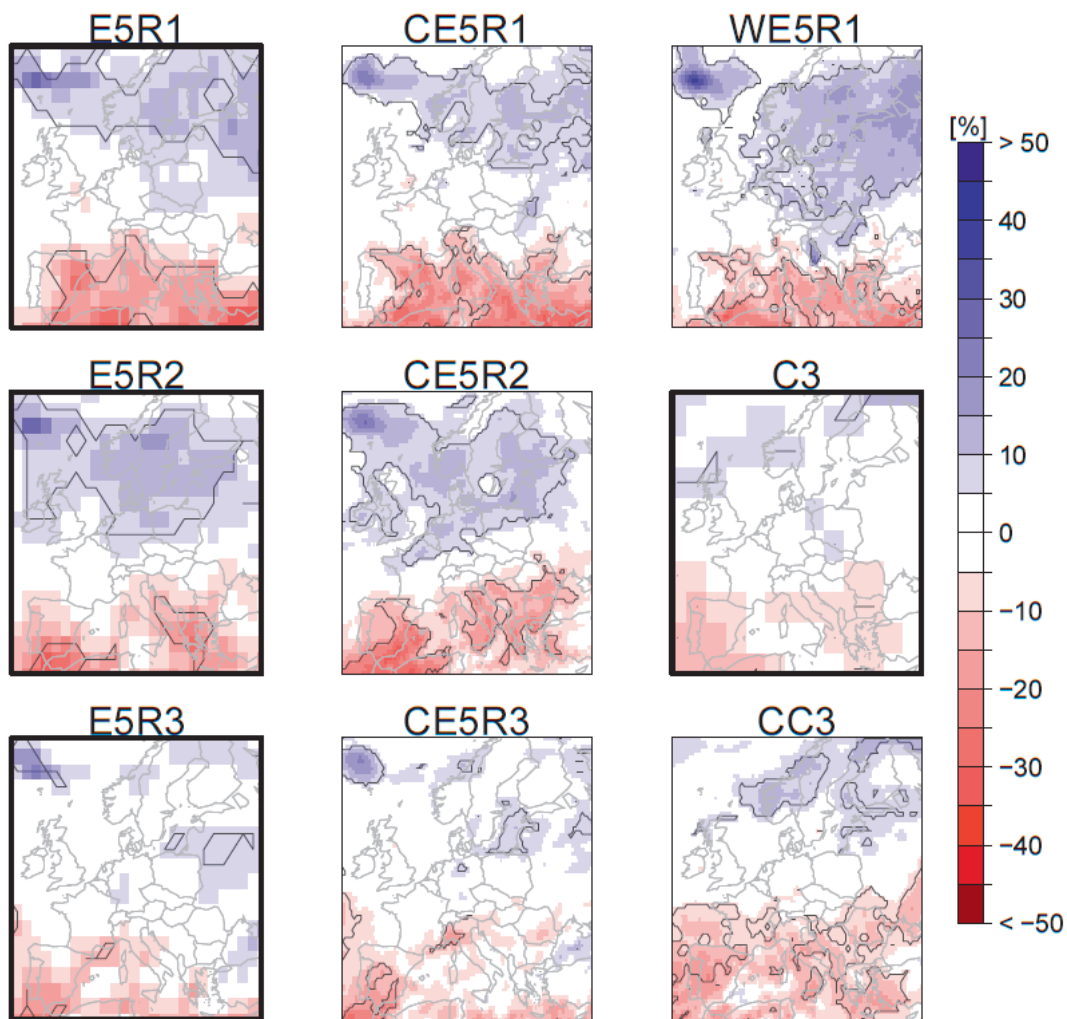


Abb. 5: Änderungssignal des Niederschlags in Globalmodellen (fett umrahmt) und zwei Regionalmodellen. Quelle: Wagner et al., 2012

## 5 Aktuelle Entwicklungen

In diesem Abschnitt werden drei aktuelle Projekte, die sich auf die Modellentwicklung (ICON), die Modellvalidierung (CORDEX) und die Modellanwendung (MiKlip) beziehen, kurz vorgestellt.

### 5.1 ICON

ICON (Icosahedral Non-hydrostatic general circulation models) ist die Bezeichnung für eine neue Generation von Atmosphären- und Ozeanmodellen für Wettervorhersagen und Klimasimulationen. Die Entwicklung geschieht beim Deutschen Wetterdienst (DWD) und beim Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M). Neben moderner Numerik und der Auslegung für Parallelrechner (Skalierbarkeit) sind die verwendeten Ikosaedergitter für Atmosphäre und Ozean (s. Abb. 6) eine Besonderheit. Diese Gitter bringen eine Reihe von Vorteilen mit sich: man erreicht eine gleichmäßige Auflösung überall auf der Erdoberfläche und vermeidet damit die Konvergenz der Längengrade zu den Polen hin, auch ein Rotieren des Gitters ist nicht mehr notwendig. Hinzu kommt, dass für Atmosphäre und Ozean das gleiche Gitter verwendet wird. Das Gitter kann durch Halbierung der Dreiecksseiten regional flexibel verfeinert werden. Dadurch erreicht man eine konsistente Modellierung auf allen Skalen (global und regional) und kann auch die Rückwirkung regionaler Skalen auf die globale Skala direkt erfassen.



Abb. 6: das Icon-Gitter. Quelle: MPI-M

Durch die nichthydrostatische Formulierung des Modells kann die Auflösung innerhalb weiter Grenzen variiert werden. Es ist geplant, beim DWD zunächst das bisher verwendete GME-Modell für die operationellen globalen Wettervorhersagen 2013/2014 durch ICON zu ersetzen, als Klimamodell wird ICON erst später zur Verfügung stehen.

### 5.2 CORDEX

CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, <http://www.eurocordex.net/About-Euro-Cordex.1864.0.html>) ist eine internationale Aktivität, welche Regionalisierungsprojekte weltweit koordinieren und bezüglich Zeiträumen, Gebieten, Validierungsstrategien, Ausgabevariablen und –formaten vereinheitlichen soll; zu den Schwerpunktregionen gehören Afrika und Europa. Alle Downscaling-Verfahren (dynamisches, statistisches und statistisch-dynamisches) werden berücksichtigt. Es soll auch enger Kontakt zu den Arbeiten in CMIP5 gehalten werden im Hinblick auf den Antrieb durch aktuelle GCM-Daten, erhöhte Auflösung und die neuen RCP-Szenarios RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. Soweit vorhanden,





sollen die Ergebnisse auch in den fünften IPCC-Sachstandsbericht eingehen. Die große Anzahl an Simulationen erlaubt Ensembleauswertungen und Abschätzungen der Unsicherheit. Für Europa liegt die Auflösung bei  $0.44^\circ$  (ca. 50 km) und  $0.11^\circ$  (etwa 12 km) mit Simulationszeiträumen zwischen 1951 und 2010 bzw. 2006-2100. Für die Validierung werden hauptsächlich ERA 40 und ERA-Interim-Reanalysen verwendet.

### 5.3 MiKlip

Das MiKlip-Projekt wurde 2011 vom BMBF initiiert mit einer Laufzeit von zunächst 30 Monaten und einer geplanten Gesamtlauzeit von 48 Monaten. Ziel des Projektes ist es, ein System zur Prognose (im Gegensatz zu Projektionen) des Klimas der kommenden Dekade zu entwickeln, analog zu den bereits jetzt von mehreren Wetterdiensten und anderen Einrichtungen bereitgestellten saisonalen Klimaprognosen für verschiedene Regionen der Erde. Die untenstehende Abbildung 7 zeigt zum Beispiel eine saisonale Prognose für die USA, wie sie dort vom Climate Prediction Center (CPC) regelmäßig veröffentlicht wird. Dargestellt ist die Wahrscheinlichkeit (grob in 3 Stufen eingeteilt), dass die Temperatur (links) bzw. der Niederschlag (rechts) über oder unter dem langjährigen Mittel liegen wird; in solche nicht eingefärbten Bereichen ist keine wesentliche Änderung zu erwarten. Solche Informationen sind für viele Lebensbereiche (z. B. Landwirtschaft Energie, Verkehr) sehr wertvoll und wären es natürlich ebenso auf längeren Zeitskalen.

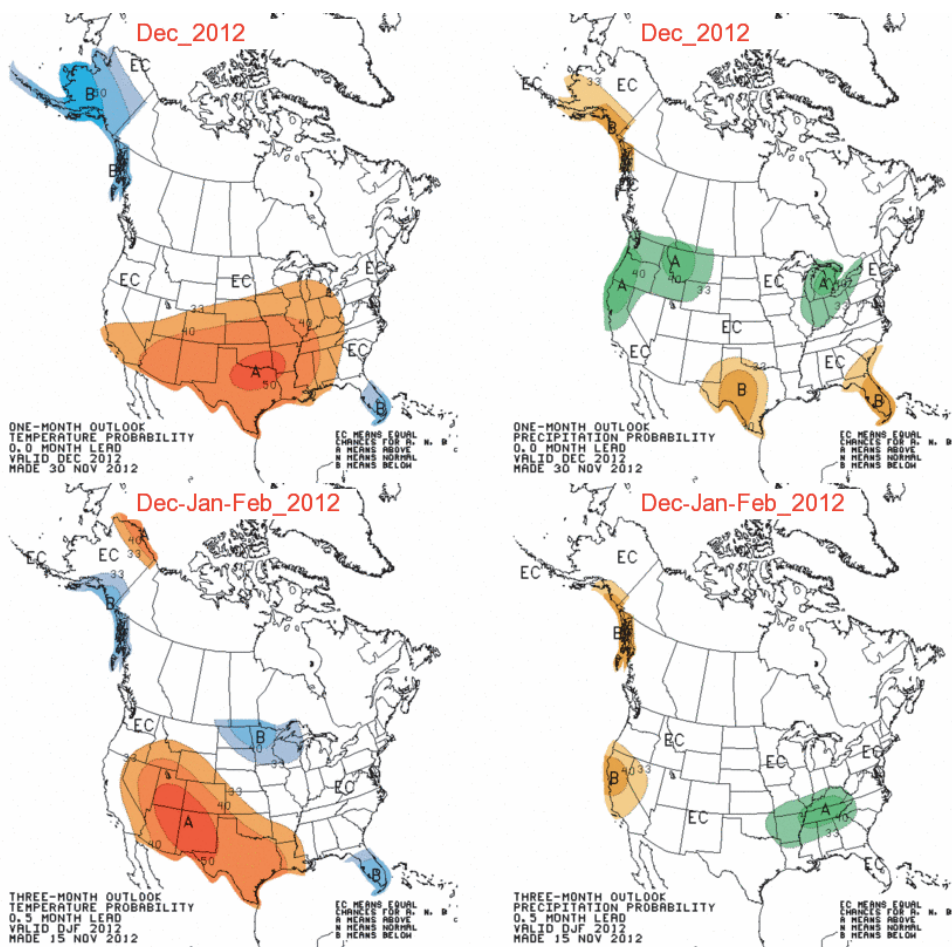


Abb. 7: Eine Jahreszeiten-Prognose des CPC für Temperatur (links) und Niederschlag (rechts).  
A: höher als das langjährige Mittel, B: niedriger als das langjährige Mittel,  
EC: keine eindeutige Aussage möglich.



Inwieweit es möglich und operationell umsetzbar ist, die möglichen Realisierung des Klimas der nächsten Dekade zu prognostizieren und möglichst nahe an diejenige Realisierung zu kommen, die tatsächlich eintreten wird, soll im MiKlip-Projekt untersucht werden. Solche Prognosen könnten möglich sein, wenn man a) zuverlässige Modelle hat und b) diese möglichst gut initialisiert. Punkt b) lässt sich wieder gut am Beispiel der logistischen Gleichung (siehe Kasten) illustrieren, wobei diesmal der Bereich für kleine Zeiten in Abbildung 4 interessiert. Man sieht, dass die Abweichung später beginnt (d. h. die „Voraussage“ länger gültig ist), wenn der geänderte Anfangswert näher am tatsächlichen Anfangswert liegt. Dies will man sich im MiKlip dadurch zunutze machen, dass man sowohl den Anfangszustand der Atmosphäre durch Assimilation von Beobachtungen als auch den Anfangszustand der Komponenten mit langem Gedächtnis, also Ozean und Boden, möglichst gut erfasst. Als Globalmodell wird ESM mit ECHAM 6, als späteres Regionalmodell ist COSMO-CLM vorgesehen. Das Projekt ist in 6 Module mit jeweils spezifischen Themen wie Initialisierung, Datenassimilation, Ozeanmodellierung, Validierung, Ensemblemethoden und Regionalisierung aufgeteilt.

## 6 Literatur

- Davin, E., Stöckli, R., Jaeger, E., Levis, S., Seneviratne, S., 2011: COSMO-CLM<sup>2</sup>: a new version of the COSMO-CLM model coupled to the community land model. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-011-1019-z.
- Meissner, C., Schädler, G., Panitz, H.-J., Feldmann, H., Kottmeier, Ch., 2009: High resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. *Meteorologische Zeitschrift*, 18, 543-557, DOI 10.1127/0941-2948/20090400.
- Peters, G. et al., 2012: The challenge to keep global warming below 2°C. *Nature Climate Change*, DOI 10.1038/nclimate1783.
- van Vuuren, D. P. et al. , 2011: The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change* 109, 5–31, doi:10.1007/s10584-011-0148-z.
- Wagner, S., Berg, P., Schädler, G., Kunstmann, H., 2012: High resolution climate model simulations for Germany: Part II – projected climate changes. *Climate Dynamics* DOI 10.1007/s00382-012-1510-1.



## **Modellierung des Wasserhaushalts unter Verwendung eines Klimaprojektions-Ensembles– methodisches Vorgehen und Ergebnisse**

Dr. Kai Gerlinger<sup>1</sup>, Dr. Andreas Meuser<sup>2</sup>

<sup>1</sup>HYDRON GmbH

<sup>2</sup>Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

### **1 Einleitung**

Ziel des seit 1999 bestehenden KLIWA-Projektes ist es, die Konsequenzen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Dazu ist neben der Analyse der bisherigen Veränderungen die Simulation bzw. Modellierung des Wasserhaushalts in der Zukunft ein zentraler Bestandteil des Projekts. Beschreibungen des bisherigen Vorgehens für die Modellierung und frühere Modellergebnisse (insbesondere in Hinblick auf den Abfluss) finden sich z. B. in Gerlinger 2004, Bremicker 2007, Kleinhans & Willems 2007, Ihringer 2009.

Die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung des Wasserhaushalts muss kontinuierlich weitergeführt werden. Die Modelle für die Berechnung der Klimaprojektionen werden ständig verbessert, aber aufgrund der bestehenden und auch noch zukünftig vorliegenden Unsicherheiten sowie der dynamischen Veränderung der Rahmenbedingungen bleibt die Zukunft nicht „vorhersagbar“. Durch die Zusammenstellung und Bewertung verschiedener Modelle ist es möglich, die Angabe der Richtung der zu erwartenden Änderungen entsprechend dem aktuellen wissenschaftlichen Stand auf eine breitere Basis zu stellen. Die dadurch gleichzeitige sichtbare Schwankungsbreite der Modellergebnisse lässt Rückschlüsse auf die Belastbarkeit der Aussagen zu. Dieses Vorgehen eines Multi-Modell-Ansatzes wird im KLIWA-Projekt wie auch von anderen verwandten Projekten verfolgt. Ein Beispiel ist das CCHydro-Projekt, welches auf dem Ensemble aus verschiedenen Klimaprojektionen des EU-Projekts ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell 2009) beruht.

### **2 Auswahl der Klimaprojektionen**

#### **2.1 Ermittlung eines qualifizierten Ensembles**

Die Auswahl geeigneter Regionalmodelle im KLIWA-Projekt erfolgt maßgeblich durch die Bewertung des Vergleichs zwischen gemessenen meteorologischen Werten und daraus abgeleiteten Abflüssen sowie den Simulationsergebnissen der Klimaprojektionen für den Zeitraum des Ist-Zustands (1971 bis 2000). Zudem wird die Plausibilität des Klimasignals analysiert, also die Höhe der berechneten Änderungen zwischen dem Zukunftsszenario (hier definiert als der Zeitraum 2021 bis 2050) und dem Ist-Zustand. Für wasserwirtschaftliche Fragestellungen ist eine gute Abbildung der räumlichen Unterschiede zwischen Einzugsgebieten von hoher Bedeutung. Daher werden auch weitere Faktoren wie die räumliche Auflösung der Klimaprojektionen sowie die Lagegenauigkeit der Niederschlagsverteilung für die Bewertung herangezogen (Komischke 2013). Im KLIWA-Projekt wird somit der Schwerpunkt darauf gelegt, ausgewählte, plausible und belastbare Klimaprojektionen in das Modell-Ensemble aufzunehmen.

Nach Vergleichsstudien mit verschiedenen dynamischen Regionalmodellen (u.a. unterschiedliche REMO-Rechenläufe sowie CLM (Version 2.4.11)) wird im KLIWA-Projekt als dynamisches Regionalmodell hauptsächlich das COSMO-CLM-Modell des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung (IMK) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) verwendet

(Schädler 2013). Dabei werden die frühere Version 4.2 und vor allem die aktuelle Version 4.8 mit der hohen räumlichen Auflösung von  $7 \times 7$  km<sup>2</sup>-Rasterzellen betrachtet.

Die bereitgestellten Ergebnisse des COSMO-CLM-Modells der Version 4.8 (CCLM4.8) liegen für drei Modellläufe (*runs*) vor. Die *runs* unterscheiden sich durch verschiedene Initialisierungsbedingungen des Globalmodells ECHAM5. Zur Initialisierung der Klima-Simulationen wurde mit ECHAM5 ein Lauf über mehrere Jahrhunderte mit präindustriellen Treibhausgaskonzentrationen durchgeführt. Drei willkürliche Zeitpunkte im Abstand von 25 Jahren wurden als Startpunkt „Jahr 1860“ der je drei Realisierungen der Klimas des 20. Jahrhunderts genommen. Jeder *run* ist gleich wahrscheinlich. Die *runs* aus CCLM4.8 basieren somit jeweils auf einem anderen Modelllauf des Globalmodells ECHAM5 und den dabei verwendeten Ausgangszuständen für die CO<sub>2</sub>-Konzentration (Anfangswert-Ensemble).

Neben dem dynamischen Regionalmodell COSMO-CLM wird das WETTREG-Modell als statistisches Modell als geeignet bewertet und im KLIWA-Projekt verwendet. Die Ergebnisse des WETTREG-Modells liegen als Stationsdaten vor. Die unterschiedlichen Versionen des WETTREG-Modells (vgl. Kreienkamp et al. 2010) werden hier entsprechend der Jahreszahl der Bereitstellung bezeichnet (z. B. WETTREG2009).

Vom WETTREG-Modell werden bis Version 2006 für jede Dekade 200 simulierte Jahre (10 Realisationen mit jeweils 20 Jahren pro Dekade, ab 2009 10 transiente Realisationen) zur Verfügung gestellt, um eine Abschätzung der Bandbreite des Klimawandels zu ermöglichen. Somit stehen für den Zeitraum des Ist-Zustands (1971 bis 2000) und des Zukunftsszenarios (2021 bis 2050) WETTREG-Daten für bis zu 600 Jahre zur Verfügung. Für die hier durchgeführten Untersuchungen werden alle WETTREG-Daten gemeinsam ausgewertet.

Alle ausgewählten Klimaprojektionen basieren auf dem Globalmodell ECHAM5 und dem Emissionsszenario A1B. Einzige Ausnahme ist die WETTREG2003-Projektion, die abweichend auf ECHAM4 und dem Emissionsszenario B2 beruht. Diese Klimaprojektion wurde für die Ableitung der Klimaänderungsfaktoren verwendet (KLIWA 2006), ist noch gültig und wird daher weiterhin berücksichtigt.

Durch diese Auswahl wird ein für Untersuchungen der Wasserwirtschaft qualifiziertes Ensemble an Klimaprojektionen zusammengestellt. Die dabei ausgewählten Klimaprojektionen wurden für Baden-Württemberg im Rahmen eines KLIMOPASS-Projekts mit weiteren Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt verglichen, die z.T. auf anderen Globalmodell-Simulationen beruhten (Wagner et al. 2013). Dabei zeigte sich, dass die für das KLIWA-Projekt ausgewählten Klimaprojektionen meist im Bereich des Medians des ausgewerteten Ensembles von insgesamt 20 Klimaprojektionen zu finden sind.

## 2.2 Bias-Korrektur

Um die Ergebnisse von regionalen Klimaprojektionen zu verbessern, können die Ergebnisse für einzelne Parameter wie z. B. den Niederschlag einer Datenkorrektur („bias correction“) in einem Post-Processing unterzogen werden. Durch die Bias-Korrektur werden die Ergebnisse der Regionalmodelle an die Ergebnisse aus Beobachtungsdaten angepasst. Die Schwierigkeit bei der statistischen Nachbearbeitung von Klimaprojektionsdaten durch die Bias-Korrektur liegt in der Wahrung der raum-zeitlichen Korrelationen der betrachteten meteorologischen Variablen untereinander („Konsistenz der Parameter“) (Teutschbein & Seibert 2012).

Die Berechnungsergebnisse des CCLM4.8-Modells für die Lufttemperatur, den Niederschlag und die Globalstrahlung wurden nach Anwendung verschiedener Verfahren der Bias-Korrektur zur Verfügung gestellt (Berg et al. 2012). Dabei wurden für die Korrektur des Niederschlags und der Lufttemperatur zwei Verfahren verwendet: *linear scaling single* (LSS) (konstante bzw. multiplikative Faktoren) und *quantile mapping single* (QMS) (Anpassung der Verteilungsfunktion) (vgl. Abb. 1). „Single“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Bias-Korrektur nicht auf den Mittelwert aus mehreren *runs* erstellt wird, sondern für jeden *run*

einzelnen. Zudem wurden die Bias-Korrekturen sowohl beim LSS- wie auch beim QMS-Verfahren jeweils getrennt anhand der monatlichen Werte der gesamten Zeitreihe des Ist-Zustands im Vergleich mit Beobachtungsdaten ermittelt.

Für die Bias-Korrektur der CCLM4.8-Daten durch das KIT wurde als Beobachtungsdaten für die Korrektur der Niederschlags- und Lufttemperaturdaten der HYRAS-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet (Rauthe et al. 2013). Die Biaskorrekturen basieren dabei auf den HYRAS-Daten der Versionen 1.0 (Niederschlag) sowie 0.2 (Temperatur). Für die Korrektur der CCLM4.8-Globalstrahlungswerte durch lineare Skalierung wurde ein Datensatz aus CMSAF-Satellitendaten verwendet. Für alle anderen Klimaparameter des CCLM-Modells sowie für die Klimaparameter der weiteren verwendeten Klimaprojektionen wurden keine Bias-Korrekturen durchgeführt.

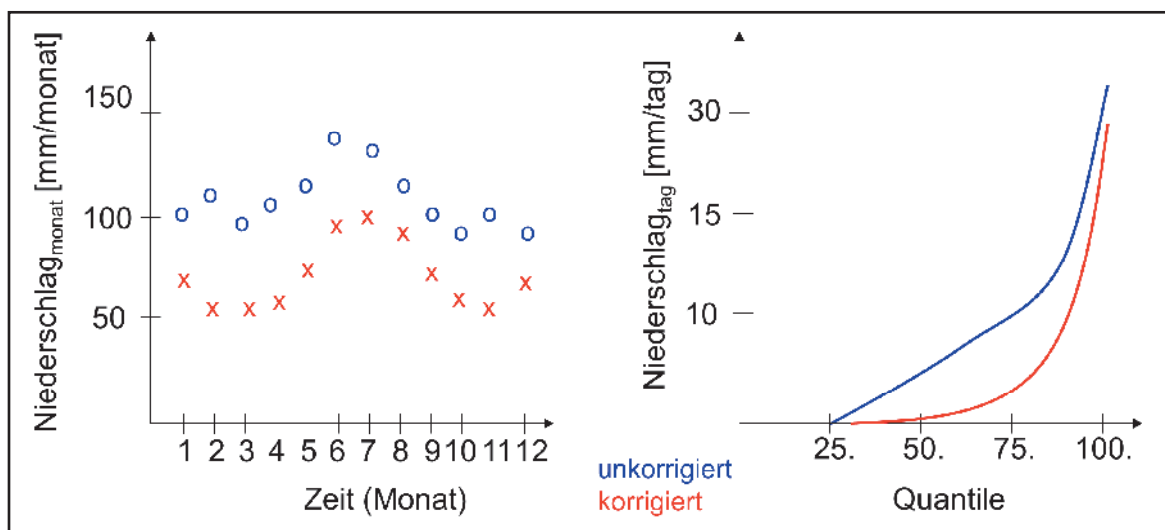


Abb. 1: Prinzip der Bias-Korrektur durch *linear scaling* (monatliche Korrekturfaktoren; links) und *quantile mapping* (Anpassung der Verteilungsfunktion; rechts)

### 3 Anwendung der Wasserhaushaltsmodelle

#### 3.1 Verwendete Wasserhaushaltsmodelle

Um die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zu untersuchen, werden Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen (WHM) unter Verwendung der Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen als Eingangsdaten durchgeführt. Für ein WHM wird das Flusseinzugsgebiet in Teilgebiete oder Rasterflächen unterteilt. Die Prozesse der Abflussbildung (wie Schneeschmelze, Bodenfeuchteentwicklung, Abflusskonzentration im Gebiet und Wellenablauf im Gewässer) werden für jedes Modellelement und jede Landnutzung getrennt modelliert (Abb. 2). Mit einem WHM können so die Veränderung des Abflussverhaltens, aber auch Veränderungen weiterer Größen wie Bodenfeuchte, Verdunstung, Grundwasserneubildung oder Schneedeckendynamik im Zuge des Klimawandels regional detailliert erfasst werden.

Im Rahmen des KLIWA-Projekts werden die WHM LARSIM (in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz) und WaSiM (in Bayern) eingesetzt (Bremicker et al. 2013, Schulla 2012). Beide Modelle sind physikalisch basierend und in ihrer Modellstruktur grundsätzlich vergleichbar. Die WHM decken die Landesflächen sowie angrenzende Quelleinzugsgebiete des Rheins und des Inns flächendeckend räumlich hochaufgelöst ab (in der Regel 1x1 km<sup>2</sup>-Rasterzellen als Modellelemente) (Abb. 3). Die Modellparameter der WHM wurden bei der Modellkalibrierung unter Verwendung von möglichst aktuellen Datensätzen mit meteorologischen Tageswerten ermittelt.

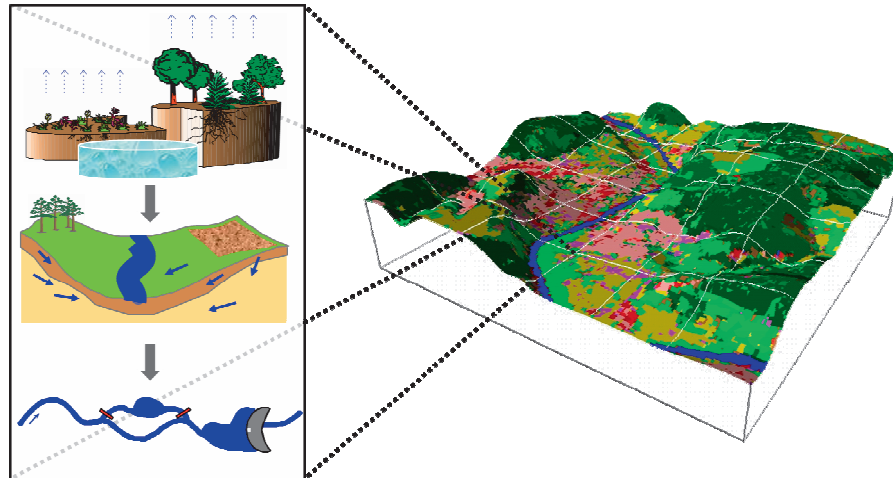


Abb. 2: Ausschnitt aus der Aufteilung eines Einzugsgebiets in  $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Rasterzellen mit unterschiedlicher Landnutzung sowie modellierte Prozesse innerhalb eines Wasserhaushaltsmodells pro Rasterzelle

Bei der Anwendung der WHM im KLIWA-Projekt wird davon ausgegangen, dass die bei der Aufstellung des Modells festgelegten Parameter unverändert für die Zukunft übernommen werden können. Zudem wird angenommen, dass die zukünftige Landnutzungsverteilung mit der heutigen übereinstimmt, da zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht abzuschätzen ist, welche klimatisch oder anthropogen bedingte Landnutzungsänderung in der Zukunft eintritt. Vorliegende Untersuchungen mit Wasserhaushaltsmodellen ergaben jedoch, dass der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf die Abflüsse bei Hochwasser in größeren Einzugsgebieten, insbesondere im Winterhalbjahr, eher gering ist (Haag et al. 2005, Bronstert et al. 2003).

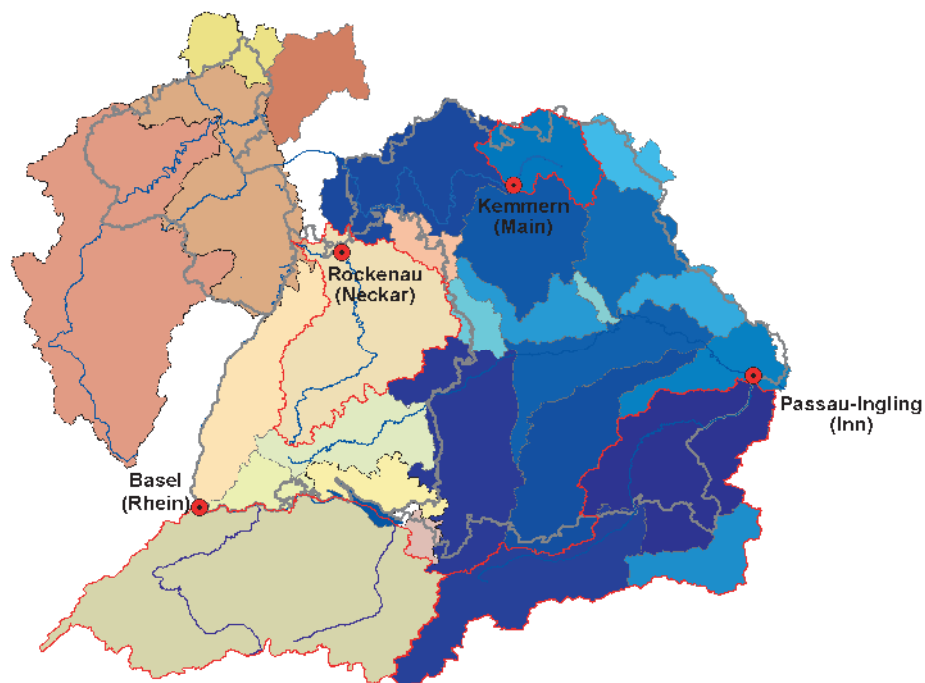


Abb. 3: Wasserhaushaltsmodelle in  $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Auflösung (Tageswerte) mit LARSIM (braun) und WaSiM (blau) im Untersuchungsgebiet sowie ausgewählte Pegelstandorte mit Einzugsgebietsgrenzen (rot)





### 3.2 Regionalisierung

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen liegen als  $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Raster-Daten (CCLM) oder als Stationsdaten (WETTREG) vor. Daher sind diese Daten noch auf die hohe  $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Auflösung der WHM zu regionalisieren.

Für die Verwendung in LARSIM werden die Niederschlagsdaten der Klimaprojektionen unter Verwendung der als  $1 \times 1 \text{ km}^2$ -Rasterzellen vorliegenden HYRAS-Daten als monatliche Hintergrundfelder regionalisiert (vgl. Kleinn 2002, Gerlinger 2004). Die räumliche Auflösung und die relativen Unterschiede der Niederschläge zwischen den HYRAS-Rasterzellen werden übernommen und auf die durch die Klimaprojektionen vorliegenden Zeitreihen aufgeprägt (sowohl für den Ist-Zustand wie für das Zukunftsszenario).

Bei den CCLM-Modellen bleibt bei diesem Verfahren der Modellwert des Niederschlags für jeden Rastermittelpunkt der  $7 \times 7 \text{ km}^2$ -Rasterzelle erhalten (stationstreu) und auch der zeitliche Verlauf bleibt unverändert. Durch die Hintergrundinformation der höher aufgelösten HYRAS-Rasterdaten wird aber innerhalb der CCLM-Rasterzelle der Niederschlag besser differenziert. Dies gilt analog auch für die WETTREG-Daten, da die räumliche Abbildung zwischen den Stationen verbessert wird.

Der Niederschlag für die WaSiM-Modelle wird mit Inversen-Distanz-Verfahren unter Berücksichtigung der Geländehöhe regionalisiert. Dieses Verfahren wird auch für die Regionalisierung aller anderen meteorologischen Parameter eingesetzt (sowohl LARSIM wie WaSiM).

Je nach gewähltem Vorgehen bei der Modellkalibrierung der WHM werden die Niederschläge einzelner Klimaprojektionen vor der Regionalisierung noch um den systematischen Niederschlagsmessfehler mit dem Verfahren nach Richter (1995) modifiziert.

## 4 Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen

### 4.1 Form der Auswertungen

Die im Rahmen des KLIWA-Projekts verwendete Modellkette beginnend mit den Annahmen zum Emissionsszenario der Treibhausgase bis hin zur Anwendung im Wasserhaushaltsmodell als Wirkmodell ist in Abbildung 4 dargestellt.

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen können nicht tagesweise mit Beobachtungsdaten verglichen werden, da nur das mittlere klimatische Verhalten wiedergegeben wird, nicht aber eine datumsscharfe Zeitreihe. Auch für die Zukunft stellen die Klimaprojektionen keine Ergebnisse zur Verfügung, die exakt einem Datum in der Zukunft zugeordnet werden können. Dies bedeutet, dass der in einer Klimaprojektion enthaltene Tagesniederschlag im Jahr 2025 genauso gut auch im Jahr 2030 oder 2022 auftreten kann. Deswegen können die Abflusswerte nur über die jeweils 30-jährigen Zeitreihen des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios insgesamt ausgewertet werden.

Die Auswertung der Ergebnisse der WHM erfolgt daher zum einen zur Analyse des mittleren Abflussverhaltens durch den Vergleich der Regimekurven der mittleren monatlichen Abflüsse für Niedrig-, Mittel- und Hochwasser (MoMNQ, MoMQ und MoMHQ). Zum anderen werden zur Analyse des extremen Abflussverhaltens Dauerlinien erstellt sowie extremwertstatistische Untersuchungen durchgeführt. Dies wird für den Ist-Zustand und für die Zukunftsszenarien durchgeführt.

Das im Folgenden beschriebene Vorgehen zur Auswertung der WHM-Simulationsergebnisse ist in Abbildung 5 verdeutlicht.

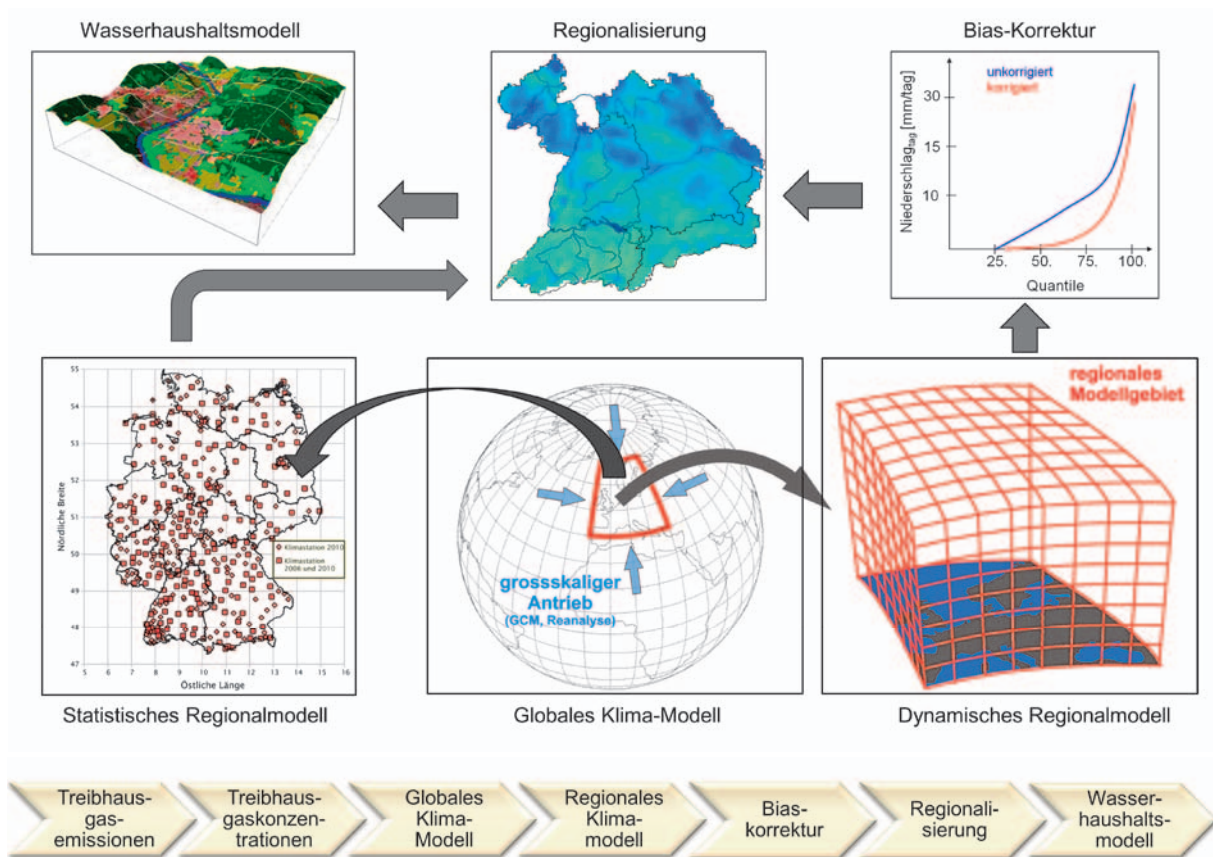


Abb. 4: Modellkette für die Auswertung der Wasserhaushaltsmodelle unter Verwendung statistischer Klimaprojektionen und bias-korrigierter dynamischer Klimaprojektionen

## 4.2 Simulation mit meteorologischen Messdaten

Zur Einschätzung der Qualität der WHM-Simulationen werden die Berechnungen zunächst unter Verwendung von meteorologischen Messdaten bzw. HYRAS-Daten für den Zeitraum des Ist-Zustands durchgeführt („Messdaten-Simulation“). Dies wird an möglichst vielen Pegeln durchgeführt, um durch den Vergleich mit gemessenen Abflüssen zu überprüfen, dass durch die Anwendung der WHM in der Modellkette kein allzu großer Fehler hinzugefügt wird.

Die durchgeführten Vergleiche zeigen die prinzipielle Eignung der beiden eingesetzten WHM LARSIM und WaSiM, die gemessenen Abflüsse an den Pegeln wiederzugeben.

## 4.3 Simulation mit Klimaprojektionen für den Ist-Zustand

Für die Überprüfung der Eignung der Klimaprojektionen zur Wiedergabe des aktuellen Klimageschehens werden WHM-Simulationen mit den Daten der Klimaprojektionen für den Ist-Zustand durchgeführt. Diese Simulationsergebnisse werden dann mit der Messdaten-Simulation verglichen, die unter Verwendung der meteorologischen Eingangsdaten erstellt wurde.

Die bias-korrigierten CCLM4.8-Simulationen zeigen erwartungsgemäß die geringsten Abweichungen von der Messdaten-Simulation. Aber auch die nicht bias-korrigierten Simulationen der Vorläuferversion CCLM4.2 stimmen recht gut mit der Messdaten-Simulation überein. Größere Abweichungen ergeben sich bei den WETTREG-Simulationen, obwohl diese auf Beobachtungsdaten beruhen.

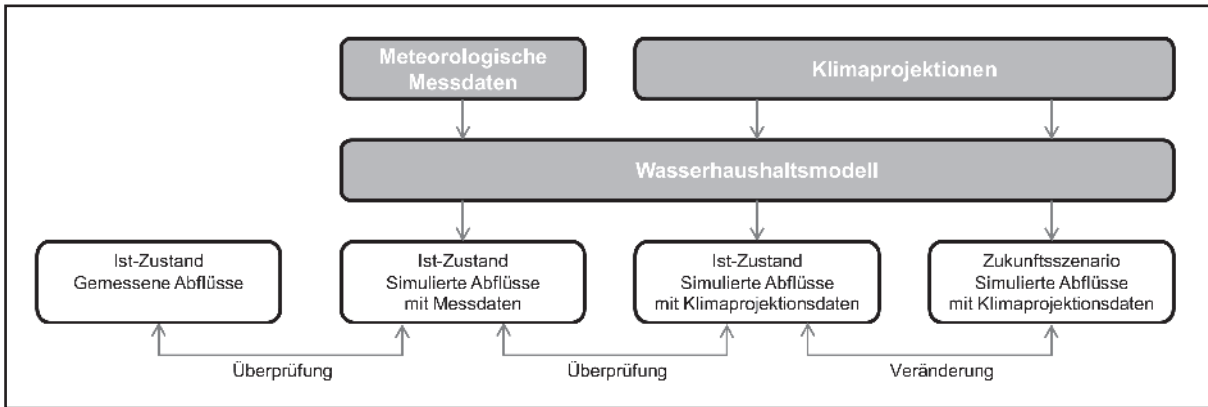


Abb. 5: Systematik der Auswertung der Wasserhaushaltssimulationen

Beispielhaft sind die Ergebnisse in Abbildung 6 für die MoMHQ-Werte für die Pegel Basel (Rhein) und Rockenau (Neckar) dargestellt. Der Pegel Basel zeigt die höchsten gemessenen Abflüsse aufgrund der Schneeschmelze im alpinen Raum im Sommer. Diesem nivalen Abflussregime steht das pluviale Abflussregime gegenüber, bei dem aufgrund der hohen Niederschläge im Winter die höchsten gemessenen Abflüsse auftreten (vgl. Pegel Rockenau/Neckar).

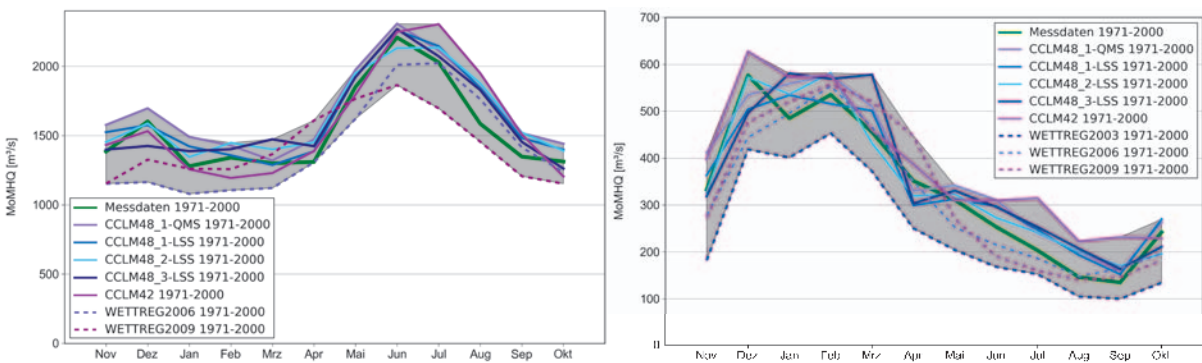


Abb. 6: Vergleich der Messdaten-Simulation mit den Simulationsergebnissen verschiedener Klimaprojektionen für den Ist-Zustand am Beispiel der MoMHQ-Werte des Pegels Basel/Rhein (links) und des Pegels Rockenau/Neckar (rechts)

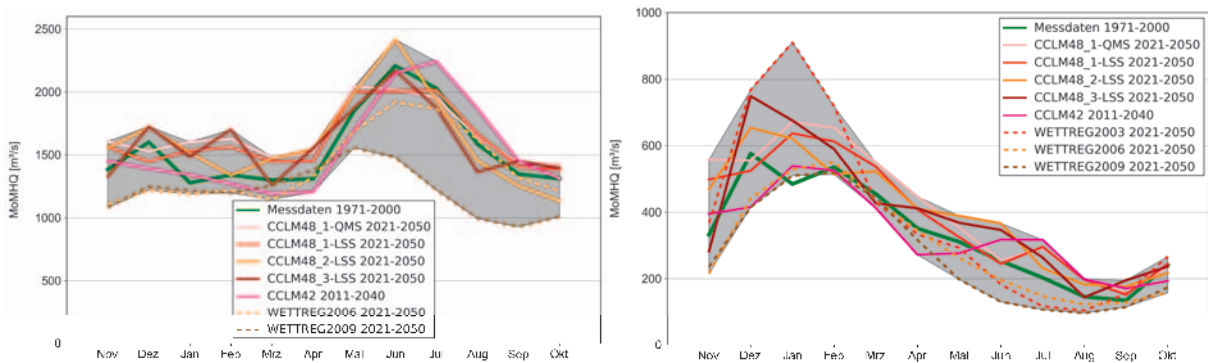


Abb. 7: Vergleich der Messdaten-Simulation mit den Simulationsergebnissen verschiedener Klimaprojektionen für das Zukunftsszenario am Beispiel der MoMHQ-Werte des Pegels Basel/Rhein (links) und des Pegels Rockenau/Neckar (rechts)

Die Abweichungen der CCLM-Simulationen von den Messdaten-Simulationen sind bei den untersuchten Pegeln mit nivalem Regime meist geringer als bei den untersuchten Pegel mit pluvialem Regime. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Werte für die relative Feuchte in den CCLM-Daten höher sind als in den gemessenen Werten. Da die relative Feuchte nicht bias-korrigiert wurde, ergeben sich meist höhere Abflüsse der CCLM4.8-Simulation im Vergleich zur Messdaten-Simulation. Dies wirkt sich bei den Pegeln mit nivalem Regime durch den großen Einfluss der Schneedynamik auf die Abflusswerte weniger stark aus.

Insgesamt werden die Abflüsse aus der Messdaten-Simulation von den CCLM4.8-Simulationen recht gut wiedergegeben. Dabei gibt es neben den größeren Abweichungen an den Pegeln mit pluvialem Regime auch regionale Unterschiede.

#### **4.4 Simulation mit Klimaprojektionen für das Zukunftsszenario**

Die beiden vorherigen Schritte dienen der Überprüfung der Eignung der WHM sowie der Eignung der Klimaprojektions-Daten für den Ist-Zustand. Für die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der Abflüsse wird die Veränderung zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand ermittelt. Systematische Fehler in den WHM oder in den Klimaprojektionen werden bei dieser Betrachtung der relativen Unterschiede ausgeglichen.

Da aufgrund der durchgeführten Analysen davon ausgegangen werden kann, dass die gewählten Klimaprojektionen und die WHM prinzipiell in der Lage sind, die hydrologischen Gegebenheiten adäquat wiederzugeben, wird im Weiteren vor allem das Klimasignal (also die Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand) beschrieben. Die Ergebnisse werden beispielhaft anhand der Regimekurven an ausgewählten Pegeln des KLIWA-Untersuchungsgebiets dargestellt. Weitergehende Auswertungen der Regimekurven und Dauerlinien finden sich z. B. in HYDRON (2012). Erste extremwertstatistische Auswertungen der Hochwasserkennwerte sind in Katzenberger (2013) aufgeführt.

Die Abbildungen 8 bis 11 zeigen für vier ausgewählte Pegel (zwei Pegel mit nivalem Regime, zwei Pegel mit pluvialem Regime, Standorte der Pegel vgl. Abb. 3) jeweils die prozentualen Abweichungen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand für jeden Monat anhand der Auswertung der mittleren monatlichen Niedrig- und Hochwasserabflüsse (MoMHQ und MoMNQ). Zur besseren Vergleichbarkeit ist die Skalierung der rechten Y-Achse in allen Abbildungen einheitlich (Ausnahme MoMHQ Pegel Rockenau). Zudem sind die Regimekurven der Messwerte in den Abbildungen eingetragen, um den Verlauf des derzeitigen Regimes zum Vergleich zur Verfügung zu haben. Die Ensembles an den Pegeln setzen sich z.T. aus unterschiedlichen Klimaprojektionen zusammen, um unterschiedliche Fragestellungen klären zu können.

##### *4.4.1 Einfluss der Bias-Korrektur*

Für die Pegel im Rhein-Einzugsgebiet (bis zum Pegel Worms) liegen Simulationsrechnungen mit den WHM und den CCLM4.8-Ergebnissen für den *run1* (abgekürzt: „CCLM4.8\_1“) mit zwei unterschiedlichen Bias-Korrekturverfahren vor. Der Vergleich der Auswirkung der Bias-Korrekturverfahren „quantile mapping“ (QMS) und „linear scaling“ (LSS) für Niederschlag und Temperatur bei CCLM4.8 zeigt, dass QMS zu etwas höheren Niederschlägen und in der Folge höheren Abflüssen im Vergleich zu LSS führt (vgl. Abb. 6 bis Abb. 9 (Legende CCLM4.8\_1-QMS und CCLM4.8\_1-LSS)).

Die CCLM4.8\_1-QMS-Simulation zeigt sowohl im Ist-Zustand als auch für das Zukunftsszenario höhere Abflüsse in den Regimekurven und in den Dauerlinien als die CCLM4.8\_1-LSS. Für das Klimasignal als relative Differenz folgen daher kaum Unterschiede zwischen den beiden Simulationen. Die Unterschiede in der Wahl der beiden untersuchten Bias-Korrekturverfahren sind somit in den hier betrachteten Einzugsgebieten gering, insbesondere im Klimasignal.





#### 4.4.2 Einfluss der unterschiedlichen runs

Die Unterschiede in den simulierten Abflüssen zwischen den drei *runs* des CCLM-Modells sind deutlich höher als die Unterschiede zwischen den Bias-Korrekturverfahren. Hinsichtlich des Klimasignals des Niederschlags kann der *run1* als eine Realisation „mittlerer“ Verhältnisse charakterisiert werden. Dagegen zeigt der *run2* das größte Klimasignal (Niederschlag und Temperatur) in beiden Halbjahren und für das gesamte Untersuchungsgebiet. Das geringste Klimasignal ergibt sich beim *run3*. In der regionalen Ausprägung des Klimasignals ähneln sich *run1* und *run3* häufig.

Der Vergleich der Regimekurven der drei CCLM4.8-Realisationen (alle mit LSS-Korrektur) zeigt untereinander deutlichere Abweichungen als zwischen den Regimekurven der QMS-Simulation und der LSS-Simulation (vgl. Abb. 6 und Abb. 7). Generell schwingt der Verlauf der Regimekurve der CCLM4.8\_2-LSS-Simulation am wenigsten und der Verlauf der CCLM4.8\_3-LSS-Simulation am stärksten von den drei *runs*. Bei den prozentualen Veränderungen des Klimasignals treten z.T. in einzelnen Monaten sogar gegenläufige Tendenzen auf, d. h. Abnahmen bei einem *run* und Zunahmen bei einem anderen *run* (vgl. Abb. 8 und Abb. 9).

Die *runs* spiegeln die natürliche Klimavariabilität wider und die Ergebnisse zeigen, dass diese Variabilität eine große Amplitude in den Ergebnissen der Abflusssimulationen mit sich bringt. Trotz dieser Unterschiede in einzelnen Monaten zeigen aber die Verläufe der Regimekurven der drei *runs* ein vergleichbares Verhalten mit etwas höheren Abflusswerten im Winter im Vergleich zum Ist-Zustand, vor allem an den Pegeln mit pluvialem Regime.

#### 4.4.3 Einfluss der Klimaprojektionen

Die Regimekurven der WETTREG-Daten zeigen in der Regel eine Unterschätzung und die Regimekurven der CCLM-Daten eine leichte Überschätzung der Messdaten-Simulation (Abb. 6).

Im Zukunftsszenario der CCLM-Simulationen zeigen insbesondere die Pegel mit pluvialem Regime Zunahmen der winterlichen Abflusswerte. Unabhängig vom Regimetyp treten bei den CCLM-Simulationen leichte Abnahmen im Sommer auf.

Für das Zukunftsszenario fallen die hohen MoMHQ-Werte im Winter bei den WETTREG2003-Simulationen auf (Abb. 7). Die hohen WETTREG2003-Werten lassen sich in den aktuelleren Klimaprojektionen, die statt mit dem Globalmodell ECHAM4 mit ECHAM5 betrieben wurden, nicht mehr in diesem Ausmaß finden.

Auch die aktuelleren WETTREG-Simulationen 2006, 2009 und 2010 stehen im Gegensatz zu den WETTREG2003-Daten, da die Regimekurven dieser WETTREG-Simulationen im Zukunftsszenario sogar noch unter der Messdaten-Simulation liegen. Auch die prozentualen Abweichungen zeigen bei diesen WETTREG-Simulationen deutliche Abnahmen im Zukunftsszenario und dies sogar im Winterhalbjahr (Abb. 8 bis Abb. 11). Besonders auffällig sind dabei die WETTREG2009- und WETTREG2010-Ergebnisse, weniger auffällig WETTREG2006.

