

---

## 4. KLIWA-Symposium

am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz

*Fachvorträge*

Klimaveränderung und  
Konsequenzen für  
die Wasserwirtschaft

---

KLIWA-Berichte

Heft 15

---



**KLIWA**

Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

---

## 4. KLIWA-Symposium

am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz

*Fachvorträge*

Klimaveränderung und  
Konsequenzen für  
die Wasserwirtschaft

---

KLIWA-Berichte

**Heft 15**

---



**KLIWA**

Klimaveränderung  
und Wasserwirtschaft

## IMPRESSUM

### Herausgeber

Arbeitskreis KLIWA

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg,  
Bayerisches Landesamt für Umwelt (BLfU),  
Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und  
Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG),  
Deutscher Wetterdienst (DWD)

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

### Herausgabedatum

August 2010

### ISBN

978-3-933123-20-6

### Bearbeitung

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbe-  
aufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG)

### Redaktionelle Bearbeitung

Dr.-Ing. Dieter Prellberg - LUWG  
Abteilung Hydrologie, Vorsorgender Hochwasserschutz  
Martin Treis - LUBW  
Referat Hydrologie und Hochwasservorhersage

### Druck

E&B Engelhardt und Bauer, 76131 Karlsruhe

### Umwelthinweis

Druck auf Recyclingpapier

Dieses Heft ist klimaneutral gedruckt

Print  kompensiert  
Ident-Nr. 105383

### Bezug über

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und  
Naturschutz Baden-Württemberg  
Griesbachstraße 1-3  
76185 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 Quellenangabe  
und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

## 4. KLIWA-Symposium

### Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

---

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorbemerkung .....	7
Begrüßung Stefan Hill, Präsident des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Rheinland-Pfalz .....	9
Grußwort Nikolaus Brender, Chefredakteur des ZDF .....	13
Anpassung an den Klimawandel – Strategie in Rheinland-Pfalz Margit Conrad, Staatsministerin für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz .....	15
Anpassung an den Klimawandel – Strategie in Baden-Württemberg Tanja Gönner, Umweltministerin Baden-Württemberg .....	21
Anpassung an den Klimawandel – Strategie in Bayern Melanie Huml, Staatssekretärin für Umwelt und Gesundheit Bayern .....	25
Position des Deutschen Wetterdienstes Wolfgang Kusch, Präsident des Deutschen Wetterdienstes .....	37
Klimawandel – Teil einer Welt im Wandel. Was bedeutet das für die Anpassungsforschung? Hans-Jochen Luhmann, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie .....	39
<b>Wie geht KLIWA vor? – Welche Grundlagen verwenden wir?</b>	
Das Kooperationsvorhaben KLIWA Albert Göttle, Bayerisches Landesamt für Umwelt .....	51
Die Klimaforschungslandschaft in Deutschland und die Rolle des Deutschen Wetterdienstes Paul Becker, Deutscher Wetterdienst .....	67
Auswertung/Verwendung regionaler Klimaszenarien im Vorhaben KLIWA Johann Weber, Bayerisches Landesamt für Umwelt .....	71
Dynamisches Modell COSMO-CLM Gerd Schädler, Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO) Karlsruher Institut für Technologie (KIT) .....	85

## **Welche Veränderungen haben wir bereits festgestellt?**

Klimamonitoring für KLIWA Bruno Rudolf, Gabriele Malitz, Annegret Gratzki, Deutscher Wetterdienst .....	97
Langjährige Hochwasserabflüsse in Rheinland-Pfalz Dieter Prellberg, Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz .....	107
Großwetterlagen und hydrometeorologische Extreme Hans J. Caspary, Hochschule für Technik Stuttgart .....	115

## **Werden die Sommer trockener?**

Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasser Jürgen Ihringer, Karlsruher Institut für Technologie (KIT) .....	135
Klimawandel und Niedrigwasser – Möglichkeiten der Anpassung Wolfgang Hennegriff, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg .....	157

## **Reichen die Wasserressourcen?**

Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen – Periodizitäten und Korrelation mit Klimasignalen Winfried Willems, IAWG, Ottobrunn .....	165
Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung – Ergebnisse von Szenarienrechnungen Thomas Gudera, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg .....	187
Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland Jörg Neumann, Bayerisches Landesamt für Umwelt .....	203
Anpassungsmaßnahmen für die Grundwasserbewirtschaftung am Beispiel des Hessischen Rieds Mario Hergesell, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden .....	211
Anpassungsstrategien der Wasserversorgung an klimabedingte Veränderungen am Beispiel einer Fernwasserversorgung Frieder Haakh, Zweckverband Landeswasserversorgung .....	221

## **Wie verändern sich Böden, Gewässer und unsere Landschaft?**

Auswirkungen des Klimawandels auf hydrologische Extreme András Bárdossy, Universität Stuttgart .....	235
Klimawandel und Bodenerosion Raimund Kohl, Stefanie Groh, LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg .....	245
Veränderung der Beschaffenheit von Fließgewässern Birgit Wolf, Folker Fischer, Michael Altmayer, Bayerisches Landesamt für Umwelt Sonja Jähmig, Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung .....	253
Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP) Ulrich Matthes, Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz .....	257
Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland (KLIWAS) Enno Nilson, Maria Carambia, Peter Krahe, Thomas Maurer, Hans Moser, Bundesanstalt für Gewässerkunde .....	265

## **Wie gestalten wir die Zukunft? – Anpassungsstrategien in Europa**

CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz David Volken, BAFU, Schweiz .....	279
The Impact of Climate Change on Water Management in Hungary László Kóthay, State Secretary for Water, Ministry of Environment and Water, Hungary.....	285
Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau Monika Prasch und Wolfram Mauser, Department für Geographie, Ludwig-Maximilians- Universität München.....	293
Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS) Achim Daschkeit, Petra Mahrenholz, Umweltbundesamt – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) .....	303

<b>Verzeichnis der Referenten</b> .....	309
---	-----



## Vorbemerkung

Das Thema "Klimaveränderung" und die damit verbundenen möglichen Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft stehen im Mittelpunkt des öffentlichen Interesses und sind Gegenstand vielfältiger Untersuchungen und Forschungsvorhaben.

Die Klimaforschung geht davon aus, dass der "Treibhauseffekt" das Weltklima nachhaltig beeinflusst und die mittlere globale Lufttemperatur bis zum Jahre 2100 um bis zu 6,4 °C erhöhen wird. Eine solche Klimaveränderung hat erhebliche Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und somit auch auf alle Bereiche der Wasserwirtschaft.

Im Sinne des Vorsorgeprinzips hat die Wasserwirtschaft die Aufgabe, die Grundlagen zu schaffen für

- die Kenntnis des Wasserhaushalts und seiner künftig zu erwartenden Entwicklung,
- die Bewertung der vertretbaren Wassernutzungen und der möglichen Gefahren und Beeinträchtigungen sowie
- die Festlegung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Handlungsstrategien.

Mittlerweile ist es weltweit anerkannt, dass wir auf unserem Planeten derzeit schon einen spürbaren Klimawandel erleben, der sich in der Zukunft verstärkt fortsetzen wird. Die Aussagen der Klimaforschung über die bisherigen und künftigen Klimaveränderungen und ihre Folgen beziehen sich zumeist auf globale bzw. großräumige Bereiche. Konkrete Angaben, also Daten und Fakten über Veränderungen von Klimafaktoren im regionalen Maßstab, sind zur Lösung wasserwirtschaftlicher Fragestellungen notwendig.

Daher haben die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Bayern zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst Anfang 1999 ein gemeinsames längerfristig angelegtes Vorhaben zum Themenkomplex "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA) vereinbart. Rheinland-Pfalz beteiligt sich an dem Vorhaben seit 2007. Damit werden die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in den Flussgebieten und Grundwasserlandschaften der Länder abgeschätzt und gebotene wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Eine erste Bestandsaufnahme zum Vorhaben fand im Rahmen des 1. KLIWA-Symposiums im November 2000 in Karlsruhe statt. Zwischenzeitliche Untersuchungen zum Klimawandel in Baden-Württemberg und Bayern wurden beim 2. KLIWA-Symposium im Mai 2004 in Würzburg und beim 3. KLIWA-Symposium im Oktober 2006 in Stuttgart der interessierten Fachwelt vorgestellt. Beim 4. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Dezember 2009 in Mainz standen neu gewonnene Ergebnisse, Erkenntnisse und Schlussfolgerungen im Vordergrund.







## Begrüßung

Stefan Hill  
Präsident des Landesamtes für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht  
Rheinland-Pfalz

Herr Angres, sehr geehrter Herr Brender,  
meine sehr geehrten Damen und Herren,

das Klima und seine Veränderungen hatte schon immer Einfluß auf den Menschen, auf die belebte und unbelebte Natur, auf alles Leben dieses Planeten. Hochwasser, Kälteperioden und Trockenzeiten gab es schon immer. Allerdings beobachten wir in den letzten Jahren eine spürbare Zunahme von Extremsituationen. Häufigere Hochwasser, heißere Sommer, anhaltende Trockenheit, stärkere Stürme, wärmste November und andere auffallende Wetterereignisse und dies an Orten, die davon bislang verschont waren.

Wir wollen mit dieser Veranstaltung einen ausgewählten Aspekt besonders beleuchten: die „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, kurz „KLIWA“, mit besonderem Augenmerk auf die: „Klimaszenarien und Folgen des Klimawandels auf die Abflüsse im Rhein sowie auf Niedrigwasser und Grundwasser“.

Und „KLIWA“ heißt auch das Kooperationsvorhaben, das vor 10 Jahren gestartet wurde und sicherlich als Vorreiter für Deutschland bezeichnet werden kann, sich mit der Thematik gründlich auseinander zu setzen. Initiiert zunächst von den Ländern Bayern und Baden-Württemberg gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst ist auch Rheinland-Pfalz seit über 2 Jahren fester Kooperationspartner. Die Tendenz des Interesses an „KLIWA“ zumindest auf der Arbeitsebene ist stark ansteigend mit Teilnahme inzwischen auch der Schweiz sowie den Ländern NRW, Hessen, Thüringen, Saarland und Niedersachsen als Gäste (*an den Sitzungen der Steuerungsgruppe*).

Im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit wird in einem Turnus von 2 bis 3 Jahren in Symposien über Ergebnisse und Erkenntnisse zu den Folgen des Klimawandels auf Wasserhaushalt und Wasserwirtschaft sowie über die Arbeiten im Kooperationsprojekt „KLIWA“ berichtet. Gemeinsame Veranstalter des inzwischen 4. „KLIWA“-Symposiums hier in Mainz sind die Kooperationspartner Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, vertreten durch die zuständigen Ministerien sowie

- der deutsche Wetterdienst,
- das Bayerische Landesamt für Umwelt,
- die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und schließlich das
- Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz in Mainz,

dem als Mitglied in der Steuerungsgruppe „KLIWA“ und in der derzeitigen Sprecherfunktion des Arbeitskreises „KLIWA“ die Federführung für dieses Symposium übertragen wurde.

Deshalb begrüße ich zunächst ganz herzlich Frau Staatsministerin Margit Conrad des rheinland-pfälzischen Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz. Klimaschutz, Klimawandel, Klimafolgen, Anpassungsstrategien, Energiesicherung und Energieeffizienz sind deutli-



che Schwerpunkte Ihrer politischen Arbeit, sehr geehrte Frau Ministerin Conrad, weshalb wir sehr gespannt über Ihren einleitenden Grundsatzvortrag sind.

Ebenso herzlich begrüße ich Frau Tanja Gönner, Umweltministerin von Baden-Württemberg sowie Frau Melanie Huml, Staatssekretärin für Umwelt und Gesundheit in Bayern.

Unsere Kooperation im Projekt „KLIWA“, sehr geehrte Frau Ministerin Gönner und sehr geehrte Frau Staatssekretärin Huml ist wichtig und richtig, sie überwindet die Landesgrenzen, dient dem Informations- und Erfahrungsaustausch und bündelt insgesamt die Kräfte.

Die hochrangige Vertretung dreier Ministerien belegt sehr eindrucksvoll die beachtliche Bedeutung der Thematik, die Erwartungshaltung gegenüber den Akteuren von heute und morgen ist entsprechend groß. Der Klimawandel ist nach allen vorliegenden Erkenntnissen von großer Tragweite. Klimawandel und Klimafolgen sind im Übrigen nur grenzüberschreitend zu verstehen.

So ist es folgerichtig, Gäste aus zahlreichen Nachbarstaaten begrüßen zu dürfen. Wir haben Gäste aus den Niederlanden, aus Frankreich, Luxemburg, aus Ungarn, aus der Schweiz und die beiden Internationalen Kommissionen zum Schutze des Rheins (IKSR) und Mosel/Saar (IKSMS) sind ebenfalls vertreten.

Die Informationsflut zum Klimageschehen ist inzwischen riesig. Heute Morgen waren es über 22 Millionen google-Eintragungen für den Begriff „climatechange“. Und je mehr wir wissen, umso mehr Fragen kommen neu hinzu. Die Thematik ist fachlich sehr anspruchsvoll, sehr komplex und letztlich auch Neuland für die verantwortlichen Personen und Institutionen. Und außerdem kommt der Klimawandel nicht einher wie ein „Großevent“, sondern meist in stetigen kleinen Schritten, sodass es einer sorgsamten Beobachtung und Analyse des Geschehens bedarf.

Klimawandel setzt Bewusstseinswandel voraus. Dazu brauchen wir belastbare Informationen. Wir alle, die konkrete Vollzugsaufgaben zum Beispiel im Hochwasserschutz zu leisten haben, erkennen großen Forschungsbedarf, weshalb sich die enge Kooperation mit nationalen und internationalen Lehr- und Forschungsinstituten sowie unseren Hochschulen gerade in den technischen Disziplinen anbietet. Forschungsinstitute aus der Schweiz, Luxemburg sowie aus Braunschweig, Darmstadt, Freiburg, Hannover, Kaiserslautern, Karlsruhe, Landau, Mainz, München, Stuttgart und Trier nehmen heute und morgen teil. Stellvertretend für die Hochschullandschaft begrüße ich von der Technischen Universität Kaiserslautern Herrn Prof. Dr. Robert Jüpner, Leiter des Fachgebiets Wasserbau und Wasserwirtschaft, ebenso herzlich wie Herrn Prof. Dr. Theo Schmitt vom Fachgebiet Siedlungswasserwirtschaft und zugleich Obmann des Ausschusses Klimawandel der Deutschen Vereinigung für Wasser- und Abfallwirtschaft „DWA“.

Meine Kolleginnen und Kollegen aus den Verwaltungen des Bundes, der Länder, aus den oberen und unteren Vollzugsbehörden, seien Sie alle sehr herzlich willkommen. Für die Landesämter und Landesanstalten für Umwelt bzw. Wasserwirtschaft ein herzliches Willkommen an Frau Präsidentin Barth aus Baden-Württemberg sowie die Präsidenten Herrn Prof. Dr. Göttle aus Bayern, Herrn Dr. Stegemann aus Mecklenburg-Vorpommern und Herrn Dr. Schmid aus Hessen.

Die Begrüßung und Ansage der Referentinnen und Referenten erfolgt im Rahmen der Moderation durch Herrn Angres, deswegen ein zusammenfassendes „Willkommen“ an alle und ein herzliches Dankeschön an diejenigen, die sich an beiden Tagen durch Rede- und Diskussionsbeiträge in die Veranstaltung einbringen werden. Das große Interesse an diesem Symposium korreliert ganz sicherlich mit der Qualität Ihrer Beiträge/ Ihrer Themen. Wir sind gespannt auf Ihre Arbeitsergebnisse.



Hochrangige Vertreterinnen und Vertreter aus Bundesministerien, Obersten Bundesbehörden wie Umweltbundesamt, Bundesamt für Naturschutz, Deutscher Wetterdienst, Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest bringen sich in unterschiedlicher Art und Weise in dieses Symposium ein. Den Präsidenten des Deutschen Wetterdienstes, Herrn Wolfgang Kusch begrüße ich stellvertretend für die Bundesbehörden aber auch in der großen Hoffnung, dass er uns zumindest für die nächsten beiden Tage ein vernünftiges Wetter beschert.

Große Themenfelder, sei es die Europäische Wasserrahmenrichtlinie, die Hochwasser-Risiko-Management-Richtlinie - und dies gilt selbstredend auch für den Themenbereich „KLIWA“ - können nicht im Alleingang gelingen. Sie erfordern einerseits sachkompetente Behandlung, vor allem aber auch Kooperationspartner. Dies vorangestellt begrüße ich die zahlreichen Vertreterinnen und Vertreter von Landkreisen, Städten und Gemeinden, Stadtwerken, Industrie und Gewerbe, Umwelt- und Naturschutzverbänden, Fachverbänden, Ingenieurbüros und aus der Versicherungswirtschaft.

Weitere Kooperationspartner sind notwendig. Stellvertretend für die Landwirtschaft begrüße ich Herrn Ralph Gockel vom Landesverband der Wasser- und Bodenverbände, stellvertretend für die Umwelt- und Naturschutzverbände Herrn Siegfried Schuch, Vorsitzender des rheinland-pfälzischen NABU, Herrn Dr. Schlapkohl vom hiesigen BUND-Landesverband, Herrn Sven Lüthje von der DWA und Herrn Heinz Flick für den Deutschen Verein der Gas- und Wasserwirtschaft und Frau Dr. Baer von der BASF in Ludwigshafen.

Herzlich willkommen Herr Oberstleutnant Rebholz vom Wehrbereichskommando II, das uns Ländern u.a. im Rahmen der zivil-militärischen Zusammenarbeit eine große Unterstützung ist.

Abschließend begrüße ich, stellvertretend für die Wasserwirtschaftsverwaltungen des Bundes und der Länder den Abteilungsleiter Wasserwirtschaft des rheinland-pfälzischen Umweltministeriums, Herrn MinDir. Werner Theis mit einem besonderen Dank für die vielfältige Unterstützung bei diesem und anderen Projekten in der Wasserwirtschaft und auch darüber hinaus.

Für das rheinland-pfälzische Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht ist es eine große Ehre, gemeinsam mit den Kolleginnen und Kollegen des Mainzer Umweltministeriums bei der Konzeptionierung, Ausgestaltung und Durchführung dieser Veranstaltung an vorderer Stelle helfen zu dürfen. - Viel Last, viel Ehr`. - Meinen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern danke ich deshalb sehr herzlich für Ihren tollen Einsatz sowohl im Rahmen der „KLIWA-Arbeitsgruppen“ als auch für die Organisation des heutigen Symposiums. Nicht zufällig nenne ich an dieser Stelle Herrn Lt. BD Dr. Prellberg, unterstützt von Frau Curatolo.

Sehr geehrter Herr Brender, weltbekannt sind die Mainzelmännchen des Zweiten Deutschen Fernsehens als unermüdliche Helfer und Ratgeber für viele Lebenslagen. Tatsächlich stehen auch richtige Menschen auf, vor und hinter dieser Bühne des Zweiten Deutschen Fernsehens, um dieses Symposium durchführen zu können. Ganz herzlichen Dank im Namen der Veranstalter für Ihre persönliche Unterstützung sowie dem Zweiten Deutschen Fernsehen für die Nutzung der Räumlichkeiten sowie für die logistische, organisatorische und technische Unterstützung. Den Intendanten des Zweiten Deutschen Fernsehens, Herrn Prof. Markus Schächter möchte ich ganz besonders hervorheben. Die Veranstaltung erfährt gerade auch durch diesen Tagungsort eine besondere Aufwertung und ein besonderes mediales Interesse.

Für dieses Symposium haben sich weit über 250 Menschen angemeldet, ich hab den Eindruck, noch vielmehr sind heute dabei. Herzlichen Dank für Ihr Kommen und uns allen wünsche ich anregende Vorträge, gute Diskussionen und insgesamt ein angenehmes Tagungsklima.



## Grußwort

Nikolaus Brender  
Chefredakteur des ZDF

Meine Damen und Herren,  
Frau Ministerin Conrad,  
Frau Ministerin Gönner,  
Frau Staatssekretärin Huml,  
Herr Dr. Hill, Präsident, und Herr Kusch, auch Präsident.

Hier sitzen beinahe nur Präsidenten, was für das gute Wetter immer wichtig ist. Wer könnte die Probleme des Klimas besser lösen, als Präsidenten oder Ministerinnen. Ministerinnen sind auch heute unter uns. Das stimmt dann fürs Klima sehr hoffnungsvoll. Der Intendant, von dem ich Sie sehr herzlich grüßen darf, hat für die Begrüßung den richtigen Vertreter zu Ihnen geschickt: Unzweifelhaft habe ich in den letzten Wochen und Monaten einiges fürs Klima im ZDF getan. Und die Problematik, die Sie behandeln, kenne ich in der gesamten Amplitude des Problems: Bis vor kurzem stand mir das Wasser bis zum Hals und ab März sitze ich dann auf dem Trockenen.

Ich freue mich sehr, dass Sie sich hier auf dem Lerchenberg getroffen haben. Denen, die zum ersten Mal das ZDF-Gelände betreten, kommt es vor wie Fort Knox – hoch sicher und abgeschlossen. Wir Journalisten haben uns aber auch auf dieser Anhöhe dem Auftrag nicht verschlossen, Augen und Ohren offen zu halten. Vor allem unsere Umweltredaktion ist es, die sich mit Ihrem heute behandelten Thema nicht nur täglich in ihrer Programmarbeit beschäftigt, sondern alle Redaktionen des Hauses für das Thema Umwelt sensibilisiert – von der Außenpolitik über die Innenpolitik bis zu den aktuellen Redaktionen. Herr Angres ist unser interner Chefperte für Umweltfragen. Er wird von den Redaktionen regelmäßig zur Beratung über Umweltthemen eingeladen. Auch Journalisten sind oftmals Fachidioten. Deswegen brauchen wir Kollegen, die über die umfassenden und vernetzten Zusammenhänge des Themas Umwelt Bescheid wissen und verständliche Beratung betreiben. Das ist bei Ihnen nicht anders als bei uns, den Journalisten.

Von einigen Medienleuten hören wir, dass das Thema Umwelt eine Sache von gestern sei. Sie weisen auf das schwindende Interesse für dieses Thema gerade in den Schulen hin. Dies stimmt aber nur zum Teil und vor allem dann, wenn Umweltpädagogik mit dem großen Zeigefinger betrieben wird. Natürlich schwindet dann das Interesse junger Leute.

Umweltthemen sind sicher auch Konjunkturthemen. Von konjunkturellen Auf- und Abschwüngen lassen wir uns bei der Berichterstattung aber nicht leiten: Wir berichten – oder versuchen es zumindest – nachhaltig, konsequent und in Zusammenhängen über ökologischen Themen. Für unsere Berichterstattung erhalten wir Kritik und Beifall, je nach Perspektive der Betroffenen. Wenn ich Ihnen unsere Berichterstattung über die zögerliche Produktstrategie von der Automobilindustrie erläutere, dann erhalte ich höchstwahrscheinlich Beifall. Die deutsche Automobilindustrie aber sieht das natürlich anders, nämlich mit Stirnrunzeln und anschließenden Beschwerden beim Intendanten.

Uns Journalisten ist es besonders wichtig, die Auswirkungen des Klimawandels für jeden einzelnen zu erklären, für jeden einzelnen auch in der Region des Rhein-Main-Gebiets. Deswegen sind Sie zusammengekommen. Dass die Gletscher schmelzen, das wissen inzwischen alle. Dass große Flüsse austrocknen, das wissen auch alle. Nur – Konsequenzen für das unmittelbare Tun haben solche Nachrichten in der Regel nicht. Die meisten wissen aber nicht, welche



Auswirkungen die Klimaveränderung auf den Fluss vor ihrer Tür hat, den Rhein. Bleibt er als Schifffahrtsstraße und als Wasserspender zugleich den Menschen erhalten? Welche Auswirkungen hat der Klimawandel auf die Landwirtschaft links und rechts des Rheins? Welche Auswirkungen für die kleinen Wirtschaftsbetriebe, die vom Fluss und von den Schwarzwaldbergen abhängen? Unsere Berichterstattung muss auf Verständnis zielen und auf ein Handeln des Einzelnen und der Gesellschaft aufgrund des Verständnisses. Nur Informationen, die begriffen worden sind, führen zu konsequentem Handeln, zur freiwilligen und gemeinsamen Veränderung unseres Lebensstils, zu politischen Entscheidungen.

Unsere Aufgabe ist es, zu informieren. Ihre Aufgabe ist es, politische Entscheidungen herbeizuführen.

Ich wünsche Ihnen viel Glück – ein bisschen Sonnenschein auf dem Lerchenberg, ein Berg voller sonnenhungriger Menschen, die Ihnen zugeneigt sind und Ihnen für den Erfolg Ihres Symposiums die Daumen drücken.

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

Margit Conrad  
Staatsministerin für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

zunächst Ihnen allen ein herzliches Willkommen hier in der Landeshauptstadt Mainz und selbstverständlich auch hier beim ZDF. Danke auch für die Begrüßung von Herrn Chefredakteur Brender, der mit dem ihm eigenen Humor auch unter Bezugnahme auf die klimatischen Extreme beim ZDF sehr gut eröffnet hat. Ich bin dankbar, dass wir hier, aber auch insgesamt in Rheinland-Pfalz, die Unterstützung der Medien haben. Klimaschutz ist ein gemeinsames Anliegen, und wir alle brauchen dringend den Transport dieser Informationen.

Ich freue mich über die große Resonanz. Ganz herzlich möchte ich auch meine Kollegin aus Baden-Württemberg, Tanja Gönner, willkommen heißen. KLIWA ist ein gemeinsames Projekt mit Baden-Württemberg und auch mit Bayern, deshalb ein herzliches Willkommen auch Ihnen, Frau Staatssekretärin Huml, und auch Ihnen, Herrn Präsident des Deutschen Wetterdienstes Wolfgang Kusch. Ich freue mich, dass wir heute und morgen eine Art Zwischenbilanz ziehen können über die mehrjährige Arbeit. Dies werden vor allen Dingen die Fachleute tun, die ich ebenfalls herzlich willkommen heiße. Dankenswerter Weise waren auch viele zu Vorträgen bereit.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, zehn Jahre ist das KLIWA-Projekt alt. Zu den Pionieren gehören Bayern, Baden-Württemberg und der Deutsche Wetterdienst. Kleine Korrektur: Rheinland-Pfalz hat seit 2002 einen Gaststatus in dieser Kooperation, und wir sind nun seit knapp drei Jahren Mitglied. Das bedeutet, dass wir Mitverantwortung übernehmen und ebenso profitieren, denn diese Zusammenarbeit ist natürlich hoch effizient und unterstützt und stärkt uns gegenseitig. Dies gilt auch für unsere Ansätze für Anpassungen an den Klimawandel.

Auch Volker Angres ein herzliches Dankeschön für die Moderation.

### **Ziele und Strategien zum Klimaschutz**

Der Klimawandel ist in vollem Gange. Das haben wir gehört, und wir reden heute und morgen über die Auswirkungen vor allem im Süden von Deutschland. Aber wir dürfen natürlich nicht vergessen, dass es eine globale Herausforderung ist und dass die Folgen und Probleme des Klimawandels in vielen Regionen dieser Erde mit geradezu dramatischen Veränderungen und Herausforderungen verbunden sind. Mehrere hundert Millionen Menschen sind existentiell betroffen durch Dürren und Überschwemmungen. Viele werden ihre Heimat verlieren, das ist heute schon nicht mehr abwendbar auf vielen kleinen Inseln.

In diesem Vergleich werden unsere Herausforderungen und unsere Anpassungsnotwendigkeiten sich geradezu als moderat erweisen. Dennoch, meine sehr verehrten Damen und Herren, stellen sie auch für uns eine große Anstrengung dar.

Es ist und bleibt auch vor Kopenhagen die Herausforderung, das Unbeherrschbare zu vermeiden und das Unvermeidbare zu beherrschen. Das ist quasi der Leitsatz, von Prof. Schellnhuber formuliert, der auch für unsere Arbeit gelten soll. Das heißt, wenn man den Klimawandel beherrschbar halten will, muss und sollte man auf der wissenschaftlichen Grundlage das Zwei-Grad-Ziel durchschnittlicher Erderwärmung bis zur Jahrhundertwende tatsächlich auch einhalten können. Und das, meine sehr verehrten Damen und Herren, ist sicherlich eine der größten





ökonomischen, ökologischen und sozialen Herausforderungen, vor der wir heute stehen. Ich sage bewusst auch ökonomisch, denn wir alle wissen: Handeln kostet Geld. Das ist richtig. Aber Nichthandeln kostet noch mehr, und das macht sich gerade bei unserer Thematik bemerkbar.

Unsere Strategie basiert auf zwei Säulen: Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel. Wenn wir die Klimagasemission oder das Zwei-Grad-Ziel global betrachten, dann müssen wir wissen, dass auch dieses Ziel für unsere Region eine durchschnittliche Erhöhung von + 2,5° bis + 3,5 °C bedeuten würde, weil sich diese Durchschnittswerte regional ganz unterschiedlich darstellen werden. Aus unserer Sicht ist deswegen als erstes die Verringerung der Treibhausgase notwendig. Dem dienen unsere Klimaschutzanstrengungen. Die notwendige Verringerung verbinden wir ebenfalls mit ambitionierten Zielen für Kopenhagen. Ich bin dankbar, dass die Bundesregierung dies auch so formuliert und das im Kontext mit Europa. Ebenso bedeutet dies für uns auch eine Länderverantwortung. Ich möchte darauf jetzt nicht weiter eingehen, aber unsere Klimaschutzstrategien sind danach ausgerichtet, dass wir national die ambitionierten Ziele, wie sie in Meseberg beschlossen wurden, tatsächlich auch erreichen. Die zweite Säule neben Klimaschutz heißt aber Anpassung an die stattfindenden und nicht mehr zu verhindernden klimatischen Veränderungen und ihre Auswirkungen auf die unterschiedlichen Sektoren.

### **Grundsätze unserer Anpassungsstrategie**

In welchem Umfang bzw. wie gehen wir mit dem Klimawandel um?

Wir haben uns zunächst Grundsätze gegeben, von denen ich einige nennen will.

1. Wir müssen die Anpassungsfähigkeit der Ökosysteme erhöhen und die Verletzbarkeit der Systeme verringern. Das heißt auch, dass wir die vorhandene Stabilität von natürlichen Systemen wie Wasserhaushalte, aber auch die Stabilität der Biodiversität schützen und erhalten müssen.
2. Wir brauchen eine Verbesserung der Entscheidungsgrundlagen. Deswegen kommt auch hier dem Fachwissen und der verbesserten Forschung über den Klimawandel eine besondere Bedeutung zu, auch der Entwicklung belastbarer regionalisierter Klimamodelle. Dies wird auch in Zukunft von fundamentaler Bedeutung für unsere Arbeit sein.
3. Wir werden weiter mit Unsicherheiten leben müssen, auch auf absehbare Zeit. Das heißt, wir werden Handlungskorridore und Optionen offen halten müssen und eine flexible, anpassungsfähige Strategie entwickeln und umsetzen.
4. Wir brauchen Gesetze und Vorschriften, die klimatauglich sind. In der Regel sind diese nicht unbedingt auf die Dynamik der Veränderungen eines Klimawandels ausgerichtet. Das gilt für die Wasserwirtschaft ebenso wie für den Naturschutz und andere Rechtssetzungen.
5. Die Ressourcensteuerung gerade für Anpassungsmaßnahmen muss gezielt und nachhaltig erfolgen, um Fehlallokationen grundsätzlich zu vermeiden. Die Umsetzung konkreter Maßnahmen bedarf auch mittelfristig ganz erheblicher Mittel. Auch auf der Umweltministerkonferenz haben wir uns auf diese und ähnliche strategische Grundsätze verständigt und auch, gemeinsam dafür einzustehen. Was die Mittelausstattung betrifft, haben wir gefordert, dass Einnahmen aus dem CO<sub>2</sub>-Handel zu einem erheblichen Teil auch zur Finanzierung von Anpassungsstrategien dienen sollen. Als Länder alleine können wir diese Aufgabe finanziell sicher nicht bewältigen.
6. Das Bewusstsein für die Klimafolgen und die notwendigen Anpassungen muss gefördert werden. Sehr gut kommunizierbar sind die Folgen für den Wasserhaushalt, ebenso Sicherheit vor Hochwasser. Darüber hinaus geht es natürlich ebenfalls um Phänomene, welche Nachbarsektoren betreffen wie die Forstwirtschaft, die Landwirtschaft, den Tourismus und die Infrastruktur insgesamt.

## Klimawandel in Rheinland-Pfalz

Die mittlere Jahrestemperatur bei uns liegt jetzt schon höher als im Bundesdurchschnitt, nämlich um + 0,4 °C. Die jüngsten Veröffentlichungen des Deutschen Wetterdienstes besagen, dass in den letzten, etwas mehr als hundert Jahren die Durchschnittstemperatur bei uns in Rheinland-Pfalz bereits um + 1,1 °C angestiegen ist. Damit liegen wir über dem Bundesdurchschnitt von + 1 °C. Regional verzeichnen wir unterschiedliche Temperatursteigerungen. Die höchsten liegen im Oberrheingraben, aber auch im Neuwieder Becken bei Koblenz, wobei man wissen muss, dass dies bereits heute die heißesten Regionen in Deutschland insgesamt sind.

Insbesondere die Sommer sind wärmer geworden, in Rheinland-Pfalz um + 1,3 °C. Die Winter verzeichnen einen Anstieg von etwas weniger als + 1 °C. Die Entwicklungen schlagen sich zudem auch in der steigenden Anzahl von Sommertagen nieder, das heißt derjenigen Tage, die Temperaturen von über 25 °C Durchschnittstemperatur verzeichnen. Diese Tage haben in den letzten 50 Jahren bereits um 20% zugenommen. Wir haben auch eine Zunahme von Temperaturextremen im Sommer mit Tagen über 30 °C. Nach allen vergleichbaren Betrachtungen bestätigen regionale Klimamodelle, dass wir damit auch in Zukunft rechnen müssen. Wir werden nach diesen Modellen im Sommer mit längeren Hitzeperioden zu rechnen haben. Wir haben aber auch mit einer größeren Variabilität des Klimas und der Witterungsverhältnisse zu tun. Damit ist klar, dass sich Anpassungsstrategien nicht so einfach, wie manche sich das vorstellen, gestalten lassen.

Noch einige Aspekte zu der Entwicklung der Niederschläge, soweit wir sie heute zumindest als Trends aus der Vergangenheit betrachten können. Niederschläge sind ein bestimmender Faktor für die Wasserwirtschaft. Wir verzeichnen eine Zunahme der Niederschlagsmenge, in Rheinland-Pfalz bereits etwas deutlicher als zum Beispiel in Baden-Württemberg und Bayern. Und wir rechnen mit häufigeren Westwetterlagen. Das heißt, wir rechnen auch für die Zukunft mit heftigen und häufigeren Starkniederschlägen insbesondere in den Regionen Eifel, Hunsrück und Westerwald.

Die Häufigkeit kleiner und mittlerer Hochwässer hat in Rheinland-Pfalz seit Ende der 70er Jahre des letzten Jahrhunderts um + 25% zugenommen, das Niveau der mittleren Hochwässer um ungefähr + 20%. Deswegen verzeichnen wir auch eine höhere Hochwassergefahr im Winterhalbjahr, zum Beispiel für das Nahegebiet oder am Oberrhein. Bis zum Rheinpegel Worms wird eine Erhöhung der dortigen mittleren Hochwasserabflüsse um + 5% prognostiziert. Dies entspricht einer Erhöhung der Wasserstände am Oberrhein von ca. 30 cm am Pegel Maxau oder 40 cm am Pegel Worms. Alle Berechnungen, meine sehr verehrten Damen und Herren, geben aber bis heute keine Hinweise, dass der Klimawandel zu einer Zunahme von Extremhochwässern führen würde. Dieser Hinweis ist für uns am Oberrhein wichtig für das Ausbauziel auf einen 200-jährlichen Hochwasserschutz.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, dass extreme Niederschläge im Sommer zu einem erheblichen Problem gerade auch für die Böden werden, will ich nur nachrichtlich kurz ansprechen. Das Thema Erosionsschutz ist jetzt schon ein Thema in der Landwirtschaft und im Weinbau, insbesondere in den Steillagen. Es wird dort bereits berücksichtigt für künftige Anbaumethoden. Die mittleren Niedrigwasserabflüsse im Sommer haben am Oberrhein um - 15% und am Mittelrhein um ca. - 10% abgenommen. Das heißt, wir haben noch einmal einen weiteren Rückgang der Niedrigwasserstände zu erwarten mit enormen Auswirkungen auf die Schifffahrt, aber auch auf das gesamte Wasser- und Niedrigwassermanagement. Das heißt auch auf den Betrieb von Kraftwerken am Rhein.

Wir rechnen, meine sehr verehrten Damen und Herren, aufgrund von höheren Winterniederschlägen mit steigenden Grundwasserständen, allerdings regional durchaus unterschiedlich. Wir kennen aber auch Regionen, in denen wir durch längere Trockenperioden zunehmend mit Problemen durch das Absinken des Grundwasserspiegels rechnen müssen. Dies hat bereits



Auswirkungen auf die Trinkwasserversorgung. Ich will es bei diesen wenigen Stichworten belassen. Die Erkenntnisse sind natürlich noch ausbaufähig und werden auch in den einzelnen Referaten noch zu berichten sein.

### **Anpassungsmaßnahmen in Rheinland-Pfalz**

Anpassungsmaßnahmen, die wir bereits heute ergreifen - oder Konsequenzen im Stadium relativen Nichtwissens, das müssen wir so zugestehen -, will ich in wenigen Punkten darstellen.

Bezogen auf den Hochwasserschutz haben wir unser Schutzkonzept überprüft. Es ist grundsätzlich klimatauglich. Deswegen ist die konsequente Umsetzung unseres Hochwasserschutzkonzeptes eine der ersten wichtigen Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Sicherheit der Menschen in unserem Land, aber selbstverständlich auch der Menschen in den benachbarten Regionen. Ich möchte hinzufügen, dass wir bereits seit 1991 ca. 600 Millionen Euro in den Hochwasserschutz investiert haben und bis zum Jahre 2020 noch weitere ca. 500 Millionen Euro zu investieren gedenken.

1) Die erste Säule des Hochwasserschutzkonzeptes, „Förderung des Rückhaltes in der Fläche“, gewinnt vor dem Hintergrund der geschilderten klimatisch bedingten Niederschlagsveränderungen zunehmend an Bedeutung. In Stichworten bedeutet dies konkret: dezentrale Versickerung, Förderung von Rückhaltemaßnahmen, Renaturierung auch an kleineren Flüssen und Niederschlagswasserbewirtschaftung. Wir haben bereits reagiert, indem wir die Förderkulisse verbessert haben. Bis zu 90% können Kommunen als Investoren heute in der Regel als Förderung aus der **Aktion Blau** erhalten. Die Aktion Blau hat sich insgesamt in den letzten Jahren als Erfolgsmodell herausgestellt. Ebenfalls sind wir dabei, einen „Leitfaden Starkregen“ für die Kommunen und die kommunale Wasserwirtschaft zu entwickeln, zusammen mit den kommunalen Spitzenverbänden und der Universität Kaiserslautern.

2) Der zweite wichtige Punkt ist die zügige Umsetzung des selbstverständlich mit den Nachbarländern abgestimmten Hochwasserschutzkonzeptes am Oberrhein. Wir arbeiten mit Baden-Württemberg und Frankreich eng zusammen. Sichere Deiche und vor allem die zügige Umsetzung von zehn Retentionsräumen ist eine der wichtigsten Aufgaben gerade auch vor dem Hintergrund der Erhöhung der mittleren Hochwasserstände. Sechs sind fertiggestellt. Bis auf einen, der beklagt worden ist, sind wir zuversichtlich, dass bis zum Jahr 2012 alle restlichen entweder im Betrieb sind oder im Bau kurz vor dem Abschluss stehen.

3) Auch in Verbindung mit den Veränderungen des Klimas sind zusätzlich **Reserveräume für extreme Hochwässer** entwickelt worden. Wir sind dabei, zwei zusätzliche Reserveräume auszuweisen. Die Moderationsverfahren sind bereits im Gang bzw. abgeschlossen. Sie stehen nach Abschluss der Retentionsräume zur Realisierung an.

4) Ein wichtiger Baustein ist und bleibt die Hochwasservorsorge. Wir haben gerade mit den kommunalen Spitzenverbänden die Eigenvorsorge der Kommunen verstärkt, auch im Interesse der Bevölkerung. Dazu gehören Hochwasserrisikokarten, Hochwassermanagement in Umsetzung auch der Hochwasserrahmenrichtlinie sowie die Förderung einer Beratungs- und Informationsplattform bei den kommunalen Spitzenverbänden, das Konzept **Hochwasserpartnerschaften**.

5) Zur Grundwasserbewirtschaftung nur ein Stichwort: Viele kennen in der Vorderpfalz die Debatte über Grundwasserhochstände. Dort wird bereits in eine angepasste Gewässerbewirtschaftung investiert, die sowohl Grundwasserhochstände als auch die geringere Wasserführung in Bächen und Flüssen in den Sommermonaten reguliert. Was die Trinkwasserversorgung betrifft, haben wir zunächst identifiziert, wo wir mit Versorgungsproblemen in Zukunft rechnen müssen. Deswegen sind wir in drei größeren Regionen im Raum Neuwied, Richtung Bonn und Altenkirchen, im südlichen Hunsrück für Birkenfeld und Idar-Oberstein oder auch in Rheinhes-

sen und der Nordpfalz dabei, mit Verbundsystemen für eine verbesserte und sichere Wasserversorgung auch unter veränderten klimatischen Bedingungen zu sorgen.

6) **Beregnung** ist ein weiteres Stichwort. Hier kommt zugute, dass für die Beregnung auch aus anderen Gründen bereits eine Umstellung auf Rheinwasserversorgung erfolgte. Die Beregnung ist in Rheinhessen und der Vorderpfalz mit den Sonderkulturen von existentieller Bedeutung für die Landwirtschaft. Wir entnehmen das Wasser nicht mehr kleinen Flüssen oder dem Grundwasser, sondern dem Rhein.

7) Wir brauchen und fordern eine verstärkte **überregionale und internationale Zusammenarbeit**. Ich will nur die Zusammenarbeit mit den hier anwesenden Nachbarn nennen, aber auch mit Luxemburg und mit dem Saarland.

8) Wir können und müssen unseren Beitrag dazu leisten, dass wir durch Forschungsförderung die Datengrundlage verbessern und belastbarer machen. KLIWA leistet hier einen wichtigen Beitrag, aber auch andere Projekte. Wir haben in Rheinland-Pfalz durch ein weiteres interdisziplinäres Projekt: „KlimLand“ Klimafolgenforschung sektorenübergreifend aufgelegt. Klimawandelfolgen werden für Landwirtschaft, Boden, Wasser, Forstwirtschaft, Biodiversität betrachtet. Auch regionalisierte Klimamodelle werden einbezogen. Ich bin dankbar, dass das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung als Partner mitwirkt. Im Übrigen sind wir dabei, ein Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen einzurichten. Dies geht zurück auf eine Forderung der Enquête-Kommission „Klimawandel“ des Landtages. Forschungen sollen zusammengeführt und Monitorings aufeinander abgestimmt werden. Eine sektoren- und ressortübergreifende Koordination ist notwendig angesichts der Vielfalt der Aktivitäten.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, dies war ein Einblick in die Strategien, in die Entscheidungen, die wir bereits getroffen haben. Es wird sicherlich in Zukunft auf der Grundlage konkreter Datenbasen auch weitere Schritte geben. Wir haben zum Beispiel bisher keinen Klimawandelanpassungsfaktor bei Investitionen vorgesehen. Wir schließen das für die Zukunft nicht aus, aber wir wissen, dass für Rheinland-Pfalz noch zum Teil widersprüchliche Datenlagen vorliegen.

Ich wünsche Ihnen einen ausgesprochen informativen Tag. Wir haben eine Zwischenbilanz vorzulegen. Es ist auch wichtig, dass wir eine konkrete Adresse Richtung Kopenhagen schicken. Tanja Gönner und ich werden ebenfalls dabei sein. Klimaschutz ist das eine, Anpassung ein anderes Thema in Kopenhagen; bei uns wird beides ganz konkret. Vielen Dank!



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

Tanja Gönner  
Umweltministerin Baden-Württemberg

Sehr geehrte Frau Ministerin Conrad,  
sehr geehrte Frau Staatssekretärin Huml,  
sehr geehrter Herr Dr. Kusch,  
meine sehr verehrten Damen und Herren,

ich darf Sie sehr herzlich zum **4. KLIWA-Symposium** hier in Mainz im ZDF begrüßen.

### 1 Einführung

Vor **zehn Jahren** haben wir zusammen mit den bayerischen Kollegen und dem Deutschen Wetterdienst das **Kooperationsvorhaben KLIWA gegründet**. **Vier Jahre zuvor** war der zweite Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) erschienen und es zeichnete sich schon damals ab, dass die Prognosen über die weitere Klimaentwicklung Anlass zur Sorge boten.

Die folgenden Jahre haben deutlich gezeigt, dass sich eine **Klimaerwärmung** abzeichnet. **Überflutungen** von bis dahin nicht gekanntem Ausmaß wechseln sich mit **Hitze- und Dürreperioden** ab. Heute wird niemand mehr ernsthaft eine Klimaerwärmung leugnen. Wir alle wissen, welche verheerenden Auswirkungen auf uns zukommen, wenn wir nicht handeln. Umso wichtiger ist es, dass sich die Staaten jetzt auf ein gemeinsames Vorgehen einigen.

Nächste Woche beginnt in **Kopenhagen** die Weltklimakonferenz. Vielleicht ist das Thema Klimawandel in den vergangenen Monaten von der Wirtschaftskrise etwas in den Hintergrund gedrängt worden. Aber in den letzten Wochen wurde gerade hinter den Kulissen sehr intensiv um den richtigen Weg in der weltweiten Klimapolitik gestritten.

*Ich meine es ist dringender denn je geboten, dass sich die Staaten **bis zum 18. Dezember** auf ein **neues und verbindliches Protokoll** einigen. Die weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen müssen weiter gesenkt werden, um den Temperaturanstieg auf noch vertretbare 2 Grad Celsius zu beschränken.*

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

Die Botschaft ist klar: wir müssen handeln. Und zwar auf allen Ebenen. Wir in Baden-Württemberg verfolgen daher eine **Drei-Punkte-Strategie**, um einer weiteren Verschärfung vorzubeugen und die Auswirkungen des Klimawandels zu mindern:

#### 2.1 Klimaschutz

**Punkt 1:** Wir müssen unsere Anstrengungen zum Klimaschutz verstärken, um den Temperaturanstieg zu begrenzen. Dies ist ein zentraler Bestandteil der Klimapolitik unseres Landes. Wir haben den Ehrgeiz, die CO<sub>2</sub>-Emissionen auch durch **landesspezifische Maßnahmen** zu reduzieren. Genau zu diesem Zweck hat die Landesregierung von Baden-Württemberg das **Klimaschutzkonzept 2010**, das wir im nächsten Jahr fortschreiben werden, und das **Energiekonzept 2020** beschlossen.



Im Kern geht es dabei um den **Ausbau** der **erneuerbaren Energien**, und um die **Steigerung** der **Energieeffizienz**, das **Energiesparen** eingeschlossen. Damit verbunden sind aus meiner Sicht die Entwicklung innovativer Produkte und die Schaffung zukunftsfähiger Arbeitsplätze.

So wollen wir in Baden-Württemberg den Anteil der erneuerbaren Energien sowohl bei der Wärmebereitstellung als auch bei der Stromerzeugung erhöhen. Im Jahr **2007** hatten wir einen Anteil von fast **10%** am gesamten **Endenergieverbrauch**.

## 2.2 Klimaforschung

**Punkt 2:** Wir brauchen Gewissheit über die Systemzusammenhänge. In Baden-Württemberg haben wir zur **Erforschung der Klimafolgen** in den letzten Jahren verschiedene Forschungsprogramme aufgelegt. Dabei haben wir uns sehr frühzeitig, gerade im KLIWA-Projekt mit Fragen der **regionalen Klimamodellierung** beschäftigt. Darüber hinaus standen Untersuchungen im Vordergrund, um die Folgen für sehr sensible Bereiche, wie zum Beispiel für Biotope oder zur Ausbreitung vektorübertragener Krankheiten besser einschätzen zu können. Es ist wichtig, dass wir diese Forschung fortsetzen.

## 2.3 Anpassungsstrategien

**Punkt 3:** Wir brauchen für alle wichtigen Felder entsprechende **Anpassungsstrategien**, um die Folgen des Klimawandels zu mindern.

Mit dem Projekt **KLIWA** haben wir bereits vor **zehn Jahren** damit begonnen, gemeinsam mit unseren Partnern die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt zu untersuchen.

Dabei haben wir, wie ich meine, sehr weitsichtig gehandelt, in dem wir nicht nur ein reines Forschungsprojekt auf den Weg gebracht haben, sondern von Beginn an die Abschätzung **möglicher Konsequenzen und die Entwicklung von Strategien** im Auge gehabt haben. Dies macht dieses KLIWA für mich so einzigartig unter den vielen Klimavorhaben, die es heute gibt!

Ein gutes Beispiel für konkrete Handlungsempfehlungen ist die Einführung **des Lastfalls Klima** bei der Bemessung von **technischen Hochwasserschutzanlagen**, den wir bereits **2005 übernommen** und den wir in den letzten KLIWA-Symposien ausführlich vorgestellt haben.

Neben dem Hochwasserthema beschäftigen wir uns in KLIWA nun aber **schwerpunktmäßig** mit den Themen **Grundwasser**, **Niedrigwasser** und **Bodenerosion**, die beim heutigen 4. KLIWA-Symposium einen breiten Raum einnehmen.

### **Grundwasser**

Mit durchschnittlich etwas **mehr als 200 Millimeter Grundwasserneubildung im Jahr** dürfen wir uns in Baden-Württemberg sicherlich zu den grundwasserreichen Bundesländern zählen. Die ersten Modellrechnungen **bis 2050** zeigen nun, dass im Vergleich zum Istzustand lediglich **geringe mittlere Änderungen** der Grundwasserneubildung zu erwarten sind.

Diese Prognosen klingen nicht sonderlich beunruhigend, wenn wir allein die **Durchschnittswerte** der Grundwasserneubildung betrachten. Doch dieses Bild täuscht. Betrachten wir die **innerjährlichen Verteilungen** der Niederschläge und der Grundwasserneubildung, können wir die Folgen des Klimawandels erkennen.

Die Folge von zunehmenden **Trockenperioden** und **Hitzewellen** sind **geringere Niederschläge** in den **Sommermonaten** und damit eine Abnahme der Sickerwasserbildung.



Daneben häufen sich **Starkniederschlagsereignisse**, die nur wenig zur Grundwasserneubildung beitragen. Diese Entwicklungen werden sich auch auf unsere **Trinkwasserversorgung** auswirken.

Einen ersten Vorgeschmack darauf hat uns der **Rekord-Sommer 2003** spüren lassen. Die **Trinkwasserversorgung** war **jederzeit gesichert**, doch wie ernst war die Lage?

Vor allem der **Spitzenbedarf** ist in den Sommermonaten dramatisch gestiegen, während wir gleichzeitig einen **Rückgang der Quellschüttungen** beobachten konnten.

Auch die **Grundwasserstände** sanken deutlich **ab**. Zur gleichen Zeit wurde ein **Anstieg des Nitratgehaltes** gemessen. Die Ertragsausfälle im trocken-heißen Sommer haben die **Stickstoffproblematik verschärft**.

Welche **Konsequenzen** ziehen wir nun aus den gewonnenen Erkenntnissen?

Durch **grundwasserschonende Bewirtschaftungsmaßnahmen**, wie beispielsweise Begrünung oder Änderung der Fruchtfolge, gelingt es **überschüssiges Nitrat** in Pflanzen **zu binden** und **Auswaschungen** in das Grundwasser **zu mindern**. Damit stellen wir sicher, dass weiterhin nahezu **75%** des **Trinkwassers** im Südwesten aus **Grundwasser** gewonnen werden können.

Ich begrüße es in diesem Zusammenhang sehr, dass im neuen **Wasserhaushaltsgesetz** die **öffentliche Wasserversorgung als Aufgabe der Daseinsvorsorge** festgeschrieben und der Vorrang der Versorgung aus ortsnahen Wasservorkommen betont wird. Dies entspricht der Linie, die von Baden-Württemberg **seit vielen Jahrzehnten** verfolgt wird. Die **Wasserversorgung** soll **in der Verantwortung der Kommunen** bleiben.

Das entbindet uns jedoch nicht von der Pflicht, unsere **Strukturen** in der Wasserversorgung **immer wieder zu optimieren**.

Durch vernetzte Systeme, größere interkommunale Lösungen und **ein zweites Standbein** in der Wasserversorgung können wir die Folgen des Klimawandels, den **steigenden Spitzenbedarf** und die **ungleichmäßige Auslastung** der Anlagen, abfedern. Damit können wir unsere **Wasserversorgung** für die Zukunft **sichern**.

### ***Bodensee***

Lassen Sie mich kurz auch einige Worte zum Bodensee verlieren. Der Bodensee ist für die Trinkwasserversorgung Baden-Württembergs **von herausragender Bedeutung**. In den vergangenen Jahren lagen die **Bodenseewasserstände** unter dem langjährigen Mittel. Grund dafür waren zu geringe Niederschläge. Damit einher geht eine langsame **Erwärmung des oberflächennahen Wassers**, die eine **geringere vertikale Durchmischung** des Seewassers und damit eine **Verschlechterung der Wasserqualität** zur Folge hat. Auch diese Entwicklung müssen wir genau beobachten.

In diesem Zusammenhang freue ich mich, dass wir Ihnen die aktuellen KLIWA-Untersuchungsergebnisse zum Bodensee in der KLIWA-Reihe als Heft 13 heute sozusagen druckfrisch und noch pünktlich zum Symposium vorlegen können.

### ***Niedrigwassermanagement***

Meine sehr verehrten Damen und Herren, aus den Erfahrungen des Hitzesommers 2003 und den Ergebnissen der KLIWA-Berechnungen haben wir aber noch **weitere Konsequenzen** gezogen. So haben wir bei unserer Landesanstalt für Umwelt eine operationelle **Niedrigwasservorhersage** eingerichtet, um vor drohenden Niedrigwasserständen zu warnen. Täglich werden für **ca. 90 Pegel Abflussvorhersagen** berechnet,





die **bis zu 7 Tage** in die Zukunft reichen. Genutzt werden diese Informationen u.a. von Industrie, Energieversorgern und Behörden.

Für den **Neckar** von Plochingen bis Mannheim werden täglich **Wassertemperaturvorhersagen** für die **nächsten 7 Tage** berechnet. Damit können ökologische und wasserrechtliche Grenzsituationen frühzeitig erkannt werden. Dieses von **Land** und **EnBW** gemeinsam **entwickelte Wärmemodell** hat sich in den letzten Jahren bei kritischen Niedrigwassersituationen **bereits mehrfach bewährt**. Für den **Rhein** zwischen Basel und Worms wird derzeit ebenfalls ein Wärmemodell erstellt.

### **Bodenerosion**

Als Folge der Zunahme von Starkregenereignissen, erwarten wir auch einen spürbaren **Anstieg der Bodenerosion**. Die Erosion von Böden und die Beeinträchtigung Ihrer Leistungsfähigkeit und Fruchtbarkeit haben fatale Folgen – nicht nur für den Hochwasserschutz und die Landwirtschaft. Wir rechnen mit der **Zunahme sogenannter „off-site Schäden“** wie die Verschlammlung von Straßen und Ortslagen oder die Verlandung und Eutrophierung von Gewässern und Biotopen. **Wenn wir nicht aufpassen, gehen unsere Böden buchstäblich „den Bach runter“**.

Mir ist es daher wichtig, dass wir das **Thema Bodenschutz** als **neuen Baustein** im KLIWA-Verbund auf den Weg gebracht haben. Je schneller wir verstehen, wo und in welchem Ausmaß Bodenerosion unter veränderten Klimabedingungen zum Problem wird, desto effektiver können wir durch angepasste, erosionsmindernde Formen der Bodenbewirtschaftung gegensteuern. Ich bin zuversichtlich, dass wir auch bei diesem wichtigen neuen Thema **bundesweit Akzente** setzen können.

## **3 Schluss**

Meine Damen und Herren,  
der **Klimawandel** ist eine **zentrale Herausforderung** unserer Zeit.

Wir nehmen diese Herausforderung inzwischen auf allen Ebenen an. Wir versuchen, den **Klimawandel** zu **bewältigen** und noch **weitergehende** Veränderungen zu **verhindern**.

Mit dem Projekt KLIWA haben wir im Süden der Republik ein schlagkräftiges Kooperationsvorhaben, mit dem wir auf dem Gebiet der Klimafolgenforschung für den Wasser- und Bodenbereich gut aufgestellt sind und auch in den nächsten Jahren sicherlich wegweisende Fortschritte erzielen können.

Ich hoffe, dass es dieses Jahr im Rahmen der **Vereinten Nationen** auch international gelingt, **verbindliche Vereinbarungen** zum Schutz des Klimas zu treffen. **Weltweit** sind die energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen zwischen **1990 und 2007** um über **30%** gestiegen. **Kopenhagen** bietet uns eine weitere **Chance**, das Kyoto-Protokoll fortzuschreiben.

Es geht nicht zuletzt darum, die verschiedenen Maßnahmen zum Klimaschutz auch umzusetzen. Entscheidend ist ferner, dass der Klimaaspekt **in unser Bewusstsein und unser Handeln Eingang findet**.

In diesem Sinne wünsche ich der Tagung einen erfolgreichen Verlauf und interessante Diskussionen.

Vielen Dank!

## Anpassung an den Klimawandel – Strategie in Bayern

Melanie Huml  
Staatssekretärin für Umwelt und Gesundheit Bayern



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



### Bayerische Klima-Anpassungsstrategie

4. KLWA-Symposium 2009  
Mainz-Lerchenberg

Melanie Huml  
Staatssekretärin

Sehr geehrter Herr Brender,  
liebe Frau Ministerin Conrad,  
liebe Frau Ministerin Gönner,  
sehr geehrter Herr Staatssekretär Kóthay,  
sehr geehrter Herr Präsident Kusch,  
lieber Herr Präsident Hill,  
meine sehr geehrten Damen und Herren,



Bayerisches Staatsministerium für  
Umwelt und Gesundheit



UNITED NATIONS  
CLIMATE CHANGE  
CONFERENCE  
DEC 7-DEC 18  
2009  
COP15  
COPENHAGEN



## **Im Vorfeld von Kopenhagen**

die Augen der Welt blicken in den nächsten Tagen nach Dänemark. Auf der **Weltklimakonferenz** in Kopenhagen soll ein **Nachfolgeabkommen** für das Kyoto-Protokoll verabschiedet werden. Denn was wir brauchen, sind **international verpflichtende Ziele**, um dem Klimawandel entschieden entgegenzutreten. Durch ein international verbindliches Protokoll für die **Zeit nach 2013** müssen die weltweiten Auswirkungen des Klimawandels auf ein erträgliches Maß begrenzt werden. Nur wenn wir es schaffen, das **2-Grad-Ziel** einzuhalten, haben wir eine Chance, die **Folgen** des Klimawandels in einem **beherrschbaren Rahmen** zu halten.

Leider werden auch immer wieder Stimmen laut, die ein **Scheitern** der Klimakonferenz in Kopenhagen prophezeien und auf die Schwierigkeit eines globalen Konsenses verweisen.