Diese simulierten Verschärfungen der Niedrigwassersituation treffen bei den Pegeln mit pluvialem Regime mit der saisonalen Niedrigwasserphase zusammen. Basierend auf diesen Ergebnissen könnten z. B. in Regionen, deren Trinkwasserversorgung sich auf Quellschüttungen stützt, Einschränkungen in der Zukunft erwartet werden (HYDRON 2013). Allerdings sind die hohen Abflussabnahmen dieser WETTREG-Simulationen im Vergleich mit anderen Klimaprojektionen eher als „worst case“ Szenario zu werten (vgl. Wagner et al. 2013).



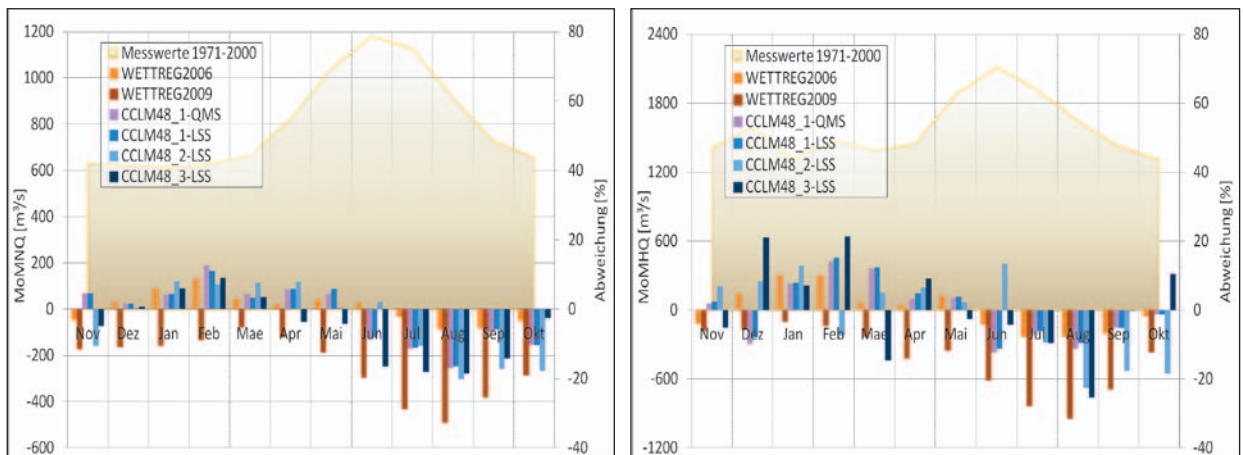


Abb. 8: Ensemble-Analyse: prozentuale Veränderungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (links) und Hochwasserabflüsse (rechts) am Pegel Basel/Rhein ( $A_{EZG} = 35.921 \text{ km}^2$ ) im Zukunftsszenario 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000

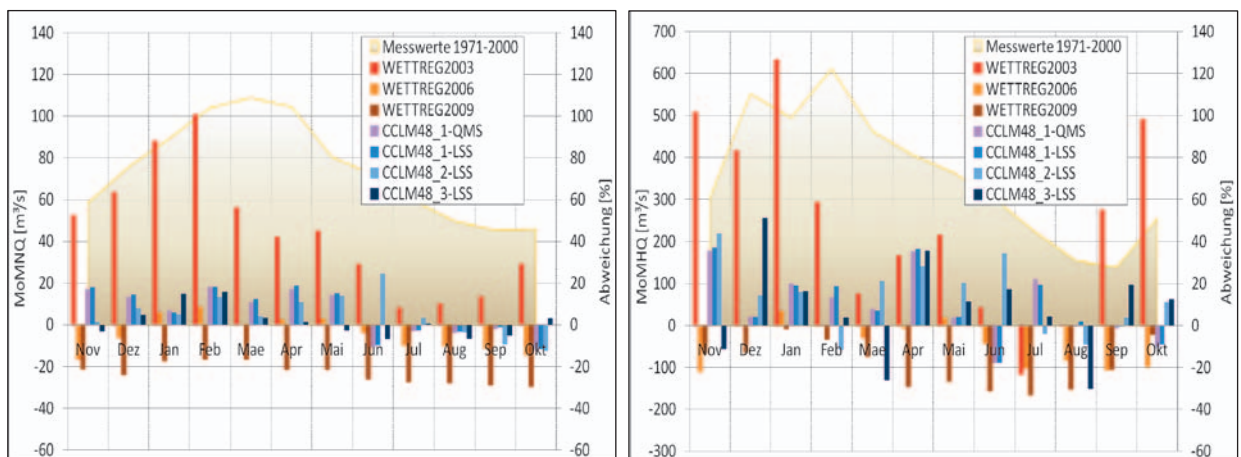


Abb. 9: Ensemble-Analyse: prozentuale Veränderungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (links) und Hochwasserabflüsse (rechts) am Pegel Rockenau/ Neckar ( $A_{EZG} = 12.676 \text{ km}^2$ ) im Zukunftsszenario 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000

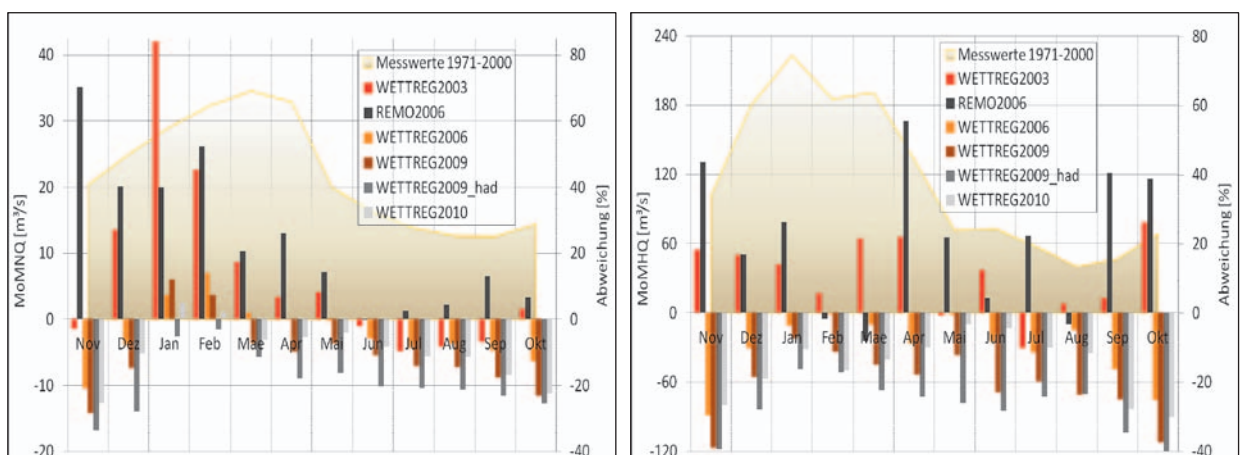


Abb. 10: Ensemble-Analyse: prozentuale Veränderung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (links) und Hochwasserabflüsse (rechts) am Pegel Kemmern/Main ( $A_{EZG} = 4.223 \text{ km}^2$ ) im Zukunftsszenario 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000

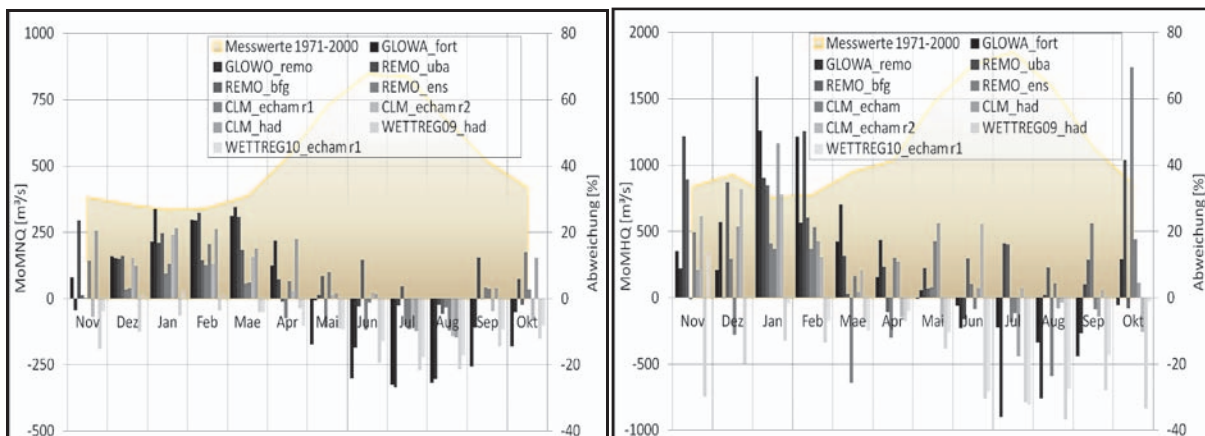


Abb. 11: Ensemble-Analyse: prozentuale Veränderung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (links) und Hochwasserabflüsse (rechts) am Pegel Passau-Ingling/Inn ( $A_{EZG} = 26.062 \text{ km}^2$ ) im Zukunftsszenario 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000

#### 4.4.4 Veränderungen im Niedrigwasserbereich

Die sommerlichen Abflussabnahmen im Zukunftsszenario auf Grundlage der aktuellen WETTREG-Simulationen verringern bei den Pegeln mit pluvialem Regime die Niedrigwassermenge deutlich. Bei den Pegeln mit nivalem Regime mit den höchsten MoMNQ-Werten im Sommer wird durch diese Abnahmen das Abflussregime über das Jahr ausgeglichener. Auch die CCLM-Simulationen zeigen analog zu den WETTREG-Simulationen Abflussabnahmen im Sommer. Tendenziell höhere Abnahmen treten dabei an den Pegeln mit nivalem Regime auf.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem ausgewerteten Ensemble eine Verringerung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse im Bereich um ca. -10 %, bei einzelnen WETTREG-Klimaprojektionen bis -20 % in den Monaten Juni bis Oktober für den Zeitraum des Zukunftsszenarios im Vergleich zum Ist-Zustand, wobei es regionale Unterschiede gibt.

#### 4.4.5 Veränderungen im Hochwasserbereich

Die durchgeführten Auswertungen zeigen meist für das Zukunftsszenario eine Zunahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Winter. Dies führt bei den Pegeln mit nivalem Regime, die die höchsten MoMHQ-Werten im Sommer aufweisen, vergleichbar wie beim Niedrigwasser zu einer im Vergleich zum Ist-Zustand ausgeglicheneren Regimekurve. Bei den Pegeln mit pluvialem Regime werden die Regimekurven dagegen akzentuierter, mit größeren Gegensätzen zwischen den höheren Abflusswerten im Winter und niedrigeren Abflusswerten im Sommer. Die aktuellen WETTREG-Simulationen zeigen bei einzelnen Pegeln mit pluvialem Regime allerdings im Winter auch Abnahmen der MoMHQ-Werte. Dem steht allerdings die Zunahme der winterlichen Niederschläge gegenüber, die aus den meisten Klimaprojektionen für das Zukunftsszenario berechnet wird.

Zusammenfassend ergibt sich aus dem ausgewerteten Ensemble eine Erhöhung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse im Bereich von +5 %, z.T. bis +10 % (mit Ausnahme der WETTREG2009- und WETTREG2010-Klimaprojektionen) in den Monaten November bis Mai für den Zeitraum des Zukunftsszenarios im Vergleich zum Ist-Zustand, wobei es regionale Unterschiede gibt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Modellierung des zukünftigen Wasserhaushalts wird die Modellkette „Emissionsszenario → Globalmodell → Regionalmodell → (Bias-Korrektur) → Regionalisierung → Wasserhaushaltsmodell“ angewandt. Für wasserwirtschaftliche Fragen ist in der Auswahl der Klimaprojektionen, die zum Antrieb der Wasserhaushaltsmodelle LARSIM und WaSiM verwendet werden, besonderes Gewicht zu legen. Daher werden im KLIWA-Projekt umfangreiche Analysen der Klimaprojektionen durchgeführt, um z. B. auch die Lagegenauigkeit der simulierten Niederschläge zu überprüfen.

Durch die inzwischen mit mehreren Klimaprojektionen durchgeführten Auswertungen ergibt sich ein Ensemble-Ergebnis. Dabei wird für die Ableitung von Aussagen aus dem Ensemble als Schwerpunkt das aktuelle CCLM4.8-Modell herangezogen, welches als zuverlässig und plausibel eingestuft wird.

Die CCLM4.8-Ergebnisse basieren auf dem Globalmodell ECHAM5 mit dem Emissionsszenario A1B. Zur Berücksichtigung der natürlichen Variabilität liegt ein Anfangswert-Ensemble vor, welches aus drei Realisierungen (*runs*) zur Beschreibung der natürlichen Variabilität besteht. Die Simulationsergebnisse zeigen z.T. deutliche Unterschiede der Abflüsse zwischen den Realisierungen, aber der zeitliche Verlauf des Klimasignals für den Abfluss ist vergleichbar.

Für den *run1* liegen aus dem CCLM4.8-Modell die Ergebnisse aus zwei unterschiedlichen Bias-Korrekturverfahren vor. Die Unterschiede der simulierten Abflüsse sind aber relativ gering zwischen diesen beiden verwendeten Korrekturverfahren.

Für die Ermittlung des Klimasignals hinsichtlich der Veränderung der Niedrig- und Hochwasserabflüsse werden die Simulationsergebnisse des Zukunftsszenarios 2021 bis 2050 in Beziehung zu den Ergebnissen für den Ist-Zustand 1971 bis 2000 gesetzt. Dabei wird bei der Ergebnisinterpretation unterschieden zwischen den Pegeln mit nivalem Regime (Abflussmaximum in Folge der Schneeschmelze im Sommer) und den Pegel mit pluvialem Regime (Abflussmaximum in Folge der Niederschläge im Winter).

Bei den untersuchten Pegeln mit nivalem Regime gleichen sich tendenziell die Abflusswerte der Regimekurven im Zukunftsszenario aus, so dass die monatlichen Unterschiede geringer werden. Bei den betrachteten Pegeln mit pluvialem Regime verlaufen dagegen die Regimekurven des Zukunftsszenarios in der Regel akzentuierter als im Ist-Zustand: im Winter nehmen die Abflüsse und somit die Hochwassergefahr im Zukunftsszenario zu, während im Sommer die Abflüsse abnehmen und sich die Niedrigwassersituation verschärft. Die Stärke der Änderungen des Abflussverhaltens im Zukunftsszenario an den untersuchten Pegeln ist regional unterschiedlich.

Zwischen den Klimaprojektionen des CCLM-Modells und des WETTREG-Modells zeigen sich Unterschiede. Hier stellen insbesondere die WETTREG2009- und WETTREG2010-Ergebnisse sehr trockene Verhältnisse dar.

Weitergehende Auswertungen der bislang vorliegenden Ergebnisse aus den Wasserhaushaltsmodellen sind im KLIWA-Projekt vorgesehen. Darüber hinaus ist zu erwarten, dass zukünftige Modellverbesserungen der Global- und Regionalmodelle es erlauben werden, die bestehenden Unsicherheiten stärker einzugrenzen. Derzeit werden die Arbeiten des *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* zum 5. Sachstandsbericht des IPCC durchgeführt, bei dem u.a. die ECHAM6-Version sowie neue Vorgaben für die Emissionsszenarien (RCP-Szenarien) eingesetzt werden (Marotzke 2013).



## 6 Literatur

- Berg P., Wagner S., Kunstmann H. & Schädler G. (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany: Part 1 – validation. - *Climate Dyn.*, 40, 401-414.
- Bremicker M. (2007): Simulation von Hochwasserereignissen in Baden-Württemberg. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart. KLIWA-Berichte, Heft 10, S. 71-78
- Bremicker M., Brahmmer G., Demuth N., Holle F.-K. & Haag I. (2013): Räumlich hoch aufgelöste LARSIM Wasserhaushaltsmodelle für die Hochwasservorhersage und deren Anwendung. weitere Anwendungen. - *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 6. Jahrgang, Heft 9, September 2013 (im Druck), S. 509-514
- Bronstert A., Bárdossy A., Bismuth C., Buiteveld H., Busch N., Disse M., Engel H., Fritsch U., Hundecha Y., Lammersen R., Niehoff D. und Ritter N. (2003): LAHoR - Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumaßnahmen an Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. – *Berichte der Kommission des Rheins* II-18
- CH2011 (2011): *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. - Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fuchs R. (2011): *Empirical-Statistical Post-Processing of Radiation and Humidity Parameters in Regional Climate Simulations*. - Wegener Center Verlag, Graz, Austria
- Gerlinger K. (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 2. KLIWA-Symposium 03.-04.05.2004 in Würzburg. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 87-102
- Haag I., Gerlinger K. & Kolokotronis V.: (2005): Auswirkungen von Windwurfschäden auf Hochwasserabflüsse am Beispiel des Enz-Nagold-Gebiets. - *Wasserwirtschaft*, Heft 10/2005, S. 8-14
- HYDRON (2012): *Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten Version 4.8 für das Rheineinzugsgebiet bis zum Pegel Worms*. - Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und des Landesamts für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz
- HYDRON (2013): *Untersuchungen zu Quellschüttungen und Bodenwasserhaushalt mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Abschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf Quellschüttungen und Niedrigwasserabflüsse*. - Unveröffentlichter Bericht im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt
- Ihringer J. (2009): Auswirkungen des Klimawandels auf den Niedrigwasserabfluss. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 4. KLIWA-Symposium 03.-04.03.2009 in Mainz. KLIWA-Berichte, Heft 15, S. 135-156
- Katzenberger B. (2013): *Hochwasser – Abflussprojektionen und Auswertungen*. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg. KLIWA-Berichte (im Druck)
- Kleinhans A. & Willems W. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen im bayerischen Maingebiet. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 3. KLIWA-Symposium 25.-26.10.2006 in Stuttgart. KLIWA-Berichte, Heft 10, S. 79-91
- Kleinn J. (2002): *Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine Basin: A Process Study with a Coupled Climate-Runoff Model*. - Diss. 14663, ETH Zürich.
- KLIWA (2006): *Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland*. - KLIWA-Berichte Heft 9



- Komischke H. (2013): Regionale Klimaprojektionen bei KLIWA. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg. KLIWA-Berichte (im Druck)
- Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2010): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. - Bericht, CEC Potsdam GmbH
- Marotzke J. (2013): Von der Vergangenheit in die Zukunft: neue Klimasimulationen für Wissenschaft und Gesellschaft. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg. KLIWA-Berichte (im Druck)
- Rauthe M., Steiner H., Riediger U., Mazurkiewicz A. & Gratzki A. (2013): A precipitation climatology covering Germany and neighbouring river basins – Part I: Generation of a high-resolution gridded daily precipitation data set (HYRAS) and first results. - Meteorolog. Zeitschrift (angenommen)
- Richter D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. - Deutscher Wetterdienst, 93 Seiten
- Schädler G. (2013): Dynamische regionale Klimamodellierung – Sachstand und weitere Entwicklung. - In: AK KLIWA (Hrsg.):Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg. KLIWA-Berichte (im Druck)
- Schulla J. (2012): Model description WaSiM-ETH. - [http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim\\_2012\\_ed2\\_en.pdf](http://www.wasim.ch/downloads/doku/wasim/wasim_2012_ed2_en.pdf)
- Teutschbein C. & Seibert J. (2012): Is bias correction of Regional Climate Model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions? - Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss., 9, 12765–12795
- Van der Linden P. & Mitchell J.F.B. (Hrsg.):Hrsg.) (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. - Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 Seiten.
- Wagner A., Gerlinger K., Chomoev E. & Aigner D. (2013): Statistische Analyse eines zeitlich und räumlich hochaufgelösten Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg. - Forschungsbericht KLIMOPASS, HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg P., Wagner S., Kunstmann H. & Schädler G. (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany: Part 1 – validation. - Climate Dyn., 40, 401-414.





## Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserkraftnutzung in der Schweiz

Dr. Bruno Schädler<sup>1)</sup>, David Volken<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Geographisches Institut der Universität Bern, Gruppe Hydrologie & Oeschger Zentrum für Klimaforschung

<sup>2)</sup>Bundesamt für Umwelt, Bern

### 1 Einleitung

In den letzten vier Jahren wurden in der Schweiz mehrere grosse Forschungsprojekte durchgeführt, mit dem Ziel, quantitativ verlässliche Daten zur zukünftigen Veränderung des Wasserkreislaufes und der Abflüsse für die Zeitperioden um 2035 und 2085 (Volken 2010) und der damit im Zusammenhang stehenden Wasserkraftproduktion (Hänggi, 2011) zu erlangen. Basis dazu sind Szenarien der Klimaänderung, welche spezifisch für die Schweiz erarbeitet wurden (CH2011, 2011). Das Bundesamt für Umwelt BAFU, das Bundesamt für Energie BFE sowie das Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz sowie auch Swiss Electric Research wie auch der Kanton Wallis unterstützten diese Projekte finanziell und personell. Ein weiteres, wichtiges Ziel des Projekts war die Bereitstellung von wissenschaftlichen hydrologischen Grundlagen zur Erarbeitung einer Strategie zur Anpassung an die Klimaänderung (BAFU 2012a).

Durchgeführt wurden die Studien von einem Konsortium von Forschungsinstituten:

- Institut für Atmosphäre und Klima IAC, ETH Zürich;
- Geographisches Institut GIUB und Oeschger Zentrum für Klimaforschung an der Universität Bern;
- Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL;
- Geographisches Institut der Universität Zürich GIUZ;
- Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich VAW;
- HYBEST GmbH.

Die wichtigsten Ergebnisse sind in drei Syntheseberichten festgehalten: zu den Klimaszenarien in CH2011 (2011), zur Frage der Auswirkungen auf die Wasserressourcen und die Gewässer in BAFU (2012b) und zu den Auswirkungen auf die Wasserkraftnutzung in SGHL und CHy (2011).

### 2 Methoden

Um in einem derart grossen Projekt, in dem verschiedene Forschungsgruppen mitarbeiteten, vergleichbare Ergebnisse zu gewinnen, war es unerlässlich, auf gemeinsamen wichtigen Grundlagen zu basieren. Abbildung 1 gibt die Zusammenhänge und die verwendeten Grundlagen schematisch wieder. Allen Teilprojekten wurden dieselben Klimaszenarien, wie sie in Kapitel 3 beschrieben werden, verbindlich zur Verfügung gestellt. Auch wurde in allen Projekten mindestens die Perioden 2021-2050 (nahe Zukunft) und 2070-2099 (ferne Zukunft) jeweils im Vergleich zur Referenzperiode 1980-2009 berücksichtigt. Da die Veränderungen der vergletscherten Flächen in den hydrologischen Modellen von zentraler Bedeutung sind, wurden die Gletscherszenarien, wie sie von Linsbauer et al. (2012) mit dem Modell GWL-Verschiebung abgeschätzt worden sind, verwendet. Alle verwendeten hydrologischen Modelle sind spezifisch angepasste Varianten des Modells PREVAH (Viviroli et al., 2009). Dabei

werden alle wichtigen hydrologischen Prozesse umfassend auf der Grundlage von detaillierten meteorologischen Daten und von Daten welche die Einzugsgebiete und deren Landnutzung räumlich hoch aufgelöst beschreiben, berücksichtigt.

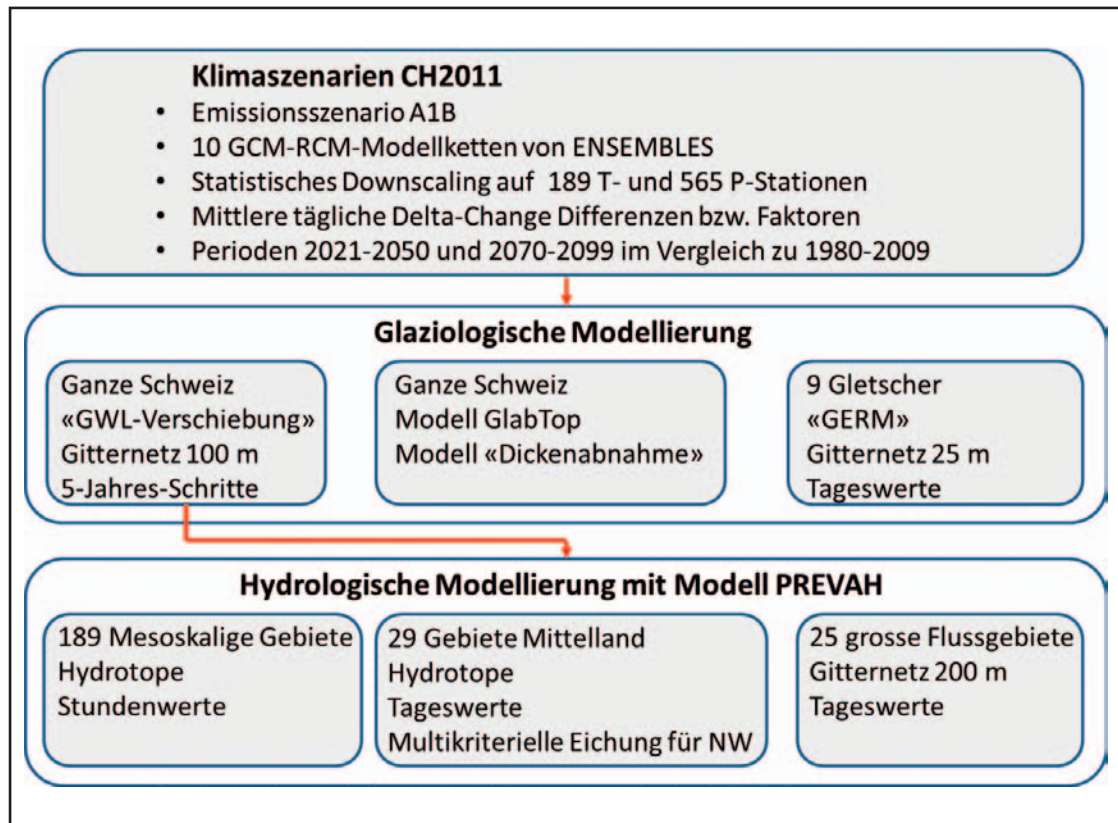


Abb. 1: Verwendete Modelle und deren Zusammenspiel.

### 3 Klimaszenarien

Innerhalb des Projekts CCHydro wurden Daten von 10 regionalen Klimamodellen des europäischen Projekts ENSEMBLE aufbereitet. Diese Klimaszenarien basieren auf dem A1B-Emissionsszenario vom IPCC und sind täglich und lokal verfügbar (Bosshard et al. 2011; CH2011, 2011). Dazu wurde die Delta Change Methode auf die beiden Parameter Lufttemperatur und Niederschlag und die beiden Szenarioperioden 2021-2050 und 2070-2099 angewandt. Die Resultate zeigen einerseits eine grosse Bandbreite der projizierten Veränderungen der Temperatur und des Niederschlages. Andererseits lassen sich auch trotz der grossen Unsicherheit einige robuste Aussagen über die projizierte Klimazukunft machen. Die Modellrechnungen sagen für die nächsten Jahrzehnte für alle Jahreszeiten und alle Regionen der Schweiz eine Temperaturzunahme voraus. Für die nahe Zukunft (2021 bis 2050) liegt die erwartete Temperaturzunahme zwischen 0.7 und 1.7 °C gegenüber der Referenzperiode 1980 bis 2009 und liegt durchwegs über dem Unsicherheitsbereich der natürlichen Variabilität. Für die ferne Zukunft (2070 bis 2099) beträgt der Anstieg 2 bis 4 °C. Die grössten Änderungen der Temperatur werden im Sommer und in den höher gelegenen alpinen Regionen prognostiziert. Beim Niederschlag kann keine klare Aussage gemacht werden, da die Niederschlagsänderung sowohl in der nahen wie auch in der fernen Zukunft häufig innerhalb der natürlichen Variabilität liegt. Eine starke Abnahme von 20 bis 30 % wird für die Sommermonate in der fernen Zukunft sowohl nördlich als auch südlich der Alpen erwartet (Abb. 2).

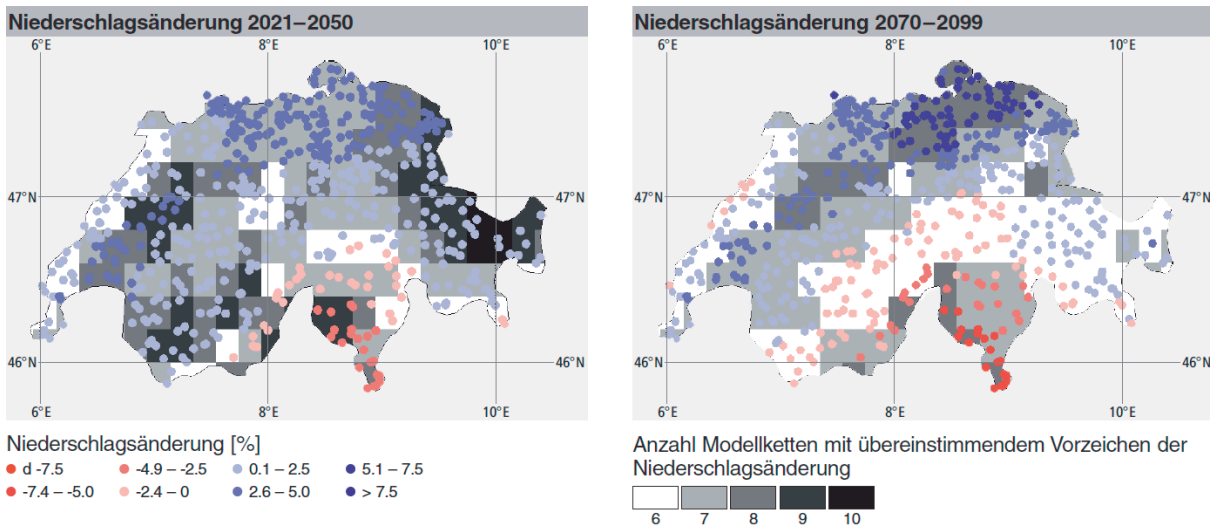


Abb. 2: Veränderung der Jahresniederschläge im Emissionsszenario A1B gegenüber der Kontrollperiode 1980-2009 für die Schweiz (Bosshard et al., 2011; CH2011, 2011)

Im Norden dürften die Niederschläge, mit Ausnahme des Sommers, leicht zunehmen. Die Ergebnisse für den Niederschlag und Temperatur für die verschiedenen Jahreszeiten der Perioden 2021 bis 2050 sowie 2070 bis 2099 sind in Abb. 3 aufgeteilt nach Alpennord- und -südseite übersichtlich dargestellt.

	2021-2050		2070-2099	
	Temperatur	Niederschlag	Temperatur	Niederschlag
<b>Jahr</b>	+1.2°C ± 0.5°C	N → S →	+3°C ± 1°C	N → S →
<b>Frühling</b>	+1°C ± 0.5°C		+2.5°C ± 1°C	N → S →
<b>Sommer</b>	+1.5°C ± 0.5°C	N →	+4°C ± 1°C	N/S ↘
<b>Herbst</b>	+1°C ± 0.5°C	N →	+2°C ± 1°C	N →
<b>Winter</b>	+1°C ± 0.5°C	N →	+3°C ± 1°C	N/S →
	leicht (< 10%) →	stark (10 - 20%) →	sehr stark (> 20%) ↗ ↘	

Abb. 3: Klimaänderung in der Schweiz für die nahe (2021-2050) und die ferne (2070-2099) Zukunft nach dem Emissionsszenario A1B. Angegeben ist die Temperaturänderung (Ensemble-Mittel), deren Unsicherheit (Standardabweichung) sowie die Tendenz des Niederschlags. N: Alpennordseite, S: Alpensüdseite (BAFU, 2012b).

## 4 Gletscher

Seit dem Hochstand der Gletscher in der kleinen Eiszeit (1600 bis 1850) um 1850 haben die Gletscher der Schweizer Alpen ca. 50 % ihres Volumens verloren. Aufgrund der starken sommerlichen Temperaturerhöhung seit dem Jahr 1987, hat sich die Eisschmelze in den letzten Jahrzehnten beschleunigt. Die Schweizer Gletscher verzeichnen seit 1998 einen Massenverlust von durchschnittlich 1 m pro Jahr. Dies ergibt einen jährlichen Eisvolumenverlust von ca. 1 km<sup>3</sup> bei einem geschätzten Restvolumen von 50 bis 60 km<sup>3</sup>.

Bis Ende dieses Jahrhunderts werden sich die Gletscher in den Schweizer Alpen weiter stark zurückziehen. Gletscher werden nur noch in den hochgelegenen Gebieten der Berner und Walliser Alpen zu finden sein. Je nach verwendetem Modell und Klimaszenario ist von einem Verlust von 60 bis 80 % der heute noch in der Schweiz vorhandenen Gletscherfläche auszugehen. Die grössten absoluten Massenverluste werden in den Einzugsgebieten der Aare und der Rhone prognostiziert, da dort am meisten Eis vorhanden ist (Linsbauer et al., 2012). Bei diesen dicken Talgletschern wie z. B. Aletsch- oder Gornergletscher findet in den nächsten Jahrzehnten ein grosser Massenverlust und in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts dann ein beschleunigter Flächenverlust statt. Am meisten Eis wird Ende des Jahrhunderts im Einzugsgebiet der Rhone (Wallis), wo heute 80 % der Schweizer Eismasse zu finden ist, übrigbleiben. Das Einzugsgebiet des Rheins verliert bis auf wenige Eisreste im Berner Oberland alle Gletscher. Das Engadin und das Tessin sind bis Ende des Jahrhunderts vollständig eisfrei (Abb. 4).

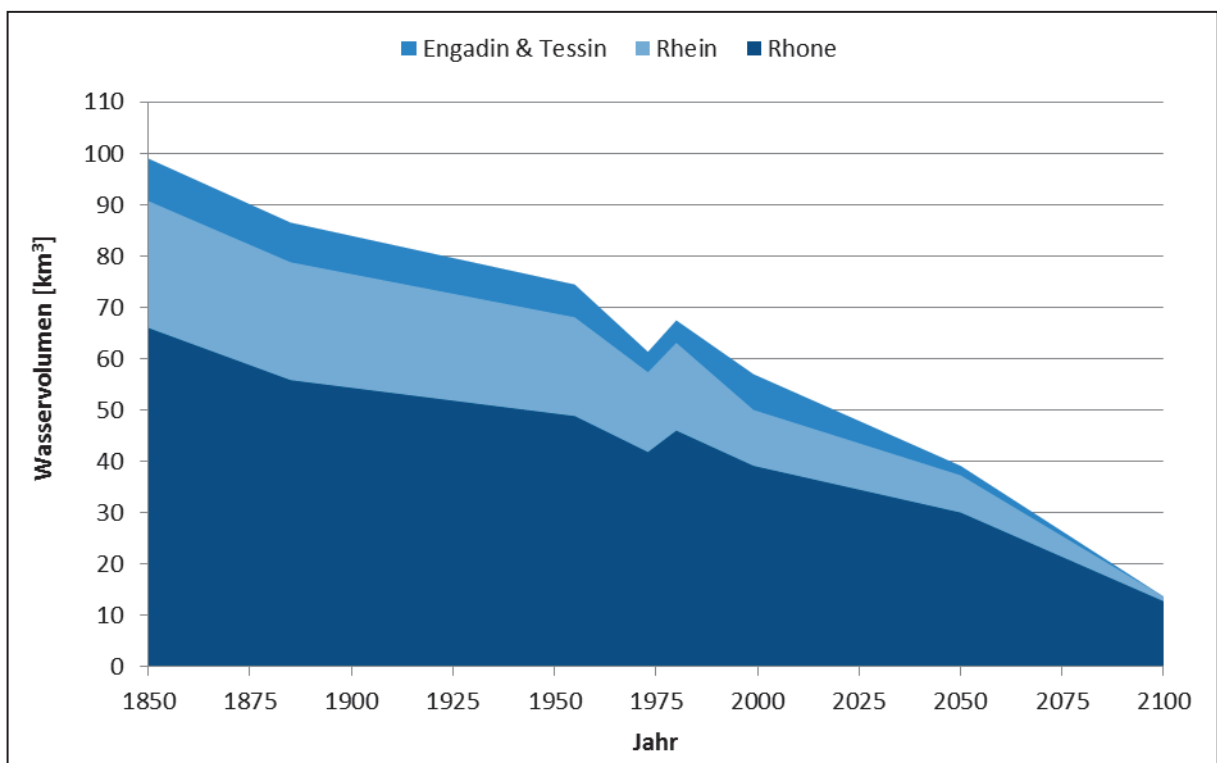


Abb. 4: Entwicklung der in den Schweizer Gletschern gespeicherten Wasservolumen für die Einzugsgebiete Rhone, Rhein, Inn und Ticino seit 1850 bis 2100 (aus BAFU, 2012b).

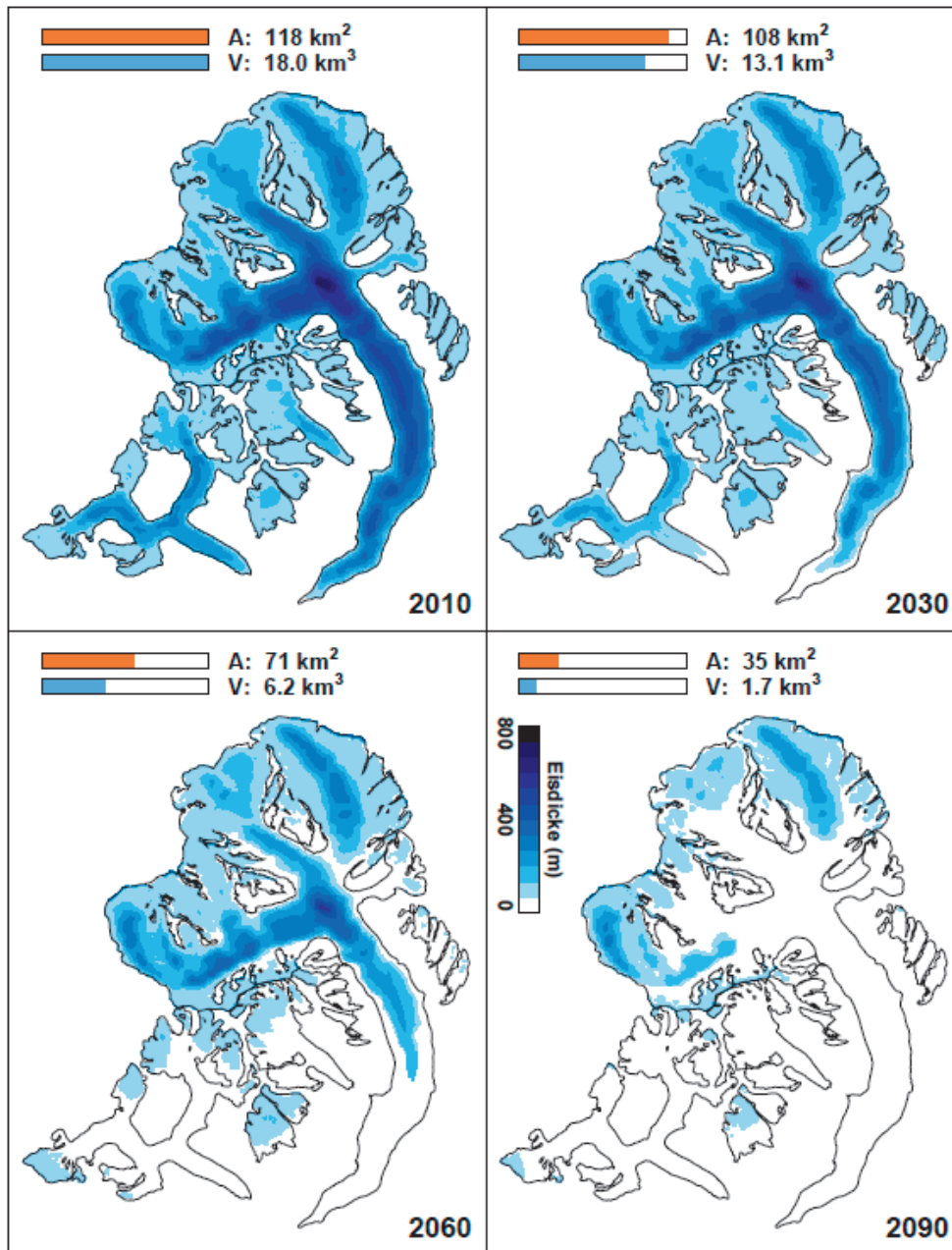


Abb. 5: Gletscherentwicklung des Aletschgletschers im Jahr 2010 und für 3 verschiedene Zeitperioden in der Zukunft: 2030, 2060 und 2090. A: Gletscherfläche, V: Gletschervolumen. Die gezeigten Gletscherumrisse entsprechen dem Stand von 1999 (VAW 2011)

Die Entwicklung der Gletscher im Aletschgebiet, der grössten zusammenhängenden Eisfläche der Alpen, ist für die Jahre 2030, 2060 und 2090 in Abb. 5 dargestellt. Obwohl der Grosse Aletschgletscher beim Konkordiaplatz immer noch fast 900 m Eisdicke aufweist, wird dieser bis Ende des Jahrhunderts seine Gletscherzunge vollständig verlieren und sich in die höchstgelegenen Einzugsgebiete oberhalb 3000 m ü.M. zurückgezogen haben. Die Fläche des Gletschers wird sich von heute noch 118 km<sup>2</sup> bis ins Jahr 2090 auf 35 km<sup>2</sup> zurückgebildet haben. Beim Volumen bleiben nur noch 1.7 km<sup>3</sup> Eis übrig, was weniger als 10 % der heutigen Eismasse entspricht (VAW, 2011).



Dieser starke Flächen- und Volumenverlust der Aletschgletscher bis Ende Jahrhundert hat grosse Konsequenzen auf das Abflussregime dieses Einzugsgebiets. Abb. 6 zeigt die Abflussentwicklung der Aletschgletscher für die Vergangenheit und die Zeitperioden 2020 bis 2049 und 2070 bis 2099. Für die nahe Zukunft (2020 bis 2049) wird aufgrund einer verstärkt einsetzenden Eisschmelze von Juni bis August mehr Abfluss erwartet im Vergleich mit der Periode 1980 bis 2009. Zudem verlagert sich der maximale sommerliche Abfluss von anfangs August in Richtung Juli. Aufgrund des zu erwartenden wärmeren Klimas setzt die Schneeschmelze in Zukunft immer früher ein. Dies führt zu mehr Abfluss im Frühling im Vergleich zu heute. In der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts werden sich die saisonalen Abflüsse markant verändern: Die immer kleiner werdende Gletscherfläche im Einzugsgebiet produziert immer weniger Schmelzwasser und der über den Winter gespeicherte Schnee wird im Sommer im früher geschmolzen sein. Der maximale Abfluss wird sich auf Ende Juni vorverschieben und sogar unter die Werte von 1940 bis 1969 sinken. Der gesamte Jahresabfluss aus dem Einzugsgebiet der Aletschgletscher wird bis Mitte des Jahrhunderts noch zunehmen. Danach sinken die abfliessenden Wasserressourcen bis Ende des Jahrhunderts langsam ab, bleiben aber auf einem höheren Niveau im Vergleich zu 1900.

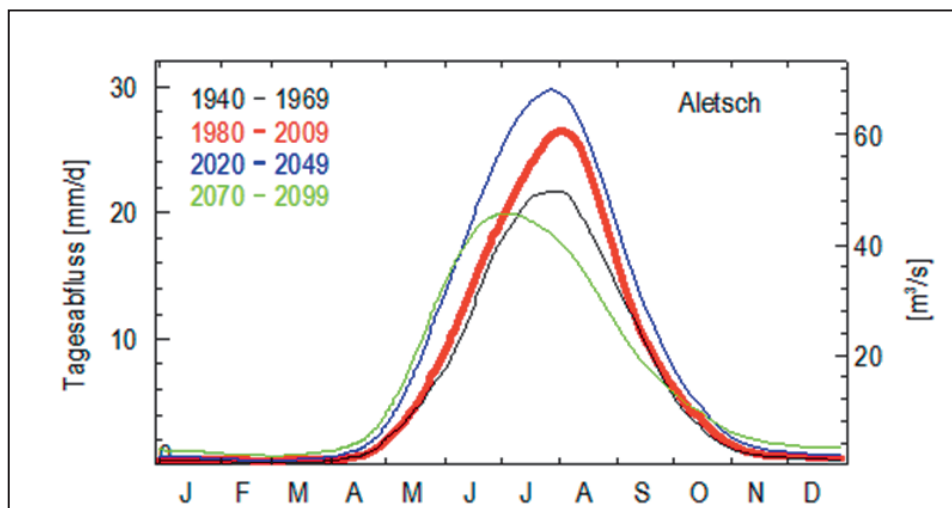


Abb. 6: Jahreszeitliche Entwicklung des Abflusses im Einzugsgebiet Aletsch. Gezeigt wird der Abfluss aus der Zeit von 1940-1969 (schwarze Kurve), der Referenzperiode (1980-2009, rote Kurve), für die nahe Zukunft (2020-2049, blaue Kurve) und die ferne Zukunft (2070-2099, grüne Kurve) (VAW 2011).

## 5 Schnee

Die Schneedecke, welche jeden Winter neu auf- und abgebaut wird, ist der bedeutendste periodische Wasserspeicher in der Schweiz. Das Maximum des Schneespeichers wird anfangs April erreicht und beträgt inklusive der ausländischen Anteile der Einzugsgebiete durchschnittlich etwa  $13 \text{ km}^3$  Wasser. Da zusätzlich öfters Schnee fällt, der innerhalb weniger Tage oder Wochen wieder schmilzt, verlassen insgesamt etwa  $22 \text{ km}^3$  Schmelzwasser aus der Schneedecke die Schweiz (Bernhard et al., 2012). Das sind etwa 42 % des Gesamtabflusses aus der Schweiz. Diese Schmelzwassermengen prägen ganz markant die verschiedenen hydrologischen Regimes in den unterschiedlichen Höhenstufen.



Die Erwärmung des Klimas führt einerseits zu einem Anstieg der Schneegrenze um rund 500 Meter bis 2070-2099 und andererseits zu einer deutlichen Reduktion des Schneeanteils im Gesamtniederschlag und damit einer massiven Veränderung der Schneedecke. Das maximale Schnee-Wasseräquivalent dürfte bis 2035 um 20-50 %, bis 2085 um 50-60 % sinken. Bis in die ferne Zukunft sinkt damit auch das Volumen des gesamten Schmelzwassers auf etwa 60 % im Vergleich zur Kontrollperiode (Abb. 7). In sehr grossen Höhen über 3000 m ü.M. könnte wegen der zunehmenden Winterniederschläge die Schneedecke sogar zunehmen.

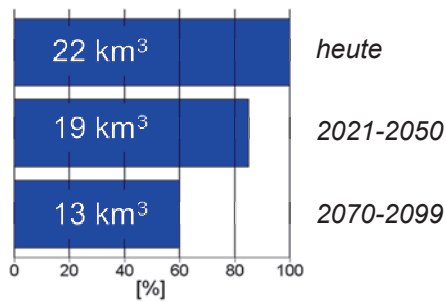


Abb.7: Mittlere Schnee-Schmelzwasservolumen, welche jährlich über die Flüsse die Schweiz verlassen (Bernhard et al., 2012)

## 6 Abfluss

Die Abflüsse in der Schweiz verändern sich bis in die nahe Zukunft (2035) nur wenig mit vorübergehenden Zunahmen in vergletscherten Gebieten. Sie nehmen bis in die ferne Zukunft (2085) zumeist leicht ab, mit Ausnahme der Flüsse Ticino und Toce, wo die Abnahme dann etwa 10 % beträgt. Im Alpengebiet ist die Temperaturzunahme die wichtigste Einflussgrösse für die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse: Die Schneefallgrenze steigt an, während die winterlichen Schneereserven, die Gletschervolumen und die Gletscherflächen schwinden. Die Verdunstung nimmt in allen Regionen zuerst nur wenig, später stärker zu.

Die jahreszeitliche Verteilung der Abflüsse (Regimes) ändert sich fast in der ganzen Schweiz. Im Winter gibt es in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer vermindern sich die Abflüsse. In vielen Gebieten tauchen heute unbekannte Regimetypen mit einem jahreszeitlichen Abflussmaximum im Winter und einem deutlichen Minimum im August auf (Köplin, 2012; BAFU, 2012b). In der Schweiz verschwinden die heute dominanten nordalpinen zu Gunsten der heute südalpinen Regimetypen weitgehend.

Auch die grossen Flüsse verändern sich entsprechend. Während heute die Niedrigwasserzeit im Winter beobachtet wird, ist in ferner Zukunft mit eher noch ausgeprägteren Niedrigwasserzeiten im Spätsommer zu rechnen (Abb. 8) Umgekehrt muss am Jahreswechsel mit deutlich höheren Abflüssen gerechnet werden, die ähnlich hoch ausfallen wie die saisonalen Hochwasser im Frühsommer. Diese extremen Abflüsse dürfen zu einer Verstärkung der saisonalen Niedrig- bzw. Hochwasserständen weiter Rhein abwärts beitragen.

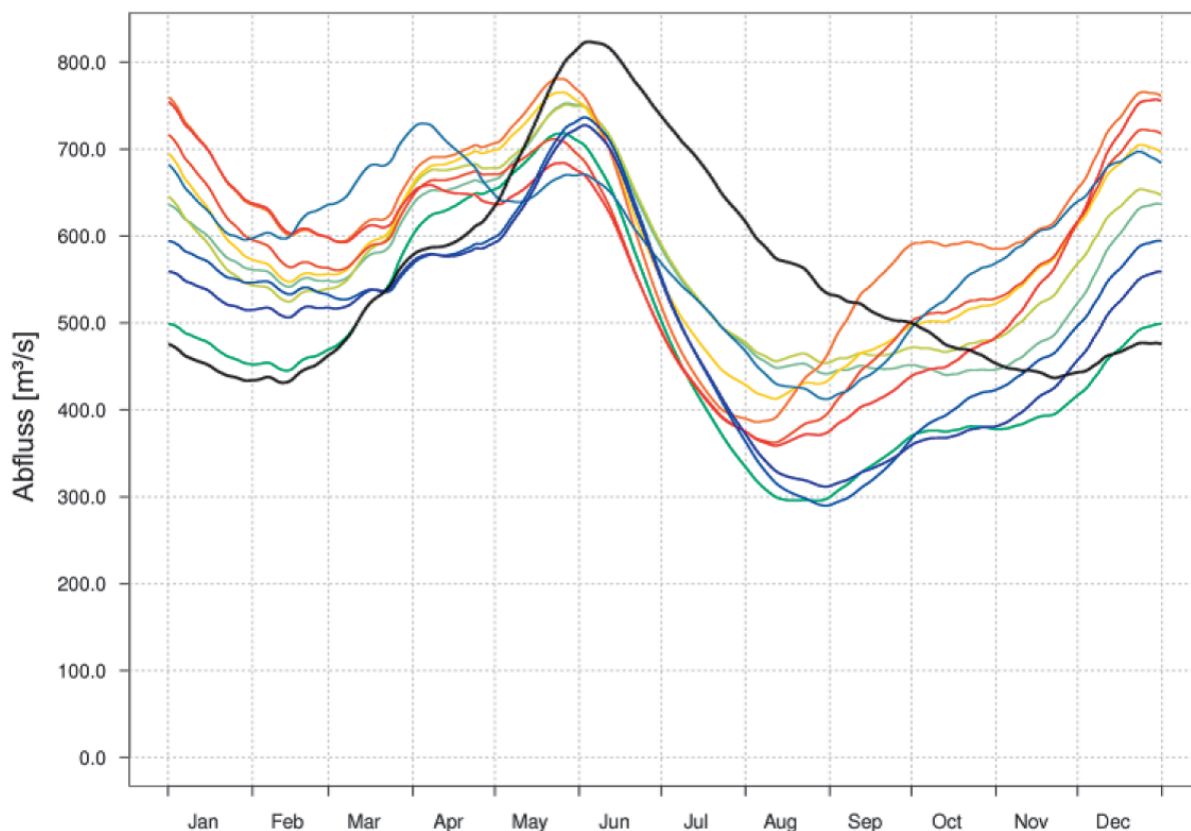


Abb. 8: Mittlerer Abfluss im Rhein in Basel für die Zeitperiode 2070-2099 (farbige Kurven) im Vergleich zur Kontrollperiode 1980-2009 (schwarze Kurve). Die farbigen kurven zeigen die Ergebnisse der 10 Klimaszenarien und damit auch den Bereich der Unsicherheit (Bernhard et al., 2012).

Mittlere Hochwasser scheinen sich in mesoskaligen Einzugsgebieten auch in der fernen Zukunft nicht wesentlich zu verändern, könnten aber tendenziell leicht höher liegen. Das saisonale Auftreten der Hochwasser wird in Zukunft weniger ausgeprägt sein. Dies zeigt sich vor allem im Alpengebiet und ist auch eine Folge der veränderten alpinen Abflussregimes (Köplin et al., 2013)

Sowohl die Dauer der sommerlichen Niedrigwasser wie auch deren Intensität nehmen im Mittelland deutlich zu. Somit sinken auch die  $Q_{347}$  Werte, welche heute massgeblich sind für die Festlegung der Restwassermengen. Die Unterschreitungsdauern der heutigen  $Q_{347}$  könnten bis zum Ende des Jahrhunderts um 9 bis 17 Tage zunehmen (Meyer et al., 2012). Dies gilt auch für die grossen Flüsse. In den Alpen verschiebt sich die Niedrigwasserzeit vom Winter teilweise in den Spätsommer, die Abflüsse im Winter werden mit der Temperaturzunahme ansteigen.

## 7 Wasserkraftnutzung

Im Rahmen der Synthesearbeiten zum Projekt «Klimaänderung und Wasserkraftnutzung» (SGHL und CHy, 2011) wurde von Hänggi et al (2011b) eine Abschätzung durchgeführt, wie sich die Klimaänderung auf die mittlere Stromproduktion der Schweiz in der nahen Zukunft (2021–2050) auswirken könnte. Als Grundlage dazu dienten (a) Simulationen möglicher Abflussveränderungen in repräsentativen Einzugsgebieten der Schweiz (Hänggi, 2011), (b) die in mehreren Fallstudien aus der Modellkette «Klimaszenario – hydrologisches Modell –



Betriebsmodell» abgeleiteten Veränderungen (vgl. Abb. 9) der mittleren Stromproduktion (Hänggi et al., 2011a; SGHL und Chy, 2011), (c) eine Kraftwerkstypologie sowie (d) eine Gliederung der Schweiz in Regionen mit ähnlichem Klimaänderungssignal. Die Hochrechnung geht – unter Annahme der heutigen Produktionsmuster – für den Zeitraum 2021–2050 im Vergleich zu 1980–2009 im Winter von einem Anstieg der mittleren Produktion von rund 10 % und im Sommer von einer Abnahme zwischen 4 und 6 % aus (Hänggi et al., 2011b). Diese saisonalen Veränderungen bewirken auf das Jahr gesehen eine leichte Zunahme zwischen 0.9 und 1.9 %. Insgesamt zeigen die Ergebnisse – unter Berücksichtigung der Modellunsicherheiten –, dass sich die mittlere Stromproduktion aus der Wasserkraftnutzung gegenüber heute nicht wesentlich verändern wird. Diese Ergebnisse lassen sich allerdings nicht generell auf einzelne Kraftwerke übertragen. So muss aus regionaler Sicht bei den Wasserkraftwerken im Tessin und im südlichen Wallis mit einer leichten Produktionsabnahme gerechnet werden. Ausserdem ist zu beachten, dass Effekte wie etwa eine Veränderung von Extremereignissen, die den täglichen Betrieb massgeblich beeinflussen, bei den Hochrechnungen nicht berücksichtigt wurden.

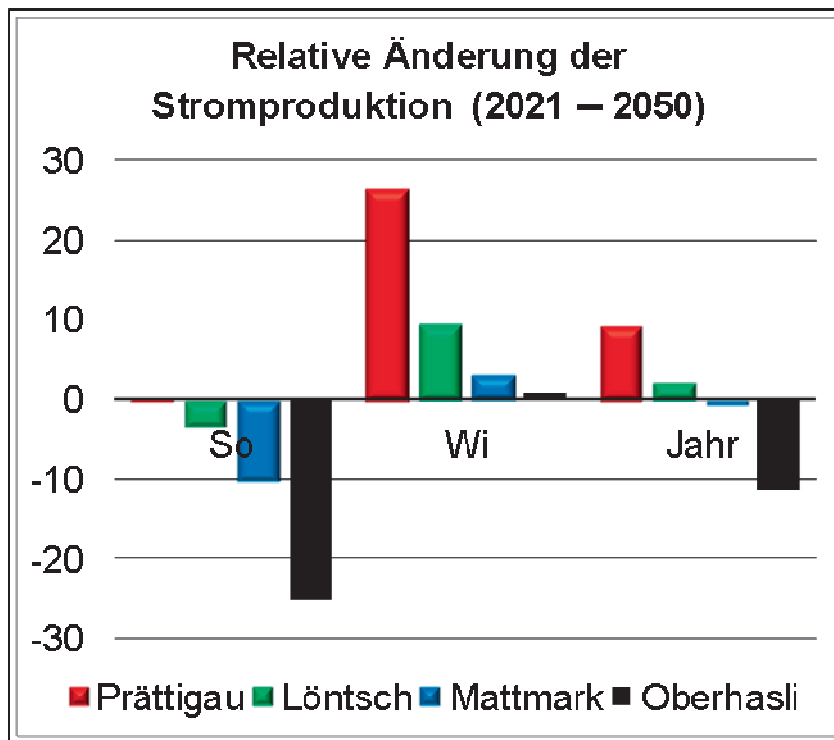


Abb. 9: Veränderung der saisonalen Stromproduktion im Vergleich zur Kontrollperiode 1980-2009 für vier verschiedene Hochdruck-Kraftwerkstypen in den Schweizer Alpen: ohne grossen Speicher und ohne Gletscher (Prättigau); mit Speicher und ohne Gletscher (Löntsch); komplexe Anlage mit grossen Speicher in vergletschertem Gebiet (Oberhasli); mit grossem Speicher, im Südwallis hochgelegen und stark vergletschert (Mattmark). (Hänggi et al., 2011a; SGHL und Chy, 2011).

## 8 Fazit

Selbst wenn die Klimaszenarien, gerade beim Niederschlag, noch gewisse Unsicherheiten aufweisen, können klare Aussagen zur zukünftigen Entwicklung der Wasserressourcen in der Schweiz gemacht werden. Dank hochqualifizierten Partnern, guter Zusammenarbeit und Koordination mit anderen zurzeit laufenden Forschungsprojekten im Bereich von Klimaänderung und Hydrologie können erstmals wissenschaftlich verlässliche flächige und quantitative

Aussagen gemacht werden, wie sich der Wasserhaushalt in der Schweiz bis Ende des Jahrhunderts verändern wird. Die Wasserressourcen werden nur geringfügig abnehmen, dafür aber anders übers Jahr verteilt sein. Dadurch dürfte es in Zukunft zeitweise zu regionalen und lokalen Engpässen kommen, welche wasserwirtschaftliche Anpassungsmassnahmen erfordern würden. Auf der Angebotsseite kann durch eine bessere regionale Vernetzung der Wasserversorgung sowie durch die Erschliessung bisher nicht genutzter Wasservorkommen das Angebot erhöht werden. Andererseits kann die Nachfrage durch Effizienzsteigerung bei technischen Massnahmen und durch ökonomische Anreizmechanismen (Wasserpreis) reduziert werden. Trotz allem bleibt die Schweiz das Wasserschloss Europas. Diese Wasserschlossfunktion wird in einem zukünftig wärmer und trockener werdenden Europa vermutlich an Bedeutung gewinnen.

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro) des Bundesamts für Umwelt (BAFU) wurden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der Schweiz bis zum Jahr 2100 untersucht. Bis Ende des Jahrhunderts werden die jährlich verfügbaren Wasserressourcen nur leicht abnehmen. Die jahreszeitlichen Verteilungen der Abflüsse (Abflussregimes) hingegen werden sich beinahe in der ganzen Schweiz verschieben. Dies ist auf die temperaturbedingten Speicheränderungen (Schnee, Eis) sowie auf eine erwartete saisonale Umverteilung der Niederschläge zurückzuführen: Im Winter mehr Niederschlag in Form von Regen, im Sommer deutlich weniger Niederschlag und reduzierte Schmelzwassermengen. Im Winter wird in vielen Gebieten deutlich mehr Abfluss, im Sommer jedoch weniger – außer in den noch vergletscherten Gebieten – erwartet. Deshalb wird sich im größten Teil des Mittellandes die potenzielle Hochwasserzeit vom Frühsommer in das Winterhalbjahr verschieben und teilweise auch verlängern. Hochwasser- und insbesondere Niedrigwasserereignisse werden wahrscheinlich vermehrt auftreten – vor allem in sensitiven Regionen wie dem Mittelland, dem Wallis oder dem Tessin. Die Auswirkungen auf die Stromerzeugung aus Wasserkraft sind insgesamt leicht positiv, mit einer Zunahme im Winterhalbjahr und einer Abnahme im Sommer.

## 10 Literatur

- BAFU (2012a): Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz – Ziele, Herausforderungen und Handlungsfelder. 1. Teil der Strategie des Bundesrates vom 2. März 2012. Bern: 81 S.
- BAFU (2012b): Auswirkungen der Klimaänderung auf Wasserressourcen und Gewässer. Synthesebericht zum Projekt „Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz“ (CCHydro). Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 1217; 76 S.
- Bernhard L., Zappa M. (2012): Klimaänderung und natürlicher Wasserhaushalt der Grosseinzugsgebiete der Schweiz. Technischer Bericht WSL.
- Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T., Schär C. (2011): Spectral representation of the annual cycle in the climate change signal. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15: 2777–2788.
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich: 88p. ISBN 978-3-033-03065-7.
- Hänggi, Pascal (2011): Auswirkungen der hydroklimatischen Variabilität auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- Hänggi, Pascal; Angehrn, Sonja; Bosshard, Thomas; Helland, Eivind; Job, Donat; Rietmann, Daniel; Schädler, Bruno; Schneider, Robert; Weingartner, Rolf (2011a): Einfluss der Klimaänderung auf die Stromproduktion der Wasserkraftwerke Löntsch und Prättigau. *Wasser Energie Luft*, 103. Jg., Heft 4: 292–299, Baden.





- Hänggi P., Weingartner R., Balmer M. (2011b): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung in der Schweiz 2021–2050 – Hochrechnung. *Wasser-Energie-Luft*, 103. Jg., Heft 4, P. 300-307, Baden.
- Köplin N. (2012): Hydrological impacts of climate change in Switzerland during the 21st century, PhD Thesis, Faculty of Science, University of Bern, Bern, Switzerland, 112 pp., 2012.
- Köplin N., Schädler B., Viviroli D., and Weingartner R. (2013): Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change, *Hydrol. Process.* (accepted for publication).
- Linsbauer A., Paul F., Haeberli W. (2012): Grossräumige Modellierung von Schwundszenerarien für alle Schweizer Gletscher. Modellvergleich, Unsicherheiten und eine Analyse bezogen auf Grosseinzugsgebiete. Schlussbericht CCHydro, Ergebnisse vom Teilprojekt CCGlinCH. Universität Zürich. 18 S.
- Meyer (2012): Die Auswirkungen der projizierten Klimaänderung auf Sommerniedrigwasser im Schweizer Mittelland basierend auf einer multi-variablen Kalibrierung des hydrologischen Modellsystems PREVAH. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- SGHL, CHY (Hrsg.) 2011: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesenbericht. Beiträge zur Hydrologie der Schweiz Nr. 38. Bern: 28 S.
- VAW (2011): Gletscher- und Abflussveränderungen im Zeitraum 1900-2100 in sieben Einzugsgebieten der Schweiz. 77 S.
- Viviroli D., Gurtz J., Zappa M., Weingartner R. (2009): An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing tools. *Environmental Modelling & Software* 24: 1209–1222.
- Volken D. (2010): Projektbericht. CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* Bd. 54: 143–146.

## **Das Klima ändert sich – harte Fakten für die österreichische Wasserwirtschaft**

Reinhold Godina

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien

### **1 Einleitung**

Die Folgen des Klimawandels sind Global, vor allem in der Arktis und damit auch in Europa erkennbar und messbar. In dem vergangenen Jahrzehnt ereigneten sich in Österreich mehrmals Hochwasserereignisse (2002, 2005) mit großen Schäden. Im Gegensatz dazu war der Sommer 2003 durch eine intensive und langanhaltende Trocken- und Hitzeperiode gekennzeichnet, die europaweit höhere Schäden verursachte als das Hochwasserereignis 2002 (BMLFUW, 2008). Darüber hinaus war Österreich in den letzten Jahren von zahlreichen Naturereignissen betroffen, die regional große Schäden verursacht haben. In der medialen Diskussion nach den Ursachen dieser Naturkatastrophen wird dem globalen Klimawandel immer häufiger und unreflektiert die Schuld an diesen Ereignissen zugesprochen. Der Wasserwirtschaft in Österreich war es daher ein Anliegen, die Diskussion zu versachlichen und objektive Entscheidungsgrundlagen für die Anpassung an die durch den Klimawandel verursachten Veränderungen zu entwickeln und diese Grundlagen in die „Österreichische Anpassungsstrategie an den Klimawandel“ zu integrieren.

Ausgehend von der politisch akzeptierten Strategie Anpassungen an den Klimawandel zu fördern und umzusetzen, wird in diesem Artikel auf die für die Wasserwirtschaft in Österreich konkret formulierten Handlungsempfehlungen eingegangen. An Beispielen zu den Themen Niederschlag, Wasserbilanz, Rückgang der Gletscher und Veränderungen der Wassertemperatur soll aufgezeigt werden, in welchem Ausmaß sich bereits in der Vergangenheit Veränderungen in hydrographischen Zeitreihen erkennen lassen.

### **2 Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel**

Der Klimawandel wird Folgen für verschiedene Sektoren, Ökosysteme und für die Gesellschaft haben. Um den Auswirkungen effizient begegnen zu können, sind Maßnahmen zur Anpassung unerlässlich. Auch hat die Europäische Union den Mitgliedstaaten aufgetragen, national abgestimmte Anpassungsstrategien zum Klimawandel zu erarbeiten.

Das Lebensministerium hat im Jahr 2007 mit der Ausarbeitung einer österreichischen Klimawandelanpassungsstrategie, unter Einbindung aller Stakeholder und Berücksichtigung internationaler Beispiele, begonnen. Ziel der österreichischen Anpassungsstrategie ist es, nachteilige Auswirkungen des Klimawandels auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zu vermeiden und die sich ergebenden Chancen zu nutzen.

Trotz umfangreicher wissenschaftlicher Erkenntnisse sind die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Bereichen noch mit Unsicherheiten behaftet. Im Vordergrund stand daher, flexible bzw. robuste Handlungsempfehlungen zu entwickeln, die sich mit geringem Aufwand an unterschiedliche Anforderungen anpassen lassen und auch einen sekundären Nutzen bringen.

Die Strategie wurde in einem breiten Prozess erarbeitet, in dem Vertreter der Ressorts, der Länder, von Interessensverbänden, Stakeholdern, NGOs und sonstigen Institutionen aktiv eingebunden waren.



Die Österreichische Anpassungsstrategie gliedert sich in zwei Teile, in ein strategisches Rahmenwerk („Kontext“) und in einen Aktionsplan. Der Kontext behandelt strategische Grundfragen und erklärt die Einbettung der Strategie in den Gesamtzusammenhang.

Im Aktionsplan sind konkrete Handlungsempfehlungen als Angebot für empfehlenswerte Initiativen zur Umsetzung in den folgenden 14 Aktivitätsfeldern dargestellt (BMLFUW, 2012):

- Landwirtschaft
- Forstwirtschaft
- Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft
- Tourismus
- Energie (Fokus Elektrizitätswirtschaft)
- Bauen und Wohnen
- Schutz vor Naturgefahren
- Katastrophenmanagement
- Gesundheit
- Ökosysteme/Biodiversität
- Verkehrsinfrastruktur
- Raumordnung im Klimawandel
- Wirtschaft/Industrie/Handel
- Stadt – Urbane Frei- und Grünräume

Im Zuge der Erstellung der Strategie wurde übereinstimmend festgehalten, dass es notwendig und vorteilhaft ist, entscheidende Schritte im Umgang mit dem Klimawandel umgehend zu setzen, da die Möglichkeiten für eine erfolgreiche Anpassung im Laufe der Zeit stetig abnehmen. Auch die mit der Anpassung verbundenen Kosten steigen beträchtlich, wenn erst zu einem späteren Zeitpunkt gehandelt wird. Zentrale Aussage der gemeinsamen Beratungen war, dass die möglichen Folgen des Klimawandels in Planungs- und Entscheidungsprozessen zu berücksichtigen sind.

Die Umsetzung der Strategie soll in Zusammenarbeit zwischen Bund und Ländern unter Beachtung der entsprechenden Zuständigkeiten erfolgen. Es wird eine breite Palette an Handlungsempfehlungen vorgelegt. Anpassung an den Klimawandel ist eine langfristige Aufgabe, die jedoch umgehend in Angriff zu nehmen ist. Sie muss sich auch am jeweils aktuellsten wissenschaftlichen Erkenntnisstand orientieren. Im Rahmen der Gesamtkoordination des Prozesses werden daher nachfolgende Fragen einer vertiefenden Bearbeitung zugeführt werden:

- Wissenschaftlich-ökonomische Evaluierung der Konsequenzen des Klimawandels in Österreich („Kosten des Nichthandelns“ und „Schätzung der Anpassungskosten“) bis Mitte 2015
- Entwicklung eines Kriterienkatalogs bis Ende 2013, der es erlaubt, den Erfolg bei der Umsetzung der österreichischen Anpassungsstrategie zu überprüfen und klar darzustellen.
- Da eine regelmäßige Erfolgskontrolle unabdingbar ist, wird auch der Umsetzungserfolg der Strategie zu dokumentieren sein.

Die österreichische Strategie wurde vom Ministerrat am 23. Oktober 2012 beschlossen.

### 3 Anpassungsstrategien der österreichischen Wasserwirtschaft

Um die Auswirkung des globalen Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft zu prüfen, beauftragte das Lebensministerium die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und die Technische Universität Wien (TU – Wien) im Jahr 2010, die Anpassungserfordernisse für die Wasserwirtschaft zu konkretisieren. Die Ergebnisse dieser im Jahr 2011 fertiggestellten Studie, bildeten die fachliche Grundlage der für das Aktivitätsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft formulierten Handlungsempfehlungen in der österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel (BMLFUW, 2011).

Im Rahmen dieser Studie wurde die gesamte relevante Literatur mit Bezug auf Österreich aufgearbeitet, die Trends der vergangenen Jahrzehnte auf Basis umfangreicher Datenauswertungen ausgewertet, Projektionen für den Zeitraum 2021-2050 angestellt und Anpassungsmaßnahmen für alle Sektoren der Wasserwirtschaft vorgeschlagen. Um realistische Maßnahmen ableiten zu können, wurde zwischen „harte Fakten“ und „weichen Fakten“, also Aussagen die mit größerer Zuverlässigkeit als andere getroffen werden können, unterschieden. Dabei lag der Fokus auf Mechanismen die differenziertere und transparentere Aussagen über Ursache - Wirkung erlauben, als es Szenarienmethode alleine könnten. Um die Zuverlässigkeit der Aussage zu erhöhen wurden Änderungen im Wasserdargebot der Oberflächenwasser mit mehreren Methoden untersucht (Trendanalysen, Szenarienanalysen, Elastizität, Trading space for time).

Die auf dieser Basis erarbeiteten Anpassungsstrategien münden in zweierlei Maßnahmen. Solche die aus Vorsorgeüberlegungen und Vulnerabilitätsbetrachtungen jedenfalls durchgeführt werden sollen und adaptive Maßnahmen deren Umsetzung von den Ergebnissen des laufenden Monitorings und der sonstigen Entwicklung abhängen. Um Aussagen zu erhalten, die sowohl wissenschaftlich fundiert, als auch direkt praxisrelevant sind wurde die Studie von Vertretern der wasserwirtschaftlichen Abteilungen aller Bundesländer und des Lebensministeriums während der gesamten Laufzeit begleitet.

Aus den Ergebnissen der ca. 500 Seiten umfassenden Studie, wurden zehn plakative Thesen der Wasserwirtschaft zum Klimawandel bis 2050 formuliert (BMLFUW, 2011).

#### 1. Hochwasser

Es werden regional unterschiedliche Änderungen der Abflüsse bei Hochwässern erwartet, die im Bereich von -4% bis +10% liegen dürften. Die Unsicherheiten der Auswirkungen auf Extremereignisse sind jedoch relativ groß, besonders in kleinen Gebieten. Natürliche Schwankungen der Hochwässer sind wesentlich größer, als Änderungen aufgrund des Klimawandels. Die Einführung eines generellen Klimazuschlages für Bemessungswerte ist nach dem derzeitigen Stand nicht erforderlich.

#### 2. Niederwasser

In den Alpen Österreichs werden die Abflüsse bei Winterniederwasser wegen höherer Lufttemperaturen deutlich erhöht, was als positiv zu betrachten ist. In den Flachlandregionen Ost- und Südösterreichs kann eine Abnahme der Abflüsse bei Niederwasser eintreten.

#### 3. Gletscher

Der Rückgang der Gletscher wird sich fortsetzen. Der Abfluss aus Gletscherschmelze dürfte um die Jahre 2040-2050 sein Maximum erreichen. In unmittelbarer Nähe von Gletschern ist in diesem Zeitraum eine deutliche Zunahme der Sommerabflüsse zu erwarten, in größeren Einzugsgebieten ist der Einfluss nur in Trockenjahren relevant.

#### 4. Grundwasser – Menge

Für den Süden Österreichs, wo eine Abnahme der Winterniederschläge erwartet wird, wie auch in den niederschlagsarmen Regionen im Osten Österreichs, ist künftig wieder eine



Abnahme der Grundwasserneubildung wahrscheinlich. Im Norden und Westen Österreichs könnte die Grundwasserneubildung zunehmen.

#### 5. Geschiebepotential

Lokal kann im Bereich der Dauerfrostgrenze das Geschiebepotential deutlich zunehmen. In größeren Einzugsgebieten liegt die erwartete Zunahme weit unter den natürlichen Schwankungen.

#### 6. Wassertemperaturen

Eine Zunahme der Temperaturen von Oberflächengewässern um ca. 0,8°C bis 2050 ist zu erwarten. Diese erhöhte Temperatur entspricht einer Verschiebung in der Seehöhe um ca. 100 m. Damit ist auch mit Verschiebungen der Bioregionen zu rechnen. Die Zunahme der Wassertemperatur konnte auch im Grundwasser gemessen werden. Bei der Beurteilung von Wärmeeinleitungen (z. B. von Kraftwerken, die Flusswasser als Kühlwasser verwenden) ist diese Temperaturerhöhung zu berücksichtigen.

#### 7. Oberflächenwassergüte

Durch eine geringere Wassermenge – wie es in den Flachlandregionen Ost- und Südösterreichs der Fall sein kann – werden bestimmte Stoffe, wie Schadstoffe, nicht mehr so stark verdünnt und würden in höherer Konzentration auftreten. Angesichts des hohen Standards bei der Abwasserreinigung ist nur in Einzelfällen eine punktuelle Verbesserung erforderlich.

#### 8. Grundwasser – Güte

Das Grundwasser unterliegt Prozessen analog zu denen der Oberflächengewässer. Durch die Temperaturerhöhung laufen die Prozesse im Übergangsbereich zwischen Oberflächen- und Grundwasser etwas rascher und vollständiger ab, wodurch Änderungen in der chemischen Zusammensetzung möglich sind. Eine Weiterführung der bisherigen Grundwasserschutzpolitik ist angebracht.

#### 9. Wasserkraft

Die Leistung der Laufkraftwerke dürfte im Winter zunehmen und sich im Sommer wenig ändern. Dadurch ergibt sich eine bessere Anpassung an den Verbrauch. Durch den Klimawandel ergibt sich für die Wasserkraft kein Handlungsbedarf.

#### 10. Nutzungs- und Bedarfsaspekte

Aufgrund der hohen Wasserverfügbarkeit in Österreich und der zu erwartenden geringen Änderungen ist mit keinem großräumigen Mangel an Rohwasser für die Wasserversorgung zu rechnen. Kleinräumig könnten sich jedoch vorhandene Engpässe in Gebieten mit ungünstigem Wasserdargebot verstärken. Dies ist bei der Bewirtschaftung der Wasserressourcen zu berücksichtigen.

Aufmerksamen LeserInnen dieser Thesen fällt auf, dass viele Aussagen im Konjunktiv formuliert und zur Planung konkreter Handlungsalternativen nur mit Vorbehalt maßgebend sind. Dies liegt vor allem daran, dass einzelne Szenarien für den Alpenraum sehr unterschiedliche Ergebnisse und in vielen Fällen für Österreich – anders als für anderen Regionen Europas – nur geringfügige Änderungen für den Zeitraum bis 2050 prognostizieren.

Die österreichische Anpassungsstrategie empfiehlt dem Aktivitätsfeld Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft die Analyse bestehender Daten und die Forcierung weiterer Datenerhebungen zur Ressource Wasser. Hervorgehoben wird, dass derzeit die Aspekte der Wassermenge – und Qualität in breitem Umfang erhoben werden und eine konsequente Weiterführung dieser Messnetze im vollen Umfang notwendig ist.



## 4 Hydrographie – die Basis zuverlässiger Aussagen

Eine entscheidende Grundlage für eine zuverlässige Quantifizierung von vergangenen und zukünftigen Änderungen des Wasserhaushaltes ist die Gewinnung, Dokumentation und Bereitstellung von langen Beobachtungszeitreihen und räumlichen Datensätzen. Ohne vieljährige und zuverlässige hydrologische Zeitreihen sind Veränderungsanalysen betreffend den Wasserhaushalt nicht möglich. Am Beispiel vieljähriger Aufzeichnungen des Abflusses und der Wassertemperatur an der österreichischen Donau, soll der Wert der hydrographischen Beobachtung unterstrichen werden.

### 4.1 Wassertemperatur

Die Hydrographie Österreichs untersuchte für den Zeitraum 1901 – 2010 die Temperaturdaten von vier österreichischen Flüssen unterschiedlicher Charakteristik und Einzugsgebietsgröße auf mögliche Trends (Standhartinger, 2013). Im Zeitraum von 1901 bis 2010 wurde an allen Gewässern ein Anstieg der mittleren jährlichen Wassertemperatur verzeichnet. Das Ausmaß des Anstieges der Temperatur weist je nach Saison Unterschiede auf. Die Wassertemperatur hat sich an den vier untersuchten Gewässern zwischen 0,3°C und 1,4°C erhöht.

Die Abbildung 1 zeigt die Entwicklung der mittleren jährlichen Wassertemperatur am Donaupegel in Kienstock sowie die der Lufttemperatur an der Messstelle St. Pölten für den Zeitraum 1901 bis 2010. Die Luft- und Wassertemperatur weist im Beobachtungszeitraum eine hohe Variabilität auf. Die Schwankungen der Wassertemperatur stimmen in hohem Maße mit denen der Lufttemperatur überein. Beide Parameter folgen einem ansteigenden Trend. Aus der Gleichung der Trendgeraden ergibt sich ein Anstieg der Temperaturen um ca. 0,13°C (Wasser) bzw. 0,14°C (Luft) pro Dekade. Der geringe Wert des Bestimmtheitsmaßes ( $R^2$ ) zeigt die hohe Variabilität der mittleren jährlichen Temperaturen an. Die Wassertemperatur ( $R^2 = 0,44$ ) schwankt weniger stark als die Lufttemperatur ( $R^2 = 0,32$ ). Dies ist wahrscheinlich eine Folge der Pufferwirkung des Wassers, durch die kurzfristige Extreme abgeschwächt werden.

Betrachtet man den Verlauf der Ganglinien von Wasser- und Lufttemperatur (Abbildung 2), so ist erkennbar, dass die Entwicklung der Temperatur im Untersuchungszeitraum unterschiedlichen Trends folgt. Im Zeitraum 1901 bis 1970 liegt der Anstieg der Wasser- und Lufttemperatur unter 0,1°C pro Dekade. Seit den 1970er Jahren ist ein deutlich stärkerer Trend erkennbar. In diesem Zeitraum stieg die Temperatur um etwa 0,3°C pro Dekade an, also etwa dreimal so stark. Hinsichtlich der absoluten Temperatur bedeutet das, dass etwa zwei Drittel des Gesamtanstiegs in den vergangenen 40 Jahren geschehen ist.

Betrachtet man die saisonale Temperaturentwicklung, ergibt sich in den untersuchten 110 Jahren in beinahe allen Gewässern in allen Jahreszeiten eine deutliche Erhöhung der mittleren Wassertemperatur. Im Herbst macht der Anstieg an der Donau am Pegel Kienstock mehr als 2°C aus. Der jeweils höchste Anstieg ist in den untersuchten Gewässern in unterschiedlichen Jahreszeiten vorzufinden.

Vor allem in den kleineren, „alpinen“ Einzugsgebieten steigt die Wassertemperatur wesentlich weniger an als die Lufttemperatur. Die mittlere monatliche Wassertemperatur der Salzach ist in den Frühjahrsmonaten zum Teil – wenn auch nicht signifikant – gesunken. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Schneeschmelze im Frühjahr stärker ist, mehr Schmelzwasser frei wird und dadurch die Temperatur des Wassers trotz steigender Lufttemperatur sinkt.

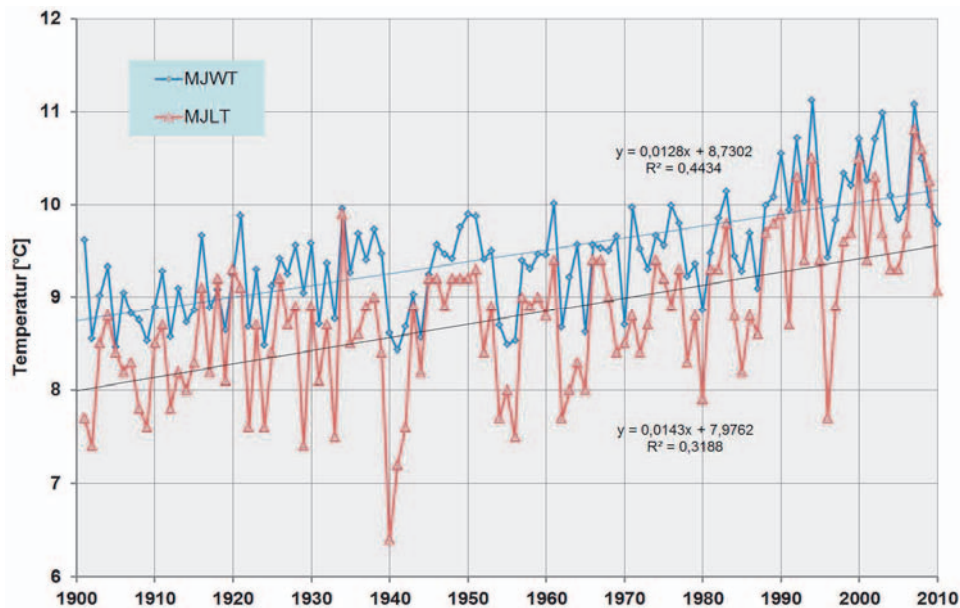


Abbildung 1: Mittlere jährliche Temperatur von Wasser (Kienstock/Donau) [blau] und Luft (St. Pölten) [rot] in °C für den Zeitraum von 1901-2010. Geraden zeigen den linearen Trend.

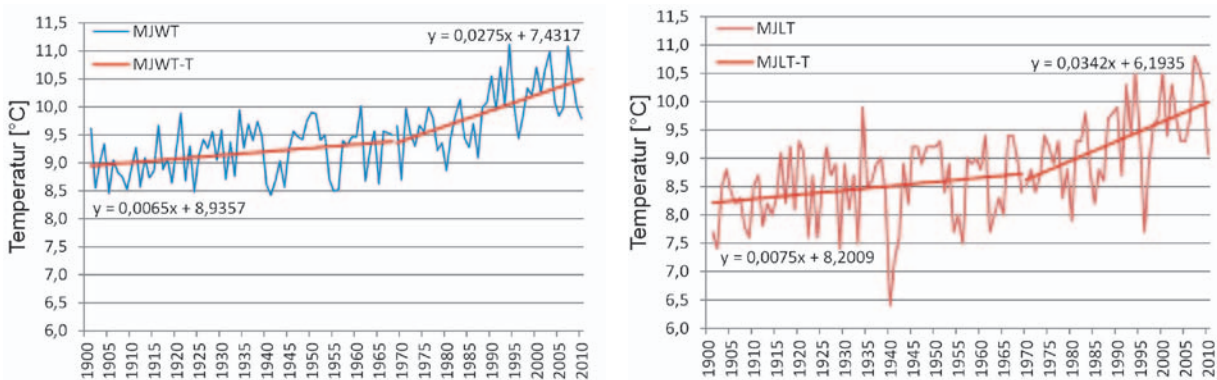


Abbildung 2: Änderung im Trend und Gleichungen der Trendgeraden der mittleren jährlichen Wassertemperatur (MJWT) in Kienstock/Donau (links) und der mittleren jährlichen Lufttemperatur (MJLT) in St. Pölten (rechts)

Die österreichische Donau ist im vergangenen Jahrhundert sehr stark durch menschliche Eingriffe verändert worden. Neben den ansteigenden Lufttemperaturen könnte der Einfluss von Regulierung und Stauhaltung das Temperaturregime wesentlich beeinflussen.

Es konnte auch ein Zusammenhang zwischen der Luft-Wassertemperatur-Beziehung und der Größe bzw. Charakteristik des Einzugsgebietes identifiziert werden (Webb & Nobilis, 2007). Je größer das Einzugsgebiet ist bzw. je niedriger es liegt, desto stärker folgt die Wassertemperaturentwicklung jener der Lufttemperatur. Dabei ist zu beachten, dass nicht die Einzugsgebietsgröße direkt die Wassertemperatur beeinflusst. Sie spiegelt vielmehr die äußeren Einflüsse, die auf das Gewässer und somit auch auf die Wassertemperatur wirken, wider. Auch was das Trendverhalten angeht, scheint die Einzugsgebietsgröße eine Rolle zu spielen. Nur die Donau und zum Teil auch die Mur weisen in den Zeitreihen von Wasser- und Lufttemperatur ähnliche Trendveränderungen auf. Bei Gail und Salzach hingegen zeigen die Zeitreihen von Wasser- und Lufttemperatur ganz unterschiedliche Trends und Trendände-

rungen. Die genauen Gründe dafür lassen sich alleine über die Analyse der mittleren jährlichen Temperatur nicht hinreichend erörtern. Hier ist es sicher notwendig, den zeitlichen Maßstab zu verkleinern. Aber auch Änderungen im Niederschlagsregime, Schmelzwasserabfluss oder anthropogene Eingriffe im Gewässer und Einzugsgebiet müssen genauer analysiert werden, um schlüssige Erklärungen zu finden.

#### 4.2 Veränderungen der Abflüsse in den Gewässern

Vergleicht man die Komponenten Niederschlag und Abfluss der Abflussbilanz der vergangenen 30 Jahre mit den Daten seit 1900 so zeigen sich für das gesamte Bundesgebiet keine signifikanten Veränderungen. Auch die Szenarien für die Periode bis 2050 lassen erwarten, dass sich die Jahressumme des Niederschlages zwar im Süden und Osten Österreichs verringern wird, dieses Defizit aber durch mehr Niederschläge nördlich der Alpen ausgeglichen wird. Von der Fläche Österreichs werden 96 % in die Donau entwässert. Die Abflüsse der Donau sind demnach ein wichtiger Indikator für die in Österreich verfügbaren Wassermengen und deren Veränderungen. Nur an zwei Messstellen der österreichischen Donau existieren Abfluss-Zeitreihen von Tagesmittelwerten ohne Lücken seit Beginn des 20-igsten Jahrhunderts. Wie zu erwarten war, zeigen diese eine große jahreszeitliche Varianz. Die Jahres- und Dekaden-Mittelwerte hingegen lassen keinen signifikanten Trend in diesen mehr als hundert Jahren erkennen. Was jedoch nachgewiesen werden konnte ist, dass die saisonalen Abflüsse im Winter durchgehend einen positiven Trend (Steigerung) aufweisen (Abbildung 3) und im Sommer, ab den 1960iger Jahren, signifikant weniger geworden sind (Abbildung 4). In welchem Ausmaß dieses Ergebnis durch den Klimawandel verursacht wurde, oder wie groß der Einfluss von anthropogenen Veränderungen – wie zum Beispiel die Speicherbewirtschaftung der Wasserkraft – ist, diese Frage bleibt vorerst noch unbeantwortet.

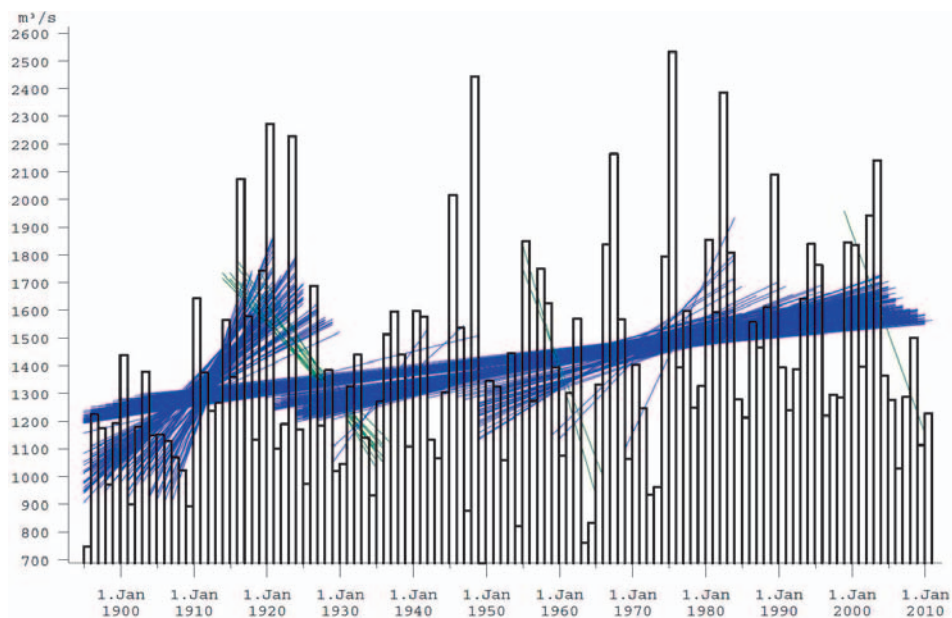


Abbildung 3: Veränderungen der Winterabflüsse an der Donau bei Kienstock; blaue Linien: Perioden mit signifikant steigendem Trend, grüne Linien: Perioden mit signifikant fallendem Trend

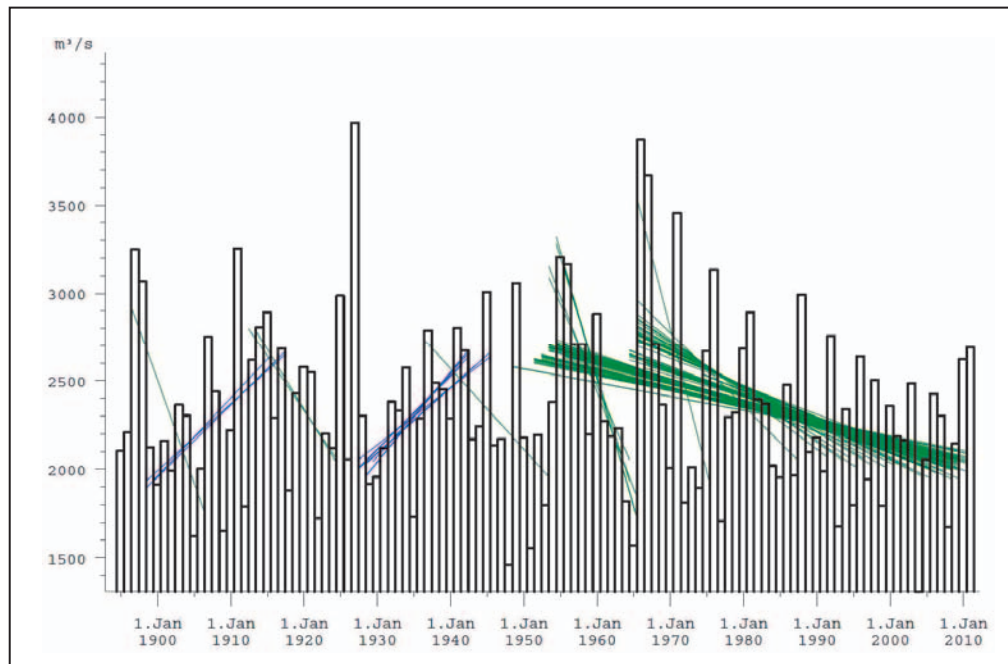


Abbildung 4: Veränderungen der Sommerabflüsse an der Donau bei Kienstock; blaue Linien: Perioden mit signifikant steigendem Trend, grüne Linien: Perioden mit signifikant fallendem Trend

### 4.3 Die Gletscher verschwinden

Gletscher sind Teil des Wasserkreislaufs und stellen eine zeitlich variable Speichergröße dar. Aus Sicht der Hydrologie und Wasserwirtschaft ist insbesondere der Abflussbeitrag der Gletscher von Interesse. Daneben ist aus wasserwirtschaftlicher Sicht ihr möglicher Einfluss auf sommerliche Niederwässer, Hochwässer, Geschiebeführung und Wassertemperatur zu beachten. In Österreich wird die Veränderung der Gletscher durch mehrere Messprogramme erfasst. Diese umfassen die Messung von jährlichen Längenänderungen (durch den österreichischen Alpenverein), die Messung der jährlichen Massenbilanz an ca. 15 ausgewählten Gletschern sowie die Aufnahme der Gletschertopographie einer Vielzahl von Gletschern im Rahmen des Gletscherinventars in unregelmäßigen Zeitintervallen (in Österreich für alle Gletscher für 1969 und ca. 1998). Aus dem letzten Inventar ca. 1998 können folgende Daten abgeleitet werden (Lambrecht und Kuhn, 2007):

Gesamtfläche	470 km <sup>2</sup>
geschätztes Volumen	17.4 km <sup>3</sup>
Flächenänderung 1998-1969	-17.1 %
Volumenänderung 1998-1969	-4.9 km <sup>3</sup>
Wasserwert bezogen auf die Fläche von Österreich	ca. 55 mm
Mittlerer Abflussbeitrag pro Jahr	ca 2 mm/Jahr
Verhältnis des Abflussbeitrages zum Niederschlag	0.2% von mittleren Jahresniederschlag



Aus diesen Kenngrößen ist ersichtlich, dass der Beitrag der Gletscher zum Jahresabfluss unter den derzeitigen Klimabedingungen relativ klein ist. In trockenen und heißen Sommern jedoch kann die Gletscherspende Werte erreichen, die lokal für kleine Einzugsgebiete einen beträchtlichen Anteil am Gesamtabfluss ausmachen. Wie lange dieser Einfluss wirksam sein wird, darüber gibt es noch unterschiedliche Angaben, die zwischen maximal 10 und 30 Jahren (BMLFUW, 2011) variieren.

Die Hydrographie Österreichs betreibt im Tiroler Ötztal den Pegel Vent an der Rofenache. Das Einzugsgebiet dieses Pegels ist energiewirtschaftlich unbeeinflusst und weist einen Gletscheranteil von 40% auf. Die Lufttemperatur an diesem in 1900 m über Adria gelegenen Pegel ist in den vergangenen drei Dekaden um  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{Dekade}$  gestiegen, der Abfluss am Pegel zeigt einen mittleren Anstieg um ca.  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$  pro Dekade (siehe Abbildung 5). Da die Jahressumme des Niederschlages in diesem Zeitraum in etwa gleich geblieben ist, kann angenommen werden, dass die Abflusszunahme zum Großteil vom Abschmelzen des Gletschereises stammt und einem Volumen von 265 Mio.  $\text{m}^3$  Wasser entspricht. Dem gegenüber stehen die Ergebnisse der Beobachtungen zur Abschätzung der Massenbilanz (Längen- und Oberflächenänderung) für die Gletscher im Ötztal die ein Minus von 170 Mio.  $\text{m}^3$  ergeben. Diese Differenz lässt vermuten, dass die Gletscher nicht nur an Höhe verlieren, sondern auch im Inneren verstärkt Hohlräume ausbilden und der Rückgang in den nächsten Jahren fortgesetzt bzw. beschleunigt wird.

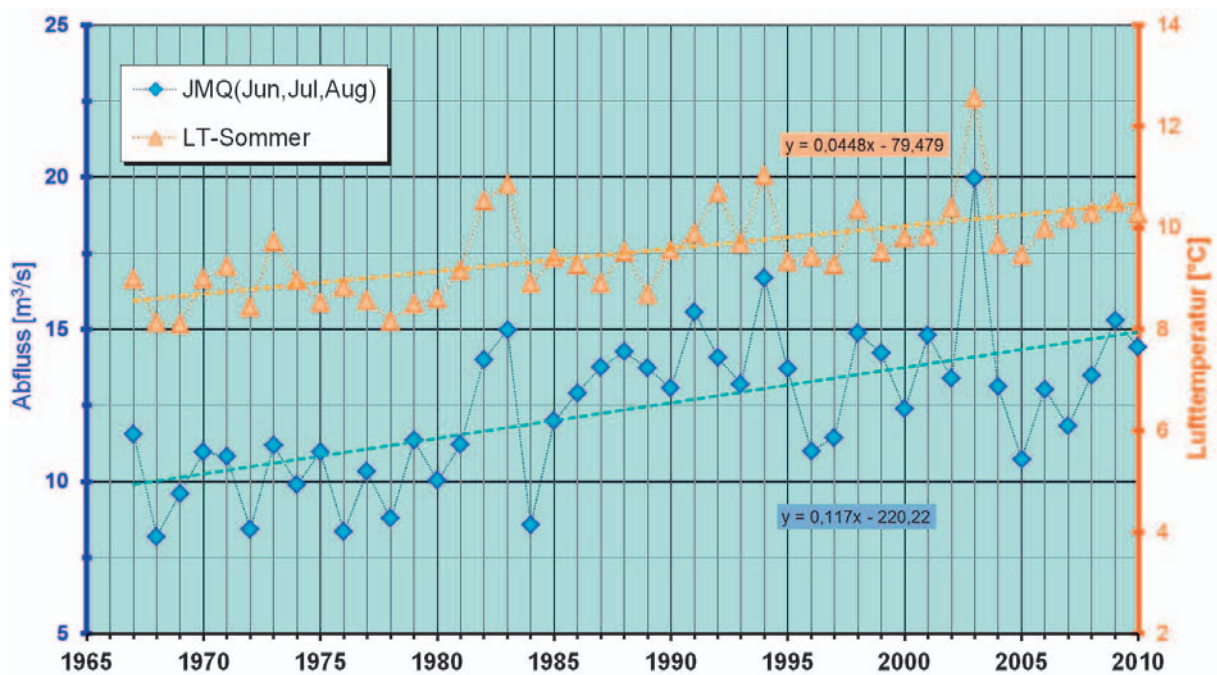


Abbildung 5: Zusammenhang zwischen der mittleren jährlichen Sommer-Lufttemperatur und der mittleren Durchflüsse im Sommer am Pegel Vent/Rofenache





## 5 Zusammenfassung

Der Klimawandel als globales Phänomen ist auch für Österreich eine umweltpolitische Herausforderung. In der österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel wird hervorgehoben, dass die Klimaänderung nicht mehr verhindert, sondern nur in ihrer Auswirkung gemindert kann. Es wird angenommen, dass die Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit für Österreich bis 2050 moderat bleiben und die bestehenden Management-Maßnahmen (Wasserrahmenrichtlinie, Nationaler Gewässerbewirtschaftungsplan und Hochwasser-Richtlinie) ausreichen werden, um nachhaltige Anpassungen vornehmen zu können. Trotzdem bleiben die Unsicherheiten groß und es sind robuste Maßnahmen zu wählen und bestehende Monitoring-Systeme (Quantität, Qualität) unbedingt weiter zu betreiben.

## 6 Literatur

- BMLFUW (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf die Österreichische Wasserwirtschaft, BMLFUW/ÖWAV
- BMLFUW (2011): Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft, Studie der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik und der Technischen Universität Wien, BMLFUW
- BMLFUW (2012): Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel Teil 1 – Kontext und Teil 2 – Aktionsplan Handlungsempfehlungen für die Umsetzung
- [http://www.lebensministerium.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik\\_national/anpassungsstrategie.html](http://www.lebensministerium.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie.html)
- Lambrecht, A. und Kuhn, M. (2007) Glacier changes in the Austrian Alps during the last three decades, derived from the new Austrian glacier inventory, *Annals of Glaciology*, 46, 177-184.
- Standhartinger St., Godina R. (2013): Langzeitentwicklung der Wassertemperatur in österreichischen Fließgewässern, *Mitteilungsblatt des Hydrografischen Dienstes* Nr.: 88
- Webb, B.W., Nobilis F. (2007): Long-term changes in river temperature and influence of climatic and hydrological factors. *Hydrological Science Journal*. Vol. 52 (1); 74-85.

## Niedrigwassermanagement an Neckar und Rhein – Erfahrungen und Schlussfolgerungen

Uwe Bergdolt  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

### 1 Einleitung

Bedingt durch den Klimawandel werden künftig „trockene“ Großwetterlagen im Sommerhalbjahr häufiger vorkommen. In der Folge wird es öfter als bisher ausgedehnte Trockenperioden geben. Entsprechend werden auch die Niedrigwasserereignisse in den Flüssen häufiger und extremer. Außerdem sagen die KLIWA-Untersuchungen steigende Lufttemperaturen und damit höhere Wassertemperaturen im Sommer voraus. Probleme für die Gewässerfauna, wie sie insbesondere im Extremjahr 2003 auftraten, werden zunehmen. Besonders kritisch ist diese Entwicklung am staugeregelten Neckar mit seinem dichtbesiedelten Einzugsgebiet, wo solche Situationen häufig auch zu Sauerstoffdefiziten führen.

Neben ökologischen Problemen können Niedrigabflüsse und hohe Wassertemperaturen auch Einschränkungen bei den Gewässernutzungen erforderlich machen. Die einschneidendsten Folgen sind zu erwarten, wenn die Wärmekraftwerke ihre Leistung drosseln oder gar abgeschaltet werden müssen, weil das Kühlwasserdargebot nicht ausreicht. Schlimmstenfalls kann es zu einem großflächigen Zusammenbruch der Stromversorgung kommen.

Wasserwirtschaftliche Handlungsoptionen zur Minderung dieser Effekte des Klimawandels im Bereich der **Vorsorge** sind die verstärkte dezentrale Versickerung, der Erhalt und die Schaffung naturnaher Gewässerstrukturen. Auch weitere Verbesserungen der Wassergüte helfen der Gewässerfauna, extreme Niedrigwassersituationen mit gleichzeitig hohen Wassertemperaturen besser zu überstehen. Stichwort ist hier insbesondere die Reduzierung des Phosphoreintrags aus kommunalem Abwasser und diffusen Quellen.

Im **akuten Fall**, also während extremer Trocken- und/oder Hitzephasen kommen Maßnahmen des Niedrigwassermanagements in Frage. Dazu gehören die Niedrigwasser- und Temperaturprognose, aber auch Nutzungseinschränkungen und/oder Stützmaßnahmen. Im Folgenden werden Maßnahmen des **Niedrigwassermanagement** vorgestellt, die sich in Baden-Württemberg bewährt haben.

### 2 Was ist Niedrigwassermanagement?

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser hat in ihren „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ (LAWA 2007) Strategien zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser aufgeteilt in Maßnahmen der Niedrigwasservorsorge und des Niedrigwassermanagements (Abb. 1).

Das Niedrigwassermanagement wird wiederum unterteilt in administrative und nutzungsbezogene Maßnahmen. Die nutzungsbezogenen Maßnahmen sieht die LAWA in erster Linie beim Nutzer selbst. Darunter fällt zum Beispiel die Schaffung von Verbundsystemen zur Überbrückung lokaler Engpässe im Bereich der Energiewirtschaft und der Trinkwasserversorgung.