Ich wende mich entschieden **gegen** diese **pessimistischen** Tendenzen. Denn im Vorfeld von Kopenhagen ist **Bewegung in die Klimadebatte** gekommen, und bedeutende Emittenten wie **China, USA**, aber auch **Japan** haben **Ziele im Klimaschutz angekündigt**. Kopenhagen wird zeigen, ob diese Ziele leere **Lippenbekenntnisse** sind **oder** ob sie den **Weg zu** einem international verbindlichen **Nachfolgeabkommen von Kyoto öffnen**. Die persönliche **Teilnahme** des amerikanischen Präsidenten **Barack Obama stimmt jedenfalls hoffnungsvoll**.

Schon der chinesische Philosoph **Laotse** sagte:

*"Selbst eine Reise von tausend Meilen beginnt mit einem ersten Schritt."*

(Zitat Ende)

Zweifellos einen wichtigen Schritt auf der langen Reise unternommen haben die Verantwortlichen, als vor nunmehr **10 Jahren das KLIWA-Projekt** begonnen wurde. Den **KLIWA-Initiatoren** gebührt heute unsere **Anerkennung**, aber auch unser **Dank** für ihren damaligen **Weitblick**.

## Auswirkungen auf Bayern

Sehr geehrte Damen und Herren,

die **Auswirkungen** des weltweiten Temperaturanstiegs sind schon überall deutlich zu **spüren**. Auch vor Bayern macht der Klimawandel nicht Halt. In den Jahren 1931 bis 2005 ist die **Temperatur** bei uns je nach Region **um 0,8 bis 1,3 Grad gestiegen**.



Besonders drastisch fällt die Erwärmung in der sensiblen **Alpenregion** aus:

Die **Temperaturen** im Gebirge sind in den letzten 100 Jahren **doppelt** so stark gestiegen, wie im weltweiten Durchschnitt. Dies führt nicht zuletzt dazu, dass die **Gletscher** rapide **schwinden**. An einem warmen Sommertag **verliert** der **Zugspitzgletscher** so viel **Wasser**, wie Augsburg an einem Tag verbraucht.

Es ist nicht nur ein **emotionales Problem**, wenn diese großartigen Zeugen der Erdgeschichte langsam zerfließen und die Ursachen dafür in der Art und Weise liegen, wie wir leben. In den Zentralalpen, wo die Gletscher gerade im Sommer mit ihrem **Schmelzwasser** einen wichtigen Beitrag für den **Wasserhaushalt** liefern, ist der Gletscherschwund darüber hinaus auch eine ernsthafte **Bedrohung**. Fehlendes Schmelzwasser im Sommer wird zu häufigeren **Niedrigwasserperioden** führen. **Felsstürze** drohen, wenn die schmelzenden Gletscher und der auftauende **Permafrost** das Gebirge nicht mehr stützen.

Der **Rückzug der Gletscher** ist jedoch nur ein Aspekt des Klimawandels. Wir alle kennen die Szenarien der Wissenschaftler. Diese reichen von **Artenschwund** über **Naturkatastrophen** bis hin zu enormen **volkswirtschaftlichen Schäden**.



### Klimaprogramm Bayern 2020

- Minderung von Treibhausgasen
- Anpassung an den Klimawandel
- Forschung und Entwicklung

### Klimaschutz - Gebot der Stunde

Handeln ist also dringend angesagt. Ein wichtiger Baustein ist für uns das **Klimaprogramm Bayern 2020**:

Zur Umsetzung dieses Programms werden wir in den Jahren 2008 bis 2011 eine **dreiviertel Milliarde Euro** für einen nachhaltigen Klimaschutz investieren. Diese Summe setzt sich zusammen aus **350 Millionen Euro** aus dem Klimaprogramm und **400 Millionen Euro** aus dem laufenden Haushalt.

Diese Gelder investieren wir in die **drei Säulen** des Klimaprogramms Bayern 2020:

**Erstens** wollen wir die **Treibhausgase reduzieren**. **Bis 2020** wollen wir unsere energiebedingten jährlichen **CO<sub>2</sub>-Emissionen** von derzeit 6,7 Tonnen pro Kopf – da sind wir schon ziemlich gut – **auf deutlich unter 6 Tonnen pro Kopf senken**.

**Zweitens** wollen wir Bayern an die unvermeidbaren **Folgen** des Klimawandels **anpassen**.

**Und drittens** sollen **Forschung und Entwicklung** gefördert werden, beispielsweise durch neue **Forschungsverbände** im Bereich Anpassung, Effizienzsteigerung und Ressourcenschonung sowie durch die Neuausrichtung der Umweltforschungsstation **Schneefernerhaus** auf der Zugschneise.



## Anpassen

Auch wenn wir die Emissionen von Treibhausgasen sofort auf Null reduzieren könnten, würde der **Klimawandel** weiter **voran schreiten**. Eine zentrale Aufgabe wird es deshalb sein, die **klimasensitiven** und **verwundbaren** Bereiche bestmöglich an die unvermeidbaren Folgen des Klimawandels **anzupassen**. Zur **Verstärkung** dieses strategischen Ansatzes und um Handlungsoptionen für künftige Erfordernisse aufzuzeigen, hat der Bayerische Ministerrat im Mai dieses Jahres die **Bayerische Klima-Anpassungsstrategie** beschlossen. Diese können Sie – ebenso wie unser Klimaprogramm – als Broschüre **auf unserer Ministeriums-Homepage herunterladen oder bestellen**.

## Bayerische Klima-Anpassungsstrategie

Klimaschutz ist, ebenso wie die Klimafolgenanpassung, eine **gesamtgesellschaftliche Aufgabe**. So beziehen wir in den **Dialog** und die **Zusammenarbeit** alle betroffenen **Akteure** mit ein. Wir wollen die betroffenen Kreise schrittweise über die möglichen Folgen des Klimawandels **informieren** und bei Bedarf auch **Hilfestellung** leisten. Eine wichtige Multiplikatorenrolle kommt auch den Partnern der **Bayerischen Klimaallianz** zu. Für außerstaatliches Handeln setzen wir auf das Prinzip der **Freiwilligkeit** und der **Kooperation** zwischen der bayerischen Staatsregierung und den betroffenen Akteuren der verschiedenen Handlungsfelder.

Wir müssen uns darauf einstellen, dass **direkte** und **indirekte Auswirkungen** des Klimawandels, aber auch von **Klimaschutz-** und **Anpassungsmaßnahmen**, jeden **gesellschaftlichen** und **wirtschaftlichen** Bereich beeinflussen können. Die derzeit vordringlichsten Handlungsfelder für die Anpassung an den Klimawandel reichen von der Wasserwirtschaft über den Naturschutz und die Energiewirtschaft bis hin zu Bodenschutz und Georisiken.

Erlauben Sie mir, im Nachfolgenden auf zwei der **15 Handlungsfelder** der Bayerischen Klima-Anpassungsstrategie näher einzugehen.



## Handlungsfeld Wasserwirtschaft

Eine **Schlüsselrolle** bei der **Anpassung** an die Folgen der globalen Erwärmung kommt zweifellos der **Wasserwirtschaft** zu. Denn Veränderungen im Wasserhaushalt haben Auswirkungen auf nahezu alle anderen Handlungsfelder und **Lebensbereiche**.

Auch die **Wasserwirtschaft** selbst muss sich anpassen. Sie wird auf veränderte Wasserdarstellungs- und -nachfragesituationen sowie eine Zunahme von **Hochwasserereignissen** und **Dürren** reagieren müssen.

Wichtige **Handlungsziele** sind daher:

- der Hochwasserschutz,
- die Sicherung der Wasserressourcen nach Menge und Qualität,
- der Erhalt der Versorgungssicherheit für Trink- und Brauchwasser, sowie
- die Entsorgungssicherheit im Abwasserbereich.

## Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020

Bayern hat im Bereich des Handlungsfeldes Wasserwirtschaft bereits **vielfältige Maßnahmen** eingeleitet. Als eine der wichtigsten möchte ich das **Hochwasserschutz-Aktionsprogramm 2020** nennen, das Bayern bereits im Jahr 2001 beschlossen hat. Bis zum Jahr 2020 werden wir insgesamt **2,3 Milliarden Euro** in den **Hochwasserschutz** investieren. Über **eine Milliarde Euro** haben wir **schon eingesetzt** und damit viele Menschen und Sachwerte vor Hochwasser geschützt.

Der **integrale Ansatz** dieses Programms erlaubt eine **rasche** und **flexible Reaktion**. Wesentliche Ziele des Aktionsprogramms sind die **Reduktion** der Schadenspotenziale und die **Gewährleistung** eines ausreichenden **Schutzes** vor Hochwasser. Dies erreichen wir durch die **Kombination** von:

1. technischem Hochwasserschutz,
2. natürlichem Rückhalt und
3. Hochwasservorsorge.

Erste **Erfolge** des Programms wurden beim August-Hochwasser 2005 deutlich. Trotz deutlich höherer Abflüsse wie beim Pfingsthochwasser vor zehn Jahren waren die Schäden nur etwa halb so groß.

Mit der Einführung des **Klimaänderungsfaktors** für die Bemessung von Hochwasserschutzanlagen im Jahr 2004 haben wir bereits einen wichtigen Schritt in Richtung **Klimaanpassung** unternommen. Seitdem werden alle Hochwasserschutzprojekte auf einen um **15%** erhöhten Abfluss ausgelegt. Auch wenn das Hochwasser natürlich nicht an jedem Fluss exakt 15% höher werden wird, bauen wir damit im Sinne der Vorsorge eine Art "**Klimareserve**" ein.



### Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern

Ein weiteres Beispiel ist der **Niedrigwasser-Informationsdienst Bayern** (NID), den wir im September 2008 eingeführt haben. Der NID bietet als **webbasierte Anwendung** bei Niedrigwasser die Grundlage für **frühzeitige Reaktionen** der Entscheidungsträger.

Lassen Sie uns z. B. einen Blick auf die für uns alle lebenswichtigen, **kommunalen Wasserversorger** werfen. Wenn sie frühzeitig realisieren, dass Wassermangel droht, können sie sich **besser** auf diese **Situation einstellen**. Durch die Informationen des Niedrigwasserinformationssdienstes können sie die Bevölkerung rechtzeitig auf die Notwendigkeit zum **Wassersparen** vorbereiten und wichtige **Tipps** und Verhaltensmaßnahmen aufzeigen.

Dies gilt auch für jeden **Betrieb**, der für seine Produktion auf größere Mengen Wasser angewiesen ist, wie beispielsweise die **chemische** oder die **metallverarbeitende Industrie**. Betriebe können sich durch frühzeitige Information wesentlich besser auf die bevorstehende **Wasserknappheit** einstellen und entsprechend reagieren.

Auch die **Öffentlichkeit** kann sich jederzeit über die aktuelle Situation und die weitere Entwicklung informieren. **Ein Blick auf die Internetseite lohnt** und ist über den Suchbegriff "Niedrigwasser" sehr leicht zu finden.





### Regionale Verfügbarkeit von Wasser

Der Klimawandel wird die **regionale Verfügbarkeit** von Wasser deutlich beeinflussen. Auch in Bayern werden wir uns deshalb auf veränderte Verhältnisse einstellen müssen. So gilt es, unsere **Versorgungsstrukturen** zu **überprüfen** und sicherzustellen, dass es möglichst überall ein **zweites Standbein** gibt, auf das die Gemeinden im Notfall zurückgreifen können. Denn die Wahrscheinlichkeit, dass wir häufiger, längere Trockenperioden überbrücken müssen, wird ansteigen.

Wir werden aber auch die Strukturen in der Wasserversorgung **anpassen** müssen. Wenn wir beispielsweise Gemeinden mit **eigenen** Wasserversorgungsanlagen besser durch **lokale Verbundleitungen** miteinander vernetzen, werden insgesamt flexiblere Strukturen entstehen. Bereits im letzten Jahr haben wir unser Landesamt für Umwelt im nordbayerischen Hof mit verschiedenen **Studien** zur **Wasserversorgungsstruktur** und Versorgungssicherheit beauftragt.

Eine unserer **Kernforderungen** lautet: Jede Wasserversorgungsanlage sollte mindestens über **zwei** unabhängige **Standbeine** verfügen: seien es eigene, unabhängige Gewinnungsgebiete oder Verbundleitungen zum Nachbarn.

### Vielfältige Handlungsoptionen Wasserwirtschaft

Auf der Agenda der Wasserwirtschaft stehen aber noch viele **weitere Aufgaben**. Zu nennen wären hier

- die Entwicklung von Managementkonzepten für extreme Niedrigwasserereignisse,
- die Verringerung der Aufheizung von Gewässern durch Kühlwassereinleitungen,
- die Entwicklung von Handlungsempfehlungen zum Aufbereiten und Wiederverwenden von Abwasser oder
- die Überprüfung der Richtlinien für die Bemessung von Entwässerungseinrichtungen im Hinblick auf Starkregenereignisse.



### Handlungsfeld Naturschutz

Sehr geehrte Damen und Herren,  
um zu **überleben** brauchen wir nicht nur Wasser, sondern auch **funktionierende Ökosysteme**.

Die biologische Vielfalt ist aber durch die weltweite **Bevölkerungsexplosion** ebenso bedroht wie durch wachsende **Nutzungsansprüche** an Natur und Umwelt.

Bereits heute sind 6% aller bewerteten Tier- und 2,9% aller Pflanzenarten Bayerns **ausgestorben**. Des Weiteren sind 40% der Tierarten vom Aussterben **bedroht**, über 50% der Gefäßpflanzen stehen auf der Roten Liste. Um dem entgegen zu wirken, haben wir im **April 2008** unsere **Bayerische Biodiversitätsstrategie** vorgestellt.

Zusätzlich verschärft wird diese Problematik durch den vom Menschen verursachten Klimawandel. Dies führt dazu, dass der **Lebensraum** für Tiere und Pflanzen immer mehr **eingengt** wird.



## Klimawandel verschärft die Situation zusätzlich

**Zwei Phänomene** werden hier v.a. zu beobachten sein:

Erstens werden **Wärme liebende Arten**, die bisher nicht bei uns heimisch waren, verstärkt hierher **vordringen**, wie beispielsweise die Giftspinne Dornfinger.

Zweitens könnten unsere heimischen Arten "**klimatisch verdrängt**" werden. So ist beispielsweise im Fichtelgebirge die Fichte schon heute auf wenige Hochlagen beschränkt.



## Bayern Arche

Um Bayerns Tier- und Pflanzenwelt noch stärker zu schützen, haben wir seit September 2009 das Programm "**BayernArche**". Die „BayernArche“ informiert über die **einzigartigen Naturschätze Bayerns**. Für ausgewählte, gefährdete heimische Wildpflanzenarten richten wir eine **Genbank** ein, die „Genreserve Bayern“. Pflanzenarten, die weltweit nur in Bayern vorkommen oder für die Bayern eine besondere Verantwortung hat, werden wir durch Erhaltungszucht in ihrem Bestand sichern. Für besonders bedrohte Tierarten intensivieren wir bestehende Artenhilfsprogramme.



### Besondere Anforderungen im Alpenraum

In den Alpen beispielsweise werden sich Tier- und Pflanzenarten so an den Klimawandel anpassen versuchen, dass sie **immer weiter in die Höhe** steigen, **je wärmer es wird**. Aber wenn sie am Gipfel angekommen sind, wird ihr Überleben gefährdet sein.

Weitere Auswirkungen des Klimawandels auf den **sensiblen Alpenraum** hatte ich schon skizziert.

**Handlungsbedarf** besteht im Alpenraum vor allem in den Handlungsfeldern **Wasserwirtschaft, Georisiken, Bodenschutz, Naturschutz und Tourismus**.

Auf die hohe Betroffenheit des Alpenraums haben wir im Rahmen des Klimaprogramms Bayern 2020 bereits durch Sonderprogramme reagiert.

**Folgende Anpassungsmaßnahmen** fördern wir im **Zeitraum 2008-2011** besonders:

- **integrierte Wildbachschutzkonzepte** zur Beurteilung der Hochwassergefahren im alpinen Raum und zu Festlegung von Vorsorgemaßnahmen,
- die Erarbeitung der "**Gefahrenhinweiskarte bayerische Alpen**" als Grundlage für die flächenhafte Gefahrenvorsorge und die Einschätzung von geologischen Gefährdungen,
- **Schutzmaßnahmen im Bergwald** und die zugehörige Bergwaldforschung im Rahmen der Bergwaldoffensive,
- die Kartierung des Vorkommens von **Permafrost** in den bayerischen Alpen im Projekt „Perma-Net“,
- die Erarbeitung der fachlichen Grundlagen für den **Klima-Aktionsplan der Alpenkonvention** durch das Forschungsprogramm "Klimaanpassung Naturhaushalt und Alpen" und
- die systematische **Neuausrichtung der Umweltforschungsstation Schneefernerhaus** zu einem international vernetzten Zentrum für Klima- und Höhenforschung.



Ziel unserer Anstrengungen ist ein **integrales Risikomanagement** im Alpenraum, das die Möglichkeiten der **Vorbeugung**, der **Bewältigung** und der **Regeneration** optimal aufeinander abstimmt.



### Dank und gute Wünsche

Im Kampf gegen den Klimawandel können wir nur **gemeinsam erfolgreich** sein. Ich freue mich daher, dass das Forschungsprogramm KLIWA gemeinsam mit unseren **Freunden** in Baden-Württemberg und in Rheinland-Pfalz durchgeführt wird.

Auf **zehn Jahre** KLIWA können wir mit Stolz zurückblicken. Dank KLIWA haben wir für unsere Region einen **hohen Wissensstand** in Klimafragen erreicht.

Forschung und Entwicklung sind aber auch **weiterhin** von elementarer Bedeutung. Das KLIWA-Projekt als Kern der Anpassung müssen wir daher intensiv **fortführen und** auch fachlich **ausweiten**.

Ich zähle deshalb darauf, dass wir mit unseren Partnern **Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz** auch künftig über KLIWA die Weichen für eine klimasichere Zukunft stellen.

In diesem Sinne wünsche ich Ihnen allen für dieses Symposium aufschlussreiche Vorträge, anregende Diskussionen und gute Gespräche.

## Position des Deutschen Wetterdienstes

Wolfgang Kusch  
Präsident des Deutschen Wetterdienstes

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

ich freue mich außerordentlich, als Präsident des Deutschen Wetterdienstes dieses vierte KLIWA-Symposium hier in Mainz mit eröffnen zu dürfen. Der Deutsche Wetterdienst ist in Deutschland einer der zentralen Ansprechpartner zu Fragen der Klimaveränderung und der notwendigen Anpassung an den Klimawandel.

Der Klimawandel, seine Ursachen und seine Folgen sind längst keine reine Forschungsangelegenheit mehr. Der Klimawandel findet bereits statt: Im Laufe der vergangenen gut 100 Jahre beobachteten wir einen deutlichen Anstieg der Lufttemperatur, global wie auch in Deutschland. Diese Entwicklung setzt sich fort – und wird sich in den kommenden 100 Jahren sogar noch beschleunigen.

Fest steht auch: Die Veränderung des Klimas wird einen nachhaltigen Einfluss auf alle wirtschaftlichen, sozialen und politischen Bereiche unserer Gesellschaft haben. Wir alle müssen lernen, mit den Konsequenzen dieser Klimaänderung zu leben und uns anzupassen. Diese Fakten sorgen dafür, dass der Klimawandel inzwischen im Zentrum der politischen und gesellschaftlichen Diskussionen steht.

Jedem von uns dürfte klar sein, dass die unumgängliche Anpassung unserer Gesellschaft an den Klimawandel nicht zum Nulltarif zu haben ist. Gerade Anpassungsmaßnahmen im Wasserbereich können sehr teuer werden. Ihre Notwendigkeit muss deshalb durch Fakten belegt werden. Nur auf dieser Basis werden die notwendigen politischen Entscheidungen, die uns der Klimawandel aufzwingt, eine breite Akzeptanz finden.

Diese Fakten misst, sammelt, archiviert und bewertet der Deutsche Wetterdienst (DWD) als Nationales Klimadatenzentrum der Bundesrepublik Deutschland. Dazu wird im DWD das komplette Instrumentarium, über das die Wissenschaft verfügt, eingesetzt: wie Bodenmessstationen, Radiosonden, Wetterrads und Satelliten. Herzstück dieses Messsystems ist unser Messnetz mit mehr als 2 000 Stationen. Es ist eines der weltweit dichtesten Messnetze. Zur regionalen Verdichtung bindet der DWD zusätzlich Messdaten der Bundesländer ein, insbesondere der Länder Bayern, Baden- Württemberg und Rheinland-Pfalz.

Nur mit Hilfe dieser vielfältigen Mess- und Beobachtungsdaten, die im vom DWD betriebenen Nationalen Klimadatenzentrum zusammenfließen - ist ein hochwertiges „Klimamonitoring“ und damit auch die Beratung der Politik bei Fragen zum Klimawandel möglich.

Meine Damen und Herren: All diese Aufgaben sind ein teurer, aber notwendiger Beitrag eines jeden nationalen Wetterdienstes zur weltweiten Klimaüberwachung. Möglich ist das nur, weil die Steuerzahler in aller Welt die hohen Kosten dieser wichtigen Staatsaufgabe tragen. Allein die nationalen Wetterdienste sind in der Lage, jahrzehntelange Klimabeobachtungen mit höchster Qualität zu garantieren. In Deutschland kann nur der DWD als nationaler Wetterdienst der Bundesrepublik Deutschland die gesamte meteorologische Infrastruktur bereitstellen. Ohne unsere Mess- und Beobachtungssysteme, ohne unsere Kommunikations- und Datenverarbeitungssysteme und ohne unsere Wettersvorhersagemodelle gäbe es keine Wettersvorhersagen, keine Unwetterwarnungen und keine Klimaüberwachung.



Zugleich setzen wir traditionell auf eine intensive internationale Zusammenarbeit. Wetter und Wasser kennen keine nationalen Grenzen. Darum pflegt der DWD einen engen Kontakt mit den Nachbarn Deutschlands, mit der Europäischen Union, sowie weltweit im Rahmen der Weltorganisation für Meteorologie, der WMO.

Um aktuelle Klimatrends quantitativ nachweisen zu können, benötigt man möglichst weit zurückreichende Aufzeichnungen von Beobachtungen des Wetters, also von Messungen der wichtigsten Wetterelemente. Dazu gehören unter anderem Lufttemperatur, Niederschlag, Windrichtung und Windgeschwindigkeit. Für die Elemente Temperatur und Niederschlag besteht in Deutschland seit dem Jahr 1901 ein ausreichend dichtes Messnetz. Wir können heute aus den dort gewonnenen Daten sogenannte 1-km-Rasterfelder der mittleren Tagesmitteltemperatur und der Niederschlagshöhe berechnen - und zwar für jeden einzelnen Monat seit 1901. Daraus wiederum werden Zeitreihen der Gebietsmittel für Deutschland und für einzelne Bundesländer oder auch für Flusseinzugsgebiete erstellt. Auf dieser Basis ist es dem DWD heute möglich, ein detailliertes Bild des aktuellen Klimawandels in Deutschland zu zeichnen.

Um Forschung und Wissenschaft, Politik und Öffentlichkeit mit all diesen Daten und Analyseprodukten schnell und komfortabel bedienen zu können, hat der DWD im Jahr 2008 ein „Climate Data Centre“ eingerichtet.

Gerade im Wasserbereich ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Meteorologie/Klimatologie sowie Hydrologie und Wasserwirtschaft geboten, ob das nun die Hochwasservorhersage betrifft oder die Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer und Wasserversorgung. Wasser wird künftig knapper werden; sehr deutlich wird sich das zum Beispiel in Südeuropa zeigen. Auch in Deutschland erwarten wir eine Abnahme der Sommerniederschläge insgesamt, obwohl die Häufigkeit von Starkniederschlägen ansteigen wird. Aber in welchem Umfang wird uns das betreffen? Wie wird die räumliche Verteilung der Änderungen aussehen? Welche Auswirkungen sind für die Wasserwirtschaft zu erwarten, und welche Anpassungsmaßnahmen sind nötig und zu planen.

Bei all diesen Fragen arbeitet der DWD eng mit den Wasserbehörden von Bund und Ländern zusammen. Zuständige ist unsere Fachabteilung „Hydrometeorologie“. Mit der „Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser“ (LAWA) besteht eine enge Zusammenarbeit im Bereich Hochwasserschutz und Hochwasservorhersage.

Eine solche intensive Zusammenarbeit gibt es auch beim Thema „Klimawandel und Wasser“. Der Deutsche Wetterdienst ist Gründungsmitglied des Kooperationsvorhabens KLIWA. Der DWD hat während der bisherigen zehn Jahre das Vorhaben insbesondere auf dem Gebiet des Klimamonitorings unterstützt und beraten, sich im KLIWA-Arbeitskreis und in der Steuerungsgruppe eingebracht sowie mehrere KLIWA-Hefte bearbeitet.

Meine Damen und Herren, KLIWA hat nun eine Strecke von zehn Jahren erfolgreich zurückgelegt. 1999 hat KLIWA als Vorreiter im Wasserbereich mit einer konkreten, länderübergreifenden Zusammenarbeit, das heißt, mit aufeinander abgestimmten gemeinsamen Analysen begonnen. Ich bin überzeugt: KLIWA hat die vergangenen zehn Jahre sehr erfolgreich zurückgelegt. Allerdings werden wir immer wieder mit neuen Fragen konfrontiert. So interessiert uns sehr, worin zum Beispiel die Ursachen für regional sehr unterschiedliche Niederschlagstrends liegen und wie wir mit den unterschiedlichen Ergebnissen, den Unsicherheiten der Klimaprojektionen umgehen sollen?

Schon diese zwei noch unbeantworteten Fragen zeigen: Wir müssen KLIWA fortführen. Der DWD wird KLIWA auch künftig unterstützen. Er wird zum Beispiel neue Leistungen wie die Interpretation regionaler Klimaprojektionen und der daran geknüpften Unsicherheiten einbringen. Angesichts der Bedeutung des Klimawandels für unsere Zukunft wünsche ich dem Projekt auch weiterhin Erfolg und uns allen ein interessantes und fruchtbares Symposium.

## **Klimawandel – Teil einer Welt im Wandel. Was bedeutet das für die Anpassungsforschung?**

Hans-Jochen Luhmann  
Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie

### **1 Einleitung: Glückwunsch zum Geburtstag**

Herzlichen Glückwunsch! Sie, die KLIWA-Gemeinde bzw. -Familie, wenn ich Sie so anreden darf, feiern Ihren 10. Geburtstag, so besagt das Programm. Sie widmen sich einem Thema, welches dem nahe kommt, was Hermann Kahn einmal auf die Formel gebracht hat

*Thinking the Unthinkable.*

Dass Sie sich dem, seit zehn Jahren, mit Erfolg stellen, dass Sie nicht ausweichen vor dieser Perspektive, auch dazu gilt Ihnen meine Gratulation.

#### **1.1 Das produktive Konfliktpotential dessen, die Opferseite in den Blick zu rücken**

Immer erneut in den Abgrund zu schauen, ist eine seelische Daueranstrengung. Üblich und verständlich ist deshalb auszuweichen: auszuweichen vor dem, was nur mit Erschrecken wahrgenommen werden kann – Ihr professionelles Ethos bewahrt Sie vor dieser allzumenschlichen Reaktion.

Aber nicht nur menschlich, auch politisch ist diese Ihnen aufgegebenene Perspektive verdrängungsträchtig. Ihre Perspektive auf den Klimawandel vermag nämlich die Schäden, die Verluste sichtbar zu machen: Es ist die Opferseite, die Sie fokussieren. Ihre Perspektive ist in der Lage, die Ungebrochenheit der Nur-Täterperspektive der fossilen Industriegesellschaft aufzuheben. Sie vermag ihren Eliten, die den Klimawandel bis zur Selbsterstörung zu betreiben versessen sind, Einhalt zu gebieten. ‚Katrina‘ in den USA deutet dieses Potential an. Katrina erinnert dort an die traumatischen ‚dust bowl‘-Vorgänge in Arkansas mit der dadurch ausgelösten Massenmigration in den 1930er Jahren (John Steinbeck 1939), die nach dem Krieg den Boden abgeben für die dort, in den USA initiierte überparteiliche Umweltpolitik. Beim Klimathema schienen die USA bislang auf dem ‚March of Folly‘, wie die US-Historikerin Barbara Tuchman (1984) ihre bedrückende historische Beispielsammlung betitelt hat – Katrina scheint diesen Marsch der US-amerikanischen Eliten in eine neue Richtung gelenkt zu haben, weg von der Richtung auf die Klippe zu.

Die Wissenschaftsgemeinschaft, in der ich als junger Mann sozialisiert wurde, hat die für die Interessen der Täter so bedrohliche Interferenz, die der Blick auf die Opfer zu bringen vermag, an der folgenden Begebenheit begriffen. Die deutschen Atomphysiker, die Göttinger 18, haben bekanntlich 1957 für sich selbst erklärt, dass sie an einer Atomwaffenentwicklung in Deutschland nicht mitzuwirken bereit seien – sehr zur Verärgerung von Bundeskanzler Adenauer. Dass sie mit dieser ihrer persönlichen Nicht-Mitmach-Erklärung den mit Atomwaffen ausgetragenen Krieg auf dem Territorium ihrer Heimat nicht um einen Deut unwahrscheinlicher gemacht hatten, das war ihnen selbstverständlich klar.

Also waren sie bewegt von dem Wunsch, nach diesem ersten Akt sich verweigernden politischen Engagements sich auch positiv einzubringen. Sie gründeten die Vereinigung Deutscher Wissenschaftler, die VDW, um als Gruppe ihre Verantwortung für die Ergebnisse der Wissenschaft wahrnehmen zu können. Als VDW entwickelten sie ein Schutzprogramm für den schlimmen Fall, den Dritten Weltkrieg, mit Atomwaffen ausgetragen, mit Deutschland als Schlachtfeld. Das ausgearbeitete Schutzprogramm trugen sie zwei Jahr später Bundeskanzler Adenauer vor.





Dessen sofortige Reaktion: ‚Meine Herren, das kommt natürlich überhaupt nicht infrage – wenn unserer Bevölkerung die möglichen Folgen so auf Dauer vor Augen gestellt werden, dann würde das die Akzeptanz der Stationierung von Atomwaffen auf unserem Territorium unterminieren; das würde die Abschreckung gegen die Russen unmöglich machen.‘

Diese innerhalb der VDW kolportierte Begebenheit war mir eine Lehre. Vor diesem Hintergrund weiß ich, dass Ihre, KLIWAs, Existenz keineswegs selbstverständlich ist. Mehr noch: sie ist politisch eher unwahrscheinlich. Das ist der Grund für den außerordentlichen Grad meiner Dankbarkeit dafür, dass es Sie gibt; dass Sie dazu beitragen, der fossilen Industriegesellschaft die ganze Wahrheit zum Klimawandel, den sie selbst sich eingebrockt hat, antizipativ vor Augen zu stellen. Für jedermann ersichtlich wird sie sich ja nur scheinbar und sehr allmählich einstellen.

## 1.2 Das Familiengeheimnis

Sie werden schon ahnen, dass die ungewöhnliche Ausführlichkeit meiner Geburtstagsgratulation einen Anlass in der Sache meines Vortragsthemas haben muss. In der Tat: So ist es. Ich bin ebenfalls Mitglied Ihrer Profession. Also gilt das Ethos der ‚ganzen Wahrheit‘ auch für mich. Also nehme ich mir die Freiheit, Sie liebe KLIWA-Familie, an Ihr ‚Familiengeheimnis‘ zu erinnern. Meine Gratulation gilt nicht Ihrem 10. Geburtstag. Ich gratuliere vielmehr zu Ihrem 20. Geburtstag. Für mich sind Sie kein vorpubertäres Kind, für mich sind Sie ein nachpubertärer, in voller Kraft stehender junger Erwachsener. Biographisch und politisch noch etwas unerfahren zwar – aber, ich bin zuversichtlich: Das wird sich auswachsen.

Sie haben eine wenig vorzeigbare Frühgeschichte, die deswegen lieber verdrängt wird. Ihre Kindheitsgeschichte spielt in Bayern. Angesichts der auch ohne klimawissenschaftliche Speziallupe leicht erkennbaren besonders zugespitzten Gefährdungen des Alpenraumes durch den Klimawandel sind Sie dort gezeugt worden – das war sachlich für Eltern, die einen unbefangenen Blick sich erhalten haben, zum damaligen Zeitpunkt nahe liegend. Dort also sind Sie 1990 geboren, auf den Namen BayFORKLIM (1999) getauft und aufgewachsen. Ihre frühe Kindheit war eine glückliche, Sie haben sich prächtig entwickelt, bis zu einem Alter von 9 Jahren etwa. Sie haben Ergebnisse herausgebracht, die öffentliches Aufsehen verdient hätten – so zur „Häufung winterlicher Hochwassersituationen“, zur „Vitalität der drei Hauptbaumarten des Bergmischwaldes“, zum Stickstoffhaushalt der Waldböden. In geradezu kindlicher Unschuld haben Sie zudem ausgesprochen, dass die Sommertemperaturen im Bodenseegebiet um sechs Grad ansteigen werden – also dreimal so hoch wie die globale Durchschnittstemperatur. Zum Bodenseegebiet zählt u.a. die Insel Mainau, ein Gemüseanbaugelände.

Mit diesen Ergebnissen gerieten Sie in den Blick von Politikern, die für Verkehrsinfrastrukturen und Raumordnung zuständig sind. Die hatten erkannt, dass Sie, wenn Sie einmal groß sind, ein Machtkonkurrent in diesen Politikbereichen darstellen werden. Also spielte der uralte Herodes-Affekt. Anlass war, dass Sie, programmfinanziert, eine neue Finanzierung für Ihre nächste Entwicklungsphase brauchten, gleichsam einen finanzierten Schulplatz. Der Herodes-Affekt wurde in Ihrem Falle mit den Mitteln des Finanzministers vollzogen – es kam also nicht zum Äußerten, nicht zum Kinder-Mord. Ab dann wurden Sie erbarmungslos rachitisch gehalten und im Keller versteckt – was sich im Adenauerschen Spontan-Votum ausdrückt, ist eben nicht pure Vergangenheit; als Potentialität ist es allgegenwärtig. So denken politische und wirtschaftliche Eliten, wenn sie in Systemkonkurrenzen kalkulieren – da müssen auch Späne fallen dürfen, weil im Großen zu hobeln ist.

Dass Sie wieder ans Tageslicht durften bzw. gelassen wurden, verdanken Sie Ihrer Stiefmutter, Baden-Württemberg. Die wurde vor gut 10 Jahren, des alpenschneegespeisten Rheines wegen, von einem vergleichbaren Gedanken schwanger. Es war die bevorstehende Niederkunft Ihres Halbgeschwisterchens im Nachbar-Ländle, welche Ihre Eltern bewog, sich Ihrer zu erbarmen. Sie wurden zu einem Wesen zusammengefügt, und Ihre Eltern (samt Stiefmutter) haben

dieses Familiengeheimnis bis heute gewahrt. Nun aber, so meine ich, sind Sie in einem Alter, dass man Ihnen die Wahrheit über Ihre Herkunft zumuten kann. Sie stärkt Sie letztlich auch. Und das ist mein Anliegen: Ich will dazu beitragen, dass Sie, unter welchen Umständen auch immer, nicht erneut in einem Keller versteckt werden können. Dagegen schützt die öffentliche Kenntnisaufnahme des erstmaligen Versuchs. In Latenz ist dieser Versuch nämlich ständig gegeben.

## 2 Einführung in die Fragestellung

Nun zum eigentlichen Thema meines heutigen Vortrags. Dessen Titel steht da, wie wenn eine bare Selbstverständlichkeit noch in Frage gestellt werden sollte – das aber ist nicht gemeint.

Das Fragezeichen im Titel steht vielmehr für eine Frage, die mir mit der Erläuterung der Titelwahl aufgegeben wurde. Sie hat die folgende Beobachtung zum Hintergrund.

KLIWA und DAS, die beiden Vorhaben, die hier in den beiden kommenden Tagen im Zentrum stehen, haben den anthropogenen Klimawandel, also Begrenztes, im Fokus: Ausschließlich im Sinne seiner – ich betone: regional differenzierten – Manifestationen, und das im Schwerpunkt in der Hydrosphäre. Diese hier fokussierten Manifestationen des Klimawandels sind aber bei weitem nicht das Einzige an Wandel, das in Zukunft die Erde überziehen und umgestalten wird. Die Manifestationen des Klimawandels gehen vielmehr einher mit vielem anderen an Wandel. So zum Beispiel:

- dem, was fachlich ‚globaler Wandel‘ genannt wird, der Benennung ungeachtet aber auch nur einen Teil des Wandels wiederzugeben beansprucht, der den Globus heimsuchen wird;
- der weiteren Entwicklung der ökonomischen Globalisierung in der eingeschlagenen Richtung;
- einem weiteren massiven kulturellen Wandel, dessen Zeugen wir zweifelsfrei sein werden, vermutlich auch Zeugen einer weiteren Einebnung kultureller Unterschiede;
- einem zunehmenden Nord-Süd-Gefälle;

... man könnte die Liste deutlich verlängern. Man wird zugeben: Ja, so steht es zu erwarten. Die Manifestationen des Klimawandels sind, in historischer Perspektive nach vorne geschaut, Teil von einem weit umfassenderen Wandel.

Diese Beobachtung hat zu einer von Selbstzweifeln ausgelösten Frage geführt. Im Wortlaut:

„Ist es zielführend, nur das Einzelphänomen Klimawandel zu betrachten? Können lediglich in diesem Bezug entwickelte Anpassungsstrategien für die Wasserwirtschaft, oder auch für die anderen, im Rahmen der DAS betrachteten Sektoren, den Herausforderungen der Zukunft insgesamt gerecht werden?“

Ich übersetze, und spitze dabei zu: Gibt die Klimafolgenforschung nicht vielleicht massiv irreführende Signale, wenn sie nur einen Teil des Wandels, der die Welt erfasst hat und sich in Zukunft manifestieren wird, fokussiert? Wenn sie lediglich auf die Manifestationen des Klimawandels abstellt, das umfassende Ganze an Wandel aber im Ausgeblendeten hält?

Ich habe der Bitte entsprochen und die Frage geprüft. Zunächst sage ich Ihnen die Struktur meiner Antwort, zu der ich gekommen bin. Sie lautet: ‚Es kommt darauf an‘ – sie kann mal ‚nein‘ und mal ‚ja‘ sein. Konkret: Ich teile nicht die in der Frage gemachte Unterstellung, nach der die Wissenschaft – sei es die Klimafolgenforschung, sei es die zum Globalen Wandel – gleichsam ‚allzuständig‘ sei für die Orientierung der Gesellschaft und ihrer Subjekte. Deshalb meine For-



mel: Die Antwort ist abhängig von den Aufgaben desjenigen Subjekts, welches an die Wissenschaft, hier die Klimafolgenforschung, herantritt und ihr Fragen stellt.

Damit habe ich zwei gewichtige Themenkreise angeschlagen:

- Einmal das Verhältnis der Wissenschaft zu ihren Klienten. Und
- zum zweiten das Verhältnis von Teil und Ganzem – und zwar in ihrer systemanalytischen Zu-Ordnung.

### 3 Beratungswissenschaft: Verhältnis der Wissenschaft zu Klienten

Die Pointe auf der zuletzt genannten Ebene, der der Struktur, ist somit: Mein Bild ist (in diesem Falle) nicht das, dass die Wissenschaft sich selber Fragen stellt; dass sie dann Antworten entwickelt und diese schließlich einer amorphen Umwelt oder Öffentlichkeit zum Besten gibt. Ich blende vielmehr kommunikationstheoretisch auf, weise darauf hin, dass in dem hier interessierenden Fall Fragen von Subjekten außerhalb der Wissenschaft an die Wissenschaft gestellt werden. Die Wissenschaft ist hier Teil des Beratungs-Gewerbes – sie hat Klienten. Die Verantwortung für die Formulierung der Frage liegt damit nicht einfach, quasi definitorisch, bei der Wissenschaft; die Verantwortung liegt nun in der Beziehung von Wissenschaft und Klient; und ist innerhalb dieser Beziehung gestaltbar und verteilbar – und damit auch für die Wissenschaft begrenzbar.

Ein anderes Ergebnis ist in der Sache auch nicht ernstlich zu erwarten. Ließe ich mich auf die Anmutung auch nur ein, dass ‚man‘ alles wissen müsse, so könnte ich nur zustimmen – und anschließend verzweifeln. Da hilft Pragmatismus. Schließlich ist auch die Wissenschaft Teil der modernen, auf Effizienz getrimmten und deshalb arbeitsteilig organisierten Produktionssysteme der Industriegesellschaft. Also unterliegt auch die Erkenntnis einem Prozess der Arbeitsteilung – Allwissenheit konkreter Subjekte ist da ausgeschlossen. Die bleibt den Göttern vorbehalten. Damit, mit diesem Pragmatismus, ist der Überforderung ein Riegel vorgeschoben.

Ein anderes Ergebnis ist zudem von mir auch nicht ernstlich zu erwarten. Ich komme schließlich aus einer Einrichtung der, wie es so schön offiziell heißt, „wissenschaftlichen Politikberatung“. Dass wir dort eine klientenbezogene Auffassung von Wissenschaft entwickelt haben, ist zwangsläufig – das Gegenteil wäre selbstmörderisch. Also haben Sie gleichsam jemanden von Athen gerufen – und da ist es nicht verwunderlich, dass ich Ihnen mit dieser Struktur meiner Antwort auf die von Ihnen gestellte Frage eine Eule mitgebracht habe.

Fragwürdig wird diese klientenbezogene Positionierung nur der finden, der die Entscheidung neuzeitlicher Wissenschaft, von *science*, für den Standort der Allgemeingültigkeit teilt – in diesem Sinne für ‚Objektivität‘. Dann ist die Wissenschaft mit ihren Ergebnissen allein für die Allgemeinheit da, nicht für partielle Gruppen; dann macht ihr Selbstverständnis als autonome Wissenschaft Sinn. Die Gegenposition ist, dass die Wissenschaft sich auch in eine ausschnittshafte Perspektive, eben die spezieller Klienten, begeben darf und deshalb legitimiert sei, begrenzte Kenntnis zu produzieren; anders gesagt: Wenn das akzeptiert ist, kann sie das, ohne – notwendig – irreführen. Zu wissen ist dann dasjenige, was in einem speziellen Kontext wichtig ist. Begrenzung ist dann eine wesentliche Leistung.

Innerhalb der Wissenschaften existiert sogar ein prägnantes Beispiel mit langer Tradition für die zuletzt genannte Positionierung. In der Rechtswissenschaft gibt es das Ethos des sog. ‚Partei-gutachtens‘. Deren Aufgabenverständnis ist gerade nicht, rechtliche Wahrheit zu finden, d.h. eine allgemeingültige Sicht von Rechtstext und Subsumption zu entwickeln. Deren Ethos ist exakt gegenteilig: Wahrheit ist strittig – entschieden, wer Recht hat, wird vom Richter, nicht von der Wissenschaft; vor ihm, dem Richter, müssen die Parteien streiten. Die Aufgabe der

(Rechts-)Wissenschaft ist dann die, die Teilnehmer des Streits zu unterstützen – zu diesen Teilnehmer des Streits zählen allerdings nicht nur die (streitenden) Parteien sondern auch die Organe der Rechtsprechung, die Richter, mit ihrer Pflicht zum Ausgleich, zum sozialen Frieden.

Ich betone den Unterschied beider Positionen mit Grund. Die Klimafolgenforschung kommt aus der klassischen Naturwissenschaft und hat deren Ethos ohne große Reflexion übernommen – also tendiert sie zu einem Selbstverständnis der erstgenannten Art. Das aber kann hinderlich sein. Besonders deutlich wird das, wenn, wie in dem folgenden Beispiel, eine Vermischung beider Position stattfindet. Gefunden habe ich das Beispiel in einem Dokument der Forschungsplanung, in einem *scoping*-Papier zum Thema Adaptations-Forschung des US National Research Council (NRC)

Da plant die Wissenschaft der Klimafolgenforschung sich einem speziellen Klientenkreis zuzuwenden, den Besitzern industriellen Vermögens in ausgewählten Wirtschaftssektoren; wenn sie deren Begrenztheit an Einsicht in die potentielle Betroffenheit vom Klimawandel erkennt und dies als einen Mangel empfindet, so ist das noch im professionellen Berater-Modus agiert; wenn sie dann aber den Schluss daraus zieht – und nun zitiere ich –

*„Identify gaps in existing knowledge about climate change impacts on individual sectors ...“*  
(NRC 2009, p. 18)

– um diese von sich, von der unabhängigen Wissenschaft aus, zu schließen, so kann ich nur sagen: Ich halte das zwar für konsequent argumentiert im Modus einer Wissenschaftsvorstellung, deren Programm ist, alles in den Modus objektiven Wissens zu bringen; ich halte das allerdings für einen Schluss absurder Konsequenz. Die (relevanten) Auswirkungen des Klimawandels auf Anlagen, die der Natur ausgesetzt sind, können nur in Kooperation mit den dafür, für die Anlagen, Verantwortlichen ermittelt werden – also nur in einem gestalteten Klienten-Verhältnis. Und das verhindert zugleich, dass dieses Wissen umstandslos oder gar vollständig objektiv sein kann – es hat zu einem Gutteil den Charakter ‚privaten‘ Wissens und wird dies notwendig weiter haben.

## 4 Teil und Ganzes

### 4.1 (Terminologische) Klärungen zum Zweck der Verantwortungszuweisung

Nun zur Frage nach dem Teil und dem Ganzen. Es gehe, so meine terminologische Schöpfung, um das „Anpassungsdenken“. Von dem ist die wissenschaftliche Anpassungsforschung ein Teil, so das Verständnis. Diesen terminologischen Unterschied mache ich, weil es beim Thema Anpassung dominant weniger um kollektive als vielmehr um private Güter und deren Schutz geht – deshalb ist zunächst und in erster Linie jeder Vermögensbesitzer selber gefordert, für den Schutz seines bzw. des ihm anvertrauten Vermögens Sorge zu tragen. Also hat er zu veranlassen, dass er in den Besitz des dazu erforderlichen Wissens kommt. Dafür braucht er die Klimafolgenforschung – die aber, das ist wichtig, liefert ihm das erforderliche Wissen nicht fix und fertig.

‚Privat‘ vor ‚Güter‘ ist dabei eher im wörtlichen Sinn zu nehmen, nicht in seiner eigentumsrechtlichen Bedeutung – der Anspruch gilt auch für die äußerst differenzierte Landschaft öffentlicher Institutionen als Vermögensbesitzer oder Infrastrukturen-Treuhänder.

Relativ dazu, zu dieser vorfindlichen Verteilung der primären Verantwortung für den Schutz von Gütern, hat man die Aufgabe der Wissenschaft, der Anpassungsforschung, zu bestimmen. Ihre Aufgabe ist überwiegend die einer Unterstützung, einer Beratung der vielen Vermögenstreuhänder bei der Klärung der je unterschiedlichen Verletzlichkeit ihres Schutzgutes – derselbe Klimawandel führt eben zu deutlich unterschiedlichen ‚Verletzlichkeiten‘, so die professionelle



Sprechweise für dieses Phänomen. Entsprechend divers haben die Schutz-Kalküle zu sein – auch bei deren Ausarbeitung kann die Wissenschaft behilflich sein. Übrigens gilt: Sowohl die auf dem jüngsten, dem Zweiten Welt-Klimakongress der WMO vorgestellte Initiative als auch das gerade in Hamburg eingerichtete Zentrum unter der Leitung von Guy Brasseur stellen beide den „Service“-Gedanken begrifflich in den Mittelpunkt ihres Auftrags. Meine Betonung des Beratungs-Verständnisses ist mit dieser Aufbruchstendenz in völliger Übereinstimmung. „Service“ wird für die Wissenschaft zum Ehrentitel, nachdem es bis heute ein Dienstbotentitel ist.

#### **4.2 Herleitung der ‚Es kommt darauf an‘ – Antwort – erste Reaktion**

Nun die Herleitung meiner ‚Es kommt darauf an‘ – Antwort. Beide, Anpassungsdenken wie wissenschaftliche Anpassungsforschung, machen die „Anpassung an den Klimawandel“ zum Gegenstand – so lautet ihre gemeinsame Formel. Dass der Klimawandel in eine Vielfalt sonstigen Wandels eingebettet ist und die Klienten der Anpassungsforschung dies im Gespräch mit der Anpassungsforschung regelmäßig ausblenden, ist nach meinem Eindruck häufig der Fall. Die Formel, das Programm, das beide Partner eint, ist somit tatsächlich als „Anpassung nur an den Klimawandel“ zu lesen.

Die Frage ist, ob dieses Verhalten der Klienten kritikwürdig ist, insbesondere seitens der Anpassungsforschung. So wie ich die Verantwortungszuweisung hier aufgemacht habe, ist zunächst aber mit einer Legitimitätsvermutung zu reagieren. Es gilt:

(a) Der Beratene offenbart nicht sämtliche Ergebnisse seiner strategischen Orientierung dem Berater, insbesondere dann nicht, wenn er nicht McKinsey ist sondern aus der Wissenschaft kommt: Die ist nämlich zur Öffentlichkeit ihres Wissens verpflichtet.

(b) Subjekt der Integration der – ich betone: für ihn relevanten – Perspektiven auf die Welt im Wandel ist der betroffene Klient, nicht die Wissenschaft. Das entspricht einem Bild einer nach Subjekten perspektivisch differenzierten Wahrnehmung der Welt, auch in ihrem Wandel – zu der gibt es keine Totalwahrnehmung ‚der‘ Welt als Entsprechung, als möglichen Gegenstand der Wissenschaft.

#### **4.3 Herleitung der ‚Es kommt darauf an‘ – Antwort – zweite Reaktion**

Das aber ist nur eine erste Reaktion. Nicht bedacht ist dabei, was natürlich in jeder Beziehung gilt, so auch in der zwischen Anpassungsforschung und ihren Klienten: Der Berater steht doch auch in einer gewissen Verantwortung, wenn er sieht, dass sein Klient wesentliche Züge der Wirklichkeit ausblendet – wesentlich zunächst nach Auffassung des Beraters, hier der Klimafolgenforschung. Das kann er nicht einfach für ‚Sache des Klienten‘ halten; es gibt auch in dieser Beziehung schon so etwas wie eine treuhänderische Verantwortung. Die bezieht sich, pragmatisch, nicht auf alle Felder möglicher Ausblendung, sondern beschränkt sich ganz natürlich: vor allem auf das Gebiet, wo die Klimafolgenforschung gleichsam von alleine etwas an höherer Kompetenz mitbringt – und das mag die Mitigationsseite der Klimaherausforderung sein.

#### **Mein Eindruck dazu ist ein doppelter.**

1) Da besteht tatsächlich eine Wahrnehmungszurückhaltung auf Klientenseite – da findet regelmäßig Ausblendung statt. Insofern tut es dem Klienten gut, wenn der wissenschaftliche Partner, ist er in gutem Kontakt mit dem Klienten, darauf drängt, einen Blick auf die volle Breite des anstehenden Wandels zu wagen, wenn er schon bereit ist, auf der Anpassungsseite, bei seiner naturräumlich vermittelten Betroffenheit, genau hinzuschauen. Dann sollte man zusammen auch auf der Seite der Betroffenheit durch die Politik zur Lösung des Klimaproblems, die auf die Schiene gesetzt worden ist, genau hinschauen – wie beim Arzt, bei einem generellen Gesundheitscheck.

2) Doch auch auf der Seite des ‚Arztes‘, der Klimafolgenforschung, sehe ich da Schwächen, die hier anzusprechen ich mich nun trauen muss. Ich kann mich täuschen, und was ich generell sage, gilt nicht in jedem Einzelfall.

#### **4.4 Interner Konflikt der Klimawissenschaften (Adaptions- vs. Mitigationsperspektive)**

Die Welt ist nach meiner Wahrnehmung auch deshalb massiv im Wandel, weil wir entschieden sind, den Klimawandel zu stoppen. Stopp des Klimawandels heißt für uns in Industriestaaten: Die Treibhausgasemissionen in unseren Ländern sind auf nahe Null herunterzufahren, und das bis 2050. Das ist der Neuaufbau einer Industriegesellschaft, nun in 40 statt in 160 Jahren – das ist ein Faktor Vier an Beschleunigung des Wirtschaftswandels gegenüber dem, dessen Zeuge wir in der ersten Industriellen Revolution waren. Dass dieser Wandel von hoher Relevanz ist für die Klienten der Klimafolgenforschung, die Eigner physischer Infrastrukturen, ist m.E. offensichtlich.

Zweifel beschleichen mich gelegentlich hinsichtlich der Frage, ob die Klimafolgenforschung wirklich als ein guter, d.h. unvoreingenommener Arzt aufgestellt ist – oder ob da nicht doch eine Interessen-Interferenz angelegt ist, die die Professionalität der Beratung einschränkt. ‚Mitigative Revolution‘ wie ich statt ‚Zweite Industrielle Revolution‘ sage, ist für die Klienten relevant, und das proportional zum Aspirationsniveau der Mitigation – was ich eben an Zahlen genannt habe, entspricht dem Zwei-Grad-Ziel. Im Unterschied zu dem Wandel in den Klimafolgen weist die ‚mitigative Revolution‘ zudem keine zeitliche Verzögerungsstruktur auf. Bei den Klimafolgen ist die Relevanz für den Klienten in beiden Punkten genau umgekehrt.

Nun sehe mit gewisser Besorgnis eine Ambivalenz. Die Klimafolgen werden von der Klimafolgenforschung in der Regel von Szenarien abgeleitet, die deutlich oberhalb des Zwei-Grad-Zieles zu liegen kommen. Der Grund: (1) Es gibt aktuell kein Zwei-Grad-Szenario des IPCC; und (2) ist es so, dass man dann, bei zwei Grad überschießenden Szenarien, früher und deutlicher ‚etwas sieht‘. Die Ergebnisse sind dann prägnanter und früher relevant. Wenn aber der Klient auf Konsistenz beider Seiten der einen Medaille pocht – und an der Klimafolgenforschung als Berater festhält –, dann vermindert sich das Aspirationsniveau der ‚mitigativen Revolution‘ erheblich, nimmt einiges an Druck heraus. Unter dem vollen Druck aber stünde der Klient sonst, wenn er z.B. von mir, als Experten der anderen Seite der Medaille, beraten würde.

Dieser Konflikt besteht m.E.. Ihn sollten wir, sollte die Wissenschaft nicht beim Klienten austragen, den sollte sie untereinander vorab, bevor sie dessen Haus betritt, ausgetragen haben. Durch diese Ambivalenz müssen wir, muss die Wissenschaft noch durch. Wesentliche Entscheidungen liegen auch nicht in unserer je individuellen Hand, sie werden in der Vorbereitung des Szenariensets für den nächsten Assessment-Bericht des IPCC getroffen; und soweit ich das verfolgt habe, wird da diesmal ein Zwei-Grad-Szenario dabei sein – also weißer Rauch, auch wenn das knapp war.

### **5 Eine illegitime Ausblendung innerhalb der Anpassungsforschung**

Ich kommen abschließend dann doch auf eine Ausblendung zu sprechen, bei der nicht der Klient in der Verantwortung steht sondern die Wissenschaft, die Anpassungsforschung, Subjekt der Ausblendung ist – in ihrer Verantwortung liegt sie. Diese Ausblendung ist von der wissenschaftlichen Anpassungsforschung begrifflich angelegt und findet in ihr statt, doch ihre Wirkung bleibt nicht auf sie beschränkt: Sie strahlt aus auf das Anpassungsdenken. Die (privaten) Vermögensbesitzer werden auf diese Weise, so mein Eindruck, Opfer einer konzeptionellen Entscheidung der Wissenschaft, deren Konsequenzen sie nicht zu durchschauen vermögen. Es findet seitens der Wissenschaft etwas Unbewusstes statt, die Gesellschaft lebt zu ihrem Schaden in Kollusion damit. Diese Ausblendung halte ich für illegitim und für allein in der Verantwortung der wissenschaftlichen Anpassungsforschung liegend.



Um dieser Ausblendung (a) ansichtig zu werden und sie (b) zudem als professionell illegitim zu erkennen, ist zunächst das Übliche auf den Begriff zu bringen. Die übliche Fokussierung der Anpassungsforschung auf ihren Gegenstand begrifflich zu fassen und sich auf der Zunge zergehen zu lassen, ist somit die erste Leistung, die ich jetzt anstrebe.

### 5.1 Was die Anpassungsforschung fokussiert

Bei der üblichen wissenschaftlichen Anpassungsforschung geht es um die Anpassung an klimawandelbedingte Einwirkungen auf Gegenstände, die ‚Wind und Wetter‘, also der Natur und ihren stochastisch auftretenden Unbilden, ausgesetzt sind. Diese Gegenstände kann man in dreierlei Arten unterscheiden:

1. Dinge natürlicher Art, in Flora und Fauna – gleichsam in der Natursphäre;
2. (künstliche) Bauten und Anlagen – gleichsam in der Technosphäre; und
3. drittens das Zwitterwesen Mensch selbst, ohne sein Gehäuse – er ist eben natürlich und künstlich zugleich, in kaum unterscheidbarer Weise.

Dabei geht es der Anpassungsforschung typischerweise – das ist das Erste, was die Anpassungsforschung auszeichnet, – um Einflüsse auf Gegenstände in einer speziellen Region. Diese betrachtete Region wird aus dem Globus als ganzen herausgeschnitten, sie ist Ziel bzw. Gegenstand der Betrachtung – deswegen ist das Sprachbild ‚Fokussierung‘ angemessen. Diese naturräumliche Regionalisierung ‚passt‘ zudem auch in Klienten-Sicht: Sie ist aus der Perspektive eines Vermögensbesitzers in der Regel funktional – je ‚immobiler‘ sein Vermögen ist, desto mehr. Den Klienten interessiert z.B. sein Hotel in den Alpen oder an der Nordseeküste, und diesem Interesse entspricht die regionale Fokussierung, weil der Klimawandel nun einmal die Eigenart hat, dass er regional massiv streut.

Der Ausweis bzw. die Betonung regionaler Disparatheit ist, etwas stilisierend gesprochen, gerade das, was die Klimawandelfolgenforschung vor der Forschung zum Klimawandel auszeichnet. Der Klient der Forschung zum globalen Klimawandel, so könnte man aus Freude an der Paradoxie formulieren, ist ‚die Weltgemeinschaft‘ – und das Ganze, die Allgemeinheit, ist natürlich nur der Grenzfall eines Klienten. Das ist bei der Klimawandelfolgenforschung ganz anders; und deswegen differenzierter. Dort gibt es Klienten (Plural!), da macht der jeweilige Klient, mit dem regionalen Sitz seines Investments, etwas aus. Soweit zum Ort der – ggfls. – betroffenen Gegenstände.

Das Zweite, was die Anpassungsforschung auszeichnet, ist eine Entscheidung anderer Art. Die hat die Anpassungsforschung einstmals getroffen und perpetuiert sie seitdem ständig. Sie betrifft den Pfad, über den Einflüsse, die Gegenstände treffen, vermittelt sind bzw. sein müssen. „Sein müssen“ verweist darauf, dass wissenschaftliche Konzepte Bedingungen formulieren, unter denen etwas zur Wahrnehmung zugelassen wird – etwas, was diesen Bedingungen nicht entspricht, wird wissenschaftlich nicht wahrgenommen. Gemäß dem üblichen Konzept werden allein Einflüsse berücksichtigt, die auf dem Naturpfad vermittelt sind, in diesem Sinne ‚direkte‘ Einflüsse. Was sich in diesem Konzept von Folgen, die berücksichtigungsfähig gemacht werden, ausdrückt, ist das Standardverständnis von ‚Klimawandel‘; es ist Ausdruck naturwissenschaftlicher Dominanz in diesem Denken, und in der Folge im (fokussierten) Systemzuschnitt.

In der Folge dieser so ausgewiesenen Folgen erst, also indirekt, geht es dann auch – und auch weit überwiegend – um Wirkungen auf die Soziosphäre; es geht dann darum, ob Folgen des Klimawandels z.B. Konflikte verschärfen, ob sie wirtschaftliche Schäden anrichten für Landwirte und Hoteliers und was solcherart Fragen mehr sind – das alles also erst in zweiter Linie betrachtet, als nachgeschalteter Effekt dessen, dass Schnee weniger fällt und früher schmilzt oder Wasser über bisherige Ufer tritt.

In den methodisch ambitionierteren Formen der Klimafolgenforschung wird die Vermittlung von Effekten über den Naturpfad über die Denkfigur der *ecosystem services* eingeführt. Der Klimawandel verändert, so die Maxime der Analyse, traditionell geleistete *ecosystem services* – im Regelfall fallen die nun aus bzw. werden geringer; gelegentlich werden sie auch ertragreicher. Nutznießer der *services* sind nicht notwendig Subjekte aus der Soziosphäre – auch die Biodiversität z.B. gehört zu denjenigen, die *services* empfangen können; also zählen Dienste an einem Schutzgut des Menschen in der Natur dazu – dass *ecosystems ecosystems services* leisten können, ist eine gewöhnungsbedürftige Sprechweise.<sup>1</sup>

## 5.2 Spezifische Engführung seitens der Anpassungsforschung

Das Anpassungsdenken nimmt mit diesem ihrem üblichen Konzept eine spezifische Engführung vor. Es fehlt das Komplement, es fehlen Einflüsse, die über den komplementären Pfad der Vernetztheit vermittelt sind. Wir sind in der sog. ‚Globalisierung‘ vernetzt. Unter den Medien unserer globalen Verbundenheit ist die über die Wirtschaft, sowohl in Warenströmen, mehr aber noch in finanziellen Werten (Preisen) hervorzuheben. Ausgeschlossen ist eine Berücksichtigung der Soziosphäre, ich betone das nochmals, nicht als Objekt in der Zielregion – nachgeschaltet wird sie ja als Raum von Betroffenheit berücksichtigt.<sup>2</sup>

Der fehlende sozial vermittelte Folgentyp via Wirkung des Klimawandels sei an einem Beispiel erläutert, der Forstwirtschaft. Die naturräumliche Vorstellung von „Wirkung“ des Klimawandels sei durch die Vorkommnisse im Gefolge von ‚Lothar‘ evoziert. Wir erwarten, so können wir steno-graphisch formulieren, vermehrt Ereignisse vom Typ ‚Lothar‘, also ‚Lothar II‘, und später ‚Lothar III‘, ‚Lothar IV‘ usw.. Wenn Lothar II, das hier gewählte Modell für eine Folge des Klimawandels mit Relevanz für den Sektor bzw. Klienten Forstwirtschaft, die konkret betrachtete Region verschont, die dortigen Forsten also völlig unbeschädigt bleiben, es aber anderswo auf der Erde waldreiche Gebiete trifft und darüber der (globale) Holzmarkt über Monate bis Jahre in die Knie gezwungen wird, so ist die Forstwirtschaft in der betrachteten Region in vergleichbarer Weise zentral betroffen, als wenn es bei ihr eingeschlagen hat – nämlich über ihre Einbindung in den überregionalen Markt für Forstprodukte, den Holzmarkt. Die Forstwirtschaft in einer zur Betrachtung ausgewählten Region kann in zwar nicht wirklich gleicher Weise, aber doch in ökonomisch vergleichbarer Weise von Folgen des Klimawandels über den Marktzusammenhang getroffen werden. Die Modelle der regionalisierten Klimafolgenforschung bieten schließlich nur den ‚genesteten‘ Ausschnitt gemäß dem gewählten regionalen Fokus, der Klimawandel aber läuft globalweit im Hintergrund, er ist nur modelltechnisch ausgeblendet. Was da in anderen Regionen passiert, ist Teil der Wirklichkeit und vermag uns zu betreffen, wir leben schließlich in einer globalisierten Welt, d.h. marktvermittelten einen Welt.

Die Art der Betroffenheit ist dann eine deutlich andere. Während übliche Klimafolgen-Modelle Aussagen zur Veränderung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Vorkommens-Typen, wie es ‚Lothar‘ ist, regionenspezifisch machen, führt der marktvermittelte Folgen-Pfad schon aus sich heraus zu Aussagen, in denen die regionale Besonderheit ‚stratifiziert‘, zurückgenommen ist. Der Typus der resultierenden Aussage ist:

‚Die Wahrscheinlichkeit der Betroffenheit von Preiswirkungen, die durch regionale Schadereignisse (wo auch immer auf der Welt) resultieren, steigt.‘

<sup>1</sup> Wir bemerken erst jetzt, zum Zeitpunkt des (drohenden) Ausfalls, dass wir bislang Nutznießer dieser *services* waren. Das ist aber noch nicht der springende Punkt. Es gilt vielmehr: Nur *ex negativo* sind wir in der Lage, die für unsere Fragestellung relevanten *ecosystem services* begrifflich zu fassen, sie zu benennen und damit zu isolieren und herauszuheben aus dem allgemeinen ‚Funktionieren‘ der Natur, das in Fülle unsere Lebensgrundlage ist – also nur diejenigen, die sich verändern und deshalb unsere Aufmerksamkeit erregen bzw. in Anspruch nehmen.

<sup>2</sup> Der Vollständigkeit halber sei erwähnt: Sozial vermittelt sind zudem erwartbare Reaktionen auf das anwachsende Problem, also Effekte der Mitigationpolitik. Sie können auslegungsleitende Nachfragemuster, mindestens in ihrer erwarteten Konstanz beim Zuwachs von nachgefragten Leistungen, erheblich verändern.





Auch in der Konsequenz ergeben sich erhebliche Unterschiede: Man hat zu fragen, was ‚Adaptation‘ angesichts dieses Typs von Diagnose potentieller Betroffenheit heißen kann.

Es ist somit die Soziosphäre als Medium, die fehlt. Mittels ihr können wir in der Region A von einem Klimawandelbedingten Extremereignis in der Region B betroffen sein, und das *stante pede*, wenn in A sich kein Lüftchen rührt, wohl aber in Region B. Ausgeschlossen ist eine Berücksichtigung der Soziosphäre vielmehr als Vermittlungsmechanismus. Es fehlt somit – so mein Ergebnis – nicht an der Berücksichtigung anderer Felder globalen Wandels als autonome Ursachen, wie in der mir gestellten Frage unterstellt, es fehlt bereits etwas viel Näherliegendes, an einer hinreichenden Einbettung der realen Folgen des Klimawandels selbst *ceteris paribus*, selbst als ob es ansonsten keine weiteren Felder globalen Wandels gäbe.

## 6 Zusammenfassung

Anhand Abb. 1 mache ich rückblickend meinen Argumentationsgang deutlich. Die Abbildung ist eine offizielle des IPCC, lediglich die Unterlegung eines Ausschnitts stammt von mir. Die Abbildung zeigt in der Mitte, so die Sprechweise, das Climate System, das Klimasystem. Sie zeigt das recht präzise modellierbare Klimasystem eingebettet, als Teil von etwas, und das wird ‚Climate Change Processes System‘ genannt. Die Abbildung zeigt also genau, was in der mir gestellten Frage Anlass für den Selbstzweifel war: Dass etwas, was wir fokussieren, zwangsläufig etwas Partielles, weil etwas Eingebettetes ist. Fokussierung und Ausblendungen gehören zusammen, der ‚Hof‘ des Fokussierten, das dabei Ausgeblendete, kann nicht durch Fokussierung des Ausgeblendeten zum Verschwinden gebracht werden, auch asymptotisch ist das nicht möglich. Angemessen mit den Grenzen der Fokussierbarkeit umzugehen, ist dessen ungeachtet gefordert – dem Schein der Totalfokussierbarkeit zu erliegen, ist die ärgste aller möglichen Irreführungen. Es bleibt nur, so meine ‚Antwort‘, zur Partialwahrnehmung zu stehen und die Entscheidung für einen bestimmten Fokus (oder mehrere) in vollem Bewusstsein zu fällen. ‚Volles Bewusstsein‘ heißt: Klärung der Verantwortung für den mit einer Mehrfach-Fokussierung verbundenen Ressourcenaufwand und für die benötigten professionellen Kompetenzen. In diesem Sinne hier Hinweise zur Bedeutung dessen, was nicht-thematisiert ist, für das, was thematisiert wird.

Die erste Botschaft der Abbildung ist mit dem Verhältnis von Klimasystem und umhüllenden System verbunden. Letzteres ist hier zwar etwas umständlich benannt, gemeint aber ist unzweifelhaft das Erdsystem, welches das aus der mir gestellten Frage spiegelt, was dort ‚Globaler Wandel‘ genannt wurde. Die Abbildung zeigt das Selbstverständliche, dass das eingebettete Klimasystem nicht wirklich isoliert ist sondern vom umgebenden System beeinflusst wird, dass diese faktisch Interferenzen vom Umhüllenden auf das Eingebettete bestehen, aber nicht modelliert sind. Damit ergibt sich die unausweichliche Differenz von Wirklichkeit und Modell, sonst wären ja Modell und Wirklichkeit identisch. Darin, in dieser Differenz, zeigt sich die Herausforderung für einen jeden Nutzer, mit dem qua dieser Differenz in der Modellierung Ausgeblendeten in der Verwendung der Modellergebnisse gegenüber einem Klienten im Sinne dessen Interessen angemessen umzugehen – so wenn er Klimamodelle und deren Ergebnisse verwendet, insbesondere im Anpassungszusammenhang.

Die zweite Botschaft: Nach meiner persönlichen Auffassung ist die Sensitivität des Klimasystems der in diesem Zusammenhang zentrale Parameter. Denn es gilt m.E.: Klimamodelle verfehlen die wirkliche Klimasensitivität nicht in einer solchen Weise, dass der Fehlerbalken symmetrisch um den Wert der besten Schätzung spielt; die Abweichung ist vielmehr im Vorzeichen bestimmbar: ‚Klimamodelle‘ (wenn sie streng nur solche sind) unterschätzen sie (Luhmann 2008). Die Klimafolgenforschung berücksichtigt das auch, so meine Wahrnehmung und Interpretation: Sie wählt in der Regel solche IPCC-Szenarien, die weit über das Zwei-Grad-Ziel hinausschwingen, sie gibt sich also anscheinend klimapolitisch defätistisch. Ich deute das aber

anders, als Zustimmung zu meiner Interpretation, als eine implizite Korrektur der besten Schätzung der Klimasensitivität nach IPCC WG1.

Nun, drittens, zu dem, was die Anpassungsforschung üblicherweise zum Thema macht. Das sind die Konsequenzen, die im unteren Kasten im Klimasystem benannt sind, also die Konsequenzen aus ‚Climate Perturbation and Response‘.

Die Anpassungsforschung macht sie in einem zweifachen Sinne zum Thema,

(a) die naturräumlichen bzw. naturräumlich vermittelten Folgen, wie sie zu erwarten sind, also drohen (Potentialis!); und

(b) das feed back seitens des Menschen darauf, auf die drohenden naturräumlichen bzw. naturräumlich vermittelten Folgen.

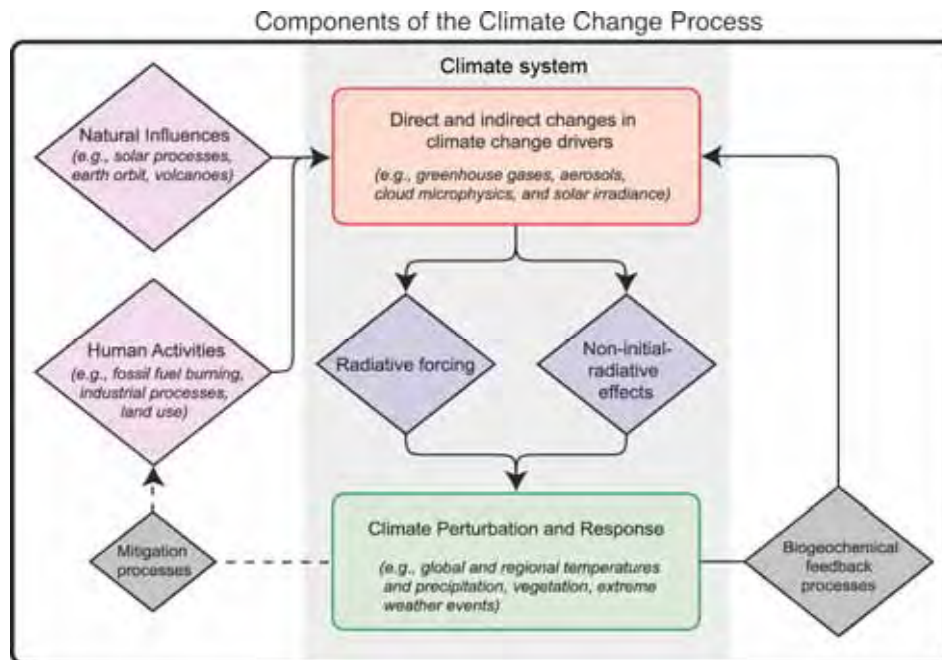


Abb. 1: Climate System als Teil des Climate Change Processes System

Letzteres ist eine Reaktion, welche dem Menschen in seinem ureigensten Interesse anzuraten ist – formal ist das zunächst eine Aussage im normativen Modus, dann aber auch im Modus des Erwartbaren, des Wahrscheinlichen, da man bzw. sofern man unterstellen darf, dass Subjekte in der Regel ihre Interessen erkennen und ihnen auch folgen. Jedenfalls sind das die Standardunterstellungen der Wissenschaften von der Wirtschaft und von der Politik, und als Regel ist das eine gerechtfertigte Unterstellung. Dass es dramatische Ausnahmen gibt, darauf hatte ich für den Bereich der Politik mit meinem Zitat des Titels des Tuchman-Buches hingewiesen.

Zum Klimawandel gehören weitere *feed backs*, die zu erwarten sind, und zwar und insbesondere seitens des Menschen. Eine dieser Rückkopplungen ist in der linken Säule (außerhalb des Klimasystems) gezeigt: Zum Klimawandel im Sinne des IPCC, zu den ‚Climate Change‘-Prozessen, gehört auch das absehbare Resultat aus der ‚feed back‘-Schleife des Menschen zum Thema Mitigation bzw. was er sonst noch sich vornimmt, um die Transformation in die post-fossile Industriegesellschaft erfolgreich zu gestalten. Dieser Teil des Weltwandels liegt sachlich am nächsten bei der Kompetenz der Klimafolgenforschung, ihn in die Beratung von Klienten zu integrieren, bietet sich an.



Die Botschaft meines Vortrags fasse ich vor diesem Hintergrund in vier Sätzen zusammen

- 1) Der Gedanke, vor irreführender Ausblendung zu warnen und dabei nach der Verantwortung der Wissenschaften zu fragen, hat sein volles Recht: Ja, die Gefahr besteht – und die Wissenschaften haben da Verantwortung wahrzunehmen.
- 2) Die Wissenschaft tappt aber in eine Falle, wenn sie Zuständigkeit für Allwissenheit proklamiert und auf dieser Basis das Problem zu lösen sich anschickt.
- 3) Die zu Recht angeführte Gefahr ist vielmehr, so meine entschiedene Konsequenz, auf Basis eines veränderten Selbstverständnisses von Wissenschaft zu entsprechen.
- 4) Was ich Ihnen nahegebracht habe, ist das Verständnis von sustainable science, entsprechend dem Aufruf von ICSU (2002), aber auch schon in der Agenda 21 (Program Area 31) von Rio de Janeiro 1992: Auch Wissenschaft sollte sich bewegen, nicht nur andere Teile der Gesellschaft dazu aufrufen, dass die sich bewegen.

## 7 Literatur

- BayFORKLIM (1999): Klimaänderungen in Bayern und ihre Auswirkungen. Abschlussbericht des Bayerischen Klimaforschungsverbundes, November 1999.
- ICSU (2002): Report of the Scientific and Technological Community to the World Summit on Sustainable Development, ICSU Series on Science for Sustainable Development No.1.
- Luhmann, Hans-Jochen (2008): Klimasensitivität, Leben und die Grenzen der Science-Kultur. Zum Vierten IPCC-Sachstandsbericht. In: Gaia – Ökologische Perspektiven für Wissenschaft und Gesellschaft 17, No. 1, S. 25 – 30.
- National Research Council (2009): New Directions in Climate Change Variability, Impacts, and Adaptation Assessment: Summary of a Workshop. Washington, DC.
- Steinbeck, John (1939): The Grapes of Wrath.
- Tuchman, Barbara (1984): The March of Folly: From Troy to Vietnam. New York

## Das Kooperationsvorhaben KLIWA

Albert Göttle  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### 1 Veranlassung

Die Erkenntnisse der Klimaforschung über die künftige Entwicklung, aber auch die Fakten aufgrund weltweiter Messungen, sind in den Veröffentlichungen des Weltklimarates (IPCC), zuletzt im 4. Sachstandsbericht von 2007, eindrucksvoll dargestellt. Die globale 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 Temperatur wird 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 Veränderungen des Wasserhaushalts, sei es bezüglich des Abflussgeschehens oder in der Fläche, werden zwangsläufig Auswirkungen auf das wasserwirtschaftliche Planen und Handeln haben. Die hydrologischen Grundlagen mit ihrer natürlichen Variabilität und bisherigen Auftretenshäufigkeit werden deshalb Änderungen erfahren.

Das gehäufte Auftreten außergewöhnlicher Hochwasserereignisse in den 1990er Jahren, insbesondere die Rheinhochwasser vom Dezember 1993 und vom Januar 1995, warf für die Wasserwirtschaft die Frage nach den Ursachen, insbesondere nach den möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf. Wegen der dahinter erkennbaren Komplexität war diese Thematik für die damit befassten Fachleute in Baden-Württemberg und Bayern der Anlass, gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst nach fachlichen Antworten zu suchen. Das dabei im Jahr 1998 entwickelte Vorgehenskonzept bildet auch noch jetzt die fachliche Grundlage für das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA), das dann 1999 begonnen werden konnte.

Heute arbeiten bei KLIWA die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz sowie der Deutsche Wetterdienst auf Grundlage einer Verwaltungsvereinbarung eng zusammen; zusätzlich ist auch die Bundesanstalt für Gewässerkunde beteiligt. Weitere Bundesländer sind mittlerweile an den Arbeiten interessiert und besitzen einen Gaststatus in KLIWA.

### 2 Konzeption und Struktur des Kooperationsvorhabens - Vorgehenskonzept

Fehlende Kenntnisse und Fakten zu Umfang und Größe der Auswirkungen des Klimawandels in den Flussgebieten Süddeutschlands gaben den Anstoß für das Kooperationsvorhaben KLIWA. Es ist als ein längerfristiges und breit angelegtes Untersuchungsprogramm konzipiert, aus dem sich für die beteiligten Partner Synergieeffekte ergeben. Mit diesem Vorhaben werden 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. Auf der Basis dieser Ergebnisse sollen ggf. neue Planungsgrundlagen sowie geeignete Anpassungsstrategien entwickelt, kommuniziert und bedarfsweise umgesetzt werden.

Das Vorgehenskonzept für KLIWA und seine Umsetzung sind zwischen den Partnern in einer Verwaltungsvereinbarung geregelt. Sie wird in regelmäßigen Zeitabständen angepasst, ist aber



in seiner Anfangsstruktur weiterhin gültig. KLIWA umfasst derzeit fünf Arbeitsschwerpunkte (Abb. 1). Ihre fachliche Unterteilung in Untersuchungsgebiete ist aus Anlage 1 ersichtlich; die zugehörigen Teilprojekte für den bisherigen bzw. aktuellen Untersuchungsumfang sind in den Anlagen 2 bis 5 schematisch dargestellt.



Abb. 1: Vorgehenskonzept von KLIWA – Projektrahmen mit den fünf Arbeitsbereichen

Die Steuerung, Planung 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 Landesämter der beteiligten Länder besetzt und für die Umsetzung der Einzelprojekte verantwortlich. 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 Know-Hows gegeben, da Fachverwaltungen keine umfassende wissenschaftliche Expertise auf dem weiten Feld von Klimaforschung und Klimawandel-anpassung vorhalten können.

### 3 Darstellung der Arbeitsbereiche

Die vorstehend angesprochenen Arbeitsbereiche umfassen jeweils eine Reihe von Einzelprojekten; diese werden im Einklang mit dem Vorgehenskonzept, gemäß 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 durch Abbildungen exemplarisch hervorgehoben; ausführlichere Erläuterungen dazu enthalten die einzelnen Fachbeiträge.

#### 3.1 Bereich A – Bisherige Veränderung von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen

Die Ermittlung der Variabilität bzw. der Veränderungen 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 Kenngrößen sind in Abbildung 2 zusammengefasst dargestellt. Für repräsentative Aussagen wurden möglichst viele Zeitreihen berücksichtigt; ein Auswahlkriterium war, dass die Messungen seit 1931 in plausibler Güte vorliegen. Die berücksichtigte Zeitreihenlänge ist üblicherweise 1931-2000; 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 einerseits Aufschluss über die zeitliche Variabilität, d.h. über vorhandene natürliche Schwankungen sowie über eventuelle systematische Veränderungen (Trends) und darüber hinaus die Bandbreite der bisherigen Veränderungen. Andererseits 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 KLIWA-Heften veröffentlicht (Anlage 6). Eine Fortschreibung der Betrachtung ausgewählter Kenngrößen findet mit dem Klimamonitoring von KLIWA statt.

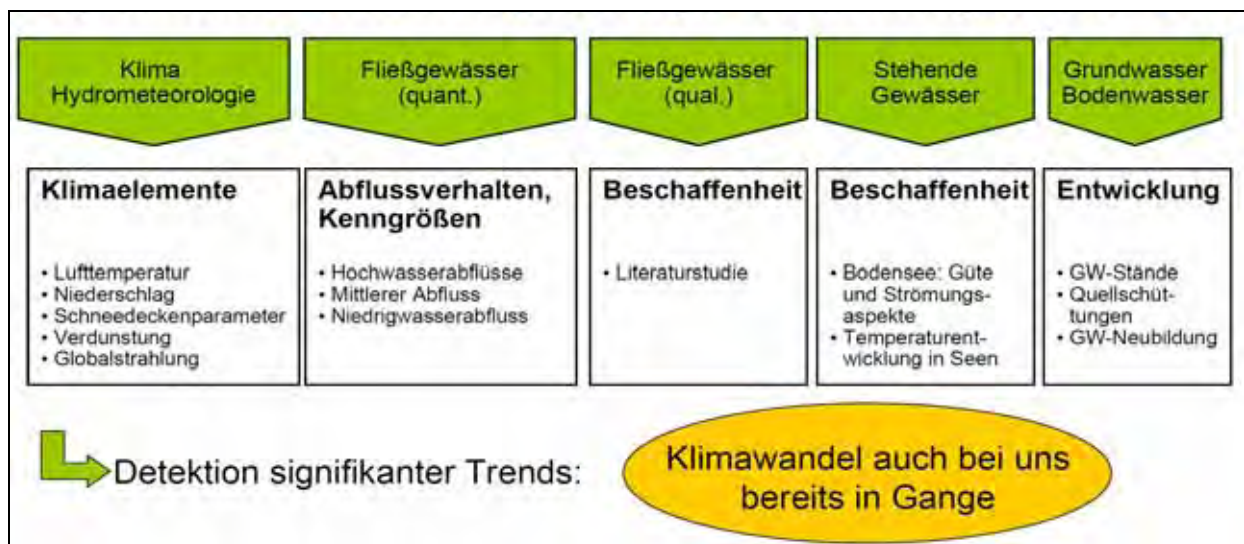


Abb. 2: Kenngrößen zum Wasserhaushalt - Ermittlung bisheriger Veränderungen 1931-2000

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 stehen auch in engem Zusammenhang mit der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie.

Die vorhandenen Messungen der hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen und ihr statistisches Verhalten stellen wichtige Eckwerte und Randbedingungen für Szenarienrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen dar.

### 3.2 Bereich B – Abschätzung des Klimawandels auf den Wasserhaushalt

#### Vorgehensweise

Mit den Untersuchungen des Projektbereichs B wird versucht, eine Vorstellung des möglichen Wasserhaushalts der Zukunft zu erhalten. Aufgrund pragmatischer wasserwirtschaftlicher Überlegungen wird dafür sinnvollerweise zunächst der Zeitraum 2021-2050 als die nahe Zukunft betrachtet, daneben aber auch die Zeit bis 2100 als die fernere Zukunft noch gesehen. Das Bild des möglichen Klimawandels wird durch 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. Es muss hier aber angemerkt werden, dass die Erzeugung verbesserter regionaler Klimaprojektionen derzeit und wohl auch für die kommenden Jahre weiterhin eine große wissenschaftliche Herausforderung für die weltweite Klimaforschung darstellt. Gleichwohl sind aber bereits zielgerichtet Szenarienrechnungen zur Abschätzung der künftigen Entwicklung in den süddeutschen Flussgebieten zweckmäßig, um so Klimaänderungssignale entsprechend dem derzeitigen Wissensstand detektieren zu können. Die Vorgehensweise mit den Arbeitsschritten ist in Abbildung 3 schematisch gezeigt.

#### B Abschätzung der Klimawandelauswirkungen auf den Wasserhaushalt

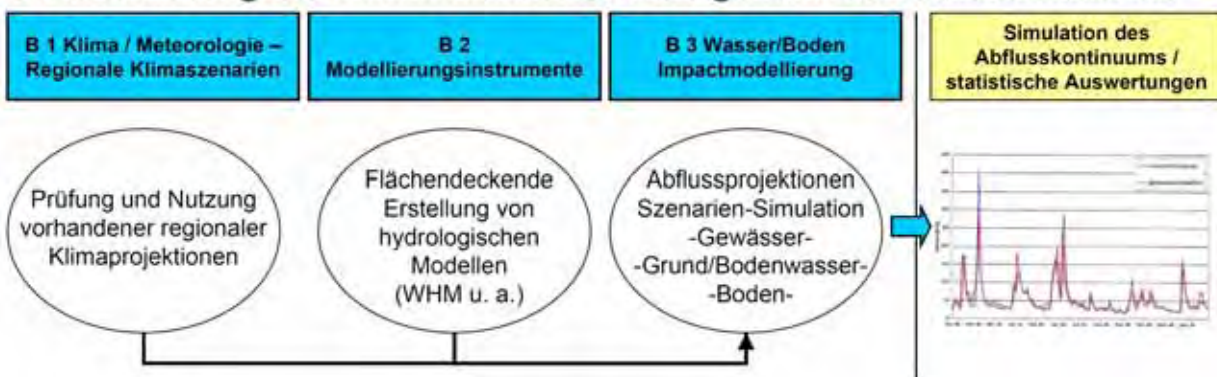


Abb. 3: Vorgehensweise – Abschätzung der Klimawandelauswirkungen auf den Wasserhaushalt

#### Entwicklung des Klimas

Nachdem zu Beginn des Vorhabens KLIWA für Süddeutschland noch keine brauchbaren regionalen Klimaszenarien 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 regionenspezifischen Auswertung für die Landesfläche von BW und BY 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 ausgewählte plausibelste Klimaprojektion diente bei KLIWA für die ersten Wasserhaushaltssimulationen.

Seit 2007 stehen neuere regionale Klimaprojektionen für Deutschland basierend auf dem Globalmodell ECHAM5 zur Verfügung, die ebenfalls in KLIWA untersucht und für weitere Wasserhaushaltssimulationen bewertet wurden; exemplarisch seien hier lediglich die Ergebnisse der Klimaprojektion WETTREG-2006/A1B bezüglich der Veränderung des Niederschlags in Abbildung 4 gezeigt. Die durchgeführten Auswertungen verdeutlichen, dass die verschiedenen Klimaprojektionen eine Bandbreite der möglichen Klimaveränderung und damit unterschiedliche Klimaänderungssignale aufzeigen. Diese muss bei zukünftigen Aussagen berücksichtigt werden. Generell aber lässt sich folgern, dass künftig die Winterhalbjahre feuchter, die Sommerhalbjahre dagegen trockener werden.

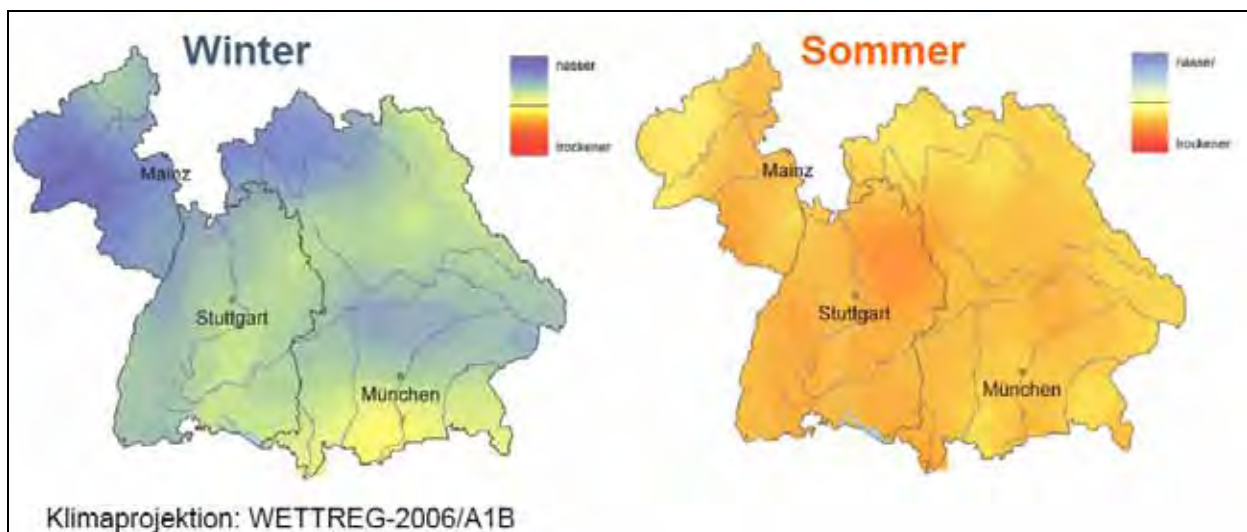


Abb 4: Veränderung der mittleren Niederschläge (Halbjahre) zwischen den Simulationszeiträumen 2021-2050 und 1971-2000

### Abflusssimulationen

Die Nutzung von ausgewählten Klimaprojektionen in den für die einzelnen Flussgebiete aufgestellten Wasserhaushaltsmodellen steht bei den Untersuchungen im Rahmen von KLIWA im Vordergrund. Nur mit flussgebietsbezogenen Abflussprojektionen ist eine Abschätzung künftiger Veränderungen auf den Wasserhaushalt möglich. Wasserhaushaltsmodelle beschreiben und quantifizieren die räumliche und zeitliche Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten. Sie ermöglichen so quantitative Aussagen zu den Abflüssen (z.B. Niedrig-, Mittel-, Hochwasser), zur Verdunstung und zur flächenhaften Grundwasserneubildung. Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz verwenden als Wasserhaushaltsmodell das Modell LARSIM, in Bayern wird das Modell WaSiM-ETH eingesetzt. Für Baden-Württemberg stehen bereits flächendeckend Wasserhaushaltsmodelle zur Verfügung, in Rheinland-Pfalz ist die flächendeckende Abbildung mit Wasserhaushaltsmodellen in Arbeit. Für Bayern stehen ebenfalls für alle größeren Flussgebiete angepasste Wasserhaushaltsmodelle zur Verfügung, Simulationsergebnisse mit Klimaprojektionen für die nordbayerischen Flussgebiete liegen bereits vor.

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 des Niedrigwassers infolge des Klimawandels bei KLIWA ein neuer Untersuchungsschwerpunkt geworden. Inzwischen liegen auch Ergebnisse für Niedrigwasserabflüsse aufgrund von Klimaprojektionen bis 2050 vor. Die Abbildung 5 zeigt, bezogen auf den Jahresgang der durchschnittlichen monatlichen Niedrigwasserabflüsse, im Sommer in den meisten bisher modellierten Flussgebieten einen deutlichen Rückgang der Monatsmittel des Niedrigwasserabflusses

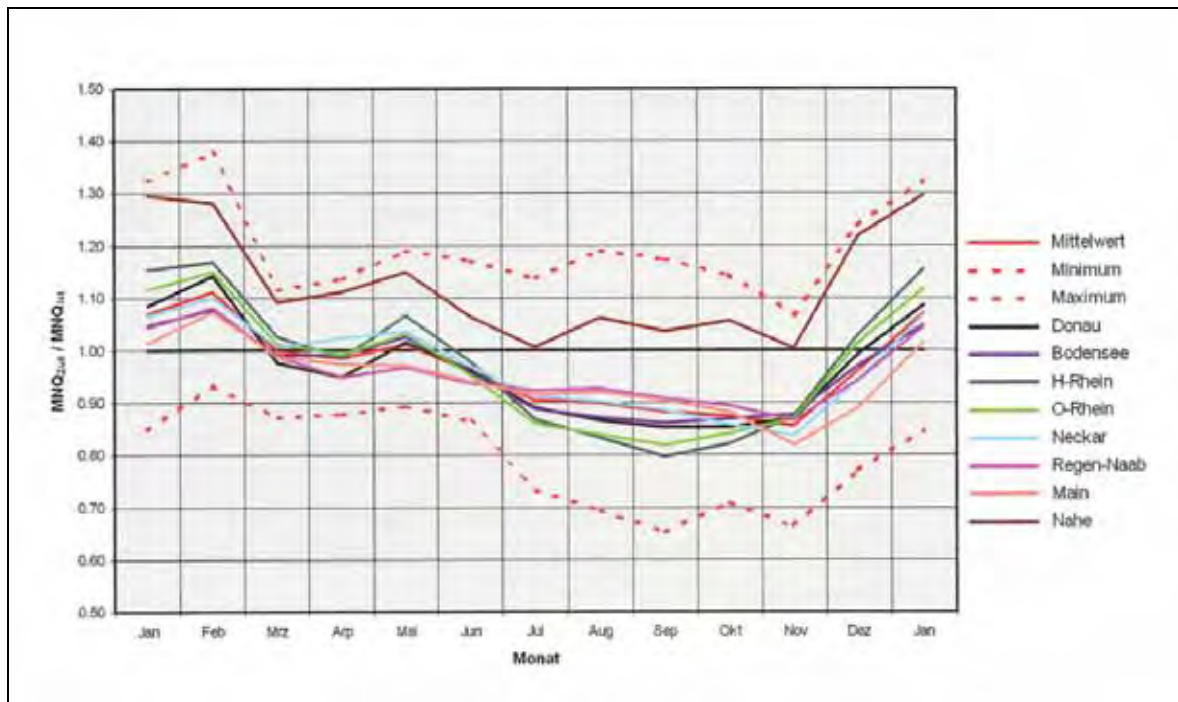


Abb 5: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse als Verhältnis zukünftiger zu derzeitiger Niedrigwasserabflüsse für die bisher untersuchten Flussgebiete (Monatswerte <1 bedeuten eine Abnahme der Niedrigwasserabflüsse)

Die in KLIWA betrachteten Klimaprojektionen dienen neben der Abschätzung von zukünftigen Änderungen mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen auch weiteren Modellen als Antrieb. Zur Abschätzung der Veränderungen der Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag wurde das Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BWH genutzt. Die simulierten Veränderungen sind aus Abbildung 6 ersichtlich. Die bisherigen Simulationsrechnungen auf Grundlage von WETTREG-2006/A1B lassen nur geringe Abweichungen bei der durchschnittlichen jährlichen Grundwasserneubildung für das KLIWA-Untersuchungsgebiet bis 2050 erwarten.

### 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. Weitere Untersuchungen zur Veränderung der Wassertemperaturen und zu den ökologischen Auswirkungen auf die Gewässer sowie den Bodensee infolge zunehmender Wärmebelastung wurden konzipiert und teilweise schon begonnen.

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand ist die Frage nach einer Zunahme von Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen kurzer Dauer, die überwiegend kleinräumig auftreten. Dazu liegen keine längeren Messzeitreihen vor. Auch regionale Klimaprojektionen können modellbedingt hier bisher nicht weiterhelfen, so dass neue Methoden angewendet werden müssen.

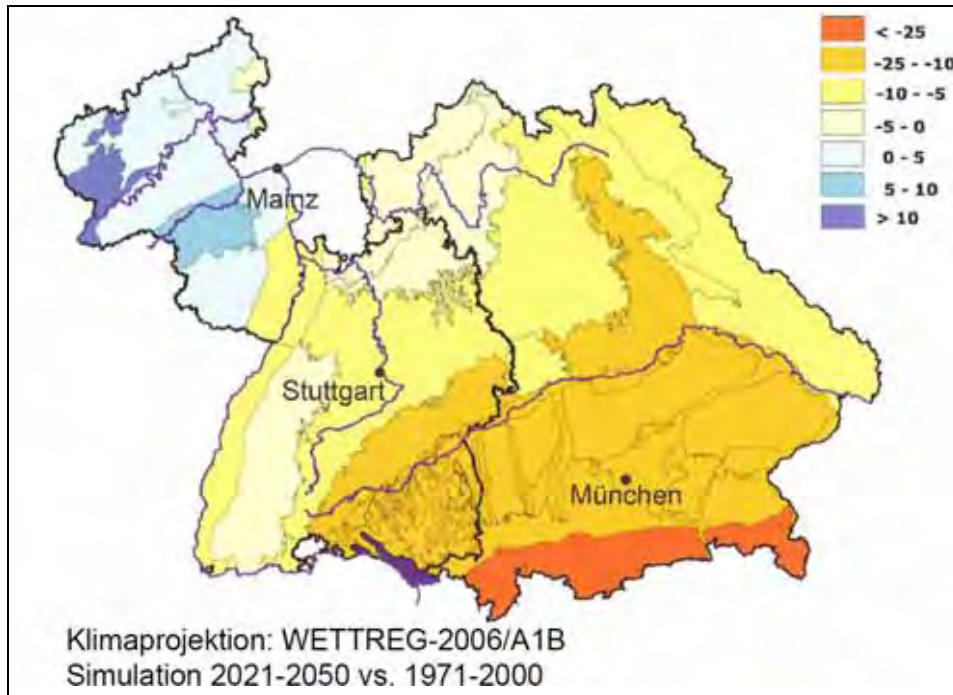


Abb. 6: Veränderung der mittleren Grundwasserneubildung aus dem Niederschlag zwischen den Simulationszeiträumen 2021-2050 und 1971-200

### 3.3 Bereich C – Klimamonitoring zur Erfassung fortschreitender Veränderungen

Im Rahmen von KLIWA ist mit dem Projektbereich A das Langzeitverhalten hydro(meteoro)logischer Messzeitreihen retrospektiv untersucht worden, um bereits nachweisbare Klimaänderungssignale zu detektieren. Diese Basisauswertungen, die am Beginn der KLIWA-Arbeiten standen, 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, soll die fortschreitende Veränderung verschiedener Messgrößen erfassen. Damit ist ein langfristig angelegtes, einheitliches Vorgehen gewährleistet, durch das die relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen in ihrer zeitlichen Entwicklung erfasst und in regelmäßigen Abständen zeitnah für das Gebiet der KLIWA-Partner ausgewertet werden. Damit werden Informationen zum Klima von Deutschland und Europa, die z.B. der DWD im jährlichen Klimastatusbericht publiziert, regional ergänzt und verfeinert aufbereitet.

Die bis 2005 verlängerten ausgewählten KLIWA-Messreihen sind in 2006/2007 für Baden-Württemberg und Bayern ausgewertet worden. Im ersten Monitoringbericht, der 2008 unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) veröffentlicht wurde, sind die wesentlichen Ergebnisse dieser aktualisierten Auswertungen dargestellt. Wesentliche Ergebnisse des ersten Monitoringberichts waren eine Verstärkung der Trends für den Temperaturanstieg, der Niederschlagszunahmen im Winterhalbjahr sowie der mehrheitlichen Zunahme der Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr. Die Ergebnisse



bestätigen die Wichtigkeit von Messnetzen und deren regelmäßige und zeitnahe Auswertung im Rahmen eines Monitorings. Die Abbildung 7 zeigt ein exemplarisches Ergebnis für die Temperatur. Eine Fortführung der Untersuchungen in einem zweiten Monitoringbericht mit verlängerten Messreihen bis Ende 2010 ist geplant. Hervorzuheben ist, dass mit diesen Auswertergebnissen in allgemein verständlicher Weise die Auswirkungen des regionalen Klimawandel vermittelbar werden.

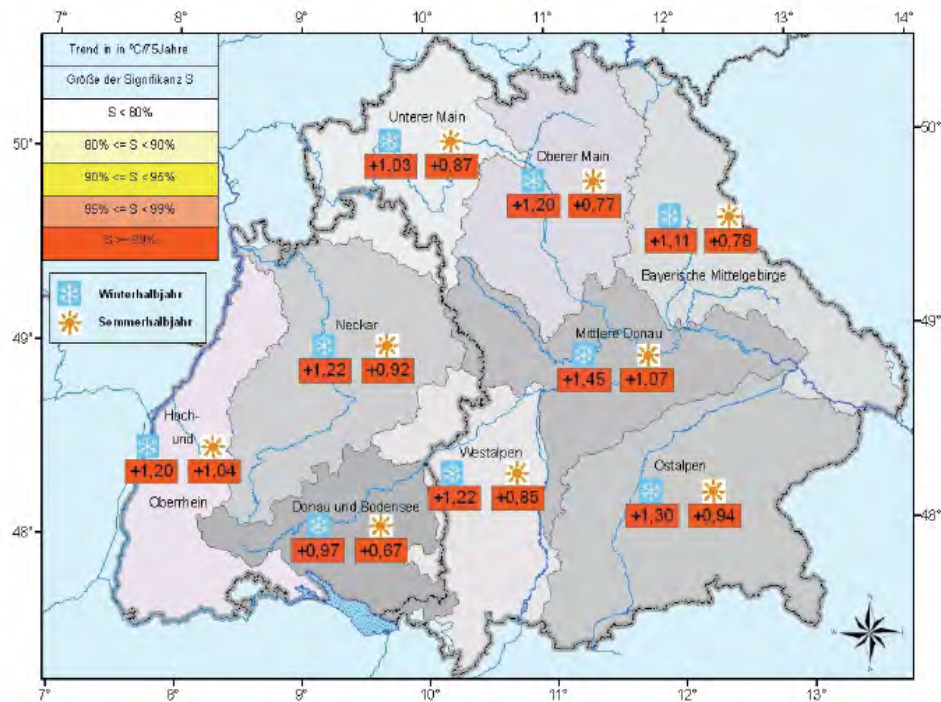


Abb. 7: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren / Trend im Zeitraum 1931-2005 in °C/75 a (aus dem 1. Monitoringbericht von KLIWA)

### 3.4 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 8.

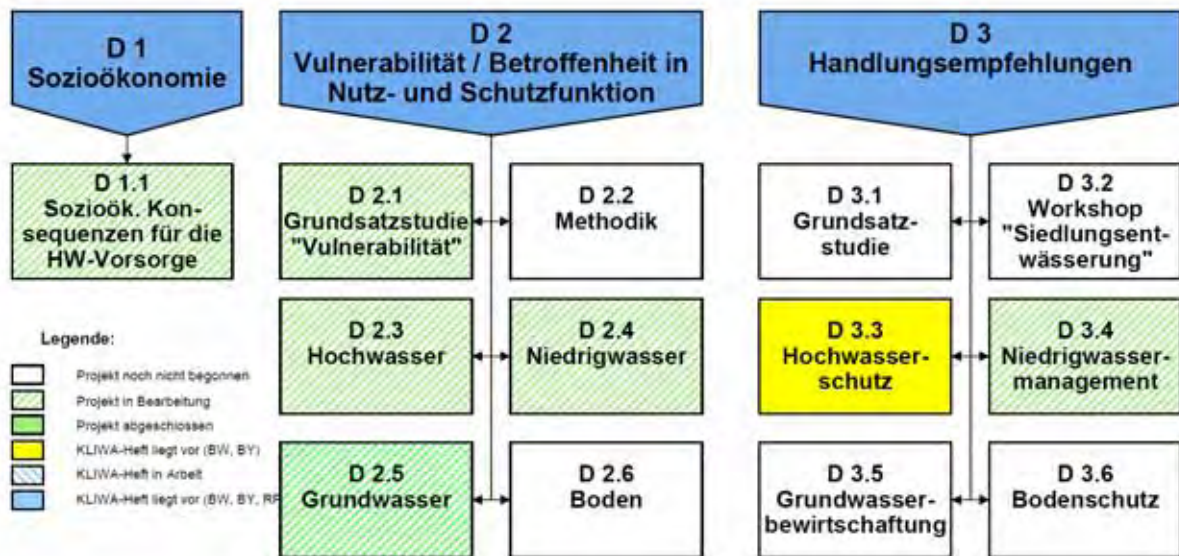


Abb. 8: Projektbereich D – Anpassung und Ableitung von Handlungsempfehlungen

### Hochwasserschutz

Die Abflusssimulationen unter Berücksichtigung des Klimawandels sind bisher vorrangig hinsichtlich der Auswirkungen für den Hochwasserschutz analysiert worden. Ein exemplarisches Ergebnis ist in Abbildung 9a 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 9b verdeutlicht den Klimaänderungsfaktor. Dieses Vorgehen trägt bereits jetzt dem Vorsorgegedanken Rechnung und erhöht für neue Hochwasserschutzanlagen den Sicherheitsgrad. Insofern ist diese Anpassungsstrategie zukunftsweisend.

### Niedrigwassermanagement

Der Klimawandel hat unterschiedliche Auswirkungen auf das Abflussregime und auf die damit verbundenen wasserwirtschaftlichen Nutzungen; dies gilt für infrastrukturelle Anlagen und ökologische Systeme wie auch für die entsprechenden Vulnerabilitäten mit den jeweiligen sozioökonomischen Konsequenzen. 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. 9a: (links) Zukünftig mögliche Veränderung der Hochwasserabflüsse bestimmter Jährlichkeiten am Pegel Wolfsmünster/Fränk. Saale;

Abb. 9b: (rechts) Verdeutlichung des Klimaänderungsfaktors - Zuschlag auf ein hundertjähriges Hochwasser zur Berücksichtigung des möglichen Einflusses des Klimawandels

## Wasserversorgung

Obwohl neuere Simulationsrechnungen für Süddeutschland insgesamt keine ausgeprägten Änderungen der mittleren Grundwasserneubildung zeigen, können lokal dennoch Engpässe der Grundwasserressourcen in bestimmten Situationen auftreten. Dies bedeutet, dass es sinnvoll sein wird, in der Folge für die Wasserversorgung gewisse redundante Versorgungseinrichtungen aufzubauen, um die Versorgungssicherheit auch bei zunehmenden Trockenperioden zu gewährleisten. Es empfiehlt sich vor allem für kleinere Wasserversorgungsunternehmen, sich auf ein zweites Standbein zu stellen. Ein zukunftsweisendes großräumiges Beispiel aus Bayern ist hier das Nordbayerische Ausgleichs- und Verbundsystem, von dessen Leistungsfähigkeit auch kleinere örtliche Unternehmen profitieren.

## Gewässerschutz

Im Gewässerschutzbereich ergibt sich in Folge des Klimawandels sicherlich ein Anpassungsbedarf in der Kanal- und Kläranlagenplanung. 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 notwendige Anpassungen in der abwassertechnischen Infrastruktur zur Folge haben.

## 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 Handlungs-

empfehlungen 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 Vorhaben KLIWA war es von Beginn an, die interessierte Bevölkerung, die Fachwelt und die politischen Verantwortlichen über das Vorhaben sowie dessen Ziele und Ergebnisse regelmäßig zu informieren. Durch die zunehmende Wahrnehmung der Problematik des Klimawandels seit dem 4. Sachstandsbericht des IPCC durch die Öffentlichkeit, nicht zuletzt aber auch sehr aktuell durch die Weltklimakonferenz in Kopenhagen, besteht ein großes Informationsbedürfnis. 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 10.

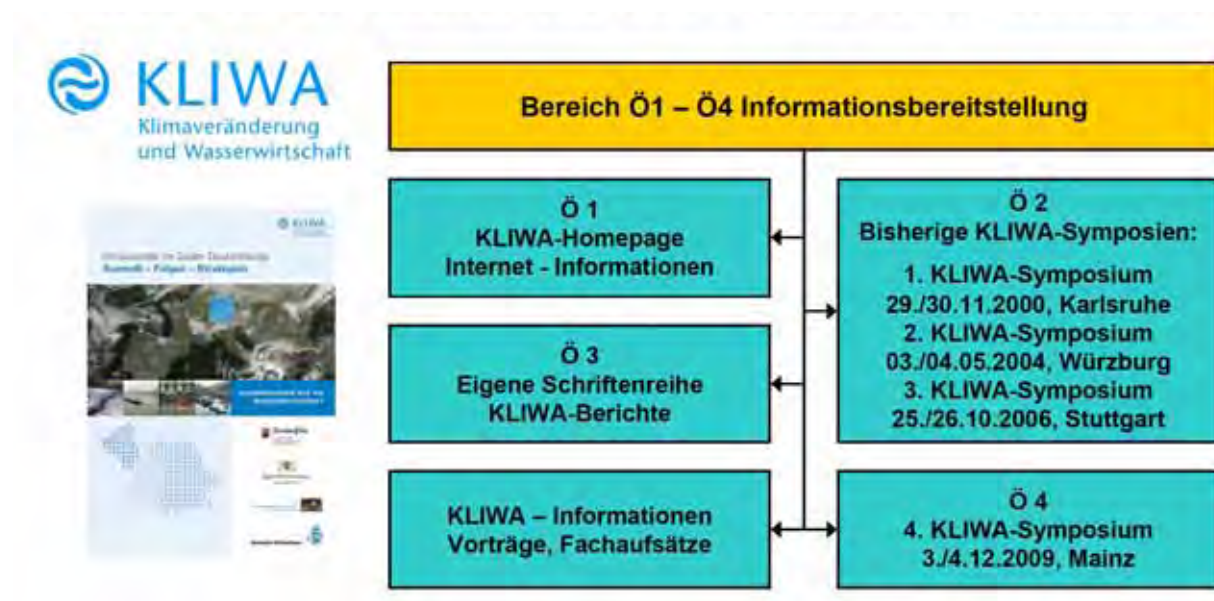


Abb. 10: Projektbereich Ö – Aktivitäten im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit von KLIWA

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 (Anlage 6). 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“ ist hierfür sicherlich ein gutes Beispiel, mit dem interessierte Bürgerinnen und Bürger objektiv über den Wissensstand zum Klimawandel und seinen Auswirkungen bei uns ohne Panikmache informiert werden können.



## 4 Ausblick

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

Während der bisher 10-jährigen Laufzeit von KLIWA haben sich die Kenntnisse zum globalen und regionalen Klimawandel 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 zukünftige Herausforderung in KLIWA wird damit einerseits der Umgang mit den vorhandenen Modellbandbreiten, die Ausdruck der Unsicherheiten in der Modellkette sind, sowie das Erarbeiten von konkreten Aussagen trotz der Unterschiede aus verschiedenen Klimaprojektionen sein. Auch für eine nachvollziehbare Darstellung und Kommunikation dieser Ergebnisse für die diversen 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.

Die bereits bestehenden Kenntnisse aus den jüngsten Untersuchungen zu Niedrigwasser und der Grundwasserneubildung aus den Wirkungsmodellierungen werden vertieft sowie die Vulnerabilität der betrachteten Systeme eingehend analysiert. 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 der verwendeten 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 im Bezug auf die Gewässerbeschaffenheit sind für KLIWA ein wichtiges neues Arbeitsfeld, in dem sich auch wichtige Verknüpfungen zu der Umsetzung der EG-Wasserrahmenrichtlinie ergeben.

## Kooperationsvorhaben KLIWA - Projektrahmen

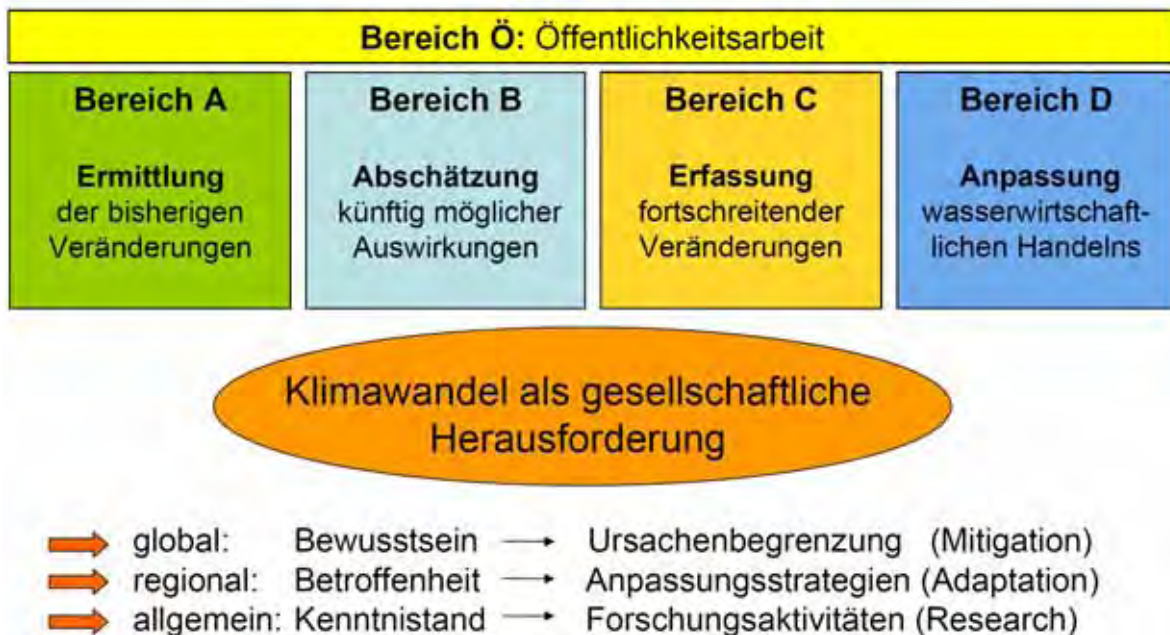


Abb. 11: Projektrahmen von KLIWA im Kontext

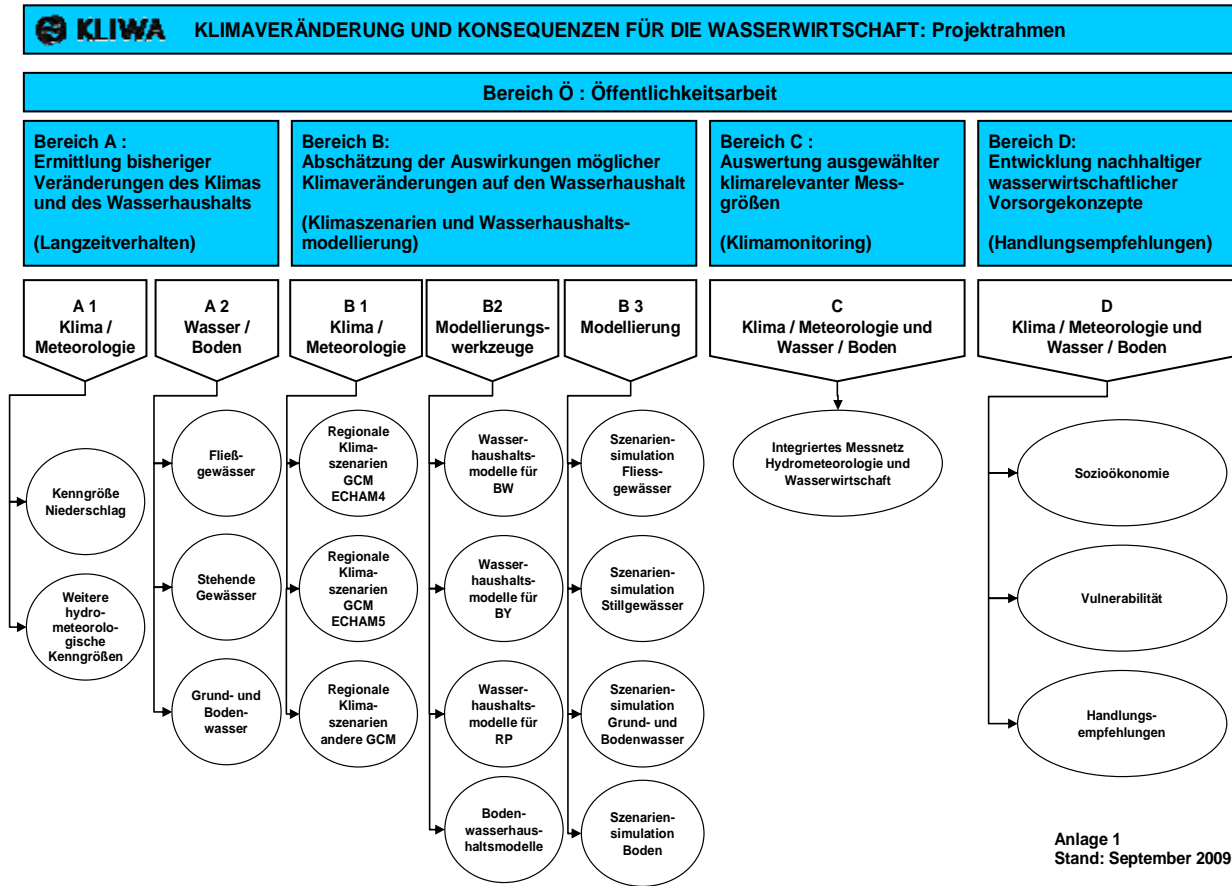
Die in KLIWA durchzuführenden Untersuchungen können nicht ohne eine intensive Zusammenarbeit zwischen Forschung und Verwaltung geleistet werden, diese Zusammenarbeit ist in Zukunft noch weiter zu intensivieren. Auch die Einbeziehung der Forschungsergebnisse nationaler und internationaler Institutionen 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. Für die bei KLIWA beteiligten wasserwirtschaftlichen Fachbehörden wird letztlich die Thematik „Klimawandel und Wasserwirtschaft“ eine Daueraufgabe werden. Abschließend ist festzustellen, dass KLIWA in den 10 Jahren seines Wirkens 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 bestmöglich gerecht zu werden.