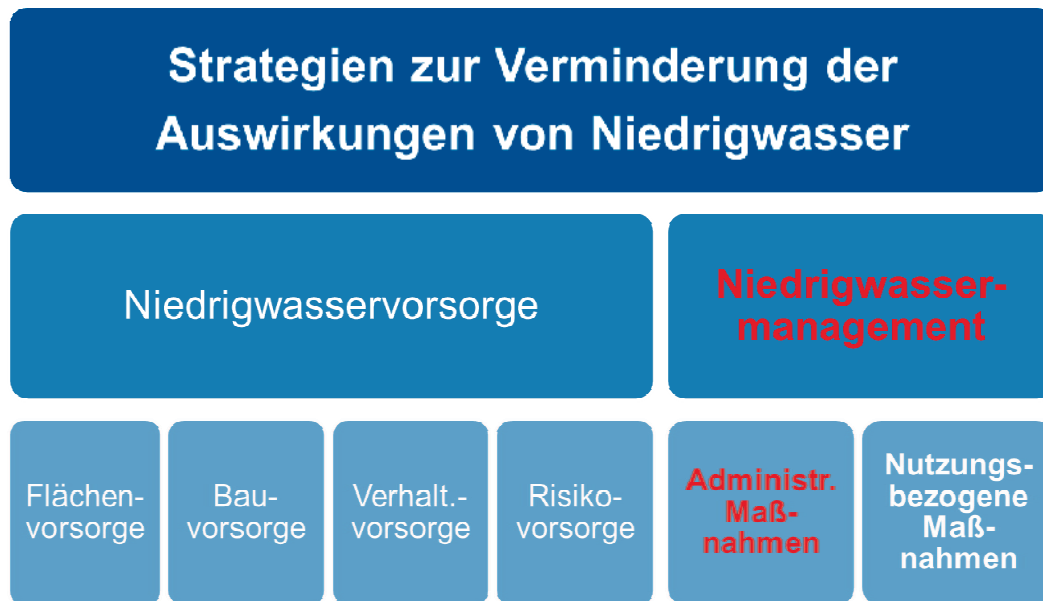


Abb. 1: Strategien zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser, aus: LAWA 2007

Im Folgenden wird der Bereich der administrativen Maßnahmen näher betrachtet. Darunter fallen laut LAWA:

- Niedrigwasservorhersage
- Information von Öffentlichkeit und Nutzern über die zu erwartende Entwicklung
- zeitnahes Monitoring der Auswirkungen
- Nutzungsbeschränkungen in wasserrechtlichen Bescheiden und Bewirtschaftungsplänen
- über die Festlegungen in den wasserrechtlichen Bescheiden hinausgehende Nutzungsbeschränkungen, Einschränkung des Gemeindegebrauchs
- Belüftungsmaßnahmen zur Stützung des Sauerstoffgehalts
- Vermeidung von nachteiligen Folgen durch Steuerung von wasserwirtschaftlichen Anlagen (Speicherbecken, Überleitungssystemen, Wehre)

### 3 Niedrigwassermanagement an Neckar und Rhein

#### 3.1 Wasserhaushalts- und Wärmemodelle Neckar und Rhein

Das Land Baden-Württemberg betreibt seit 2005 ein operatives Wasserhaushalts- und Wärmemodell für das Neckargebiet und seit 2010 für den Rhein. Beide Modelle wurden in Zusammenarbeit mit den Betreibern der Wärmekraftwerke entwickelt. Sie laufen bei der LUBW und liefern täglich aktualisierte, sieben Tage in die Zukunft reichende Vorhersagen für Abfluss und Wassertemperatur (Abb. 2). Die Abflussvorhersagen sind für landesweit rund hundert Pegel verfügbar, die Temperaturvorhersage für 14 Standorte entlang des staugeregelten Bereichs des Neckars und 14 Standorte entlang des Rheinabschnitts von Basel bis Worms.

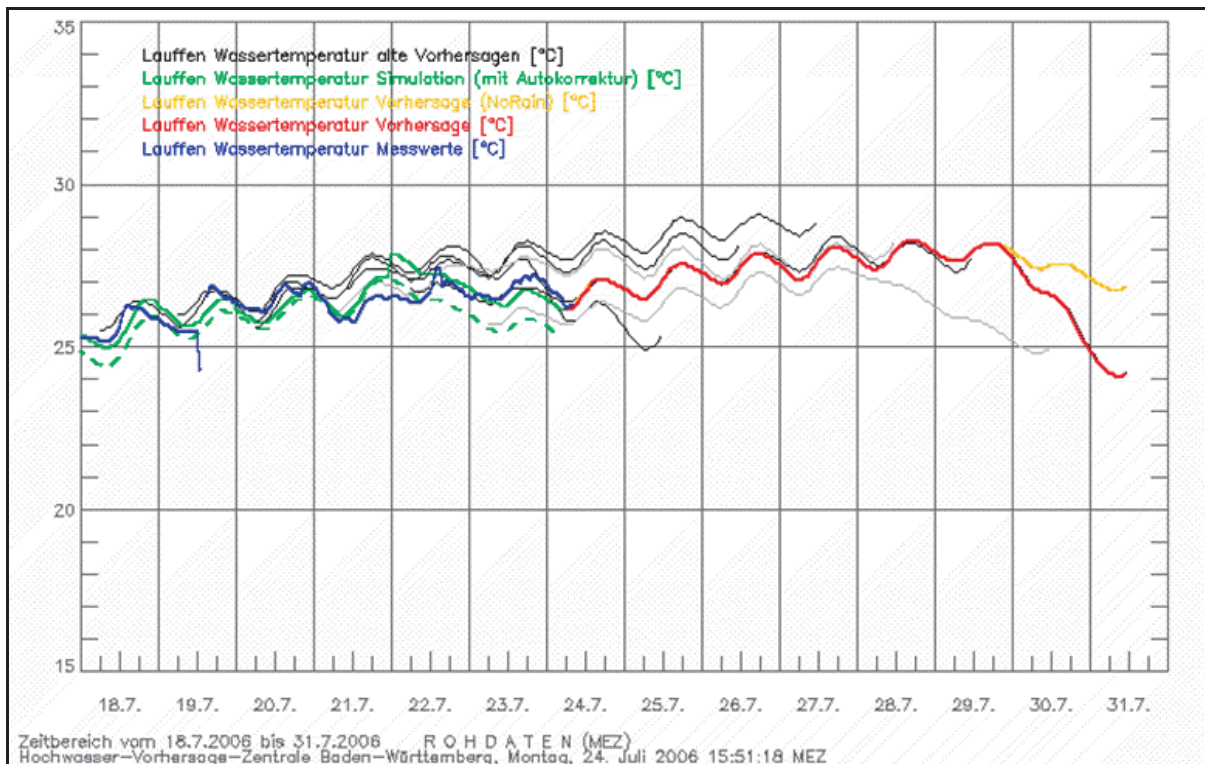


Abb. 2: 7-Tage-Prognose für die Temperatur an der Messstation Lauffen/Neckar (Beispiel)

Die Modelle beziehen die Daten der Online-Messnetze für Niederschlag, Temperatur, Globalstrahlung, Luftfeuchte, Luftdruck, Windgeschwindigkeit, Abfluss und Wassertemperatur ein. Außerdem werden verschiedene Wetterprognosen sowie die von den Kraftwerksbetreibern prognostizierten Wärmeeinträge berücksichtigt. Durch diesen hohen Aufwand wird eine sehr gute Vorhersagequalität erreicht. So beträgt beispielsweise die Abweichung der Wassertemperatur für den 4. Vorhersagetag i.d.R. weniger als 0,5 Kelvin.

Die Ergebnisse werden auf einem geschützten Internetbereich zur Verfügung gestellt und von den Überwachungsbehörden und den Energieversorgern genutzt. Die Vorteile liegen auf der Hand:

- Wasserbehörden und Energieversorger werden deutlich früher vorgewarnt und können die weitere Entwicklung besser abschätzen.
- Energieversorger können in kritischen Phasen durch Variation des Kraftwerkbetriebs oder durch Verlagerung der Produktion auf die meteorologische Situation reagieren, um Wasserrechte einzuhalten. Die Auswirkungen verschiedener Varianten können mit den Modellen vorhergesagt und dadurch optimiert werden.
- Kühlturmverluste sind quantifizier- und prognostizierbar. Zum Ausgleich kann rechtzeitig Wasser aus Speicherbecken beigeleitet werden.
- Wasserbehörden und Energieversorger können Monitoringmaßnahmen frühzeitiger vorbereiten und beginnen.
- Die Modellprognosen sind zusammen mit den laufenden Monitoringmaßnahmen wesentlicher Bestandteil für behördliche Entscheidung im Krisenfall, z. B. über Fortsetzung oder Abbruch von Ausnahmegenehmigungen.



Diese Prognosemodelle haben sich als unverzichtbares Werkzeug für das Management von Niedrigwasser- und Hitzesituationen herausgestellt und unterstützen die Kontrollfunktion des Landes bzgl. Einhaltung der Wasserrechte der großen Wärmeeinleiter.

### **3.2 Verdunstungsreglement**

Die größten Wasserentnahmen aus dem Neckar und dem Rhein erfolgen zur Kühlung der Wärmekraftwerke. Bei extremen Niedrigwassersituationen am Neckar können die Verdunstungswassermengen 10 % des Abflusses erreichen. Damit sind negative Folgen für den Fluss verbunden: die prozentualen Abwasseranteile nehmen zu, die ohnehin schon langsamen Fließgeschwindigkeiten verringern sich weiter, die Aufenthaltszeiten steigen. Deshalb werden im Rahmen des sogenannten Verdunstungsreglements bei allen Kraftwerken mit Kühltürmen die Verdunstungswassermengen begrenzt. Die Begrenzungen treten stufenweise in Abhängigkeit vom Abfluss in Kraft. Die Verdunstungsbegrenzungen können nur einen Neckarabschnitt oder den gesamten Neckar betreffen. Seit der Inbetriebnahme des Wasserhaushalts- und Wärmemodells für den Neckar ist es möglich, auch die durch die Wärmeeinleitung der Kraftwerke induzierte gewässerinterne Verdunstung zu berechnen. Diese wird bei der Bilanzierung berücksichtigt, die Verdunstungsmenge an den Kühltürmen reduziert sich entsprechend.

Der Kraftwerksbetreiber kann die Verdunstungsmenge durch Zuleitung von Wasser aus Speicherbecken ausgleichen. Er muss die Einhaltung der erlaubten Mengen täglich nachweisen. Die entsprechenden, aufeinander abgestimmten Bestimmungen sind in den Wasserrechten aller Kraftwerke mit Rückkühlmöglichkeiten enthalten.

### **3.3 Übereinkunft über die Zusammenarbeit bei wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Extremsituationen**

Neben den Begrenzungen der Verdunstungswassermengen enthalten die Wasserrechte für alle Kühlwasserentnahmen auch Beschränkungen hinsichtlich der einleitbaren Wärmemengen, der Höchsttemperatur des eingeleiteten Kühlwassers und der Maximaltemperatur im Fluss stromab der Einleitung. Dadurch wird gewährleistet, dass extrem hohe, gewässerökologisch nicht vertretbare Wassertemperaturen oder Temperatursprünge nicht auftreten. In lang anhaltenden Hitzeperioden führt dies dazu, dass Kraftwerke ihre Leistung drosseln müssen, bis hin zum zwangsweisen Abschalten.

Um die Energieversorgung trotzdem soweit vertretbar sicherzustellen, kann es unter bestimmten Randbedingungen möglich sein, die Kraftwerke auch bei Erreichen der festgelegten Maximaltemperatur im Gewässer, in der Regel 28 °C, im Rahmen von Ausnahmegenehmigungen in engen Grenzen weiter zu betreiben. Da im Krisenfall allerdings nicht viel Zeit für die Beantragung und Prüfung von solchen Ausnahmegenehmigungen bleibt, besteht zwischen den Energieversorgern und dem Land eine Übereinkunft über die Zusammenarbeit bei wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Extremsituationen. Sie regelt detailliert die Abläufe, an die sich beide Seiten zu halten haben. Auch hier sind die Prognosen der Wärmemodelle wichtiger Bestandteil.

Gemäß Übereinkunft sind Ausnahmegenehmigungen dann zu beantragen, wenn das Wärmemodell das Erreichen der zugelassenen Höchsttemperatur in 4 Tagen prognostiziert (Abb. 3). Allerdings dürfen Ausnahmegenehmigungen nur für die Kraftwerke beantragt werden, die laut einem unabhängigen Gutachten zur Stromversorgung des Landes unbedingt erforderlich sind und gleichzeitig eine geringe Wärmebelastung ins Gewässer eintragen. Durch den Vorlauf von 4 Tagen ist gewährleistet, dass den Wasserbehörden und der LUBW 2 Tage zur Prüfung des Antrags verbleiben und der Energieversorger noch 2 Tage Zeit hat, um im Falle einer Ablehnung eine Abschaltung vorzubereiten.



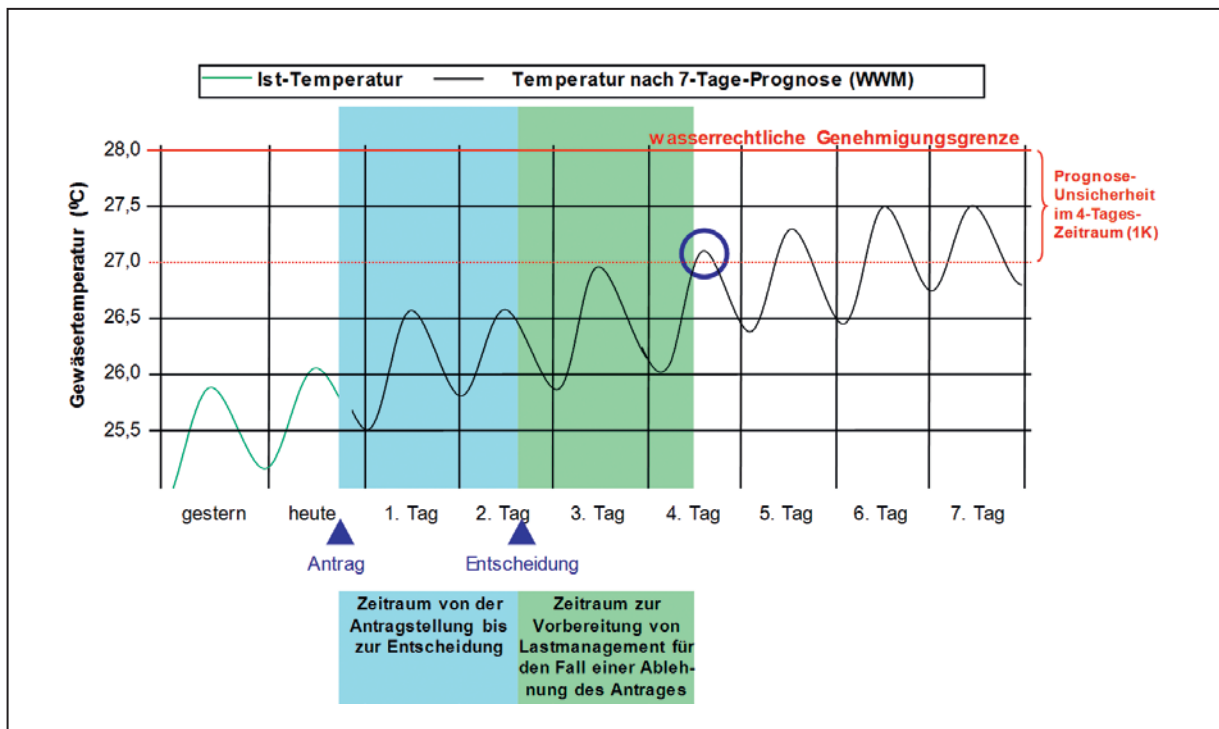


Abb. 3: Prinzipieller Verfahrensablauf bei der Beantragung von Ausnahmegenehmigungen im Hitzefall

Geregelt ist auch ein begleitendes Monitoringprogramm inklusive einer Nullmessung. Es dient zum einen der täglichen Prüfung, ob die Wärmeeinleitung weiter vertretbar ist oder beendet werden muss. Zum anderen ist es Grundlage für eine eingehendere Prüfung nach Beendigung der Krisensituation, ob und in wieweit durch die Ausnahmegenehmigungen Veränderungen eingetreten sind, und wie diese im Hinblick auf folgende Fälle zu bewerten sind.

### 3.4 Sauerstoffreglement Neckar

Der Sauerstoffhaushalt des schiffbaren Neckars ist in der warmen Jahreszeit durch die beschleunigt ablaufenden Abbauprozesse, dem im Verhältnis zum Abfluss hohen Abwasseranteil und die vielen Stauhaltungen streckenweise labil. Besonders empfindlich reagiert der Neckar dann beim stoßartigen Eintrag Sauerstoff zehrender Stoffe durch Starkregenereignisse oder wenn es nach ausgeprägten Schönwetterperioden mit massiven Algenblüten zum Zusammenbruch der Algenpopulation kommt.

Insbesondere in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts, als die Kläranlagen noch nicht den heutigen Ausbaustandard erreicht hatten, kam es häufig zu Sauerstoffmangel mit größeren Fischsterben. Damals wurde das „Sauerstoffreglement Neckar“ entwickelt, um durch künstliche Sauerstoffzufuhr die Situation zu verbessern. Mit dem zunehmenden Ausbau der Abwasserbehandlung hat sich die Situation zwar deutlich verbessert und es kommt heute nicht mehr zu größeren Fischsterben. Aufgrund der genannten Randbedingungen besteht aber nach wie vor kein ganzjährig optimales Sauerstoffangebot.

Die Regelungen des „Sauerstoffreglements Neckar“ wurden ständig fortgeschrieben und an die Gewässersituation angepasst. Es handelt sich dabei um eine Vereinbarung zwischen dem Land Baden-Württemberg und den Kraftwerksbetreibern sowie der Stadt Stuttgart als



Betreiberin der größten Kläranlage am Neckar. Das Reglement beinhaltet eine mehrstufige Vorgehensweise, um bei Unterschreiten festgelegter, kritischer Sauerstoffgehalte durch Belüftungsmaßnahmen negative Auswirkungen für die Gewässerbiozönose so gering wie möglich zu halten:

- **Warnung** erfolgt ab  $< 4,5$  mg/L Sauerstoff im Neckar
- **Alarm** erfolgt ab  $< 3,5$  mg/L Sauerstoff im Neckar
- **Stützmaßnahmen** werden bei Erreichen bzw. Unterschreiten von  $4,0$  mg/L Sauerstoff für zunächst mindestens 24 h durchgeführt
- **Alarmmaßnahmen** werden zusätzlich bei weiter abnehmenden Sauerstoffgehalten durchgeführt

In den meisten Fällen erfolgt der Sauerstoffeintrag durch Absenken von Wehren. Dadurch wird ein Wehrüberfall induziert, mit dem ein Sauerstoffeintrag verbunden ist. Weitere Eintragsmöglichkeiten bestehen z. B. durch Turbinenbelüftung oder durch Kühlturbetrieb.

Durch das Sauerstoffreglement konnten Fischsterben in den letzten Jahren und Jahrzehnten weitgehend vermieden werden. Es ist ein häufig genutztes Instrumentarium (Abb. 4).

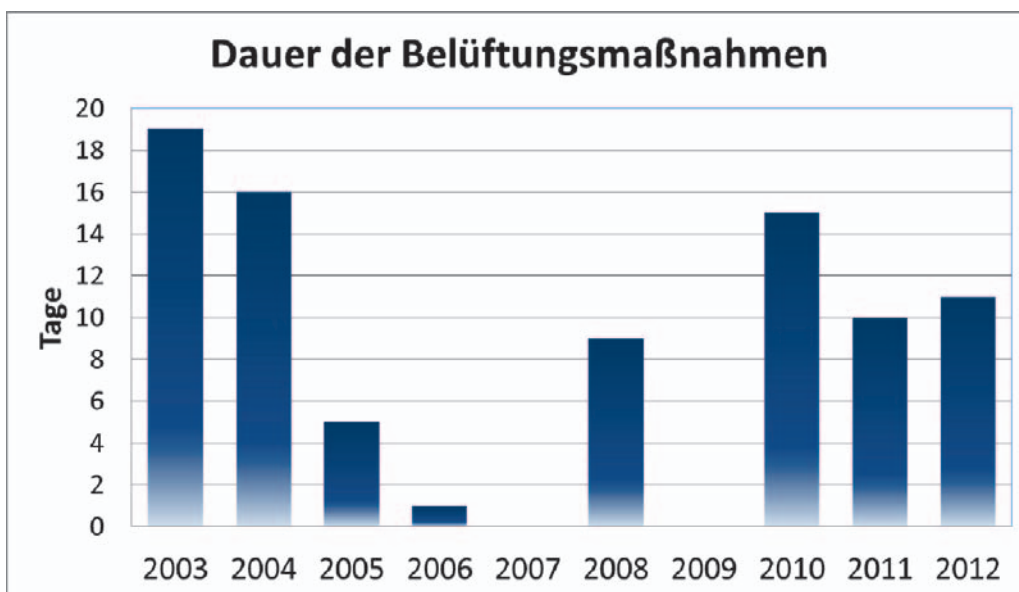


Abb. 4: Dauer der Belüftungsmaßnahmen im Rahmen des Sauerstoffreglements

#### 4 Zusammenfassung

In Baden-Württemberg werden einige der von Länderarbeitsgemeinschaft Wasser in ihren „Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ vorgeschlagenen Strategien und Maßnahmen eingesetzt, teilweise schon seit vielen Jahren.

In den Bereich „Niedrigwasservorhersage“ und „Information von Nutzern über die zu erwartende Entwicklung“ fallen die Niedrigwasser- und Temperaturprognosemodelle für Rhein und Neckar. Sie geben frühzeitig Hinweise, ob und in welchem Ausmaß mit kritischen Situationen zu rechnen ist. Die Prognosemodelle sind ein wichtiges Hilfsmittel für das Management von Niedrigwasser- und Hitzesituationen und unterstützen die Kontrollfunktion des Landes bzgl. Einhaltung der Wasserrechte der großen Wärmeeinleiter.

Das Verdunstungsreglement für die Kraftwerke am Neckar fällt in die Kategorie „Nutzungsbeschränkungen in wasserrechtlichen Bescheiden“ sowie „Steuerung von wasserwirtschaftlichen Anlagen“. Durch wasserrechtlich festgelegte Beschränkungen der Verdunstungsmengen bei sehr niedrigen Abflüssen wird vermieden, dass es zu gravierenden nutzungsbedingten Nachteilen für die Gewässerökologie kommt.

Die Übereinkunft über die Zusammenarbeit bei wasserwirtschaftlichen und gewässerökologischen Extremsituationen zwischen dem Land Baden-Württemberg und den beiden größten Energieversorgern trägt durch abgestimmte Vorgehensweisen und Vereinbarungen dazu bei, in extremen Hitzephase Einzelfall bezogen ökologische Belange und Energieversorgungssicherheit in Einklang zu bringen.

Das Sauerstoffreglement Neckar schließlich fällt in die Kategorie „Belüftungsmaßnahmen zur Stützung des Sauerstoffgehalts“ des LAWA-Papiers. Das Reglement beinhaltet eine mehrstufige Vorgehensweise, um bei Unterschreiten festgelegter, kritischer Sauerstoffgehalte durch freiwillige Belüftungsmaßnahmen von Kraftwerks- und Kläranlagenbetreibern negative Auswirkungen für die Gewässerbiozönose so gering wie möglich zu halten.

## **5 Literatur**

LAWA (2007): Leitlinien für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement, Länderarbeitsgemeinschaft Wasser



## Landwirtschaftlicher Beregnungsbedarf in der nördlichen Oberrheinebene

Dr. Georg Berthold

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden-Biebrich

### 1 Einleitung

Das Hessische Ried ist eine verbrauchernahe Region, in der zur Versorgung der Ballungsräume Rhein-Main und Rhein-Neckar neben traditionellen landwirtschaftlichen Kulturen Sonderkulturen angebaut werden. Unter den klimatischen Bedingungen des Hessischen Rieds ist eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion schon jetzt nur durch die Verabreichung von Zusatzwassergaben möglich. Die Grundwasserentnahmen für die benötigte Zusatzwassermenge liegen zwischen 3,5 Mio. m<sup>3</sup>/a (Nassjahr) und über 35 Mio. m<sup>3</sup>/a (Trockenjahr). Es ist anzunehmen, dass der Bedarf an Zusatzwasser bei den angebauten Kulturen im Sommerhalbjahr auf Grund der prognostizierten Klimaveränderung steigen wird. Dies betrifft sowohl die Anzahl der Beregnungsgaben (Menge, Zeitraum) pro Jahr als auch die Ausweitung der Beregnungsflächen. Mit dieser Entwicklung wäre eine erhebliche Zunahme des Zusatzwasserbedarfs in der Pflanzenproduktion verbunden.

Das Aufzeigen von Veränderungen hinsichtlich des Zusatzwasserbedarfs von landwirtschaftlichen Kulturen setzt allerdings die Erfassung der derzeitigen Beregnungspraxis voraus.

In Form einer Bestandsaufnahme wurde daher die Ist-Situation der landwirtschaftlichen Beregnung im Hessischen Ried erfragt:

- Feststellung der erschlossenen Beregnungsfläche
- Beregnungsmengen in der Vergangenheit für Normal-, Nass- und Trockenjahre.

Vom IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) wurden verschiedene Szenarien für die weltweite sozioökonomische Entwicklung erarbeitet. Diese globalen Entwicklungsmodelle weisen eine große Bandbreite auf. Je nach gewähltem Szenario verändern sich die Treibhausgaskonzentrationen unterschiedlich stark.

Für die zu erwartende klimatische Entwicklung wurde das A1B-Szenario zugrunde gelegt. Dieses moderate Szenario des IPCC geht von einer weiter steigenden Konzentration der Treibhausgase aus und basiert auf den Annahmen eines „raschen Wirtschaftswachstums“, „einer Weltbevölkerung, die ein Maximum Mitte des 21. Jahrhunderts erreicht und danach rückläufig ist“ sowie einer „raschen Einführung von neuen und effizienten Technologien“.

Auf regionaler Ebene ist die räumliche Auflösung globaler Klimamodelle nicht ausreichend. Deshalb kommen regionale Klimamodelle zum Einsatz, die die Klimaszenarien der Globalmodelle nutzen. Für die Auswertung wurde das wetterlagenbasierte, regionale Klimamodell WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode) herangezogen.

Auf Grundlage einer kontinuierlichen Zeitreihe des regionalen Klimamodells WETTREG auf Basis des A1B-Szenarios wurden die erwarteten Ausprägungen von Temperatur, Niederschlag sowie Verdunstung vom Jahr 1960 bis zum Jahr 2050 simuliert. Diese Daten wurden als Basis für die zu erwartende Entwicklung der Zusatzberegnung herangezogen.

## 2 Ergebnisse

### 2.1 Die derzeitige Beregnungssituation

Zur Erfassung der derzeitigen Verhältnisse wurde eine Befragung bei den 45 Abteilungen der „Beregnungs- und Bodenverbände“ im Hessischen Ried durchgeführt.

#### 2.2.1 Potentielle Beregnungsflächen und Anbauverhältnisse

Der Begriff „potentielle Beregnungsfläche“ sagt aus, dass diese Flächen mit Zusatzwasser beschickt werden können, also prinzipiell für Beregnungszwecke erschlossen sind. Ob allerdings alle ausgewiesenen Flächen innerhalb eines Jahres beregnet werden, ist abhängig von der jeweiligen Kulturführung. Eines der Ziele des Projektes war die digitale Erfassung aller potentiellen Beregnungsflächen im Hessischen Ried, da bisher lediglich auf Schätzungen hinsichtlich der flächenhaften Ausdehnung der Beregnungsflächen zurückgegriffen werden konnte. Die landwirtschaftliche Nutzfläche im Hessischen Ried wird laut ATKIS (**A**mtliches **T**opographisch-**K**artographisches **I**nformationssystem) mit 34.437 Hektar ausgewiesen (siehe Abb. 1). Bereits visuell wird deutlich, dass die potentielle Beregnungsfläche nahezu die gesamte ackerbaulich genutzte Fläche einnimmt. Die aus der Digitalisierung der Beregnungsflächen erhaltenen Flächengrößen werden in Tabelle 1 aufgeführt. Der weitaus größte Teil der erschlossenen Beregnungsflächen bezieht das landwirtschaftliche Zusatzwasser direkt aus dem Grundwasser mit Hilfe von Beregnungsbrunnen, die sich auf den Feldern befinden. Die Rheinwasseraufbereitungsanlage, die sich in Biebesheim befindet, versorgt mehr als 5.000 Hektar landwirtschaftliche Nutzflächen mit Beregnungswasser. Der Anteil von aufbereitetem Oberflächenwasser, das zur Bewässerung der Feldfrüchte eingesetzt wird, ist mit 91 Hektar sehr gering. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche (34.437 ha) beträgt der prozentuale Anteil der erschlossenen Beregnungsfläche 96 %.

Tab. 1: Beregnungsfläche, unterteilt nach Herkunft der Beregnungswässer

Herkunft der Beregnungswässer	Fläche in Hektar
Beregnung aus Grundwasser	27.725
Beregnung mit aufbereitetem Rheinwasser	5.233
Beregnung mit aufbereitetem Oberflächenwasser	91
Gesamte Beregnungsfläche	33.059

Die in der Befragung der Landwirte erhobenen Anbauverhältnisse zeigen die Sonderstellung der Landbewirtschaftung im Hessischen Ried eindrucksvoll auf. Der Anteil an „normalen“ landwirtschaftlichen Kulturen wie Winter- und Sommergetreide, Zuckerrüben, Mais u. a. beträgt ca.  $\frac{3}{4}$  der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche.

Der Anteil der Fläche an Kulturen, die unter die Rubrik „Gemüse, Erdbeeren und andere Gartengewächse“ fallen, liegt mit einem Viertel der landwirtschaftlichen Nutzfläche weit über dem landesweiten Anteil (3-5 %). Begründet ist dieser hohe Anteil an Marktfrüchten durch die klimatische Gunst des Hessischen Rieds sowie die durchweg stark sandhaltigen Böden, die für die Produktion von Marktfrüchten besonders gut geeignet sind.





Tab. 2: Anbauverhältnisse landwirtschaftlicher Kulturen im Hessischen Ried

Kulturart	Flächenanteil in % an der Beregnungsfläche
Winter- und Sommergetreide	46
Zuckerrüben	10
Kartoffeln	6
Mais	5
Raps	4
Nachwachsende Rohstoffe	2
Zwiebelgewächse	14
Spargel	5
Sonstiges	8

### 2.1.2 Beregnungstechnik, Beregnungssteuerung sowie Beregnungszeiten

#### Beregnungstechnik:

Die durchgeführte Befragung ergab, dass 85 % der potentiellen Beregnungsflächen durch eine bewegliche Maschinenberegnung erschlossen ist. Diese nicht ortsfeste Art der Bewässerung bindet in der Hauptvegetationszeit durch das ständige Umsetzen und Einjustieren der Beregnungsmaschinen einen guten Teil der Arbeitszeit in den jeweiligen Betrieben.

Mit Reihenbewässerungsanlagen sind 12 % der Beregnungsflächen bestückt. Da die Leitungen in der Regel über die gesamte Vegetationsperiode auf dem Felde verbleiben, ist mit dieser Technik eine termingerechte und an den Bedarf angepasste Beregnung möglich.

Ortsfeste Beregnungsanlagen wie „Tropfbewässerung“, die über mehrere Jahre fest installiert auf dem Feld verbleiben können, kommen auf ca. 3 % der Beregnungsflächen zum Einsatz. Allerdings stellen Tropfbewässerungsanlagen erhöhte Anforderungen an die Qualität der Beregnungswässer. Vor allem eisen- und manganhaltige Wässer verursachen ein Zusetzen der Tropfschläuche.

#### Beregnungssteuerung:

Den Angaben der Landwirte zufolge erfolgt die Steuerung der Beregnungsgaben überwiegend mit Hilfe von „Wasseruhren“ und/oder „Pumpenstunden“. Die erforderliche Anzahl der „Pumpenstunden“ für eine bestimmte Kultur beruht ausschließlich auf den Erfahrungen der Landwirte. Prognosemodelle, die den jeweiligen Wasserbedarf einer Kultur unter Berücksichtigung der herrschenden Witterung ermitteln, kommen nur ganz vereinzelt zum Einsatz.

#### Beregnungszeiten:

Die Beregnungssaison beginnt im Hessischen Ried bereits in der letzten Märzwoche und endet in der Regel Ende September/Anfang Oktober.

Alle Landwirte sind bemüht, möglichst alle Bewässerungsgaben in den Abendstunden und während der Nacht zu verabreichen, um die Verdunstungsverluste zu minimieren. Daher entfallen zwei Drittel der Zusatzwassergaben in diese Zeiträume. Dieser Anteil wäre noch höher, wenn der Anteil an ortsfesten Bewässerungsanlagen höher wäre.

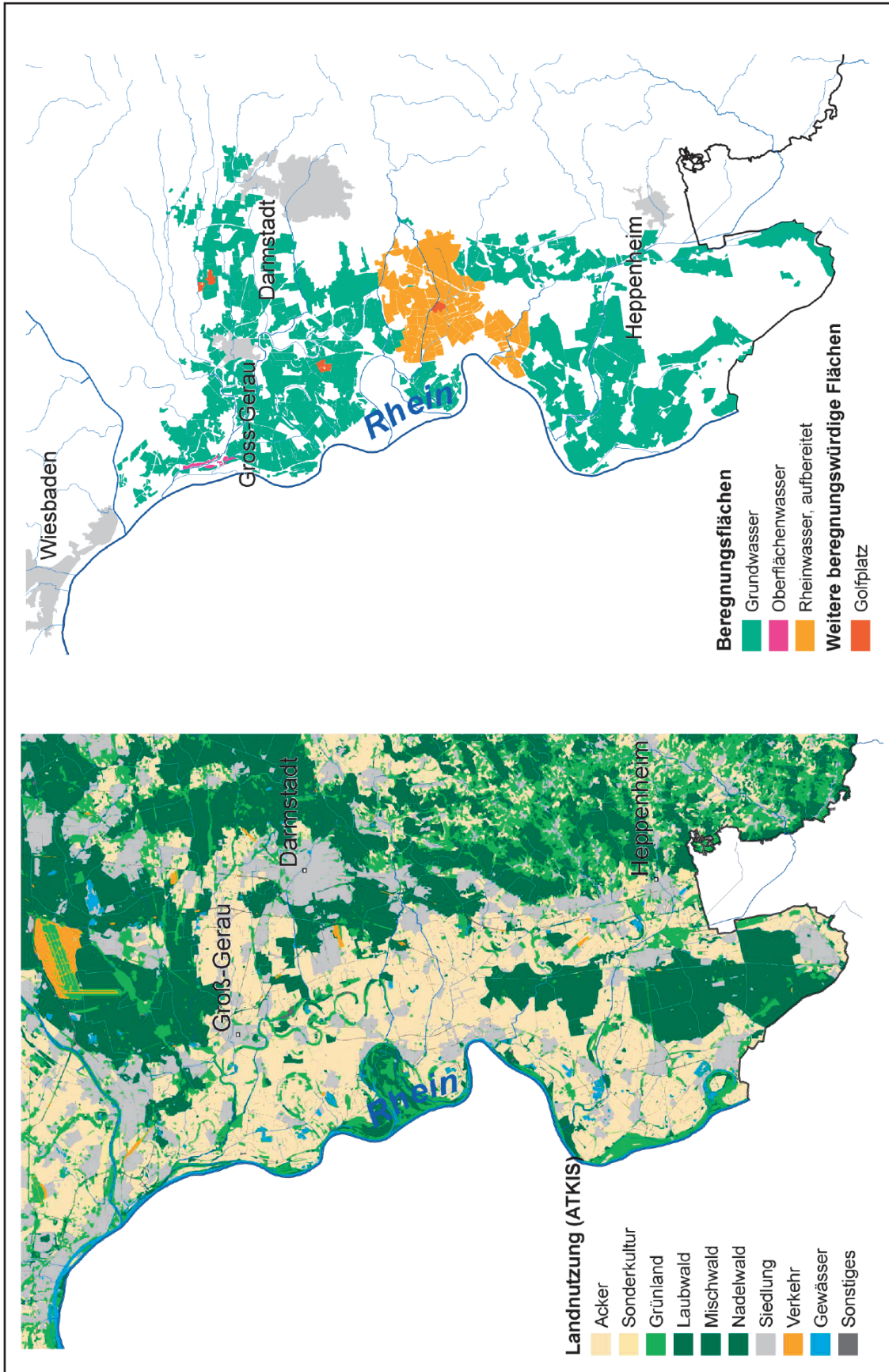


Abb. 1: Landnutzung sowie potentielle Beregnungsflächen im Hessischen Ried (Stand 2008)



### 2.1.3 Höhe der Zusatzwassergaben

Ein wichtiger Bestandteil der Befragung der Beregnungsverbände war die Ermittlung der verabreichten Beregnungsgaben, wobei zwischen dem Wasserbedarf in „Nassjahren“ sowie in „Trockenjahren“ unterschieden wurde. Da bereits im Jahr 1994 eine Abschätzung der Zusatzwassermengen für die Beregnungsflächen im Hessischen Ried durchgeführt wurde, können die ermittelten Erhebungsdaten mit dem „historischen“ Zahlenwerk verglichen werden.

Im Jahr 1994 wurden in Absprache mit dem damaligen Amt für Regionalentwicklung, Landschaftspflege und Landwirtschaft Darmstadt und dem Regierungspräsidium Darmstadt hinsichtlich der Beregnung bestimmte Einteilungskriterien vorgenommen. Zum einen wurde eine Aufteilung in sog. „Normal-, Nass- und Trockenjahre“ vorgenommen und zum anderen wurde auf Gemarkungsebene der Zusatzwasserbedarf, in Abhängigkeit von der Bewirtschaftungsintensität, in die Bewässerungsstufen „niedrig, mittel und hoch“ eingeteilt. Die Beregnungshöhen beinhalten somit eine Taxierung der mittleren Anbauverhältnisse pro Gemarkung, die auch die durchschnittliche Anbaupalette (z. B. Spargel, Salat, Gemüse) berücksichtigte.

Tab. 3: Beregnungsklassen für Normal-, Trocken- und Nassjahre im Hessischen Ried (Schätzung aus dem Jahr 1994)

	Stufe		Menge (l/m <sup>2</sup> )
Normaljahr (25-jähriger Durchschnitt)	Niedrig	(N)	60
	Mittel	(M)	75
	Hoch	(H)	100
Nassjahr	Niedrig	(N)	20
	Mittel	(M)	40
	Hoch	(H)	60
Trockenjahr	Niedrig	(N)	80
	Mittel	(M)	120
	Hoch	(H)	200

Wie aus Tab. 3 zu ersehen ist, werden für die drei verschiedenen Jahrestypen jeweils drei Beregnungsklassen vorgestellt. Für ein Normaljahr variieren die Beregnungsmengen von 60 bis 100 l/m<sup>2</sup>. In Trockenjahren kann der Zusatzwasserbedarf durchaus auf 200 l/m<sup>2</sup> und mehr ansteigen.

Der Zusatzwasserbedarf wurde im Jahr 1994 auf ca. 3,5 Mio. m<sup>3</sup> für „Nassjahre“ sowie 35 Mio. m<sup>3</sup> für „Trockenjahren“ taxiert. In Trockenjahren wird demnach eine zehnmal höhere Wassermenge zur Beregnung als in Nassjahren benötigt (nach: Althoff S., Berthold G., Brahmer G., Von Pape W.-P., Toussaint B. (1996)).

Die aktuelle Befragung (2008) der Beregnungsverbände ergab dagegen einen aufsummierten Zusatzwasserbedarf für Nassjahre von 10 Mio. m<sup>3</sup>. Somit hat sich der Zusatzwasserbedarf im Hessischen Ried in sog. „Nassjahren“ innerhalb der letzten 15 Jahre nahezu verdreifacht.

In der Abb. 2 sind die Zusatzwassergaben für Nassjahre, unterteilt nach Kreisen, als Boxplot dargestellt. Mit Hilfe eines „Boxplots“ kann das jeweilige Verteilungsmuster einer Grundgesamtheit, hier der Zusatzwasserbedarf, gut visualisiert werden. Wie aus Abb. 2 zu erkennen

ist, beläuft sich das 25-Perzentil in allen drei Kreisen auf ca. 15 l/m<sup>2</sup> (entspricht etwa der Menge einer Wassergabe). Das 75-Perzentil erreicht Werte zwischen 42 und 66 l/m<sup>2</sup>, je nach Kreis. Dies bedeutet, dass aktuell auch in sog. Nassjahren mindestens 3 Beregnungsgaben verabreicht werden. Die höchsten Zusatzwassergaben werden für den Landkreis Darmstadt-Dieburg erhalten. Ursache hierfür ist der höhere Anteil an Marktfrüchten, die gegenüber rein ackerbaulichen Früchten wie Mais oder Getreide einen höheren Zusatzwasserbedarf aufweisen.

Für Trockenjahre, als Beispiel sei das Jahr 2003 genannt, wird in der aktuellen Befragung ein Zusatzwasserbedarf in Höhe von 35,5 Mio. m<sup>3</sup> angegeben. Demnach hat sich der Spitzenwasserbedarf nur unwesentlich während der letzten 15 Jahre erhöht und pendelt sich bei dem bereits 1994 geschätzten Wert von 35 Mio. m<sup>3</sup> ein.

Die höchsten Zusatzwassergaben werden wiederum im Landkreis Darmstadt-Dieburg verabreicht. Der Median von 122 l/m<sup>2</sup> zeigt an, dass in jeder zweiten Beregnungsfläche dieser Wert überschritten wird. In 25 % aller Fälle werden sogar mehr als 207 l/m<sup>2</sup> Zusatzwasser eingesetzt (siehe Abb. 3).

## 2.2 Projektion der zu erwartenden Entwicklung des Bedarfs an Zusatzwasser

Die für Hessen prognostizierte Klimaänderung wird einen großen Einfluss auf alle Wasserhaushaltsgrößen ausüben. Im Landesmittel zeigen die Klimaprojektionen bis zum Jahr 2050 eine deutliche Erhöhung der Jahresmitteltemperatur. Diese Temperaturerhöhung bedingt längere Vegetationszeiten, die wiederum einen deutlichen Einfluss auf den Wasserverbrauch von landwirtschaftlichen Kulturen haben werden. Gleichfalls wird eine markante Zunahme der Winterniederschläge sowie eine deutliche Abnahme der Niederschläge im Sommer prognostiziert. Somit wird sich der Klimawandel insbesondere auf die intensiv bewirtschafteten landwirtschaftlichen Räume in Südhessen auswirken.

### 2.2.1 Datengrundlagen

Aus den vom IPCC definierten Emissionsszenarien wurde ein Szenario aus der A1B-Familie gewählt (IPCC, 2007). Dies Szenario geht von einer mittleren Emissionsentwicklung aus. Bedingt durch eine sehr rasche wirtschaftliche Entwicklung, gepaart mit einer raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien, wird die zukünftige Emissionsbelastung etwa ab Mitte des 21. Jahrhunderts reduziert.

Als Regionalisierungsmodell wurde WETTREG (**W**etterlagen-basierte **R**egionalisierungsmethode), in das die bisherigen Klimabeobachtungen sowie der Einfluss der Großwetterlagen auf das Lokalklima einfließen, benutzt (Spekat et. al., 2007). Zum Einsatz kam eine kontinuierliche Zeitreihe von 1960 bis 2050, die mittlere Niederschlagsverhältnisse widerspiegelt.

Die WETTREG-Daten liegen als Punktinformationen für die Messstationen des Deutschen Wetterdienstes auf Tageswertbasis vor. Als Messstation wurde die Klimastation Mannheim herangezogen, da diese in geeigneter Weise die klimatischen Verhältnisse im Hessischen Ried repräsentiert. Die Niederschlagswerte wurden mit Hilfe des vom Deutschen Wetterdienst vorgeschlagenen Korrekturverfahrens bereinigt (Richter, 1995).



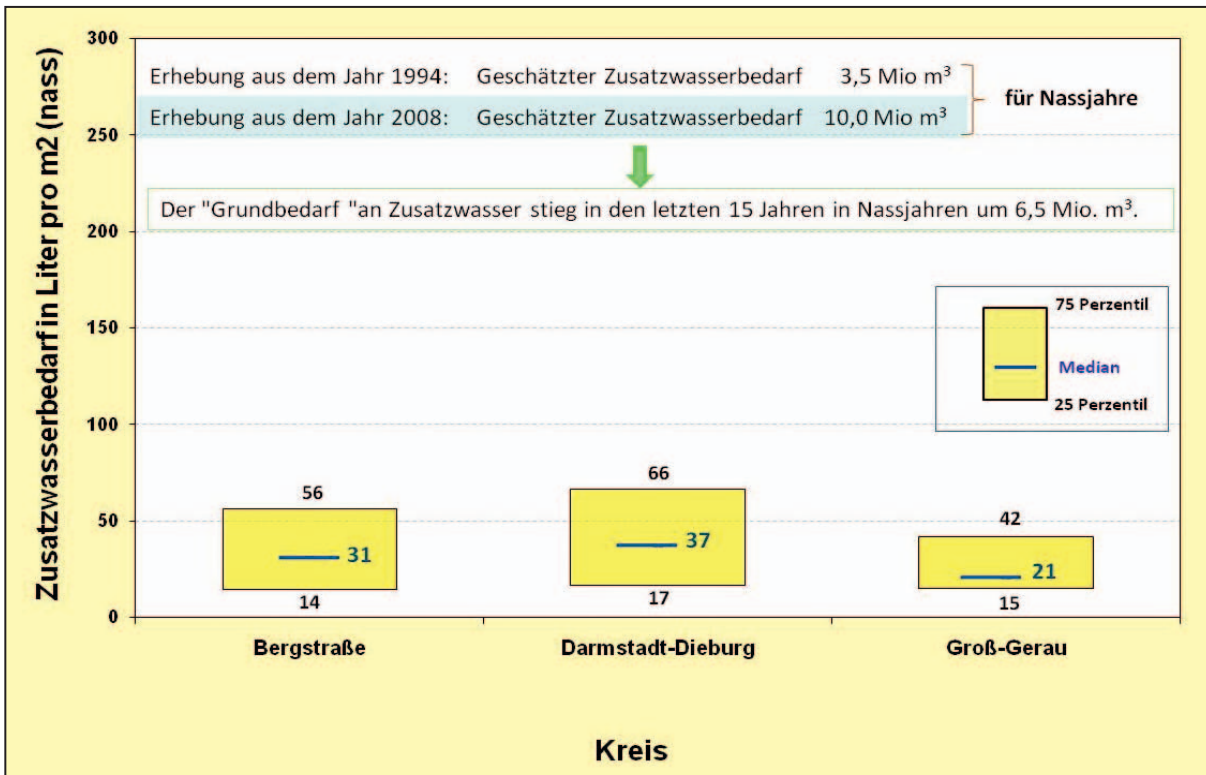


Abb. 2: Zusatzwasserbedarf in „Nassjahren“, gruppiert nach Kreisen

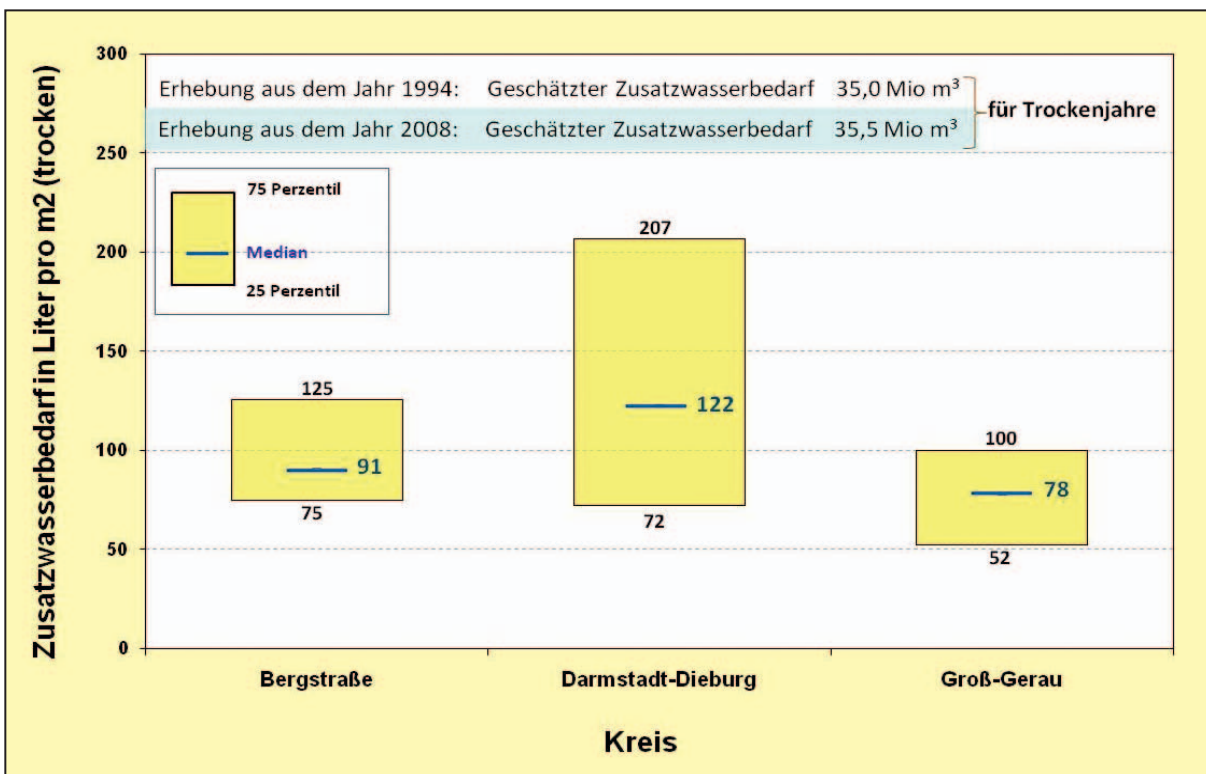


Abb. 3: Zusatzwasserbedarf in „Trockenjahren“, gruppiert nach Kreisen



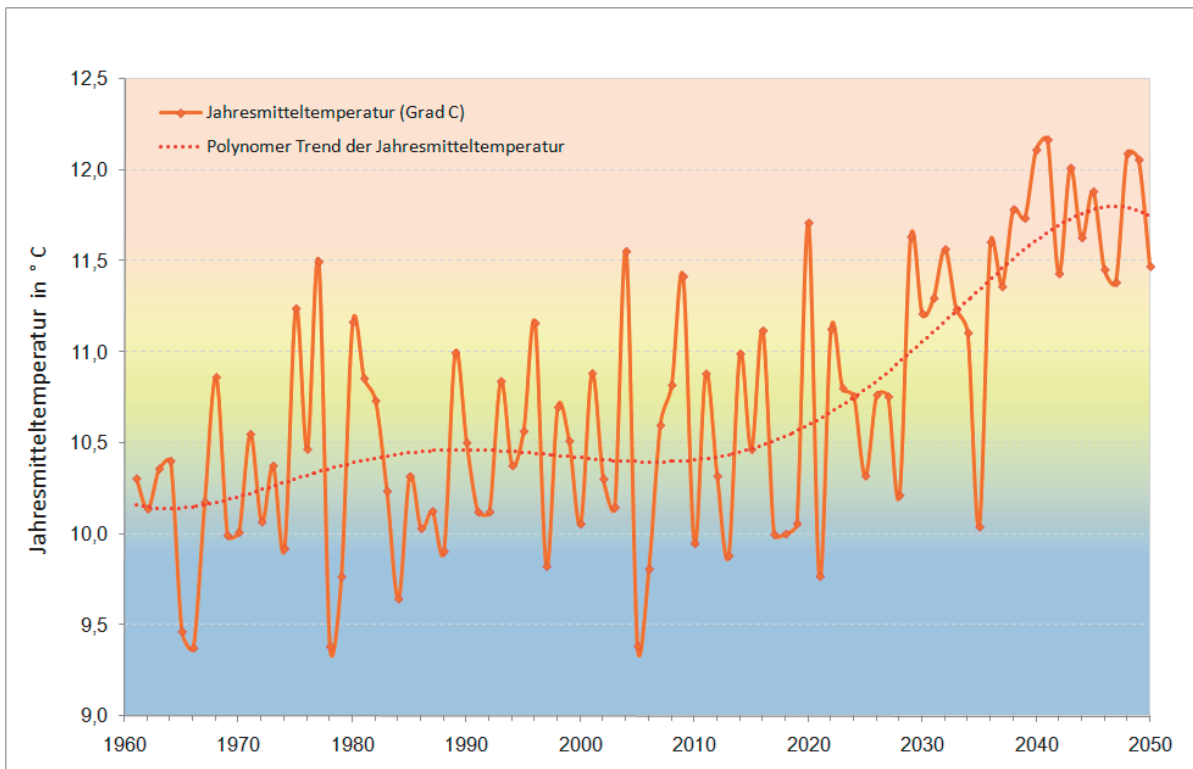


Abb. 4: Modellierte Jahresmitteltemperatur der Klimastation Mannheim (Szenario A1B)

Der in Abb. 4 illustrierte Verlauf der Jahresmitteltemperatur der Klimastation Mannheim zeigt eine sukzessive Zunahme der Jahresmitteltemperatur. In den ersten Jahrzehnten wird keine gravierende Veränderung der Jahresmitteltemperatur ausgewiesen, während ab den 90er Jahren eine deutliche Zunahme der Jahresmitteltemperatur zu verzeichnen ist. Die Klimaprojektion liefert einen Anstieg der Jahresmitteltemperatur von 10,5 auf rund 12 °C bis zum Jahr 2050.

#### 2.2.2 Berechnung der Wasserbilanzen als Bewertungsgrundlage für den Bewässerungsbedarf

Die Wasserbilanz stellt die Differenz zwischen Niederschlag (korrigiert) und Verdunstung dar. In der Hydrologie dient die potentielle Evapotranspiration, die auf Tageswertbasis für die Messstation Mannheim vorliegt, als Eingangsgröße zur Berechnung der Wasserbilanz.

Aus den vorliegenden Klimadaten Niederschlag und potentielle Evapotranspiration wurden zunächst die Wasserbilanzen auf Tagesbasis durch Differenzbildung berechnet und anschließend auf Monatebene aggregiert. Die Auswertung erbrachte, dass für die Monate Januar, Februar und März in Zukunft mit einer ständig steigenden positiven Wasserbilanz zu rechnen ist. Für die Monate April, Mai, Juni, Juli und August werden die Wasserbilanzen im Laufe der Zeit immer stärker negativ. Für den September wird eine ausgeglichene Wasserbilanz, die keiner zeitlichen Veränderung unterliegt, ausgewiesen. Die Wasserbilanzen für die Monate Oktober bis Dezember sind deutlich im positiven Bereich und zeigen keine zeitliche Veränderung im Betrachtungszeitraum (1960 - 2050).