**Anlagen:**

Anlage 1: Übersicht – Projektrahmen von KLIWA



## Anlage 2: Übersicht Projektbereich A

<b>Projektbereich A – Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts</b>					
A 1 Klima und Meteorologie			A 2 Wasser / Boden		
A 1.1 Kenngröße Niederschlag	A 1.2 Weitere hydro- meteorologische Kenngrößen	A 2.1 Fließgewässer (quant. / qual.)	A 2.2 Stehende Gewässer	A 2.3 Grundwasser und Bodenwasser	
A 1.1.1 Ermittlung der Gebietsniederschläge (Heft 7)	A 1.2.1 Langzeitverhalten der potentiellen Verdunstung (Heft 12)	A 2.1.1 Langzeitverhalten der NW-Abflüsse	A 2.1.2 Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse (Heft 3)	A 2.2.1 (Land BW) Langzeitdaten des Bodensees (Heft 11)	A 2.3.1 Langzeitverhalten von Grundwasserständen
A 1.1.2 Langzeitverhalten langer Niederschlagsreihen (Heft 7)	A 1.2.2 Langzeitverhalten der tatsächlichen Verdunstung (Heft 12)	A 2.1.3 Langzeitverhalten der HW-Abflüsse (Heft 2)	A 2.1.4 Rückverlängerung der Zeitreihen extremer Abflüsse	A 2.2.2 (Land BW) Güte – und Strömungs- aspekte des Bodensees	A 2.3.2 Langzeitverhalten von Quellschüttungen
A 1.1.3 Langzeitverhalten extremer Niederschlagsereignisse (Heft 8)	A 1.2.3 Langzeitverhalten Lufttemperatur (Heft 5)	A 2.1.5 HW-Extremwert-Statistik unter Berücksichtigung von Trends	A 2.1.6 (Land BW) Analyse der Entstehung extremer Hochwasser		A 2.3.3 Langzeitverhalten der Grundwasserneubildung
A 1.1.4 Langzeitverhalten der Schneedeckenparameter (Heft 6)	A 1.2.4 Langzeitverhalten Globalstrahlung (Heft 12)	A 2.1.7/10 Neue Methoden der Zeitreihenanalyse - Skalenanalyse -			A 2.3.4 Langzeitverhalten des Bodenwasserhaushalts
A 1.1.5 Niederschlagsdargebot (Heft 7)		A 2.1.11 Veränderung der Gewässerbeschaffenheit - Literaturstudie -			

- Legende:**
- Projekt noch nicht begonnen
  - Projekt in Bearbeitung
  - Projekt abgeschlossen
  - KLIWA-Heft liegt vor (BW, BY)
  - KLIWA-Heft in Arbeit
  - KLIWA-Heft liegt vor (BW, BY, RP)

Anlage 2  
Stand: September 2009

## Anlage 3: Übersicht Projektbereich B

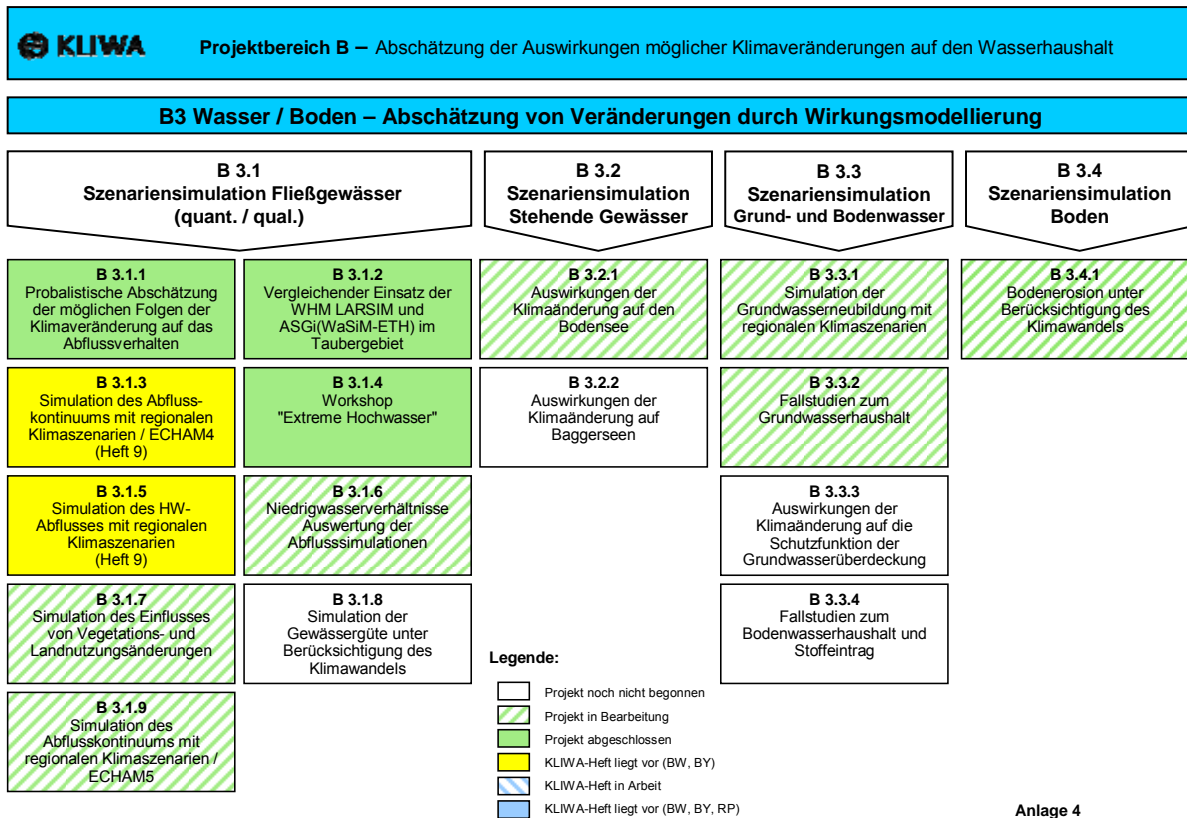
<b>Projektbereich B – Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt</b>					
B1 Klima / Meteorologie – Regionale Klimaszenarien			B2 Modellierungswerkzeuge	B3 Modellierung	
B 1.1 Basis ECHAM4	B 1.2 Basis ECHAM5	B 1.3 Sonstige GCM's und regionale Klimaszenarien	B 2.1 Wasserhaushaltsmodelle B 2.2 Bodenwasserhaushalts- modelle		
B 1.1.1 Bereitstellung hydro- meteorologischer Größen aus Klimaszenarien für Wasserhaushaltsmodelle (Heft 9)	B 1.2.1 Prüfung und Nutzung fortentwickelter regionaler Klimamodelle	B 1.3.1 Vergleich der Ergebnisse von GCM's für Süddeutschland	B 2.1.1 Flächendeckende Erstellung des WHM LARSIM für BW	<div style="border: 2px solid blue; border-radius: 50%; padding: 10px; display: inline-block;">                 Siehe eigene Übersicht             </div>	
B 1.1.2 Grundsatzstudie über Einsatzmöglichkeiten und Umsetzung eines regionalen Klimamodells	B 1.2.2 Prüfung und Nutzung Regionale Klimaszenarien des UBA – REMO	B 1.3.2 Klimaszenarien zur Ermittlung extremer Kurzzeit-Niederschläge	B 2.1.2 Flächendeckende Erstellung des WHM ASGI für BY		
B 1.1.3 Workshops "Klimaszenarien"	B 1.2.3 Prüfung und Nutzung Regionale Klimaszenarien des UBA – WETTREG		B 2.1.3 Flächendeckende Erstellung des WHM LARSIM für RP		
B 1.1.4 Vergleichende Bewertung der Ergebnisse der Klimaszenarien (Heft 9)	B 1.2.4 Prüfung und Nutzung Regionale Klimaszenarien CLM		B 2.2.1 Flächendeckende Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells in BW		
	B 1.2.5 Prüfung und Nutzung Regionale Klimaszenarien COSMO-CLM		B 2.2.2 Flächendeckende Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells in BY		
			B 2.2.3 Flächendeckende Aufstellung des Bodenwasserhaushaltsmodells in RP		

- Legende:**
- Projekt noch nicht begonnen
  - Projekt in Bearbeitung
  - Projekt abgeschlossen
  - KLIWA-Heft liegt vor (BW, BY)
  - KLIWA-Heft in Arbeit
  - KLIWA-Heft liegt vor (BW, BY, RP)

Anlage 3  
Stand: September 2009

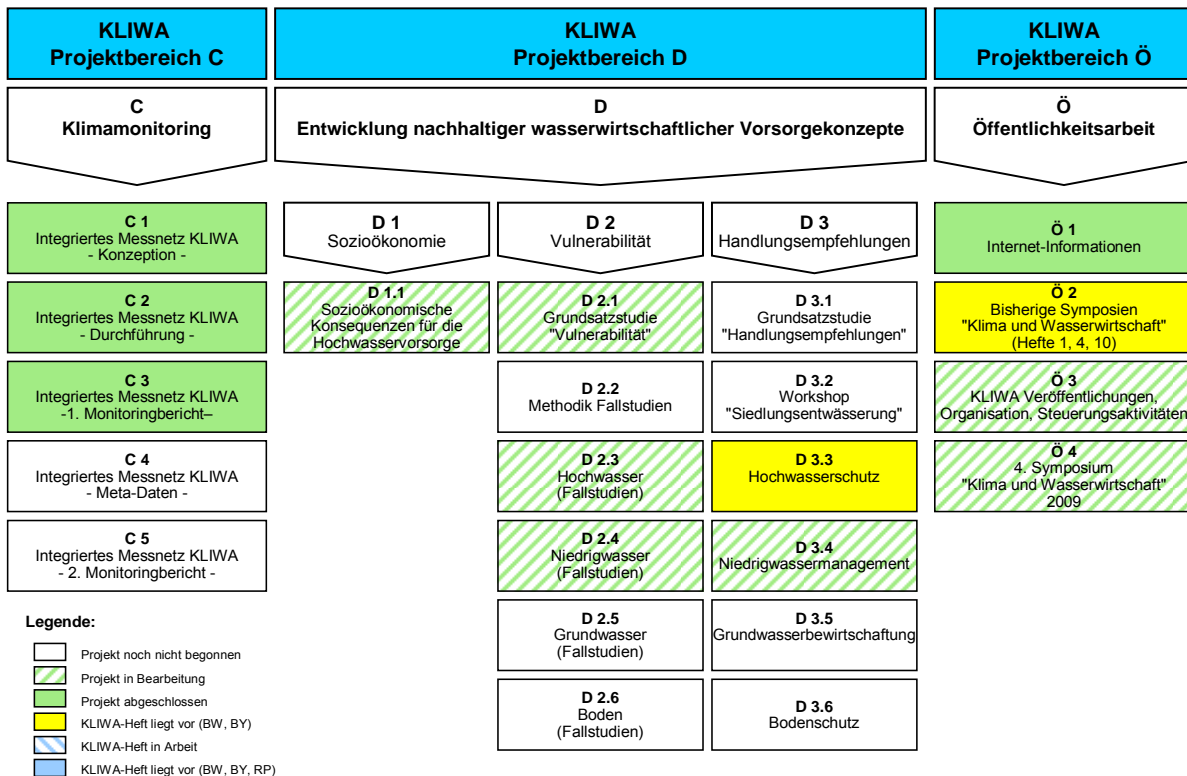


Anlage 4: Übersicht Projektbereich B - Teil B 3 im Detail



Anlage 4  
Stand: September 2009

Anlage 5: Übersicht Projektbereiche C, D und Ö



Anlage 5  
Stand: September 2009

## **Die Klimaforschungslandschaft in Deutschland und die Rolle des Deutschen Wetterdienstes**

Paul Becker  
Deutscher Wetterdienst

### **1 Einleitung**

In Deutschland und in den meisten Staaten der Welt haben Politik, Gesellschaft und Wirtschaft spätestens seit der Vorlage des letzten IPCC-Berichtes erkannt, dass der Klimawandel eine der größten Herausforderungen in diesem Jahrhundert darstellt. Neben dem Klimaschutz (Emissionsminderung klimarelevanter Substanzen) ist eine qualitativ hochwertige und fachlich breit aufgestellte Klimaforschung notwendig um in den Bereichen Klimamonitoring, Szenarienrechnungen, Klimafolgenabschätzung und Anpassung an den Klimawandel die notwendigen Informationen zur bestmöglichen Meisterung der Herausforderung Klimawandel bereitzustellen. Dieser Beitrag gibt einen kurzen Überblick über die Klimaforschungslandschaft in Deutschland, wobei insbesondere auf die Rolle des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eingegangen wird.

### **2 Klimamonitoring**

Eine langfristige Überwachung (Monitoring) des Klimas ist notwendig um die Ursachen und das Ausmaß des Klimawandels zu bestimmen, um die Güte von computerbasierten Klimasimulationsrechnungen beurteilen zu können und um nachweisen zu können inwieweit Klimaschutzmaßnahmen Wirkung zeigen. Hierzu sind der nachhaltige und qualitätskontrollierte Betrieb unterschiedlichster Beobachtungssysteme, die Archivierung und Bereitstellung der Beobachtungsdaten in Datenbanksystemen sowie die sorgfältige Bestimmung von Trends in den Beobachtungsdaten erforderlich. Der DWD leistet hierzu seit vielen Jahrzehnten mit seinem u.a. aus Klimastationen und instrumentierten Satelliten bestehenden Beobachtungssystemen einen unverzichtbaren Beitrag, der durch Messnetze von anderen Organisationen oder Behörden des Bundes oder der Länder ergänzt wird. Darüber hinaus führen viele Forschungsinstitutionen Messungen klimarelevanter Parameter durch, die vor allem dem besseren Verständnis des Klimasystems dienen.

Der DWD publiziert die Ergebnisse des Klimamonitorings regelmäßig in Berichten, Presseinformationen und einem im Internet online verfügbaren Klimaatlas (<http://www.dwd.de/klimaatlas>). Die qualitätsgeprüften Beobachtungsdaten des DWD und vieler Partnerorganisationen können im Climate Data Center (CDC) des DWD über das Internet recherchiert und abgerufen oder angefordert werden (<http://www.dwd.de/cdc>).

### **3 Szenarienrechnungen und Klimafolgenabschätzung**

Um Veränderungen des Klimas besser verstehen und zukünftige Klimaänderungen abschätzen zu können, verwenden Wissenschaftler Klimamodelle, die sich bezüglich der Größe des Simulationsgebiets, der räumlichen Auflösung des simulierten Klimas und auch des Detaillierungsgrades der simulierten Klimaprozesse unterscheiden.

Für die Simulation des Klimas auf der ganzen Erde hat in Deutschland insbesondere das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) mit seinem Modell ECHAM hohe internationale Anerkennung erhalten. Die mit ECHAM auf der Basis der IPCC Emissionsszenarien berechneten Klimaprojektionen werden regelmäßig in den Sachstandsberichten des IPCC berücksichtigt und auch von vielen Forschungsgruppen für die Simulation des Klimas in Deutschland mit höher auflösenden Regionalmodellen genutzt. Der DWD und das MPI-M entwickeln derzeit zusam-



men das neue globale Klima- und Wettermodell ICON (<http://www.icon.enes.org>), welches aufgrund seiner moderneren Architektur und höheren Leistungsfähigkeit das Modell ECHAM ablösen soll.

Zur Abschätzung der regionalen Unterschiede des zu erwartenden Klimawandels in Deutschland setzen viele deutsche Forschungsgruppen regionale Klimamodelle ein, die eine typische räumliche Auflösung von 10 bis 20 km aufweisen. Beispiele solcher Regionalmodelle sind das Modell REMO des MPI-M (entwickelt aus dem Europa- / Deutschlandmodell des DWD) und das Modell COSMO-CLM (Klimaversion des COSMO Modells des DWD) der CLM Community (<http://www.clm-community.eu>). Zusätzlich kommen in Deutschland auch sogenannte statistische Regionalmodelle zum Einsatz, die unter Nutzung der Ergebnisse globaler Klimamodelle aus gemessenen Klimastationswerten der Vergangenheit mit statistischen Verfahren Klimastationswerte für die Zukunft berechnen. Beispiele hierfür sind das Modell STAR des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung und das Modell WETTREG der Firma CEC Potsdam.

Neben der Simulation des zukünftig zu erwartenden Klimas sind auch möglichst genaue Abschätzungen der Auswirkungen des Klimawandels (Impaktmodellierung) auf den Menschen, die Umwelt und die Wirtschaft notwendig um möglichst geeignete Anpassungsmaßnahmen zu planen. In Deutschland gibt es bereits viele, teilweise durch Drittmittel geförderte Arbeitsgruppen an Universitäten, Forschungseinrichtungen und Behörden, die sogenannte Wirkmodelle nutzen um die möglichen Folgen des Klimawandels zu untersuchen. Die Wirkmodelle nutzen die Ergebnisse der globalen oder regionalen Klimaprojektionen als Eingangsdaten. Eine besondere Herausforderung besteht hier darin Wirkmodellbetreiber mit dem notwendigen Wissen zum Umgang mit den Klimaprojektionsdaten und den inhärenten Unsicherheiten zu schulen. Der DWD unterstützt viele dieser Arbeitsgruppen durch Beratung und Service zu Klimaprojektionsdaten als Wirkmodelleingangsdaten sowie zu Klimamonitordaten für die Wirkmodellevaluierung. Beispiele hierzu sind die Bereiche Wasserwirtschaft (<http://www.kliwa.de>) und die Biodiversität (<http://www.bik-f.de>).

Zusätzlich untersucht der DWD auch mit eigenen Wirkmodellen die möglichen Auswirkungen des Klimawandels zu Fragestellungen in der Landwirtschaft, der Humanbioklimatologie und des Stadtklimas. So wird u.a. derzeit in Kooperationen mit den Städten Frankfurt und Berlin die zukünftige Wärmebelastung in diesen Städten und die Wirksamkeit planerischer Gegenmaßnahmen mit hochauflösenden Stadtklimamodellen berechnet und ausgewertet.

#### **4 Anpassung an den Klimawandel**

Neben den Strategien zur Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen sind Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zwingend notwendig. In Deutschland wurde hierzu unter anderem die „Deutsche Anpassungsstrategie“ (DAS) entwickelt. Zur adäquaten Auslegung der Anpassungsmaßnahmen werden dabei zunächst spezifische Abschätzungen der Auswirkungen der Klimaänderung auf die unterschiedlichen Sektoren, wie z. B. Verkehr, Bauwesen, Energie, Landwirtschaft, Gesundheit und Hydrologie durchgeführt. Die geplanten Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel finden auf unterschiedlichen Zeitskalen statt. Neben sofort wirksamen Anpassungsmaßnahmen wie dem Betrieb bundesweiter Warnsysteme (z.B. Hitze- und Waldbrandwarnsysteme) werden auch längerfristige Vorhaben, wie zum Beispiel die Stadtplanung und die Landschaftsplanung (<http://www.klimamoro.de>) oder auch die Anpassung der Wasserwege für die Schifffahrt (<http://www.kliwas.de>) unterstützt.

Die Planung möglicher Anpassungsmaßnahmen erfordert eine intensive Beratungstätigkeit, zu der der DWD einen entscheidenden Beitrag leistet. Bei diesem Kommunikationsprozess, der zwischen der Klimaforschung, den Erbringern von Klimadienstleistungen und den unterschiedlichen Entscheidungsträgern stattfindet, steht derzeit die Identifikation von Nutzerfragestellun-

gen, aber auch die Aufklärung über die Grenzen des wissenschaftlichen Kenntnisstandes auf der Seite der Nutzer im Fokus.

## 5 Kommunikation

Relevante Informationen und Beratungen zum Thema Klima werden in Deutschland u. a. von einer Reihe von Bundesministerien und ihren nachgeordneten Behörden sowie wissenschaftlichen Institutionen erbracht. Erwähnt seien hier das Umweltbundesamt (UBA) mit dem Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass), das Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK), das Climate Service Center (CSC) und der DWD.

Entscheidungen fallen häufig auf der sub-nationalen Ebene. Daher werden in Deutschland für die Unterstützung von klimarelevanten Entscheidungen auf dieser Skala neben Institutionen der Bundesländer auch eine Reihe von regionalen Klimabüros der Helmholtzgesellschaft (HGF) und des DWD betrieben. Die regionalen Klimabüros haben dabei neben der regionalen Zuständigkeit noch jeweils eine fachspezifische Spezialisierung, zum Beispiel für maritime Fragen, den Küstenschutz, das Bioklima oder alpine Regionen.

## 6 Herausforderungen

Auch wenn die Klimaforschung in Deutschland schon viel erreicht hat, gibt es für die nähere Zukunft noch viele Herausforderungen zu meistern. Diese umfassen die Bereiche: Kommunikation und Klimaservices, Extremwertklimatologien, Unsicherheiten in Klimaprojektionen, Downscaling, Verbesserung der Klimamodelle und dekadische Klimavorhersage.

Die Frage, ob in Zukunft extreme Wetterlagen häufiger oder in stärkerer Ausprägung auftreten werden, ist aufgrund des damit verbundenen Gefahrenpotentials von besonderer Bedeutung. Zu erwartende Änderungen im Auftreten von Hitzewellen, Trockenheit, Stürmen oder extremen Niederschlägen und damit Überschwemmungskatastrophen stellen enorme Herausforderungen, zum Beispiel für die Planung von Infrastruktur oder Katastrophenvorsorge, dar. Leider zeigen bisherige Studien, dass die Genauigkeit bei der Simulation von zukünftigen Extremereignissen signifikant geringer ist als bei der Simulation mittlerer Verhältnisse (z.B. Jahresmitteltemperatur). Der DWD erforscht daher im Rahmen einer Behördenallianz mit dem Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BKK), dem Technischen Hilfswerk (THW), und dem UBA Verfahren um dennoch aus den bereits vorliegenden Projektionsrechnungen belastbare Aussagen zur zukünftigen Häufigkeits- oder Intensitätsänderung von Extremereignissen machen zu können.

Ergebnisse von Klimamodellrechnungen werden auch zukünftig immer mit gewissen Unsicherheiten behaftet sein. Die Unsicherheiten entstehen z.B. durch die in Klimamodellen vereinfachten Beschreibungen klimarelevanter Prozesse (Parametrisierungen). Hinzu kommt, dass die zukünftige Treibhausgas- und Aerosolkonzentration sowie die Intensität der Sonnenaktivität nicht bekannt sind und deshalb nur abgeschätzt werden können. Um die Unsicherheiten abschätzen zu können nutzt daher der DWD derzeit Projektionen von 14 verschiedenen Regionalmodellen, die von 5 verschiedenen Globalmodellen angetrieben wurden. Darüber hinaus werden z.B. im Rahmen des KLWAS Projektes (<http://www.kliwas.de>) Postprozessingverfahren zur Korrektur der Fehler in den Klimaprojektionsdaten genutzt und teilweise neu entwickelt. Ein wichtiger Bestandteil der Postprozessingverfahren ist auch die räumliche Auflösung der Projektionsdaten zu erhöhen (Downscaling von der regionalen auf die lokale Skala), damit auch kleinräumige Fragestellungen des Klimawandels (z.B. zukünftige Pegelstände in kleinen Flusseinzugsgebieten) untersucht werden können.

Durch die kostenfreie Verfügbarkeit vieler Klimaprojektionen über das Internet hat sich das Spektrum und die Intensität der Nutzung von Klimaprojektionen in den letzten Jahren stark er-



höht. Hierbei wurde auch deutlich, dass weitere Verbesserungen der Klimamodelle unbedingt erforderlich sind um belastbarere Aussagen zum zukünftigen Klimawandel machen zu können. Numerische Klimamodelle wurden in der Vergangenheit überwiegend aus bereits existierenden operationellen Wettervorhersagemodellen entwickelt. Inzwischen erfolgt die Entwicklung von Modellen für Klimaprojektionen und Wetterprognosen gemeinsam in Koordination zwischen DWD und externen wissenschaftlichen Partnern.

In Anbetracht der Unsicherheiten bei der Simulation von Wetter und Klima ist es sinnvoll für Zukunftszeiträume von einigen Tagen bis zu 100 Jahren ein einheitliches Ensemble-Modellsystem zu entwickeln („nahtlose Vorhersage“). Gegenwärtig besteht in der zeitlichen Abdeckung bestehender Ensemble-Systeme eine Lücke zwischen dem Prognosezeitraum der Jahreszeitenvorhersage und dem ersten auswertbaren Zeitraum von Klimaprojektionsrechnungen, die etwa den Vorhersagezeitraum von 1 bis 10 Jahren betrifft. Der DWD erforscht hierzu nun gemeinsam mit wissenschaftlichen Partnern die Machbarkeit einer Klimavorhersage, die Aussagen über den jahreszeitenbezogenen Verlauf des zu erwartenden Klimas in den nächsten 10 Jahre ermöglichen soll („dekadische Vorhersage“). Hierbei kommt den für die gekoppelten Atmosphären-Ozean-Modelle vorzugebenden Anfangswerten der Ozeanzirkulationen eine besondere Bedeutung zu, da großskalige Ozeanzirkulationen typischerweise eine Periodendauer von einigen Jahrzehnten aufweisen. Fortschritte in der Satellitenfernerkundung und zunehmender Einsatz von auf- und abtauchenden Messbojen („Argo-Floats“) haben die operationell verfügbaren Messdaten zu Temperatur, Salzgehalt und Strömungsgeschwindigkeit zumindest in den obersten 2000m der Meere deutlich verbessert und unterstützen somit das Vorhaben.

## **7 Schlussbemerkungen**

Die Klimaforschung in Deutschland ist durch die Beteiligung vieler Organisationen, Institute und Behörden breit aufgestellt und weist mit seinen vielen Aktivitäten teilweise international führende Qualität auf. Für die Klimafolgenforschung und die Planung von Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel werden eine umfangreiche Beratung der Akteure und ein Ausbau der Klimageservices benötigt. Der DWD nimmt bezüglich des Klimawandels nicht nur beim Klimamonitoring eine wichtige Funktion ein, sondern auch bei der Politikberatung, der Beratung und Unterstützung von Nutzern von Klimaprojektionsdaten, der Impaktmodellierung, der Verbesserung von Klimamodellen und auch der Klimamodellierung (dekadische Vorhersage). Für die nahe Zukunft und auch darüber hinaus sind noch viele Herausforderungen in der Klimaforschung, der Klimafolgenforschung und der optimalen Nutzung der Forschungsergebnisse zu meistern um mögliche negative Klimafolgen zu minimieren, aber auch um Chancen für eine bessere Umwelt und eine starke Wirtschaft in Deutschland zu nutzen.

## Auswertung/Verwendung regionaler Klimaszenarien im Vorhaben KLIWA

Johann Weber  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### 1 Einführung

Hinsichtlich des künftigen Klimawandels gilt für die Fachwelt als weitgehend gesichert, dass global das allgemeine mittlere Temperaturniveau deutlich ansteigen wird. Der letzte Sachstandsbericht des Weltklimarats (IPPC, 2007) gibt dafür als Bandbreite der Ergebnisauswertung der verfügbaren globalen Klimamodelle (GCMs) eine Zunahme von 1,4 bis 6,1 K bis zum Ende dieses Jahrhunderts an. Das Kooperationsvorhaben KLIWA hat zum vorrangigen Ziel, diese Besorgnis auslösende Veränderung in quantitative Aussagen zum regionalen Klimawandel für das Untersuchungsgebiet der beteiligten drei Bundesländer umzusetzen und die künftig möglichen Auswirkungen der Klimaveränderung auf den regionalen Wasserhaushalt abzuschätzen. Damit soll das wasserwirtschaftliche Handeln im Sinne des Vorsorgeprinzips bei Bedarf frühzeitig auf zu erwartende nachteilige Änderungen angepasst werden. **Abb. 1** zeigt die Projektbereiche von KLIWA, die für diese Aufgabenstellungen konzipiert sind.



Abb. 1: Vorgehenskonzept von KLIWA – Projektrahmen mit den fünf Arbeitsbereichen

Die GCMs mit ihrer derzeitigen räumlichen Auflösung sind bisher und auch in den nächsten Jahren nur in der Lage, großräumig, jedoch nicht für einzelne Regionen, Modellergebnisse der meteorologische Parameter zu liefern, da sie u.a. die orographischen Verhältnisse nur sehr grob abbilden. Zur Abschätzung der regionalen Klimaentwicklung müssen daher zusätzliche Verfahren herangezogen werden. Für die Übertragung der Ergebnisse eines GCM auf eine kleinräumigere Ebene sind regionale Klimamodelle bzw. Regionalisierungsverfahren (RCMs) entwickelt worden, die die Klimainformationen in verfeinerter räumlicher Auflösung bereit stellen können. Die RCMs müssen die Klimaparameter in einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung so bereitstellen, dass sie als Eingangsgrößen für die nachgelagerte Wirkungsmodellierung, die auf Flusseinzugsgebiete ausgerichtet ist, nutzbar sind.

Für wasserwirtschaftliche Untersuchungen müssen die Klimaelemente als Antrieb für die Wasserhaushaltsmodellierung verwendbar sein, um so mit Simulationsrechnungen die Veränderung des Wasserkreislaufs bzw. der Wasserhaushaltsgrößen ermitteln zu können. Diese Arbeitsschritte gehören zum Projektbereich B von KLIWA; dieser gliedert sich wiederum in drei Teilbereiche, die mittlerweile jeweils eine Reihe von Einzelprojekten umfassen. **Abb. 2** zeigt schematisch die drei Teilbereiche und ihr Zusammenwirken.



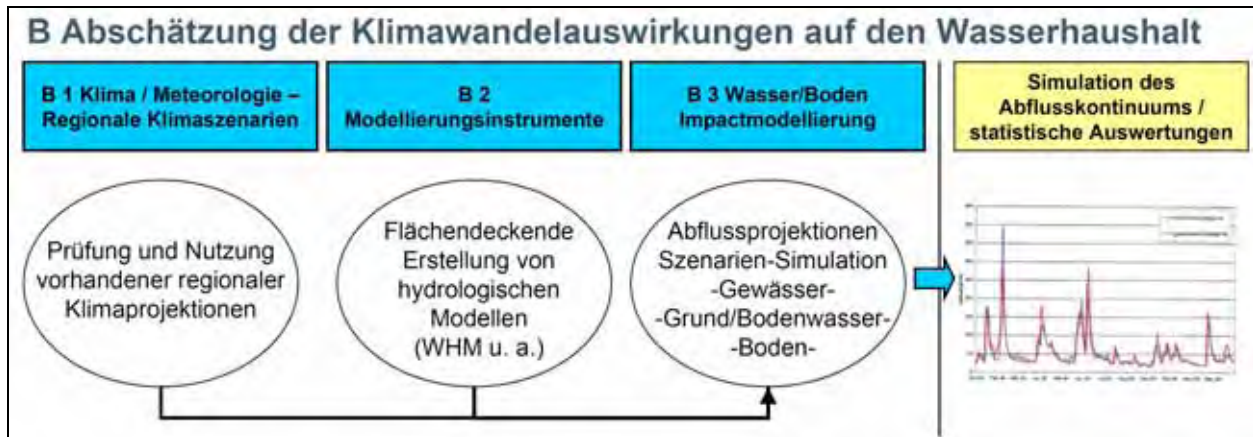


Abb.2: Abschätzung der Klimawandelauswirkungen - Stellung der regionalen Klimaprojektion

Diese notwendige Regionalisierung der Ergebnisse eines GCMs stand zusammen mit den retrospektiven Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Klimaparametern am Beginn des Vorhabens KLIWA; sie war und bedeutet auch weiterhin eine große fachliche Herausforderung für die Klimaforschung, ein Umstand, der sich in der ständigen Weiterentwicklung von Regionalisierungsverfahren zeigt. Die Schwierigkeiten bestehen darin, dass einerseits das Klimasystem der Erde ein hochkomplexes System ist, das bisher nicht vollständig verstanden ist, demzufolge auch nur eingeschränkt modelltechnisch nachgebildet werden kann; andererseits werden möglichst "gute" regionale Abschätzungen erwartet, aber in den einzelnen Modellen und den Modellierungsschritten bestehen noch erhebliche Unsicherheiten.

## 2 Methodisches Vorgehen

In Kenntnis dieser fachlichen Herausforderungen haben die KLIWA-Partner am Beginn der gemeinsamen Arbeiten eine Grundsatzstudie zu den Möglichkeiten und Grenzen der regionalen Klimamodellierung durch die ETH Zürich/Prof. Schär erstellen lassen. In dieser Studie zum aktuellen Forschungsstand wurde verdeutlicht, dass derzeit noch keine gesicherten regionsspezifischen Aussagen mit RMCs für die Zukunft bereitgestellt werden können; dies gilt für die Auswirkungen auf den Wasserkreislauf und das Niederschlagsregime und trifft insbesondere auch auf die Veränderung extremer Ereignisse zu. Ein optimales Verfahren für die Ergebnisregionalisierung war nicht erkennbar. Zur Behandlung der vorrangigen Aufgabenstellungen von KLIWA waren und sind aber regionalisierte Erkenntnisse über die künftige Klimaentwicklung unabdingbar. Die KLIWA-Partner haben sich daher intensiv mit verschiedenen Entwicklern von anwendbaren Regionalmodellen auseinandergesetzt, um die anstehenden Fragestellungen zielführend bearbeiten zu können. Es zeigte sich dabei, dass es notwendig ist, verschiedene Modelle zu betrachten, weil jedes Modell Stärken und Schwächen erkennen ließ und dass für eine vergleichende Bewertung von Modellergebnissen einheitliche Rahmenbedingungen notwendige Voraussetzung sind. Für die Ermittlung brauchbarer Klimaprojektionen wurden daher zusammen mit den Modellentwicklern eine einheitliche Vorgehensweise mit vergleichbaren Ausgangsbedingungen für die KLIWA-Untersuchungen festgelegt.

### 2.1 Ausgangsbedingungen für die Regionalisierung

Die KLIWA-Partner einigten sich darauf, zunächst drei in Deutschland entwickelte Regionalisierungsverfahren zu beauftragen, also eine damals eher noch neuartige Ensemble-Betrachtung anzustellen, um die Bandbreite der Verfahren kennenzulernen. Als Methoden wurden das dynamische Regionalmodell REMO des MPI-M sowie zwei weitere Downscalingverfahren, das statistische Verfahren STAR des PIK und das statistisch-dynamische Verfahren WETTREG eines Fachbüros, heute CEC, vorgesehen. Die Entwicklung von regionalen Klimaprojektionen

mit diesen drei Methoden bedeutete bei KLIWA, fachlich Neuland zu betreten. Aus einer Reihe von Fachdiskussionen ergaben sich schließlich folgende gemeinsame Ausgangsbedingungen:

- Das Globalmodell ECHAM4 des MPI-M liefert den meteorologischen Antrieb für die drei Regionalisierungsverfahren.
- Die zugrunde zu legende Emissionsentwicklung wird durch das Emissionsszenario B2 abgebildet, das eine mittlere Entwicklung mit einer Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration von rund 40% bis zur Jahrhundertmitte unterstellt.
- Die regionalen Klimasimulationen sollen die Entwicklung für die Gegenwart oder IST-Zeit sowie eine „nahe Zukunft“ abbilden. Dafür sollen Perioden von 30 Jahren Dauer, nämlich die Zeitspannen 1971-2000 und 2021-2050, betrachtet werden. Für die zweite Jahrhunderthälfte bis 2100 erschienen die möglichen Simulationsergebnisse noch zu unsicher und für wasserwirtschaftliche Fragen noch nicht relevant.
- Die Modellierungsergebnisse sind als Zeitreihen von Tageswerten für die hydrometeorologischen Größen bereitzustellen, die den Dateninput für die Wasserhaushaltsmodellierung darstellen. Mit solchen simulierten Zeitreihenlängen sind auch statistische Auswertungen fachlich noch sinnvoll.
- Die Güte der regionalen Simulationen wird für die IST-Zeit anhand der Mess- und Beobachtungsdaten verifiziert; damit wird der jeweilige Kontrolllauf eines Modells hinsichtlich ausgewählter statistischer Kenngrößen verglichen und die Nachbildung der IST-Größen bewertet (Szenarioplausibilität).
- Die mögliche Klimaveränderung wird durch den Vergleich der Simulationsergebnisse von Zukunfts- und IST-Zeitraum erfasst (Szenariovergleich). Klimaänderungssignale ergeben sich daraus als absolute Größe (v.a. für die Temperatur) oder als relative Veränderung (v.a. für den Niederschlag).

Ein erstes Ensemble von regionalen Klimaprojektionen auf der Basis des Globalmodells ECHAM4 ließ KLIWA von 2001 bis 2003 erstellen (Anm.: die entsprechenden Projektionen tragen zur eindeutigen Unterscheidung von nachfolgenden Projektionen als Bezeichnung den Namen von Methode und Jahreszahl, also z.B. WETTREG-2003). Für die nachfolgende wasserwirtschaftliche Wirkungsmodellierung standen damit als Voraussetzung die notwendigen Modelleingangsgrößen bereit. Vor Beginn der aufwendigen Modellierungsarbeiten war dabei schon klar, dass aus den erzeugten Klimaprojektionen noch eine sachgerechte Auswahl für die nachfolgende Wasserhaushaltsmodellierung zu treffen ist, da aus Zeit- wie Kostengründen nicht alle Projektionen verwendet werden konnten.

Wegen der stetigen Fortschritte bei der Modellierung des zu erwartenden Klimawandels standen etwa ab 2003 bereits die Ergebnisse weiterentwickelter GCMs, so auch des Nachfolgemodells von ECHAM4, nämlich ECHAM5, zur Verfügung. Das Umweltbundesamt ließ damit, auch in Abstimmung mit den vorausgegangenen KLIWA-Arbeiten, auf der Basis von ECHAM5 und der Emissionsszenarien A2, B1 und A1B ab 2004 weitere regionale Klimaprojektionen für Deutschland mit den RCMs REMO und WETTREG erstellen. Die entsprechenden Datensätze REMO-2006 und WETTREG-2006 standen ab Anfang 2007 für die Verwendung zur Wasserhaushaltsmodellierung zur Verfügung.

## 2.2 Vergleichende Bewertung der Klimaprojektionen

Die regionalen Klimamodelle produzierten die Ausgabedatensätze in unterschiedlicher Weise. Die statistischen Verfahren lieferten die Zeitreihen der Klimaelemente als Tageswerte für die verwendeten Messstationen, das dynamische Modell REMO erzeugte die Ergebnisdaten als Mittelwerte für Flächenraster von 18x18 km in Stundenschritten. Für den Vergleich der unterschiedlichen Ergebnisse und die Bewertung der Modelloutputs hinsichtlich ihrer weiteren Ver-



wendung einigten sich die KLIWA-Partner auf ein einfaches pragmatisches Vorgehen, das sich analog bereits bei Auswertungen zum Langzeitverhalten der hydrometeorologischen Messzeitreihen als zweckmäßig bewährt hatte.

Das Untersuchungsgebiet wurde in naturräumlich ähnliche Regionen mit Größen von im Mittel 10.000 km<sup>2</sup> unterteilt; dies ergab für Baden-Württemberg und Bayern zunächst neun KLIWA-Regionen, deren Zahl mit Rheinland-Pfalz auf elf anstieg; **Abb. 3** zeigt die Regionseinteilung. Diese bildete den räumlichen Bezug für die sogenannte regionenspezifische Auswertung. Für die Messwerte bzw. modellierten Werte legte man die arithmetische Mittelung hinsichtlich Raum (KLIWA-Region) und Zeit (Gesamtjahr sowie Halbjahre) fest. Mit diesem robusten Vorgehen war es möglich, die umfangreichen Datensätze relativ einfach auszuwerten, eine Abschätzung der Hauptergebnisse der einzelnen Projektionen in stark aggregierter Form zu erhalten und über eine vergleichende Ergebnisbewertung Festlegungen für den Umgang mit den Projektionen und die nachfolgenden Arbeitsschritte zu treffen.

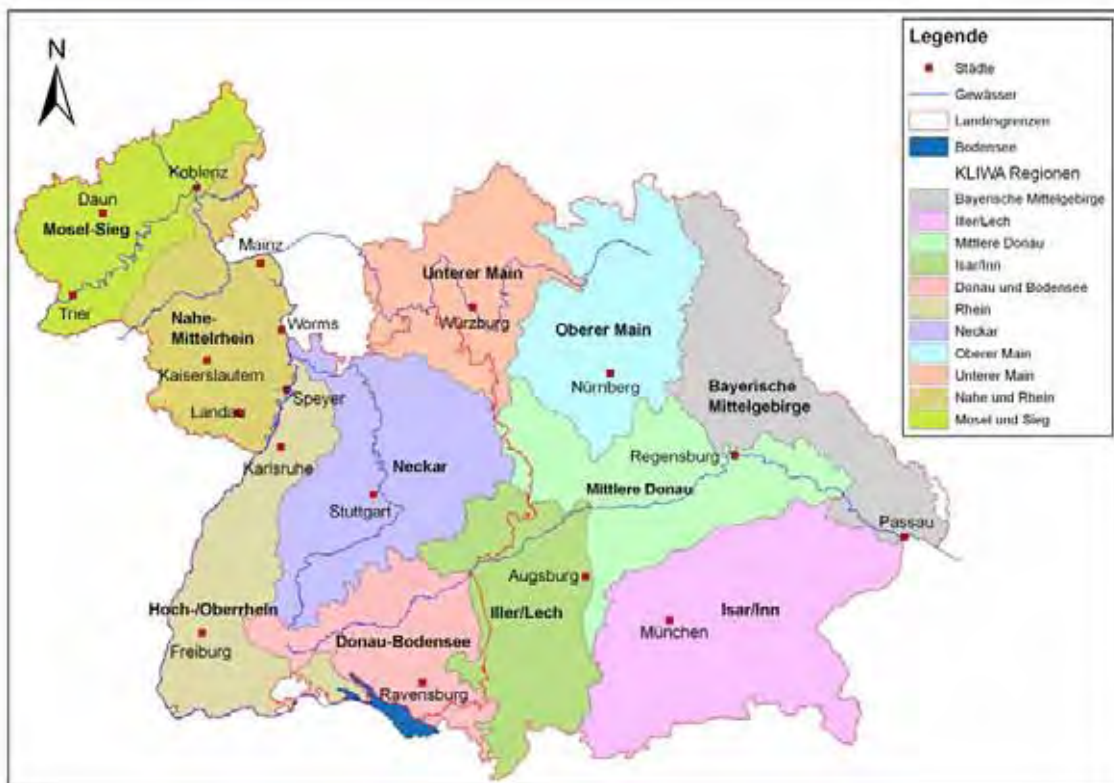


Abb. 3: KLIWA – Untersuchungsgebiet – Gebietseinteilung in Regionen

### 3 Klimaprojektionen auf Basis des GCM ECHAM4

#### 3.1 Ergebnisdarstellung

Die mit den genannten Regionalisierungsverfahren erzeugten Klimaprojektionen umfassten die Zeitreihen der hydroklimatischen Größen Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung (oder Sonnenscheindauer), relative Luftfeuchtigkeit und Wind. Sie stellten umfangreiche Datensätze dar, die erwartungsgemäß in den Ergebnissen heterogen waren und hinsichtlich der weiteren Verwendung als Input für die Wasserhaushaltsmodelle der einzelnen Flussgebiete bewertet werden mussten. Es war der Frage nachzugehen, welche Projektion hinsichtlich der Ergebnisse

am plausibelsten zu bewerten war und daher vorrangig für die weiteren Arbeitsschritte verwendet werden sollte. Mit dem dargestellten Vorgehen wurden die KLIWA-Projektionen zunächst hinsichtlich ihrer Szenarioplausibilität verglichen, dann aber auch bezüglich ihrer Klimaänderungssignale bewertet; dazu waren die Befunde aus der Langzeitanalyse der gemessenen Klimagrößen hilfreich.

Die Szenarioplausibilität, also die Gegenüberstellung von simulierter und beobachteter Klimatologie für die IST-Zeit 1971-2000, ist in **Abb. 4** regionenbezogen dargestellt. Die simulierten Mittelwerte der IST-Zeit für die Klimaelemente Temperatur und Niederschlag sind den homogenisierten Messdaten, die als Referenz dienen, gegenübergestellt; allerdings lag für die Methode STAR kein IST-Datensatz vor. Es ist ersichtlich, dass die WETTREG-2003-Ergebnisse, vor allem methodisch bedingt, näher an den Referenzdaten liegen als die REMO-2003-Ergebnisse, die eine deutliche systematische Abweichung von der gemessenen Klimatologie aufweisen.

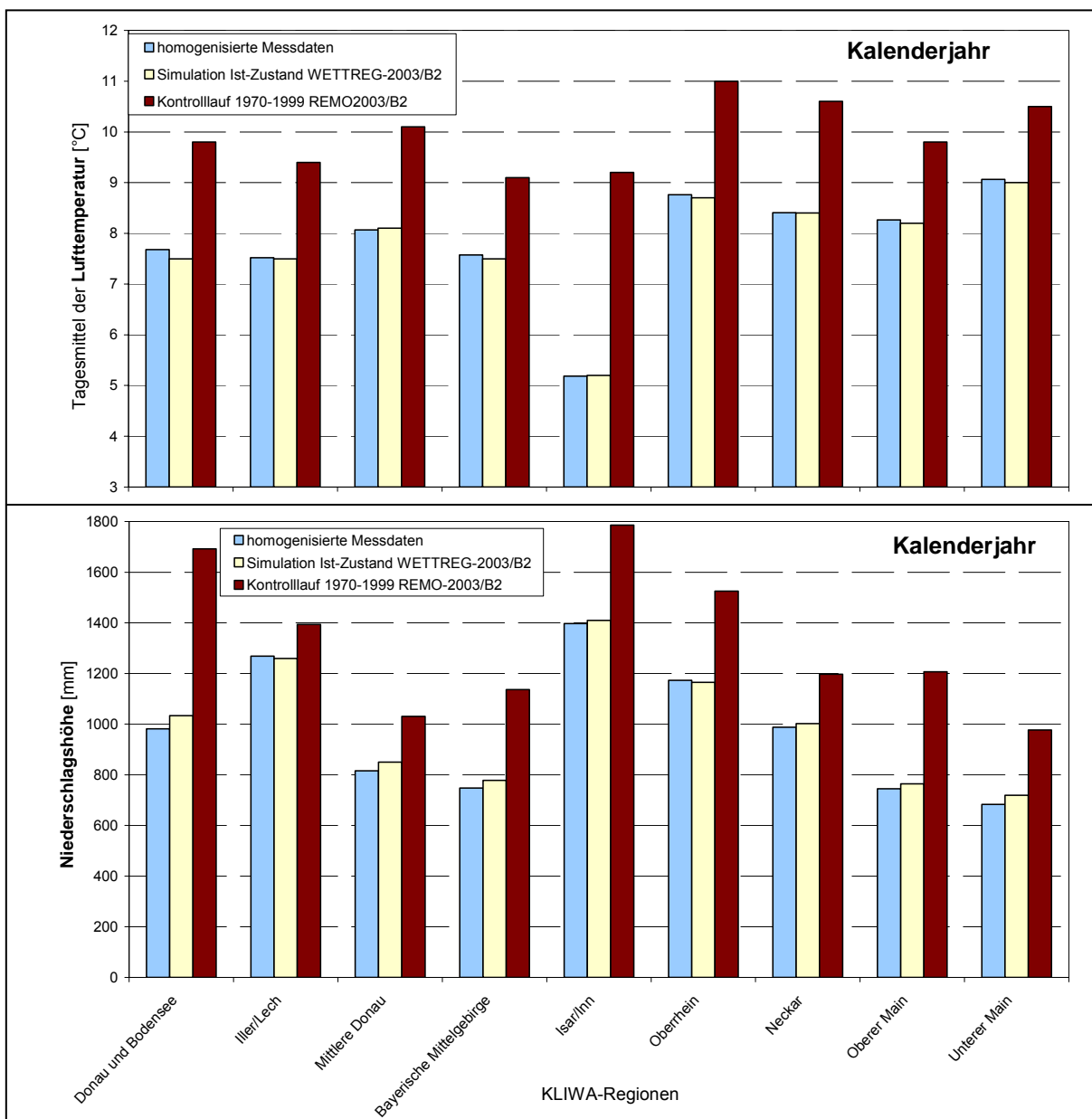
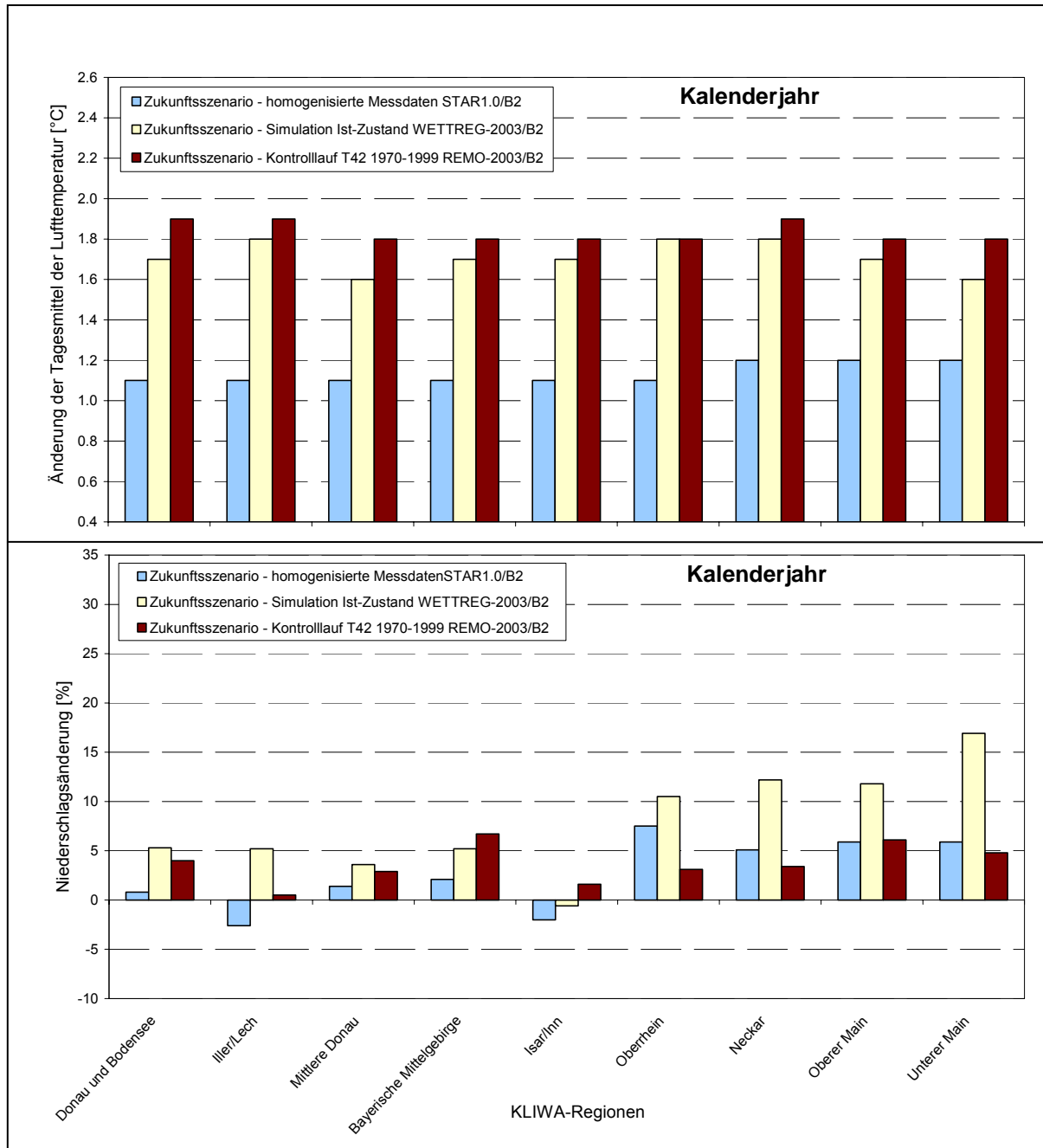


Abb. 4: Szenarioplausibilität der mittleren jährlichen Lufttemperatur (oben) und des mittleren jährlichen Niederschlags (unten) für zwei regionale Projektionen auf der Basis von ECHAM4



**Abb. 5** zeigt die Ergebnisse der Szenariensimulationen für die neun KLIWA-Regionen. Für die Temperatur sind die absoluten Differenzen der Mittelwerte zwischen den Simulationen Zukunft und IST dargestellt. Die Veränderungen der mittleren Niederschlagshöhen sind dagegen als prozentuale Differenzen ermittelt. Diese Ergebnisse, hier für das Gesamtjahr gezeigt, wurden auch für die hydrologischen Halbjahre analysiert, um die Veränderungen in ihrer innerjährlichen Ausprägung zu erkennen. Dabei ergab sich dann, dass die Zunahme der Mitteltemperatur im Winterhalbjahr bei allen drei Projektionen deutlicher als im Sommer ausfällt. Für die Niederschlagsveränderung ergab sich kein eindeutiges Bild; für das Sommerhalbjahr zeigten sich moderate Ab-, aber auch Zunahmen, für das Winterhalbjahr überwogen die Zunahmen, die bei einer Projektion besonders stark ausfielen.



**Abb. 5:** Szenariensimulation: Regionenspezifische Auswertung der Tagesmittel der Lufttemperatur (oben) und des Niederschlags (unten) für das Kalenderjahr - Ergebnisvergleich Zukunft/IST für die drei regionalen KLIWA-Projektionen basierend auf ECHAM4-B2

### 3.2 Ergebnisbewertung

Die Ergebnisse der untersuchten regionalen Klimamodelle wiesen wie erwartet teilweise erhebliche Unterschiede auf. Dies erschien neben den verfahrenstechnischen Unterschieden auch darin begründet, dass sich die damals vorliegenden Methoden noch in einer Art Entwicklungsphase befanden. Für die eigentliche Ergebnisbewertung und die notwendigen Schlussfolgerungen kam eine Reihe von vorgegebenen Beurteilungskriterien zum Tragen, die die prinzipiellen Möglichkeiten, aber auch bestehenden Schwächen der betrachteten Verfahren aus klimatologischer wie hydrologischer Sicht analysierten. Im Hinblick auf die zu behandelnden hydrologischen Fragestellungen, die im Vordergrund standen, zeichneten sich klare Unterschiede bei der Eignung der Regionalisierungsverfahren ab. So nutzen die einzelnen Verfahren die Ergebnisse des zugrunde gelegten GCM in unterschiedlichem Umfang, so dass sich auch die bestehenden Unsicherheiten unterschiedlich auf die Regionalisierung auswirkten. Für den Niederschlag, der wasserwirtschaftlich prioritär, andererseits am schwierigsten modelltechnisch nachzubilden ist, waren die raum-zeitliche Variabilität, die Persistenz von Witterungsperioden und die Simulation von Extremwerten wesentliche Gesichtspunkte.

Zusammenfassend kamen die KLIWA-Partner dann zu folgender Bewertung: Prinzipiell werden alle drei betrachteten Methoden als geeignet angesehen, um die möglichen regionalen Auswirkungen des Klimawandels abschätzen und die Datengrundlagen für die quantitative Abschätzung des künftigen Wasserhaushalts bereitstellen zu können; dabei wird mittelfristig die dynamische regionale Modellierung, wie z.B. mit REMO, nach intensiven Weiterentwicklungsarbeiten als am besten geeignet beurteilt. Zunächst erschienen aber die mit dem WETTREG-Verfahren gewonnenen Simulationsergebnisse für ein sachgerechtes Zukunftsszenario, auch wegen der tendenziell guten Übereinstimmung mit den Tendenzen aus den Langzeitanalysen ableitbaren Erkenntnisse, am wahrscheinlichsten. Daher entschieden sich die KLIWA-Partner, für die anstehenden wasserwirtschaftlichen Wirkungsmodellierungen zunächst vorrangig die regionale **Klimaprojektion WETTREG-2003/B2** zu verwenden.

Diese Klimaprojektion war daher auch Gegenstand weiterer vertiefender Analysen. So wurden die Veränderungen der Klimaelemente Temperatur und Niederschlag hinsichtlich ihrer räumlichen Verteilung ausgewertet. Die Ergebnisse der Veränderungen in ihrer räumlichen Ausprägung sind in den Kartendarstellungen für die Gebiete von Baden-Württemberg und Bayern als **Anhang** beigefügt. Analog dazu waren stationsbezogen weitere Erkenntnisse wie Veränderungen in der Anzahl der Frosttage oder auch der Sommertage ableitbar. Diese so gewonnenen Ergebnisse stellten in den zurückliegenden Jahren die wesentlichen Aussagen zur möglichen regionalen Klimaveränderung in Süddeutschland dar; sie sind fachlich auch weiterhin akzeptabel.

## 4 Klimaprojektionen auf der Basis des GCM ECHAM5

Ab Anfang 2007 waren für das gesamte Gebiet von Deutschland die neuen regionalen Klimaszenarien des Umweltbundesamts verfügbar; es handelte sich um regionale Projektionen, die mit den weiterentwickelten Regionalisierungsverfahren REMO-2006 und WETTREG-2006 erstellt worden waren. Als meteorologischer Antrieb dienten die Datensätze des GCM ECHAM5, das eine Weiterentwicklung von ECHAM4 durch das MPI-M darstellte und als ein deutscher Beitrag für den vierten Sachstandsbericht des IPCC globale Klimaprojektionen für die Emissionsszenarien A2, B1 und A1B bereit stellte. Es lagen damit zunächst sechs regionale Projektionen vor, nämlich REMO-2006/A2, B1 und A1B sowie WETTREG-2006/A2, B1 und A1B. Die Modellverbesserungen zeigten sich u.a. daran, dass die Simulationsläufe die Zukunft bis 2100 abbildeten und REMO-2006 Ergebnisse mit einer höheren räumlichen Auflösung von nun 10x10 km produzierte.



Eine orientierende Auswertung der neuen Regionalprojektionen bei KLIWA ergab, dass die Klimaänderungssignale weniger deutlich ausgeprägt waren als bei den vorhandenen KLIWA-Projektionen. Weiterhin war feststellbar, dass die drei Emissionsszenarien bis Mitte des Jahrhunderts keine besonderen Ergebnisunterschiede ergaben und erst danach zu einer stärkeren Spreizung der Ergebnisbandbreite führten, auch ein Hinweis auf die zwangsläufig zunehmenden Modellierungsunsicherheiten. Vor der Nutzung dieser neuen regionalen Klimaprojektionen, die ab Ende 2008 auch noch um Datensätze des dynamischen Regionalmodells CLM erweitert wurden, entschlossen sich die KLIWA-Partner wiederum, analog zum früheren Vorgehen zunächst regionenspezifische Auswertungen für die mittlerweile elf KLIWA-Regionen durchführen zu lassen. Dabei sollte der Schwerpunkt auf dem „gemäßigten“ Emissionsszenario A1B sowie der nahen Zukunft 2021-2050 liegen; die ferne Zukunft 2071-2100 war nur ergänzend zu betrachten.

Die Ergebnisse dieser Auswertungen sind hinsichtlich der Szenarioplausibilität in **Abb. 6** in aggregierter Form als Mittel über alle KLIWA-Regionen dargestellt. Die vergleichende Auswertung zeigte, dass die mit den dynamischen Regionalmodellen erzeugten Projektionen im Mittel entweder den Niederschlag oder die Temperatur deutlich überschätzten, also eine systematische Abweichung aufwiesen; die Verwendung der zugrundeliegenden Datensätze wäre ohne Bias-

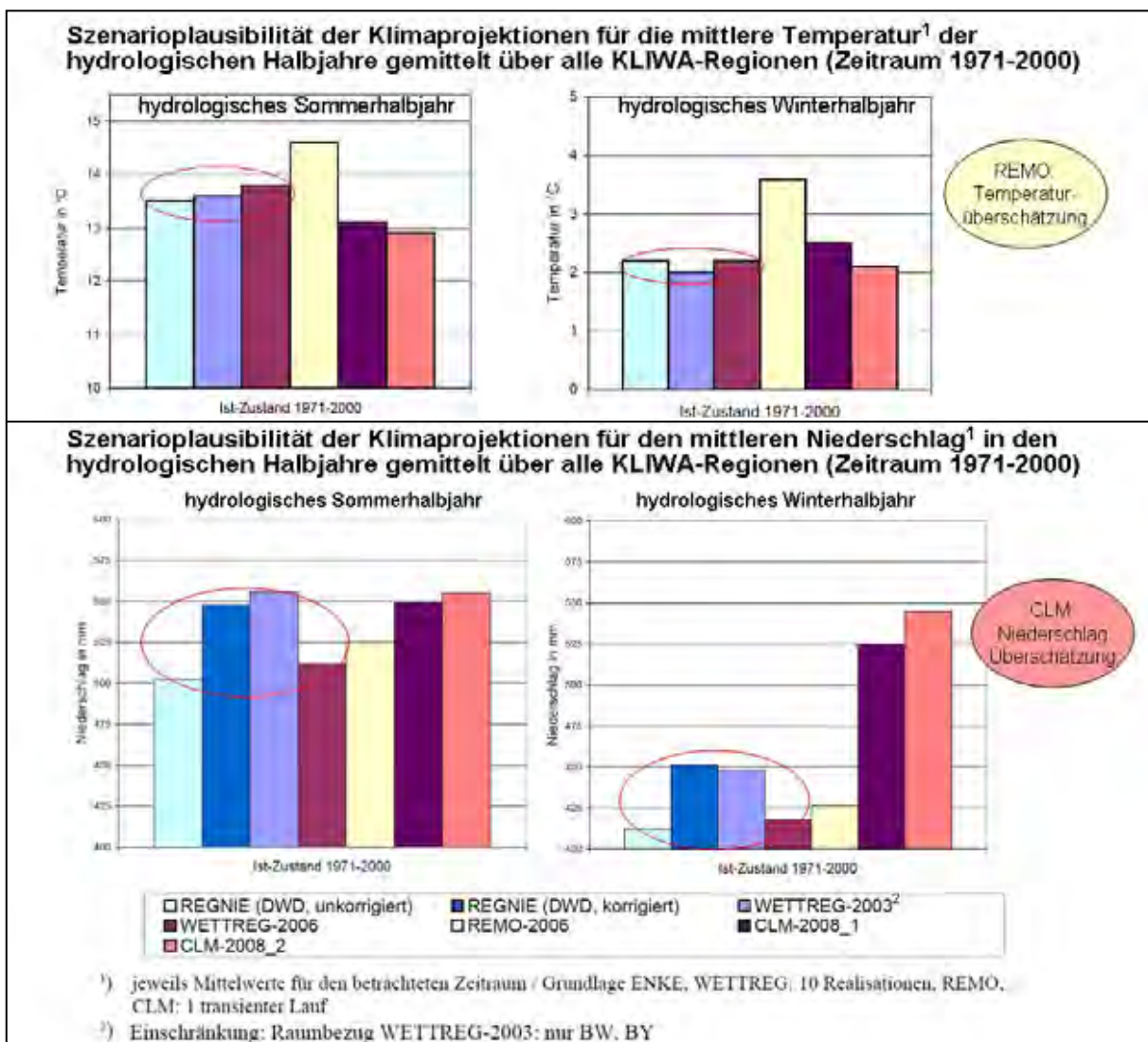


Abb. 6: Szenarioplausibilität der regionalen Klimaprojektionen auf Grundlage von ECHAM 5

Korrekturen nicht plausibel als Antrieb für die Wasserhaushaltsmodellierung verwendbar gewesen. Die Simulation der IST-Zeit mit WETTREG-2006 lieferte dagegen bei der gewählten Betrachtungsweise eine gut akzeptable Übereinstimmung mit dem IST-Klima, so dass sich die KLIWA-Partner auch für die vorrangige Nutzung der Projektion WETTREG-2006/A1B als weiterem Antrieb für Wasserhaushaltsmodellierungen entschieden.

In **Abb. 7** ist die Veränderung der mittleren Halbjahresniederschläge in ihrer räumlichen Verteilung qualitativ für das gesamte KLIWA-Untersuchungsgebiet wiedergegeben.

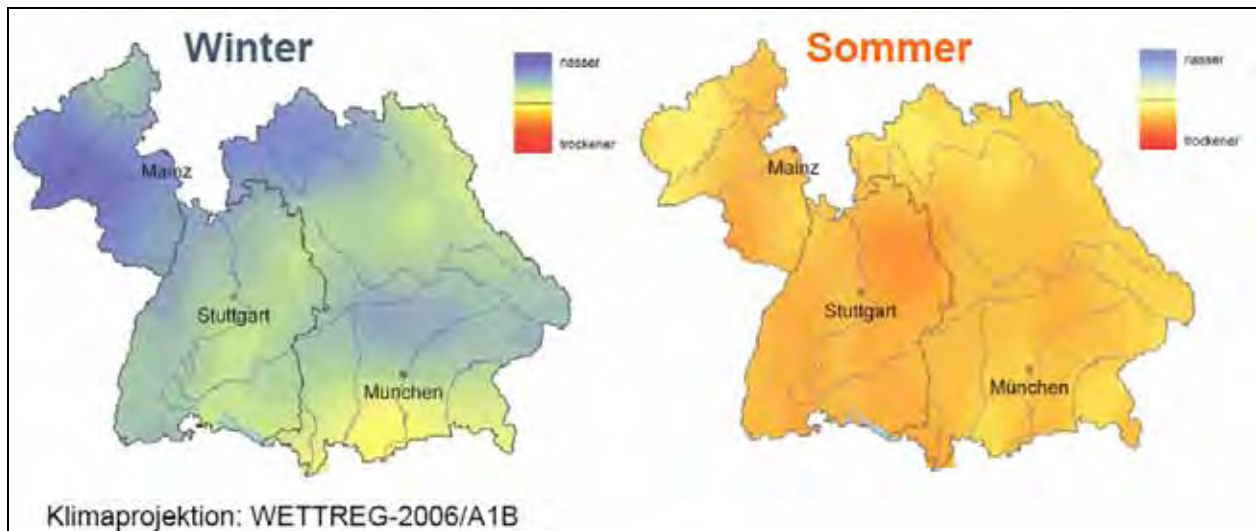


Abb. 7: Räumliche Veränderung der Halbjahres-Niederschläge zwischen den Simulationsperioden 2021-2050 und 1971-2000 für die regionale Klimaprojektion WETTREG-2006/A1B

Die Unterschiede der beiden bei KLIWA bisher favorisierten Klimaprojektionen von WETTREG sind in **Abb. 8** hinsichtlich des mittleren Niederschlags verdeutlicht: Für die beiden Halbjahre sind die prozentualen Veränderungen des mittleren Niederschlags in den KLIWA-Regionen aus dem Vergleich der simulierten Zeitperioden 2021-2050 und 1971-2000 angegeben. Es zeigt sich, dass sich die Klimaänderungssignale für den Niederschlag bereits im Mittel deutlich unterscheiden. WETTREG-2006/A1B weist gegenüber WETTREG-2003/B2 in beiden Halbjahren einen Rückgang auf, der für das Winterhalbjahr bezogen auf die Größe der Zunahmen besonders deutlich ausfällt; die Simulationsergebnisse stimmen aber tendenziell überein und zeigen eine Niederschlagszunahme im Winter, im Sommer dagegen einen Rückgang. Die beiden Klimaprojektionen präsentieren für die Niederschlagsentwicklung sowohl ein feuchteres wie ein trockeneres Klima, dessen mögliche Bandbreite durch Einbeziehung anderer Projektionen noch weiter auszuloten wäre. Zur möglichen Entwicklung nach 2050 sei nur angemerkt, dass sich hier ein Rückgang des mittleren Jahresniederschlags abzeichnet, der sich in beiden Halbjahren gleichermaßen mit einer Abnahme auswirkt.

Der vorstehende Vergleich zeigt deutlich, dass die Abschätzung der zu erwartenden Klimaentwicklung mit Unsicherheiten behaftet ist, die sich hier in der Ergebnisbandbreite widerspiegeln. Eine Hauptursache für die unterschiedlichen Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen ist sicherlich in den globalen Antrieben zu sehen. Eine überschlägige Betrachtung der Outputs der beiden verwendeten GCMs ECHAM4 und ECHAM5 hat gezeigt, dass ihre Klimaänderungssignale verschieden stark ausfallen; dies zeigt sich dann ebenfalls in den davon abgeleiteten regionalen Klimaprojektionen und sei hier als eine allgemeine Erklärung für die feststellbaren Unterschiede angeführt.



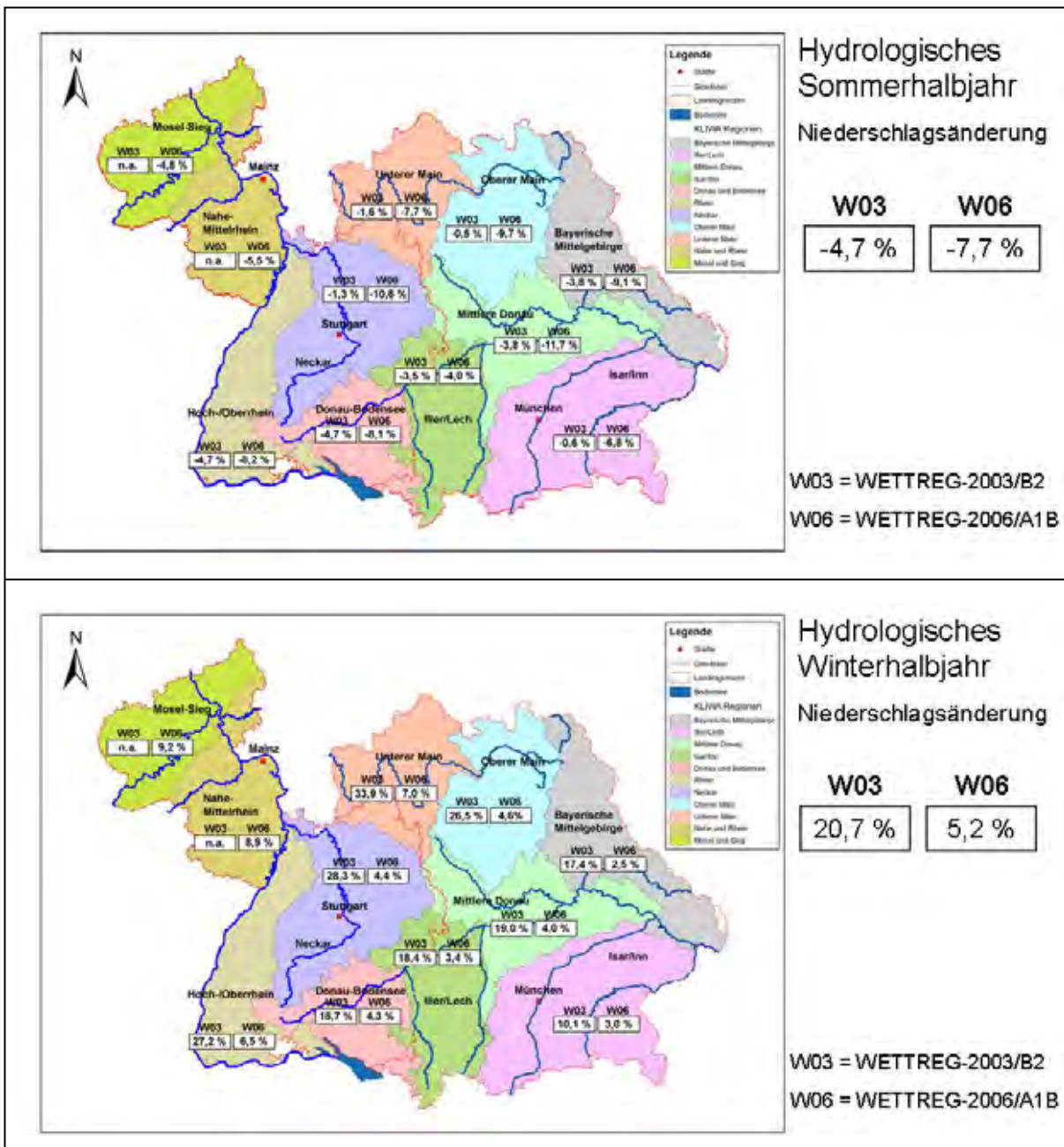


Abb. 8: Gegenüberstellung der regionsbezogenen Niederschlagsänderungen für die Simulationsperioden 2021-2050 und 1971-2000, ermittelt mit den zwei gewählten WETTREG-Klimaprojektionen

### 5 Ausblick

Die verstärkten Forschungsanstrengungen im Bereich der Klimaforschung haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass zunehmend auch mehr regionale Klimaprojektionen verfügbar und potentiell nutzbar sind. Eine besondere Rolle haben dabei sicherlich die großen europäischen Forschungsverbünde PRUDENCE und ENSEMBLES gespielt, durch die die regionale Klimamodellierung und eine kritische Auseinandersetzung mit den Modellergebnissen verstärkt Impulse erhalten haben. Dabei standen die Verfahren der dynamischen regionalen Klimamodellierung und deren Ergebnisbandbreiten im Mittelpunkt. Aus Sicht von KLIWA erscheint ihre Ver-

wendung als Dateninput für die weitere Wasserhaushaltsmodellierung nur mit einer vorausgehenden (Bias-) Korrektur zielführend.

Eine besondere Bedeutung für die notwendige Bandbreitenbetrachtung wird in der Einbeziehung weiterer globaler Klimamodelle gesehen. Sie haben in der Modellierungsabfolge, wie die Auswirkungen der GCMs ECHAM4 und ECHAM5 bei KLIWA bereits gezeigt hat, einen erheblichen Einfluss auf die regionalen Klimaprojektionen, die die Ergebnisse der möglichen Klimaentwicklung und davon abhängig auch der Klimawandelauswirkungen beeinflussen. Beispielhaft seien hier noch in **Abb. 9** die Ergebnisse einer vergleichenden Auswertung von vier GCMs zur Entwicklung der Klimaelemente Temperatur und Niederschlag für den süddeutschen Raum gezeigt; eine Kommentierung der Unterschiede erübrigt sich.

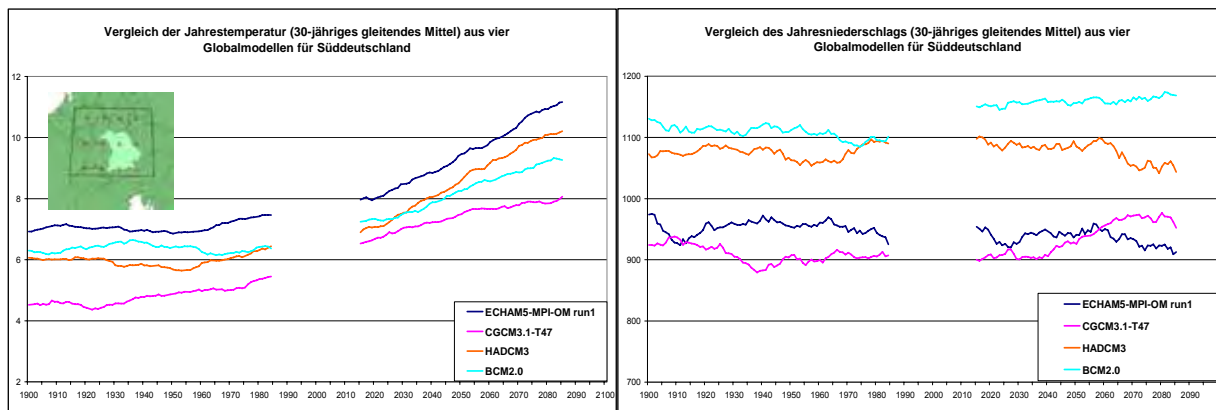


Abb. 9: Vergleich des 30-jährigen gleitenden Mittels der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags für vier ausgewählte Globalmodelle

Die KLIWA-Partner haben diese Richtung, wenn auch aus pragmatischen Gründen bisher eher verhalten, bereits eingeschlagen. Neben den beiden WETTREG-Klimaprojektionen, bei denen statistische Ansätze mit einer dynamischen Wetterlagenklassifikation verknüpft sind, sollen nun auch mit dynamische Modellierungsverfahren erzeugte Klimaprojektionen für weitere Simulationen zum Wasserhaushalt der einzelnen Flussgebiete im Süden Deutschlands genutzt werden.

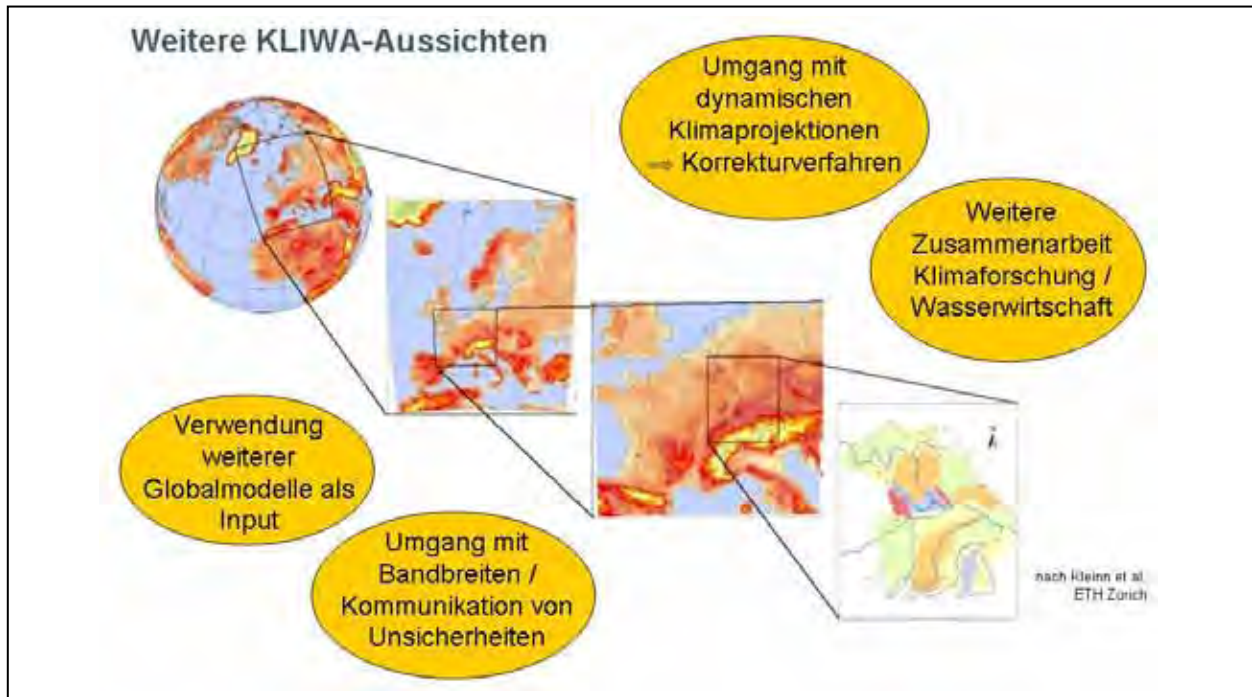


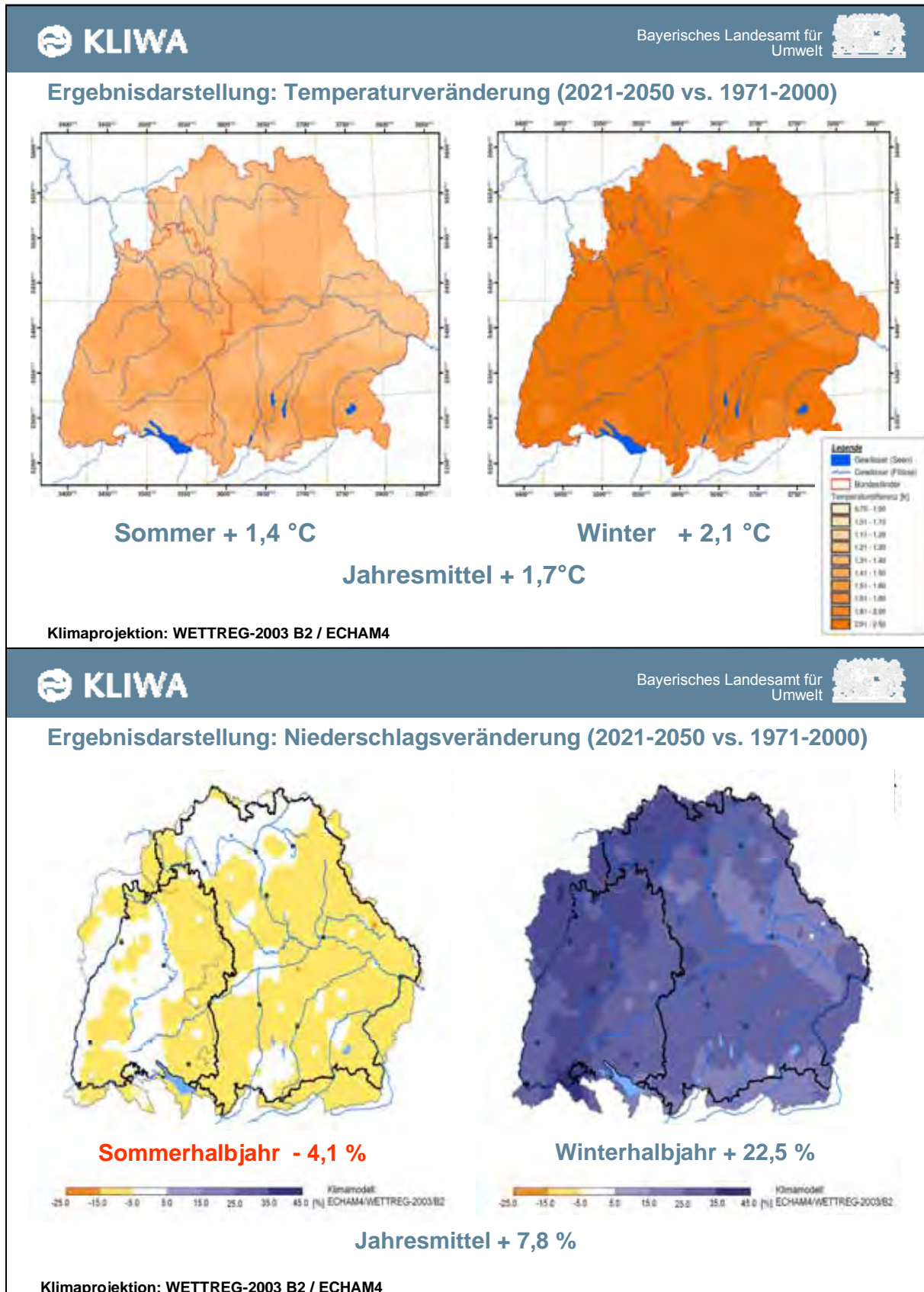
Abb. 10: Darstellung der Modellkette „vom Globalmodell zur Wasserhaushaltsmodellierung“

Für die künftigen Untersuchungen im Kooperationsvorhaben KLIWA werden daher eine Reihe von Weiterentwicklungsmöglichkeiten, aber auch -notwendigkeiten gesehen. Dies betrifft die Verwendung weiterer Globalmodelle als Antrieb von Regionalisierungsmethoden wie auch die Nutzung regionaler Klimaprojektionen von dynamischen Regionalmodellen. Daraus ergibt sich zwangsläufig ein sachgerechter Umgang mit den Ergebnisbandbreiten, die sowohl als Input wie auch Output der Wasserhaushaltsmodellierungen zu erwarten sind. Weiterhin könnte eine Intensivierung des Erfahrungsaustausches zwischen den Klimamodellierern und der Wasserwirtschaft mit ihren speziellen Anforderungen an die Güte von Modellierungsergebnissen zu einem besseren Prozessverständnis und damit insgesamt zu Verbesserung der Modellierungswerkzeuge führen. Und schließlich wird es eine notwendige Aufgabe sein, die Bandbreite der möglichen Klimaentwicklung mit ihren Unsicherheiten verständlich zu kommunizieren und bedarfsweise in sachgerechte wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen umzusetzen. Die damit verbundenen Herausforderungen sind in **Abb. 10** als wichtige weitere „KLIWA-Aussichten“ visualisiert.

## 6 Literatur

- Bartels, H. (2005): Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland, KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 73-86.
- Feske, N. (2009): Vergleichende Analyse globale Klimamodellsimulationen für Süd-deutschland und umliegende Gebiete, Untersuchung der TU Dresden im Auftrag des Bay. LfU, unveröffentlicht.
- Schär, Ch. et al. (2000): Grenzen und Möglichkeiten der globalen und regionalen Klimamodellierung für die Quantifizierung des Wasserhaushalts, Studie für KLIWA, Klimaforschung ETH Zürich, unveröffentlicht; (Internet: [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)), 21 Seiten.
- KLIWA – AK (2005): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, KLIWA-Berichte, Heft 9.
- KLIWA - AK (2009): Klimawandel im Süden Deutschlands – Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft, KLIWA-Broschüre.

**Anhang:** Räumliche Darstellung der Veränderung von Temperatur und Niederschlag -- Vergleich der mittleren Verhältnisse der Simulationsperioden 2021-2050 zu 1971-2000 auf der Basis der Ergebnisse der regionalen Klimaprojektion WETTREG-2003 B2-ECHAM4





## Dynamisches Modell COSMO-CLM

Gerd Schädler  
Institut für Meteorologie und Klimaforschung (IMK-TRO)  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### Einleitung: Bedeutung der Gitterauflösung und Regionalisierungsverfahren

Das Klimasystem gehört zu den komplexesten Systemen, die wir kennen, und sowohl im Verständnis als auch bei der Interpretation komplexer Systeme mit Hilfe von Modellen sind wir erst am Anfang. Obwohl Modellen in der Öffentlichkeit und den Medien häufig Skepsis entgegengebracht wird, führt an Modellen spätestens dann kein Weg vorbei, wenn es um die künftige Entwicklung des Klimas geht. Aber auch wenn für die Vergangenheit und die Gegenwart physikalisch konsistente Informationen in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung benötigt werden, kommen Modelle (hier verstanden als numerische Gitterpunktmodelle) ins Spiel. Um allerdings für konkrete planerische Zwecke brauchbar zu sein, müssen Modelldaten zwei grundlegende Bedingungen erfüllen: sie müssen in einer, abhängig von der Anwendung, räumlichen und zeitlichen Mindestauflösung vorliegen, und es muss eine Abschätzung der Datenqualität vorliegen. Beide Anforderungen können bislang aus Gründen der Rechenkapazität nicht hinreichend erfüllt werden. Für viele Anwendungen liegt die Mindestauflösung im Bereich von einigen Kilometern (Hydrologie, Landwirtschaft, Raumplanung); hierfür sind die Daten von globalen Modellen, die derzeit in Auflösungen von meist über 100 km vorliegen, nicht geeignet. Globale Modelldaten werden aber benötigt, um die großskaligen und längerfristigen Strukturen und Wechselwirkungen erfassen und diese globale Information für höher aufgelöste Modelle liefern. Abb. 1 zeigt zur Illustration die Herbstniederschlagsverteilung über Süddeutschland, wie sie vom Globalmodell ECHAM (ca. 180 km Auflösung, links) und vom Regionalmodell COSMO-CLM (hier mit einer Auflösung von 7 km, rechts) gesehen wird. Während ECHAM den Niederschlag in Baden-Württemberg mit ganzen vier Zahlen charakterisiert, treten bei COSMO-CLM die bekannten regionalen Strukturen deutlich hervor.

Neben dem Anwendungsaspekt ist hohe Auflösung auch aus folgendem Grund wichtig: viele klimarelevante Prozesse, also Prozesse, die periodisch auftreten bzw. persistent sind, werden von kleinskaligen Details der Orographie bzw. der Landnutzung bestimmt. Ein Beispiel ist die Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur: wird aufgrund zu grober Auflösung die Geländehöhe nicht korrekt erfasst, wird auch die Lufttemperatur nicht korrekt wiedergegeben, mit möglichen weiteren Auswirkungen z.B. auf Wind und Niederschlag. Auch die Niederschlagsbildung, insbesondere konvektive Sommerniederschläge und Hebungsniederschläge, können nicht oder ungenügend erfasst werden, wenn Gelände und Landnutzung nicht hinreichend fein aufgelöst sind. Die Auswirkungen zu grober Auflösung zeigt Abb. 2 für Kanalisierung, Talwindssysteme und Temperaturverteilung in Südwestdeutschland. Man erkennt, dass diese persistenten bzw. periodischen Strukturen bei zu grober Auflösung nicht erfasst werden.

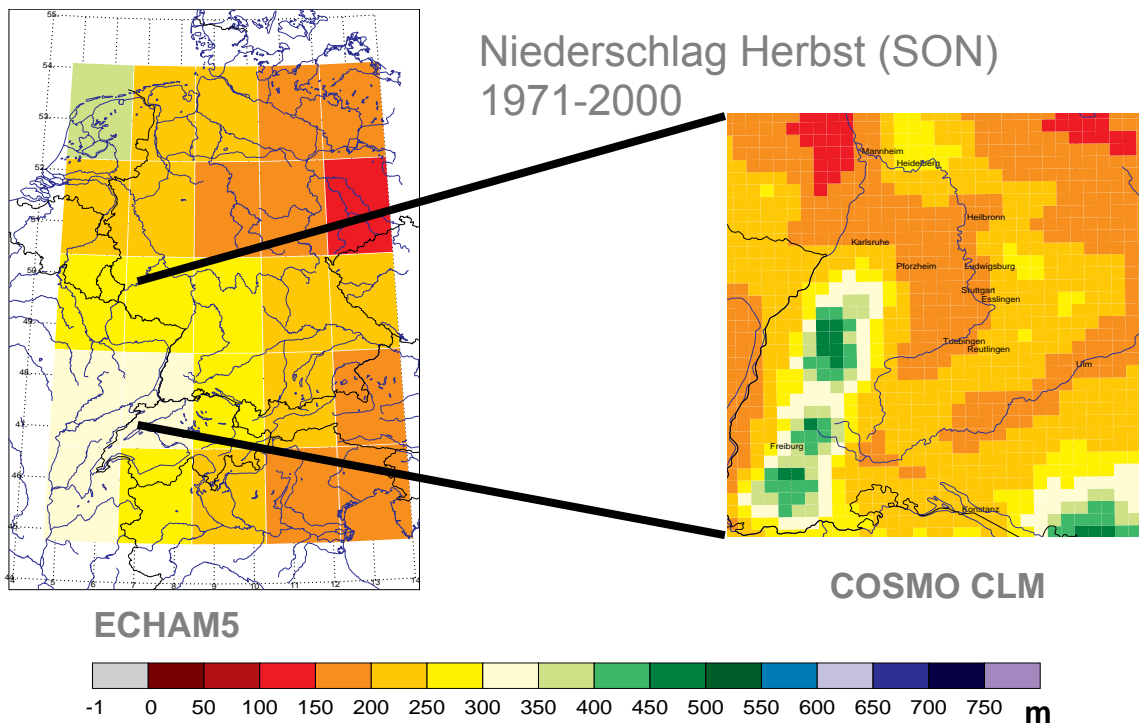


Abb. 1: Der klimatologische Herbstniederschlag in Baden-Württemberg aus der Sicht eines Globalmodells (links) und der eines Regionalmodells (rechts).

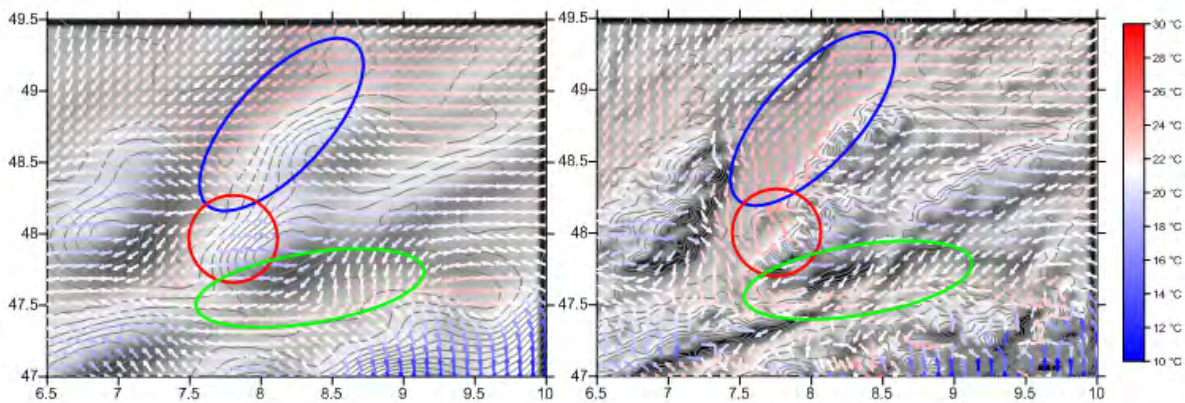


Abb.2: Einfluss der Auflösung auf Kanalisierung (blau markiert), Temperatur (rot) und lokale Windsysteme (grün) im südlichen Oberrheingraben, Schwarzwald, Schwäbischer Alb und Voralpenraum. Links: Auflösung 14 km, rechts Auflösung 2.8 km. Dargestellt sind Windvektoren, welche entsprechend der Temperatur eingefärbt sind.

Innerhalb gewisser Grenzen können Fehler des Globalmodells durch höher aufgelöste Regionalmodelle korrigiert werden, z.B. bei sommerlicher Konvektion, welche Globalmodelle nicht erfassen; ein Beispiel hierzu ist in Feldmann et al. (2008) zu finden.

Es stellt sich natürlich sofort die Frage, wie hoch die Auflösung denn sein sollte. Sehr hohe Auflösungen (im 1 km-Bereich) sind bislang bei Klimarechnungen für größere Gebiete und längere Zeiträume nicht möglich, da der Rechenaufwand bei Halbierung der horizontalen Maschenweite um etwa den Faktor 8 steigt, während sich die abzuspeichernde Datenmenge etwa vervierfacht. Das folgende eher heuristische Argument, hier anhand der Variablen Niederschlag und Wind

erläutert, gibt Hinweise auf die erforderliche Auflösung: viele Prozesse in der Atmosphäre, die zu Niederschlag führen (Hebung und Konvektion) stehen, ebenso wie lokale und regionale Windsysteme, in direktem Bezug zur Orographie; durch ihre Persistenz bzw. Periodizität prägen sie das lokale und regionale Klima. Das lässt sich so interpretieren, dass ähnliche Wellenlängen der Atmosphäre mit ähnlichen Wellenlängen der Orographie „in Resonanz“ stehen. Abb. 3 zeigt nun eine (zweidimensionale) Fourieranalyse der Orographie von Baden-Württemberg, d.h. welche Wellenlänge der Orographie (horizontale Achse) welchen Beitrag (Amplitude, vertikale Achse) zur realen Orographie leistet. Man erkennt, dass die höchsten Beiträge (10000 bis 20000) von Skalen mit Wellenlängen zwischen 30 und 100 km, also Strukturen wie Schwarzwaldmassiv und Rheintal kommen. Nimmt man an, dass Skalen, die Amplituden von weniger als 2000 (d.h. ca. 1/10 der höchsten Amplituden) haben, keine wesentliche regionalklimatische Rolle spielen, so kommt man zu Wellenlängen im Bereich von 5 und 10 km. Noch kleinere Skalen sind kurzlebig (Schädler, 1990) und daher eher als Rauschen zu interpretieren. Damit sollte die Auflösung (= halbe minimale relevante Wellenlänge) feiner als 5 km sein. Diese Auflösung ist deutlich feiner als die Auflösung, mit der bislang Klimarechnungen durchgeführt werden (wir arbeiten mit 7 km), aber man kann davon ausgehen, dass eine solch hohe Auflösung in einigen Jahren Standard werden wird. Es sei nochmals betont, dass dieses heuristische Argument eine erste Abschätzung liefern soll.

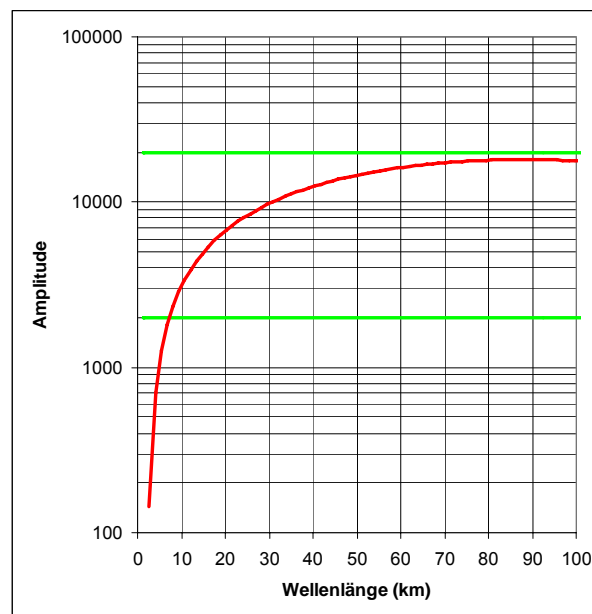


Abb. 3: Fourieranalyse der Orographie Baden-Württembergs (geglättet). Der relevante Amplitudenbereich ist in grüne Linien eingeschlossen.

Das Verfeinern der grob aufgelösten Klima- und Klimaänderungsdaten der Globalmodelle auf regionale Skalen wird als Downscaling bezeichnet; der Faktor zwischen den Skalen des Globalmodells und des Regionalmodells liegt typischerweise zwischen 10 und 20. Es lassen sich grob drei Arten von Downscaling-Verfahren unterscheiden (auf die verschiedenen Unterverzweigungen wird hier nicht eingegangen): das dynamische Downscaling, bei dem ein Regionalmodell, über die Ränder angetrieben durch Daten eines Globalmodells, kontinuierlich mehrere Jahrzehnte der Gegenwart und der Zukunft simuliert. Dies ist das Verfahren, welches bei den meisten COSMO-CLM-Simulationen verwendet wird. Vorteil des Verfahrens ist, dass es lückenlose, flächenhafte Verteilungen z.B. der Temperatur liefert und dass die Ergebnisse physikalisch fundiert und in sich konsistent sind. Letzteres ist wichtig, wenn z.B. miteinander korreliert Variable wie z.B. Temperatur und Niederschlag (man denke z.B. an das Schneefallkriterium in hydrologischen Modellen) oder Verdunstung und Niederschlag gemeinsam betrachtet werden





sollen. Nachteil des Verfahrens ist der hohe Rechenaufwand und entsprechend hohe Zeitbedarf. Beim statistisch-dynamischen Downscaling werden, unter Verwendung der Globaldaten, zunächst repräsentative Wetterlagen samt ihrer Häufigkeit ermittelt; das Regionalmodell simuliert nur die regionalen Ausprägungen dieser Wetterlagen, und die Ergebnisse dieser Episodensimulationen werden anschließend, gewichtet mit der Häufigkeit der Episoden, statistisch zu Mittelwerten oder Summen überlagert. Vorteil des Verfahrens ist, dass es deutlich schneller als das dynamische Downscaling ist und dabei dessen Vorteile wie physikalische Konsistenz beibehält. Nachteil ist, dass die Initialisierung der langsamen Komponenten (z.B. Boden, Wasser) schwierig ist und die Erfassung von Extremereignissen zusätzlichen Aufwand erfordert. Schließlich ist noch das statistische Downscaling zu nennen, bei welchem Gegenwarts Korrelationen zwischen Stationsbeobachtungen der jeweils interessierenden Variablen und Großwetterlagen ermittelt und mit Hilfe dieser Korrelationen und der Zukunftswetterlagenstatistik (von den Globalmodellen) Zukunftszeitreihen an den Stationen berechnet werden. Dieses Verfahren hat den Vorteil, schnell zu sein. Dem steht eine Reihe von Nachteilen gegenüber, wie z.B. die Gebundenheit an Klimastationen und die dort gemessenen Variablen; will man Flächendaten, muss eine Interpolation erfolgen. Insbesondere bei geringer Stationsdichte und Größen mit hoher räumlicher Variabilität wie z.B. dem Niederschlag birgt die Interpolation von Stationen in die Fläche ein nicht zu unterschätzendes Maß an Unsicherheit. Auch die Trennung zwischen Kalibrierung und Validierung des Verfahrens kann problematisch sein.

### Überblick über COSMO-CLM

COSMO-CLM (Climate Lokal-Modell, im folgenden mit CCLM abgekürzt) wurde aus dem Lokal-Modell des Deutschen Wetterdienstes entwickelt, welches seit 1999 zur operationellen Wettervorhersage verwendet wird. Die erste Version von CCLM wurde vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) erstellt (2002), die weitere Entwicklung erfolgte zusammen mit GKSS und TU Cottbus. 2004 wurde die erste Langzeit-Klimasimulation mit CCLM im Rahmen des PRUDENCE-Projekts durchgeführt und validiert. Dabei zeigte sich, dass die Qualität der CCLM-Ergebnisse mit derjenigen der anderen beteiligten regionalen Klimamodelle vergleichbar war. Parallel zu diesen Arbeiten wurde die sogenannte CLM-Community aufgebaut, in der sich die Nutzer des – nach Registrierung und Verpflichtung zur Mitarbeit – frei verfügbaren CCLM-Modellsystems zusammenschlossen mit dem Ziel der gemeinsamen Weiterentwicklung und Nutzung des Modells. Inzwischen (Ende 2009) ist diese Nutzergemeinschaft auf über 100 Mitglieder in Europa (z.B. Deutschland, Schweiz, Österreich, Italien, Irland, Großbritannien) sowie in Afrika, Mittelamerika und Indien angewachsen; entsprechend wird CCLM inzwischen nicht nur auf Regionen in Europa, sondern auch in Asien und Afrika angewendet. Ein Blick auf das Programm des letzten CLM-Treffens im September 2009 in Karlsruhe (siehe CLM-Webseite) gibt einen Eindruck von der Vielfalt der Themen und Regionen, welche von der Nutzergemeinschaft bearbeitet werden.

Ein Modell (eigentlich muss man von einem Modellsystem sprechen) dieses Umfangs und dieser Komplexität, welches, wie alle komplexen numerischen Modellsysteme, unvermeidbar mit Fehlern behaftet ist, und eine sehr große Mannigfaltigkeit von Betriebskonfigurationen (Setups) erlaubt, kann nur durch die Arbeitskraft und Erfahrung einer Gemeinschaft gepflegt und weiterentwickelt werden; daher wurden Arbeitsgruppen zu Themen von allgemeinem Interesse eingerichtet und es finden regelmäßige jährliche Treffen und Schulungen statt. Hierbei ist die CLM-Webseite (<http://clm.gkss.de>) von großem Nutzen. Auf dieser Seite finden sich auch viele weiterführende Informationen zu Themen, die hier nur kurz angesprochen werden, wie Modellbeschreibungen, aktuelle Versionen etc.

Ein wichtiger Schritt war die Entscheidung der Leitungsgruppe des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ) in Hamburg im Jahr 2005, CCLM zum Community Modell der deutschen Klimaforschung zu machen. Damit konnten die Rechner des DKRZ für die sogenannten Konsortialläufe (Consortial Runs) genutzt werden. Bei diesen Läufen wurden CCLM-Simulationen für Europa mit ca. 18 km Gitterauflösung für den Zeitraum 1960-2100 durchgeführt; Antriebsdaten

kamen von ECHAM5 mit verschiedenen Realisierungen der Emissionsszenarios A1B und B1. Diese Daten sind in der CERA-Datenbank allgemein verfügbar; Genauerer ist unter <http://www.mad.zmaw.de/service-support/consortium-model-runs/clm-experiments/> zu finden. Im Jahre 2007 wurden die bis dahin unterschiedlichen Versionen für Wetter und Klima zu einer einheitlichen Version zusammengeführt und der Name COSMO-CLM eingeführt. Im Jahre 2009 wurde CCLM um einen Aerosol/Chemie-Modul erweitert. Die Community arbeitet zusammen mit dem DWD kontinuierlich an der Verbesserung des Modellsystems, die derzeit aktuelle Version ist 4.8. Ein Sonderheft der Meteorologischen Zeitschrift (Band 17, 2008, No. 4) ist CCLM gewidmet.

Wie bereits angedeutet, muß man CCLM eher als Modellsystem denn als Modell betrachten. Kernstück ist natürlich das numerische Regionalmodell CCLM, aber die Qualität der erzielten Ergebnisse hängt in starkem Maß von einer ganzen Reihe von vor- und nachbereitenden Schritten ab, welche zeitlich und logisch genau untereinander abgestimmt sein müssen. Sowohl der Ablauf einer regionalen Klimasimulation mit CCLM als auch das Modell selbst werden hier nur kurz beschrieben, weiterführende Informationen sind auf der bereits genannten CLM-Webseite zu finden. Zunächst erfolgt das sogenannte Präprozessing, welches die Beschaffung und Aufbereitung der globalen Anfangs- und Randdaten (zur Zeit u.a. ECHAM5, HadAM sowie ERA- und NCEP-Reanalysen) für die gewünschte Region und den gewünschten Zeitraum sowie Bereitstellung zeitlich invarianter Felder wie Orographie, Landnutzung, Bodenarten, Land-See-Maske umfasst; die Beschaffung, Überprüfung und Aufbereitung diese Daten erfordert viel Zeit und Sorgfalt. Die Zusammenführung all dieser Daten und die Interpolation auf das CCLM-Gitter erfolgt im Präprozessor int2lm. Zeitlich und logisch überlappt sich mit diesem Schritt das Konfigurieren (Setup) von CCLM; es beinhaltet u.a. Entscheidungen über Lage und Größe des Rechengebiets und die zu verwendenden numerischen und physikalischen Parameter und umfasst z.T. sehr aufwendige Sensitivitätstests. Die Auflösung der globalen Daten liegt meist deutlich über 100 km, während die gewünschte Auflösung der regionalen Simulationen oft deutlich unter 10 km liegt. Die Mehrheit der Modellierer ist der Ansicht, dass Skalensprünge größer als etwa 5 aus numerischen Gründen vermieden werden sollten; daher werden zunächst CCLM Klimasimulationen mit einer Auflösung von etwa 50 km durchgeführt, welche dann zum Antrieb der eigentlich interessierenden hoch aufgelösten Simulationen verwendet werden (sog. Nesting). Um die wesentlichen synoptischen Systeme (z.B. Tiefdruckgebiete) und orographischen Faktoren (z.B. die Alpen) zu erfassen und Randeinflüsse zu minimieren, wird das Rechengebiet dieser ersten Nestingstufe wesentlich größer als das feiner aufgelöste Gebiet gewählt; aus ähnlichen Gründen wird letzteres wiederum deutlich größer als das eigentlich interessierende Gebiet gewählt. Es hat sich z.B. gezeigt, dass für eine zufriedenstellende Modellierung des süddeutschen Raums praktisch der gesamte Alpenraum berücksichtigt werden muß. Abb. 4 zeigt die beiden genesteten Gebiete, welche von uns für solche Simulationen verwendet werden.

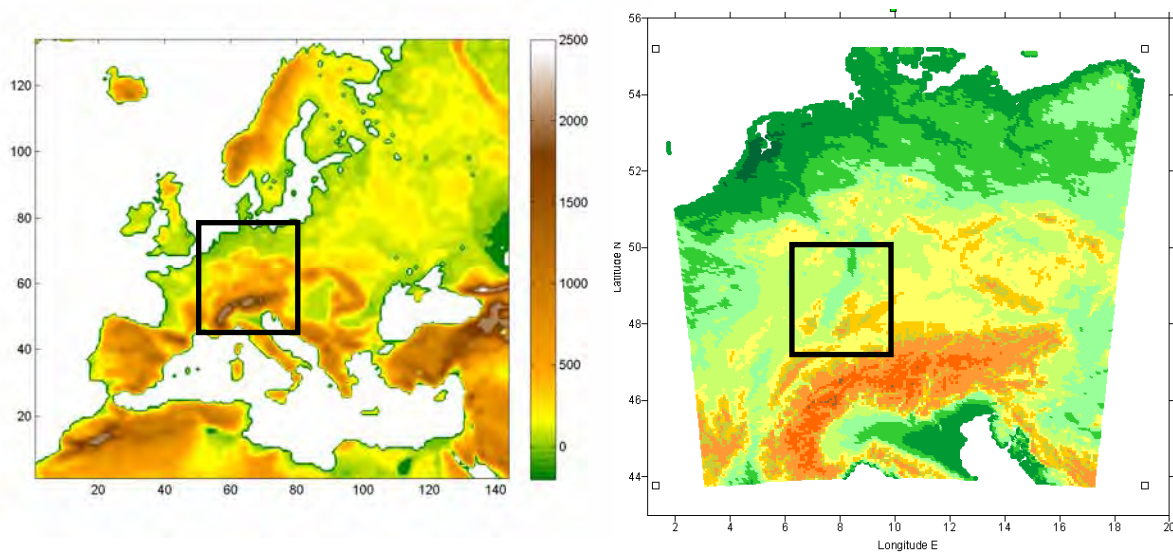


Abb.4: Nesting. Links 50 km Auflösung, rechts 7 km Auflösung.

Während der Rechnungen sind stichprobenartige Plausibilitätskontrollen notwendig. Nach Abschluss der Rechnungen, die, abhängig von der Konfiguration und der Rechnerverfügbarkeit, mehrere Wochen bis Monate in Anspruch nehmen können, erfolgt die abschließende Kontrolle, Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Im Falle von Ensemble-Simulationen (siehe unten) müssen die genannten Schritte entsprechend mehrfach durchgeführt und das Ensemble statistisch ausgewertet und interpretiert werden.

Die CCLM-Ausgabegrößen liegen entweder im grib- oder NetCDF-Format vor. Neben den üblichen Größen Temperatur, Niederschlag, Feuchte, Wind, Strahlung, Energiebilanzen, Bodentemperatur und Bodenfeuchte ist eine Vielzahl weiterer Ausgabegrößen (zum Teil auch als räumlich dreidimensionale Felder) als stündliche Werte verfügbar.

Die wichtigsten Charakteristika des numerischen Modells CCLM werden im folgenden kurz zusammengefasst, Details sind in der Modellbeschreibung auf der schon mehrfach erwähnten CLM-Webseite zu finden. Die physikalische Basis des Modells bilden die prognostischen Erhaltungsgleichungen für Masse, Impuls (kompressible Navier-Stokes-Gleichungen) und Energie sowie die Gasgleichung. Das Modell ist nicht-hydrostatisch; dadurch können hohe Vertikalbeschleunigungen, wie sie z.B. bei steiler Orographie und konvektiven Prozessen auftreten, modelliert werden, so dass im Gegensatz zu hydrostatischen Modellen eine hohe Modellauflösung bis in den 1 km-Bereich und feiner möglich ist. Die Massenerhaltung wird in ungefilterter Form benutzt; dadurch wird eine Aufspaltung der Zeitintegration in schnelle und langsame Prozesse notwendig, was aber durch die bessere Eignung für Parallelrechner sowie Vereinfachungen der Numerik aufgewogen wird. Als Koordinatensystem wird ein horizontal rotiertes sphärisches Koordinatensystem benutzt, dessen Äquator und Nullmeridian im Zentrum des Rechengebiets gelegt werden (siehe Abb. 5). Dadurch kann eine relativ gleichmäßige Horizontalauflösung mit geringer Verzerrung erreicht werden.



Abb. 5: Das rotierte Gitter von CCLM

Es stehen verschiedene Turbulenz- und Konvektionsschemata zur Auswahl. In den neueren Versionen wird der Niederschlag prognostisch berechnet, d.h. die Verfrachtung des Niederschlags während des Fallens wird berücksichtigt, was besonders bei feineren Auflösungen wichtig ist. In CCLM ist standardmäßig das beim DWD entwickelte Mehrschichten-Bodenmodell TERRA-ML eingebaut, der Einbau und Test alternativer Boden-Vegetationsmodelle werden am IMK-TRO (Veg3d) und an der ETH Zürich (Common Land Model CLM) durchgeführt. CCLM ist in Fortran 90 mit MPI als Parallelisierungssoftware programmiert und umfasst ca. 200000 Codezeilen. Neuere Entwicklungen umfassen ein explizites Seenmodell zur besseren Erfassung von Binnenseen sowie die Möglichkeit, synthetische Satellitenbilder zu erzeugen, was für den Vergleich mit Satellitendaten interessant ist; die Kopplung mit Ozeanmodellen ist möglich.

### Wie gut gibt COSMO-CLM die Realität wieder?

Um für Forschung und Anwendung brauchbar zu sein, müssen die Modellergebnisse validiert, d.h. mit der gegenwärtigen Realität verglichen werden. Erst nachdem man dadurch ein gewisses Vertrauen in das Modell gewonnen hat, ist an die Interpretation von Aussagen zur künftigen Entwicklung überhaupt zu denken. Bei genauerem Hinsehen wirft die Validierung aber eine ganze Reihe von Fragen auf, z.B. die, inwieweit Beobachtungsdatensätze die Realität wiedergeben. Man darf nicht vergessen, dass auch Beobachtungsdaten prozessierte Daten sind: abgesehen von der Repräsentativität und Datengeberfehlern werden oder auch nicht Korrekturen angebracht (z.B. Niederschlag) und Punktdaten mit sehr verschiedenen Verfahren in die Fläche interpoliert. Das Resultat ist, dass verschiedene Beobachtungsdatensätze für die gleiche Variable durchaus differieren können. Als Beispiel zeigt Abb. 6 den Jahresgang des mittleren Niederschlags zwischen 1971 und 2000 in Baden-Württemberg für verschiedene oft verwendete Beobachtungsdatensätze. Man erkennt deutliche Unterschiede; der Datensatz mit der größten Auflösung (ERA 40, schwarze Linie) weicht im Sommer am stärksten nach unten ab und illustriert, dass zu grob aufgelöste Daten für Validierungen nicht verwendet werden sollten. Weitere Vergleiche finden sich in Bückle (2008).

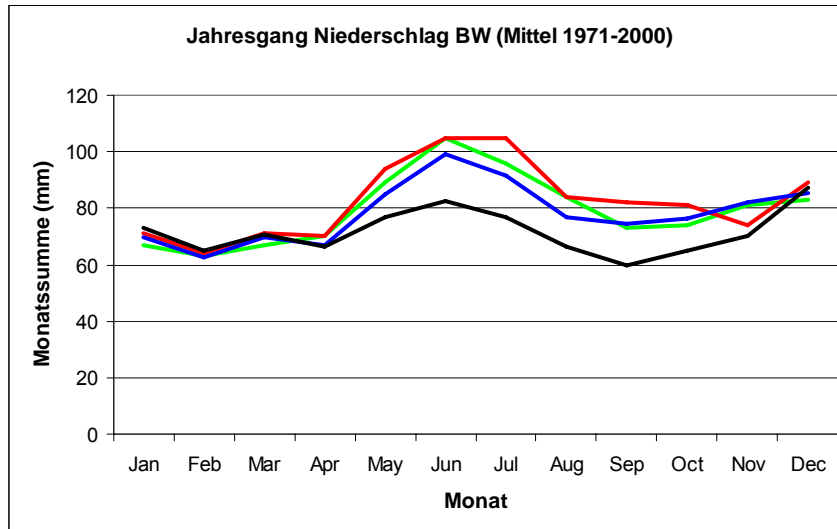


Abb. 6: Mittlerer Jahresgang des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg gemäß verschiedenen Beobachtungsdatensätzen; Erläuterungen siehe Text.

Diesen Unschärfen der Beobachtungsdaten stehen Unschärfen der Modellergebnisse, bedingt durch verschiedene Modellphysik und –numerik, Modellkonfiguration, Antriebsdaten usw. gegenüber. Diese können, abgesehen von offensichtlichen Modell- oder Konfigurationsfehlern, nicht a priori als „besser“ oder „schlechter“ betrachtet werden können. Ein vielversprechender Ausweg aus dieser Schwierigkeit ist, alle „plausiblen“ Daten zu verwenden und in einem Ensemble zu kombinieren. Dem Nachteil eines erheblich höheren Rechenaufwandes stehen wesentliche Vorteile solche Ensemblesimulationen gegenüber: sie liefern wahrscheinlichste Werte und ermöglichen Aussagen zur Unschärfe dieser Werte, außerdem steht eine viel breitere Datenbasis zur Analyse von seltenen (extremen) Ereignissen zur Verfügung, so dass besser abgesicherte Aussagen gemacht werden können. Auf die den Ensembles zugrunde liegenden Konzepte und Methoden soll hier nicht weiter eingegangen werden, Darstellungen sind in Palmer et al. (2005), Collins (2007) und dem ENSEMBLES-Abschlussbericht zu finden:

[http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf).

Als Folgerung aus dem Gesagten müsste also idealerweise ein Ensemble von Modellklimaten mit einem Ensemble von Beobachtungsdatensätzen verglichen werden. Wegen des hohen Aufwandes (und der beschränkten Verfügbarkeit von Beobachtungsensembles) wird dies zurzeit jedoch nur ansatzweise umgesetzt.

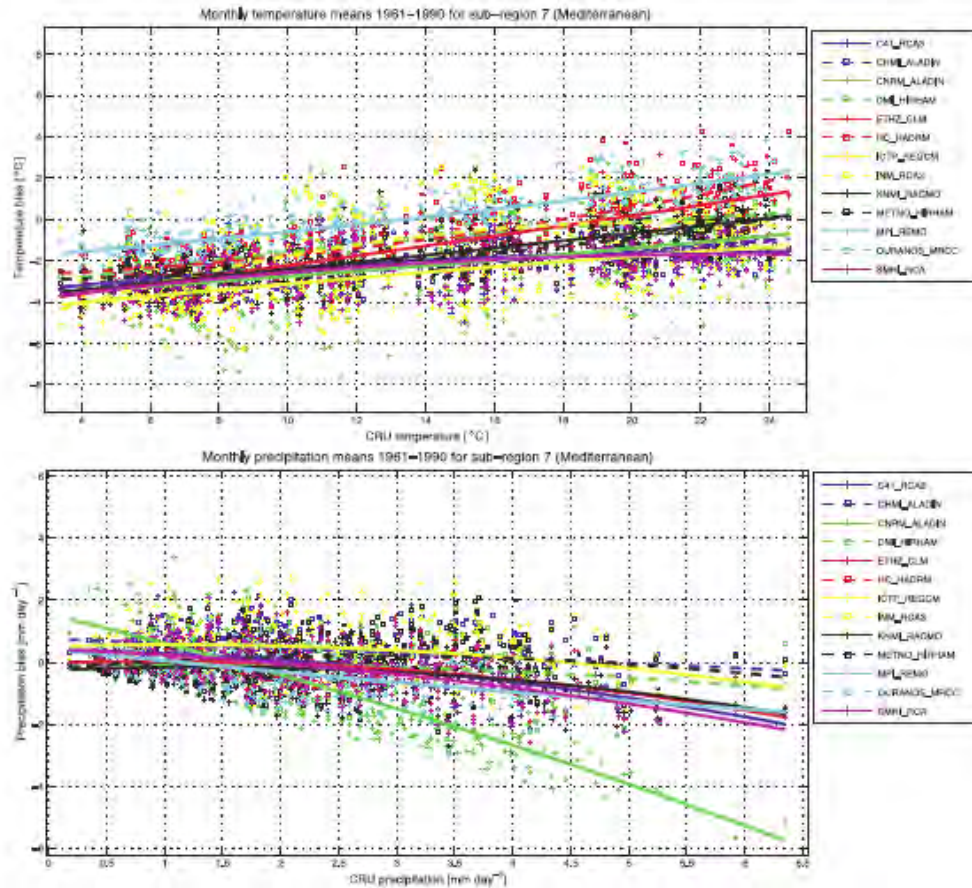


Abb. 7: CCLM im ENSEMBLES-Modellvergleich für den Mittelmeerraum. Die Abbildungen sind dem ENSEMBLES-Abschlussbericht entnommen.

Innerhalb des EU-Projekts ENSEMBLES wurde ein Vergleich verschiedener in Europa verwendeter regionaler Klimamodelle mit je einem Beobachtungsdatensatz systematisch durchgeführt, unter anderem um zu sehen, wie sich Modellstruktur, systematische Modellfehler und die Konfiguration des Modells (Gebietsgröße, Auflösung, Zeitschritte, Parameterwahl, Kataster) auswirken. Abb. 7 zeigt exemplarisch ein Ergebnis aus dem Abschlußbericht. CCLM war hier in einer älteren Version mit größerer Auflösung als ETHZ-CLM (durchgezogene rote Linie) vertreten. Man sieht, dass CCLM im Mittelfeld der Modelle liegt und die Temperatur sowie starke Niederschläge unterschätzt. Details und weitere Vergleiche sind in Jaeger et al. (2008) und Feldmann et al. (2008) zu finden.