Bezogen auf den Beregnungszeitraum (letzte Märzwoche bis Anfang Oktober) ergibt sich aus dieser Betrachtung allein schon ein Mehrbedarf an Zusatzwasser für die landwirtschaftlichen Kulturen durch die stärker negativ werdenden Wasserbilanzen in der Zukunft. Da alle Ausgangsdaten auf Tagesebene vorliegen, können die Wasserhaushaltsgrößen ohne Probleme auf den für die Beregnung wichtigen Zeitraum (letzte Märzwoche bis zur zweiten Woche im Oktober) aggregiert werden. Die Veränderung der Wasserbilanz in die-



sem Zeitraum dient als Maß für den Bedarf an Zusatzwasser. Diese Vorgehensweise bietet sich an, da Wasserbilanzen die Grundlage für eine Vielzahl von Modellen zur Berechnungssteuerung sind. Um eine aussagekräftige Tendenz für die Entwicklung der Wasserbilanz über die Zeit zu erhalten, werden die Daten zu Dekaden zusammengefasst.

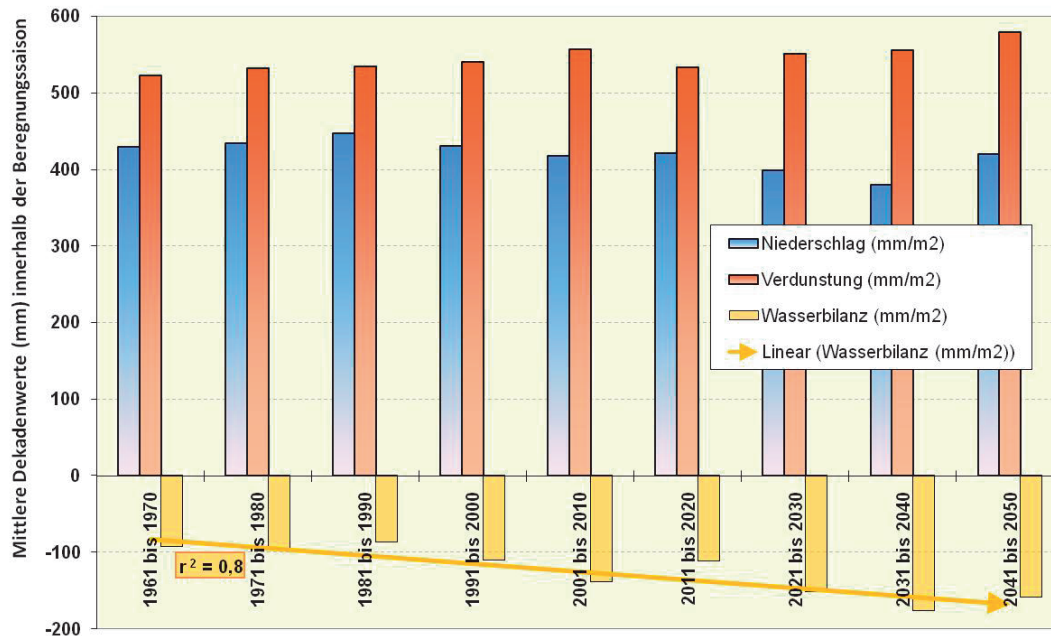


Abb. 5: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie Wasserbilanz (jeweils in mm) innerhalb der Berechnungsperiode

In Abb. 5 werden die Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung und die aus deren Differenz berechnete Wasserbilanz innerhalb der Berechnungsperiode visualisiert. Für die Wasserbilanz ergibt sich ein statistisch abgesicherter abnehmender Trend. Die sukzessive negativer werdende Wasserbilanz resultiert einerseits aus den leicht abnehmenden Niederschlägen sowie andererseits aus der leicht gestiegenen Verdunstung. Beide Entwicklungstendenzen ergeben in der Summe eine stärker ausgeprägte negative Wasserbilanz innerhalb der Berechnungsperiode. Im Durchschnitt berechnet sich pro Jahrzehnt eine mit -8 bis -12 mm stärker negativ werdende Wasserbilanz. Dies bedeutet, dass der durchschnittliche Zusatzwasserbedarf sich pro Dekade um ca. 10 mm erhöhen würde.

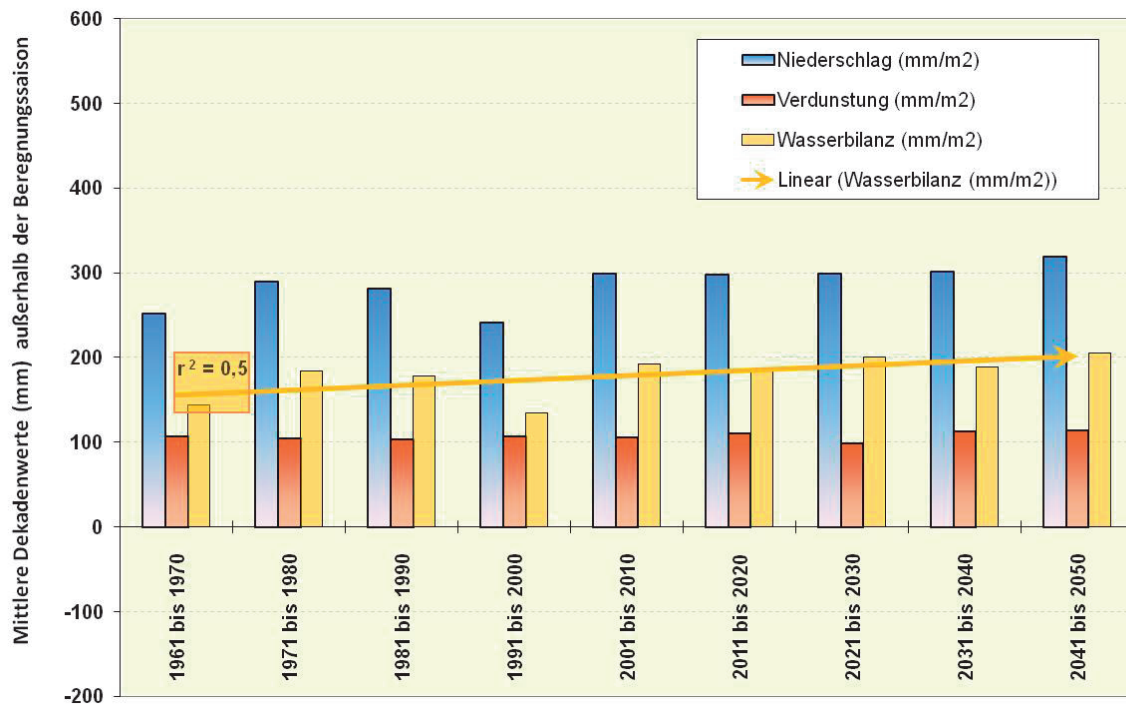


Abb. 6: Mittlere Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie Wasserbilanz (jeweils in mm) außerhalb der Beregnungssaison

Die in Abb. 6 aufgetragenen mittleren Dekadenwerte für Niederschlag, Verdunstung sowie die Wasserbilanz zeigen außerhalb der Beregnungssaison (Mitte Oktober bis Mitte März) eine völlig andere Ausprägung als dies während der Beregnungszeit der Fall ist. Die Regenmengen liegen mit durchschnittlich 300 mm deutlich unter denen innerhalb der Beregnungssaison und zeigen eine leicht zunehmende Tendenz. Die Verdunstung, die innerhalb des Beregnungszeitraums mit steigender Tendenz durchweg über 500 mm liegt, weist für die beregnungsfreie Zeit Werte um 100 mm aus, allerdings ohne erkennbaren Trend. Die Wasserbilanz außerhalb der Beregnungszeit, als Resultierende beider Größen, zeigt eine statistisch schwach abgesicherte zunehmende Tendenz, die maßgeblich auf die tendenziell höheren Niederschläge zurückzuführen ist.

### 2.2.3 Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Anbauverhältnisse

Als Grundlage für die Abschätzung werden die Ergebnisse der Befragung sowie die Einschätzung der Entwicklung von Fachberatern (Gemüsebau) herangezogen.

#### Entwicklung der Beregnungsflächen:

Die kartografische Erfassung der Beregnungsflächen ergab, dass derzeit 96 % der landwirtschaftlichen Fläche beregnet werden kann. Dies bedeutet, dass nahezu alle Ackerflächen bereits beregnet werden können. Durch die klimatische Entwicklung ist zu erwarten, dass auch die wenigen Restflächen für die Beregnung erschlossen werden.

#### Veränderung der Produktionstechnik:

Die anhaltende Ausweitung der Bebauungsflächen (Siedlung, Verkehr) im Hessischen Ried, die mit einem Rückgang der ackerbaulich genutzten Flächen einhergeht, wird sich auf die Nutzung der verbleibenden landwirtschaftlichen Flächen auswirken. Weiterhin bietet das Hessische Ried gute Voraussetzungen für die landwirtschaftliche Beregnung. Die hydrogeologischen Verhältnisse des Grundwasserleiters (Porengrundwasserleiter, meist aus Sanden und Kiesen bestehend), teilweise geringe Grundwasserflurabstände sowie die vorhandene



Rheinwasseraufbereitung in Biebesheim schaffen Bedingungen, die für die landwirtschaftliche Beregnung als ideal anzusehen sind. Theoretisch könnte ein Mangel an Beregnungswasser durch die verstärkte Nutzung von aufbereitetem Rheinwasser ausgeglichen werden. In anderen Gebieten mit intensiver Landnutzung (z. B. Gemüseanbau) sind derart günstige Bedingungen für eine zukünftig notwendig werdende Zusatzbewässerung nicht vorhanden. Die relative Vorzüglichkeit des Hessischen Rieds könnte demnach zur Folge haben, dass sich die Flächennutzung im Ried intensiviert. Falls der Trend Beerenobst anhält, könnte dies mit einer sukzessiven Ausweitung der Flächen mit Tropfbewässerung einhergehen, da diese Kulturen mehrjährig sind. Gleiches gilt für den Spargelanbau, der ebenfalls durch eine Tropfbewässerung weiter optimiert werden könnte.

#### Mögliche Änderungen hinsichtlich der anzubauenden Kulturen:

Während Erdbeeren, Beerenobst, Spargel und weiteres Gemüse einen hohen Arbeitsaufwand bei der Produktion bedingen, ist der Anbau von z. B. Buschbohnen, Zwiebeln aber auch Arznei- und Gewürzpflanzen gut zu mechanisieren. Es ist denkbar, dass die vorherrschenden landwirtschaftlichen Kulturen wie Getreide und Mais daher zugunsten der vorgenannten Gruppen leicht zurückgehen.

Allgemein ist festzuhalten, dass die Entwicklung der Anbauverhältnisse und damit auch die Veränderung der Produktionstechnik sehr stark von der Nachfrage bzw. Marktlage und der Vermarktungsstruktur abhängig ist. Erhöht sich der Anteil der Selbstvermarkter, wird sich ebenfalls der Anteil an intensiven gärtnerischen Kulturen erhöhen. Dies zieht wiederum eine Veränderung der Produktionstechnik nach sich.

### **3 Diskussion der Ergebnisse**

#### Erschließung der Beregnungsflächen

Die erstmalige digitale Erfassung der Beregnungsflächen im Hessischen Ried ergab eine potentielle Beregnungsfläche von 33.059 ha. Damit können derzeit 96 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit Zusatzwasser versorgt werden. In der Praxis liegt allerdings die pro Jahr tatsächlich beregnete Fläche etwas unter diesem Wert, da bei vielen landwirtschaftlichen Betrieben aus arbeitstechnischen Gründen sowie auf Grund der technischen Ausstattung nicht alle Flächen ausreichend und zur geeigneten Zeit mit Zusatzwasser versorgt werden können.

Das Beregnungswasser stammt zum überwiegenden Teil aus dem Grundwasser, das in der Regel direkt „vor Ort“ aus sog. Beregnungsbrunnen gefördert wird. Mit Grundwasser wird der überwiegende Teil der Beregnungsflächen bewässert (27.725 ha). Mit aufbereitetem Rheinwasser werden derzeit 5.233 ha mit Zusatzwasser versorgt. Die Verwendung von aufbereiteten Oberflächenwässern zur Beregnung spielt heute dagegen nur eine untergeordnete Rolle.

#### Beregnungssteuerung

Die durchgeführte Umfrage brachte deutlich zum Ausdruck, dass der Bewässerungseinsatz derzeit hauptsächlich durch die „Erfahrungswerte“ der Landwirte gesteuert wird. Prognosemodelle, die Witterung und den spezifischen Wasserbedarf einzelner Kulturen berücksichtigen, kommen nur vereinzelt zum Einsatz. Dies bedeutet jedoch nicht, dass Prognosemodelle als Grundlage zur Steuerung der Zusatzwassergaben abgelehnt werden. Gegen ihren Einsatz werden überwiegend arbeitstechnische Aspekte ins Feld geführt (oft haben die Betriebe einen festen zeitlichen Ablauf; Nähe der Flächen zueinander u. a.). Eine effizientere Beregnungssteuerung, die auf den Wasserbedarf der Kulturen aufbaut, kann daher nur durch eine Erhöhung des Anteils an ortsfesten Beregnungsanlagen erreicht werden. Gleich-

falls wurde deutlich, dass die Landwirte möglichst die Abend- und Nachtstunden zur Beregnung nutzen. Die Verlegung sämtlicher Bewässerungsgaben in die verdunstungsärmeren Tageszeiten ist allerdings mit der vorherrschenden Bewässerungstechnik im Hessischen Ried derzeit nicht möglich.

#### Höhe der Zusatzwassergaben

Bereits im Jahr 1994 wurde eine Befragung hinsichtlich der Höhe der Beregnungsgaben durchgeführt. Der Zusatzwasserbedarf wurde damals auf 3,5 Mio. m<sup>3</sup> für sog. „Nassjahre“ und 35 Mio. m<sup>3</sup> für „Trockenjahre“ taxiert. Die aktuelle Erhebung (2008) dagegen ergab für „Nassjahre“ einen Zusatzwasserbedarf von rund 10 Mio. m<sup>3</sup>. Bezogen auf die Beregnungsfläche von rund 33.000 ha ergibt dies eine Steigerung der Zusatzwassergaben in „Nassjahren“ von ca. 12 l/m<sup>2</sup> (Jahr 1994) auf rund 30 l/m<sup>2</sup> (Jahr 2008). Dies entspricht einer Steigerung des Zusatzwasserbedarfs im Laufe einer Dekade um 12 l/m<sup>2</sup>.

Für „Trockenjahre“ wurde mit einer Zusatzwassermenge von 35,5 Mio. m<sup>3</sup> nahezu die gleiche Größenordnung erreicht wie dies im Jahre 1994 der Fall war. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit den Arbeiten von Prof. Paschold (Vortrag im Mai 2008), der beispielhaft für die Kulturen Sommer-Zwiebel und Spinat (früh) einen zunehmenden Wasserbedarf in den letzten Jahrzehnten festgestellt hat. Dass die Beregnungsmengen in „Trockenjahren“ während der letzten 15 Jahre keine nennenswerte Steigerung erfuhren, ist vor allem auf die begrenzenden technischen Möglichkeiten zurückzuführen. Dies ist in extremen Trockenjahren mit Ertragsminderungen verbunden.

Die Ergebnisse der Befragung decken sich gut mit der Entwicklung der berechneten Wasserbilanzen. Die Modellierung der Wasserbilanzen für die Beregnungssaison auf Grund kontinuierlicher Zeitreihen für den Niederschlag und die Verdunstung von 1960 bis 2050 ergab eine mit zunehmender Zeit immer stärker negativ werdende Wasserbilanz. Hierfür sind zum einen die abnehmenden Niederschlagsmengen und zum anderen die steigende Verdunstung verantwortlich. Pro Jahrzehnt wird die Wasserbilanz um ca. 10 mm stärker negativ. Der höhere Verdunstungsanspruch muss durch die Beregnung ausgeglichen werden. Dies drückt sich durch das Mehr an Zusatzwasser in sog. „Nassjahren“ aus. Gleichfalls wurde bei der Befragung der Beregnungsverbände von deren Vorsitzenden einhellig die Meinung vertreten, dass sich der Bedarf an Zusatzwasser im letzten Jahrzehnt ständig erhöht hat und mit einer weiteren Zunahme der Zusatzwassergaben zu rechnen sei.

In der beregnungsfreien Zeit gibt es eine schwach abgesicherte Tendenz hin zu einer steigenden positiven Wasserbilanz. Dies legt den Schluss nahe, dass zu Beginn der Beregnungssaison die Böden mehr oder weniger wassergesättigt sein werden.

#### Abschätzung der zukünftig zu erwartenden Anbauverhältnisse:

96 % der landwirtschaftlichen Fläche im Hessischen Ried ist für die Beregnung aus technischer Sicht zugänglich. Aus arbeitstechnischen Gründen liegt jedoch der tatsächliche Anteil „Flächen mit Zusatzwassergaben“ unter diesem Wert. Zukünftig könnte jedoch auf Grund des „Wasserreichtums“ im Ried eine Intensivierung des Anbaus erfolgen. Dies würde zwangsläufig dazu führen, dass ein höherer Anteil der technisch erschlossenen Beregnungsflächen in optimaler Weise (auch in Richtung der Anzahl der Beregnungsgaben) genutzt würde. Gleichfalls ist bei Beerenobst- und Spargelanbau eine Ausweitung der Tropfbewässerung denkbar, durch die eine Optimierung der Zusatzwassergaben (Höhe und zeitliche Terminierung der Wassergaben) gegeben wäre.

Hinsichtlich der Anbauverhältnisse könnte es zu einer leichten Zunahme von gartenbaulich intensiv genutzten Flächen (z. B. Gemüse, Spargel) auf Kosten von Flächenanteilen aus der konventionellen Landbewirtschaftung (z. B. Getreide und Mais) kommen.





## 4 Zusammenfassung

Im Hessischen Ried spielt neben dem Anbau von traditionellen ackerbaulichen Kulturen vor allem die Produktion von Marktfrüchten eine herausragende Rolle. Eine wirtschaftliche landwirtschaftliche Produktion ist in dieser klimatisch begünstigten Region Hessens nur durch die Verabreichung von Zusatzwassergaben möglich. Inwieweit der prognostizierte Klimawandel eine Steigerung des Zusatzwasserbedarfs zur Folge haben könnte, war Thema der Arbeit. Die Erfassung der aktuellen Berechnungssituation im Hessischen Ried sollte hierzu die Grundlage liefern. Die Prognose der Wasserbilanz, als Grundlage für die Abschätzung des zukünftigen Zusatzwasserbedarfs, wurde mit Hilfe kontinuierlicher Zeitreihen von 1960 bis 2050 durchgeführt.

- Die Befragung der Berechnungsverbände ergab, dass derzeit bereits 96 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche potentiell beregnet werden/werden können.
- Die Berechnungssteuerung erfolgt in der Hauptsache über Erfahrungswerte der Landwirte. Prognosemodelle zu Berechnungssteuerung, die Witterung und Wasserbedarf der jeweiligen Kultur berücksichtigen, kommen nur ganz vereinzelt zum Einsatz.
- Als Zusatzwasser kommt zum überwiegenden Teil Grundwasser aus Berechnungsbrunnen zum Einsatz. Daneben stammt ein nicht unerheblicher Teil des Zusatzwassers aus der Rheinwasseraufbereitungsanlage von Biebesheim.
- Der Grundbedarf an Zusatzwasser hat sich in den letzten 15 Jahren von 3,5 Mio. m<sup>3</sup> auf 10 Mio. m<sup>3</sup> erhöht. Dies entspricht einer Zunahme des Zusatzwasserbedarfs von rund 12 l/m<sup>2</sup> innerhalb einer Dekade.
- Die Berechnung der kontinuierlichen Zeitreihen für Niederschlag und Verdunstung ergab eine mit zunehmender Zeit immer stärker negativ werdende Wasserbilanz während der Berechnungssaison. Pro Dekade wird die Wasserbilanz um ca. 10 mm stärker negativ. Als Ursache hierfür sind die abnehmenden Niederschläge sowie die steigende Verdunstung zu nennen. Dieses Defizit bedingt eine Steigerung des Zusatzwasserbedarfs pro Dekade um ca. 10 l/m<sup>2</sup> und Jahr.
- In der berechnungsfreien Zeit entwickelt sich die Wasserbilanz positiv. Dies bedingt eine höhere Wahrscheinlichkeit, dass der Bodenwasserspeicher zu Vegetationsbeginn gefüllt ist.
- Da im Hessischen Ried die erforderliche Infrastruktur für die Beregnung vorhanden ist, ist eine Zunahme der Intensivkulturen (z. B. Spargel und weiteres Gemüse, Beerenobst) bei weiter steigendem Wasserbedarf, hervorgerufen durch den Klimawandel, zu erwarten.

## 5 Literatur

- Althoff S., Berthold G., Brahmer G., von Pape W. P., Toussaint B. (1996): Ermittlung der Grundwasserneubildung aus Niederschlag im Hessischen Ried. Teilmodell des mathematischen Grundwassermodells Hessisches Ried. Bearbeitet von der Hessischen Landesanstalt für Umwelt, Wiesbaden.
- IPCC (2007): Fourth Assessment Report: Report of the Working Group I: The Physical Science Basis.
- Paschold P. J. (2008): Steuern der Bewässerung zur Erzielung qualitativ hochwertiger Erträge und zur Schonung der Umwelt. Vortrag im Rahmen einer Fortbildungsveranstaltung des HLU in Allmendfeld/Gernsheim im Mai 2008.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes Nr. 194. Offenbach.
- Spekat, A., Enke, W., Kreienkamp, F. (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Publikation des Umweltbundesamtes, Dessau, 149 S.



## Fallstudie Donauried – Auswirkungen des Klimawandels auf die Entwicklung der Nitratbelastung im Grundwasser

Thomas Gudera

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

### 1 Einführung und Zielsetzung

Der Klimawandel muss sowohl bei der Beurteilung der zukünftigen Entwicklung der quantitativen Grundwasserverhältnisse, also Grundwasserstand und Quellschüttung, als auch der Grundwasserqualität berücksichtigt werden. Am Beispiel des Langenauer Donaurieds wurde anhand einer komplexen Modellkette untersucht, wie sich die Nitratkonzentration im Grundwasser bei sich verändernden klimatischen Verhältnissen entwickeln kann. Diese Untersuchungen erfolgten in Baden-Württemberg erstmals im Rahmen des Forschungsprogramms KLIMOPASS mit dem Projekt „Auswirkung des Klimawandels auf die Entwicklung der Nitratbelastung im Grundwasser am Beispiel des Gesamteinzugsgebiets des Donaurieds“. In KLIMOPASS wurden aus Haushaltsmitteln 2011/2012 des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg angewandte Forschungsprojekte zum Themenbereich Klimawandel und Anpassung gefördert. Die Projektergebnisse dienen im Rahmen von KLIWA auch der Ergänzung der Fallstudien im Grundwasserbereich.

Das Projekt wurde von der Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Stuttgart zusammen mit GIT HydroSConsult GmbH, Freiburg unter Mitwirkung des Zweckverbandes Landeswasserversorgung und der LUBW durchgeführt (LANG ET AL. 2012). Informationen und Daten der örtlichen Landwirtschaftsverwaltung wurden einbezogen. Es konnte teilweise auf bereits vorliegende Modellierungsgrundlagen zurückgegriffen werden.

Zielsetzung war die Beschreibung von möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf die quantitativen Grundwasserverhältnisse, den Nitrataustrag aus dem Boden, die Nitratkonzentrationsentwicklung im Grundwasser und auf die Grundwassernutzung für die öffentliche Wasserversorgung.

### 2 Vorgehensweise

Die Beschreibung einer möglichen zukünftigen Entwicklung der Nitratkonzentration im Grundwasser ergibt sich aus der zu erwartenden Entwicklung des Nitrataustrags aus dem Boden und der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag. Es wurde eine Modellkette zusammengestellt, mit welcher eine Vielzahl möglicher Szenarien untersucht werden kann. Im vorliegenden Fall wurde als regionales Klimaszenario für die nahe Zukunft (2021-2050) der Datensatz WETTREG2006-A1B verwendet. Für die Vergangenheit (1951-2010) bzw. die Referenzperiode (1971-2000) wurde mit realen meteorologischen Beobachtungsdaten und den Daten des WETTREG2006-Kontrolllaufs die tägliche flächendetaillierte Sickerwasserrate mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW (KLIWA 2012) berechnet. Die instationären Grundwasserströmungsverhältnisse im Gesamteinzugsgebiet Donauried beschreibt das geeichte und anhand Tritiumdaten validierte numerische Grundwassermodell (MODFLOW). Der Nitrataustrag wurde für die Vergangenheit aus einer Kombination von Stickstoffsalden, welche Überschüsse aus Düngung, Nachlieferung aus dem Humusvorrat, Denitrifikation und Abfuhr mit dem Erntegut berücksichtigen und deterministischer Modellierung mit dem Agrar-

ökosystemmodell Expert-N bestimmt. Für die Zukunft zu erwartende Änderungen des Nitrat-austrags wurden mit Expert-N ermittelt. Die zeitliche und räumliche Entwicklung der Nitratkonzentration im Grundwasser in Vergangenheit und Zukunft wird mit dem Transportmodell MT3DMS berechnet.

### 3 Ergebnisse

#### 3.1. Projektgebiet

Das Projektgebiet befindet sich im Herzen des aus drei Bundesländern bestehenden KLIWA-Kooperationsgebietes (Abb. 1) an der Grenze von Baden-Württemberg zu Bayern (Abb. 3.2) und umfasst das Gesamteinzugsgebiet des Donaurieds mit dem Kiesgrundwasserleiter zwischen Sontheim und Ulm sowie den Karstgrundwasserleiter bis zur Karstwasserscheide auf der Schwäbischen Alb. Das Projektgebiet ist Teil des überregionalen Karstgrundwasserleiters im Oberjura (siehe Abb. 3.1 und 3.2), für den derzeit ein Grundwassermodell erstellt wird. Die hauptsächliche Grundwasserneubildung findet im offenen Karstaquifer des Oberjuras statt, die mit dem Grundwasseraufstieg im Donauried (Abb. 3.3) den Wasserreichtum des Donaurieds ausmacht. Die Neubildungsflächen auf der Schwäbischen Alb und im Donauried werden intensiv durch die Landwirtschaft genutzt, so dass hier Stoffe aus der Landwirtschaft in das Grundwasser eingetragen werden.

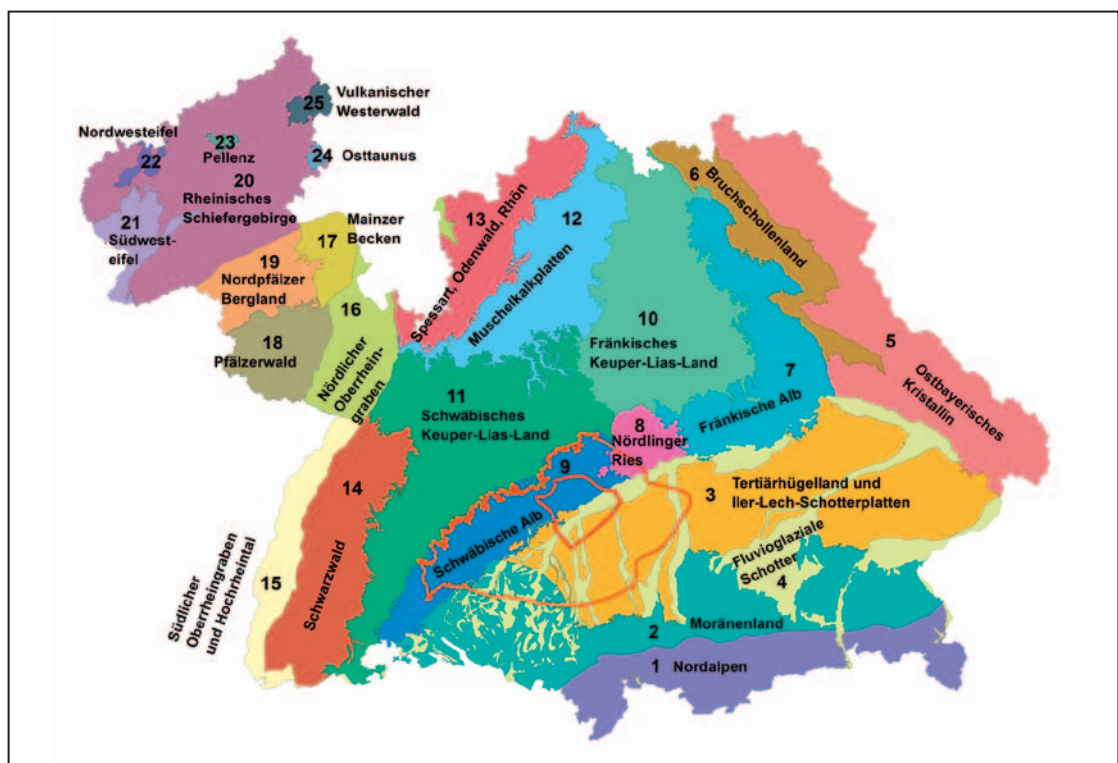


Abb. 1: Lage des Projektgebietes (rote Linie) im Kontext des in naturräumlich-hydrogeologische Einheiten gegliederten KLIWA-Kooperationsgebietes. Orange: Großräumiges Grundwassermodellgebiet Oberjura.

Im Donauried östlich von Ulm zwischen Langenau und Sontheim entnimmt der Zweckverband Landeswasserversorgung, der zu den größten Fernwasserversorgungen Deutschlands zählt, an sechs Fassungsanlagen Grundwasser aus dem Kies- und Karstgrundwasserleiter. Mit einer Entnahme von über 30 Mio. m<sup>3</sup>/a aus dem Donauried bilden diese Brunnen ein wesentliches Standbein der Wasserversorgung Baden-Württembergs. Das Ried ist seit jeher



ein Wasserüberschussgebiet, das heute auch intensiv landwirtschaftlich genutzt wird. Zudem birgt das Donauried ein bedeutendes Naturschutzgebiet, ein 42 km<sup>2</sup> umfassendes Torfmoor beherbergt eine vielfältige Flora und Fauna. Weite Bereiche des Donaurieds sind daher Vogel- und Landschaftsschutzgebiet.

### 3.2 Grundwasserneubildung aus Niederschlag

Die Berechnung der flächenhaften Grundwasserneubildung aus Niederschlag erfolgte mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW, welches tatsächliche Verdunstung und Sickerwasserrate auf Basis von meteorologischen Eingangsdaten in Tagesschritten berechnet (KLIWA 2012). Die Grundwasserneubildungsberechnung für die Vergangenheit erfolgte auf Grundlage von Messdaten für den Zeitraum 1951 bis 2010 und auf Grundlage der Daten des WETTREG2006 Kontrolllaufes für 1971 bis 2000 (Ist-Zustand). Für die Abschätzung der zukünftigen (2021 bis 2050) Grundwasserneubildung aus Niederschlag wurden auf Basis der WETTREG2006 Projektionen eine trockene, ein mittlere und ein feuchte Klimaprojektion respektive eine niedrige, mittlere und hohe Grundwasserneubildungsprojektion für das Untersuchungsgebiet ausgewählt.

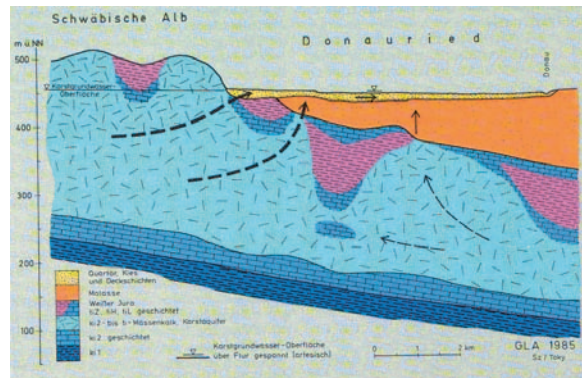
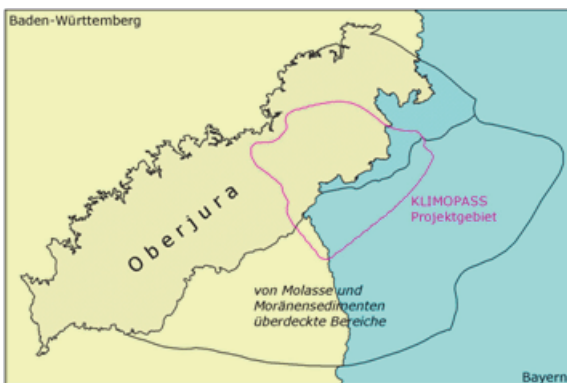


Abb. 2: Lage des Projektgebietes an der Grenze von Baden-Württemberg zu Bayern mit Aufteilung in offenen und überdeckten Oberjura-karst.

Abb. 3: Geologischer Schnitt durch das Projektgebiet.

Tab. 1: Mittlere jährliche Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts (1951-2010).

Region	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Temp [°C]	Prec [mm]	KapAuf [mm]	ETA [mm]	Qdir [mm]	Sick [mm]
Projektgebiet	1443,7	7,9	797,0	10,1	522,7	36,8	238,0
Nord	945,0	7,8	807,3	5,5	509,6	31,3	266,9
Karst	777,0	7,7	822,7	2,1	501,7	33,3	288,2
Kies	126,4	8,1	736,8	17,3	542,0	28,9	166,3
Torf	41,6	8,0	734,9	33,2	559,4	0,8	175,1
Süd	498,7	8,1	777,5	18,8	547,5	47,1	183,3

Temp = Lufttemperatur, Prec = Niederschlag, KapAuf = kapillarer Aufstieg, ETA = tatsächliche Verdunstung, Qdir = Direktabfluss von versiegelten Flächenanteilen, Sick = Sickerwasserrate unterhalb der durchwurzelten Bodenzone



In Tab. 1 sind die langjährigen mittleren Jahreswerte der Bilanzgrößen des Bodenwasserhaushalts für die Periode 1951-2010 zusammengestellt. Neben den über das gesamte Projektgebiet gemittelten Werten sind jene für den nördlich (Einzugsgebiet des Donaurieds) und südlich der Donau gelegenen Teil angegeben. Weiterhin erfolgt für den nördlichen Teil eine separate Angabe für die Teilgebiete, in welchen der Grundwasserleiter oberflächennah als Karst- (Alb), Kies- oder Torfaquifer (Donauried) ausgebildet ist (Abb. 4). Die angegebenen Sickerwasserraten sind als Nettogröße zu verstehen und bereits um einen möglichen kapillaren Aufstieg bereinigt.

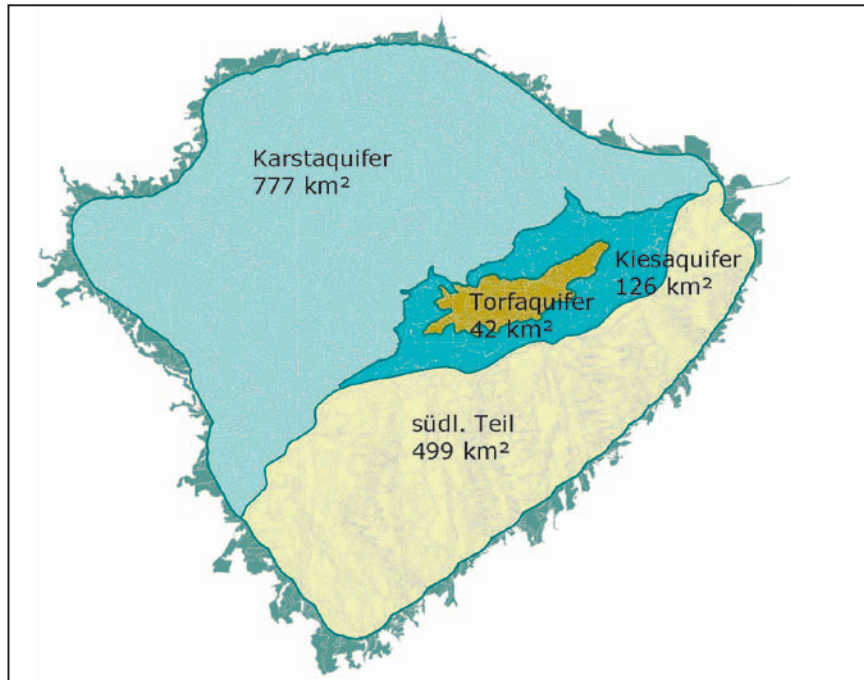


Abb. 4: Teilbereiche des Projektgebietes.

Tab. 2: Bias der aus WETTREG2006 für die Referenzperiode 1971-2000 berechneten Sickerwasserraten gegenüber dem Ergebnis aus Stationsdaten. WETTREG Mittel entspricht dem Mittelwert aus 10 WETTREG-Realisationen, WETTREG Auswahl „Normal“ entspricht einer mittleren ausgewählten Realisation.

Region	Stationsdaten [mm/a]	WETTREG Mittel [mm/a]	Bias [%]	WETTREG Auswahl "Normal" [mm/a]	Bias [%]
Projektgebiet	236,4	219,4	-7,2	222,8	-5,8
Nord	262,6	249,2	-5,1	253,3	-3,5
Karst	284,2	271,6	-4,4	275,9	-2,9
Kies	160,5	145,1	-9,7	148,2	-7,7
Torf	168,1	146,6	-12,8	151,3	-10,0
Süd	187,0	162,9	-12,9	164,9	-11,8



Tab. 3: Klimaprojektion 2021-2050 „Normal“.

Projektion 2012-2050 „Normal“				Klimasignal „Normal“		
Region	Temp [°C]	Prec [mm/a]	Sick [mm/a]	Temp [°C]	Prec [%]	Sick [%]
Projektgebiet	9,0	764,6	206,8	1,1	-2,7	-7,2
Nord	8,9	777,3	235,5	1,1	-3,4	-7,0
Karst	8,8	791,8	258,0	1,1	-3,8	-6,5
Kies	9,2	710,8	134,7	1,0	-1,6	-9,1
Torf	9,2	710,0	121,1	1,0	-2,0	-20,0
Süd	9,1	740,6	152,5	1,0	-1,1	-7,5

Der Vergleich der auf Basis des WETTREG Kontrolllaufes für den Ist-Zustand berechneten Grundwasserneubildungsraten mit jenen auf Grundlage der realen meteorologischen Messwerte berechneten Raten zeigt, dass auf Basis der WETTREG-Daten eine systematische Unterschätzung der Grundwasserneubildung von etwa 6 bis 7 % bezogen auf das Projektgebiet gegeben ist (Tab. 2). Da die Grundwasserneubildung aus Niederschlag die maßgebliche Bilanzkomponente für die Grundwasserströmungsverhältnisse im Modellgebiet ist, müssen die Grundwasserneubildungsraten aus den WETTREG-Projektionen um diesen systematischen Unterschied korrigiert werden (Bias-Korrektur). Das Klimasignal der Projektion 2021-2050 „Normal“ für die Sickerwasserrate liegt bei etwa -7 % im Projektgebiet (Tab. 3), d. h. es kann von einem Rückgang der mittleren Grundwasserneubildung von etwa 7 % bezogen auf die Grundwasserneubildung im Zeitraum 1971-2000 (WETTREG Auswahl „Normal“) ausgegangen werden.

### 3.3 Grundwasserströmungsverhältnisse

Im Mittel beträgt der mit dem Grundwassermodell berechnete Wasserumsatz ungefähr  $9 \text{ m}^3/\text{s}$ , daran hat die Grundwasserneubildung aus Niederschlag einen Anteil von rund  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Die flächenhafte Grundwasserneubildung im Gesamteinzugsgebiet Donauried ist damit die dominierende Zuflusskomponente der Wasserbilanz. In Abb. 5 sind die Grundwasserneubildungsraten exemplarisch für einen Monat dargestellt. Blaue Bereiche kennzeichnen hohe und rote Bereiche niedrige Neubildungsraten. Die grauen Bereiche im Süden sind durch Molasse überdeckt. Hier findet nur eine sehr geringe Grundwasserneubildung statt, da der weitaus größere Teil über die oberflächennahen Grundwasserleiter und Vorfluter abgeführt wird, die nicht im Modell enthalten sind.

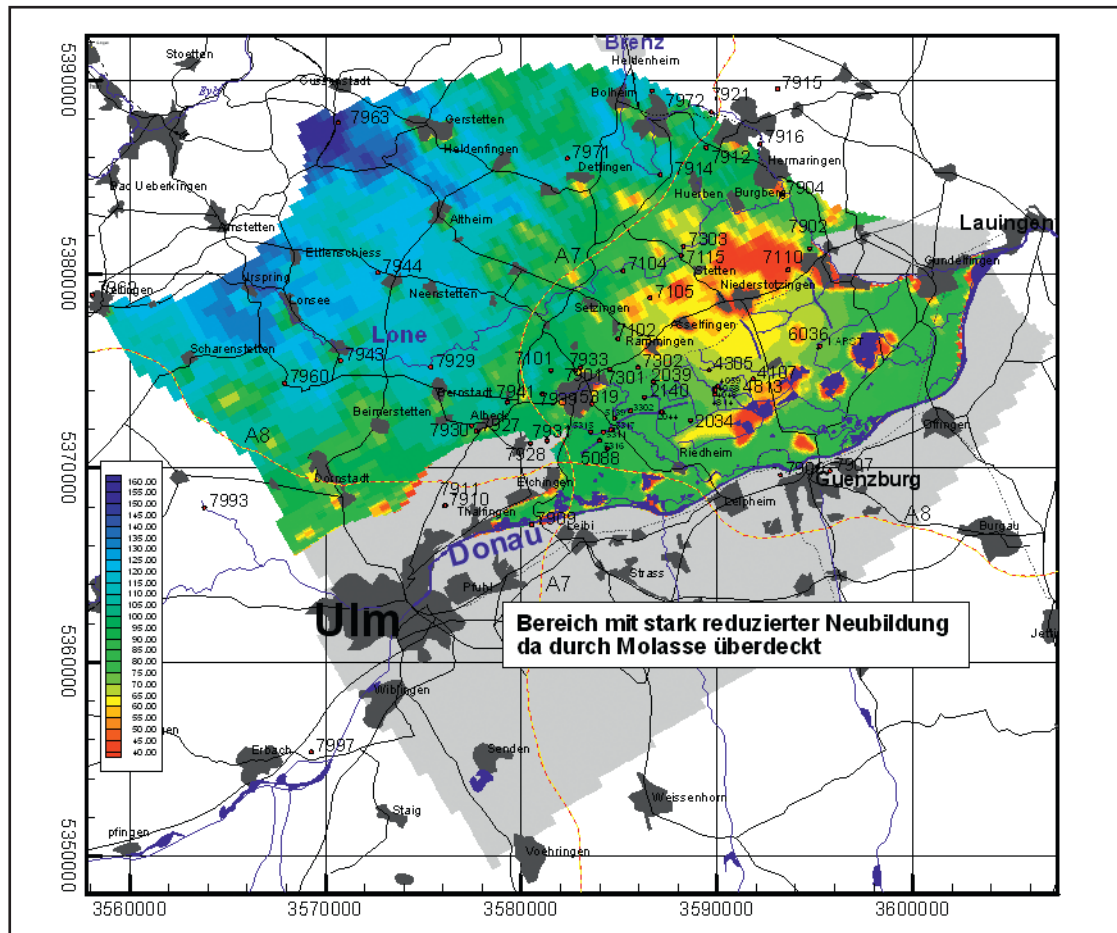


Abb. 5: Grundwasserneubildung als Randbedingung im numerischen Modell, Werte in mm/Monat. Punktsymbole mit vierstelliger Nummer stellen Grundwassermessstellen dar.

Die großräumige Grundwasserströmung im Karstaquifer ist in Abb. 3.6 anhand einer berechneten Potenzialverteilung dargestellt, sie verläuft von Nordwest nach Südost und ist im Wesentlichen auf das Donauried hin ausgerichtet. Die höchsten Potentiale befinden sich im Nordwesten mit etwa 600 m+NN, die niedrigsten im Osten des Modellgebietes mit etwa 430 m+NN.

Mit den Projektionen der biaskorrigierten Grundwasserneubildung wurden sechs Grundwassermodellläufe über einen Zeitraum von 30 Jahren durchgeführt und zwar jeweils drei (normal/trocken/feucht) für die Referenzperiode 1971-2000 und die nahe Zukunft zwischen 2021 und 2050. Bezüglich der Entnahme der Landeswasserversorgung in der Zukunft wurde angenommen, dass im Mittel 1.044 l/s aus dem Donauried entnommen werden. Dabei variiert die Entnahme jahreszeitlich, im Sommer werden bis zu 9 % mehr und im Winter bis zu 10 % weniger entnommen als im Jahresmittel. Die Piezometerhöhenverteilung im Aquifer zu Beginn der Berechnung ist für jedes Szenario dieselbe und wurde mit der Re-Simulation „Normal“ berechnet (Abb. 6).

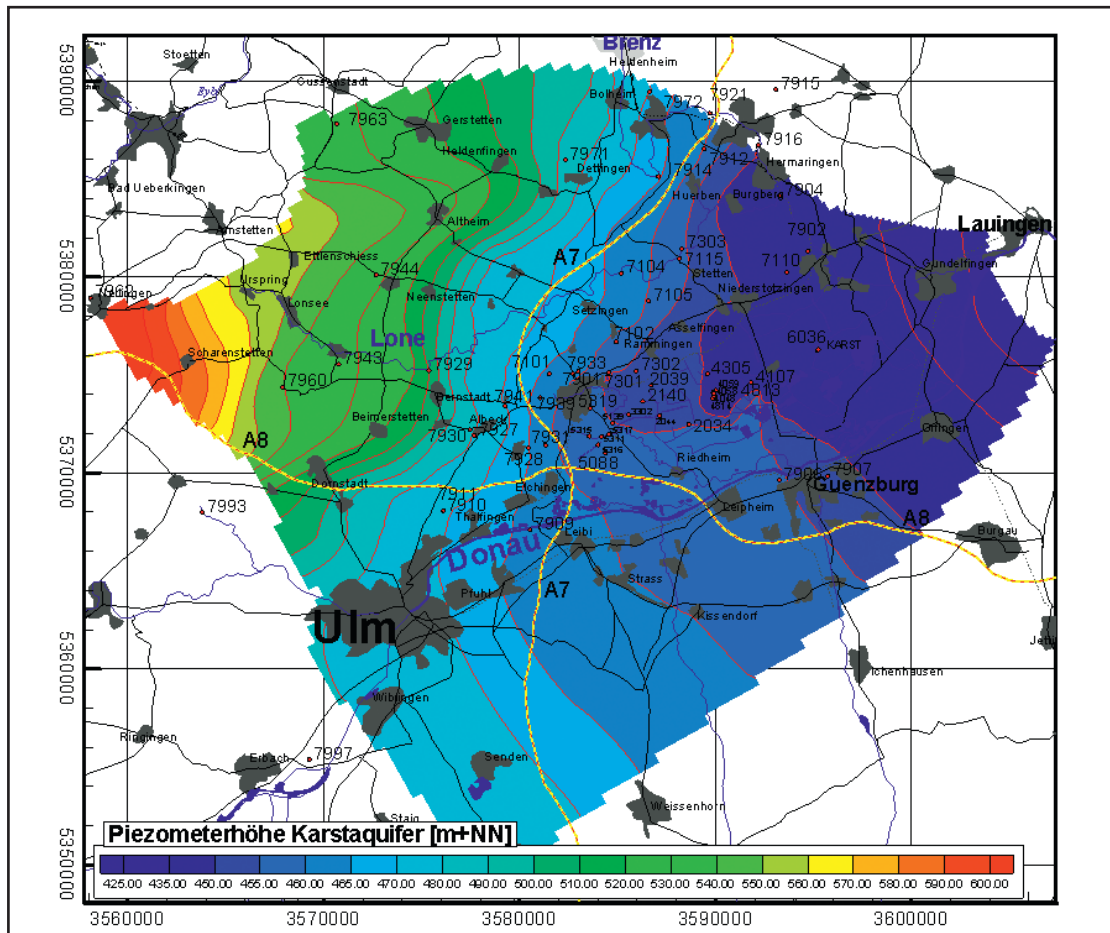


Abb. 6: Berechnete Potenzialverteilung im Karstaquifer im November 1970. Punktsymbole mit vierstelliger Nummer stellen Grundwassermessstellen dar.

In Abb. 7 sind die berechneten Piezometerhöhenganglinien an der Grundwassermessstelle 1.002 (102/814-8) im Kiesaquifer des Donaurieds exemplarisch dargestellt. Die gemessene Ganglinie und die mit der auf realen Stationsdaten basierenden Grundwasserneubildung berechneten Piezometerhöhen sind gepunktet dargestellt.

Es ist deutlich zu erkennen, dass es zwischen der gemessenen Ganglinie und der berechneten Historie eine sehr gute Übereinstimmung gibt. Die blau dargestellte Ganglinie der Re-Simulation „Feucht“ verläuft zumeist auf mittlerem Niveau, liegt aber, außer in den frühen 70er Jahren, oft unterhalb der gemessenen Werte. Die grün dargestellte auf Grundlage der Re-Simulation „Normal“ berechnete Ganglinie liegt zunächst auf mittlerem Niveau, hat aber einen Trend zu niedrigeren Wasserständen. Die orange dargestellte Kurve mit der Grundwasserneubildung der Re-Simulation „Trocken“ liegt über viele Jahre deutlich tiefer als die beobachteten Grundwasserstände und zeigt einen deutlichen Trend nach unten. Dies korrespondiert mit der zuvor gemachten Feststellung, dass die reale Grundwasserneubildung mit den WETTREG-Re-Simulationen unterschätzt wird.

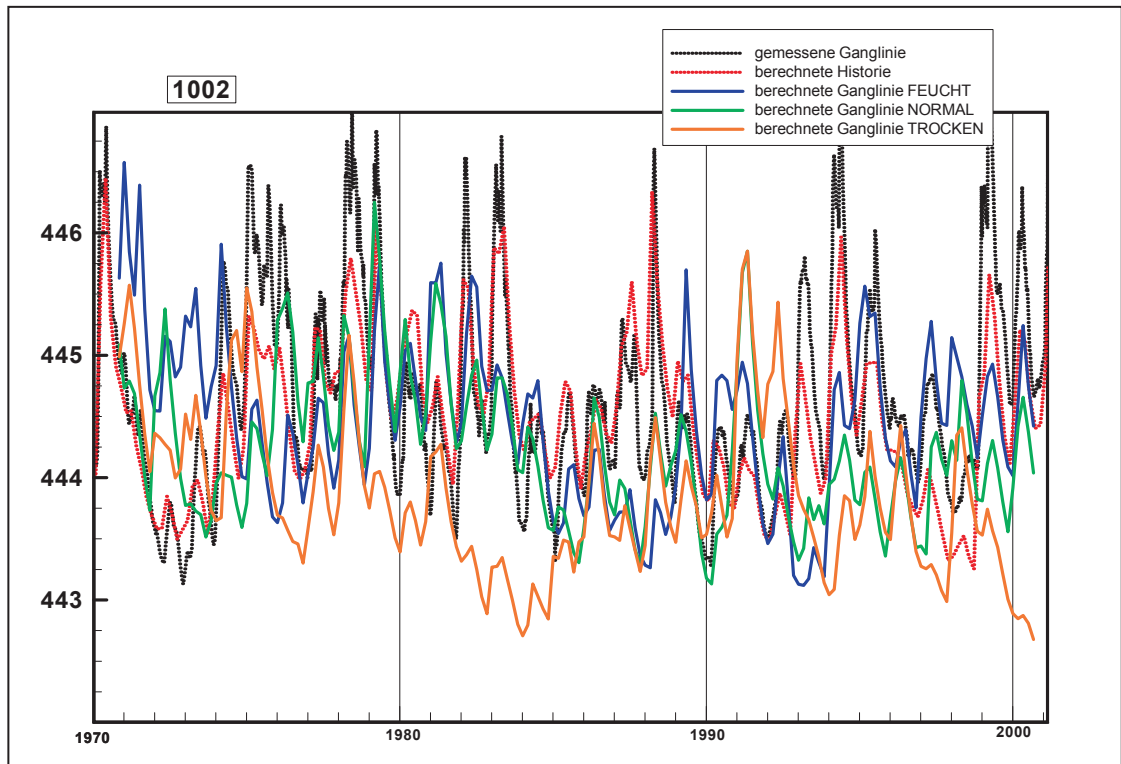


Abb. 7: Gemessene Piezometerhöhen, mit „realer“ Grundwasserneubildung sowie mit den Grundwasserneubildungsprojektionen Feucht, Normal und Trocken berechnete Piezometerhöhen an der GW 1.002 (102/814-8) im Zeitraum 1971-2000.

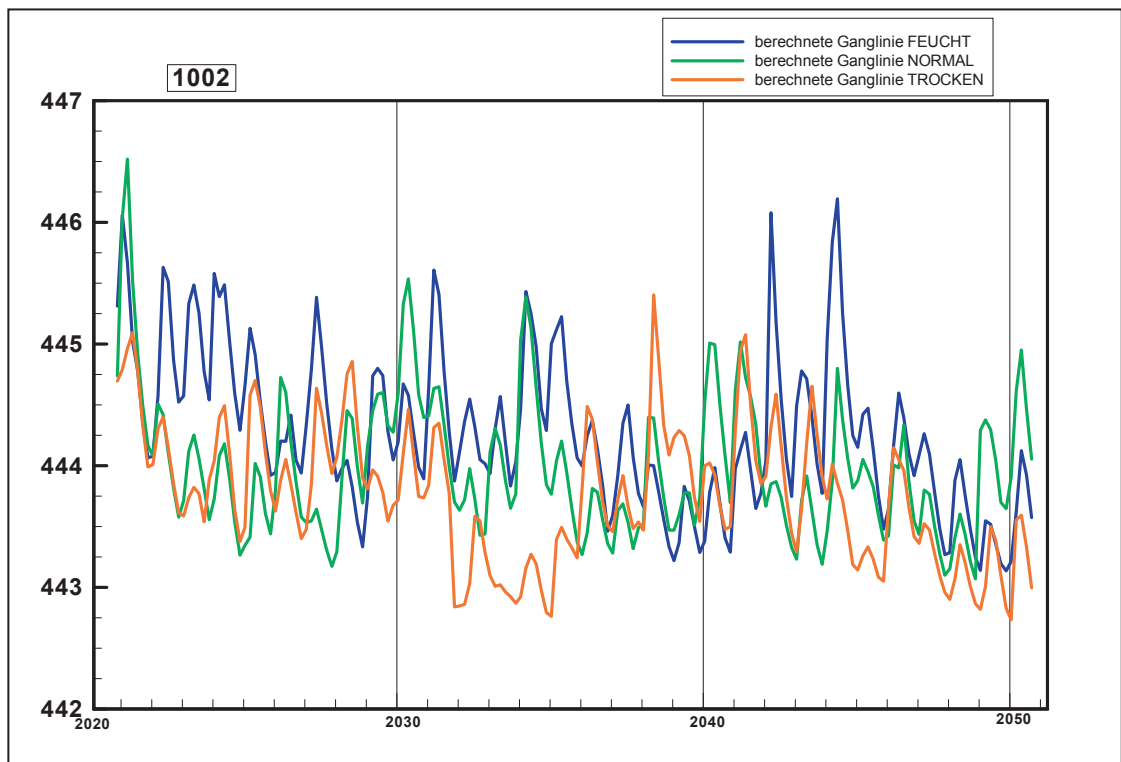


Abb. 8: Mit den Grundwasserneubildungsprojektionen Feucht, Normal und Trocken berechnete Piezometerhöhen an der GW 1.002 (102/814-8) im Zeitraum 2021-2050.





Die Modellrechnungen lassen bezüglich der Entwicklung der Piezometerhöhen im Donauried und auf der Albhochfläche bis 2050 sinkende Grundwasserstände im Dezimeterbereich, die aus der geringeren Grundwasserneubildung resultieren, erwarten (Abb. 8). Im Torf ist mit Wasserstandsänderungen von 20 bis 50 cm zu rechnen, auf der Alb liegen die Grundwasserstände im unteren Bereich der Schwankungsbreite der letzten 30 Jahre. Im Torfaquifer ist auch mit einem Schwund des Torfkörpers zu rechnen, so dass sich keine signifikanten Änderungen im Flurabstand ergeben werden.

### 3.4 Nitrataustrag aus dem Boden

Der Nitrataustrag aus den Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung im Projektgebiet wurde zunächst über einen N-Saldenansatz abgeschätzt, welcher mit vergleichsweise einfach zu erhebenden Eingangsdaten auskommt. Der N-Saldenansatz stellt mangels Prognosefähigkeit bezüglich der Reaktion des Stickstoffhaushalts auf veränderte Klimabedingungen kein geeignetes Instrument dar. Er ist jedoch ein unverzichtbarer Baustein für die Erstellung der Nitrateintragsfunktion, da das prozessorientierte Agrarökosystemmodell Expert-N bislang noch nicht für alle Kulturarten eingesetzt werden kann. Außerdem ist Expert-N für historische Zeiträume mit ungenau bekannter Bewirtschaftungsweise und älteren ertragsärmeren Sorten starken Einschränkungen unterworfen (LANG ET AL. 2012).

Mit Hilfe des lokal angepassten Agrarökosystemmodells Expert-N wurden Simulationsläufe sowohl für den historischen Nitrateintrag ab 1951 als auch die in Zukunft zu erwartenden Nitrateintragsraten durchgeführt. Dabei kommt dem prozessbeschreibenden Modell Expert-N in erste Linie die Aufgabe zu, die zeitliche Dynamik zwischen Einzeljahren mit unterschiedlichem Witterungsverlauf zu beschreiben (Abb. 10) und die Reaktion auf veränderte Klimabedingungen der Zukunft zu prognostizieren. Die absolute Höhe der langjährig mittleren Stickstoffauswaschung stammt nur für jene Kulturen und Standorte aus Expert-N, für welche das Modell die aktuellen Bilanzgrößen (bei gegebener Düngung erzielter Ertrag und insbesondere mit dem Erntegut erfolgende Stickstoffabfuhr) in hoher Genauigkeit simuliert. Für Kulturen, für welche keine Pflanzenmodelle verfügbar sind, die Pflanzenmodelle nicht hinreichend an die Bewirtschaftungsdaten angepasst werden konnten oder historische Zeiträume, für welche die standortbezogene Bewirtschaftung und die Erträge nur ungenau bekannt sind, wird das mehrjährig mittlere Niveau der Nitratauswaschung durch die abgeschätzten N-Salden gestützt und nur die relative Dynamik zwischen den Einzeljahren und die absolute Änderung unter veränderten Klimabedingungen der Zukunft mit Expert-N bestimmt.

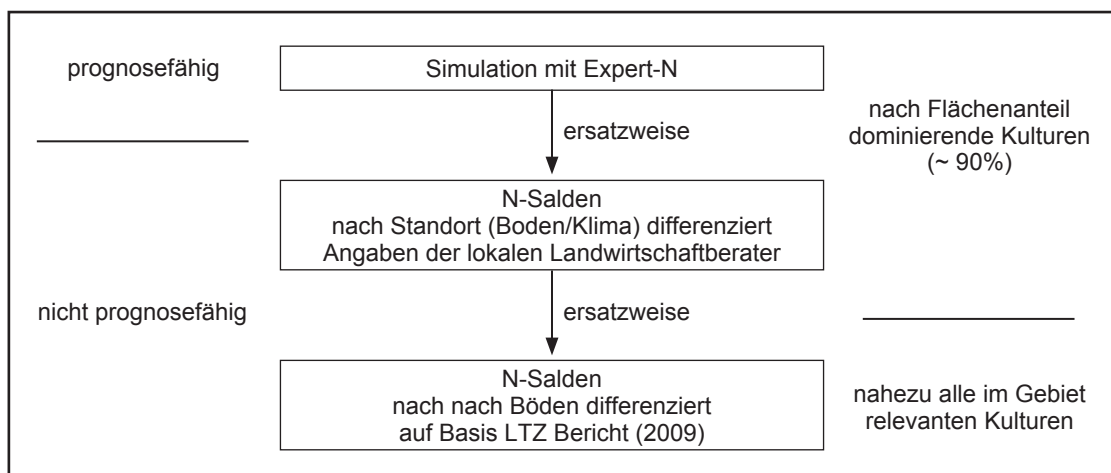


Abb. 9: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Bestimmung des Nitrataustrags aus dem Boden unter landwirtschaftlicher Nutzung.

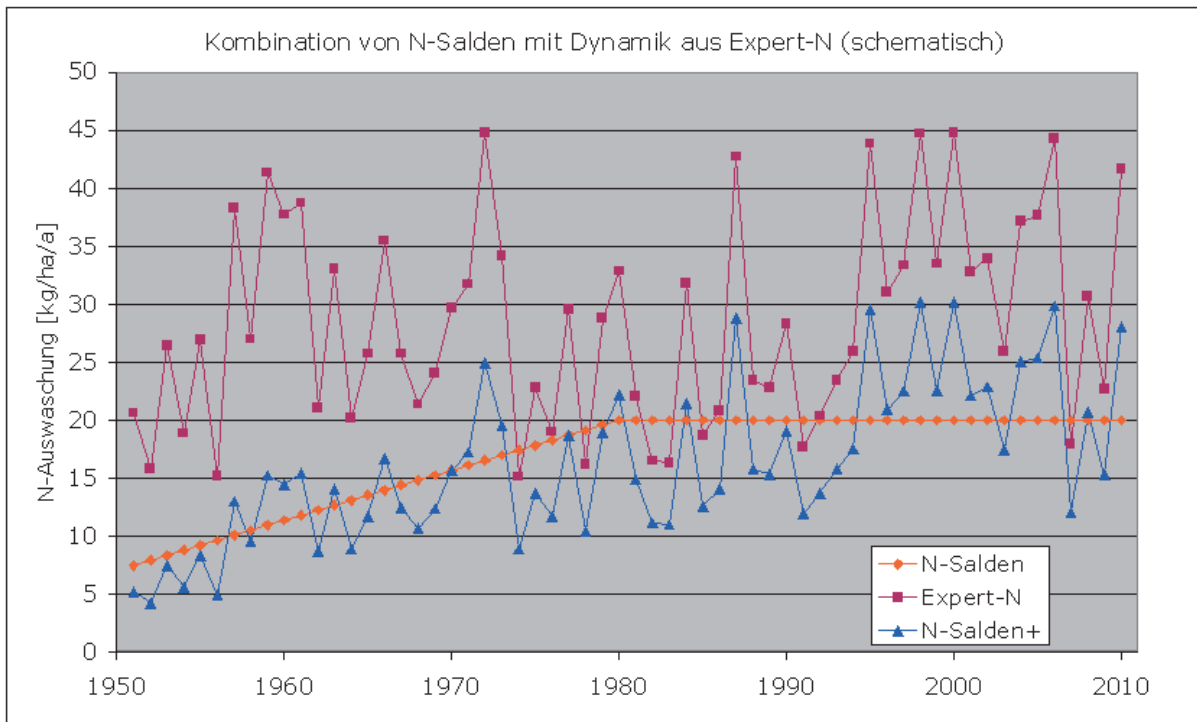


Abb. 10: Schematische Darstellung der Berechnung des Nitrataustrags aus dem Boden aus Kombination von vorgegebenem Stickstoffeintrag aus N-Salden (orange) und relativer Dynamik der Einzeljahre aus Expert-N (violett).

Klimatisch bedingt ist keine signifikante Änderung des Nitratreintrags in der Zukunft zu erwarten, falls die landwirtschaftliche Bewirtschaftung in gleicher Weise fortgeführt wird und auch aus dem Bereich anderer Nutzungen kein erhöhter Nitratreintrag erfolgt. Die Nitratauswaschung aus den landwirtschaftlichen Kulturflächen in der letzten Dekade (2001–2010) war klimatisch bedingt im Mittel höher als sie zwischen 1971 und 2000 bei gleicher Bewirtschaftung gewesen wäre (Abb. 11 und 12). Die resultierende Nitratkonzentration im Sickerwasser lag damit in der vergangenen Dekade 2001–2010 bereits auf dem Niveau, welches man auch für die nahe Zukunft (2021–2050) auf Grundlage der WETTREG-2006 Szenarien erhält.

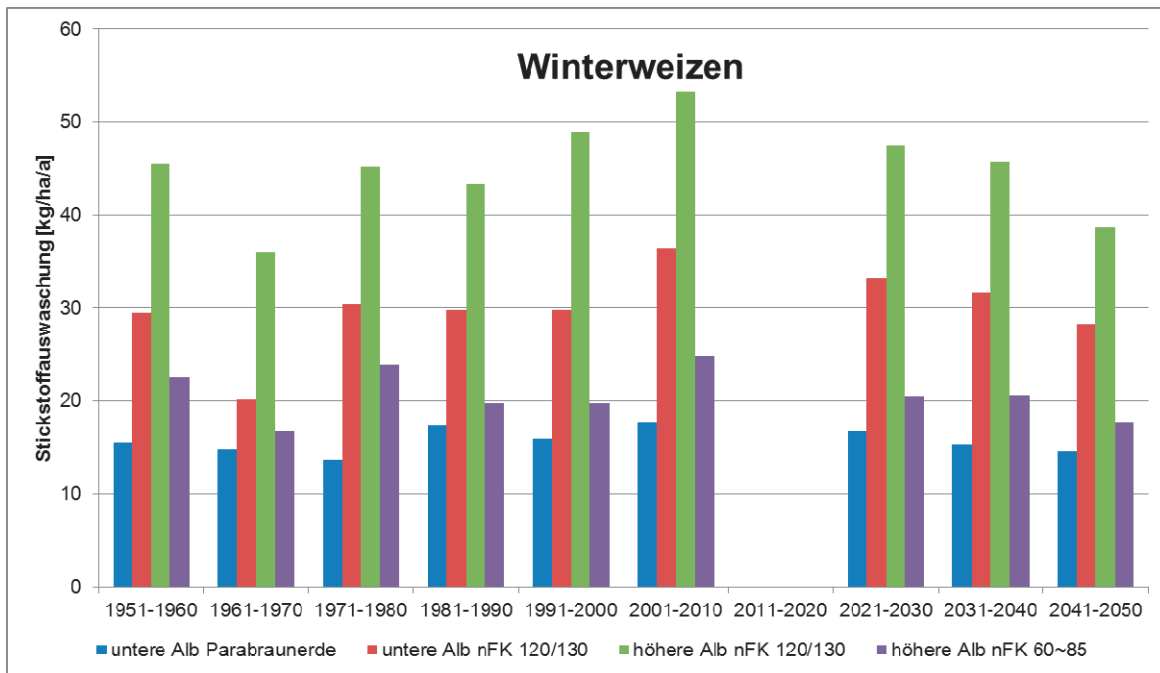


Abb. 11: Simulierte Stickstoffauswaschung für Winterweizen für unterschiedliche Typstandorte bei gleichbleibender Bewirtschaftung. Untere Alb = in der Mitte des Teilgebiets Karstaquifer; höhere Alb = im Norden des Teilgebiets Karstaquifer (vgl. Abb. 4).

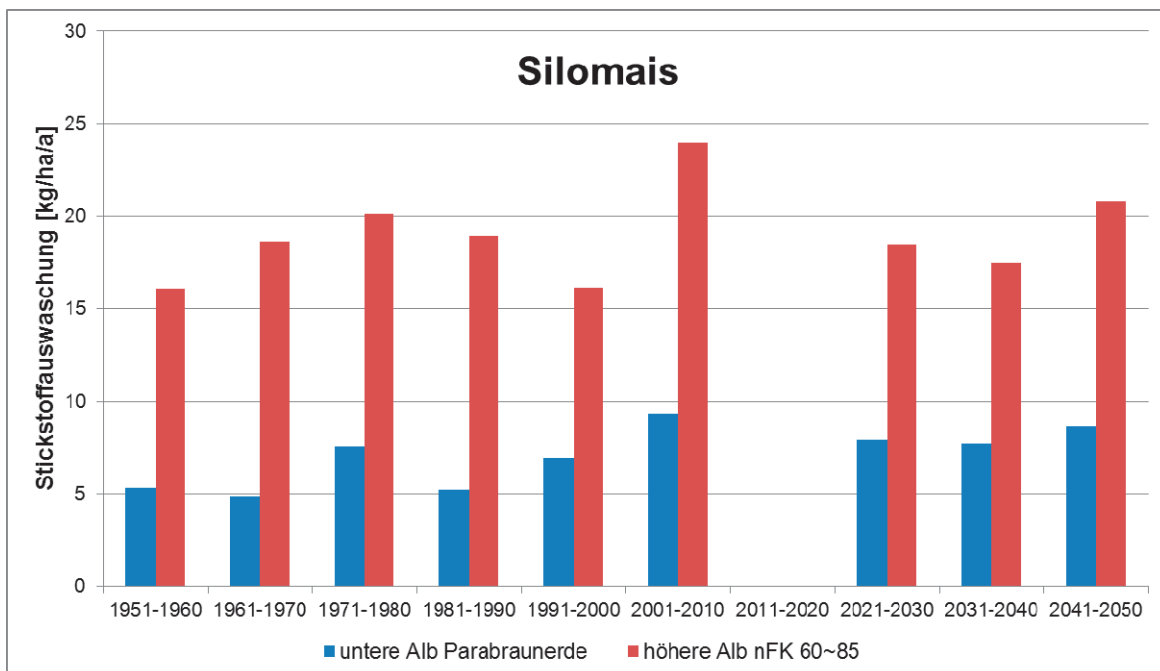


Abb. 12: Simulierte Stickstoffauswaschung für Silomais für unterschiedliche Typstandorte bei gleichbleibender Bewirtschaftung. Untere Alb = in der Mitte des Teilgebiets Karstaquifer; höhere Alb = im Norden des Teilgebiets Karstaquifer (vgl. Abb. 4).

### 3.5 Nitratkonzentration im Grundwasser

Auf Grundlage der ermittelten Nitratreintragsfunktion wurde mit dem Transportmodell MT3DMS zunächst der Nitrattransport im Grundwasser für die Vergangenheit von 1951-2010 berechnet. Die Startkonzentrationsverteilung im Grundwasser im Jahr 1951 (Abb. 13) wurde durch die Simulation einer Periode von 20 Jahren mit den Neubildungs- und Nitratreintragsverhältnissen von 1955 bestimmt. Der südliche Bereich ist von mächtigen Molasseschichten überdeckt und führt kein lokal neugebildetes Grundwasser. Die berechnete Nitratkonzentration liegt hier unter 7 mg/l. Das Grundwasser auf der Schwäbischen Alb weist eine mittlere berechnete Konzentration von ca. 12 bis 17 mg/l auf. Im numerischen Modell ergibt sich eine klare Trennlinie zwischen nitrathaltigem Grundwasser von der Albhochfläche und nitratfreiem Wasser aus dem molasseüberdeckten Bereich im südlichen Zustrom. Diese Trennlinie stimmt mit den Erkenntnissen aus Tritiummessungen überein (KUP 2009) wonach südlich dieser Trennlinie tritiumfreies Grundwasser zu finden und nördlich davon das Grundwasser deutlich jünger ist. Die für den Kies- und Torfaquifer ermittelten Startkonzentrationsverteilungen sind wesentlich inhomogener als im Karst.

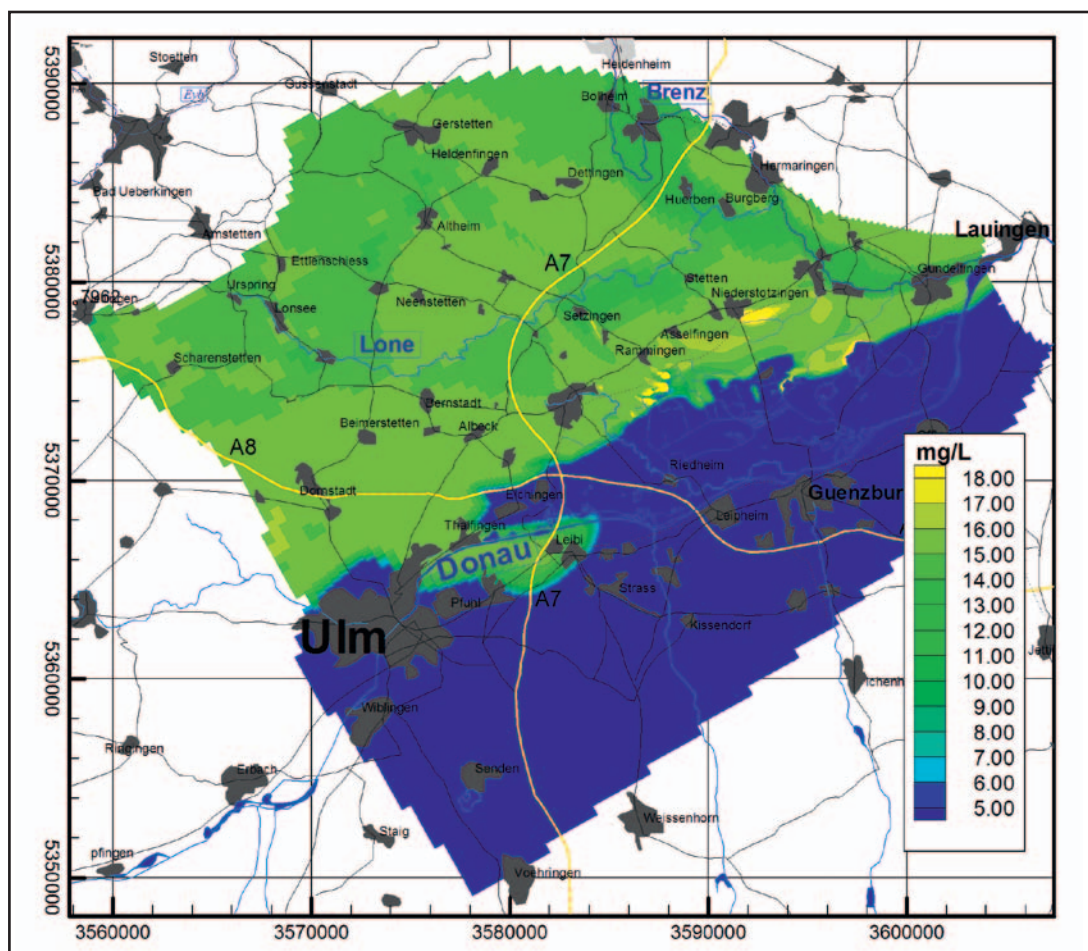


Abb. 13: Berechnete Nitratkonzentrationsverteilung im Karstaquifer im Jahr 1951.



Die anschließende Transportmodellierung mit instationärem Nitrateintrag ergab für die Historie von 1951 bis 2010, nach einigen erforderlichen Korrekturen, z. B. Erhöhung des Nitrateintrags im Einzugsgebiet der Fassung 5 (Abb. 14 und 15), eine gute Anpassung der berechneten an die gemessenen Nitratkonzentrationen an den Fassungen. Es konnten sowohl die langfristigen Trends der Nitratentwicklung als auch die unterschiedlichen Nitratkonzentrationen in den Entnahmen der Trinkwasserfassungen im Modell abgebildet werden (Abb. 16).

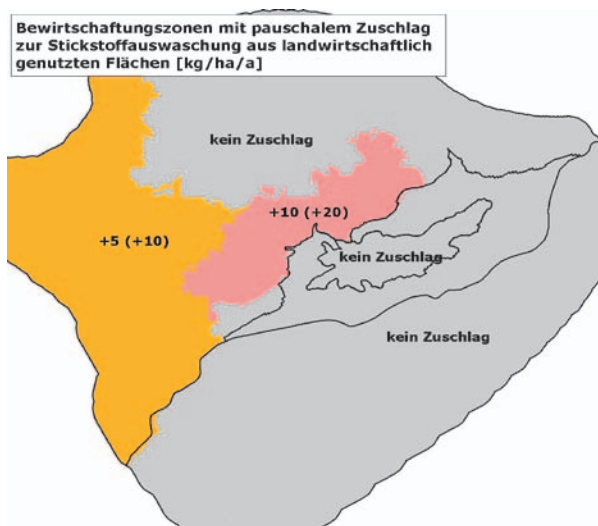


Abb. 14: Erweiterung der Nitratrandbedingung durch Zuschläge zur Stickstoffauswaschung unter landwirtschaftlichen Kulturlflächen.

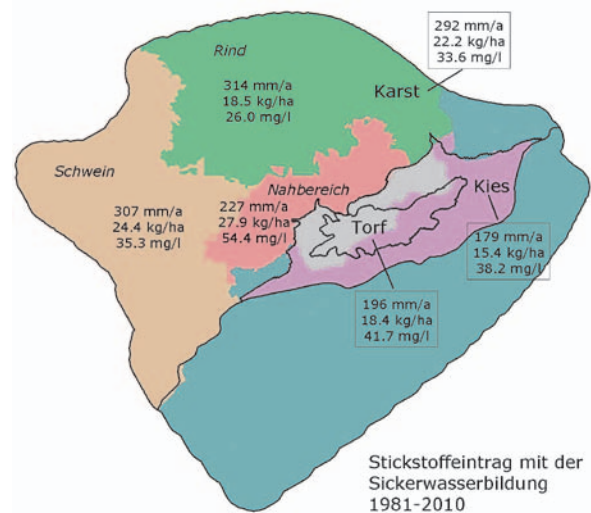


Abb. 15: Mittelwerte für Sickerwassermenge, Nitrateintrag und Nitratkonzentration in unterschiedlichen Teilbereichen des KLIMOPASS Projektgebiets, 1981-2010.

Da die Projektionen der Nitratkonzentration im Grundwasser für die nahe Zukunft erst im Jahr 2021 beginnen, musste eine plausible Nitratkonzentrationsverteilung für 2020 bestimmt werden. Hierzu wurde der Nitrattransport von 2010 bis 2020 unter stationären Strömungsbedingungen mit mittleren Grundwasserneubildungs- und Nitrataustragsraten der Jahre 2000 bis 2009 berechnet.

Als Projektionen in die nahe Zukunft bis zum Jahr 2050 wurden die Nitratkonzentrationsverteilungen für normale, hohe und geringe Nitrateinträge, ausgehend von der zuvor bestimmten Nitratkonzentrationsverteilung im Jahr 2020, berechnet. In den ersten Jahren verläuft die Konzentrationsentwicklung für geringen, normalen und hohen Nitrateintrag noch parallel, danach entwickelt sich bis 2050 eine kleine Bandbreite mit Unterschieden von maximal 4 mg/l. Die Projektionen in die nahe Zukunft von 2021 bis 2050 zeigen zudem, dass allein aufgrund der klimatischen Verhältnisse keine signifikanten Änderungen der Nitratkonzentrationen zu erwarten sind (Abb. 17). Wie die Analyse des Nitrataustrags zeigt, haben die klimatischen Verhältnisse in den Jahren 2001 bis 2010 bereits zu einer Erhöhung der Nitratkonzentration im Sickerwasser geführt.



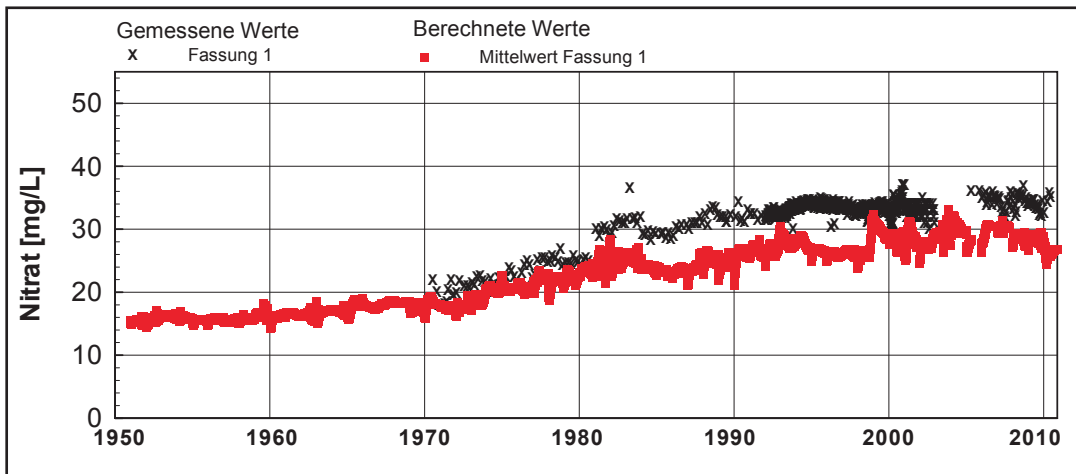


Abb. 16-1: Gemessener und berechneter Nitratkonzentrationsverlauf von 1951-2010 im Mischwasser der Fassung 1.

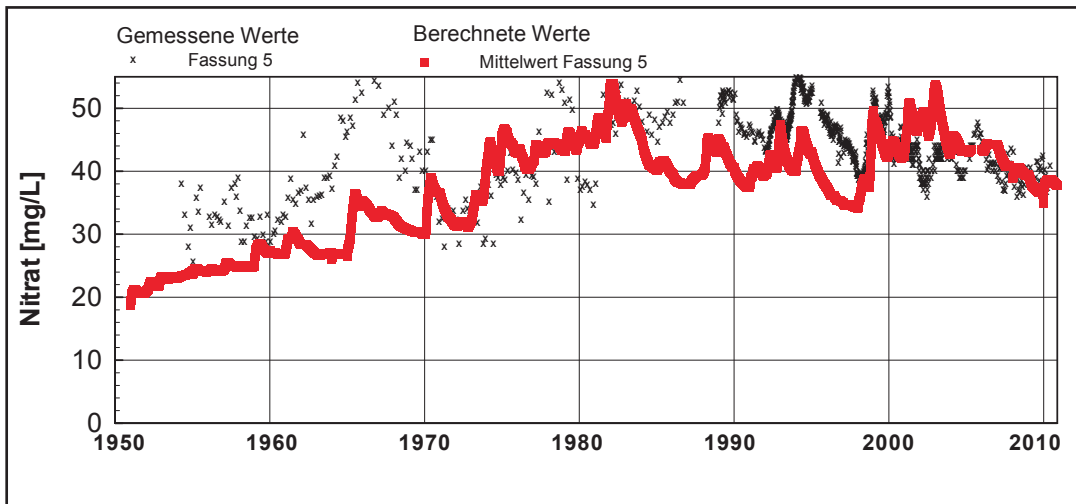


Abb. 16-2: Gemessener und berechneter Nitratkonzentrationsverlauf von 1951-2010 im Mischwasser der Fassung 5.

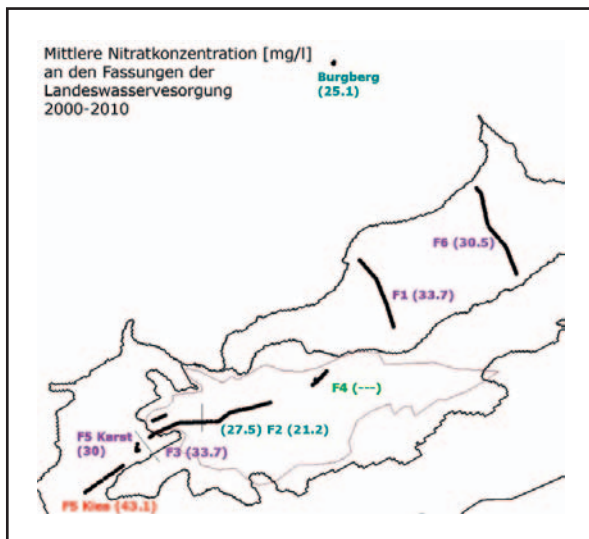


Abb. 16-3: Lage der Fassungen 1 bis 6 sowie deren mittlere Nitratkonzentrationen in den Jahren 2000-2010 (links).

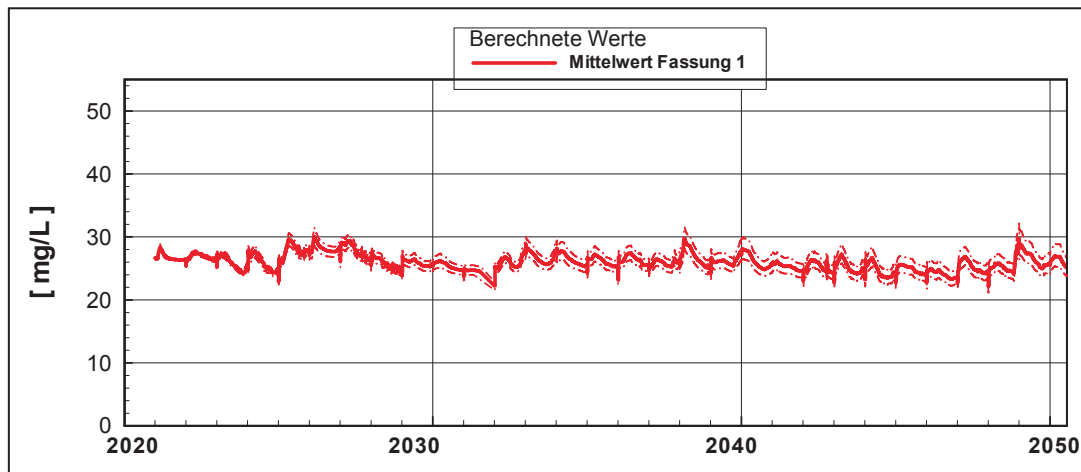


Abb. 17-1: Projektionen der möglichen klimabedingten Nitratkonzentrationsentwicklung an der Fassung 1 für die nahe Zukunft bis 2050 für normale (durchgezogene Linie), hohe und geringe (gestrichelte Linien) Nitratreinträge.

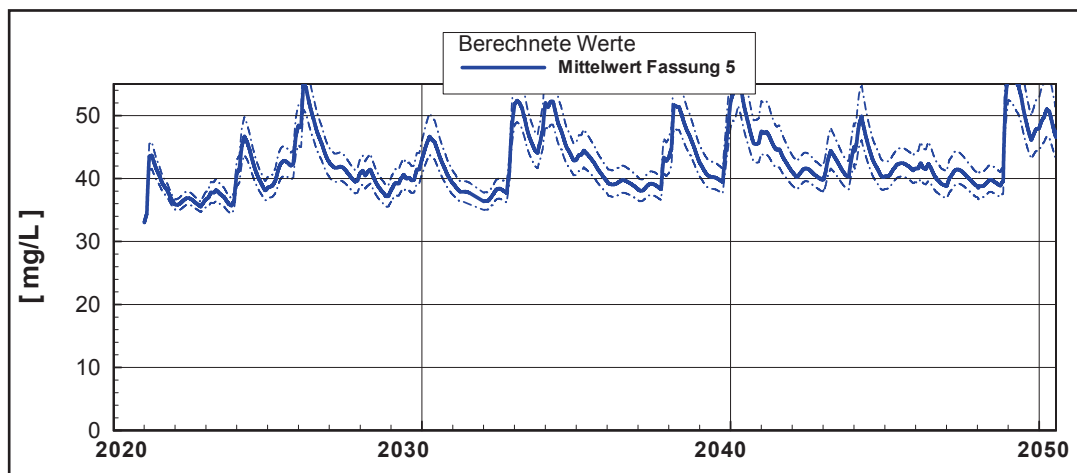


Abb. 17-2: Projektionen der möglichen klimabedingten Nitratkonzentrationsentwicklung an der Fassung 5 für die nahe Zukunft bis 2050 für normale (durchgezogene Linie), hohe und geringe (gestrichelte Linien) Nitratreinträge.

Die durchgeführten Modellberechnungen haben gezeigt, dass die Nitratkonzentration im Grundwasser nur durch einen deutlicher veränderten Eintrag zu beeinflussen ist. Allein aufgrund der unterstellten klimatischen Veränderungen ist mit keiner signifikanten Veränderung der Nitratkonzentrationen bis zum Jahr 2050 zu rechnen. Aus diesem Grund wurden in einem weiteren Grundwassermodelllauf alle Nitratkonzentrationen im Sickerwasser zu konstant 15 mg/l angenommen und konsistent zu den vorigen Berechnungen wurde der Nahbereich um die Fassung 5 entsprechend mit 30 mg/l beaufschlagt. Dadurch kann abgeschätzt werden, wie sich die Nitratkonzentration im Grundwasser und insbesondere an den Fassungen entwickeln würde, wenn durch Veränderungen der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung deutlich weniger Nitrat eingetragen würde.

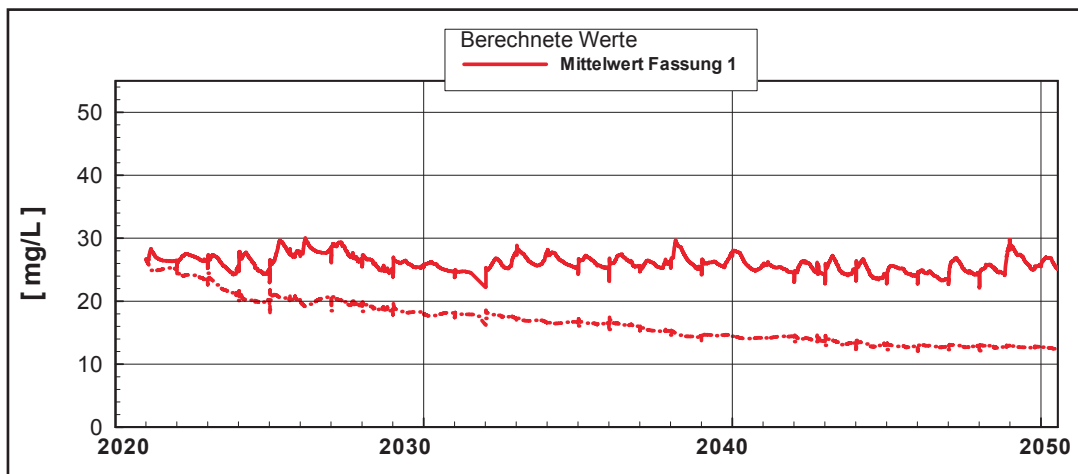


Abb. 18-1: Projektionen der möglichen klimabedingten Nitratkonzentrationsentwicklung an der Fassung 1 für die nahe Zukunft bis 2050 für normale und minimale Nitratreinträge.

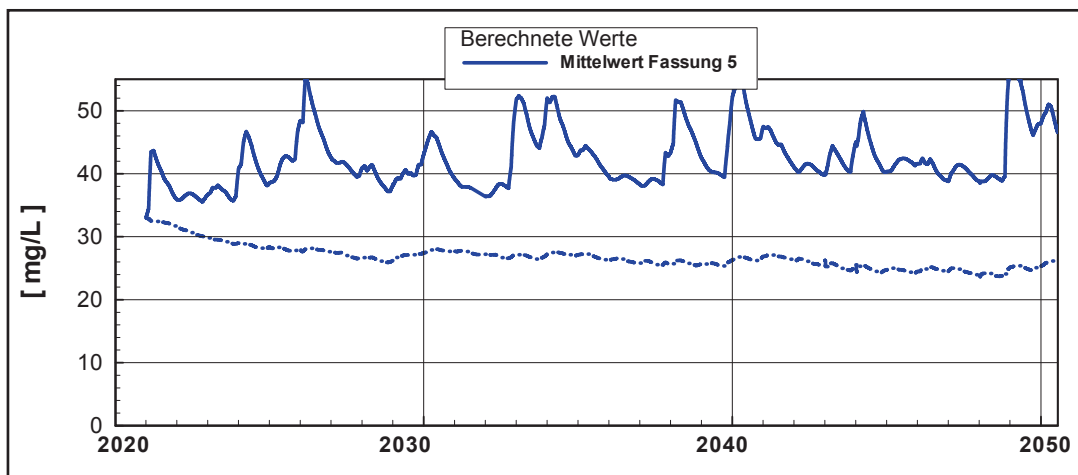


Abb. 18-2: Projektionen der möglichen klimabedingten Nitratkonzentrationsentwicklung an der Fassung 5 für die nahe Zukunft bis 2050 für normale und minimale Nitratreinträge.

#### 4 Ausblick

Mit der vorliegenden Modellkette liegt eine Grundlage vor, auf der weitergehende Studien insbesondere zu einer veränderten landwirtschaftlichen Bewirtschaftung sowie mit weiteren regionalen Klimaszenarien durchgeführt werden können. Darüber hinaus wurde durch den Einsatz der vorliegenden Modelle und Modellketten das Systemverständnis weiterentwickelt und vorhandene Defizite in der Informations- und Datengrundlage konnten identifiziert werden. Weitergehende Untersuchungen sowie eine noch stärkere Einbindung von Erfahrungen und Kenntnissen der Landwirtschaftsverwaltung sollen im Rahmen eines Folgeprojektes erfolgen.



## 5 Literatur

- KLIWA (2012): Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz - Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien. Karlsruhe, Hof, Mainz.
- Lang, U., Justiz, J., Morhard, A. (2012): Auswirkung des Klimawandels auf die Entwicklung der Nitratbelastung im Grundwasser am Beispiel des Gesamteinzugsgebiets des Donaurieds. Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM). Herausgeber: LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.
- KuP (2009): Grundwasserbilanz- und Bewirtschaftungsmodell Donauried: Bestimmung der mittleren Verweilzeiten, Bericht A334, Ingenieurgesellschaft Prof. Kobus und Partner GmbH, Stuttgart.

## Fallstudie Ilz – Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt und die Wasserversorgung im Bayerischen Wald

Dr. Wolfgang Sprenger<sup>1</sup>, Andrea Blomenhofer<sup>1</sup>, Beate Klöcking<sup>2</sup>,

Dr. Jörg Neumann<sup>1</sup>, Sybille Wendel<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof

<sup>2</sup>Büro für Angewandte Hydrologie, München

### 1 Einführung

Das Einzugsgebiet der Ilz liegt im Kristallin des Bayerischen Waldes. Hier fehlen großräumig zusammenhängende Grundwasservorkommen, so dass die lokale Wasserversorgung sehr dezentral strukturiert ist und sich primär auf die Nutzung z.T. wenig ergiebiger Quellen stützt. Den Grundwasserleiter bildet die Zersatzzone des kristallinen Grundgebirges, er ist gekennzeichnet durch einen raschen Grundwasserumsatz. Schon im Extremjahr 2003 kam es in einigen Gemeinden zu Engpässen bei der Trinkwasserversorgung. Vor diesem Hintergrund stellt sich die wichtige Frage, wie sich die Quellschüttungen bzw. die Niedrigwasserabflüsse in den Oberläufen unter dem Einfluss des Klimawandels entwickeln werden.

Auf der Basis eines deterministischen Wasserhaushaltsmodells wurden für das Einzugsgebiet der Ilz die gegenwärtige Wasserhaushaltssituation analysiert und Szenariosimulationen (Modellkette: WETTREG2006, ECHAM5-OM1 A1B) durchgeführt. Die Fallstudie dient der Ergänzung statistischer Grundwasserstands- und Quellschüttungsanalysen (KLIWA 2011) auf regionaler Ebene und makroskaliger Wasserhaushaltssimulationen (KLIWA 2012). Dabei sollen auch die bisherigen Ergebnisse der Wasserhaushaltsuntersuchungen im Quellgebiet der Ilz im Inneren Bayerischen Wald, der Großen Ohe, in das Projekt einfließen. Die Ergebnisse der Fallstudie fließen wiederum ein in das vom LfU fachlich betreute Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“, Maßnahmenpaket „Vorsorge gegen Trockenheit und Dürre“, als Teil der Bayerischen Klimaanpassungsstrategie.

### 2 Wasserhaushaltsmodellierung

Mit dem hydrologischen Modellierungssystem ArcEGMO-PSCN (Pfützner 2003, Becker et al. 2002) wurde für das Einzugsgebiet der Ilz bis zum Pegel Kalteneck (760 km<sup>2</sup>) ein räumlich und zeitlich hoch auflösendes Wasserbilanzmodell aufgebaut, das sowohl die Vegetationsdynamik und den Bodenwasserhaushalt als auch die Gewässerabflüsse simuliert. Die Aufteilung der unterirdischen Abflusskomponenten erfolgt dabei mittels des auf dem Lithofazieskonzept beruhenden Moduls SlowComp (Schwarze, 2004).

Zur Beschreibung der zukünftigen klimatischen Entwicklung wurde das im Auftrag der Nationalparkverwaltung erstellte, lokale WETTREG-Klimaszenario „Bayerischer Wald“ (ECHAM5-OM1 A1B) mit 54 Stützstellen (Klöcking et al. 2008) genutzt. Dieses liegt in Form transienter Tageswertreihen in drei repräsentativen Realisierungen (trocken, normal, feucht) hinsichtlich der Niederschlagsverteilung vor.

Die Modellvalidierung erfolgte für den Zeitraum 1980 bis 2008 anhand des Vergleichs von simulierten und beobachteten

- Abflüssen an allen 13 Pegeln im Gebiet (Einzugsgebiete s. Abb. 3, Beispiel Ganglinie Pegel Kalteneck Abb. 1)
- Schneedeckenverhalten an allen Schneepegeln des DWD und





- Bodenfeuchte, -temperaturen und Schneemengen aus dem LfU-Messgebiet „Markungsgraben“(Große Ohe, Abb. 2)

Insgesamt ist die Übereinstimmung für die genannten Parameter zwischen simulierten und gemessenen Daten gut.

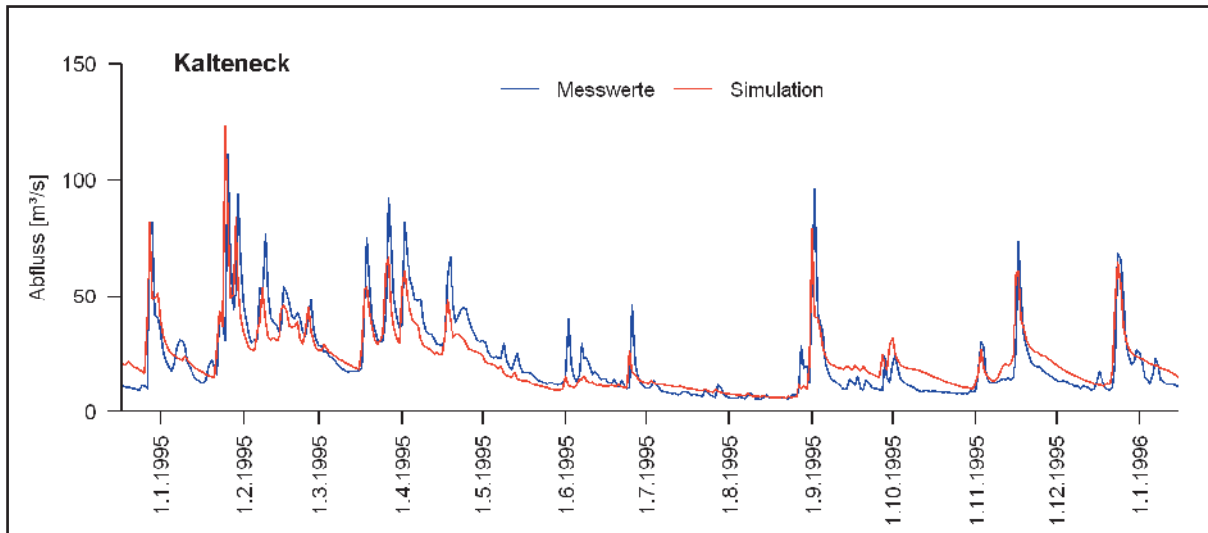


Abb. 1: Modellvalidierung anhand Pegelmessdaten (hier: Pegel Kalteneck/Ilz)

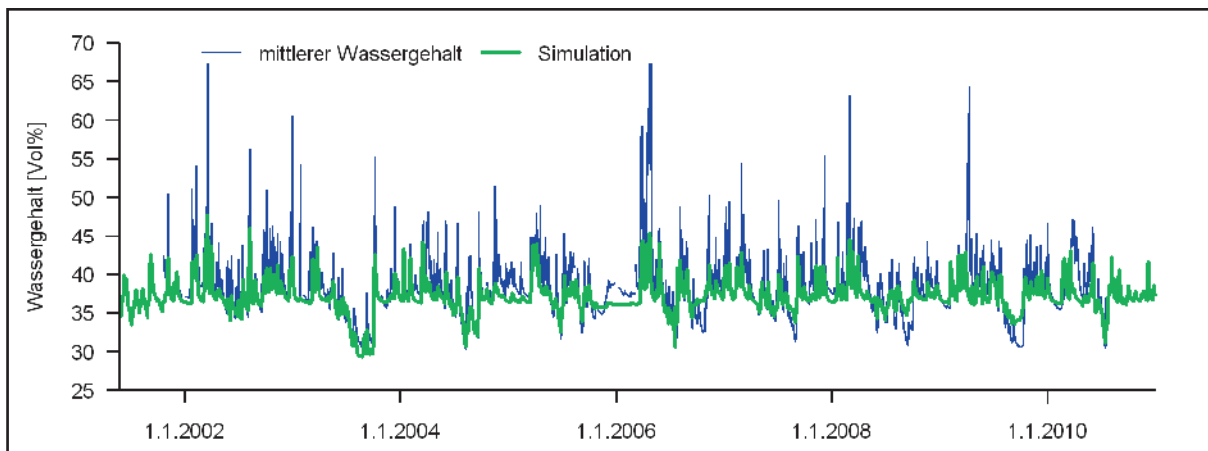


Abb. 2: Modellvalidierung anhand mittlerer gemessener Bodenwassergehalte des LfU-Messgebiets Markungsgraben

Neben der flächendifferenzierten Untersuchung der Entwicklung der wichtigsten Wasserhaushalts- und Abflusskomponenten erfolgte eine statistische Auswertung der simulierten Niedrigwasserabflüsse an insgesamt 34 Kontrollpunkten im Gewässernetz. Um das Schütungsverhalten der Quellen abbilden zu können, wurden dabei neben den 13 Abflusspegeln gezielt unbeobachtete quellnahe Oberläufe einbezogen.

Insgesamt konnten die Abflussverhältnisse und der Wasserhaushalt in der Fläche plausibel abgebildet werden. Schwierig gestaltete sich jedoch in einigen Teilbereichen des Untersuchungsgebietes die Abbildung der meteorologischen Bedingungen. Obwohl in diesem Projekt alle Stationen des Deutschen Wetterdienstes (DWD), des Tschechischen Hydrometeorologischen Institutes (CHMI), der Nationalparkverwaltung Bayerischer Wald (NPV) und weitere, z. T. temporär betriebene Stationen innerhalb bzw. im Umkreis des Untersuchungs-

gebietes einbezogen wurden (Abb. 3), konnte das Problem einer nicht optimalen Stationsabdeckung nicht abschließend gelöst werden. So ist z. B. die Erfassung der enormen Schneeniederschläge in den Hochlagen aufgrund der hier fehlenden Messstellen schwierig, was zu einer systematischen Unterschätzung der Fröhsommerabflüsse in diesen Gebieten führte.

In Kenntnis dieser Unsicherheiten wurden die Szenariosimulationen auf Basis der o. g. regionalen WETTREG-Klimaszenarien durchgeführt. Untersucht wurden die Veränderungen der wesentlichen Klima- und Wasserhaushaltsgrößen sowie der Abflusskomponenten in den Perioden 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1971–2000 für alle drei Realisierungen (trocken, normal, feucht). Die Simulationsergebnisse liegen für alle Einzelflächen des GIS-Modells (Hydrotope) als Mittelwerte für die jeweils dreißigjährigen Perioden sowie als flächengewichtete Tageswerte für die Pegelbezugsgebiete vor, ebenso die täglichen Abflüsse an den Pegeln und den zusätzlichen Kontrollpunkten. Aus diesen Wasserhaushalts- und Abflusswerten wurden für die untersuchten Perioden statistische Kenngrößen abgeleitet. Im Fokus stand dabei die Auswertung des Niedrigwassers.