Inzwischen existieren neuere Modellversionen und -konfigurationen. Die von uns erstellte und jetzt verwendete CCLM-Konfiguration liefert für den mitteleuropäischen Raum zufriedenstellende Ergebnisse. Abb. 8 zeigt exemplarisch Ergebnisse für drei kleinere Flusseinzugsgebiete im Mittelgebirgs- und voralpinen Raum, nämlich die Einzugsgebiete der Mulde, der Ruhr und der Ammer. Dargestellt ist der Vergleich der mittleren (1971-2000) Jahregänge von 2m-Temperatur (linke Spalte) und Niederschlag (rechte Spalte), jeweils gemittelt über das entsprechende Einzugsgebiet, von Ergebnissen von CCLM-Simulationen (mit einer 50km-Nestingstufe, Zielauflösung war 7km), E-OBS-Beobachtungsdaten. Vergleiche dieser Art mit weiteren Beobachtungsdatensätzen im Sinne des oben Gesagten sind in Arbeit.

Aus Abb. 8 lassen sich eine Reihe interessanter und mit entsprechender Vorsicht verallgemeinerbare Schlüsse ziehen: Temperaturen und Niederschläge werden gut wiedergegeben, wobei die Temperaturen besser erfasst werden. Eine Erhöhung der Auflösung (hier von 50 km auf 7 km) bringt insbesondere beim Niederschlag eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse. Dies lässt sich erwartungsgemäß vor allem im Sommer beobachten, wo kleinskalige Prozesse (Konvektion, Orographieeinflüsse), welche durch die höhere Auflösung besser erfasst werden,



eine dominierende Rolle spielen. Am schlechtesten wird der Niederschlag im Einzugsgebiet der Ammer wiedergegeben; eine Ursache hierfür dürfte die voralpine Orographie mit hohen Gradienten sein, so dass hier eine noch höhere Auflösung Verbesserungen bringen könnte.

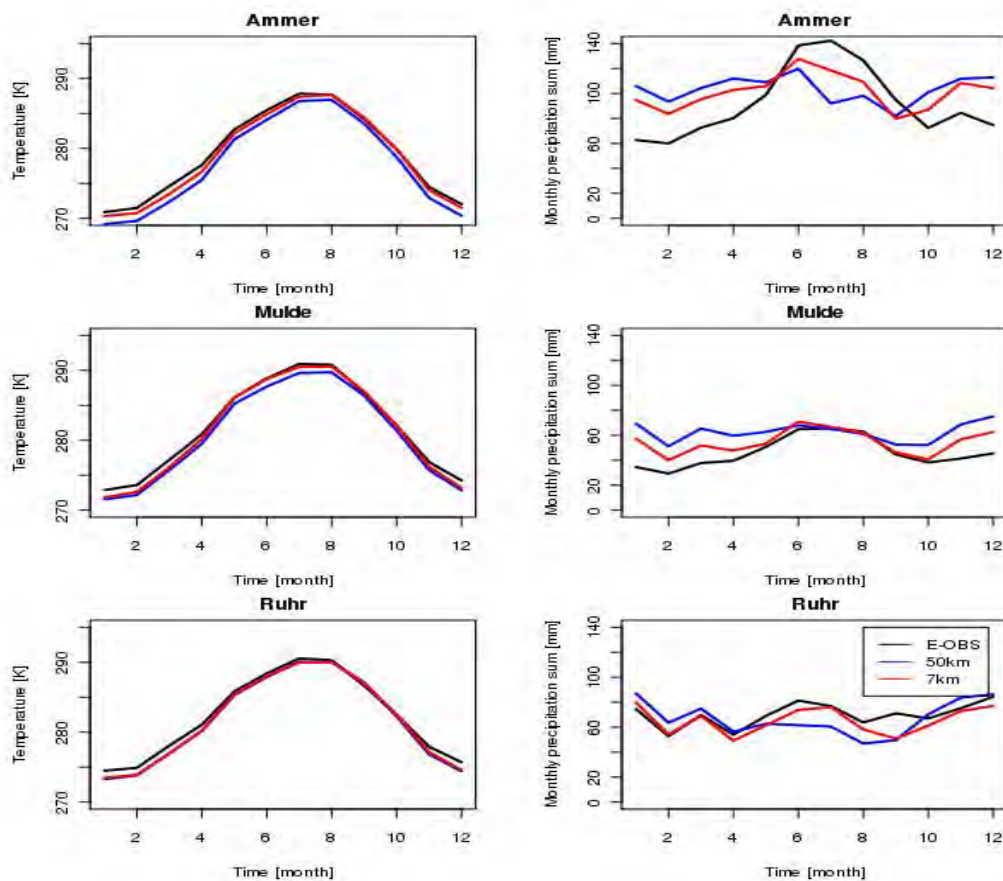


Abb. 8: Mit CCLM berechnete mittlere Jahrgänge (1971-2000) von Temperatur (links) und Niederschlag (rechts) für drei Einzugsgebiete. Blau: 50 km Auflösung, rot: 7 km Auflösung, schwarz: E-OBS Beobachtungsdaten.

### Schlussbemerkung

Dieser Aufsatz sollte nur einen kurzen Überblick sowohl über das CCLM-Modellsystem als auch über Projekte, in denen CCLM verwendet wird, geben.

Aktuelle Informationen hierzu sind auf der bereits genannten CLM-Webseite und der Webseite unseres Instituts (<http://www.imk-tro.kit.edu/>) zu finden.

Die ENSEMBLES-Daten in Abb. 7 wurden innerhalb des „EU FP6 Integrated Project“ ENSEMBLES (Förderkennzeichen 505539) erstellt und dankenswerterweise zur Verfügung gestellt.

## Literatur

- Bückle, J., 2008: Vergleich des Niederschlags aus NCEP- und Era-40-Reanalysen sowie CRU- und VASCLIM-O-Berechnungsdaten für den Bereich 5°-10° E, 47°-50° N im Zeitraum 1971 – 2000. Seminararbeit am Institut für Meteorologie und Klimaforschung der Universität Karlsruhe
- Collins, M., 2007: Ensembles and probabilities: a new era in the prediction of climate change. *Phil.Trans.R.Soc. A* 365, 1957-1970
- Feldmann, H., Früh, B., Schädler, G., Panitz, H.-J., Keuler, K., Jacob, D., Lorenz, P., 2008: Evaluation of the precipitation for South-western Germany from high resolution simulations with regional climate models. *Meteorol. Zeitschr.* 17, No. 4, 455-465
- Früh, B., Feldmann, H., Panitz, H.-J., Schädler, G., 2009: Determination of precipitation return values in complex terrain and their evaluation. Angenommen bei *Journal of Climate*
- Jaeger, E.B., Anders, I., Lüthi, D., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S., 2008: Analysis of ERA40-driven CLM simulations for Europe. *Meteorol. Zeitschr.* 17, No. 4, 349-368.
- Meissner, C., Schädler, G., Panitz, H.J., Feldmann, H., Kottmeier, Ch., 2009: High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. *Meteorol. Zeitschr.* 18, No. 5, 543-557.
- Palmer, T.N., Doblas-Reyes, F.J., Hagedorn, R., Weisheimer, A., 2005: Probabilistic prediction of climate using multi-model ensembles: from basics to applications. *Phil.Trans.R.Soc. B* 360, 1991-1998
- Schädler, G., 1990: Triggering of Atmospheric Circulations by Moisture Inhomogeneities of the Earth's Surface. *Boundary-Layer Meteorology* 51, pp. 1-29.





## Klimamonitoring für KLIWA

Bruno Rudolf, Gabriele Malitz, Annegret Gratzki,  
Deutscher Wetterdienst

### 1 Einleitung

Die Klimaüberwachung ist eine Kernaufgabe des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Darum unterstützt der DWD als Gründungsmitglied das Kooperationsvorhaben KLIWA von Beginn an, zum einen durch seine Mitarbeit im KLIWA-Arbeitskreis und in der Steuerungsgruppe, zum anderen auch wissenschaftlich durch Untersuchungen des Langzeitverhaltens der im Wasserbereich wesentlichen Klimagrößen. Die besonders hohen Anforderungen der Wasserwirtschaft hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung konnten erfüllt werden, indem lange Datenreihen aus den Messnetzen der Länder und des DWD zusammengeführt, aufbereitet und analysiert wurden. Die Untersuchungsergebnisse beziehen sich regional auf hydrologische Einzugsgebiete, jeweils separat für die hydrologischen Halbjahre. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1931 bis 2000 wurden in den „KLIWA-Heften“ sowie erweitert bis zum Jahr 2005 im KLIWA-Monitoringbericht publiziert (siehe [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)). Im Folgenden werden einige Beispiele für das Klimamonitoring des DWD im Allgemeinen unter spezieller Berücksichtigung der KLIWA-Ergebnisse gezeigt.

### 2 Beispiele für das Klimamonitoring im DWD

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), die im nationalen Klimadatenzentrum des DWD gesammelt werden. Eine stark wachsende Bedeutung haben auch die Satelliten- und Radardaten.

Um die Veränderung des Klimas auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen zu erfassen, werden die Klimadaten aufbereitet und ausgewertet. Dazu gehören die Berechnung geeigneter statistischer Kennzahlen, die Generierung entsprechender Klimaüberwachungsprodukte und die Bereitstellung von Referenzwerten zur Beschreibung des mittleren Klimas. Mithilfe der räumlichen Interpolation werden flächendeckende Rasterfeldwerte der Klimagrößen berechnet, die als Grundlage für Gebietsmittelwerte von politisch-administrativen Gebieten und Flusseinzugsgebieten dienen. Auf der Grundlage von Zeitreihen klimarelevanter Kenngrößen sind Veränderungen (z. B. Trends) ableitbar. Die Entwicklung des Klimas wird vor diesem Hintergrund bewertet. Als Klimamonitoring-Produkte entstehen Karten, Diagramme und Tabellen sowie Erläuterungstexte. Sie werden zu regelmäßigen Terminen erstellt. Zudem werden nach besonderen extremen Witterungsereignisse die ursächlichen meteorologischen Bedingungen untersucht und klimatologisch bewertet. Der DWD veröffentlicht einen großen Teil seiner Klimamonitoring-Produkte im Internet sowie im jährlich erscheinenden Klimastatusbericht.

Die Tabelle 1 ist ein Beispiel für regelmäßig erstellte Klimamonitoring-Produkte des DWD. Gezeigt sind hier die Trends von Lufttemperatur und Niederschlags von 1881 bis heute als Mittelwerte für die Bundesländer. Die Lufttemperatur hat überall zugenommen, für ganz Deutschland im Jahresmittel um rund 1°C. Die Ergebnisse zur Niederschlagsveränderung sind vielschichtiger.

Wie aus den Karten zur regionalen Verteilung der Sommer- und Winterniederschläge in Abbildung 1 zu erkennen ist, zeigt die Änderung der Niederschlagshöhe größere jahreszeitliche und regionale Unterschiede mit wechselndem Vorzeichen. Dargestellt ist die prozentuale Änderung



des Niederschlags im 18-jährigen Zeitraum 1991 bis 2008 im Vergleich zum so genannten Normalwertzeitraum 1961 bis 1990. Die Sommer wurden eher trockener, die Winter wurden überall in Deutschland feuchter.

### 3 Beispiele für Ergebnisse in den KLIWA-Heften und im KLIWA-Monitoringbericht

Im Rahmen des Projektes KLIWA wurde in der Abteilung Hydrometeorologie des DWD das Langzeitverhalten mehrerer Klimagrößen untersucht und in der (auch im Internet unter [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de) verfügbaren) Reihe der KLIWA-Hefte publiziert:

- Lufttemperatur - Heft 5 (KLIWA, 2005),
- Schneedecke - Heft 6 (KLIWA, 2005),
- Gebietsniederschlag - Heft 7 (KLIWA, 2005),
- Starkniederschlag - Heft 8 (KLIWA, 2006),
- Sonnenscheindauer, Globalstrahlung, Verdunstung und globale Wasserbilanz - Heft 12 (KLIWA, 2008)

Bereits im KLIWA-Heft 4 anlässlich des 2. KLIWA-Symposiums am 03./04.05.2004 in Würzburg wurden DWD-Beiträge über das Langzeitverhalten der hydrometeorologischen Größen (Günther, 2004) und den Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland (Bartels, 2004) veröffentlicht. Das KLIWA-Heft 10 enthält die Fachvorträge beim 3. KLIWA-Symposium am 25./26.10.2006 in Stuttgart, unter anderem den DWD-Beitrag über Starkniederschläge und Schneeschmelze in Süddeutschland (Malitz, 2007). Als Ergänzung zu den KLIWA-Heften, die überwiegend zwischen 2003 und 2007 erarbeitet wurden und auf bis zum Jahr 2000 reichenden Datenreihen beruhen, wurde 2008 der erste KLIWA-Monitoringbericht publiziert, dem bis zum Jahr 2005 reichende Auswertungen für die wichtigsten Größen (Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss) zugrunde liegen.

Die in der Abbildung 2 gezeigte Karte stammt aus dem KLIWA-Monitoringbericht 2008. Für die Wasserwirtschaft sind die in den einzelnen Flussgebieten beobachteten Klimaänderungen wichtig. Die Daten - sowohl des DWD als auch der Länder - wurden diesem Bedarf entsprechend analysiert. Es zeigt sich die hoch signifikante Zunahme der Temperatur in den hydrologischen Halbjahren im Zeitraum 1931 bis 2005.

Die Grafiken in der Abbildung 3 stellen die zeitliche Entwicklung der Lufttemperatur jeweils für Winter- und Sommerhalbjahr in zwei Regionen dar - links die Region „Neckar“ und rechts die Region „Ostalpen“. Der systematische Anstieg der mittleren Lufttemperatur ist in allen Fällen zu erkennen. In beiden Regionen war der Sommer 1947 der zweitwärmste nach dem Sommer 2003.

Wegen seiner hohen Variabilität muss der Niederschlag differenziert nach unterschiedlichen Kriterien ausgewertet werden. In den beiden Teilen der Abbildung 4 ist die Änderung der Gebietsniederschlagshöhen im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr dargestellt. Während im hydrologischen Sommerhalbjahr der relative Trend der Gebietsniederschlagshöhe in einigen Teilgebieten abgenommen, in anderen zugenommen hat, kam es im hydrologischen Winterhalbjahr generell zur Zunahme der Gebietsniederschlagshöhe - um rund 20% bis rund 30%. Die rote Einfärbung der Kästchen bedeutet, dass die berechneten Trends hoch signifikant sind.

Für die Abbildung 5 wurden unter dem Gesichtspunkt maximaler Starkniederschlag die halbjährlich höchsten täglichen Gebietsniederschläge ausgewertet. Deren Höhe hat im Wesentlichen nur im Winter zugenommen, das aber deutlich und zwar um bis zu 43%.

Auch nach Erscheinen des ersten KLIWA-Monitoringberichts wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, bspw. eine Analyse der Reihen der höchsten Tagesniederschläge je hydrologisches Halbjahr für 37 Stationen im Teilgebiet Oberer Main (1931 bis 2008). Da extrem hohe Tagesniederschläge räumlich eng begrenzt auftreten, verläuft die tendenzielle Entwicklung der höchsten Tageswerte für die einzelnen Stationen sehr unterschiedlich (siehe Abbildung 6). Im hydrologischen Winterhalbjahr sind an 32 Stationen Zunahmen bis 60% zu verzeichnen. Im hydrologischen Sommerhalbjahr stehen den 22 Stationen ohne Abnahme der höchsten täglichen punktuellen Niederschläge immerhin 15 Stationen mit abnehmenden höchsten täglichen punktuellen Niederschlägen gegenüber.

Um diese räumlichen Schwankungen auszufiltern, wurde für jedes Jahr nur der in der Region gemessene absolut höchste Tagesniederschlag für eine weitere Auswertung verwendet. Daraus ergibt sich also eine Zeitreihe aus 78 Einzelwerten, die von unterschiedlichen Stationen stammen (Abbildung 7). Die Einzelwerte dieser Reihe wurden überwiegend im Sommer beobachtet.

Die wesentlichen Ergebnisse hinsichtlich des Niederschlags im KLIWA-Untersuchungsgebiet sind:

- Zunahme der mittleren Niederschlagshöhe im Winter, aber eher indifferente Veränderungen im Sommer.
- Deutliche Zunahme der Häufigkeit von Starkniederschlägen (> 30 mm/d) insbesondere im Winter, und weniger ausgeprägt auch im Sommer.
- Trotz ihrer Zunahme erreichen Häufigkeit und Höhe der Starkniederschläge im Winter (erwartungsgemäß) bisher nicht die Werte, die im Sommer auftreten.
- Stärkere Ausprägung der positiven Trends in den höheren Lagen.
- Bisher keine Steigerung der je Jahr absolut höchsten in der Region örtlich gemessenen Tagesniederschläge.

#### **4 Ausblick für das weitere Klimamonitoring für KLIWA**

Angesichts der globalen Erwärmung und der damit einhergehenden Veränderungen im Verhalten anderer Klimagrößen, beispielsweise Lufttemperatur und Verdunstung, ist eine kontinuierliche Fortführung der Beobachtungen und zeitnahen Analyse der Daten sehr wichtig. Der DWD betreibt die dazu erforderlichen Messnetze, archiviert die Klimadaten und beteiligt sich an zukunftsweisenden Projekten. Neben der weiteren Beteiligung an KLIWA ist dabei bspw. das wasserwirtschaftlich relevante BMVBS-Forschungsprogramm KLIWAS (Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt) zu nennen. Außerdem wird der DWD künftig ein Klimamodell rechnen und anwenden, um damit einen Beitrag zu KLIWAS und zur Deutschen Anpassungsstrategie zu leisten. Die Klimasimulationsmodelle bedürfen einer Validation und Bewertung durch den Vergleich mit Messdaten.

Zum Klimamonitoring bietet das Webportal des DWD zeitnahe, regelmäßige Auswertungen und Darstellungen. Außerdem wird derzeit das Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes aufgebaut. Das CDC unterstützt den Zugriff auf Klimadaten aus Deutschland, aber auch auf Daten mit europäischem und globalem Bezug. Damit insbesondere Nutzer aus Forschung, Lehre und staatlichen Einrichtungen, aber auch aus anderen Bereichen möglichst schnell die gewünschten Daten erhalten, wird der Online-Zugang zu diesen Daten erleichtert. Der Schwerpunkt sind Klimadaten aus der Vergangenheit; das CDC bietet aber auch Ergebnisse aus Szenarienrechnungen und Projektionen in die Zukunft an. In einem zentralen Datenkatalog werden die Daten in standardisierter Form beschrieben, so dass eine Recherche nach be-



liebigen Kriterien möglich ist. Der Datenkatalog liefert Hinweise zum Online-Zugriff auf die Beschreibungen und Daten.

In der Abteilung Hydrometeorologie werden auch weiterhin spezielle Aufgaben des Klimamonitorings wahrgenommen. Das betrifft vor allem die Überwachung der Entwicklung

- des Niederschlagsdargebots und des Schneedeckenverhaltens,
- der konvektiver Stark- und Extremniederschläge,
- der Dauer und räumlichen Ausdehnung lang anhaltender Niederschläge,
- der hydrometeorologischen Bilanzen (auf Bodenniveau korrigierte Niederschlagshöhen abzüglich hydrotopbezogener Verdunstungshöhen).

## 5 Zusammenfassung

Als Gründungsmitglied unterstützt der Deutsche Wetterdienst (DWD) das Vorhaben KLIWA durch Untersuchungen zum Langzeitverhalten der in der Wasserwirtschaft wesentlichen Klimagrößen. Dem Wirkungsbereich entsprechend wurden alle Auswertungen regional für die hydrologischen Einzugsgebiete sowie zeitlich für die hydrologischen Halbjahre vorgenommen. Die besonders hohen Anforderungen der Wasserwirtschaft hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung konnten erfüllt werden, indem lange Datenreihen aus den Messnetzen der Länder und des DWD zusammengeführt, aufbereitet und analysiert wurden. Die Ergebnisse für den Zeitraum 1931 bis 2000 wurden in den KLIWA-Heften sowie erweitert bis zum Jahr 2005 im KLIWA-Monitoringbericht publiziert (siehe [www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)). Ergänzend wurden exemplarische Zeitreihenanalysen durchgeführt.

Dem Klimamonitoring des DWD zufolge haben die Niederschläge im Untersuchungsgebiet von KLIWA im Winter zugenommen. Im Sommer sehen die Veränderungen noch indifferent aus. Größere Tageswerte der Niederschlagshöhe sind häufiger aufgetreten.

Der DWD wird KLIWA auch weiterhin aktiv unterstützen, sowohl im Klimamonitoring als auch bei der Bewertung von Projektionsergebnissen.

## 6 Literatur

- Bartels, H. (2004): Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland. In: KLIWA-Heft 4, S. 73 – 86
- Günther, T. (2004): Langzeitverhalten der hydrometeorologischen Größen. In: KLIWA-Heft 4, S. 37 – 56
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.2.3: Analyse des Langzeitverhaltens von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern", KLIWA-Heft 5, 76 S.
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.4: "Analyse des Langzeitverhaltens verschiedener Schneedeckenparameter in Baden-Württemberg und Bayern", KLIWA-Heft 6, 88 S.
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.2: "Analyse des Langzeitverhaltens verschiedener Schneedeckenparameter in Baden-Württemberg und Bayern", KLIWA-Heft 6, 156 S.
- KLIWA (2006): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.3: "Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse an Hand der Niederschlagszeitreihen (Tageswerte) in Baden-Württemberg und Bayern", KLIWA-Heft 8, 93 S.

KLIWA (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und klimatischer Wasserbilanz in Baden Württemberg und Bayern, KLIWA-Heft 12, 147 S.

KLIWA (2008): Monitoringbericht „Klimawandel in Süddeutschland – Veränderungen der Kenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Hochwasserabfluss“, 24 S.

Malitz, G. (2007): Starkniederschläge und Schneeschmelze in Süddeutschland. In: KLIWA-Heft 10, S. 55 – 69.

Tab. 1: Beispiel für ein regelmäßig erstelltes Klimamonitoring-Produkt des DWD

Land	Temperaturtrend seit 1881 in Grad C / Gesamtzeitraum					Prozentualer Niederschlagstrend seit 1881 bis heute					Land
	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr	
Hamburg	1,5	1,2	1,4	1,6	1,3	14	7	15	32	17	Hamburg
Bremen	1,2	1,0	1,2	1,1	1,0	15	5	20	33	17	Bremen
Berlin	1,2	1,0	0,9	0,9	0,9	9	-3	-4	25	6	Berlin
Schleswig-Holstein	1,2	0,8	1,2	1,2	1,0	13	7	15	30	16	Schleswig-Holstein
Niedersachsen	1,3	1,1	1,3	1,3	1,2	15	-1	17	31	15	Niedersachsen
Nordrhein-Westfalen	1,3	1,1	1,3	1,3	1,2	21	-2	16	26	15	Nordrhein-Westfalen
Rheinland-Pfalz	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2	21	-6	6	26	11	Rheinland-Pfalz
Saarland	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	19	0	10	30	16	Saarland
Baden-Württemberg	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	18	-3	6	30	12	Baden-Württemberg
Hessen	1,2	1,2	1,2	1,2	1,1	22	-4	12	27	14	Hessen
Bayern	1,4	1,2	1,1	1,1	1,1	16	0	11	28	12	Bayern
Mecklenburg-Vorpom.	0,3	0,3	1,0	0,9	0,5	12	-1	2	23	9	Mecklenburg-Vorpom.
Brandenburg	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8	5	-9	-7	21	2	Brandenburg
Sachsen-Anhalt	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	7	-8	-6	21	3	Sachsen-Anhalt
Sachsen	1,2	1,2	1,1	0,8	1,0	-6	-14	-5	14	-5	Sachsen
Thüringen	1,3	1,3	1,3	1,1	1,2	14	-7	5	22	8	Thüringen
Deutschland	1,2	1,0	1,1	1,1	1,0	15	-3	9	26	11	Deutschland

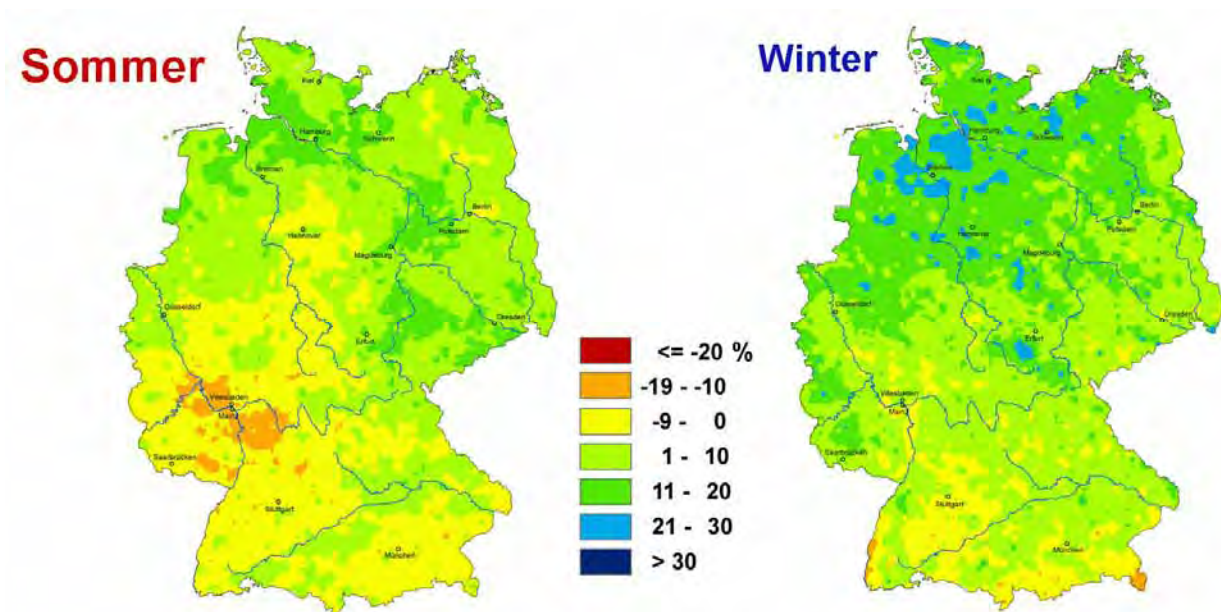


Abb. 1: Prozentuale Änderung des Niederschlags im Zeitraum 1991 bis 2008 zum Vergleich mit dem Zeitraum 1961 bis 1990

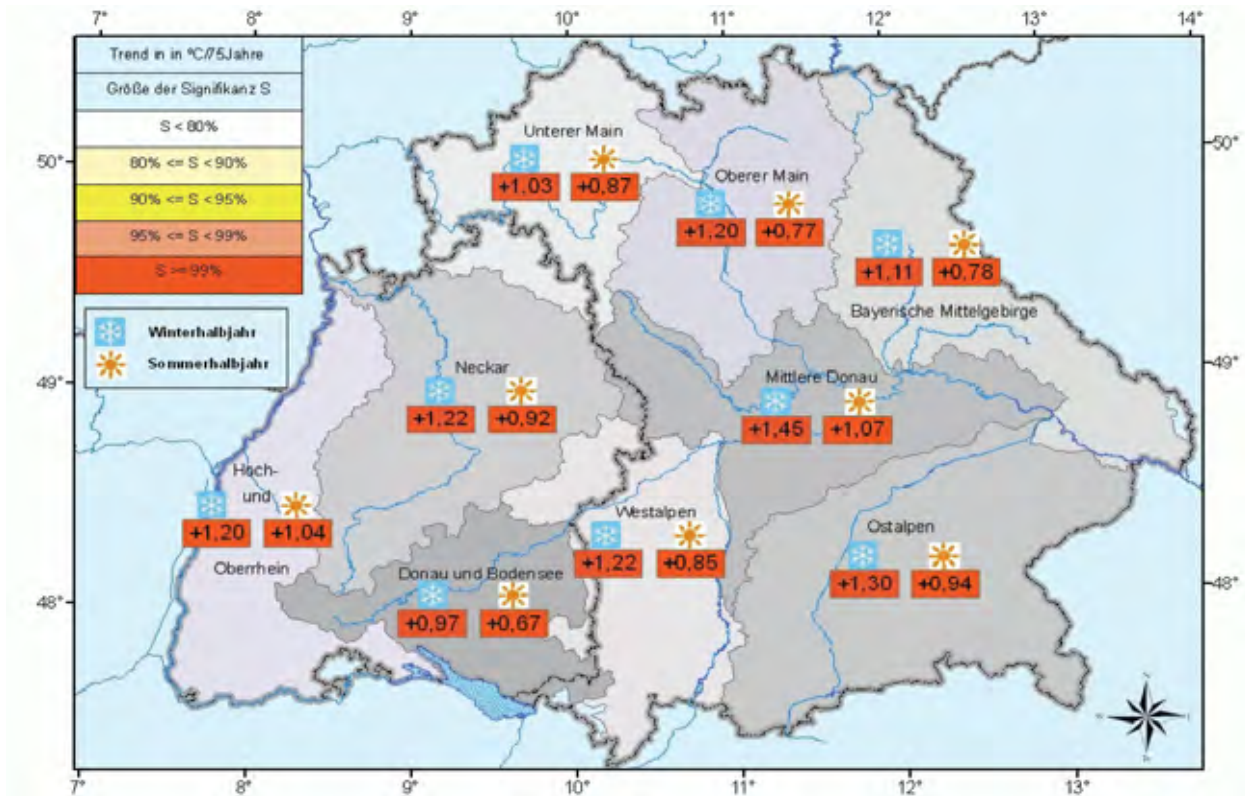


Abb. 2: Entwicklung der mittleren Lufttemperatur in den hydrologischen Halbjahren (Trend im Zeitraum 1931 bis 2005, angegeben in °C/75a)

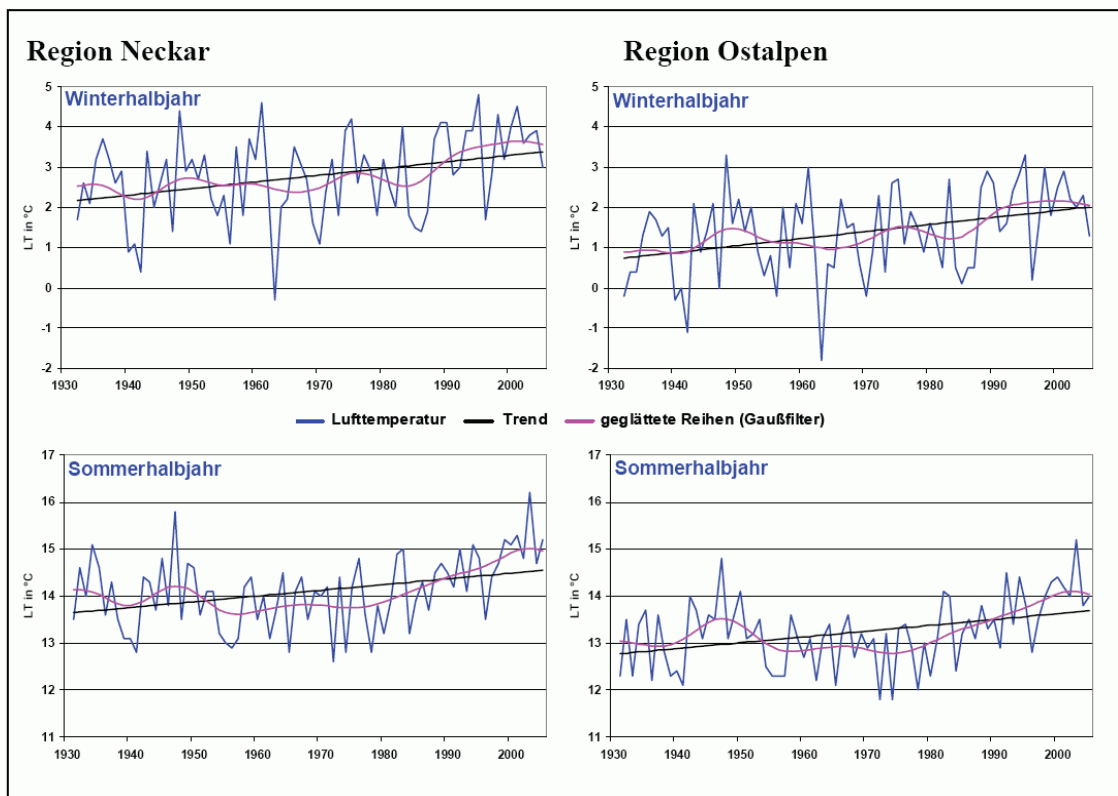


Abb. 3: Zeitreihen und Trends für die Gebietsmitteltemperaturen in den Regionen Neckar und Ostalpen im Zeitraum 1931 bis 2005

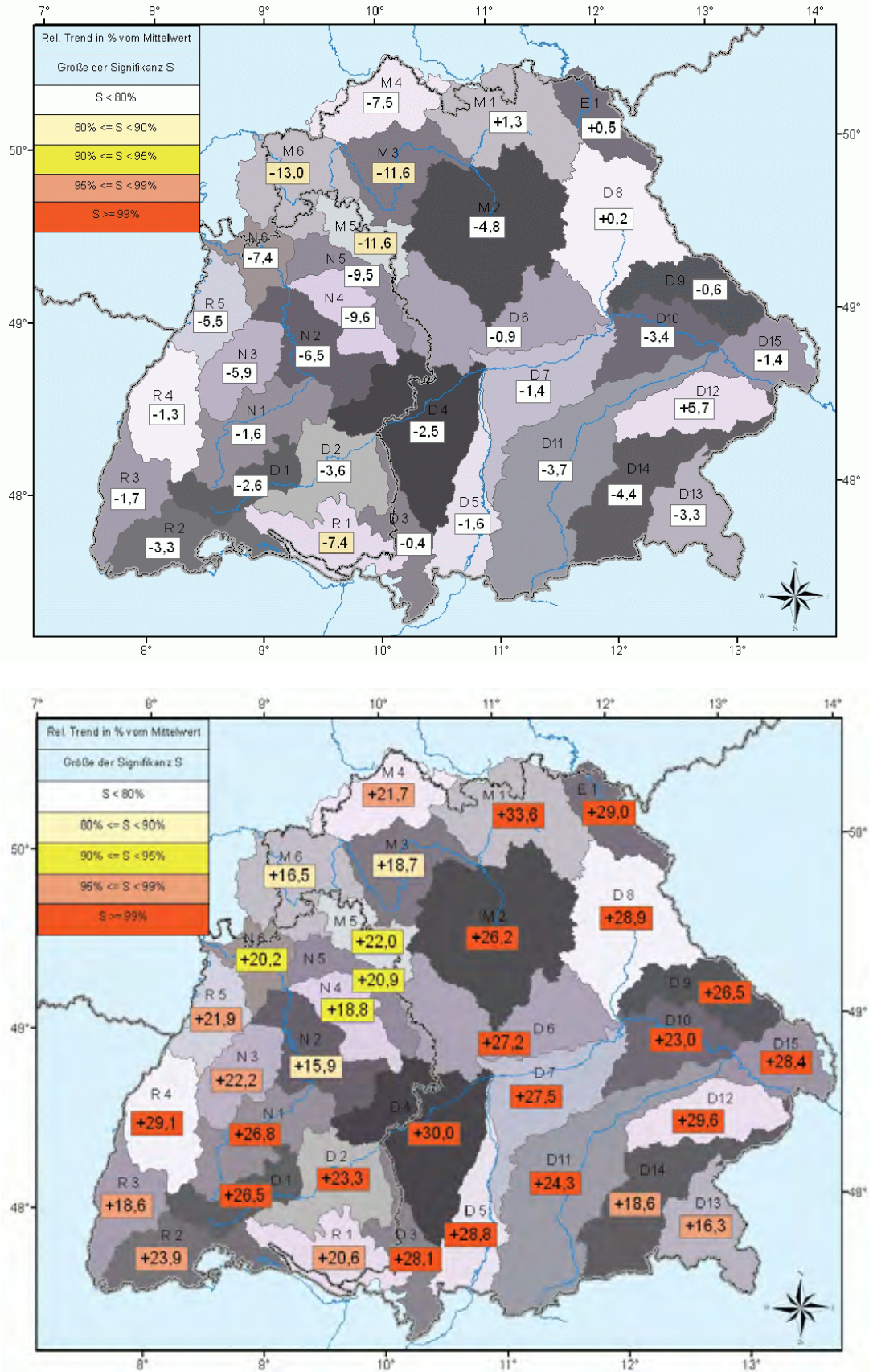


Abb. 4: Relativer Trend der Gebietsniederschlagshöhe (Änderung in Prozent vom Mittelwert für 1931 bis 2005) im hydrologischen Sommerhalbjahr (oben) und im hydrologischen Winterhalbjahr (unten)



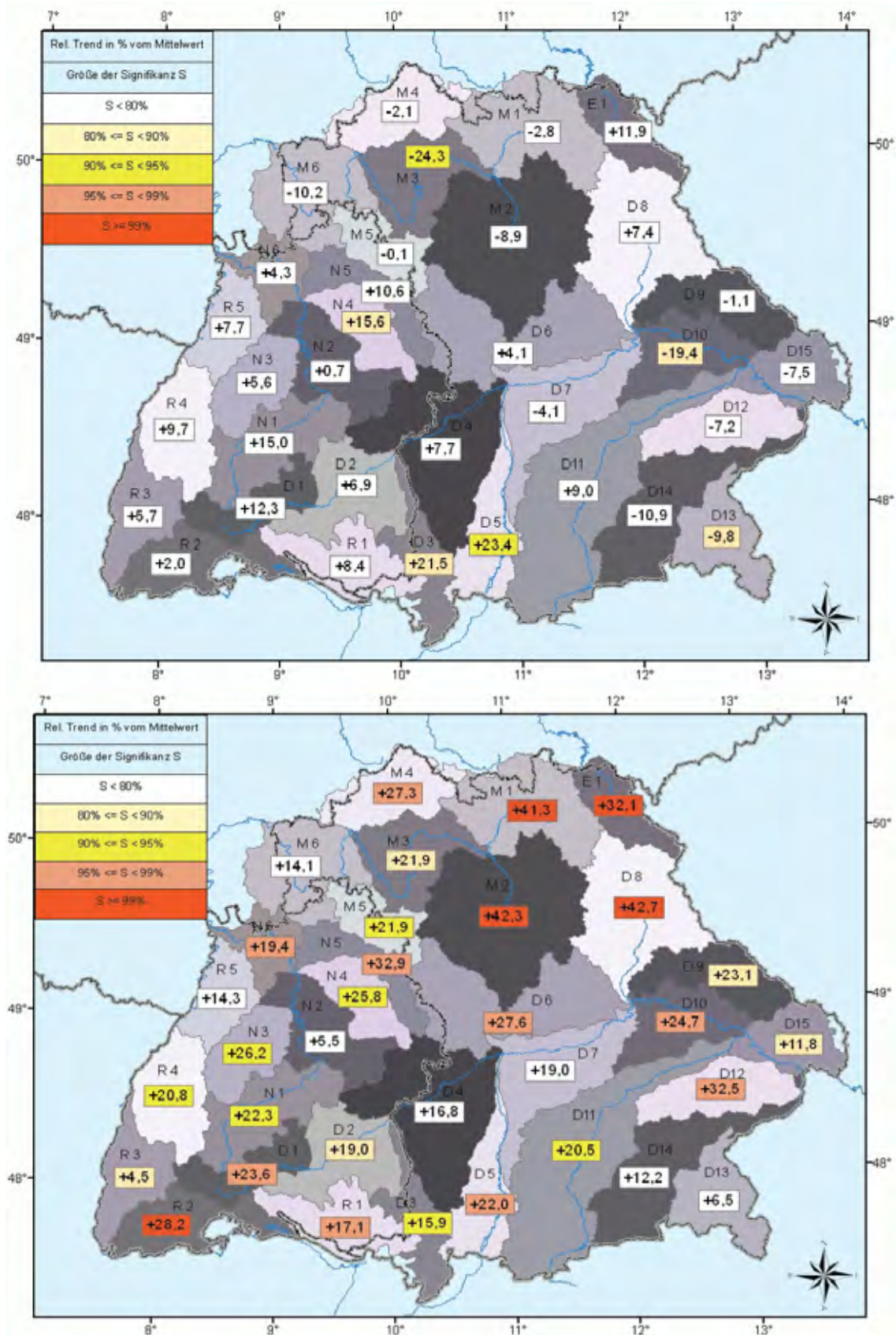


Abb. 5: Änderung der halbjährlich größten Tagesniederschlagshöhen von 1931 bis 2005 (Gebietswerte, relativer Trend in Prozent vom Mittelwert) im hydrologischen Sommerhalbjahr (oben) und im hydrologischen Winterhalbjahr (unten)

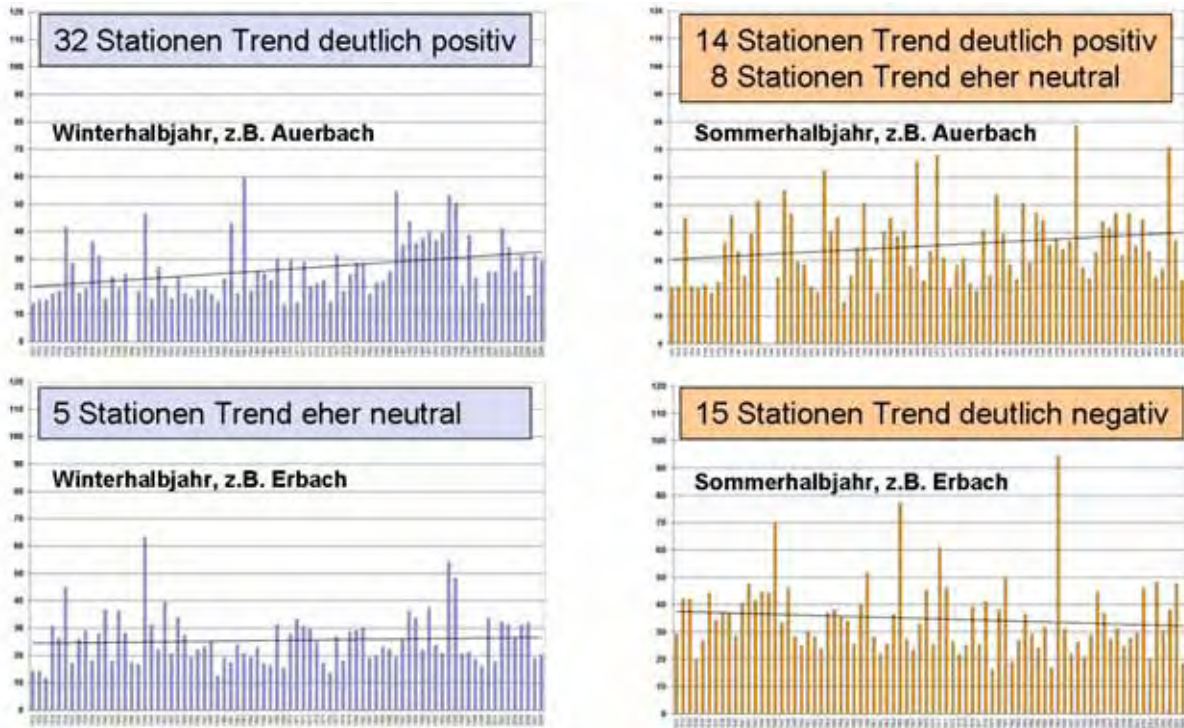


Abb. 6: Zeitreihen und Trends der höchsten Tagesniederschläge (in mm) an ausgewählten Stationen in der Region Oberer Main im Zeitraum 1931 bis 2008

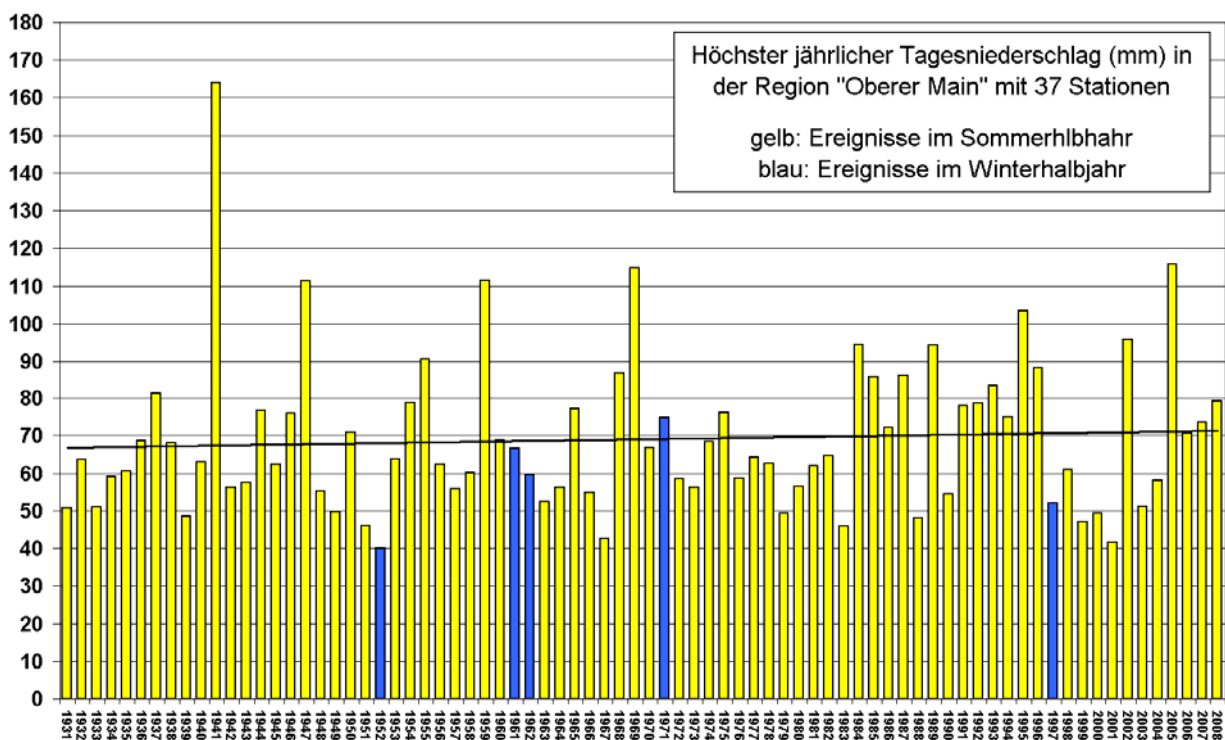


Abb. 7: Zeitreihe und Trend der jährlich in der Region Oberer Main an einer Station gemessenen höchsten Tagesniederschläge (in mm) im Zeitraum 1931 bis 2008



## Langjährige Hochwasserabflüsse in Rheinland-Pfalz

Dieter Prellberg

Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz

### 1 Veranlassung

In der jüngsten Vergangenheit traten in den verschiedenen Flussgebieten Deutschlands und auch in den benachbarten Ländern mehrfach Hochwasserereignisse auf, die erhebliche Schäden hervorgerufen haben. Diese Ereignisse haben insbesondere in der Öffentlichkeit Diskussionen darüber hervorgerufen, ob diese Naturereignisse im Bereich der natürlichen Schwankungen des Klimageschehens liegen oder ob sie als Ergebnis einer bereits eingetretenen Veränderung des Weltklimas (Klimawandel) zu betrachten sind. In diesen Diskussionen fehlen jedoch oft weitgehend die objektiven hydrologischen Zahlen und Fakten. Um diesen Mangel zu beseitigen, wurde 1998 ein fachlicher Rahmen für die Zusammenarbeit der Bundesländer Baden-Württemberg und Bayern sowie des Deutschen Wetterdienstes zum Thema "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA) vereinbart, der die gemeinsame länderübergreifende Bearbeitung ausgewählter Fragestellungen zu diesem Themenbereich umfasst. Im Januar 2007 trat Rheinland-Pfalz als vierter Kooperationspartner dem KLIWA-Vorhaben bei.

Das Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (Abteilung Hydrologie) der Universität Karlsruhe (IWG) hat im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA in verschiedenen Studien das Langzeitverhalten von Hochwasserabflüssen und mittleren Abflüssen an ausgewählten Pegeln mit langen Beobachtungszeitreihen zunächst aus Baden-Württemberg und Bayern untersucht. Bei diesen Untersuchungen wurden folgende Abfluss-Kennwerte, die jeweils aus den vorliegenden Beobachtungszeitreihen abgeleitet wurden, betrachtet:

Hochwasserabfluss HQ:

- monatliche Höchstwerte HQ(m)
- Höchstwerte des Jahres HQ(J) und der beiden Halbjahre HQ(Wi) und HQ(So)
- Häufigkeiten von Hochwasserabflüssen über einem Abfluss-Schwellenwert QS. Die Auswertung der Häufigkeiten erfolgte dabei für das Gesamtjahr und für die beiden Halbjahre (Winter und Sommer)

In Abstimmung mit dem AK KLIWA wurden die o.g. Abfluss-Kennwerte mit folgenden einheitlichen statistischen Methoden bezüglich ihrem Langzeitverhalten ausgewertet:

- Trendanalyse mit linearem Trend und MANN-KENDALL-Test zur Bestimmung der Trendsignifikanz
- Ermittlung und Darstellung des Rückschreitenden Trends
- Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY und Summenlinienanalyse zur Prüfung der Signifikanz einer Trendänderung am Bruchpunkt
- Ermittlung des mittleren Jahresgangs und Beurteilung der zeitlichen Veränderung von jährlichen und halbjährlichen Mittelwerten für definierte Teilzeitreihen

Nach Beitritt des Landes Rheinland-Pfalz als weiterer KLIWA-Kooperationspartner wurde das IWG vom Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz be-



auftragt, die für Baden-Württemberg und Bayern durchgeführten Untersuchungen des Langzeitverhaltens auch für ausgewählte Pegel mit langen Beobachtungszeitreihen aus Rheinland-Pfalz durchzuführen. Ergänzende Untersuchungen wurden darüber hinaus für weitere Pegel vom Landesamt selbst durchgeführt. Die Ergebnisse der statistischen Auswertungen für Hochwasserabflüsse durch das IWG sind nachfolgend dokumentiert.

## 2 Verfahren der statistischen Analyse

Zur Analyse des Langzeitverhaltens der Hochwasserabflüsse HQ in Rheinland-Pfalz wurden ausgewählte Pegel mit langen Beobachtungszeitreihen statistisch ausgewertet (Abbildung 1). Die Datengrundlage bestand dabei aus den Monatshöchstwerte des Abflusses HQ(m) für insgesamt 25 Pegel mit einem Zeitreihenbeginn zwischen den Jahren 1937 und 1986. Das Zeitreihenende lag bei allen Pegeln im Jahr 2006. Für diese Pegelzeitreihen wurden folgende statistische Auswertungen durchgeführt:

- mittlerer Jahresgang der Monatshöchstwerte
- Langzeitverhalten der Jahres- und Halbjahreshöchstwerte
- Langzeitverhalten der Häufigkeit von Hochwasserabflüssen über einem Schwellenwert bezogen auf das Jahr und die beiden Halbjahre

Zur Bewertung des Langzeitverhaltens wurden aus den monatlichen Höchstwerten die zugehörigen Jahres- und Halbjahreswerte abgeleitet. Das Winterhalbjahr umfasst dabei die Monate November bis April und das Sommerhalbjahr die Monate Mai bis Oktober.

Für die Analyse der Häufigkeit von Hochwasserabflüssen wurden aus den Zeitreihen der monatlichen Abflusshöchstwerte pro Jahr die jährliche Anzahl von Überschreitungen von einem Schwellenwert ermittelt. Die Anzahl von Überschreitungen pro Jahr stellt eine neue Zeitreihe dar, die analog zum Langzeitverhalten der Abflüsse ausgewertet wurden. Der Schwellenwert wurde dabei festgelegt durch den Median, der sich für jeden Pegel aus den monatlichen Höchstwerten, getrennt für das Jahr und die beiden Halbjahre, ergibt.

Die Langzeitanalyse basierte auf folgenden Datenkollektiven (Abbildung 2):

- „gesamte Zeitreihen“: Pegelzeitreihen mit unterschiedlichem Beobachtungsbeginn und einheitlichem Beobachtungsende im Jahr 2006. Die Anzahl der Beobachtungsjahre variiert dabei zwischen 22 und 70 Jahren.
- „Zeitreihen ab 1963“: Pegelzeitreihen mit einer einheitlichen Beobachtungszeitspanne von 1963 bis 2006 (44 Jahre). Dieses Datenkollektiv umfasst 20 Pegelzeitreihen.

Die Trenduntersuchungen beinhalten eine lineare Trendschätzung nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate und die Ermittlung des wahrscheinlichen Zeitpunkts einer Trendänderung über die Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITNEY. Die Signifikanz der Trends wurde bewertet mit dem Test nach MANN-KENDALL und die Signifikanz der Trendänderung am wahrscheinlichen Bruchpunkt über das Summenlinienverfahren sowie nach dem Student-Test (Abbildung 3).

### 3 Ergebnis der statistischen Analyse

#### 3.1 Hochwasserabflüsse

Die Analyse der Hochwasserabflüsse umfasst die Auswertung des Jahresgangs der monatlichen Abflusshöchstwerte bezüglich der mittleren jährlichen und halbjährlichen Hochwasserabflüsse sowie die Zeitreihen der jährlichen und halbjährlichen Hochwasserabflüsse mit folgenden Ergebnissen (Abbildung 4):

- Die Beurteilung der monatlichen Abflusshöchstwerte beruht jeweils auf drei unterschiedlichen Zeitreihen. Bezogen auf das Trennungsjahr 1974, das bei der Auswertung der wahrscheinlichen Bruchpunkte am häufigsten vertreten war, zeigt der mittlere Jahresgang bei der Auswertung des Jahres und der beiden Halbjahre nach 1974 bei der überwiegenden Mehrzahl der Pegel deutliche Zunahmen. Abnahmen zeigen lediglich wenige Pegel.
- Im Langzeitverhalten zeigen die Zeitreihen der jährlichen und halbjährlichen Hochwasserereignisse bei beiden Datenkollektiven, dass bei der Mehrzahl der Pegel kein signifikanter Trend vorhanden ist. Bei der Auswertung des Jahres und des Winterhalbjahres ergeben sich beim Kollektiv „Zeitreihen ab 1963“ bei ca. 20% bis 25% der Pegel signifikante Trends und im Sommerhalbjahr bei ca. 10% der Pegel. Wahrscheinliche Trends sind jedoch nur bei sehr wenigen Pegeln vorhanden. Beim Kollektiv „gesamte Zeitreihen“ sind die Trendsignifikanzen etwas höher. Hier ergeben sich, bedingt auch durch Einbeziehung der sehr kurzen Beobachtungszeitreihen, wahrscheinliche Trends bei ca. 20% bis 24% der Pegel im Gesamtjahr und im Winterhalbjahr sowie 16% der Pegel im Sommerhalbjahr. Sehr wahrscheinliche Trends sind ebenfalls nur an wenigen Pegel vorhanden.
- Die Trendsteigungen zeigen bei beiden Datenkollektiven bei der Auswertung des Jahres und des Winterhalbjahres mehrheitlich steigende Hochwasserabflüsse. Diese Tendenz verstärkt sich bei den Pegel mit signifikantem Trend. Im Sommerhalbjahr dagegen überwiegt die Tendenz zu einer Abnahme der Hochwasserabflüsse.
- Der wahrscheinliche Bruchpunkt für eine mögliche Änderung des Trendverhaltens liegt bei beiden Kollektiven bei der Auswertung des Jahres und des Winterhalbjahres am häufigsten zwischen dem Jahr 1975 und 1980. Im Sommerhalbjahr liegt er dagegen vorwiegend zwischen dem Jahren von 1985 bis 1990.
- Die Trendänderung an diesen wahrscheinlichen Bruchpunkten sind im Mittel über alle ausgewerteten Datenkollektiv bei ca. 60% nicht signifikant. Wahrscheinliche und sehr wahrscheinliche Veränderungen ergeben sich beim Kollektiv „gesamte Zeitreihen“ bei ca. 40% der Pegel und beim Kollektiv „Zeitreihen ab 1963“ bei ca. 25%-30% der Pegel.
- Die Langzeitanalyse der Hochwasserabflüsse ergibt somit, dass bei den Höchstwerten des Jahres und des Winterhalbjahres eine Tendenz zu Abflusszunahmen und im Sommerhalbjahr zu Abflussabnahmen vorhanden ist.

#### 3.2 Häufigkeit von Hochwasserabflüssen

Zur Analyse der Häufigkeit von Hochwasserabflüssen wurden die Zeitreihen der jährlichen und halbjährlichen Anzahl von Überschreitung eines vorgegebenen Schwellenwerts ermittelt und bezüglich dem Langzeitverhalten statistisch ausgewertet. Die wesentlichen Ergebnisse sind:



- Die Zeitreihen der jährlichen und halbjährlichen Häufigkeiten von Hochwasserereignissen zeigen sowohl bei der Auswertung des Jahres als auch der beiden Halbjahre, dass die überwiegende Mehrzahl der Pegel (80%) keinen signifikanten Trend aufweist. Nur im Sommerhalbjahr beim Kollektiv „gesamte Zeitreihen“ geht der Anteil der Pegel ohne signifikanten Trend auf 64% zurück. Wahrscheinliche und sehr wahrscheinliche Trends sind nur an einzelnen Pegeln vorhanden.
- Die Trendsteigungen zeigen bei beiden Datenkollektiven bei der Auswertung des Jahres und des Winterhalbjahres ohne Berücksichtigung der Trendsignifikanz verstärkt steigende Veränderungen. Im Sommerhalbjahr ist eine verstärkte Tendenz zu fallenden Veränderungen vorhanden. Beurteilt man nur die Pegel mit einer Trendsignifikanz ( $\alpha \geq 80\%$ ), so ist die Verteilung der Pegel mit fallenden und steigenden Veränderungen recht ausgeglichen.
- Der Zeitpunkt des wahrscheinlichen Bruchpunkts zeigt für beide Datenkollektive sehr vergleichbare Ergebnisse. Im Winterhalbjahr liegt der wahrscheinliche Bruchpunkt am häufigsten in den Jahren zwischen 1975 und 1980. Bei der Auswertung des Jahres ist dieser Zeitraum ebenfalls am häufigsten vertreten. Dabei zeigt sich jedoch eine gewisse zeitliche Verschiebung in die Jahre zwischen 1985 und 1990. Im Sommerhalbjahr liegt der wahrscheinliche Bruchpunkt, insbesondere beim Kollektiv „Zeitreihen ab 1963“, vorwiegend in den Jahren zwischen 1985 und 1990. Die Trendänderungen an den wahrscheinlichen Bruchpunkten sind jedoch an allen Pegeln nicht signifikant.
- Die Langzeitanalyse der **Häufigkeit** von Hochwasserabflüsse ergibt somit, dass wie auch bei den **Höchstwerten** des Jahres und des Winterhalbjahres eine ansteigende Tendenz und im Sommerhalbjahr eine abnehmende Tendenz vorhanden ist.