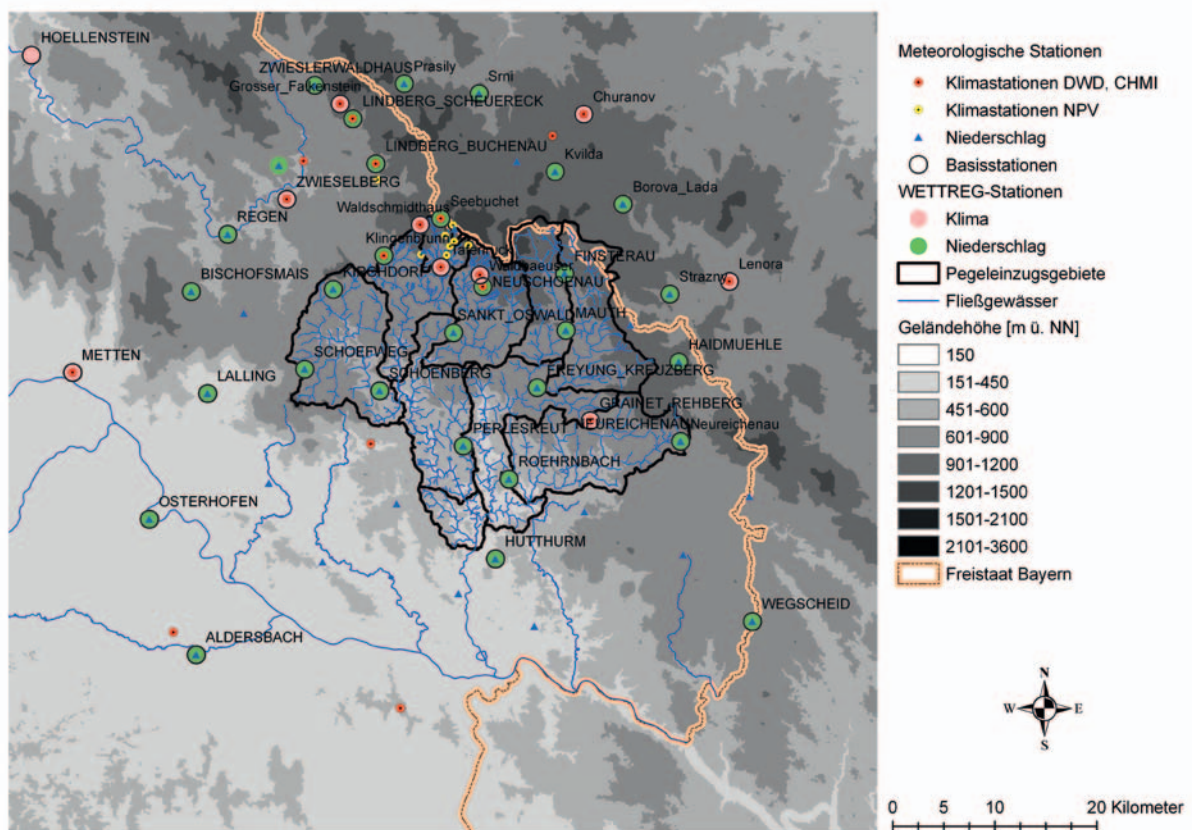


Abb. 3: Untersuchungsgebiet Ilz und Lage der für die Modellvalidierung und die Szenarioanalysen genutzten meteorologischen Stationen; Basisstationen: für die Validierung des Klimaszenarios 1980–2008 herangezogene Stationen

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Ergebnisse zur klimatischen Entwicklung

Die Szenarien beschreiben eine innerjährliche Verschiebung des Niederschlagsjahresgangs vom Sommer in den Winter bei einem leichten Rückgang der Jahresmenge (Abb. 4). Durch die erhöhten Wintertemperaturen kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Schneemengen und der Schneedauer in den Hochlagen, was zu einer zeitlichen Verschiebung der



Schneesmelze führt. Die Unterschiede zwischen dem Normalszenario (Gebietsmittel 1050 mm/a) und den beiden Extremrealisationen (trocken, feucht) ergeben für die Jahresniederschläge ein Bandbreite von ca.  $\pm 100$  mm/a für den Gesamtzeitraum (1971–2100).

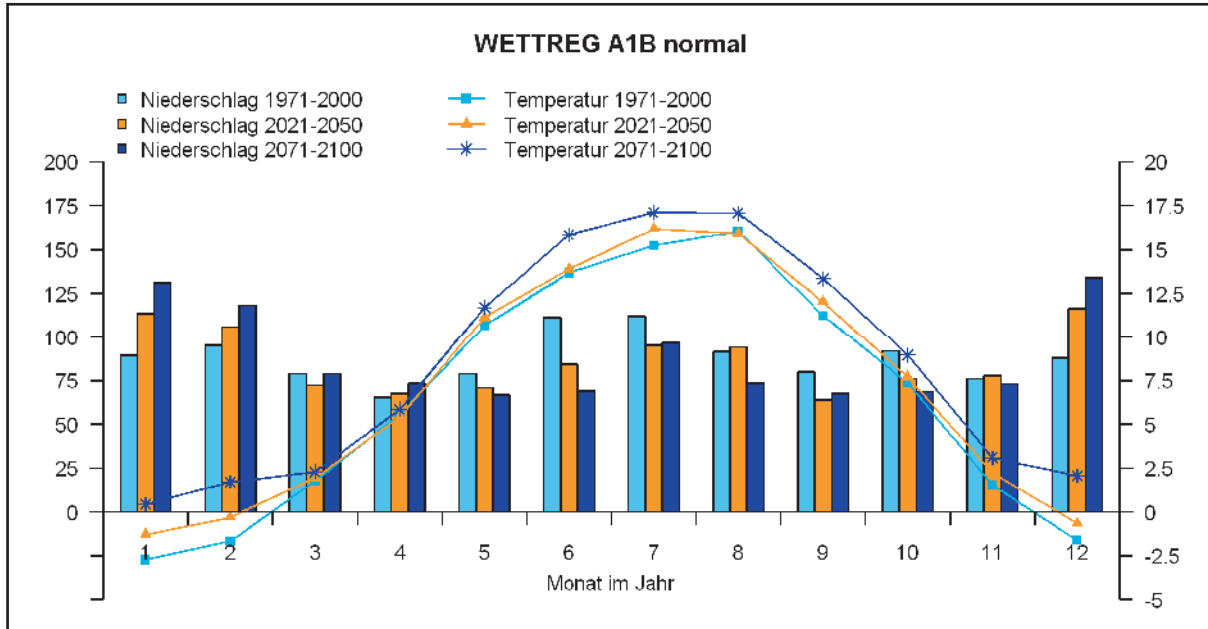


Abb. 4: Simulierte Entwicklung der Niederschlagsmengen und Lufttemperaturen im Einzugsgebiet der Ilz (Gebietsmittel), Szenario NPV-WETTREG A1B in Realisation „normal“

### 3.2 Ergebnisse zum Gebietswasserhaushalt

Die Verdunstungsmenge ändert sich im Gebietsmittel wenig. Räumlich differenziert tritt jedoch eine deutliche Änderung mit Zunahmen in den Höhenlagen (höhere Temperaturen) und Abnahmen in den Tieflagen (Begrenzung durch Wasserverfügbarkeit) auf. Eine höhere Verdunstung geht zu Lasten des Bodenwassergehaltes, was wiederum zu einer Abnahme der Grundwasserneubildung führt. Die Simulation von verstärktem Kapillaraufstieg an grundwassernahen Standorten in den Höhenlagen ergibt eine Abnahme der Grundwasserneubildung von bis zu ca. 30 % in der Periode 2021–2050 (Abb. 5). Im Zusammenhang damit nehmen auch die Abflussspenden in den Hochlagen ab, während sie in den südlichen Tallagen unverändert bleiben oder leicht zunehmen (Abb. 6). Diese Tendenzen verstärken sich zum Ende des 21. Jahrhunderts.

Die projizierten Änderungssignale aus ArcEGMO-PSCN für das Ilzgebiet wurden mit den Änderungssignalen des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW verglichen, das für alle drei KLIWA-Länder (KLIWA 2012) vorliegt und zur Berechnung der Grundwasserneubildung herangezogen wurde. Die Ergebnisse zum Bodenwasserhaushalt aus GWN-BW bestätigen die Ergebnisse aus ArcEGMO-PSCN (Abb. 7). So verhalten sich die Änderungen der Sickerwasserrate für das Ilzgebiet auf Ebene der Quartale bzw. Monate ähnlich wie die Änderungen aus ArcEGMO. Die Änderungen auf Ebene der Halbjahre und Monate fallen insgesamt deutlicher aus als bei Betrachtung des Gesamtjahres. So ist die Abnahme im Sommer auf etwa 170 mm Sickerwasser deutlich (etwa 15 %), während die Zunahme auf 440 mm im Winterhalbjahr relativ gering ausfällt (etwa 5 %).



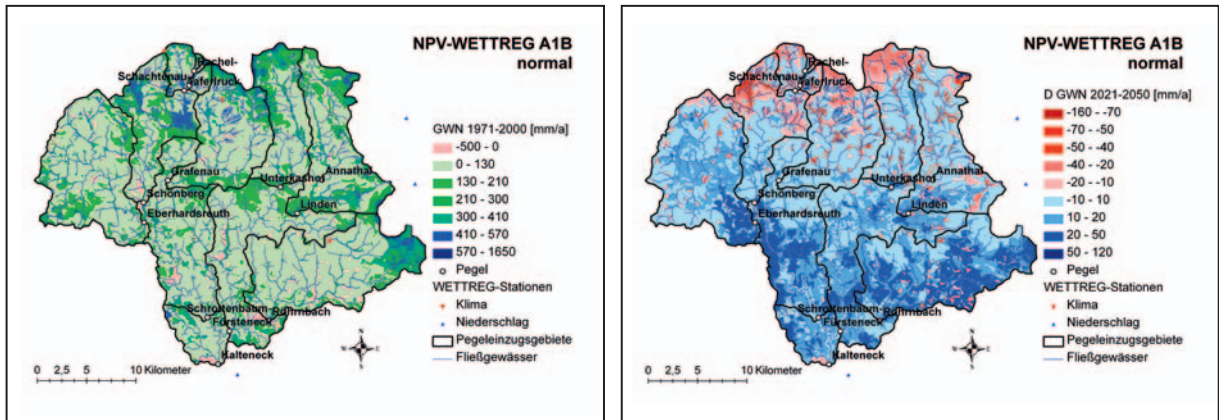


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung (GWN) als 30-jähriges Mittel für die Referenzperiode (links) und der absoluten Veränderungen zwischen Referenzperiode und Periode 2021–2050 (rechts)

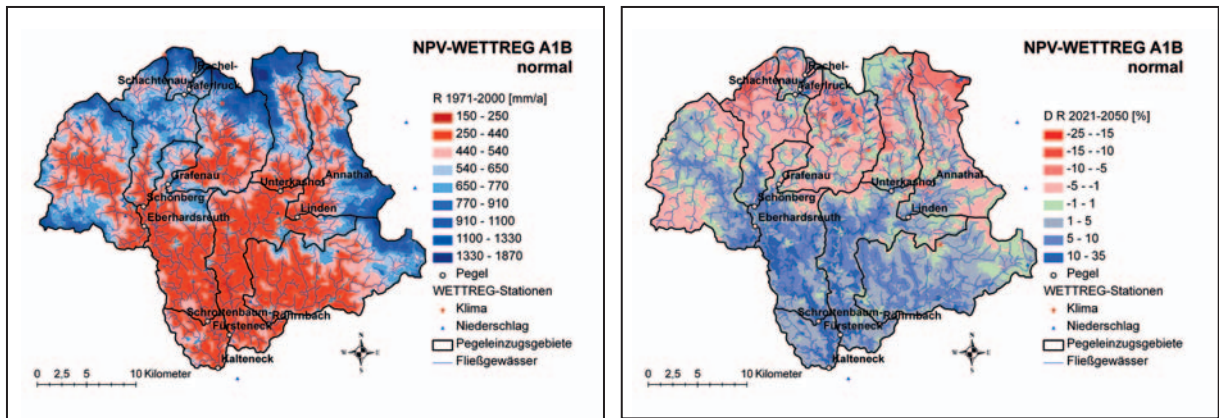


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Abflusshöhen als 30-jähriges Mittel für die Referenzperiode (links) und der relativen Veränderungen zwischen Referenzperiode und Periode 2021–2050 (rechts)

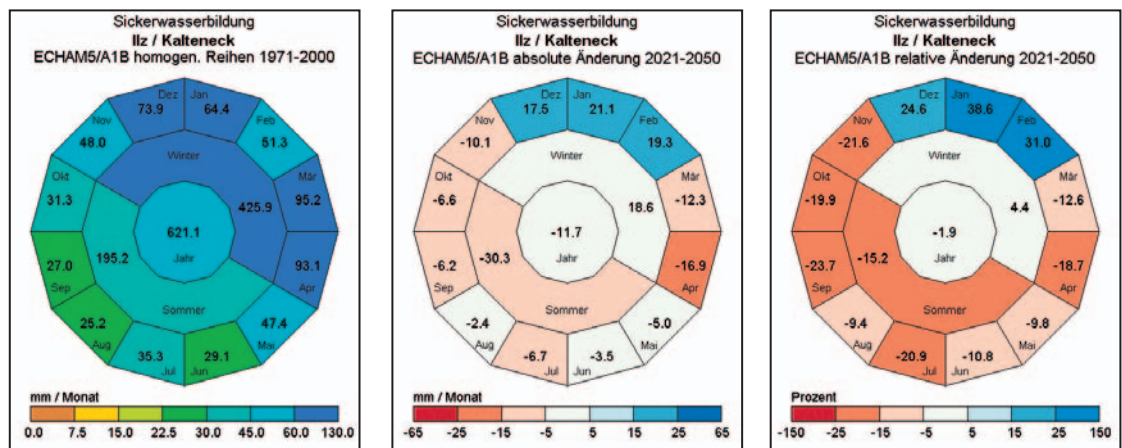


Abb. 7: Sickerwasserrate im Ist-Zustand und die absolute und relative Änderung der nahen Zukunft (2021–2050) zum Ist-Zustand (1971–2000) auf Basis des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-Baden-Württemberg

### 3.3 Ergebnisse zur Abflussdynamik

In den für die Zukunft projizierten Abflüssen zeigt sich eine Verlängerung der sommerlichen Niedrigwasserperiode durch eine Vorverlegung des Abflussmaximums. Verursacht wird dies durch zunehmende Winterniederschläge und einen reduzierten Schneedeckenaufbau (Abb. 8). Zusätzlich werden bei Verwendung der Klimaszenarien sinkende Abflüsse in den Sommermonaten simuliert, so dass in den Monaten Juli bis September kaum noch Unterschiede zwischen den mittleren monatlichen Mittelwasserabflüssen (MMQ) und Niedrigwasserabflüssen (MNQ) auftreten werden. In der Periode 2021–2050 ändert sich die räumliche Verteilung der Niedrigwasserabflussspenden im Vergleich zum Referenzzeitraum wenig, in der Periode 2071–2100 sinken sie, abgesehen von wenigen Ausnahmen, jedoch deutlich.

Im Zusammenhang mit einer längeren Niedrigwasserperiode erhöhen sich auch die Niedrigwasserkennzahlen, sowohl am Gebietsauslass (Abb. 9) als auch an den Kontrollpunkten. Die Änderungen für die nahe Zukunft (2021–2050) sind dabei moderat, für die ferne Zukunft (2071–2100) jedoch deutlich. Die Unterschreitungsanzahl pro Jahr (SumD) ist die Summe der Tage im Jahr, an denen der definierte Abflussschwellenwert (MNQ des Ist-Zustandes) unterschritten wird. Die Maximale Niedrigwasserdauer pro Jahr (MaxD) beschreibt die längste zusammenhängende Periode eines Jahres, für die der definierte Abflussschwellenwert unterschritten wird. Die Maximale Dauer des Abflussdefizits (MaxDD) ist die Summe der Tage ab Unterschreitung des Schwellenwerts bis das Abflussdefizit (Summe der täglichen Bilanz zwischen Abflusstageswert und Schwellenwert) wieder ausgeglichen ist.

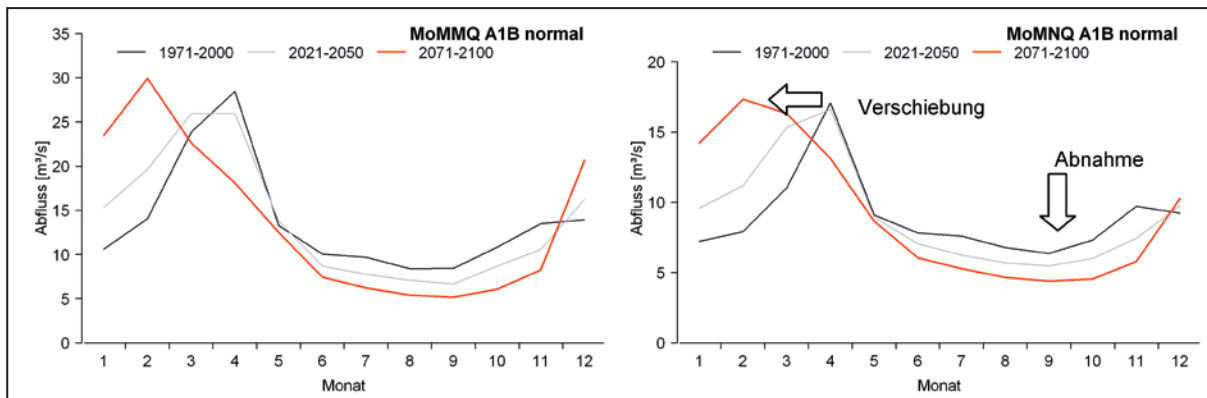


Abb. 8: Mittlere monatliche Mittelwasser- (MoMMQ, links) und Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ, rechts) am Pegel Kalteneck unter Szenariobedingungen; die in Zukunft zunehmende Vorverlegung des Abflussmaximums und abnehmenden sommerlichen Abflüsse werden deutlich

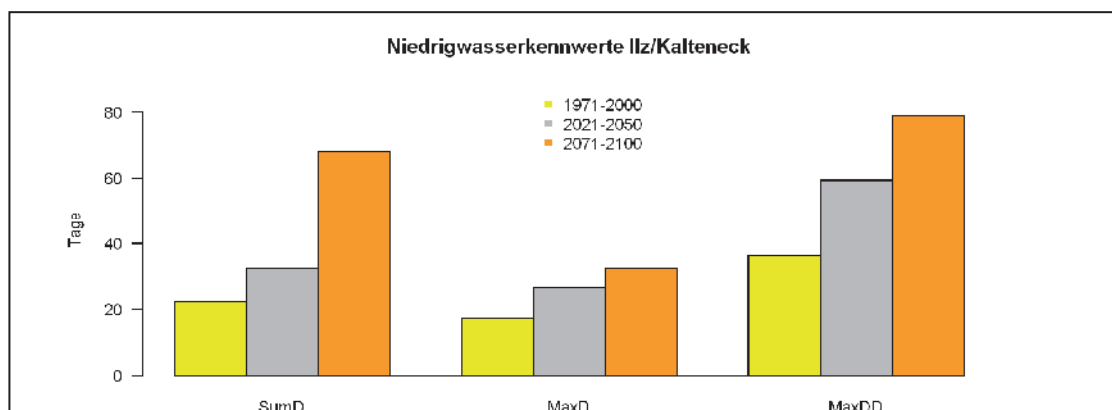


Abb. 9: Änderung der Niedrigwasserkennwerte für das Einzugsgebiet der Ilz oberhalb des Pegels Kalteneck; Unterschreitungsanzahl pro Jahr (SumD); Maximale Niedrigwasserdauer im Jahr (MaxD); Maximale Dauer des Abflussdefizits (MaxDD)



### 3.4 Ergebnisse zu den Quellschüttungen

Die Entwicklung der Quellschüttungen bzw. der Niedrigwasserabflussspenden an den Kontrollpunkten ist unterschiedlich und wurde anhand des Jahresgangs im Ist-Zustand und der zukünftigen Entwicklung in Gruppen eingeteilt (Abb. 10). An einigen Kontrollpunkten entwickelt sich der Jahresgang unter Szenariobedingungen analog zu den projizierten Abflüssen am Gebietsauslass (Gruppe c bis e). An anderen Kontrollpunkten ist zwar die Verschiebung des Abflussmaximums deutlich, die Abnahme der sommerlichen Abflüsse jedoch nicht gegeben (Gruppe a und b). Anhand des Jahresgangs im Ist-Zustand an den Kontrollpunkten konnte das Modellgebiet zweigeteilt werden. Wesentlich ist dabei, ob in der Niedrigwasserabflussganglinie im Ist-Zustand neben dem Maximum im April ein zweites Maximum im November auftritt oder nicht. Die Zweiteilung korreliert mit der Höhenlage. So stehen die Gruppen a und b in niedriger bzw. südlicher Lage ohne Novembermaximum und geringen sommerlichen Abnahmen den Gruppen c, d und e mit ausgeprägtem Novembermaximum und deutlichen sommerlichen Abnahmen gegenüber. In Zukunft gleicht sich die Entwicklung der Quellschüttungen immer mehr an und zeigt dann einen Verlauf, wie er bereits jetzt im Südteil des Untersuchungsgebiets zu beobachten ist.

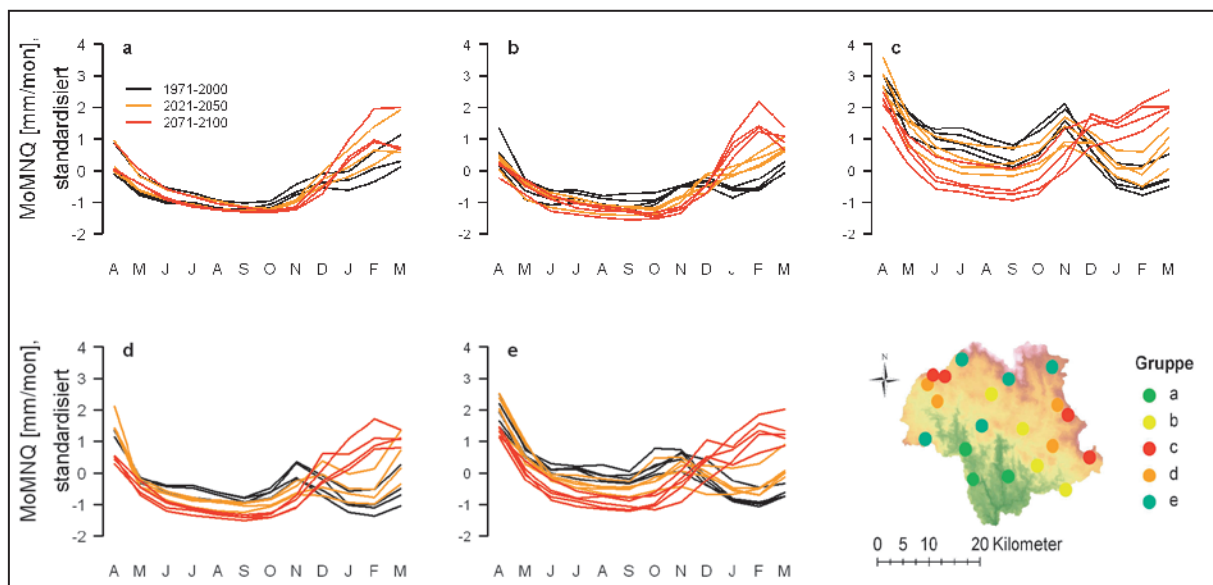


Abb. 10: Mittlere monatliche standardisierte Niedrigwasserabflussspenden (MoMNQ) an den Kontrollpunkten unter Szenariobedingungen

## 4 Bewertung der Ergebnisse und ihre Regionalisierung

In einem weiteren Schritt wurde zur Klassifizierung der Dargebotsänderung im Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ mit Hilfe des mittleren 30-jährigen Jahresgesamtabflusses als erklärender Variable eine Aussage für an das Modellgebiet angrenzende Bereiche mit niedriger Grundwasserergiebigkeit getroffen (Abb. 11).

Mittlere Änderungen der Quellschüttungen haben nur eine begrenzte Aussagekraft. Für die Wasserversorgungsunternehmen bzw. Kommunen sind die Änderungen im Jahresgang maßgeblich, da die Reduzierung der Niedrigwasserabflüsse sowie die Ausweitung der sommerlichen Niedrigwasserphasen und der damit verbundene Rückgang der Quellschüttungen mit den Spitzenbedarfszeiten im Sommer zusammenfällt. Schon heute ergeben sich deutliche Hinweise, dass die zeitweise limitierten regionalen Grundwasservorkommen, die der



Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser dienen, insbesondere im letzten Drittel des 21. Jahrhunderts weiter in ihrer Leistungsfähigkeit abnehmen werden. Die Wiederauffüllung der Grundwasserleiter im Modellgebiet ist neben dem Niederschlagsgeschehen von der Schneerücklage abhängig. Ob in Zukunft mit trockeneren Wintern gerechnet werden muss, kann mit weiteren Klimaprojektionen festgestellt werden (CLM, WETTREG2010).

Ergänzend ist festzustellen, dass in den landwirtschaftlich genutzten südlichen Gebietsteilen mit einer Unterversorgung der angebauten Kulturen aus dem Bodenwasserspeicher gerechnet werden muss. Die Vegetation der höheren Lagen wird voraussichtlich von der simulierten Temperaturerhöhung bei gleichbleibend hohen Niederschlägen profitieren.

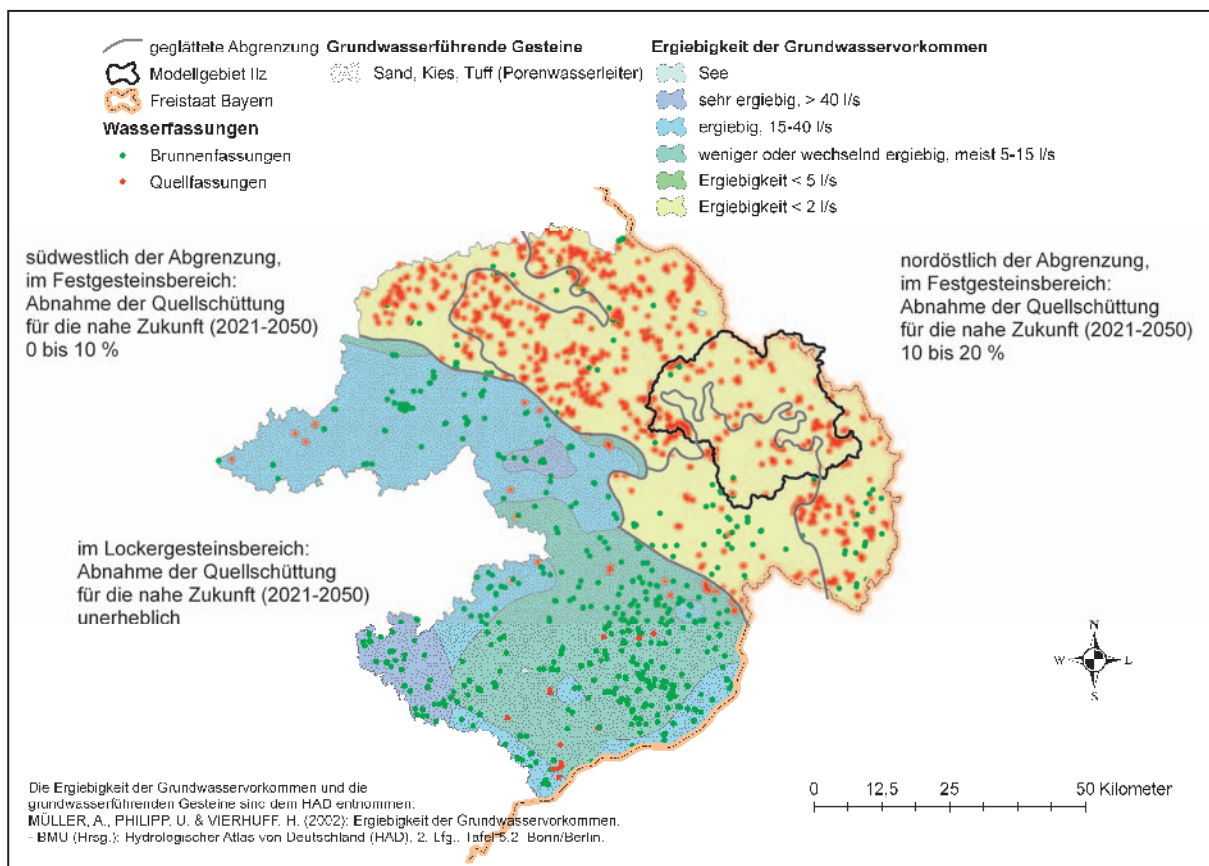


Abb. 11: Änderung der Quellschüttungen im Amtsbereich Deggendorf als Ergebnis für das LfU-Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung“

## 5 Verwendung der Ergebnisse zur Ableitung von Handlungsempfehlungen

Die Ergebnisse dieser Fallstudie können den Verantwortlichen in den Wasserversorgungsunternehmen und Kommunen sowie der Wasserwirtschaftsverwaltung als Grundlage dienen, mögliche Engpässe in der Wasserversorgung frühzeitig zu erkennen, besser einzuschätzen und ggf. auf wasserwirtschaftliche Anpassungsmaßnahmen hinzuwirken.

Das o. g. Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ der bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung hat zum Ziel, die Versorgungssicherheit der Wasserversorgungsanlagen zu bewerten und darauf aufbauend den Wasserversorgern bzw. Kommunen Hilfestellung zu geben, Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssitua-

tion, z. B. mittels Anlagenverbund oder Erschließung zusätzlicher Ressourcen („Zweites Standbein“), ergreifen zu können. Dies beinhaltet ggf. einen Ausbau der Anlagen zur Trinkwasserverteilung, der Wasserversorgungstechnik und der Behälterkapazitäten. Die Bewertung der einzelnen Wasserversorgungsanlage erfolgt auf der Basis einer Gegenüberstellung des aktuell nutzbaren Wasseraufkommens, d. h. des eigenen Grundwasserdargebots einschließlich der evtl. bezogenen Wassermengen, mit dem Wasserbedarf (Wasserbilanz) wie auch unter Berücksichtigung der vorliegenden Struktur der Wasserversorgungsanlage (Redundanz). Die zukünftige Entwicklung ist hierbei ein zentrales Thema und wird durch demographische Entwicklung, spezifischen Wasserverbrauch, potentielle Großabnehmer, auftretende Wasserverluste, etc. und eben auch durch die Entwicklung des Dargebots infolge des Klimawandels charakterisiert.

Die Frage, inwieweit die vorhandene Trinkwassertalsperre Frauenau vom Klimawandel betroffen und bei mehrjährigen Trockenphasen für die örtliche Wasserversorgung ausreichend ist, kann mit dieser Fallstudie nicht beantwortet werden, da sie außerhalb des Modellgebiets liegt. Um eine konkrete Aussage für die Talsperre Frauenau zu treffen, wären weitere Untersuchungen nötig.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Kristallin des Bayerischen Waldes ist die lokale Wasserversorgung primär auf die Nutzung von Quellwasser angewiesen. Für sie ist die zukünftige Entwicklung von Quellschüttungen vor dem Hintergrund des Klimawandels entscheidend. Daher wurde mit Hilfe eines räumlich und zeitlich hoch aufgelösten Wasserhaushaltsmodells die gegenwärtige und zukünftige Wasserhaushaltssituation unter Nutzung eines eigens für den Nationalpark Bayerischer Wald aufgestellten Szenarios analysiert (WETTREG2006, ECHAM5-OM1 A1B, 3 Realisationen). Um auf das Schüttungsverhalten der Quellen zu schließen, wurde der Niedrigwasserabfluss in ausgewählten Oberläufen ausgewertet.

Das mit ArcEGMO aufgestellte Wasserhaushaltsmodell für das Einzugsgebiet der Ilz bis zum Pegel Kalteneck bildet den Gebietswasserhaushalt und die Abflussverhältnisse plausibel ab. Das derzeit vorherrschende Abfluss- bzw. Schüttungsmaximum im April, bedingt durch die Schneeschmelze, verschiebt sich in Zukunft aufgrund der Klimaerwärmung in den Februar/März. Die für die Zukunft projizierten Abflüsse in den Sommermonaten sinken, bedingt durch die projizierte Jahresumverteilung der Niederschläge vom Sommer in den Winter. In diesem Zusammenhang muss in Zukunft auch mit länger andauernden Niedrigwasserperioden bis in den November hinein gerechnet werden.

Für die Grundwasserneubildung werden mit der Szenariosimulation für die Periode 2021–2050 in den Hochlagen des Bayerischen Waldes geringe Abnahmen (20 mm/a) und in mittleren und niederen Lagen geringe Zunahmen (20 mm/a) projiziert. Für die Wasserversorgung sind jedoch die Änderungen im Jahresgang, und damit die mit dem Klimawandel für dieses Gebiet erwartete Verstärkung der Amplitude der Quellschüttungen maßgeblich. Der projizierte Rückgang der Abflüsse bzw. Quellschüttungen in den Sommermonaten fällt häufig mit den Zeiten eines erhöhten Wasserbedarfs und der Hauptvegetationsperiode zusammen. Die dadurch möglichen Engpässe in der Trinkwasserversorgung werden im Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“ dargestellt, Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgungssicherheit mit den betroffenen Wasserversorgungsunternehmen diskutiert.

Das Wasserhaushaltsmodell für das Ilz-Einzugsgebiet ist am LfU einsatzbereit und kann bei Vorlage neuer Szenariendaten umgehend für weitere Rechenläufe verwendet werden, um die getroffenen Kernaussagen zu überprüfen und zu aktualisieren. Die Ergebnisse eines Modells können jedoch nie ein Ersatz für gemessene Daten sein. Vielmehr ist eine gute Datenbasis eine wichtige Voraussetzung für ein funktionierendes und die Realität möglichst



gut abbildendes Wasserhaushaltsmodell. Außerdem können durch ein gut konzipiertes und angepasstes Monitoring sowohl für das Grundwasser als auch für das Sickerwasser frühzeitig nachteilige Entwicklungen von Wasserqualität und -menge bei Änderungen im Waldbestand und in der Waldbewirtschaftung, z. B. durch Windbruch, Borkenkäferbefall oder Bodenverdichtung bei der maschinellen Holzernte mit dem Harvester, aufgedeckt werden.

Hervorzuheben ist der Pilotcharakter dieser Fallstudie. Erstmals wurde für die Wasserversorgung in einer Region Bayerns eine modellgestützte, flächendifferenzierte Aussage hinsichtlich der zu erwartenden Änderungen im Grundwasserhaushalt getroffen. Die Ergebnisse dieser Fallstudie liefern einen wichtigen Beitrag zum Projekt „Erhebung und Bewertung der öffentlichen Wasserversorgung in Bayern“. Aufgrund der positiven Erfahrungen und des evidenten Bedarfs an Untersuchungen zu Auswirkung des Klimawandels auf das Quellschüttungsverhalten in den Mittelgebirgen, wie er auch in der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie (StMUG 2009) formuliert ist, sind inzwischen weitere Fallstudien in Bearbeitung bzw. in Planung. Neben der Entwicklung der Quellschüttungen bzw. der Grundwasserstände ist auch die Entwicklung der Grundwasserbeschaffenheit im Zusammenhang mit dem Klimawandel von hoher Bedeutung für die Wasserversorgung. Dies ist ein weiterer Schwerpunkt, dem sich die Arbeitsgruppe Grundwasser im Kooperationsvorhaben KLIWA im Rahmen von Fallstudien in Zukunft verstärkt widmen wird.

## 7 Literatur

- Becker, A., Klöcking, B., Lahmer, W., Pfützner, B. (2002): The Hydrological Modelling System ArcEGMO. In: Singh, V.P., Frevert, D.K. (Eds.), *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Littleton/Colorado, 321-384, ISBN 1-887201-34.
- KLIWA (2011): Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte Heft 16, Bayerisches Landesamt für Umwelt, 148 S., ISBN 978-3-88251-362-2.
- KLIWA (2012): Auswirkung des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte Heft 17, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9.
- Klöcking, B., Spekat, A., Kreienkamp, F., Banzhaf, S., Reimer, E., Enke, W., Ferber, F. (2008): Überprüfung regionaler Klima- und Depositionsszenarien auf ihre Eignung für die kleinräumige Modellierung im Nationalpark Bayerischer Wald, Endbericht, NPV Bayerischer Wald, Grafenau.
- Pfützner, B. (Hrsg.) (2003): *Modelldokumentation ArcEGMO*, <http://www.arcegmo.de>, ISBN 3-00-011190-5.
- Schwarze, R. (2004): Die Berechnung unterirdischer Abflusskomponenten mit dem Modul SLOW-COMP. In: Becker, A., Lahmer, W. (Eds.), *Wasser- und Nährstoffhaushalt im Elbegebiet und Möglichkeiten zur Stoffeintragsminderung – Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft*, Weißensee-Verlag, Berlin, 193-205.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit (StMUG), Hrsg. (2009): *Bayerische Klima-Anpassungsstrategie (BayKLAS)*, 68 S.



## Kleinräumige Modellierung zur Abschätzung der Bodenerosion infolge von Starkniederschlägen

Dr. Sauer, T.<sup>4</sup>, Dr. Assmann, A.<sup>2</sup>, Dr. Billen, N.<sup>3</sup>, Fosser, G.<sup>1</sup>, Groh, S.<sup>5</sup>, Kempf, J.<sup>2</sup>, Dr. Schädler, G.<sup>1</sup>, Dr. Schipper, H.<sup>1</sup>, Strauß, D.<sup>6</sup>

- (1) Süddeutsches Klimabüro am KIT, c/o Institut für Meteorologie und Klimaforschung Karlsruhe Institut für Technologie
- (2) geomer GmbH, Geoinformatik & Ressourcenmanagement
- (3) Bodengut, Büro für nachhaltige Bodennutzung
- (4) Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen
- (5) Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- (6) Bayerisches Landesamt für Umwelt, jetzt: Landratsamt Erlangen-Höchststadt, Umweltamt

### 1 Einleitung

Das KLIWA-Teilprojekt „*Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen*“ untersucht, wie sich das Risiko von Bodenerosion durch Starkregen in Zukunft verändern könnte. Die zentralen Fragen sind hierbei (1) Wie wird der Klimawandel die Niederschlags-Charakteristik verändern? Und (2) wie wird dies den Bodenabtrag beeinflussen? Das Projekt hat 2009 mit einer *Konzeptstudie* begonnen und befindet sich zurzeit in der Phase II „*Klima- und Erosionsmodellierung*“, die Ende 2013 abgeschlossen sein wird. Dabei wird erstmals ein hochaufgelöstes, dynamisches Klimamodell mit einem physikalischen Erosionsmodell direkt gekoppelt. Die in diesem Artikel präsentierten Ergebnisse geben einen Zwischenstand der Arbeiten wieder.

In Folge einer Temperaturhöhung ändern sich auch andere Klimavariablen, wie der Niederschlag, da die Gradienten der Temperatur die wesentliche Steuergröße für die atmosphärische und ozeanische Zirkulation sind, die wiederum die Entstehung und das Verhalten der Niederschlagssysteme bedingt. Eine mögliche Zunahme extremer Niederschlagsereignisse wird daher im Zusammenhang mit dem Klimawandel diskutiert (Solomon et al. 2007, Kasang & Kaspar 2005).

Laut dem KLIWA-Monitoringbericht (KLIWA, 2011) lässt sich schon heute feststellen, dass vor allem winterliche Starkniederschläge im Süden und Süd-Westen zunehmen. Während die sommerliche Niederschlagsmenge keine signifikanten Änderungen zeigt, nimmt die eintägige sommerliche Starkniederschlagshöhe (halbjährlicher Maximalwert) in vielen Gebieten jedoch ebenfalls zu. Nach einer Untersuchung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft könnte der Bodenabtrag durch Wasser nach Berechnungen auf Grundlage der Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung (ABAG) auf bayerischen Ackerflächen bis 2050 im Durchschnitt um 16 % zunehmen (Rippel 2008).

Neben der Änderung der Niederschlagscharakteristik wird die Temperaturzunahme weitere Parameter wie Bodenfeuchte, Evapotranspiration, Infiltration, Pflanzenwachstum und Bodenbedeckung beeinflussen, die sich ihrerseits wiederum auf die Bodenerosion auswirken. Durch die Temperaturzunahme können sich beispielsweise die Zeiten von Aussaat und Ernte ändern, so dass sich das Pflanzenwachstum, die Bodenbedeckung und die Bodenbearbeitung im Jahresverlauf verändern (Scherer 2008).





## 2 Material und Methoden

### 2.1 Auswahl des Klimamodells

Um die Fragestellung zu bearbeiten wurde in der ersten Projektphase ein geeignetes regionales Klimamodell ausgewählt. Dazu wurden zehn physikalisch-dynamische und drei statistisch-empirische Modelle mit einem einfachen Punktesystem bewertet. Wichtige Kriterien waren dabei die notwendige hohe räumliche und zeitliche Auflösung für die Erosionsmodellierung und die Eignung für eine Kopplung mit einem Erosionsmodell (Kohl & Groh, 2009).

Die Modelle mit der besten Bewertung (COSMO-CLM, REMO, WETTREG, STAR und das Programmsystem NiedSim-Klima) wurden in einem zweiten Schritt detaillierter analysiert. Statistisch-empirische Modelle haben den Vorteil, dass deren Ergebnisse mit der Klimastatistik am Messstandort übereinstimmen. Für die Verwendung in der Bodenerosionsmodellierung müssen die Klimadaten in die Fläche übertragen werden. Die Dichte der Stationen in kleineren Einzugsgebieten reicht in der Regel dazu jedoch nicht aus, so dass dieses Vorgehen mit Unsicherheiten verbunden ist. Die physikalisch-dynamischen Modelle liefern Ergebnisse, die für eine bestimmte Fläche repräsentativ sind. Wenn der Gitterpunktabstand eines Modells stark verringert wird, können damit viele Einzelflächen die örtlichen Eigenschaften gut wiedergeben. Dies ist für die Erosionsmodellierung besonders wichtig. Zudem sollte für die Wiedergabe ein Ausgabezeitschritt von wenigen Minuten gewählt werden können. Diese hohe räumliche und zeitliche Auflösung lässt sich bei der momentan vorhandenen Stationslage nur mit einem physikalisch-dynamischen Modell wiedergeben. Im Ergebnis erfüllte das regionale Klimamodell COSMO-CLM am besten die gestellten Anforderungen.

### 2.2 Auswahl des Erosionsmodells

Auf der Seite der Erosionsmodelle wurden zehn empirische bzw. physikalische Modelle mit konzeptionellen Ansätzen und sieben physikalisch-prozessbasierte Modelle ebenfalls mit Hilfe eines Punktesystems bewertet. Bei der Auswahl der Bodenerosionsmodelle – besonders im Zusammenhang mit Klimaveränderungen – sind verschiedene Modelleigenschaften wie Modelltyp, räumliche und zeitliche Auflösung, Raumskala/Maßstab und abgebildete Prozesse zu beachten. Die Modelle unterscheiden sich in der Simulation der Abflussbildung, des Erosionsprozesses und des Stofftransports. Die im Rahmen dieser Studie untersuchten Modelle sind unterschiedlich komplex und haben verschiedene räumliche und zeitliche Auflösungen. Mittels einer Bewertungsmatrix wurden für das geplante Vorhaben die Modelle LISEM und EROSION3D fachlich und inhaltlich als gleichwertig beurteilt. Aufgrund der Vorteile als Open-Source-Software wurde das Modell LISEM ausgewählt.

### 2.3 Schnittstelle zwischen den Modellen

Für einen effektiven Modelleinsatz wurden Klima- und Erosionsmodell verknüpft. Dies bezieht sich zum einen auf eine inhaltliche Integration, zum anderen auch auf die technische Umsetzung. Das Klimamodell COSMO-CLM liefert Simulationsergebnisse als Raster in der Auflösung des Berechnungslaufes. Die Werte sind dabei Niederschlagsmengen in mm für jeden Gitterpunkt (bis zu einer Auflösung von 1 x 1 km). Die Niederschläge wurden in Ganglinien als Eingangsdaten für das Bodenerosionsmodell konvertiert. Da ein manuell durchgeführter Konvertierungsprozess relativ fehleranfällig und im Sinne einer Qualitätssicherung auch schlecht reproduzierbar ist, wurde ein Konvertierungsprogramm (COSMO2LISEM-Werkzeug) erstellt.

### 2.4 Auswahl der Modellstandorte

Die Analyse von 25 potenziellen Untersuchungsstandorten in den drei KLIWA-Bundesländern hat ergeben, dass die Standorte „Scheyern“ in Bayern, „Weiherbach“ in Baden-Württemberg und „Mertesdorf“ in Rheinland-Pfalz aufgrund der Datenverfügbarkeit

als Referenzstandorte am geeignetsten sind (Abb. 1). Jedoch liegen für keinen der Standorte vollständige Daten für eine Erosionsmodellierung vor. Von besonderer Bedeutung für die Simulation von ereignisbasierten Erosionsprozessen und die Validierung der Modellkette ist die hochaufgelöste Aufzeichnung der Niederschlagsverteilung und die Verfügbarkeit von Abfluss- und Abtragsdaten in den Modellgebieten. Die erforderliche Auflösung von 15-minütigen oder noch kürzeren Aufzeichnungsintervallen innerhalb der Modellgebiete oder direkt angrenzend ist für die gewählte Retrospektive von 1971-2000 in keinem Fall verfügbar. Allerdings sind für kürzere Zeiträume entsprechende Niederschlagsaufzeichnungen vorhanden.

### 3 Modellierungen

Die Qualität und der Umfang der Erosions- und Abflussmodellierungen sind im Wesentlichen abhängig von den Aspekten (1) Szenarienvielfalt, (2) Ergebnissicherheit und (3) Übertragbarkeit. Um allen Aspekten optimal gerecht zu werden, wären über 3000 Modellierungsläufe erforderlich. Da dies jedoch aus Kosten- und Zeitgründen nicht durchführbar ist, wird sich auf folgendes Versuchsdesign beschränkt:

Die Klima- und Erosionsmodellierungen werden zunächst für drei Niederschlagsereignisse an den drei Referenzstandorten Mertesdorf (RLP), Scheyern (BY) und Weiherbach (BW) für eine Retrospektive (1971-2000) und eine Klimaprojektion (2021-2050) durchgeführt. Dieser Schritt umfasst auch die Kalibrierung und Validierung der Modelle. Weiterhin werden 15 Vergleichsstandorte für die praxisorientierten Modellierungen ausgewählt und die entsprechenden Modellrechnungen durchgeführt (Abb.1).

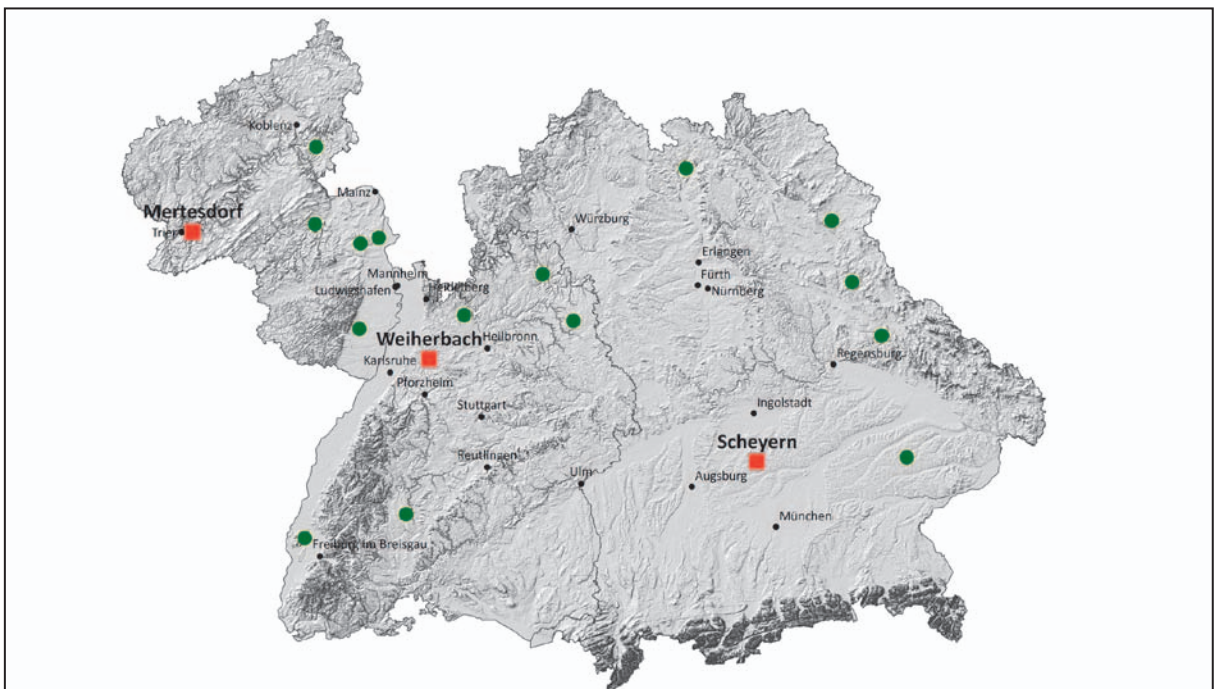


Abb. 1: Lage der drei Untersuchungsgebiete Mertesdorf (Rheinland-Pfalz), Weiherbach (Baden-Württemberg) und Scheyern (Bayern) (rote Vierecke) und der 15 Vergleichsstandorte (grüne Kreise, Datengrundlage: Verwaltungsgebiete vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, Geländemodell Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) vom US Geological Survey).

Nachdem zunächst Klimasimulationen mit einer horizontalen Auflösung von 7 km für das gesamte KLIWA-Gebiet durchgeführt wurden, wurden in einem zweiten Schritt Klimasimulationen für die Referenzgebiete mit einer Auflösung von 2,8 km gerechnet. Beide Modellie-



rungen wurden für die Zeiträume 1971-2000 und 2021-2050 durchgeführt. Aus den 2,8 km Simulationen werden Niederschlagsereignisse ausgewählt, die Bodenerosion auslösen können. In einem weiteren Schritt werden diese Einzelereignisse mit einer horizontalen Auflösung von 1 km erneut simuliert. Die 1 km Auflösung ermöglicht die Simulation kleinräumiger, wie z. B. orographische, Effekte oder auch die explizite Berechnung von lokalen Gewittern. Die Qualität der Daten mit einer höheren Auflösung wurde bisher kaum untersucht, so dass Möglichkeiten und Grenzen, d. h. der Mehrwert dieses Verfahrens gegenüber einer gröber aufgelösten Klimamodellierung besonders geprüft werden müssen.

Die direkte Kopplung von Klimamodell und Bodenerosionsmodell ist neben der Modellierung selbst die zweite Kernaufgabe des Vorhabens. Eine Kopplung von unterschiedlichen Modellen auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen wurde bisher nur unzureichend praktiziert.

### 3.1 Auswahl des Simulationsgebietes

In einem ersten Schritt wurden drei in ihrer Lage und Größe unterschiedliche Simulationsgebiete für ein Jahr mit einer räumlichen Auflösung von 2,8 km und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde simuliert, um eine geeignete Größe und Position des Simulationsgebiets festzulegen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich die drei Simulationsgebiete in der Qualität der Modellergebnisse nicht wesentlich voneinander unterscheiden. In einem zweiten Schritt wurde deshalb – um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen – in dem kleinsten Simulationsgebiet Sensitivitätsstudien zur Modellkonfiguration des Klimamodells durchgeführt. Es wurden zwei Referenzkonfigurationen überprüft; eine basiert auf der Modelleinstellung der 7 km-Simulationen, in der die 2,8 km genestet sind; die zweite entspricht den Empfehlungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) und der „CLM-Community“ für die Durchführung hochaufgelöster Simulationen. Außerdem wurden Änderungen in den Referenzkonfigurationen, wie beispielsweise eine häufigere Aktualisierung der Randbedingungen, geprüft. Ein weiterer Modelllauf über einen anderen, längeren Zeitraum (1980-1984) sollte sicherstellen, dass die ersten Ergebnisse nicht durch die Wahl eines bestimmten Jahres beeinflusst waren.

Die für die Erosion wichtigen Niederschlagsmerkmale sind Häufigkeit und Stärke von Extremereignissen und der Wechsel zwischen Trocken- und Nassperioden. Diese Merkmale wurden am besten mit der Konfiguration basierend auf den Einstellungen der 7 km Simulation und einer Aktualisierung der Randbedingungen alle drei Stunden erreicht. Für die eigentliche Klimasimulation wird das Simulationsgebiet S4\_ext (Abb. 2) verwendet. Die Bundesländer Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz mit den Untersuchungsstandorten Weiherbach und Mertesdorf werden von diesem Simulationsgebiet komplett abgedeckt. Für den Untersuchungsstandort Scheyern muss zu einem späteren Zeitpunkt ein weiteres Simulationsgebiet festgelegt werden.

## 4 Validierung der Modellkette

Abb. 3 zeigt für ausgewählte Niederschlagsereignisse neben den Niederschlagsmengen der Referenzstation, die Niederschläge der COSMO-CLM Simulationen mit 7 km Auflösung und 2,8 km Auflösung. Die Eingangsdaten für den Modelllauf basieren dabei auf den globalen Reanalysedaten ERA40. So ist ein Vergleich zwischen Beobachtungen und Modellergebnissen möglich. Für eine erste Validierung der Modellkette wurde ein Ereignis am 13.08.1995 im Untersuchungsgebiet Weiherbach ausgewählt, da dieses von COSMO-CLM gut abgebildet wird. Der simulierte Niederschlag ist für das gesamte Untersuchungsgebiet mit 194 mm zwar sehr hoch, jedoch ist die Niederschlagsmenge für die Gitterpunkte innerhalb des Einzugsgebiets Weiherbach in einer vergleichbaren Größenordnung mit den Beobachtungsdaten.