#### 4 Zusammenfassung

Wird die Häufigkeit aller Hochwasserereignisse größer als MHQ für die Zeitreihe ab Ende der 1970er Jahre mit den vorhergehenden verglichen, hat sich die Häufigkeit um rd. 25% erhöht. Dieses häufigere Auftreten spiegelt die im selben Zeitraum verstärkte Häufigkeit von zyklonalen Westwetterlagen wieder. Diese Wetterlagen, verbunden mit höheren Niederschlägen, sind auch dafür verantwortlich, dass sich die mittleren Hochwasserabflüsse seit Ende der 1970er Jahre auf einem höheren Niveau bewegen. Gegenüber dem vorhergehenden Zeitraum liegt die Erhöhung in einer Größenordnung von 20%.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Fließgewässer in Rheinland-Pfalz im Bereich der Hochwasserabflüsse noch keine signifikante, auf den Klimawandel hinweisende Tendenz zur Veränderung des Abflussverhaltens zeigen. Wird davon ausgegangen, dass der Klimawandel bis zum Jahr 2050 zu einer Abflussverschärfung in einer Größenordnung bis 15% führen würde – wie im Rahmen des Projektes KLIWA projiziert –, würden die Wiederholungszeitspannen der extremen Hochwasser bis auf die Hälfte ihres heutigen Wertes reduziert. Wird im Bereich der kleineren, für die Siedlungswasserwirtschaft bedeutsamen Hochwasserereignisse eine Verschärfung um 50% unterstellt, würden die Wiederholungszeitspannen um den Faktor 5 reduziert. Aus den vorhandenen Daten und auf Grund der Untersuchungen können aber für Rheinland-Pfalz noch keine Werte als sogenannte Klimafaktoren abgeleitet werden, mit denen bisher verwendete Bemessungswerte zusätzlich korrigiert werden müssten.

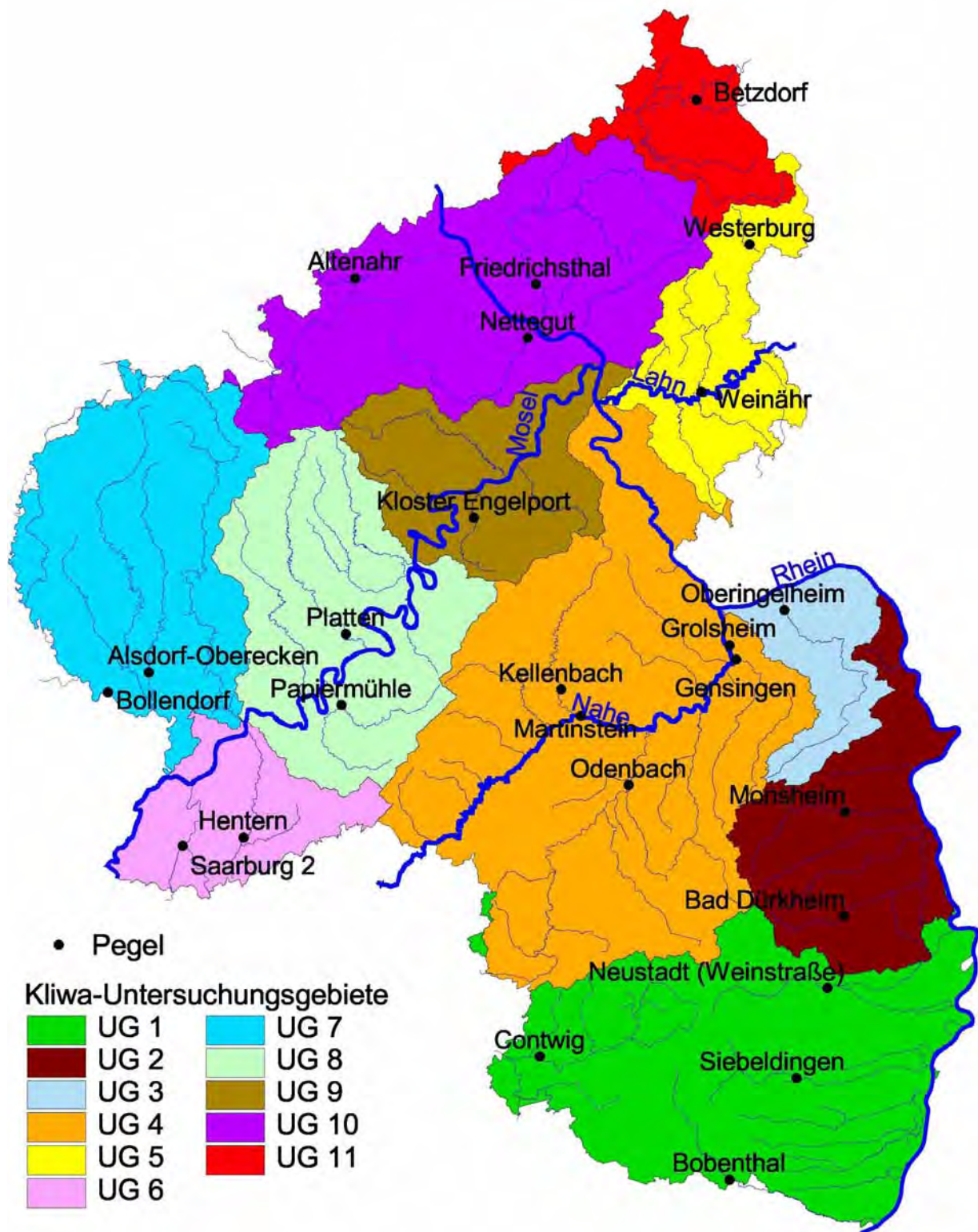


Abb. 1: Lage der untersuchten Pegel



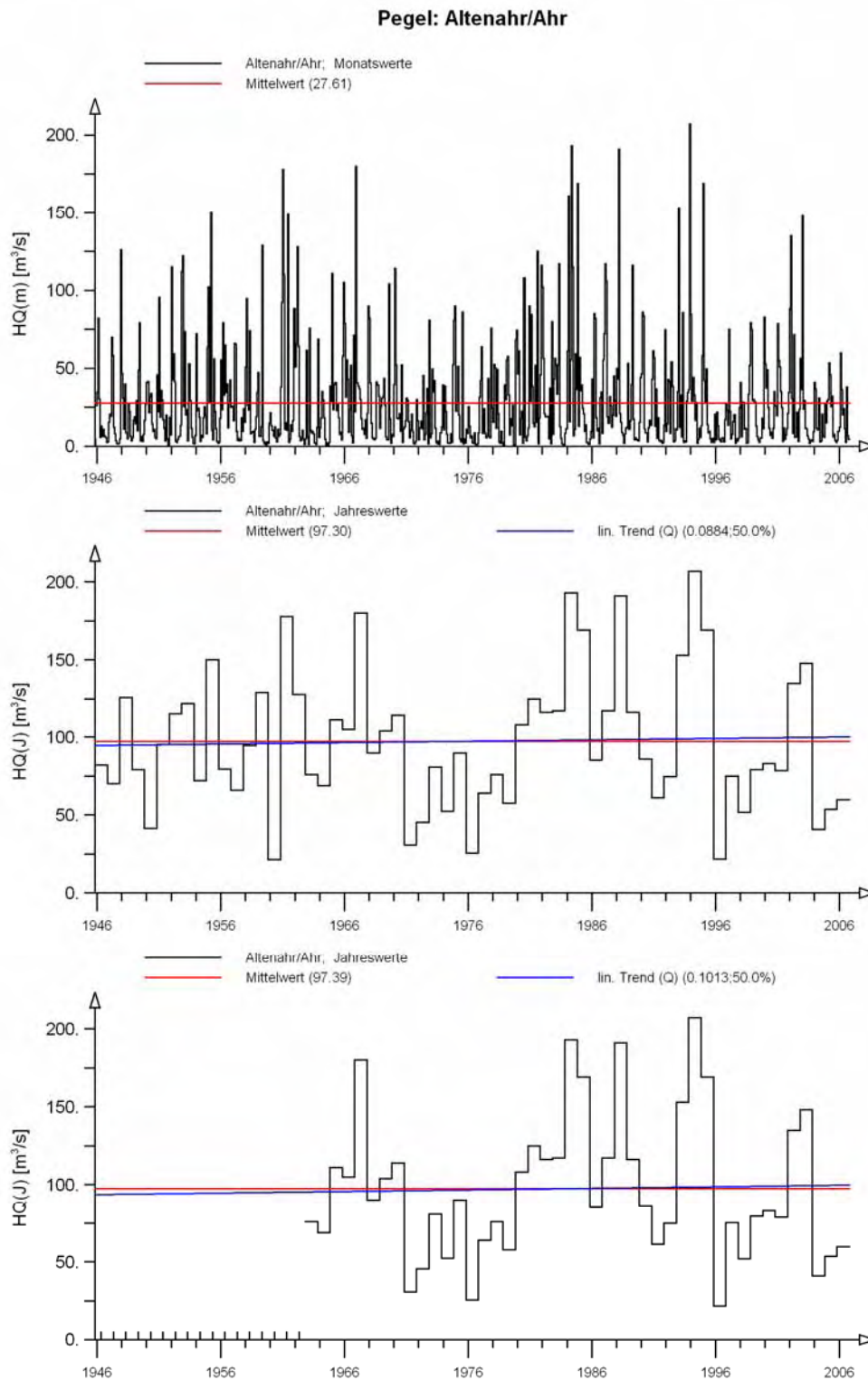
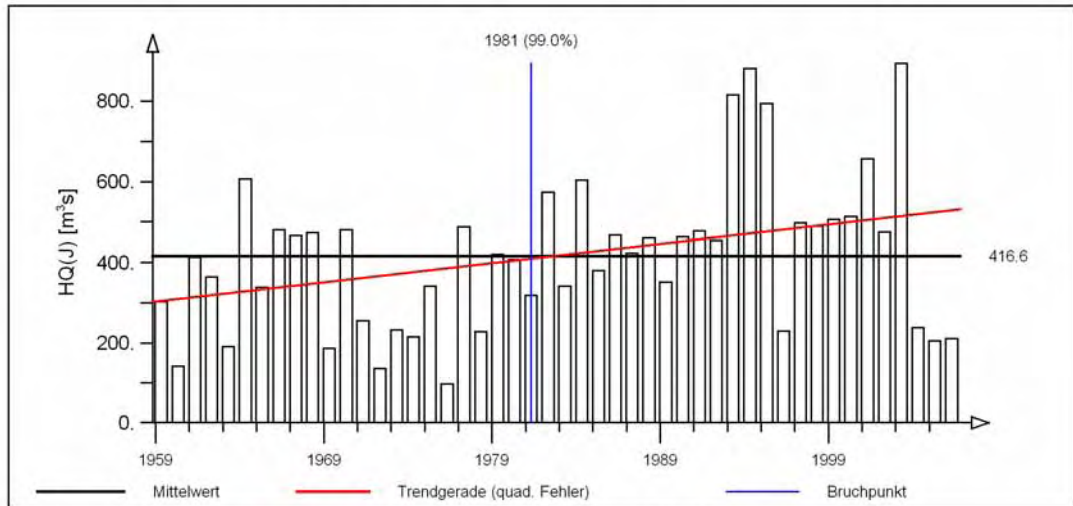


Abb. 2: Datenkollektive für die statistische Auswertung der monatlichen und jährlichen Hochwasserabflüsse am Beispiel des Pegels Altenahr/Ahr (oben: monatliche Höchstabflüsse HQ(m) über die vorhandene Beobachtungszeitreihe - Mitte: abgeleitete Höchstabflüsse HQ(J) des Jahres für die Gesamtzeitspanne – unten: abgeleitete Höchstabflüsse HQ(J) des Jahres für verkürzte einheitliche Zeitspanne ab 1963)

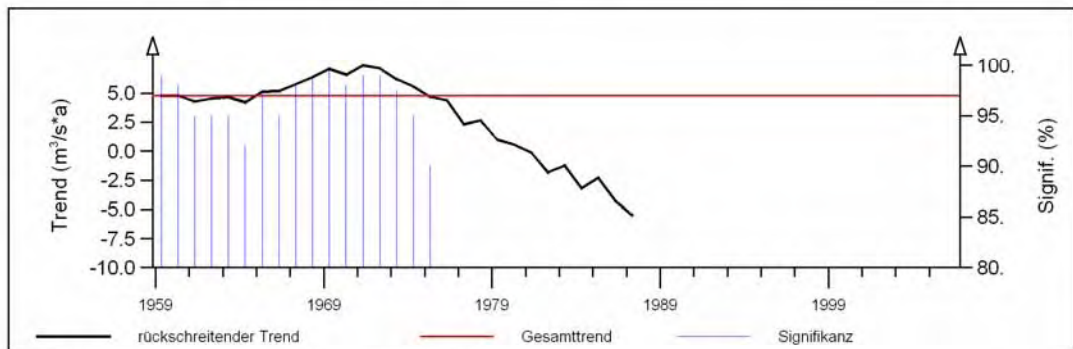
## Pegel Bollendorf 2/Sauer

(Pegel-Nr. 26200505)

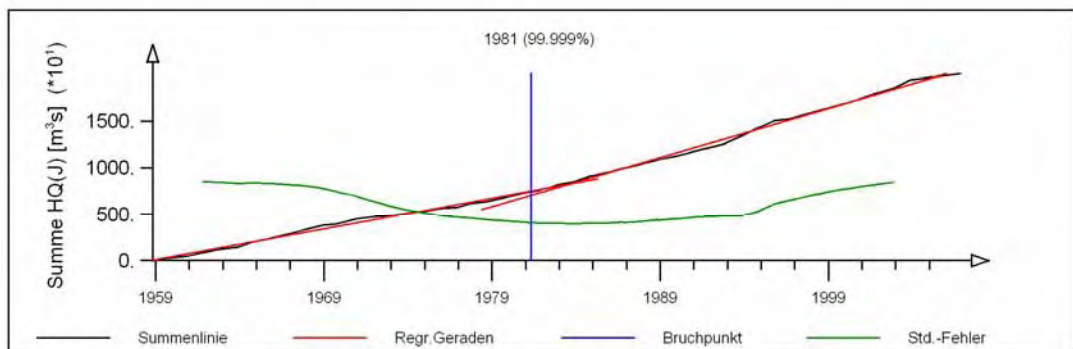
### Jährliche Höchstabflüsse HQ(J) 1959-2006 (hydrologisches Jahr)



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend:  $4.765 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{a}$   
 (Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 99%)



Rückschreitender Trend mit Signifikanz nach Mann-Kendall



Signifikanz des Bruchpunkts nach dem Summenlinienverfahren  
 und Verlauf der Summe des Standardfehlers

Abb. 3: Darstellung der Analyse des Langzeitverhaltens der jährlichen Höchstwerte HQ(J) am Pegel Bollendorf/Sauer (Rückschreitender Trend – mittlere Darstellung – aus 20 Jahren )

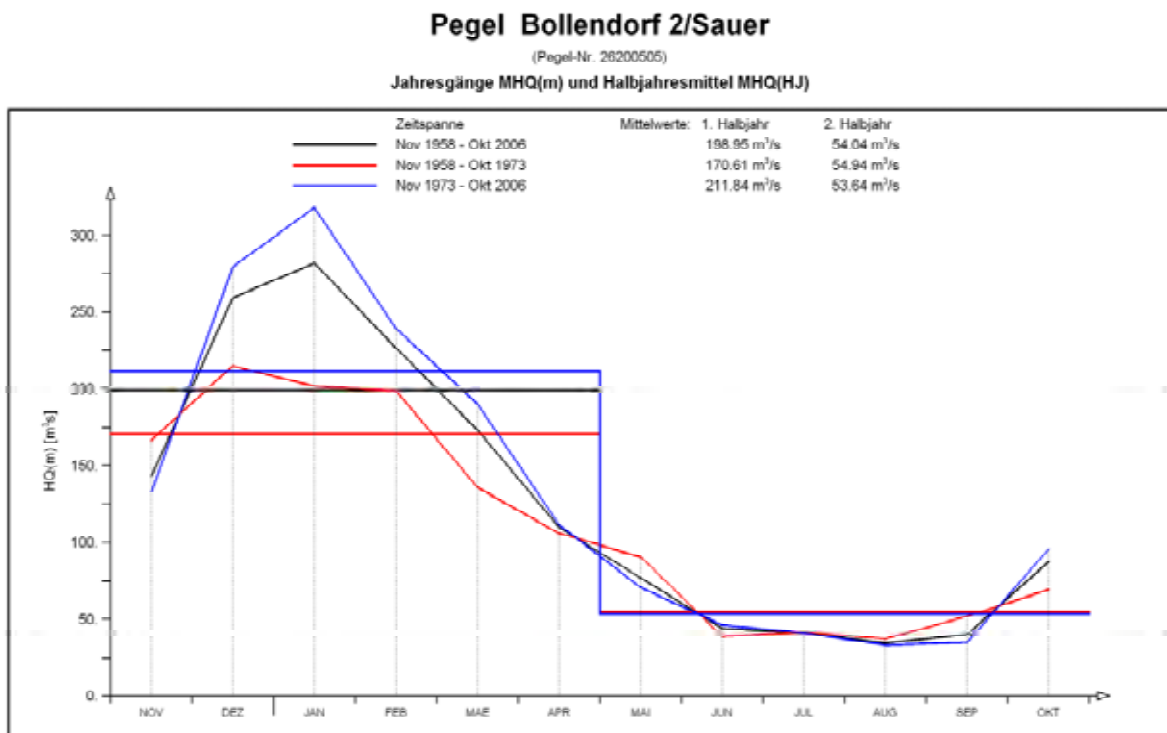


Abb. 4: Darstellung der Analyse des Jahresgangs: monatliche Höchstwerte HQ(m) und mittlerer halbjährlicher Hochwasserabfluss MHQ(HJ) für drei unterschiedliche Zeitspannen am Pegel Bollendorf/Sauer

## Großwetterlagen und hydrometeorologische Extreme

Hans J. Caspary  
Hochschule für Technik Stuttgart

### 1 Einleitung

Für zahlreiche Gewässer Südwestdeutschlands ist seit Mitte der siebziger Jahre regional eine starke Häufung von Hochwasserereignissen zu beobachten. Die Hochwasser des Februar 1980, Februar 1990, Dezember 1993, Januar 1995, Februar 1997, Oktober 1998 und März 2002 verursachten dabei Milliarden Schäden. Zudem traten im Zeitraum 1990 - 2009 zahlreiche extreme Winterstürme auf, die sehr hohe volkswirtschaftliche Schäden verursachten. Der nachfolgende Beitrag zeigt, dass sowohl die Extremniederschläge, die Hochwasser und die Winterstürme durch die gleichen großräumigen atmosphärischen Zirkulationsmuster, sogenannten Großwetterlagen, verursacht wurden.

Als ein anderes hydrometeorologisches Extrem traten in West- und Mitteleuropa in den Sommern der letzten Jahren ausgeprägte Trocken- und Niedrigwasserperioden mit extremen Hitzewellen auf. Jüngste Beispiele hierfür waren die Hitzewellen im Juni und August 2003 sowie im Juli 2006.

Im vorliegenden Beitrag wird untersucht, welche speziellen Großwetterlagen die historischen hydrometeorologischen Extreme verursacht haben und wie sich diese Großwetterlagen im Beobachtungszeitraum 1881 – 2009 systematisch verändert haben. Der Beitrag stellt hinsichtlich der Winterhochwasser und Winterstürme eine Aktualisierung von Caspary (2004) dar. Weiterhin werden die Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis diskutiert und erste Maßnahmen zur Anpassung an den fortschreitenden anthropogenen Klimawandel vorgestellt.

### 2 Großwetterlagen und extreme Winterhochwasser und Winterstürme in Südwestdeutschland

Extreme Hochwasser treten für größere Einzugsgebiete in den Mittelgebirgsregionen Südwestdeutschlands vornehmlich während der Wintermonate Dezember bis Februar auf. Sie werden in erster Linie durch das Niederschlagsverhalten von Westwetterlagen und hier insbesondere der Großwetterlage "Westlage zyklonal (Wz)" verursacht. Diese Wetterlage ist zudem für zahlreiche extreme Winterstürme verantwortlich.

#### 2.1 Großwetterlagen Europas

Atmosphärische Zirkulationsmuster wurden erstmals von *Baur et al. (1944)* für Mitteleuropa in sogenannte "Großwetterlagen Europas" klassifiziert. Sie beschreiben das atmosphärische Strömungsverhalten über dem Nordatlantik und Europa in einem Fenster über der Nordhalbkugel von Grönland bis zum Ural (40° westlicher bis 60° östlicher Länge) und vom Nordpol bis zur Sahara (30° bis 90° Grad nördlicher Breite). Eine Großwetterlage (GWL) wird definiert als die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas, während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleich bleiben. Merkmale bestimmter GWL sind die geographische Lage der Steuerungszentren (Hoch- und Tiefdruckgebiete) und die Lage und Erstreckung von Frontalzonen. Zudem werden zyklonale und antizyklonale Verhältnisse unterschieden. Auf diese Weise wurden für Europa 29 verschiedene GWL definiert, die in *Hess und Brezowsky (1969)* detailliert beschrieben und katalogisiert sind. 1993 wurde der Katalog von *Gerstengarbe und Werner (1993)* nochmals bis 1992 aktualisiert. Die Großwetterlagen Europas liegen für den langen Zeitraum von 1881 bis heute als Tageswerte vor und werden auch weiterhin vom Deutschen Wetterdienst (DWD) klassifiziert. Ab dem Jahr 2002 stellt der DWD die Großwetterlagen zusammen mit weiteren detaillier-



ten Informationen über Witterung, Bodenluftdruckkarten, 500hPa Höhenkarten, Anomaliekarten der Lufttemperatur und des Niederschlages im Internet zur Verfügung.

## 2.2 Instationarität der Großwetterlage "Westlage zyklonal" im Winter

Eine umfangreiche Zeitreihenanalyse der Großwetterlagen Europas wurde bereits von *Bárdossy und Caspary (1990)* für den Zeitraum 1881 bis 1989 durchgeführt. Bezüglich der Auswirkungen auf eine mögliche Hochwassergefährdung resultierte hieraus als wichtigstes Ergebnis, dass die Häufigkeiten zonaler Zirkulationen für die zusammengefassten Wintermonate Dezember und Januar einen drastischen Anstieg in den beiden letzten Jahrzehnten aufweisen. Zu den zonalen Zirkulationen gehören die vier Großwetterlagen „Westlage antizyklonal“ (Wa), „Westlage zyklonal“ (Wz), „südliche Westlage (Ws)“ und „winkelförmige Westlage“ (Ww). Die aus hydrologischer Sicht mit Abstand bedeutendste Wetterlage ist die "Westlage zyklonal" (Wz). Abb. 1 zeigt die Bodenluftdruckkarte der Wz-Lage des Zeitraumes 08.-24.12.1993. Die äußerst ergiebigen Niederschläge dieser 17 Tage ohne Unterbrechung andauernden Wz-Wetterlage haben an zahlreichen Gewässern Südwestdeutschlands das extreme „Weihnachts-hochwasser 1993“ verursacht. Aus **Abb. 1** ist die für Wz typische Lage eines Hochdruckgebietes im Bereich der Azoren (Azorenhoch) und eines steuernden Zentraltiefs nördlich von 60°N (Islandtief) ersichtlich. Dabei liegen der Nordatlantik und das europäische Nordmeer im Bereich tiefen Luftdruckes. Durch die Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete wird eine großräumige, nahezu Breitengradparallele Westströmung vom Atlantik nach Mitteleuropa verursacht. Die Witterung ist häufig bestimmt durch den raschen Durchzug von Fronten und langandauernde, sehr ergiebige Niederschläge. Nähere Informationen zum Dezemberhochwasser 1993 sind in *BfG (1994)* und *LfU Baden-Württemberg (1994)* enthalten.

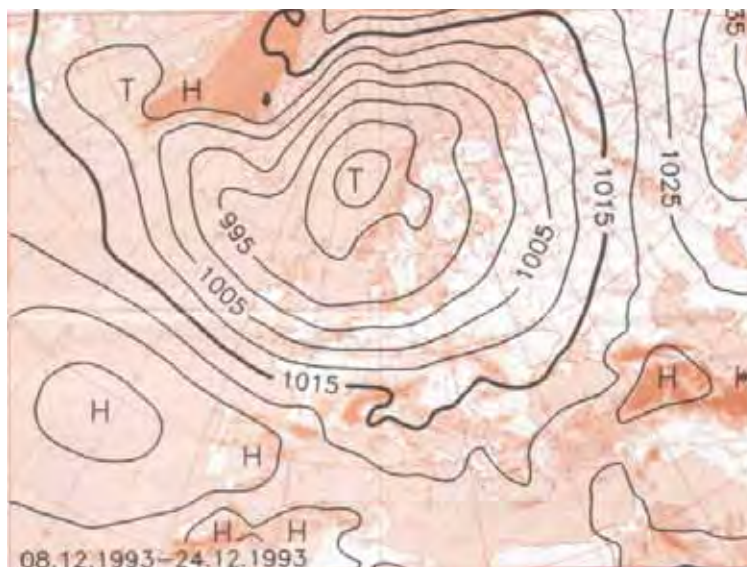


Abb. 1: Bodenluftdruckkarte der „Westlage zyklonal“ (Wz) für den Zeitraum 08.-24.12.1993, nach DWD, 1994.

**Abb. 2** zeigt die Zeitreihen der Häufigkeiten und der maximalen Dauer ( $T_{\max}$ ) zusammenhängender Perioden der GWL „Westlage zyklonal“ (Wz) für die Winter (Dez.-Feb.) des Zeitraumes 1881/82-2008/09. Beide Abbildungen enthalten neben der Trendgeraden auch das gleitende Mittel über 11 Jahre als Ausgleichskurve. Beide Zeitreihen weisen signifikant ansteigende Trends auf. Mit Hilfe nichtparametrischer Tests nach *Mann-Whitney (Pettitt, 1979)* kann für beide Zeitreihen ein übereinstimmender Bruchpunkt im Jahr 1981 berechnet werden, der sowohl für die Häufigkeiten als auch für die maximale Dauern  $T_{\max}$  auf dem 99%-Niveau statistisch signifikant ist.

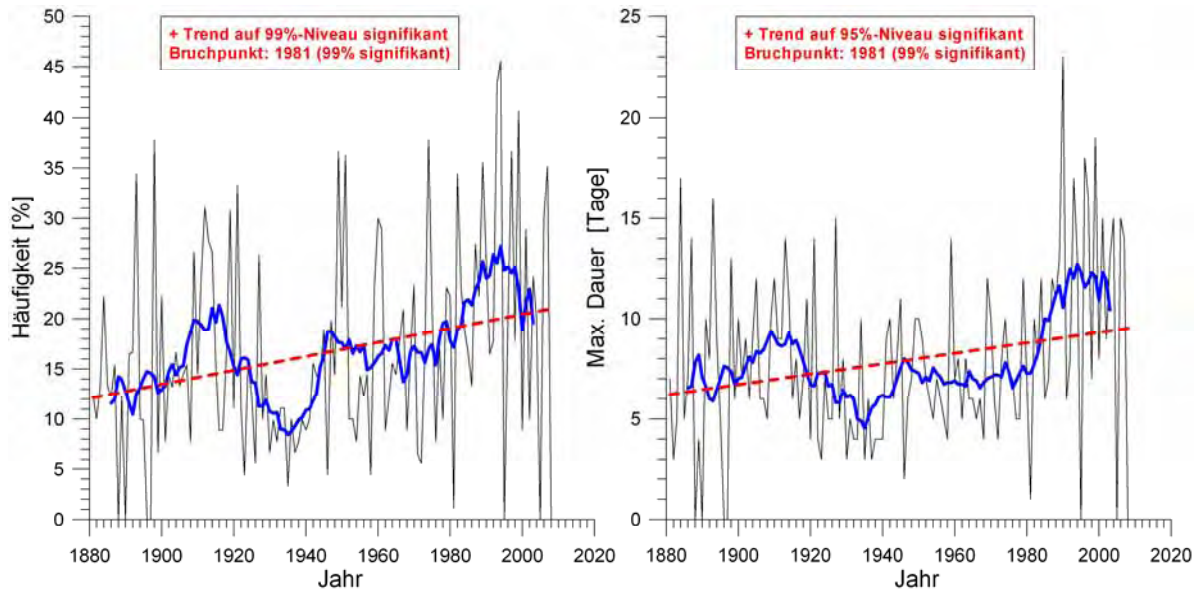


Abb. 2: „Westlage zyklonal“ (Wz) für die Winter (Dez.-Feb.) des Zeitraumes 1881/82-2008/09. Linke Abbildung: Häufigkeiten  $f$  [%], rechte Abbildung: max. Dauer  $T_{\max}$  zusammenhängender Wz-Perioden [Tage]. Ausgleichskurven: Trendgerade und gleitendes Mittel über 11 Jahre.

Der Bruchpunkt einer Zeitreihe ist der Zeitpunkt, der die Zeitreihe in zwei statistisch unterschiedliche Mengen aufteilt. Die Mittelwerte beider Parameter haben im Zeitraum nach dem Bruchpunkt im Vergleich zum Zeitpunkt vor dem Bruchpunkt um mehr als 50% zugenommen. Dies gilt auch für die Variabilität, die gemessen als Standardabweichung seit dem Bruchpunkt im Winter 1981/82 für die Häufigkeiten um 45% und für  $T_{\max}$  um 63% zugenommen hat. Bei den Ausgleichskurven der gleitenden Mittelwerte fällt auf, dass diese ca. Mitte der 90iger Jahre des letzten Jahrhunderts ein Maximum aufweisen und seither leicht rückläufig sind. Insbesondere die maximalen Dauern zusammenhängender Wz-Perioden im Winter zeigen in den letzten 20 Jahren einen im Vergleich zur Vergangenheit deutlichen Anstieg der Variabilität. Diese kommt teilweise durch das Auftreten extrem zonaler Winter (1993/94, 1994/95 und 1999/2000) und von Wintern mit fast völligem Fehlen zonaler Großwetterlagen (1995/96, 2005/06 und 2008/09) zustande.

Für die Entstehung von Hochwasser in größeren Einzugsgebieten sind ergiebige Niederschläge infolge langandauernder Wz-Lagen maßgebend. In **Abb. 3** sind statt der Zeitreihen die maximale Dauer zusammenhängender Wz-Lagen ( $T_{\max}$ ) als Funktion der Häufigkeit ( $f$ ) für alle Winter des Zeitraumes 1881/82-2008/09 in einem Scatterplot aufgetragen, wobei die Winter vor dem Bruchpunkt (1881/82-1981/82) mit Dreiecksymbolen und die Winter nach dem Bruchpunkt (1982/83-2008/09) mit quadratischen Symbolen dargestellt sind. Die obere rechte, grau hinterlegte Ecke von **Abb. 3** zeigt Winter, die sowohl eine große Häufigkeit an Wz-Lagen ( $f \geq 30\%$ ) als auch lange zusammenhängende Wz-Perioden ( $T_{\max} \geq 13$  Tage) aufweisen. Es wird eine getrennte Analyse für die beiden Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt durchgeführt. Während in den 101 Jahren des Zeitraumes 1881/82-1981/82 nur 3 Winter im grau hinterlegten „kritischen“ Sektor lagen, entfallen 7 der letzten 27 Winter und damit 25,9% auf den Zeitraum nach dem Bruchpunkt (1982/83-2008/09).

Hieraus folgt, dass **die Wahrscheinlichkeit einen niederschlagsreichen, milden Winter im „kritischen“ Sektor ( $T_{\max} \geq 13$  Tage  $\cap$   $f \geq 30\%$ ) zu erhalten bereits heute im Vergleich zu dem Zeitraum vor dem Bruchpunkt um mehr als den Faktor 8 angestiegen ist!**

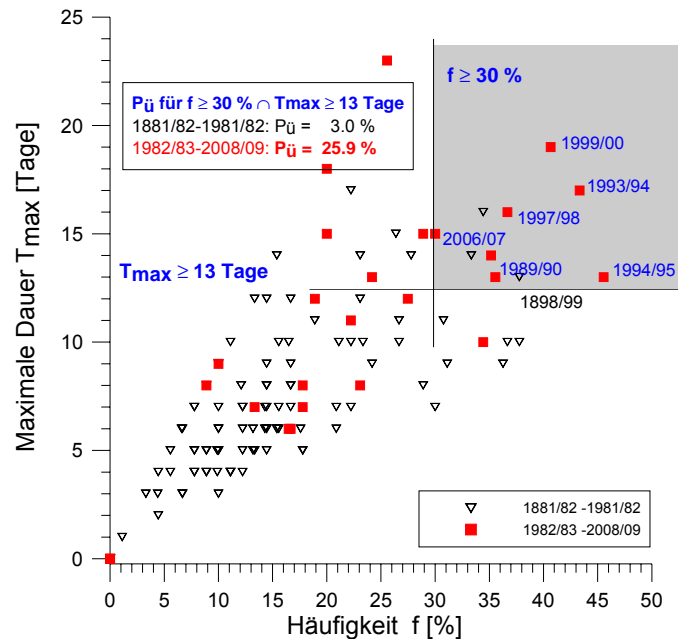


Abb. 3: Max. Dauer  $T_{max}$  zusammenhängender Wz-Perioden als Funktion der Häufigkeit  $f$  [%] für die Winter (Dez.-Feb.) der Zeiträume 1881/82-1981/82 und 1982/83-2008/09 mit „kritischem“ Sektor ( $T_{max} \geq 13$  Tage  $\cap$   $f \geq 30\%$ ).

### 2.3 Zonale Wetterlagen als Auslöser extremer Hochwasser in Südwestdeutschland

Um die für das Auftreten von Hochwasser verantwortlichen und damit "kritischen" Großwetterlagen herauszufinden, wurde in (Caspary, 2003) aus den Messreihen ausgewählter Pegel Baden-Württembergs jeweils eine Rangliste mit den größten HQ-Werten ermittelt. Diesen wurden die jeweils auslösenden Großwetterlagen zugeordnet. Hieraus folgte, dass nahezu alle großen Hochwasser an den untersuchten Pegeln durch die GWL "Westlage zyklonal" (Wz) ausgelöst wurden. In wenigen Fällen ist auch eine Kombination von Wz mit den Wetterlagen „südliche Westlage“ (Ws), „winkelförmige Westlage“ (wW) und „Nordwestlage zyklonal“ (NWz) maßgebend. In fast allen Fällen handelt es sich um lang andauernde (6-23 Tage) Wz-Perioden im Zeitraum Oktober bis März, wobei ein klarer Schwerpunkt auf den Winter (Dez.-Feb.) entfällt. Für die Hochwasserbildung an größeren Gewässern Baden-Württembergs muss die „Westlage zyklonal“ somit als äußerst „kritische“ Wetterlage angesehen werden.

Stellvertretend für die Einzugsgebiete, die von extremen Winterhochwassern besonders stark betroffen waren, werden im Folgenden die maximalen Jahresabflüsse von 4 Gewässern Südwestdeutschlands einer Analyse unterzogen. **Abb. 4** zeigt die Lage der Gewässer und Pegel. Das Einzugsgebiet des Pegels Pforzheim hat eine Einzugsgebietsfläche von 1 477 km<sup>2</sup>. Die Bodennutzung setzt sich aus zirka 60% Waldfläche, zirka 30% landwirtschaftlicher Nutzfläche und ca. 8% Siedlungsfläche zusammen. Die Donau hat am Pegel Beuron eine Einzugsgebietsfläche von 1 320 km<sup>2</sup> mit einem Siedlungsanteil von ca. 5%. Bedingt durch die geringen Anteile der Siedlungsflächen ist somit der versiegelte Anteil an diesen beiden Pegel-einzugsgebieten sehr gering, womit die Urbanisierung und damit eine zunehmende Versiegelung im Einzugsgebiet als Ursache für die Extremhochwasser dieser Untersuchungsgebiete ausgeschlossen werden kann. **Abb. 5** zeigt die Jahresmaxima des Abflusses, die sogenannten HQ-Werte, an den betrachteten Pegeln der vier Flüsse für die zur Verfügung stehenden Messzeiträume zusammen mit je einer Trendgeraden und einer Ausgleichskurve in Form des gleitenden Mittels über 11 Jahre.

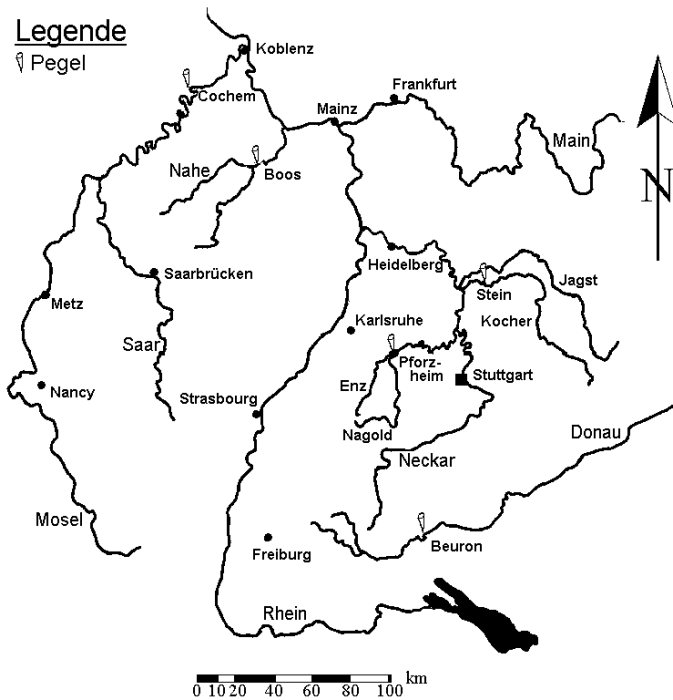


Abb. 4: Südwestdeutschland mit den untersuchten Gewässern Donau, Enz, Kocher, Nahe und Mosel.

Auffallend ist, dass alle vier Ausgleichskurven seit Mitte der siebziger Jahre einen deutlichen Anstieg aufweisen. Dies gilt eingeschränkt selbst für die Mosel, bei der die Messreihe bis zum Jahr 1816 zurückreicht. Mit Hilfe nichtparametrischer Tests (*Pettitt, 1979*) wurden die maximalen Jahresabflüsse (HQ-Werte) einer Bruchpunktanalyse unterzogen. Für die maximalen Jahresabflüsse der Donau liegt der Bruchpunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.7% im Jahr 1977, für die Messreihe des Pegels Pforzheim/Enz mit 96.2% im Jahr 1976. Was ist die Ursache für den regionalen Anstieg der Hochwasserabflüsse während der letzten drei Jahrzehnte und die nahezu zeitgleich auftretenden Bruchpunkte in den Zeitreihen?

Verursacht wurden alle Hochwasser durch äußerst ergiebige, lang andauernde Niederschläge, die wiederum durch lang andauernde Westwetterlagen ausgelöst wurden (*Caspary, 2001, 2004*). Umfangreiche Untersuchungen des Niederschlages im Rahmen des KLIWA-Projektes haben für Südwestdeutschland einen großflächigen Anstieg der Winterniederschläge gezeigt. Hierbei haben auch die winterlichen Starkniederschläge für Niederschlagsdauern größer gleich 24 Stunden in den letzten 3 Jahrzehnten regional z.T. um mehr als 40% zugenommen (*Günther, 2004; Dietzer, 2001*).



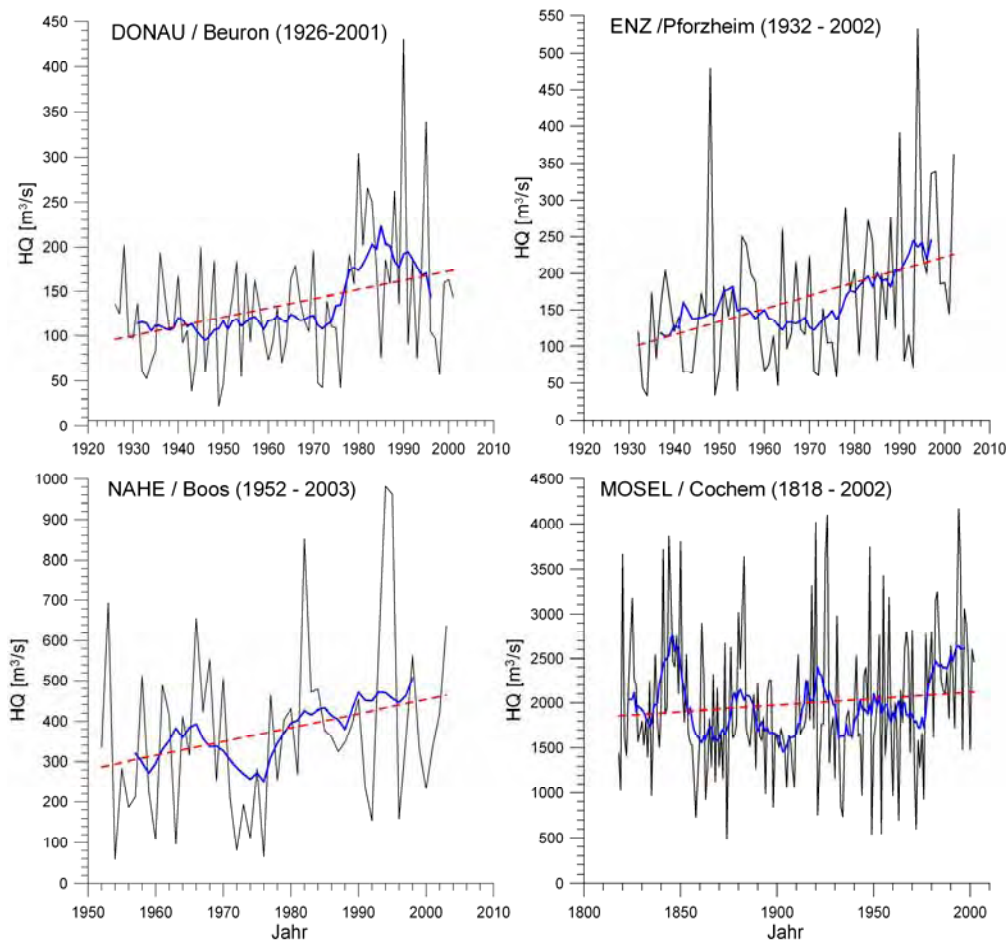


Abb. 5: Jahresmaxima des Abflusses HQ [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] der Donau am Pegel Beuron ( $A_E = 1\,320\text{ km}^2$ ) im Zeitraum 1926–2001, der Enz/Nordschwarzwald am Pegel Pforzheim ( $A_E = 1\,477\text{ km}^2$ ) im Zeitraum 1932–2002, der Nahe am Pegel Boos ( $A_E = 2\,382\text{ km}^2$ ) im Zeitraum 1952–2003 und der Mosel am Pegel Cochem ( $A_E = 27\,088\text{ km}^2$ ) im Zeitraum 1818–2002. Ausgleichskurven: Trendgerade und gleitendes Mittel über 11 Jahre.

## 2.4 Zonale Großwetterlagen als Auslöser gefährlicher Winterstürme über Europa

Zonale Großwetterlagen (GWL) verursachen nicht nur extreme Niederschläge und Hochwasser, sondern sind auch für ganze Orkanserien über West- und Mitteleuropa mit katastrophalen Schäden mitverantwortlich sind. So verursachten die während zweier Wz-Perioden (24.–30.01.1990 und 25.02.–01.03.1990) aufgetretenen Orkane "Daria" (25/26.01.), "Vivian" (25.–27.02.) und "Wiebke" (28.02.–01.03.) in Europa volkswirtschaftliche Gesamtschäden in Höhe von 14,8 Milliarden US \$, von denen 10,2 Milliarden US \$ auf versicherte Schäden entfielen und forderten 230 Todesopfer (*Münchener Rück, 1993*). Auch die Winterorkanserie im Dezember 1999 über Europa wurde durch zonale Großwetterlagen verursacht. Von dem Winterorkan "Anatol" (3./4.12.), der auf eine Wz-Periode (01. –13.12.) entfiel, war vornehmlich West- und Nordeuropa betroffen. Die beiden Orkane "Lothar" (26.12.) und "Martin" (27.12.), die dramatische Schäden in Frankreich, Deutschland, der Schweiz und Spanien auslösten, entfielen auf die zonale GWL "südliche Westlage (Ws)" des Zeitraumes 23. - 29.12.1999. Die Winterstürme des Dezember 1999 forderten mehr als 230 Todesopfer und verursachten volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von 18,5 Milliarden US-Dollar, wovon 10,75 Milliarden auf versicherte Schäden entfielen (*Münchener Rück, 2001*). Jüngstes Beispiel ist der Wintersturm „Kyrill“, der im Zeitraum 18.-20.01.2007 über weiten Teilen von West- und Mitteleuropa wütete und volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von 10 Mrd. US\$ verursachte, wovon 5,8 Mrd. US\$ auf versicherte

Schäden entfielen (*Münchener Rück, 2008*). Auch dieser Sturm entfiel auf die GWL „Westlage zyklonal“ (Wz) in einem stark zonal geprägten Winter mit langen Wz-Perioden. Für West- und Mitteleuropa besteht durch die Zunahme der winterlichen Wz-Häufigkeiten eine erhöhte Sturmgefährdung auch ohne Zunahme der Sturmaktivität über dem Nordatlantik (*von Storch et al., 1998*).

Ein Vergleich mit den zugehörigen Daten in **Abb. 3** zeigt, dass die 4 durch extreme Sturmserien gekennzeichneten Winter (1989/90, 1997/98, 1999/2000 und 2006/07) alle im „kritischen Sektor“ liegen. In **Tab. 1** sind die Ergebnisse sowohl für die Hochwasser als auch die Winterstürme zusammengefasst. Gemäß *Abb. 3* entfallen 7 der letzten 20 Winter (1989/90-2008/09) auf den „kritischen Sektor“. **Die langandauernden Wz-Wetterlagen dieser Winter haben Hochwasser- und Wintersturmschäden von mehr als 55 Milliarden US \$ verursacht.**

Tab. 1: Winter (Dez.- Feb.) des Zeitraumes 1982/83-2008/09 im „kritischen“ Sektor mit ( $T_{\max} \geq 13$  Tage  $\cap$   $f \geq 30\%$ ), hierdurch ausgelöste Hochwasser in Südwestdeutschland und Winterstürme in West- u. Mitteleuropa sowie verursachte Schäden. Schadensangaben nach (*Münchener Rück, 1993, 2001 und 2008*).

Winter	Ereignis	Datum	Land/Region/ Einzugsgebiet	GWL Wz		Volkswirt. Schäden [Mio. US \$]	Versicherte Schäden [Mio. US \$]	Todes- opfer
				Häufigkeit f [%]	max. Dauer $T_{\max}$ [Tage]			
1989/90	Winterstürme, "Daria",	25.01.-01.03.1990	Westeuropa	35,6	13	14 800	10 200	240
	"Vivian", "Wiebke"		GB, D, F, Benelux					
	Donauhochwasser	25.- 26.02.1990	Oberlauf Donau					
1993/94	Weihnachtshochwasser	20.12.-31.12.1993	Rhein, Mosel, Nahe Neckar, Enz, Kocher	43,3	17	2 000	800	14
1994/95	Hochwasser	19.01.-03.02.1995	Rhein, Nahe, Main, Mosel, Lahn, Benelux, Oberlauf Donau	45,5	13	3 500	910	28
1997/98	Winterstürme	23.12.-05.01.1998	GB, IR, D, F	36,7	16	650		15
1999/2000	Winterstürme "Anatol"	03.-04.12.1999	DK, D, GB, S, PL	40,7	19	18 500	10 750	230
	"Lothar"	26.12.1999	F, D, CH, B, A					
	"Martin"	27.12.1999	F, ES, CH					
2004/05	Wintersturm "Erwin"	07.-09.01.2005	DK,S	20,0	15	5 800	2 500	18
2006/07	Wintersturm "Kyrill"	18.-20.01.2007	GB, B, NL, D, F, PL, DK, CZ, A, CH, SLO, UA	30,0	15	10 000	5 800	49
<b><math>\Sigma =</math></b>						<b>55 250</b>		

### 3 Trocken- und Niedrigwasserperioden auslösende Großwetterlagen und deren zeitliche Veränderung

#### 3.1 Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Großwetterlagen

In Südwestdeutschland kam es in den Sommern der vergangenen Jahre wiederholt zu extremen Trockenperioden, die an zahlreichen Gewässern zu Niedrigwasserabflüssen führten. Zudem waren diese Zeiträume mit außergewöhnlich hohen Lufttemperaturen verbunden, die zu einer extremen Aufheizung der Gewässer geführt haben. Jüngste Extremjahre mit Hitzewellen waren der Juni und die erste Augusthälfte 2003 sowie der Juli 2006. **Abb. 6** zeigt beispielhaft das nahezu ausgetrocknete Flussbett der Dreisam im Sept. 2003. Neben der geringen Wasserführung hat insbesondere die bis auf ca. 28° C angestiegenen Wassertemperatur dazu geführt, dass an Neckar und selbst am Rhein Probleme mit der Kühlwasserversorgung der Kohle- und Kernkraftwerke auftraten. Die Niedrigwassersituation des Jahres 2003 ist für Baden-Württemberg in *LfU (2004)*, für Bayern in (*BLfW, 2004 u. 2005*) und für Rheinland-Pfalz in (*LfW,*



2004) jeweils gut dokumentiert. Umfangreiche Untersuchungen des Gebietsniederschlages im Zeitraum 1931-1997 durch den Deutschen Wetterdienstes (DWD) im Rahmen von KLIWA zeigten, dass im meteorologischen Sommer (JJA) die Häufigkeit von Tagen ohne Niederschlag in weiten Teilen von Baden-Württemberg und Bayern z. T. deutlich zugenommen und die Niederschlagssummen z. T. signifikant abgenommen haben (Reich, 2005).



Abb. 6: Extremes Niedrigwasser an der Dreisam im Sept. 2003, nach (LfU, 2004).

Anhand ausgewählter Trockenperioden, Niedrigwasserzeiten und Hitzewellen wurde für Südwestdeutschland untersucht, welche Großwetterlagen (GWL) die Auslöser ausgeprägter historischer Trocken- und Niedrigwasserperioden waren (Caspary, 2007). Diese „kritischen“ Trocken-GWL wurden erfasst und hinsichtlich signifikanter Veränderungen (Trends, Bruchpunkte) im Sommer (JJA) und in der Vegetationsperiode (April – Sept.) für die Zeitreihe 1881 – 2006 untersucht.

Die kombinierte Auswertung dieser Trockenperioden und der Großwetterlagen zeigte, dass die GWL „**Hochdruckbrücke Mitteleuropa**“ (BM) durch lang andauernde, zusammenhängende BM-Perioden an allen Trockenperioden der Sommer (JJA) bzw. der Vegetationsperioden (April – Sept.) maßgeblich beteiligt war. Daneben spielt auch die GWL „Hoch Nordmeer – Island, antizyklonal“ (HNa) eine bedeutende Rolle. Für diese beiden GWL sind die Anomalien des Bodenluftdruckes in **Abb. 7** dargestellt. Weitere „kritische“, Trockenperioden in der Vegetationszeit (April – Sept.) und im Sommer verursachende GWL sind die antizyklonalen Ostlagen „Hoch Fennoskandien, antizyklonal“ (HFa) und „Hoch Nordmeer-Fennoskandien, antizyklonal“ (HNFa) sowie die „Nordostlage, antizyklonal“ (NEa) und die „Südostlage antizyklonal“ (SEa).

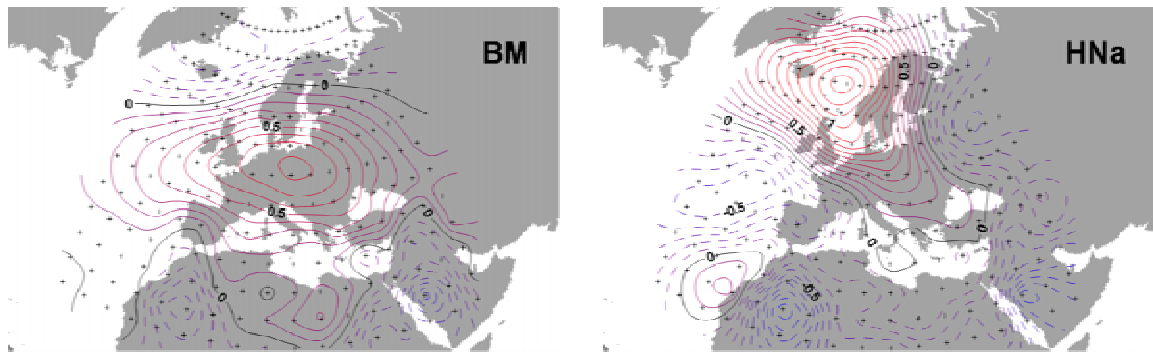


Abb. 7: Anomalien des Bodenluftdruckes der „kritischen“ Trocken-GWL „Hochdruckbrücke Mitteleuropa (BM)“ und der GWL „Hoch Nordmeer-Island, antizyklonal (HNn)“.

### 3.2 Instationarität der Trocken-Großwetterlagen im Sommer und in der Vegetationsperiode

Um Aussagen über die Veränderungen der Häufigkeiten und maximalen Dauer zusammenhängender kritischer Trocken-GWL zu erhalten, wurden die nachstehenden GWL („BM+HNn+NEa+HFa+HNFa +SEa“) zunächst zu einer Trocken-GWL-Kombination zusammengefasst. **Abb. 8** zeigt für die Vegetationsperioden (April – Sept.) des Zeitraumes 1881-2008 die Häufigkeiten und die maximale Dauer zusammenhängender „kritischer“ Trocken-GWL. Die extremen Trockenjahre (1921, 1947, 1976, 1991 und 2003) lassen sich als „Peaks“ aus beiden Zeitreihen deutlich ablesen.

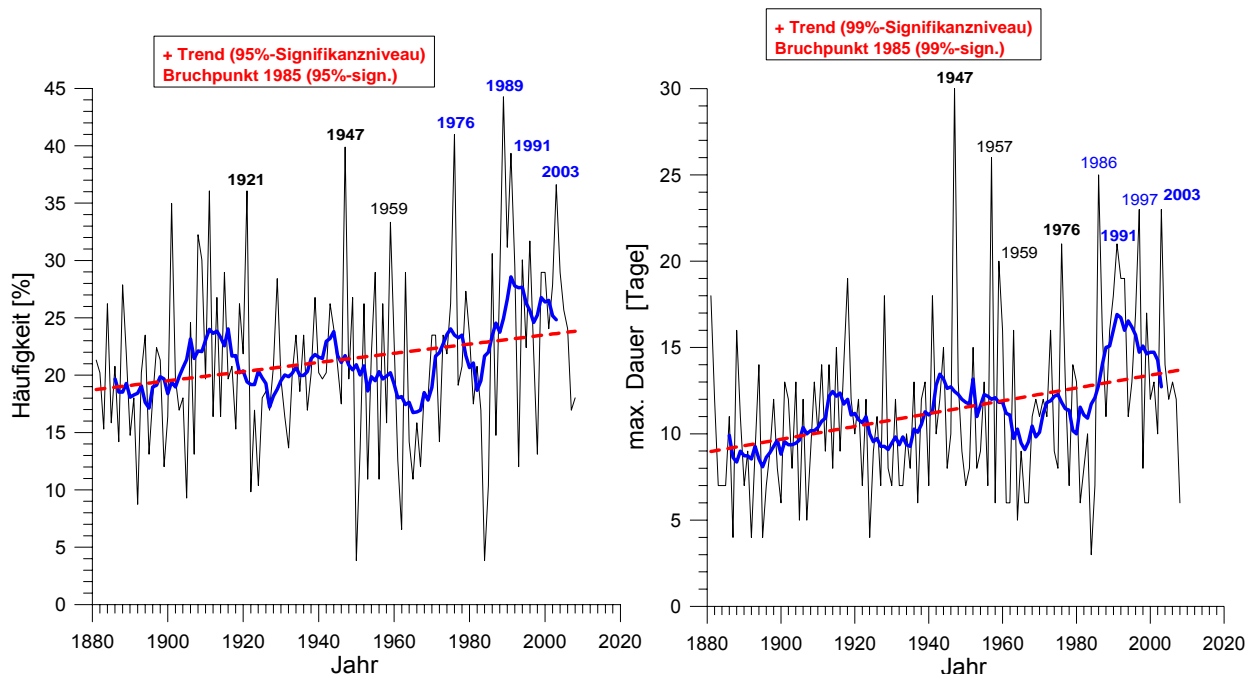


Abb. 8: „Trocken-GWL“ (BM+HNn+NEa+HFa+HNFa+SEa) für die Vegetationsperioden (April – Sept.) des Zeitraumes 1881- 2008. Links: Häufigkeiten, rechts: max. Dauer zusammenhängender Trocken-GWL-Perioden; Ausgleichskurven: Trendgeraden und gleit. Mittel über 11 Jahre.



Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchung war (Caspary, 2007), dass die „kritische“ Trockenperioden auslösenden GWL-Kombinationen („BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa“) sowohl im Sommer (JJA) als auch in der Vegetationsperiode (April – Sept.) im Beobachtungszeitraum 1881-2008 hochsignifikant ansteigende Trends für die Häufigkeiten und die maximale Dauer zusammenhängender Trocken-GWL aufweisen. Die signifikanten **Bruchpunkte** liegen für die in Abb. 8 dargestellten Zeitreihen der **Vegetationsperioden (April-Sept.) im Jahr 1985** und für die Sommerzeitreihen (JJA) im Jahr 1968. **Die Wahrscheinlichkeit eines trockenen, heißen Sommers und einer extrem trockenen Vegetationsperiode hat in Südwestdeutschland im Vergleich zum Zeitraum vor den siebziger Jahren des letzten Jahrhunderts bereits um ein Vielfaches zugenommen.**

Analog zu Abb. 3 ist im Scatterplot von **Abb. 9** die maximale Dauer  $T_{\max}$  zusammenhängender „Trocken-GWL-Perioden“ als Funktion der Häufigkeit  $f$  [%] für die kombinierten „Trocken-GWL“ (BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa) für die Vegetationsperioden (April - Sept.) der Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt 1985 dargestellt, wobei die Vegetationsperioden vor dem Bruchpunkt (1881-1985) mit Dreiecksymbolen und die Vegetationsperioden nach dem Bruchpunkt (1986 - 2008) mit quadratischen Symbolen gekennzeichnet sind. Die obere rechte, grau hinterlegte Ecke von Abb. 9 zeigt Vegetationsperioden, die sowohl eine große Häufigkeit an Trocken-GWL ( $f \geq 30\%$ ) als auch lange zusammenhängende Trocken-GWL-Perioden ( $T_{\max} \geq 20$  Tage) aufweisen. Bei Betrachtung der Einzeljahre im „kritischen“ Sektor fällt auf, dass es sich hierbei jeweils um Trockenjahre mit ausgeprägten Niedrigwasserperioden wie 1947, 1959, 1976, 1991 und 2003 handelt.

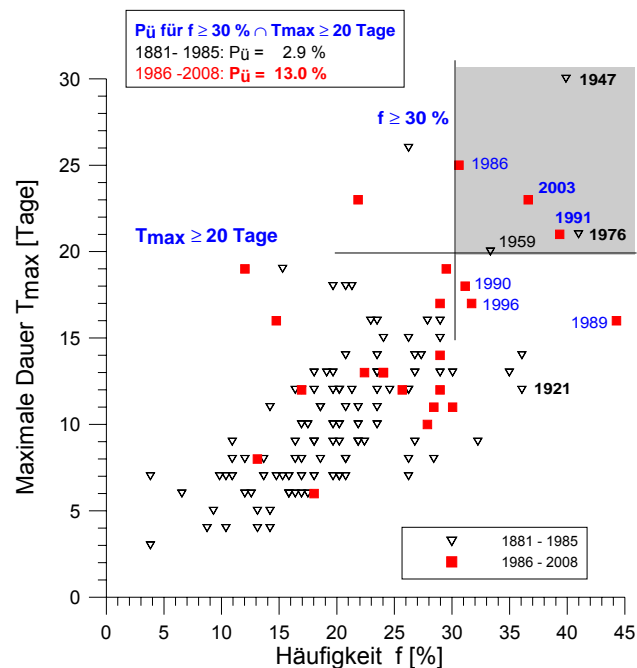


Abb. 9: Max. Dauer  $T_{\max}$  zusammenhängender „Trocken-GWL-Perioden“ als Funktion der Häufigkeit  $f$  [%] für die kombinierten „Trocken-GWL“ (BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa) für die Vegetationsperioden (April - Sept.) der Zeiträume 1881-1985 und 1986-2008. Auftretenswahrscheinlichkeit  $P_u$  von Vegetationsperioden im kritischen Sektor.