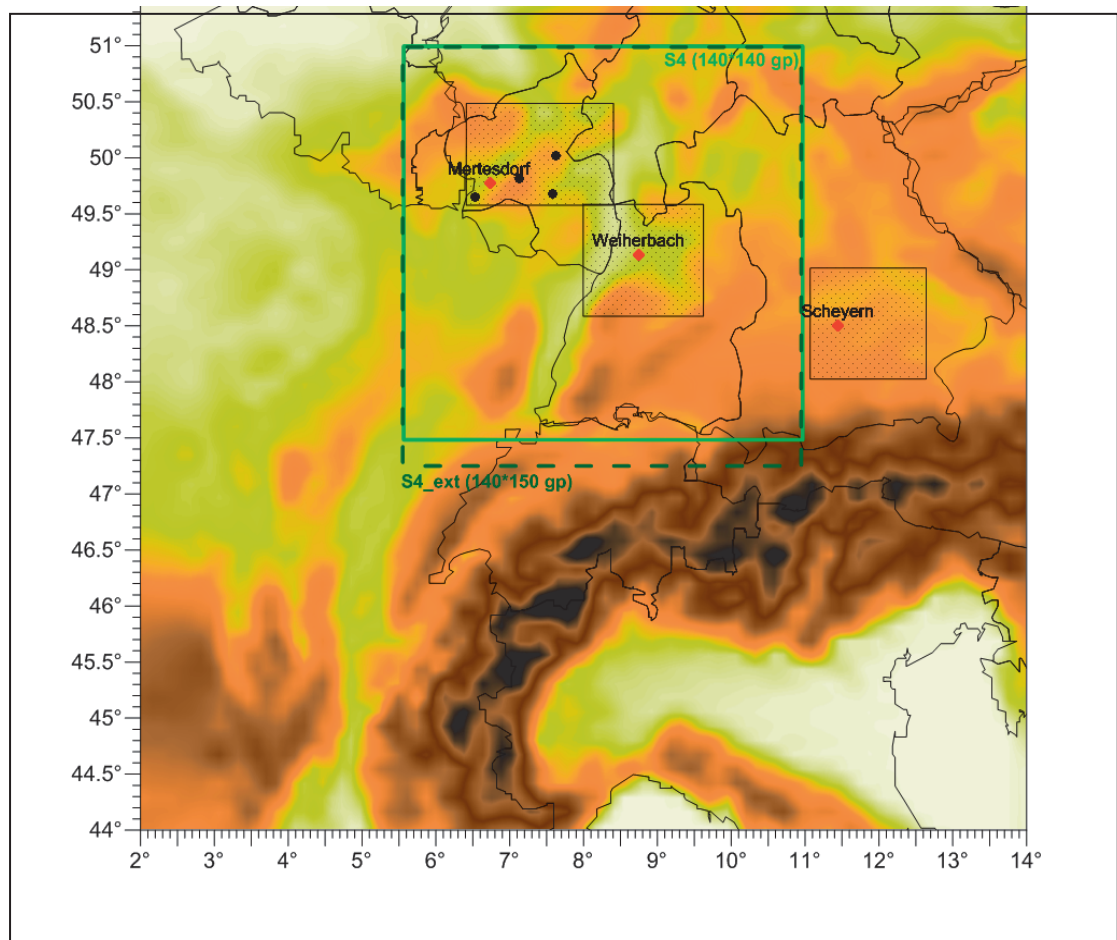


Abb. 2: Lage des Simulationsgebietes S4 (hellgrün, durchgezogen), S4\_ext (dunkelgrün, gestrichelt), der Untersuchungsgebiete (schwarz) und der Referenzstandorte (rote Punkte).

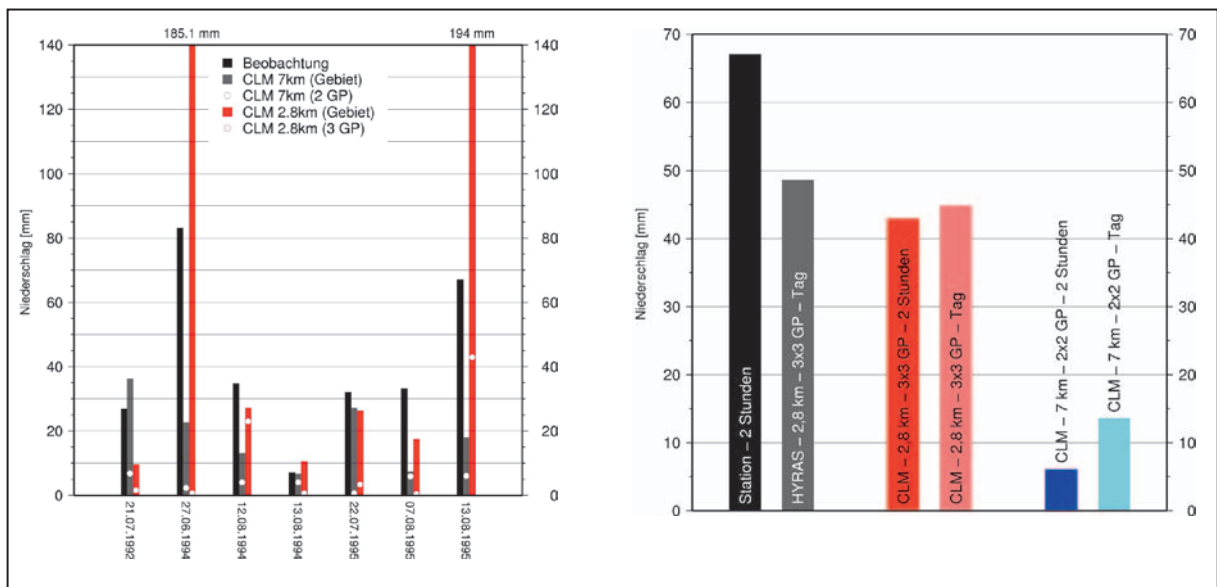


Abb. 3 und 4: Ausgewählte Niederschlagsereignisse für das Untersuchungsgebiet Weiherbach (Beobachtungsdaten, Simulationsergebnisse mit 7 km und 2,8 km Auflösung (links)). Vergleich der Niederschlagsmengen der Messstation Menzingen mit dem HYRAS-Datensatz und den Modellsimulationen (rechts).





Die weißen Kreise in Abb. 3 zeigen die mittlere Niederschlagsmenge für die Gitterpunkte, welche innerhalb des Einzugsgebiets liegen. Bei der 2,8 km und der 7 km Simulation sind das drei bzw. zwei Gitterpunkte. Am 13.08.1995 verzeichnete die Messstation Menzingen innerhalb von zwei Stunden 67 mm Niederschlag. Um diesen Messwert mit Modellergebnissen vergleichen zu können, wurde ein Feld von 3 x 3 Gitterpunkten (2,8 km Auflösung) und ein zweites von 2 x 2 Gitterpunkten (7 km Auflösung) gewählt, womit das Einzugsgebiet Weiherbach komplett erfasst wird. Abb. 4 zeigt den Vergleich der Niederschlagsmengen der Messstation Menzingen, des HYRAS-Datensatzes (Rauthe et al. 2013) und der Modellsimulationen in beiden horizontalen Auflösungen (7 km und 2,8 km). Der erhebliche Unterschied zwischen den beobachteten Niederschlägen an der Station Menzingen und den HYRAS-Daten kann entweder durch die Gitterstruktur des HYRAS Datensatzes oder aber auch durch Messfehler bzw. -ungenauigkeiten des Regenmessers bedingt sein. Die Auflösung von 2,8 km zeigt jedoch ein Niederschlagsmaximum, das mit den HYRAS-Daten gut vergleichbar ist. Die hohe Auflösung von 2,8 km birgt jedoch auch die Gefahr, dass Ergebnisse fehlinterpretiert werden, wenn eine geringfügige räumliche Verschiebung zwischen dem beobachteten und dem simulierten Ereignis auftritt.

Abb. 4 zeigt die über das Einzugsgebiet gemittelten Niederschläge. Diese räumliche Mittelung führt zwangsläufig zu einer Glättung der an einem einzelnen Gitterpunkt registrierten Extremwerte, auch wenn die Domäne so klein ist wie im betrachteten Fall. Um die Unterschiede der räumlichen Auflösung klarer herauszustellen, zeigt Abb. 5 den Tagesgang der gemittelten Niederschläge für den 13.08.1995 zwischen 10 und 22 Uhr für 2,8 km und 7 km Auflösung (graue und rote Balken) sowie die Werte an jedem Gitterpunkt im Gitterpunktfeld 3 x 3 bei einer Auflösung von 2,8 km (weiße Kreise) dar.

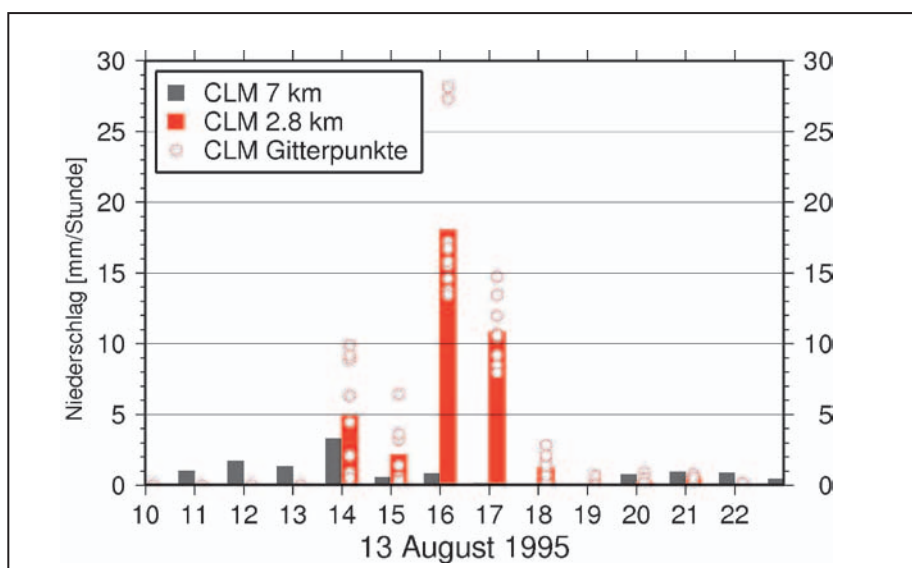


Abb. 5: Tagesgang der Niederschläge für den 13.08.1995 zwischen 10 Uhr vormittags und 10 Uhr abends. Die Balken stellen die über ein Feld von 3 x 3 bzw. 2 x 2 Gitterpunkten gemittelte stündliche Niederschlagsmenge bei 2,8 km (rot) bzw. 7 km (grau) dar. Die Kreise zeigen den Wert an jedem Gitterpunkt innerhalb eines Feldes von 3 x 3 Gitterpunkten bei einer Auflösung von 2,8 km.

Eine korrekte Darstellung des Tagesganges ist für die Kopplung Klimamodell und Bodenerosionsmodell entscheidend, da die Ergebnisse von LISEM mit gemessenen Daten auf stündlicher Basis verglichen werden sollen. Abb. 5 zeigt bei einer Auflösung von 2,8 km ein Niederschlagsmaximum am späten Nachmittag. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Modell in dieser Auflösung die Konvektion, die im Allgemeinen nachmittags und abends auftritt, explizit berechnet. Konvektion ist ein Vorgang, der in einem Maßstab von einigen wenigen Kilome-



tern wirkt und deshalb mit einer Auflösung von 7 km modelltechnisch nicht aufgelöst werden kann und daher in diesem Maßstabsbereich im Modell parametrisiert werden muss. Die gewählte Konvektionsparametrisierung ist in diesem Beispiel bei der 7 km Auflösung nicht in der Lage das Niederschlagsmaximum am Nachmittag abzubilden.

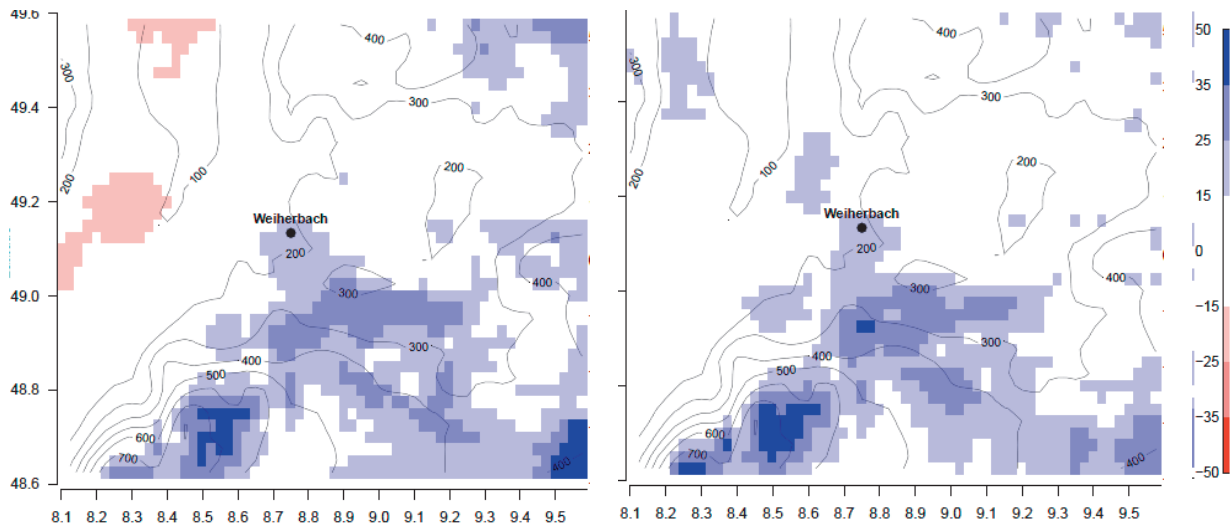


Abb. 6 und 7: Abweichungen der täglichen mittleren Niederschläge zwischen dem Modelllauf mit einer 2,8 km Auflösung und den HYRAS-Daten unter Berücksichtigung aller Tage (links) und nur der Regentage (über 1 mm pro Tag, rechts).

Da nicht nur die Niederschlagsmenge und -intensität für die Bodenerosion von großer Bedeutung sind, sondern auch die räumliche Verteilung des Niederschlags zeigen Abb. 6 und 7 die räumlichen Abweichungen der täglichen mittleren Niederschläge zwischen dem Modelllauf mit einer 2,8 km Auflösung und den HYRAS-Daten unter Berücksichtigung aller Tage (links) und nur der Regentage (über 1 mm pro Tag, rechts). Im Untersuchungsgebiet Weierbach wird im Bergland südlich des Einzugsgebietes in Höhenlagen über 500 m zu viel Niederschlag simuliert. Im Einzugsgebiet selbst geben die modellierten Niederschläge die Werte des HYRAS-Datensatz dagegen gut wider.

#### 4.1 Landnutzung und Fruchtfolgen

Die Belegung der Ackerflächen mit einjährigen Feldkulturen wird je nach Verfügbarkeit aus der Anbauverteilung gemäß Daten aus dem Projekt-/Versuchswesen der ausgewählten Untersuchungsgebiete oder der Agrarstatistik vorgenommen. Die erosionsrelevanten Feldgrößen sind häufig nicht von den Flurstücksgrößen abhängig, sondern von der Größe der Ackerschläge, die aus mehreren Flurstücken bestehen können. Deshalb wurden für die Referenzstandorte durch einen Vergleich mit Luftbildern die Aggregation bzw. Teilung der Flurstücke vorgenommen. Die Verteilung der Feldkulturgruppen auf die Ackerschläge erfolgte in einem abgestuften Verfahren: (1) Falls Informationen für Einzeljahre aus Projekt-/Versuchswesen vorhanden sind, werden diese direkt übernommen. (2) Falls Informationen aus Projekt-/Versuchswesen lückenhaft sind oder fehlen erfolgte eine 1-malige Zufallsverteilung der Anbauverteilung nach Agrarstatistik jeweils für 1999, 2003, 2007. (3) Bei fehlenden Informationen für Einzeljahre wird ein Flächenanteil-Mittelwert aus der Agrarstatistik berechnet. Damit wird eine 3-malige Zufallsverteilung durchgeführt, so dass Belegungsoptionen für Alternativmodellierungen vorliegen. Für die Zufallsverteilung wird jeder Fläche eine Zufallszahl zugeordnet, dann werden die Flächen entsprechend den Zufallszahlen sortiert, danach werden die Flächen sukzessive mit der ersten Feldkulturgruppe aufgefüllt bis der Anbauumfang erreicht ist. Folgendes Beispiel soll das Vorgehen verdeutlichen: Laut Statistik werden im Jahr 1999 in einem Einzugsgebiet umgerechnet 10 ha Zuckerrüben angebaut. Diese



werden auf die ersten 5 Ackerschläge mit zusammen 10,2 ha verteilt. Danach folgt die nächste Feldkulturgruppe. Für ein anderes Jahr oder für Jahresmittel werden den Flächen jeweils neue Zufallszahlen zugeordnet und mit denen eine neue Rangfolgesortierung der Flächen vorgenommen. Die Verteilung der Feldkulturen für das Untersuchungsgebiet Weiherbach für die Modellierung zeigt Abb. 8. Da für dieses Datum keine Feldbelegung aus den verfügbaren Projektdaten vorhanden war, wurden Mittelwerte, die aus den vorhandenen Belegungen abgeleitet wurden, als Nutzungskarte verwendet.

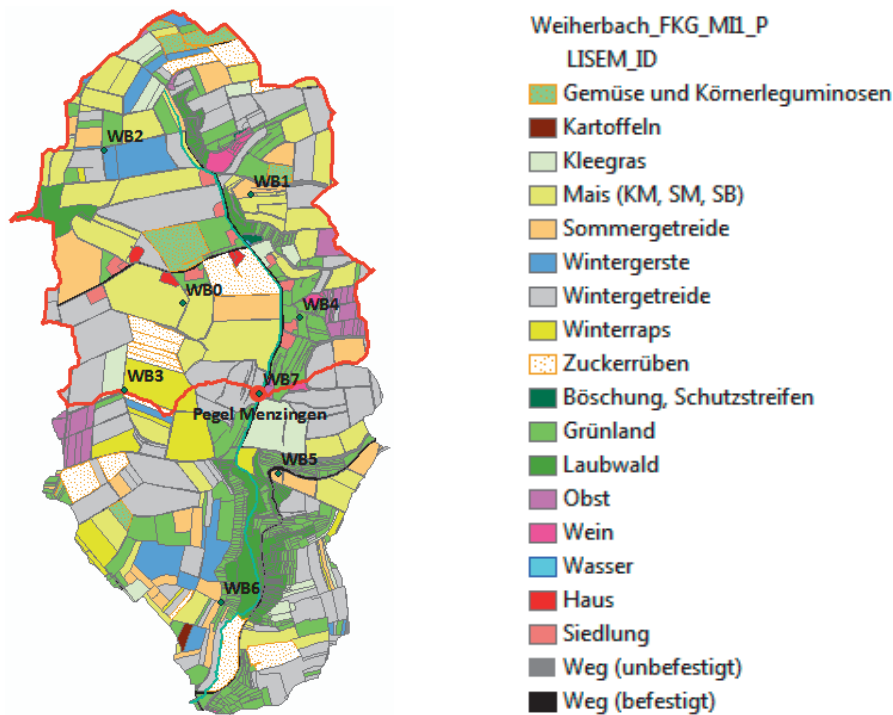


Abb. 8: Verteilung der Feldkulturen für das Untersuchungsgebiet Weiherbach für die Validierung der Modellkette.

#### 4.2 Bodenfeuchten / Bodenwasserspannung

Eine weitere wichtige Eingangsgröße für die Erosions- und Abflussmodellierungen ist die Ausgangsbodenfeuchte. Im COSMO-CLM-Klimamodell berechnet das Bodenmodul Terra-ML sowohl für die Retrospektive als auch für die Zukunftsprojektionen Bodenfeuchten, es wurde daher das Potenzial der Terra-ML-Bodenfeuchte als Eingangsgröße für das Erosionsmodell untersucht. Dabei soll die Bodenfeuchte, die als Wasservorrat bzw. „Wasserstand“ in Terra-ML spezifischen Bodenschichten ausgegeben werden, in Wasserspannungswerte der vorgegebenen Horizonte der Bodenkarten zu transformieren (Tab. 1).

Tab. 1: Vergleich der von Terra-ML ausgegebenen Bodenfeuchte-Informationen mit den auf Basis der Bodenkarten bestehenden Anforderungen für die Erosionsmodellierungen mit LISEM.

Kennwert	Terra-ML	Bodenkarten & LISEM
Bodenwasser	Wasservorrat („Wasserspiegel“) je Bodenhorizont	Wasserspannung in hPa je Bodenhorizont
Bodenschichtung	10 Horizonte bis 1150 cm	3-6 Horizonte bis max. 250 cm
Mächtigkeit des obersten Bodenhorizonts	0,5 cm	10 bis 30 cm
Bodenarten	5	ca. 20

Die erforderlichen Transformationsschritte von den Terra-ML Informationen zu den bodenkartenbezogenen Wasserspannungen für LISEM können dabei auf verschiedenen Ebenen vorgenommen werden (Tab. 2), die auch zu unterschiedlichen Ergebnisse führen, wie anhand des Testdatensatzes von Terra-ML erkennbar wird (Tab. 3).

Tab. 2: Vier exemplarisch überprüfte Optionen zur Transformation der Terra-ML Informationen in bodenkartenbezogene Wasserspannungen für die LISEM-Modellierungen.

Option	Datenquelle Bodenfeuchte	Datenquelle Bodenart	Horizontbezug des Wassergehalts	Horizontbezug der Wasserspannung
1	Wasserstand Terra-ML	Bodenkarte	Bodenkarte	Bodenkarte
2	Wasserstand Terra-ML	Terra-ML	Bodenkarte	Bodenkarte
3	Wasserstand Terra-ML	Terra-ML	Terra-ML	Bodenkarte

Tab. 3: Exemplarische Berechnung der Wasserspannung nach unterschiedlichen Optionen zur Transformation der Terra-ML Informationen (LD = Lagerungsdichte, WG = relativer Wassergehalt, WS = Wasserspannung).

Bodenkarte	Bodenkarte	Bodenkarte	Terra-ML	Option 1		Option 2		Option 3	
				WG	WS	WG	WS	WG	WS
Horizont	Bodenart	LD	Bodenart	WG	WS	WG	WS	WG	WS
[cm]	[-]	[g cm <sup>-3</sup> ]	[-]	[-]	[hPa]	[-]	[hPa]	[-]	[hPa]
10	Lu	1.3	L	0.196	-995.0	0.189	-212.9	0.189	-253.0
25	Lu	1.3	L	0.209	-837.3	0.169	-303.9	0.169	-304.5
45	Lt3	1.5	L	0.234	-1726.9	0.174	-276.4	0.174	-277.2
70	Tl	1.7	L	0.247	-3745.4	0.177	-260.6	0.177	-260.6
250	Tl	1.7	L	0.258	-2843.0	0.185	-226.6	0.185	-226.6

Die differenzierte Option 1 liefert für alle Bodenhorizonte die höchste Wasserspannung, bildet also eine verstärkte Austrocknung ab (-837 bis -3745 hPa, siehe Tab. 3). Dies ist wahrscheinlich auf die höheren Tongehalte der ausgewählten Bodenart aus der Bodenkarte 1:50.000 gegenüber dem Terra-ML-Ansatz zurückzuführen, der auf der europäischen Bodenkarte im Maßstab 1:1.000.000 basiert. Dieses Verfahren führt zu einer höheren Wasserspannung bei gleichem Wasservorrat. Die Optionen 2 und 3 liefern geringere und gegenüber Messwerten plausiblere Wasserspannungen (siehe Abb. 9), also höhere Bodenfeuchten (-227 bis -305 hPa). Im Mai 1994 stimmen die gemessenen und die für 0-0,5 cm Bodentiefe simulierten Werte gut überein. Am 27.06.1994 liegen die entsprechenden Simulationswerte über den Messwerten, allerdings zeigt der Vergleich mit den Simulationswerten von drei Tagen vorher eine gute Übereinstimmung. Somit weisen die Vergleiche darauf hin, dass die simulierten Bodenfeuchten 2-3 Tage vor einem realen Starkniederschlagsereignis aus 0-0,5 cm Bodentiefe befriedigende Initialwerte für die LISEM-Modellierungen liefern. Die Vergleiche mussten allerdings mit Werten von 1994 durchgeführt werden, da für das gewählte Ereignis zur Validierung der Modellkette (13.08.1995) keine Feldmesswerte vorlagen.

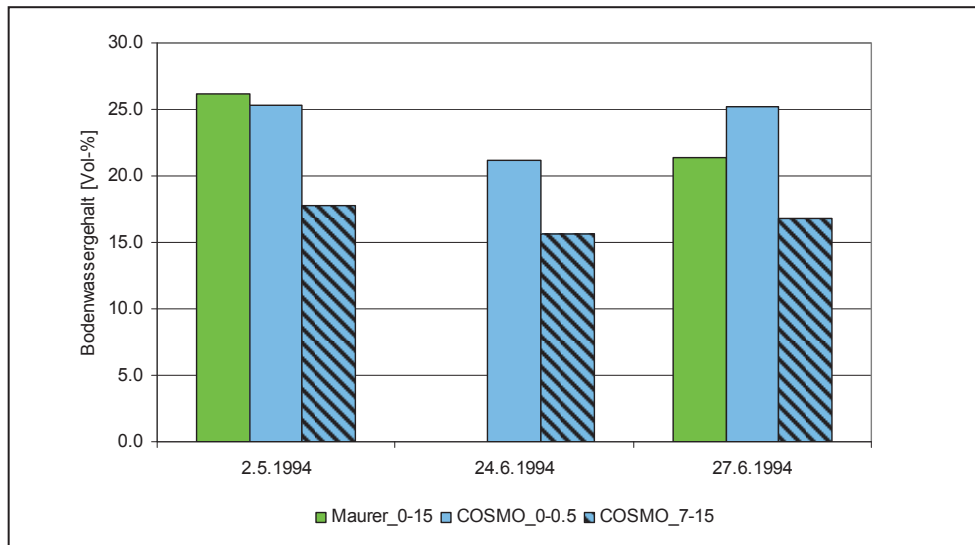


Abb. 9: Vergleich der Bodenfeuchten nach Messwerten von Maurer (1997) mit COSMO-7-km - Retrospektive-Werte nach Transferoption 3. Messwerte sind Mittelwerte aus 39 bis 50 Messpunkten und einem Termin, CCLM-Werte sind Mittelwert von 4 Simulations-Punkten des 7-km-Rasters und 4 Zeitpunkten eines Tages).

Für die Modellierung wurde als Anfangsbodenfeuchte für das gesamte Einzugsgebiet ein Matrixpotential von 250 hPa angenommen, was im Mittel aus der exemplarischen Transformation der Terra-ML Bodenfeuchten hervorging und den Feldanalysen von Maurer (1997) für unterschiedliche Termine im Jahr 1994 entspricht.

#### 4.2 LISEM-Simulationen mit COSMO-CLM-Daten

Für die Simulation des Erosionsereignisses vom 13.08.1995 wurden COSMO-CLM Daten mit einer räumlichen Auflösung von 2,8 km und einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde verwendet. Innerhalb des Einzugsgebietes dienen drei Gitterpunkte aus dem Modell als „virtuelle“ Niederschlagsstationen für das Erosionsmodell LISEM. Die COSMO-CLM Daten wurden mit dem COSMO2LISEM-Werkzeug so umgewandelt, dass sie als Eingangsdaten für LISEM genutzt werden können. COSMO-CLM simulierte am 13.08.1995 eine Niederschlagsmenge von ca. 43 mm in zwei Stunden, die Abweichung zu der realen Niederschlagsmenge (67,1 mm in zwei Stunden) liegt bei ca. 36 %.

Für die Validierung wurde das Ereignis im nördlichen Einzugsgebiet mit realen Niederschlagsdaten vom 13.08.1995 mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Minuten simuliert (Sim 313), da sich in den verfügbaren Projektberichten (Maurer 1997, Scherer 2008) die gemessenen bzw. bilanzierten Daten überwiegend auf den Pegel Menzingen im nördlichen Teileinzugsgebiet beziehen. Der Pegel liegt etwa in der Mitte des Einzugsgebiets. Das Teileinzugsgebiet umfasst eine Fläche von 3,5 km<sup>2</sup> (Abb. 8). Erosion und Abfluss wurden jeweils mit zwei (Stationsnr. 4 und 7, Sim 309) und mit nur einer Niederschlagsganglinie (Stationsnr. 4, Sim 311) für dieses Teileinzugsgebiet simuliert (vgl. Tab. 4, Abbildung 9).

Tab. 4: Gemessene (Scherer 2008) und simulierte Abflusswerte am Pegel Menzingen vom 13.08.1995.

Simulation	Abflussvolumen [m <sup>3</sup> ]			Scheitelabfluss [m <sup>3</sup> /s]	
	gemessen	LISEM	Differenz	gemessen	LISEM
Sim 309 (2 Stationen)	19100	14230	-26 %	3,17	2,24
Sim 311 (1 Station)	19100	6129	-68 %	3,17	0,88
Sim 313	19100	18498	-3,1 %	3,17*	2,75

Beim Vergleich der gemessenen Werte mit den simulierten Abflusswerten für den Pegel Menzingen fällt auf, dass die Differenz bei der Berücksichtigung von zwei Stationen deutlich geringer ist als bei Verwendung von nur einer Station (Tab. 4).

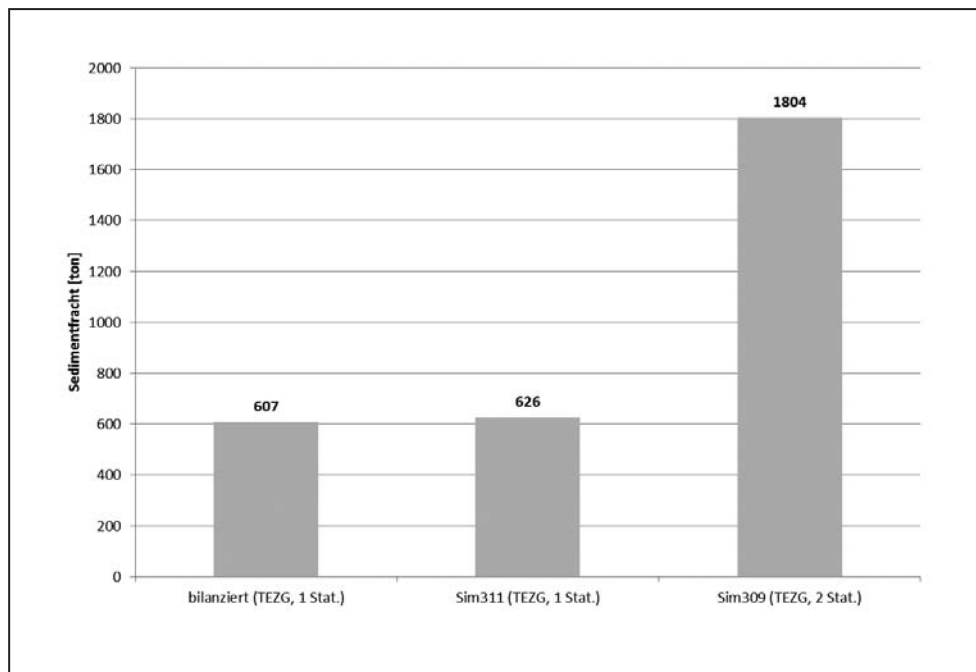


Abb. 9: Simulierte und bilanzierte Sedimentfracht am Pegel Menzingen vom 13.08.1995, deutlich wird der Einfluss der unterschiedlichen Stationsanzahl und die damit verbundene Unsicherheit für die Bilanzierung/Hochrechnung.

Für die Sedimentfracht liegen keine gemessenen, sondern nur bilanzierte Daten für das Ereignis am 13.08.1995 vor. Im Modell wurde bei der Simulation mit nur einer Station (Sim 311) die bilanzierte Sedimentfracht nur gering überschätzt. Bei der Simulation mit zwei Stationen (Sim 309) wird die bilanzierte Sedimentfracht dagegen deutlich überschätzt. (Abb. 9). Allerdings sind die bilanzierten Sedimentfrachten nur eingeschränkt zur Validierung der Modellkette geeignet. Die bilanzierten Frachten im Weiherbachgebiet beruhen auf Regressionsbeziehungen zwischen der Schwebstoffkonzentration im Wasser und dem Abfluss (Scherer 2008). Mit der Schwebstoffkonzentration wird jedoch nur ein Anteil des gesamten erodierten Materials erfasst. Zudem lag das Ereignis am 13.08.1995 außerhalb der Gültigkeit der Regressionsgeraden und musste zur Ermittlung der Schwebstoffkonzentration über den Geltungsbereich extrapoliert werden.





### 4.3 LISEM-Simulationen mit realen Niederschlagsdaten

Zur Validierung wurde das Ereignis vom 13.08.1995 auch mit gemessenen Niederschlagsdaten, mit einer Auflösung von 30 Minuten, mit LISEM simuliert (Sim 313). Abb. 10 zeigt den gemessenen Abfluss, den mit gemessenen Niederschlagsdaten simulierten Abfluss und den Abfluss mit COSMO-CLM-Niederschlagsdaten. Der gemessene Abfluss wird mit einer Differenz von nur 3,1 % sehr gut wiedergegeben. Um eine mögliche Fehlerkompensation auszuschließen, sind jedoch weitere Simulationen mit gemessenen Ereignissen notwendig.

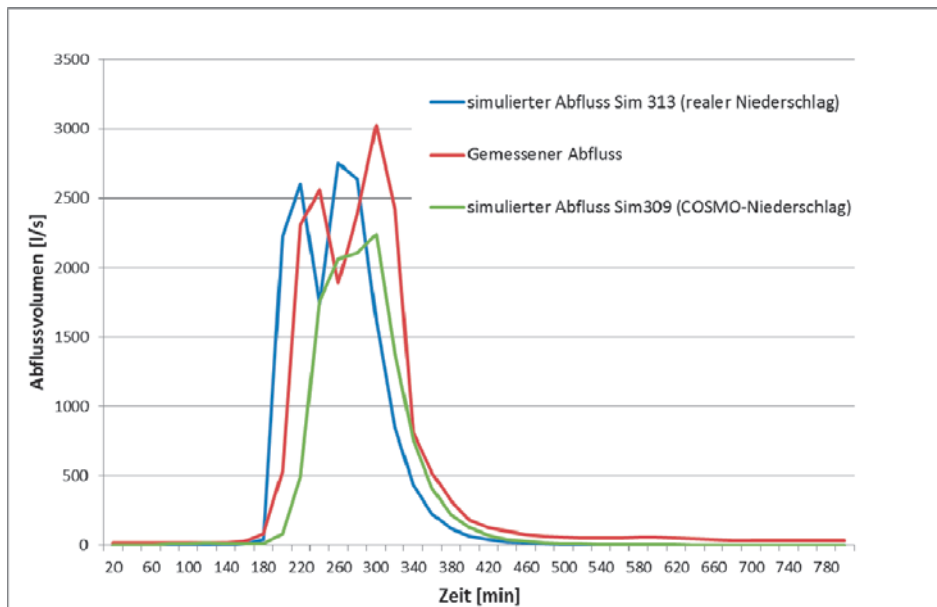


Abbildung 10: Gemessene und simulierte Abflussganglinien am Pegel Menzingen vom 13.08.1995.

## 5 Ausblick

Untersuchungen mit weiteren Niederschlagsereignissen sollen zu einer Validierung der Methode führen. In weiteren Arbeitsschritten werden sowohl Niederschlagsereignisse aus der Vergangenheit als auch für die Zukunft simuliert und den Erosions- und Abflussmodellierungen zugeführt, so dass mögliche Veränderungen des regionalen Erosions- und Abflussrisikos erkennbar werden. Als Antriebsdaten für die Klimamodellierungen mit COSMO-CLM werden in diesem Fall die Ergebnisse des Globalmodells ECHAM5 verwendet.

## 6 Literatur

- IPCC (2007): Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: Klimaänderung 2007: Wissenschaftliche Grundlagen. Beitrag der Arbeitsgruppe I zum Vierten Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC), Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z.
- KASANG, D. & KASPAR, F. (2005): Veränderung regionaler Extreme. In: LOZÁN, J. L., GRASSL, H., HUPFER, P., MENZEL, L. & SCHÖNWIESE, C.-D.: Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle?, Hamburg. S. 202-205
- KLIWA (2011). Klimawandel in Süddeutschland Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen, Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA, [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)

- 
- KOHL, R. & GROH, S. (2009): Klimawandel und Bodenerosion, KLIWA-Berichte Heft 15
- MAURER, T. (1997). Physikalisch begründete, zeitkontinuierliche Modellierung des Wassertransports in kleinen ländlichen Einzugsgebieten. Diss. Karlsruhe.
- RAUTHE, M., H. STEINER, U. RIEDIGER, A. MAZURKIEWICZ, A. GRATZKI (2013). A Central European precipitation climatology – Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). Meteorologische Zeitschrift, akzeptiert.
- RIPPEL, R. (2008): Auswirkungen der Klimaänderung auf die Bodenerosion durch Wasser in Bayern, UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“, 22. und 23. Januar 2008, Dessau
- SCHERER, U. (2008): Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion in einer Lösslandschaft. Diss. Schriftenreihe SWW. Bd. 129. Karlsruhe.
- SOLOMON, S., QIN, D., MANNING, M., CHEN, Z., MARQUIS, M., AVERYT, K. B., TIGNOR, M. & MILLER, H. L. (Hrsg.) (2007): Climate Change 2007: the physical science basis. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.



## Untersuchungen zu Auswirkungen der Klimaveränderung auf die gewässerökologischen Verhältnisse

Dr. Folker Fischer  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### 1 Einleitung

Die im Zusammenhang mit dem Klimawandel prognostizierten Veränderungen der Temperatur, der Niederschlagsverteilung und die daraus resultierenden Abflussverhältnisse haben auf Hydrologie, Chemismus und Lebensgemeinschaften von Gewässern einen entscheidenden Einfluss.

Aus diesem Grund werden die Aktivitäten zum Thema Gewässerbiologie/Gewässerökologie seit 2009 innerhalb der KLIWA-Expertengruppe „Gewässerqualität“ (AG Gewässerökologie) koordiniert und gemeinsam bearbeitet. Der Beitrag gibt einen Überblick über den Sachstand der Bearbeitung. Dabei steht die Beantwortung folgender Fragen im Vordergrund:

1. Was wurde bisher bearbeitet?
2. Was sind die wichtigsten Ergebnisse?
3. Haben die prognostizierten Veränderungen Auswirkungen auf die Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie?
4. Welche Bearbeitungsschritte sind für die Zukunft geplant?

### 2 Vorstellung des aktuellen Bearbeitungsstandes

Zunächst war es Ziel, den aktuellen Wissensstand zum Thema Klimawandel und Gewässerökologie möglichst umfassend zu recherchieren. Zu diesem Zweck wurde die Studie „Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität – Literaturlauswertung und erste Vulnerabilitätseinschätzung“ in Auftrag gegeben. Im Rahmen der Bearbeitung fand eine umfangreiche Literaturrecherche statt. Hierbei wurden recherchefähige online-Literaturdatenbanken, internationale wie nationale Literaturbestände, Gutachten und Berichte von Behörden sowie Abschlussarbeiten von Hochschulen gesichtet und ausgewertet. Ziel war es, regionalisierte Aussagen zu klimabedingten Veränderungen treffen zu können und Informationen zu folgenden Themen zusammenzustellen:

- der Empfindlichkeit von Arten, Biozönosen und Gewässertypen,
- der Veränderung von Lebensgemeinschaften,
- den Folgen für Bewertungsergebnisse nach EG-Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL).

Sämtliche Ergebnisse wurden im Rahmen eines Expertenworkshops zur Diskussion gestellt und mit Hilfe von Untersuchungsdaten bzgl. deren Aussagekraft hin überprüft.

Die Ergebnisse der Studie liegen als Abschlussbericht vor. Darüber hinaus fand eine Aufbereitung für einen Internetauftritt statt. Dieser ist unter [www.fliessgewaesserbiologie.kliwa.de](http://www.fliessgewaesserbiologie.kliwa.de) aufrufbar. Das Angebot umfasst zum einen eine einfach bedienbare Literaturdatenbank, durch die selbstständige Recherchen zum Thema ermöglicht werden. Zum anderen werden wichtige Ergebnisse zu den Themen Wirkungsbeziehungen unterschiedlicher Parameter,

Empfindlichkeit von Gewässertypen und Organismengruppen sowie Neobiota (gebietsfremde Arten) dargeboten. Ein „Download-Portal“ mit Literatur und Querverweisen auf andere Internetauftritte zum Thema runden den Auftritt ab.

### **3 Vorstellung der wichtigsten Ergebnisse der Literaturstudie**

Literaturhinweise auf einen Einfluss des Klimawandels auf die Besiedler von Fließgewässern gibt es zahlreiche. Im Folgenden werden für einige Organismengruppen exemplarisch Beispiele genannt. Umfangreichere Informationen finden sich in der zitierten Studie.

Für Fische wird ein Rückgang kälteliebender Arten zugunsten toleranter Arten (Buisson et al. 2008) beschrieben. Dies führt zu einer Verschiebung der Fischregionen in Richtung der Oberläufe (Graham & Harrod 2009, Buisson & Grenouillet 2009, Schmutz et al. 2004). Ferner werden vermehrte Fischsterben in Folge höherer Wassertemperaturen/Trockenfallen (Reinartz et al. 2007) prognostiziert. Auch ein gehäuftes Auftreten von Krankheiten (Burkhardt-Holm 2009) wird wahrscheinlich gemacht.

Für die wirbellosen Besiedler des Gewässergrundes (Makrozoobenthos) lassen sich folgende Prognosen ableiten: Wirkungen ergeben sich aus der geänderten Landnutzung, der Abschwemmung sowie aufgrund höherer Temperaturen. Dabei sind sensitive, strömungsliebende sowie kälteliebende Arten besonders betroffen (Beckmann 2002). Hinzu tritt ein Konkurrenzdruck durch neue einwandernde Arten (Neobiota) (Schöll 2007). Als besonders sensibel sind kleinere Gewässer anzusehen. Hier stellt die Bedrohung durch Austrocknung zuvor nicht ausgetrockneter Gewässer eine besondere Gefahr dar.

Bei den Wasserpflanzen (Algen und höhere Wasserpflanzen) wirkt sich das geänderte Abflussgeschehen sowie der Geschiebetransport negativ auf die Besiedlung aus (Sailer 2005, Ibsch 2004). Eine Zunahme der Verkräutung der Gewässer sowie ein vermehrtes Blaualgenvorkommen wird prognostiziert (IKSR 2004). In größeren Gewässern kann die verminderte Filtrierleistung der Muscheln zu vermehrter Planktonentwicklung führen (Christmann 2007).

### **4 Haben die prognostizierten Veränderungen Auswirkungen auf die Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie?**

Die Bewertung des ökologischen Zustandes gemäß EG-WRRL erfolgt auf Grundlage der Bewertung einzelner sogenannte biologischer und chemischer Qualitätskomponenten unter Berücksichtigung weiterer Hilfskriterien. Biologische Qualitätskomponenten stellen die Fische, das Makrozoobenthos, die festsitzenden Wasserpflanzen sowie das Phytoplankton dar. Hinsichtlich der Chemie wird eine Reihe von Schadstoffen gemessen.

Im Rahmen der Studie konnte belegt werden, dass die in der Literatur prognostizierten Veränderungen Auswirkungen auf einzelne bewertungsrelevante Indizes haben können. Da jedoch bisher keine zuverlässigen Prognosen bezüglich der zu erwartenden Erwärmung der Gewässer, der Niederschlagsverteilung oder aber der daraus resultierenden Abflussverhältnisse vorliegen, ist eine seriöse Abschätzung der Auswirkungen auf die Bewertung des ökologischen Zustandes gegenwärtig nicht möglich.

### **5 Welche Bearbeitungsschritte sind für die Zukunft geplant?**

Die Literaturswertungsstudie hat die Notwendigkeit der Überprüfung und ggf. Anpassung der bestehenden Monitoring- und Bewertungskonzepte für ein gewässerökologisches Klimamonitoring bestätigt. Aus diesem Grund wurde eine Folgestudie zum Thema „Anforderungen an ein gewässerökologisches Klimamonitoring“ vergeben, deren Bearbeitung ge-



genwärtig erfolgt. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines Rahmenkonzeptes für ein Mess- und Auswertungssystem zur Detektion klimabedingter Änderungen in Fließgewässerökosystemen im süddeutschen Raum. Dabei sollen die bisherigen Monitoringansätze der KLIWA-Länder besondere Berücksichtigung erfahren.

Im Rahmen des Projektes erfolgt zunächst eine Zusammenstellung und Auswertung bisheriger Ansätze (national wie international) mit dem Ziel der Entwicklung eines empirisch abgeleiteten Rahmenkonzeptes (Literaturrecherche). Dieses Konzept wurde im Rahmen eines Expertenworkshops vorgestellt und abgestimmt. Gegenwärtig erfolgt ein Test des Konzepts sowie dessen Weiterentwicklung anhand biotischer und abiotischer Datensätze aus den KLIWA-Ländern.

Im Vordergrund der Bearbeitung steht die Beantwortung dreier Kernfragen, die die Monitoringstrategie maßgeblich bestimmen:

Was soll untersucht werden?

Wo soll untersucht werden?

Wann und wie oft soll untersucht werden?

Mit ersten Ergebnissen ist mit Projektende Mitte 2013 zu rechnen.

Neben den geschilderten Aktivitäten zum bisherigen Themenschwerpunkt „Fließgewässer“ ist künftig auch eine intensive Beschäftigung mit dem Thema „Seen“ vorgesehen.

## 6 Literatur

- Beckmann, M. (2002): Auswirkungen des Rheinhochwassers auf das Makrozoobenthos seiner Zuflüsse. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn: 96 S.
- Buisson, L., W. Thuiller, S. Lek, P. Lim & G. Grenouillet (2008): Climate change hastens the turnover of stream fish assemblages. *Global Change Biology* 14(10): 2232-2248.
- Buisson, L. & G. Grenouillet (2009): Contrasted impacts of climate change on stream fish assemblages along an environmental gradient. *Diversity and Distributions* 15(4): 613-626.
- Burkhardt-Holm, P. (2009): Climate change and decline in abundance of brown trout - is there a link? Results from Switzerland. *Klimawandel und Bachforellenrückgang - gibt es einen Zusammenhang? Resultate aus der Schweiz*: 1-9.
- Christmann, K.-H. (2007): Rhein-Messprogramm Biologie 2006/2007, Teil II-A. Das Phytoplankton im Rhein (2006-2007): 39 S.
- Graham, C.T. & C. Harrod (2009): Implications of climate change for the fishes of the British Isles. *Journal of Fish Biology* 74(6): 1143-1205.
- Reinartz, R., E. Bohl & M. Herrmann (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 57/Gewässerökologie: 124 S.
- Ibisch, R.B. (2004): Biogene Steuerung ökologischer Systemeigenschaften des hyporheischen Interstitials der Lahn (Hessen). Dissertation am Institut für Hydrobiologie, Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Wasserwesen der Technischen Universität Dresden. 180 S.
- IKSR (2004): Wärmebelastung der Gewässer im Sommer 2003. Zusammenfassung der nationalen Situationsberichte. 70. Plenarsitzung – 8./9. Juli 2004 - Bern. Bericht Nr. 142d, Internationale Kommission zum Schutz des Rheins: 46 S.
- Reinartz, R., E. Bohl & M. Herrmann (2007): Auswirkungen der Gewässererwärmung auf die Physiologie und Ökologie der Süßwasserfische Bayerns, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 57/Gewässerökologie: 124 S.





- Sailer, G. (2005): The roles of local disturbance history and microhabitat parameters for stream biota. Dissertation an der Fakultät für Biologie der LMU München: 195 S.
- Schmutz, S., C. Matulla, A. Melcher, T. Gerersdorfer, P. Haas & H. Formayer (2004): Beurteilung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Fischfauna anhand ausgewählter Fließgewässer. Endbericht, im Auftrag des BMLFUW, GZ 54 3895/163-V/4/03.
- Schöll, F. (2007): Rhein-Messprogramm Biologie 2006/2007, Teil II-D. Das Makrozoobenthos des Rheins 2006/2007. 39 S.



## Verzeichnis der Referenten

<p>Dr. Michael Altmayer Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz Rosenkavalierplatz 2 81925 München Michael.Altmayer@stmuv.bayern.de</p>	<p>Uwe Bergdolt Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Griesbachstraße 1-3 76185 Karlsruhe Uwe.Bergdolt@lubw.bwl.de</p>
<p>Dr. Georg Berthold Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie Rheingaustraße 186 65203 Wiesbaden Georg.Berthold@hlug.hessen.de</p>	<p>Dr. Folker Fischer Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Folker.Fischer@lfu.bayern.de</p>
<p>Dr. Kai Gerlinger Ingenieurbüro HYDRON Haid-und-Neu-Str. 7 76131 Karlsruhe Kai.Gerlinger@hydron-gmbh.de</p>	<p>Reinhold Godina Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Abteilung VII / 3 Wasserhaushalt Stubenring 1 1010 Wien Reinhold.Godina@lebensministerium.at</p>
<p>Thomas Gudera Landesanstalt für Umwelt und Naturschutz Baden-Württemberg Griesbachstraße 1 76185 Karlsruhe Thomas.Gudera@lubw.bwl.de</p>	<p>Gerhard Hofmann DWD / Regionales Gutachtenbüro München Helene-Weber-Allee 21 80637 München Gerhard.Hofmann@dwd.de</p>
<p>Bernd Katzenberger Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Griesbachstraße 1-3 76185 Karlsruhe Bernd.Katzenberger@lubw.bwl.de</p>	<p>Holger Komischke Bayerisches Landesamt für Umwelt Hans-Högn-Str. 12 95030 Hof Holger.Komischke@lfu.bayern.de</p>
<p>Prof. Dr. Jochem Marotzke Max Planck Institut für Meteorologie Bundesstr. 53 20146 Hamburg jochem.marotzke@zmaw.de</p>	<p>Dr. Andreas Meuser Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz Kaiser-Friedrich-Str. 7 55116 Mainz Andreas.Meuser@luwg.rlp.de</p>



<p>Dr. Jörg Neumann          Bayerisches Landesamt für Umwelt          Hans-Högn-Str. 12          95030 Hof          Joerg.Neumann@lfu.bayern.de</p>	<p>Prof. Dr. Dr. Franz Josef Radermacher          Forschungsinstitut für anwendungsorientierte          Wissensverarbeitung          Lise-Meitner-Strasse 9          89081 Ulm          Franz-Josef.Radermacher@uni-ulm.de</p>
<p>Dr. Bruno Rudolf          Deutscher Wetterdienst          Frankfurter Straße 135          63067 Offenbach          Bruno.Rudolf@dwd.de</p>	<p>Dr. Tilmann Sauer          RLP-Kompetenzzentrum für Klimafolgen          Hauptstraße 16          67705 Trippstadt          Tilmann.Sauer@wald-rlp.de</p>
<p>Dr. Bruno Schädler          Universität Bern; Geographisches Institut          GIUB          Hallerstrasse 12          CH-3012 Bern          Bruno.Schaedler@giub.unibe.ch</p>	<p>Dr. Gerd Schädler          Karlsruher Institut für Technologie (KIT);          Institut für Meteorologie und Klimafor-          schung          76128 Karlsruhe          Gerd.Schaedler@kit.edu</p>
<p>Dr. Wolfgang Sprenger          Bayerisches Landesamt für Umwelt          Hans-Högn-Str. 12          95030 Hof          Wolfgang.Sprenger@lfu.bayern.de</p>	<p>Johann Weber          Bayerisches Landesamt für Umwelt          Hans-Högn-Str. 12          95030 Hof          Hans.Weber@lfu.bayern.de</p>
<p>Prof. Dr. Harald Welzer          FUTURZWEI. Stiftung Zukunftsfähigkeit;          Rosenstraße 18          10178 Berlin          Harald.welzer@futzurzwei.org</p>	

---

## Bisher erschienene KLIWA-Berichte

Herausgeber: Arbeitskreis KLIWA

(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg; Bayerisches Landesamt für Umwelt; Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz und Deutscher Wetterdienst)

Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, 278 S., ISBN 3-88251-279-2, Karlsruhe 2001.

Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 98 S., ISBN 3-88251-284-9, Karlsruhe 2002.

Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88251-286-5, Karlsruhe 2003.

Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg, 249 S., ISBN 3-937911-16-2, München 2004.

Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, 76 S., ISBN 3-937911-17-0, München 2005.

Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, 88 S., ISBN 3-937911-18-9, München 2005.

Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, 160 S., ISBN 3-937911-19-7, München 2005.

Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, 93 S., ISBN 3-88148-412-4, Offenbach 2006.

Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, 100 S., ISBN 3-88251-305-5, Karlsruhe 2006.

Heft 10: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart, 256 S., ISBN 978-3-88251-325-7, Karlsruhe 2007.





- 
- Heft 11: Zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 99 S., ISBN 978-3-88251-326-4, Karlsruhe 2007. 312 4
- Heft 12: Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern, 147 S., ISBN 978-3-88148-429-9, Offenbach 2008.
- Heft 13: Modellunterstützte Untersuchungen zum Einfluss des Klimas auf den Bodensee, 128 S., ISBN 978-3-88251-345-5, Karlsruhe 2009.
- Heft 14: Auswirkungen des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 114 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2009.
- Heft 15: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, Fachvorträge beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4.12.2009 in Mainz, 313 S., ISBN 978-3-933123-20-6, Mainz 2010.
- Heft 16: Langzeitverhalten von Grundwasserständen, Quellschüttungen und grundwasserbürtigen Abflüssen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 148 S., ISBN: 978-3-88251-362-2, Karlsruhe 2011.
- Heft 17: Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, 112 S., ISBN 978-3-88251-363-9, Karlsruhe 2012.
- Heft 18: Die Entwicklung von Großwetterlagen mit Auswirkungen auf den süddeutschen Raum, 154 S., ISBN 978-3-88251-346-2, Karlsruhe 2012.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>