Es wurde eine getrennte Analyse für die beiden Zeiträume vor und nach dem Bruchpunkt durchgeführt. Während in den 105 Jahren des Zeitraumes 1881-1985 nur 3 Jahre im grau hinterlegten „kritischen“ Sektor liegen, entfallen 3 der letzten 23 Vegetationsperioden und damit 13% auf den Zeitraum nach dem Bruchpunkt (1986-2008). Hieraus folgt, dass **die Eintrittswahrscheinlichkeit einer extrem trockenen Vegetationsperiode (April – Sept.) und ausge-**

prägten Niedrigwasserjahres im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 um mehr als den Faktor 4 angestiegen ist!

#### 4 Auswirkungen der Instationaritäten

##### 4.1 Auswirkungen der Instationarität der Hochwasserabflüsse auf die hydrologische Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Betrachten wir die Ergebnisse einer herkömmlichen Hochwasserstatistik unter Verwendung der Gumbelverteilung, so können hiermit die für die hydrologische Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen maßgeblichen Scheitelabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit  $T$  berechnet werden (Tab. 2). Hier ist beispielsweise ein  $HQ_{100}$  als Hochwasserscheitelabfluss mit der Jährlichkeit  $T = 100$  definiert. Dies bedeutet, dass der Abfluss  $HQ_{100}$  im statistischen Mittel in 100 Jahren nur einmal erreicht oder überschritten wird. Es handelt sich also um einen statistischen Wert und nicht um einen gemessenen Hochwasserabfluss. Die Gumbelverteilung ist eine in der Hydrologie häufig benutzte analytische Extremwertverteilung, die an die Beobachtungsdaten der gemessenen maximalen Jahresabflüsse (HQ-Werte) angepasst wird.

Tab. 2:  $HQ_T$ -Werte ( $m^3/s$ ) und Vertrauensintervalle (%  $HQ_T$ ) (95%-Signifikanzniveau) der Donau am Pegel Beuron ( $A_E = 1\,320\,km^2$ ), der Enz/Nordschwarzwald am Pegel Pforzheim ( $A_E = 1\,477\,km^2$ ) und der Nahe am Pegel Boos ( $A_E = 2\,382\,km^2$ ) als Funktion der Jährlichkeit  $T$  und des Beobachtungszeitraumes unter Verwendung der Gumbelverteilung.

DONAU / BEURON		Wiederkehrintervall $T$ [Jahre]						
Messzeitraum	2	5	10	20	25	50	100	200
1926 - 1976	104 ±12 %	147 ±12 %	175 ±16 %	202 ±17 %	210 ±18 %	237 ±19 %	<b>263</b> ±20 %	289 ±20 %
1926 - 2001	125 ±12 %	187 ±13 %	229 ±15 %	<b>269</b> ±16 %	281 ±16 %	320 ±17 %	359 ±18 %	397 ±18 %
1977 - 2001	167 ±19 %	<b>245</b> ±22 %	297 ±24 %	346 ±26 %	362 ±27 %	410 ±28 %	458 ±31 %	
ENZ / PFORZHEIM		Wiederkehrintervall $T$ [Jahre]						
Messzeitraum	2	5	10	20	30	50	100	200
1932 - 1976	120 ±19 %	193 ±20 %	241 ±21 %	287 ±22 %	314 ±23 %	347 ±24 %	<b>392</b> ±24 %	437 ±25 %
1932 - 2002	148 ±15 %	238 ±15 %	297 ±17 %	354 ±18 %	<b>386</b> ±18 %	428 ±19 %	483 ±19 %	538 ±20 %
1977 - 2002	193 ±20 %	292 ±22 %	<b>358</b> ±25 %	421 ±26 %	457 ±27 %	502 ±28 %	563 ±29 %	
NAHE / BOOS		Jährlichkeit $T$ [Jahre]						
Messzeitraum	2	5	10	20	30	50	100	200
1952 - 1976	276 ±25 %	443 ±24 %	555 ±24 %	662 ±25 %	723 ±25 %	800 ±26 %	<b>904</b> ±26 %	1 007 ±26 %
1952 - 2003	340 ±15 %	527 ±15 %	651 ±16 %	770 ±16 %	838 ±17 %	<b>923</b> ±17 %	1 038 ±17 %	1 153 ±18 %
1977 - 2003	4028 ±17 %	571 ±18 %	684 ±19 %	792 ±20 %	<b>854</b> ±21 %	931 ±21 %	1 036 ±21 %	



Nahezu zeitgleich mit dem Anstieg der Häufigkeit und der Persistenz der Großwetterlage "Westlage zyklonal (Wz)" im Winter steigen die Extremabflüsse für zahlreiche Pegel auf ein im Vergleich zur Vergangenheit (1930–1976) deutlich erhöhtes Niveau an, bei gleichzeitiger drastischer Zunahme der Variabilität der maximalen Jahresabflüsse. Dieses Phänomen wurde bereits in *Caspary & Bárdossy (1995)* für die Enz/Nordschwarzwald sowie in *Caspary (1996)* für den Oberlauf der Donau aufgezeigt.

Bei der hydrologischen Extremwertanalyse wird bisher stets auf der Grundlage der Stationaritätsannahme die Zeitreihe des gesamten Messzeitraumes herangezogen. Die Stationaritätsannahme besagt, dass die einzelnen HQ-Werte zwar einer natürlichen Variabilität unterliegen, dass aber wichtige Einflussfaktoren wie das Klima keine systematischen Veränderungen erfahren. **Tab. 2** (jeweils obere und mittlere Zeilen, insbesondere fett gedruckte Zahlen) zeigt sehr deutlich, wie stark die Hochwasser des Februar 1980, Februar 1990, Dezember 1993 und Januar 1995 die Einschätzung eines potentiellen Hochwasserschutzes verändert haben. Beim Pegel Beuron/Donau entspricht das  $HQ_{100}$  des Zeitraumes 1926 bis 1976 lediglich dem  $HQ_{20}$  des Zeitraumes 1926 bis 2001! Ähnliches kann für die Enz am Pegel Pforzheim und in abgeschwächter Form auch für die Nahe am Pegel Boos abgelesen werden. Bereits die reguläre Berücksichtigung der drei jüngsten Extremhochwasser vom Februar 1990, Dezember 1993 und Januar 1995 hat somit rein rechnerisch für den Oberlauf der Donau gegenüber dem Zeitraum 1926 bis 1976 zu einem **fünffach größeren Hochwasserrisiko** geführt, was einem Anstieg der  $HQ_T$ -Werte um 35 bis 37% für große Jährlichkeiten entspricht.

Bei dieser Analyse werden die gesamten Messwerte als stationäre Zeitreihe angesehen: Das Vorgehen berücksichtigt noch nicht die systematische Zunahme der Häufigkeit und Persistenz der winterlichen Wz-Großwetterlagen, durch welche die extremen Winterniederschläge und die Hochwasserabflüsse der hier betrachteten Einzugsgebiete gleich einem Quantensprung auf ein höheres Extremabflussniveau angehoben werden. Die zentrale Frage ist nun: **Kann für die beschriebenen Einzugsgebiete die Stationaritätsannahme bei der Ermittlung der Bemessungshochwasserabflüsse in Zukunft beibehalten werden?** Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer in Deutschland beantworteten diese Frage bis zum Jahr 2005 mit "Ja" und dies sicherlich auch aus wirtschaftlichen Erwägungen.

Wie die Ausgleichskurven in **Abb. 2**, die Bruchpunktanalysen der Zeitreihen sowohl der Großwetterlagen als auch der maximalen Jahresabflüsse und die Ausführungen zur Instationarität der Westwetterlagen zeigten, ist die Stationaritätsannahme für die Extremwertanalyse der Hochwasserabflüsse zumindest der hier betrachteten Einzugsgebiete jedoch nicht mehr zulässig. **In den von der aufgezeigten Instationarität betroffenen Regionen wird eine Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen auf der Grundlage der gesamten historischen Zeitreihe, selbst unter Berücksichtigung der Extremabflüsse der letzten Jahre, zu einer hoffnungslosen Unterschätzung des bereits heute vorhandenen Hochwasserrisikos führen.** Der Autor ist daher der festen Überzeugung, dass die in Abschnitt 2.2 beschriebene Klimaänderung in den Problemregionen dringend bei der zukünftigen Ermittlung von Bemessungshochwasserabflüssen und damit in der Hochwasserschutzplanung berücksichtigt werden sollte.

Was aber ist zu tun, wenn man die oben gestellte Frage mit "nein" beantwortet hat? Man muss sich für diese Gebiete von der traditionellen Bemessungspraxis abweichende Verfahren überlegen. Wie könnten solche Verfahren aussehen? Eine erste Abschätzung unter Berücksichtigung der Instationarität besteht darin, die HQ-Messwerte für den Zeitraum vor und nach dem Bruchpunkt einer getrennten Analyse zu unterziehen. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Instationarität wird hierzu in den jeweils letzten Zeilen von **Tab. 2** eine **erste grobe Abschätzung** vorgenommen. Dabei wurden nur noch die HQ-Werte des Zeitraumes ab 1977, also nach dem Auftreten der Bruchpunkte in allen betrachteten Zeitreihen, berücksichtigt. Dies führt für die Donau am Pegel Beuron zu einer dramatischen Verschiebung der Jährlichkeiten. Hier entspricht das  $HQ_{100}$  des Zeitraumes 1926 bis 1976 nur noch dem  $HQ_5$  des Zeitraumes 1977 bis 2001,

das  $HQ_{100}$  steigt um 74% an. Selbst unter Einbeziehung des gesamten Messzeitraumes von 1926-2001 würde das  $HQ_{100}$  nur noch dem  $HQ_{25}$  des Zeitraumes 1977-2001 entsprechen, das zugehörige  $HQ_{100}$  steigt um ca. 28% an.

Dies bedeutet, dass in den beiden Einzugsgebieten des Donauoberlaufes und der Enz infolge der bereits eingetretenen Klimaänderungen während der Wintermonate ein früherer Schutz gegen ein 100jähriges Hochwasser zukünftig nicht einmal mehr einem 10jährlichen Hochwasserschutz entsprechen würde! Wie analoge statistische Untersuchungen in **Tab. 2** und die Zeitreihen der  $HQ$ -Werte in **Abb. 5** zeigen, gehören auch das Nahe- und Moseleinzugsgebiet zu den von der Winterklimaänderung besonders betroffenen "kritischen Hochwasserregionen" Deutschlands.

Die Referenzperioden (beispielsweise 1926–1976 für die Donau) liegen in einem Zeitraum relativer „hydrologischer Ruhe“, eine Tatsache, die zu einer Kritik an dieser Abschätzung herangezogen werden könnte. Bedauerlicherweise diente aber gerade dieser Zeitraum in der Vergangenheit als Grundlage für die herkömmliche hydrologische Berechnung der Bemessungsabflüsse und damit zur Dimensionierung zahlreicher wasserwirtschaftlicher Anlagen. Der alleinige Bezug auf das relativ kurze Intervall nach Einsetzen des Bruchpunktes in der Zeitreihe der  $HQ$ -Werte (1977–2001) führt natürlich zur Vergrößerung des Konfidenzintervalles. So kann aus **Tab. 2** abgelesen werden, dass das "zukünftige"  $HQ_5$  des Pegels Donau / Beuron mit 95% Wahrscheinlichkeit in den Grenzen  $245 \text{ m}^3/\text{s} \pm 22\%$  liegt, das heißt  $191 \text{ m}^3/\text{s} \leq HQ_5 \leq 299 \text{ m}^3/\text{s}$ .

**Tab. 3** zeigt für die Donau am Pegel Beuron nochmals die  $HQ_T$ -Werte als Funktion der Jährlichkeit  $T$  für die unterschiedlichen Messzeiträume. In Zeile 4 von **Tab. 3** sind zusätzlich die  $HQ_T$ -Werte gemäß der Regionalisierung zusammengestellt, die auf dem Zeitraum 1926-2004 beruhen (*LUBW, 2007*).

Tab. 3:  $HQ_T$ -Werte ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) der Donau am Pegel Beuron ( $A_E = 1\,320 \text{ km}^2$ ) als Funktion der Jährlichkeit  $T$  und des Beobachtungszeitraumes unter Verwendung der Gumbelverteilung. Zeile 4: Ergebnisse aus der Regionalisierung (*LUBW, 2007*), Zeile 5: Regionalisierung unter Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors nach (*LUBW, 2007*).

DONAU / BEURON	Wiederkehrintervall T [Jahre]							
	2	5	10	20	25	50	100	200
Messzeitraum								
1926 - 1976	104	147	175	202	210	237	263	289
1926 - 2001	125	187	229	269	281	320	359	397
1977 - 2001	167	245	297	346	362	410	458	
Regionalisierung 1926 - 2004	145	210	252	290		338	373	412
Regionalisierung + Klimafaktor	217	305	353	386		416	429	445

In Baden-Württemberg wurde im Juli 2005 mit dem Leitfaden zur *Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes* (*LfU, 2005*) erstmals in Deutschland die Untersuchung des **Lastfalles „Klimaänderung“** verbindlich eingeführt. Dieser soll die infolge Klimaänderung bis 2050 zu erwartenden Hochwasserverschärfungen in der Bemessungspraxis berücksichtigen. Von zentraler Bedeutung sind hierbei die Klimaänderungsfaktoren, die sich sowohl regional als auch für verschiedene Jährlichkeiten unterscheiden. Der Bemessungsabfluss  $HQ_{T,K}$  unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung kann mit Gl. (3.1) berechnet werden:

$$HQ_{T,K} = f_{T,K} \cdot HQ_T \quad (3.1)$$





Hierin bedeuten:

- $HQ_T$  = Hochwasserabfluss der Jährlichkeit T aus der Regionalisierung  
 $f_{T,K}$  = regionaler Klimaänderungsfaktor für die Jährlichkeit T  
 $HQ_{T,K}$  = Bemessungsabfluss für die Jährlichkeit T unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung

Für den Oberlauf der Donau beträgt der Klimaänderungsfaktor für die Jährlichkeit T = 100 z.B.  $f_{100,K} = 1.15$ . D.h., das aus der Regionalisierung bzw. der „normalen“ Hochwasserstatistik berechnete  $HQ_{100}$  muss gemäß Gl. (3.1) um 15% erhöht werden, um den Einfluss des zunehmenden Hochwasserrisikos infolge der zunehmenden anthropogenen Klimaänderung bis zum Jahr 2050 zu berücksichtigen. Hieraus folgt:

$$HQ_{100,K} = f_{T,K} \cdot HQ_T = 1,15 \cdot 373 = 429 \text{ m}^3 / \text{s}$$

Beim Vergleich der Zeilen 3 und 5 aus **Tab. 3** fällt auf, dass das aus den Beobachtungsdaten der verkürzten Messreihe (1977-2001) nach dem Bruchpunkt (1976) resultierende  $HQ_{50}$  von  $410 \text{ m}^3/\text{s}$  nahezu mit dem Wert aus der Regionalisierung unter Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors ( $HQ_{50,K} = 416 \text{ m}^3/\text{s}$ ) übereinstimmt. Dagegen sind die Werte für Jährlichkeiten größer T = 100 Jahre für die Reihe mit Berücksichtigung des Klimaänderungsfaktors etwas geringer. Andererseits liegen die  $HQ_{T,K}$ -Werte für Jährlichkeiten T  $\leq 20$  Jahre deutlich über den  $HQ_T$ -Werten der verkürzten Messreihe. Zumindest für die Region der oberen Donau kann somit geschlossen werden, dass die vom Autor bereits 1996 (*Caspary, 1996*) vorgeschlagene Methode zur ersten groben Quantifizierung des Einflusses der Instationarität ähnliche Werte wie die Verwendung der Regionalisierung und des Klimaänderungsfaktors ergeben. Die Werte der verkürzten Messreihe beruhen jedoch auf Messwerten und nicht wie der Klimaänderungsfaktor auf dem Vergleich von Klimamodellszenarien der Zeitreihen des Zeitraumes 2020-2050 im Vergleich zum Zeitraum 1970-2000.

Die Ergebnisse der Analyse der Hochwasserabflüsse und der Großwetterlagen haben bisher die vom Autor bereits 1995 (*Caspary & Bárdossy, 1995*) formulierte Hypothese bestätigt: **Sollten sich in Zukunft die Häufigkeiten und die Persistenz der Großwetterlage „Westlage zyklonal“ in den Wintermonaten auf dem derzeitigen hohen Niveau stabilisieren oder gar erhöhen, so muss für zahlreiche Einzugsgebiete in den betroffenen Mittelgebirgsregionen mit einem im Vergleich zu dem Zeitraum vor den achtziger Jahren mehr als zehnfach höheren Hochwasserrisiko gerechnet werden.** Dies hat weitreichende Konsequenzen für die hydrologische und wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis.

Zur scheinbaren Widerlegung dieser Hypothese werden zuweilen Pegel mit meist langen Beobachtungsreihen genannt, die keine Instationarität der Hochwasserabflüsse aufweisen. Der Autor hat jedoch stets mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass das Problem der Zunahme der Hochwasserabflüsse nicht alle Einzugsgebiete Deutschlands betrifft. Niederschlagsreiche Westwetterlagen regnen sich meist in den west- und südwestdeutschen Mittelgebirgen ab, so dass Gebiete, die weiter östlich liegen, davon wenig betroffen sind. Hier sind andere GWL für die Hochwasser-Auslösung verantwortlich. **Das zunehmende Hochwasserrisiko ist somit sowohl für Baden-Württemberg als auch für andere Bundesländer im Südwesten und Westen Deutschlands kein flächendeckendes, aber ein sehr ernstes regionales Problem** (*Caspary, 2004 und 2001; Caspary & Haeblerli 1999; Caspary 1996; Caspary & Bárdossy 1995*). Die hydrologischen Dienste der betroffenen Bundesländer sollten daher die neue intellektuelle Herausforderung annehmen, die Problemgebiete ausfindig machen, die zugehörigen Pegeldata auswerten und für diese Regionen tragfähige Konzepte eines zukunftsweisenden Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung der Klimaänderung ausarbeiten. Das von den

Ländern Baden-Württemberg und Bayern im Rahmen des KLIWA-Projektes entwickelte Vorgehen wird sicherlich für Deutschland wegweisend sein.

#### 4.2 Auswirkungen der Instationarität von Bemessungsniederschlägen

Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat die Starkniederschläge für Deutschland aktualisiert und im Dez. 2005 als KOSTRA-DWD 2000 veröffentlicht (DWD, 2005). Dabei wurde der Auswertzeitraum von ursprünglich 1951-1980 auf 1951-2000 ausgedehnt. **Abb. 10** zeigt für die Dauerstufe von 24 h im Winterhalbjahr (Nov.-April) die prozentuale Abweichung eines 100jährigen Starkniederschlages für den Zeitraum 1971-2000 im Vergleich zu den bisher benutzten Daten des Zeitraumes 1951-1980. Hieraus wird deutlich, **dass für weite Teile Baden-Württembergs, den Süden und Norden von Rheinland-Pfalz und den Norden von Bayern der 100jährige 24 h-Regen um mehr als 25% zugenommen hat!**

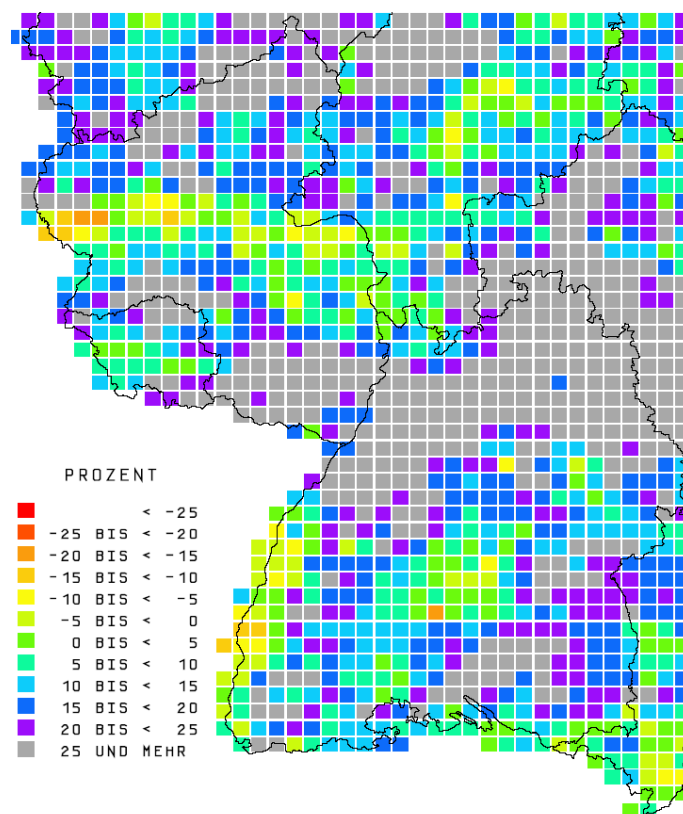


Abb. 10: Prozentuale Abweichung der Starkniederschlagshöhen für Südwestdeutschland im Zeitraum 1971-2000 gegenüber dem Zeitraum 1951-1980 für einen 100jährigen ( $T = 100a$ ) 24h-Regen im Winterhalbjahr (Nov.-April), nach DWD, 2005.

Der DWD hat seiner Extremwertstatistik für die Aktualisierung der KOSTRA-Daten jedoch nicht den Zeitraum 1971-2000 sondern den längeren Zeitraum 1951-2000 zugrunde gelegt. Dabei wurden für die extremwertanalytische Auswertung stationäre Verhältnisse angenommen, obwohl diese, wie die Ausführungen im vorliegenden Beitrag gezeigt haben, seit ca. 30 Jahren nicht mehr vorliegen. Dies bedeutet, dass eine Dimensionierung von Hochwasserschutzmaßnahmen mit Hilfe von Niederschlag-Abfluss-Modellen unter Verwendung der „neuen“ Bemessungsniederschläge aus KOSTRA-DWD-2000 in den von der Instationarität betroffenen „Problemregionen“ zu einer deutlichen Unterschätzung der Bemessungsabflüsse und damit zu einer drastischen Unterschätzung des tatsächlichen Hochwasserrisikos führen wird. In diesen „Problemregionen“ hätte die beobachtete Instationarität der lang andauernden Winterniederschläge dringend berücksichtigt werden müssen. Der für weite Teile Südwestdeutschlands nachge-



wiesene z.T. drastische Anstieg der extremen Winterniederschläge für größere Niederschlagsdauern ( $\geq 24$  h) macht eine **Aktualisierung der Extremniederschlagsstatistik** für Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern in Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) dringend erforderlich. Es erscheint zudem dringend geboten die Extremniederschlagsstatistik auf längere Niederschlagsdauern (5 -10 -15 Tage) auszudehnen, da diese für die Hochwasserbildung in größeren Einzugsgebieten sehr wichtig sind. Die KOSTRA-DWD-2000 Daten enden bei Niederschlagsdauern von 72 Stunden (DWD, 2005).

## 5 Sind die jüngsten Extremhochwasser und Winterstürme bereits Signale der befürchteten Klimaänderung infolge des anthropogenen Treibhauseffektes?

Bezüglich der in den Medien häufig gestellten Frage: "**Handelt es sich bei den jüngsten Extremhochwasserereignissen und schweren Winterstürmen bereits um Signale der befürchteten Klimaänderung durch den anthropogenen Treibhauseffekt?**" bleibt festzuhalten, dass die nachgewiesenen Änderungen der Häufigkeit und der Persistenz der winterlichen zonalen Großwetterlagen bereits heute zu einer drastischen Änderung des Winterklimas in Mitteleuropa geführt haben. Wie in Abschnitt 4 gezeigt, haben umfangreiche Untersuchungen des Niederschlages im Rahmen des KLIWA-Projektes für Südwestdeutschland einen großflächigen Anstieg der Winterniederschläge aufgedeckt, wobei die winterlichen Starkniederschläge für Niederschlagsdauern größer gleich 24 Stunden in den letzten 3 Jahrzehnten regional z.T. um mehr als 40% zugenommen haben (DWD, 2005; Günther, 2004; Dietzer, 2001). Auch internationale Studien bestätigen den Anstieg der Winterniederschläge. Gemäß dem Third Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) wurde für die Landoberflächen der hohen Breiten der Nordhemisphäre bereits eine Zunahme der Winterniederschläge beobachtet, wobei die Ausdehnung der Schneeoberfläche seit 1988 stets unter dem 21-Jahres-Mittel lag. Nach IPCC-WG I (2001) ist es wahrscheinlich, dass in den mittleren und höheren Breiten der Nordhemisphäre in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts die Häufigkeiten von Extremniederschlägen um 2 - 4% zugenommen haben. Nach IPCC (2007) haben die Niederschläge von 1900-2005 über Nordeuropa signifikant zugenommen. Umfangreiche internationale Untersuchungen zeigen für den Zeitraum 1961 bis 1990 eine signifikante Zunahme der Winterniederschläge in Nordwesteuropa und hier insbesondere im Bereich der Westküsten von Dänemark, Norwegen und Südwestschweden im Vergleich zum Zeitraum 1931 bis 1960 (IPCCWGI, 2001, Schönwiese und Rapp, 1997). Hieraus resultiert eine starke Zunahme der Hochwasserabflüsse im Winter, die insbesondere für den Bereich der Westküste von Südnorwegen und der Westküste Schottlands (Black, 1996) nachgewiesen wurde. Die beobachtete Zunahme der Winterniederschläge befindet sich nach IPCC auch in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Klimamodellszenarien mit erhöhter Treibhausgaskonzentration, die alle einen intensivierten Wasserkreislauf mit einer Zunahme der Winterniederschläge in den hohen Breiten prognostizieren. Bereits in IPCC WGII (1996) wurde eine Hochwasserverschärfung durch eine Verminderung der schneebedeckten Einzugsgebietsflächen infolge erhöhter Regenfälle im Winter vermutet.

Aufgrund von Klimamodellszenarien und zahlreichen hydrologischen Studien über deren Auswirkungen gilt es nach IPCC WGII (1996) als sehr wahrscheinlich, dass die Hochwasserhäufigkeit bei einer globalen Erwärmung ansteigen wird. Die International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin (CHR) (CHR, 1997) kommt in ihrer umfangreichen hydrologischen Impaktstudie zu dem Ergebnis, dass das hydrologische Regime des Rheins von einem bisher kombinierten Regen-Schnee-beeinflussten System infolge der prognostizierten Klimaänderungen zukünftig zunehmend in ein rein Regen-dominiertes Abflussregime übergehen wird. Für alle Regionen des Rheineinzugsgebietes erwartet die CHR im Winter einen Anstieg der Häufigkeit und Größe der Hochwasserabflüsse und damit eine Zunahme des Hochwasserrisikos.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (LAWA, 1995), ein Zusammenschluss der für die Wasserwirtschaft zuständigen Ministerien der Bundesländer der Bundesrepublik Deutsch-

land, weist in ihren "Leitlinien für den zukunftsweisenden Hochwasserschutz" darauf hin, dass es in den letzten Jahren Hinweise auf eine Verstärkung der Winterniederschläge bei gleichzeitiger Abnahme der Schneelagenhäufigkeit gibt. Diese Vermutung ist durch die umfangreiche Auswertung von Niederschlagsdaten für Süddeutschland im Rahmen des KLIWA-Projektes zwischenzeitlich bestätigt (Günther, 2004; Dietzer, 2001). Die LAWA befürchtet, dass infolge einer Verstärkung des Treibhauseffektes zukünftig mit einer Zunahme von Wetterextremen zu rechnen ist. Sollten sich diese Prognosen bestätigen, so kann nach Auffassung der LAWA die Zunahme der Regenfälle alle anderen Hochwasserrisiken aus anthropogenen Einflüssen (wie Versiegelung, Gewässerausbau, Verlust an Retentionsflächen) im Einzugsgebiet deutlich überreffen (LAWA, 1995). Diese Auffassung kann nur mit Nachdruck bestätigt werden.

Der Autor ist ferner der Überzeugung, dass die Extremhochwasser des Februar 1990, Dezember 1993, Januar 1995 und Februar 1997 sowie die damit verbundenen dramatischen Hochwasserschäden hydrologische Signale einer Winterklimaänderung für die betroffenen Einzugsgebiete waren. Auch die Winterorkane des Jan. und Feb. 1990, Dez. 1999, Jan. 2005 und Jan. 2007 über Europa mit ihren katastrophalen Schäden sind Zeichen eines bereits veränderten Winterklimas! Analog dazu waren die Trocken- und Niedrigwasserperioden und Hitzewellen des Juni und August 2003 sowie Juli 2006 Zeichen eines bereits veränderten Sommerklimas. In der Wissenschaft hat sich zwischenzeitlich mehrheitlich die Auffassung durchgesetzt, dass die nachgewiesenen Klimaänderungen neben der natürlichen Klimavariabilität bereits zu einem erheblichen Anteil anthropogen verursacht wurden (IPCC WGI, 2007 u. IPCC, 2007). Der Autor hat diese Auffassung bereits vor mehr als 15 Jahren vertreten (Caspary & Bárdossy, 1995). Er ist heute der festen Überzeugung, dass der Prozess der anthropogen verursachten Klimaänderung zumindest in unseren Regionen in der Realität bereits wesentlich weiter fortgeschritten ist, als dies die Klimamodellrechnungen ausweisen. Aus diesem Grund ist die Erarbeitung von Anpassungsstrategien und deren Umsetzung in die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis von zentraler Bedeutung.

### Danksagung

Der Autor dankt den Wasserwirtschaftsverwaltungen von Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz und Bayern für die zur Verfügung gestellten Daten.

## 6 Zusammenfassung

Die kombinierte Auswertung der Hochwasser und Großwetterlagen (GWL) in verschiedenen Regionen Südwestdeutschlands zeigt, dass nahezu alle extremen Hochwasser an großen Gewässern durch lang andauernde Perioden (6-23 Tage) der Wetterlage „Westlage zyklonal“ (Wz) im Winter (Dez.-Feb.) und den hieraus resultierenden ergiebigen Niederschlägen ausgelöst wurden. In wenigen Fällen ist auch eine Kombination von Wz mit den Wetterlagen „südliche Westlage“ (Ws), „winkelförmige Westlage“ (wW) und „Nordwestlage zyklonal“ (NWz) maßgebend. Für die Hochwasserbildung an größeren Gewässern Südwestdeutschlands muss die „Westlage zyklonal“ als äußerst „kritische“ Wetterlage angesehen werden. Die Zeitreihen der „kritischen“ Großwetterlage Wz zeigen für die Winter (Dez.-Feb.) des Messzeitraumes 1881/82-2008/09 sowohl für die Häufigkeiten als auch für die maximale Dauer zusammenhängender Wz-Perioden signifikant ansteigende Trends und einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1981. Die Instationarität der kritischen Wetterlagen ist Ursache für den in großen Teilen Südwestdeutschlands nachweisbaren drastischen Anstieg der lang andauernden extremen Winterniederschläge.

Die Wahrscheinlichkeit eines „extrem zonalen Winters“ hat im Zeitraum 1982/83-2008/09 gegenüber dem Zeitraum 1881/82-1981/82 um mehr als den Faktor 8 dramatisch zugenommen. Von den letzten 20 Wintern (1989/90-2008/09) entfallen 7 auf den „kritischen Sektor“. Sie haben Hochwasser- und Sturmschäden in Höhe von mehr als 55 Milliarden US \$ verursacht. Lang



andauernde, zusammenhängende Perioden der „kritischen“ Zirkulationsmuster sind somit im Winter (Dez.-Feb.) für zahlreiche größere Einzugsgebiete von Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz zwar keine hinreichende, aber eine notwendige Bedingung für das Auftreten großer Hochwasser und Winterstürme. Im vorliegenden Beitrag werden zudem die Auswirkungen auf die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis diskutiert.

Als weitere hydrometeorologische Extreme werden Trocken- und Niedrigwasserperioden sowie Hitzewellen analysiert. Die kombinierte Auswertung historischer **Trocken- und Niedrigwasserperioden** und der Großwetterlagen zeigte, dass die GWL „**Hochdruckbrücke Mitteleuropa**“ (**BM**) durch lang andauernde, zusammenhängende BM-Perioden an allen ausgeprägten Trockenperioden im Sommer (JJA) bzw. in den Vegetationsperioden (April – Sept.) maßgeblich beteiligt war. Daneben spielt auch die GWL „Hoch Nordmeer – Island, antizyklonal“ (HNa) eine bedeutende Rolle. Weitere „kritische“, Trockenperioden in der Vegetationszeit (April – Sept.) und im Sommer verursachende GWL sind die antizyklonalen Ostlagen „Hoch Fennoskandien, antizyklonal“ (HFa) und „Hoch Nordmeer-Fenno-skandien, antizyklonal“ (HNFa) sowie die antizyklonale „Nordostlage“ (NEa) und „Südostlage“ (SEa).

Die Kombination der Trockenperioden auslösenden „kritischen“ Trocken-GWL „BM+HNa+NEa+HFa+HNFa+SEa“ zeigt sowohl im Sommer (JJA) als auch in der Vegetationsperiode (April – Sept.) signifikant ansteigende Trends für die Häufigkeiten wie die maximale Dauer zusammenhängender Trocken-GWL. Die signifikanten Bruchpunkte liegen für die Sommerzeitreihen (JJA) im Jahr 1968, für die Vegetationsperioden (April-Sept.) im Jahr 1985. Die extremen Trockenjahre (1921, 1947, 1976, 1991 und 2003) lassen sich als „Peaks“ in den Zeitreihen der Häufigkeiten und maximalen Dauern direkt ablesen. Die **Wahrscheinlichkeit** eines **trockenen, heißen Sommers** (JJA) und einer **extrem trockenen Vegetationsperiode** (April – Sept.) ist für **Südwestdeutschland** im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 um mehr als den **Faktor 4** angestiegen.

Die aus den Beobachtungsdaten abgeleiteten Ergebnisse sind konsistent mit den aus Klimamodellszenarien abgeleiteten Ergebnissen. Wenngleich die Klimaszenarien derzeit noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, so scheint doch in den heute bereits durch die Winterklimaänderung betroffenen Regionen Südwestdeutschlands eine Berücksichtigung der Klimaänderung in der wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis dringend geboten. Die Klimaänderung ist bereits weiter fortgeschritten als die Klimamodelle es derzeit ausweisen. Sowohl im Winter als auch im Sommer hat sich das Klima in Süd- und Südwestdeutschland in Richtung häufigerer und intensiverer hydrometeorologischer Extreme verändert. Die Erarbeitung und verpflichtende Einführung von **Anpassungsmaßnahmen** in die Verwaltungs- und Ingenieurpraxis ist daher bereits heute zwingend erforderlich! Der von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern im Rahmen des KLIWA-Projektes entwickelte Ansatz zur Berücksichtigung der Klimaänderung bei der Festlegung des Bemessungshochwassers ist hierbei ein erster erfolgversprechender Schritt, der sicherlich für die Wasserwirtschaft in Deutschland und darüber hinaus wegweisend sein wird.

## 7 Literatur

- Bárdossy, A., Caspary, H. J. (1990): Detection of Climate Change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881-1989. *Theoretical and Applied Climatology* 42, 155-167.
- Baur, F., Hess, P., Nagel, N. (1944): Kalender der Großwetterlagen Europas 1881 - 1939. Bad Homburg.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (BLfW), (1979): Die Trockenperiode 1976. Eine hydrologische Monographie und eine Niedrigwasseranalyse. *Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 12*, München. 253 S.
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (BLfW), (2004): Wasserwirtschaftlicher Bericht –

- Trockenperiode 2003 - Kurzfassung. München, Mai 2004, 18 S. <http://www.bayern.de/lfw/service/download/trockenperiode2003.pdf>
- Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (BLfW), (2005): Wasserwirtschaftlicher Bericht - Niedrigwasserperiode 2003. Informationsberichte Heft 2/05, Juni 2005, München, 162 S. <http://www.bayern.de/lfw/service/download/nied03.pdf>.
- Becker, P, Bucher, K. (2006): Deutschlands Hitzewarnsystem – erste Erfahrungen. *Vortrag anlässlich 2. nationaler UBA Workshop „Anpassungen an Klimaänderungen in Deutschland“* 17.10.2006, Bundespresseamt, Berlin.
- Black, A. J. (1996): Major flooding and increased flood frequency in Scotland since 1988. *Physics and Chemistry of the Earth* 20, No. 5-6, 463-468.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (1994): Das Hochwasser 1993/94 im Rheingebiet. Koblenz, 96 S.
- Caspary; H. J., Bárdossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? *Wasser & Boden* 47, H. 3, 18-24.
- Caspary, H.J. (1996): Recent winter floods in Germany caused by changes in the atmospheric circulation across Europe. *Physics and Chemistry of the Earth* 20, No. 5-6, 459-462.
- Caspary, H. J., Haeberli, W., 1999: Klimaänderungen und die steigende Hochwassergefahr. In: Graßl, H. (Hrsg.): *Wetterwende*. Campus Verlag, Frankfurt, S. 206-229.
- Caspary, H. J. (2001): Zusammenhang zwischen der Verschärfung des Hochwasserrisikos in Südwestdeutschland seit Mitte der siebziger Jahre und einem veränderten Winterklima. *GAIA - Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics* 10, No. 4, pp. 286-293.
- Caspary, H. J. (2003): „Kritische“ Wetterlagen für die Hochwasserbildung in Südwestdeutschland – Klassifikation und Analyse mit Hilfe von Beobachtungs- und Klimamodelldaten – *KLIWA-Bericht im Auftrag der LfU Baden-Württemberg*, Dez. 2003, Karlsruhe, 52 S.
- Caspary, H. J. (2004): Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland. *KLIWA Bericht* 4, 2. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 135-151.
- Caspary, H. J. (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen. *Gutachten im Auftrag der LUBW*, Karlsruhe, Aug. 2007, 80 S.
- Deutscher Wetterdienst (DWD) (2005): KOSTRA-DWD-2000 Starkniederschläge für Deutschland (1951-2000). *Fortschreibungsbericht*, Offenbach/Main.
- Dietzer, B. (2001): Langzeitverhalten extremer Niederschläge – Ergebnisse aus KLIWA – *KLIWA-Berichte, Heft 1, 1. KLIWA-Symposium 2000, 29.-30.11.2000*, Karlsruhe, S. 46-67.
- Gerstengarbe, F.-W. , Werner, P. C. (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881 - 1992. 4. völlig neubearbeitete Aufl. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 113, Selbstverlag des DWD, Offenbach a.M., 249 S.
- Günther, T. (2004): Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen – *KLIWA Bericht* 4, 2. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 37-56.
- Engel, H. (1994): Das Weihnachtshochwasser 1993 im Rheingebiet. Wasserwirtschaft, Januarhochwasser 1995. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Hennegriff, W., Ihringer, J., Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg. *Korrespondenz Wasserwirtschaft KW* 1. H. 6, S. 309-314.
- Hess, P., Brezowsky, H. (1969): Katalog der Großwetterlagen Europas. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 113, Bd. 15. Selbstverlag des DWD, Offenbach a.M, 14 pp.
- International Commission for the Hydrology of the Rhine (CHR) (1997): Impact of Climate Change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine Basin. *CHR-report no. I-16*, Lelystad, 172 pp.
- IPCC WGII (1996): Climate Change 1995 -Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Sec-



- ond Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). WATSON, R. T., ZINYOWERA, M.C. & MOSS, R. H. (eds.), Cambridge University Press, New York, USA, 876 pp.
- IPCC-WGI (2001): Climate Change 2001 -The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). HOUGHTON, J.T., DING, Y., GRIGGS, D.J., NOGUER, M., Van der LINDEN, P.J., DAI, X, MASKELL, K., JOHNSON, C.A. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 pp.
- IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC WGI (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 996 pp.
- Katzenberger, B. (2004): Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA – Handlungsempfehlungen. *KLIWA Bericht 4, 2*. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 197-204.
- Landesamt für Wasserwirtschaft Rheinland-Pfalz (LfW) (2004): Sommer 2003 – ein wasserwirtschaftlicher Bericht zur Hitzeperiode im Jahre 2003. Mainz, 57 S.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1994): Hochwasser Dezember 1993. *Handbuch Wasser 2*, Nr. 12, Karlsruhe, 57 S.
- Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) (Hrsg.) (2004): Das Niedrigwasserjahr 2003. *Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, H. 85*, Karlsruhe, 36 S.
- Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) (Hrsg.) (2005): Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes-Leitfaden. *Oberirdische Gewässer, Gewässerökologie, H. 92*, Karlsruhe, 91 S.
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) (Hrsg.) (2007): Abfluss-Kennwerte in Baden-Württemberg -DVD. Karlsruhe.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA), 1995: Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Stuttgart, 24 S.
- Münchener Rück (1993): Winterstürme in Europa - Schadanalyse 1990, Schadenpotentiale. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München, 55 S.
- Münchener Rück (2001): Winterstürme Anatol, Lothar und Martin 1999. In: *Münchener Rück, 2001: Topics - Jahresrückblick Naturkatastrophen 2000*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München, S. 22-27.
- Münchener Rück (2008): Wintersturm Kyrill in Europa. In: *Münchener Rück, 2008: Topics Geo - Naturkatastrophen 2007*. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München, S. 17-19.
- Pettitt, A. N. (1979): A non-parametric approach to the change point problem. *Journal Royal Statistical Society (Ser. C)* 28., pp. 126-135.
- Rapp, J., Schönwiese, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturtrends in Deutschland 1891-1990. *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Meteorologie und Geophysik Bd. 5*, Universität Frankfurt, Frankfurt a. M., 255 pp.
- Reich, T. (2005): Langzeitverhalten des Gebietsniederschlages in Baden-Württemberg und Bayern. *KLIWA-Berichte 7*. 160 S.
- Storch, von H., Langenberg, H., Pohlmann, T. (1998): Stürme, Seegang und Sturmfluten im Nordatlantik. In: *Lozan, J., Graßl, H., Hupfer, P., (Hrsg.): Warnsignal Klima - Wissenschaftliche Fakten*. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, S. 182-189.
- Wald, J. (2004): Auswirkungen der Klimaänderungen auf Planungen - Praxisbeispiele. *KLIWA Bericht 4, 2*. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 169-186.

## Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasser

Jürgen Ihringer  
Institut für Wasser und Gewässerentwicklung  
Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

### 1 Einleitung

Für die Planung und Bemessung von wasserwirtschaftlichen Nutzungen und Abflussregelungen an Gewässern werden zur Beurteilung des Abflussgeschehens verschiedene Abfluss-Kennwerte herangezogen. Für nachhaltige, zukunftsorientierte Betrachtungen ist die Kenntnis darüber von besonderer Bedeutung, wie sich diese Abfluss-Kennwerte infolge des Klimawandels zukünftig verändern können. Eine erste Untersuchung über den Einfluss des Klimawandels auf Niedrigwasserabflüsse wurde in Baden-Württemberg auf der Basis des globalen Klimamodells ECHAM4 (Emissionsszenario B2) durchgeführt (IWG 2007, Hennegriff et. al. 2008).

Im Rahmen des KLIWA-Projekts B 2.2.6 „Niedrigwasserverhältnisse - Auswertung der Abflusssimulationen“ erfolgte eine Fortschreibung und räumliche Ausdehnung dieser ersten Erkenntnisse für ausgewählte Einzugsgebiete in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Die Klimaprojektion wurde hierfür aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 für das Emissionsszenario A1B abgeleitet und über das regionale Klimamodell WETTREG-2006 (UBA 2007) auf die Einzugsgebietsskala übertragen. Über Wasserhaushaltsmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie ASGi/WaSiM-ETH in Bayern) lassen sich aus den Vorgaben des Klimamodells Abflusszeitreihen berechnen, die einerseits den heutigen Klimazustand (1971 - 2000) und andererseits den zukünftigen Klimazustand (2021 - 2050) repräsentieren. Die hieraus gewonnene Datengrundlage wurde für die beteiligten Bundesländer gemeinsam untersucht, statistisch ausgewertet und regional bewertet.

Die statistischen Auswertungen und räumlichen Bewertungen beinhalten:

- Jahresregime der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse und Bewertung der daraus abgeleiteten jährlichen und halbjährlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse,
- mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ und T-jährlicher Niedrigwasserabfluss  $NQ_T$  für Jährlichkeiten zwischen  $T = 2$  und  $100$  a,
- Dauer von Niedrigwasserperioden anhand drei verschiedener Kennwerte.

Nach einer Beschreibung der einbezogenen Datengrundlage erfolgt eine zusammenfassende Erläuterung der wesentlichen Ergebnisse. Die Beschreibung der angewandten Auswertemethodik und die Gesamtergebnisse der Untersuchung sind in KLIWA (2009) ausführlich dokumentiert.

### 2 Einbezogene Datengrundlage

Grundlage für die Auswertung der möglichen Veränderung der Niedrigwasserverhältnisse infolge des Klimawandels sind insgesamt 121 Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Die Lage dieser einbezogenen Standorte ist in Abb. 1 dargestellt. Aufgrund der aktuell verfügbaren Abflussinformationen kann die Fläche von Baden-Württemberg vollständig abgedeckt werden. In Bayern liegen die notwendigen Informationen für die Einzugsgebiete von Main sowie von Naab und Regen als nördliche Zuflussgebiete zur Donau vor. Für Rheinland-Pfalz konnte das Einzugsgebiet der Nahe in die Betrachtung einbezogen werden. Weitere Gebiete werden Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein. Tabelle 1





zeigt die Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den verschiedenen Flussgebieten. Insgesamt konnten über die einbezogenen Gewässerstellen Einzugsgebietsgrößen mit einer gesamten Spannweite zwischen  $A_{E0} = 97 \text{ km}^2$  (St. Blasien/Hauensteiner Alb in Baden-Württemberg) und  $A_{E0} = 21\,479 \text{ km}^2$  (Kleinheubach/ Main in Bayern) bewertet werden.

Die Auswertung der Niedrigwasserverhältnisse für den heutigen und den zukünftigen Klimazustand basiert auf Abflusszeitreihen auf der Basis von mittleren Tageswerten  $MQ(d)$ . Zur Beurteilung des heutigen Abflusszustands wurde der Zeitraum 1971 - 2000 und für den zukünftigen Zustand der Zeitraum 2021 - 2050 festgelegt. Zur Beschreibung des heutigen Abflusszustands standen zunächst die beobachteten Abflüsse an den Pegeln und die Modellergebnisse von angepassten Wasserhaushaltsmodellen zur Verfügung. Für den Pegel Tauberbischofsheim/Tauber liegen aus beiden Wasserhaushaltsmodellen (LARSIM und ASGi) Abflussberechnungen vor, da das Einzugsgebiet der Tauber über beide Modelle erfasst wird. Deshalb erhöht sich in der Bewertung der Ergebnisse die Gesamtanzahl der untersuchten Gewässerstellen auf 122.

Da das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf statistischen Ansätzen beruht, konnten sowohl für den Ist-Zustand (1971 - 2000) als auch für den Zukunfts-Zustand (2021 - 2050) jeweils 600 Realisationsjahre abgeleitet werden, die alle im Mittel dem zugeordneten Bezugszeitraum entsprechen. Durch Anwendung der Wasserhaushaltsmodelle wurden die Klimaprojektionen in kontinuierliche Abflusszeitreihen an den einbezogenen Pegeln und Gewässerstellen umgerechnet.

Für die Auswertung der Niedrigwasserverhältnisse wurde das hydrologische Jahr mit Beginn im Juni und Ende im Mai des Folgejahres gewählt. Diese Festlegung beruhte auf der Erkenntnis, dass bei allen Pegeln die niedrigsten Abflüsse in der Regel in den Monaten September und Oktober auftreten. Somit ist sichergestellt, dass bei der Auswertung von Halbjahreswerten die Niedrigwasserphase eines Jahres nicht unterbrochen wird. Das 1. Halbjahr, das die Monate Juni bis November umfasst, wird als „Sommer-Halbjahr“ und das 2. Halbjahr mit den Monaten Dezember bis Mai als „Winterhalbjahr“ bezeichnet.

Der Auswertung standen insgesamt folgende mittlere Tageswerte des Abflusses  $MQ(d)$  als kontinuierliche Zeitreihen zur Verfügung:

- Messung: Messwerte für die Zeitspanne 1971 bis 2000
- Simulation: Abflussberechnung mit den gemessenen meteorologischen Daten für die Zeitspanne 1971 - 2000. Diese Abflussberechnung erlaubt, die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle mit den Messwerten zu vergleichen.
- Ist-Zustand: Abflussberechnungen mit der Klimaprojektion für den heutigen Klimazustand bezogen auf die Zeitspanne 1971 - 2000 (600 Realisationsjahre),
- Zukunfts-Zustand: Abflussberechnungen mit der Klimaprojektion für den zukünftigen Klimazustand bezogen auf die Zeitspanne 2021 - 2050 (600 Realisationsjahre).

Für die statistischen Auswertungen wurden aus den verschiedenen Zeitreihen der Abflusstageswerte abgeleitet:

**Niedrigwasserabfluss:** Die Analyse der Niedrigwasserabflüsse erfolgte anhand der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(m)$  und der jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(J)$ . Beispielhaft sind für den Pegel Rockenau/Neckar in Abb. 2 die monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(m)$  und in Abb. 3 die jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(J)$  dargestellt.

**Niedrigwasserperiode:** Zur Untersuchung und Beurteilung der Länge von Niedrigwasserperioden wurden insgesamt die drei Kennwerte „jährlich größte Niedrigwasserdauer  $ND(J)$ “, „jährli-

che Unterschreitungszahl  $UZ(J)$ “ und „jährliche Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$ “ betrachtet. Diese Kennwerte beziehen sich dabei auf den Schwellenwert  $Q_S$ , der dem jeweiligen mittleren Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  der betrachteten Zeitreihe entspricht. Bei den Zeitreihen für den Zukunfts-Zustand erfolgte eine zusätzliche Auswertung der Kennwerte bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss  $MNQ_{Ist}$  des Ist-Zustands. Damit konnte die gesamte Veränderung von Niedrigwasserperioden bezogen auf den Ist-Zustand beurteilt werden. Abb. 4 zeigt beispielhaft für den Pegel Rockenau/Neckar die abgeleiteten Zeitreihen der jährlichen Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$  für den Ist- und Zukunfts-Zustand über die jeweils vorliegenden 600 Realisationsjahre.

Aufgrund der vorliegenden Datengrundlage ist zu beachten, dass für Baden-Württemberg Aussagen über den Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse nur für solche Einzugsgebiete gemacht werden können, die vollständig über das Wasserhaushaltsmodell LARSIM abgedeckt sind. Dies bedeutet, dass entlang des Hochrheins, des Oberrheins und der Iller lediglich die jeweiligen Zuflussgebiete in die Bewertung einbezogen werden können. Für den Hochrhein, den Oberrhein und die Iller selbst sind bisher keine Aussagen möglich.

### 3 Mittlere monatliche Niedrigwasserabflüsse

Zur Auswertung der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $MNQ(m)$  und der zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte wurden aus den verschiedenen Abflusszeitreihen zunächst die Monatsniedrigstwerte  $NQ(m)$  bestimmt und anschließend über die zugrunde liegende Anzahl von Jahren gemittelt. Aus dem so abgeleiteten Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $MNQ(m)$  erhält man über eine zweite Mittelung die zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte. Beispielhaft zeigt Abb. 5 für den Pegel Rockenau/Neckar den Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(m)$  mit den zugehörigen Halbjahresmittelwerten. Dabei zeigen die Messdaten (schwarz) und die Simulationen (rot) insbesondere in den Monaten September und Oktober, in denen die niedrigsten Abflüsse auftreten, eine sehr gute Übereinstimmung. Auch die Abflüsse für den Ist-Zustand (blau) stimmen mit den Simulationen sehr gut überein. Der Zukunfts-Zustand (grün) zeigt im Sommer-Halbjahr (Juni bis November) eine deutliche Abnahme der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Im Winter-Halbjahr (Dezember bis Mai), das vor allem die Hochwasserperiode umfasst, ist dagegen eine leichte Tendenz zu einer Zunahme vorhanden.

Zur gemeinsamen Bewertung der Ergebnisse über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen lassen sich jeweils zwei Varianten miteinander verglichen. Hierzu wurde, insbesondere zur Beurteilung der zu erwartenden zukünftigen Veränderung, für den Mittelwert des Jahres und der beiden Halbjahre jeweils das Verhältnis berechnet:

$$f = \frac{NQ_{Zuk}}{NQ_{Ist}} = \frac{NQ_{Zukunfts-Zustand}}{NQ_{Ist-Zustand}} \quad \text{mit:} \quad \begin{array}{ll} f < 1,0 & NQ_{Zuk} < NQ_{Ist} \quad \text{Abnahme von } NQ_{Zuk} \\ f = 1,0 & NQ_{Zuk} = NQ_{Ist} \quad \text{keine Veränderung} \\ f > 1,0 & NQ_{Zuk} > NQ_{Ist} \quad \text{Zunahme von } NQ_{Zuk} \end{array}$$

Dieser Verhältniswert  $f$  erlaubt nun einerseits die einbezogenen Pegel und Gewässerstellen miteinander zu vergleichen und andererseits eine räumliche Verteilung vergleichbarer Tendenzen abzuleiten. Abb. 6 zeigt die Verhältniswerte  $f$  für alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen für den mittleren Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  des Sommer-Halbjahres. Die Anordnung der Standorte entspricht dabei der Fließreihenfolge in den jeweiligen Flussgebieten. Deutlich erkennbar ist aus Abb. 6, dass nahezu alle Standorte (117 von 122) deutlich Abnahmen mit  $f < 1$  aufweisen. Lediglich das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz weist bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen des Sommer-Halbjahres Zunahmen auf, die deutlich über  $f = 1,0$  liegen. Zur Klassifizierung der Ergebnisse und zur räumlichen Bewertung vergleichbarer Tendenzen erfolgte eine Beurteilung der Verhältniswerte  $f$  nach Tabelle 2. Mit dieser Klassifikation er-



geben sich nach Tabelle 3 für die mittleren Niedrigwasserabflüsse des Jahres und der beiden Halbjahre folgende Veränderungen:

- Im Sommer-Halbjahr zeigen 117 von 122 Pegel und Gewässerstellen (96%) abnehmende mittlere Niedrigwasserabflüsse MNQ und nur 5 von 122 Standorten (4%) zunehmende Werte. Im Mittel über alle Standorte nehmen die mittleren Niedrigwasserabflüsse MNQ im Sommer-Halbjahr um 10% ab, wobei eine sehr geringe Abweichung ( $< 2,5\%$ ) nur am Pegel Sachsenheim/Wern mit  $f = 1,01$  vorhanden ist. Aus dieser allgemeinen Tendenz weicht jedoch das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz deutlich ab, da in diesem Gebiet mit Ausnahme des Oberlaufs der Nahe nur Zunahmen vorhanden sind.
- Im Winter-Halbjahr ergibt sich im Mittel über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen eine sehr geringe Zunahme der mittleren Niedrigwasserabflüsse MNQ um 2%. Insgesamt zeigen im Winter-Halbjahr 38 von 122 einbezogenen Standorten (31%) Abnahmen und 84 von 122 Standorten (69%) Zunahmen, wobei für 42 Standorte (34%) die Abweichungen sehr gering und somit unbedeutend sind.
- Der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ des Jahres, abgeleitet aus den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m), zeigt mehrheitlich abnehmende Tendenzen. An 98 von 122 Standorten (80%) ergeben sich Abnahmen und an 24 Standorten (20%) Zunahmen, wobei für 57 Standorte (47%) die Abweichungen unbedeutend sind. Im Mittel über alle Standorte ist eine geringe Abnahme von 2% ( $f = 0,98$ ) vorhanden.

Der Zukunfts-Zustand zeigt somit im Vergleich zum Ist-Zustand sehr eindeutige Tendenzen. Im Sommer-Halbjahr ergeben sich im Vergleich zum heutigen Zustand an den weitaus meisten Pegeln und Gewässerstellen deutliche Abnahmen in den mittleren Niedrigwasserabflüssen. Lediglich das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt im Sommer-Halbjahr zunehmende Niedrigwasserabflüsse. Im Winter-Halbjahr steigt die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Zunahmen deutlich an, wobei jedoch ca. 34% der Standorte sehr geringe, unbedeutende Veränderungen aufweisen. Bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen des Jahres liegen an ca. 47% der Pegel und Gewässerstellen unbedeutende Veränderungen vor, wobei jedoch aufgrund der Anzahl der Standorte mit abnehmenden und zunehmenden Veränderungen auch im Jahresmittelwert die Tendenz zu Abnahmen deutlich erkennbar ist.

Bewertet man die Veränderungen, die beim Zukunfts-Zustand zu erwarten sind, über die Fließabfolge der Pegel und Gewässerstellen (Abb. 6), so erkennt man deutlich, dass zu- und abnehmende Tendenzen regionsspezifisch sehr ähnlich sind. Beispielsweise ergeben sich in den Flussgebieten von Donau und Bodensee größenordnungsmäßig sehr vergleichbare Abnahmen. Entlang des Hochrheins werden die Abnahmen allmählich größer, erreichen im Bereich der Elz am Oberrhein ein Maximum (kleinste Änderungsfaktoren) und schwächen sich anschließend bis zum nördlichen Oberrhein wieder deutlich ab.

Zur räumlich differenzierten Bewertung der Ergebnisse wurden deshalb Regionen abgeleitet, in denen die Pegel und Gewässerstellen vergleichbare Tendenzen aufweisen. Durch Anwendung der Klassifikation aus Tabelle 2 können die zu erwartenden Veränderungen im Niedrigwasserverhalten, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m), räumlich dargestellt und interpretiert werden.

Hierzu sind in Abb. 7 getrennt für das Jahr (obere Karte) und für das Sommer-Halbjahr (untere Karte) die zu erwartenden Veränderungen des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ dargestellt. Bei diesen Übersichtskarten ist zu beachten, dass einzelne Pegel und Gewässerstellen, die innerhalb einer bestimmten Region ein Verhalten aufweisen, das vom Verhalten der umgebenden Standorte der Region abweicht, auf das Verhalten der Region gesetzt wurden. Damit soll erreicht werden, dass eventuell vorhandene Modellierungsunsicherheiten nicht in die Inter-

pretation des regionsspezifischen Verhaltens übertragen werden. Aus den räumlichen Ergebnisdarstellungen ergibt sich:

- Mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluss MNQ: Die Einzugsgebiete im Oberlauf der Donau oberhalb der Einmündung der Lauchert, die Zuflussgebiete zum gesamte Hoch- und Oberrhein sowie das untere Neckargebiet ab dem Einzugsgebiet der Enz zeigen in Baden-Württemberg keine Veränderungen. Ebenso ergeben sich keine Veränderungen im Einzugsgebiet des Regens oberhalb der Einmündung des Chamb im Osten von Bayern. Keine Veränderungen zeigen in Bayern weiterhin die nördlichen Teilgebiete des Einzugsgebiets des Mains. Dieser Bereich beginnt bei der Rodach im Osten und erstreckt sich nach Westen bis unterhalb der Einmündung der Fränkischen Saale.

Schwache Abnahmen zeigen die gesamten östlich gelegenen Einzugsgebiete in Baden-Württemberg mit der Donau ab der Lauchert und der gesamte Zuflussbereich zum Bodensee. In Bayern ergeben sich schwache Abnahmen beginnend im Osten im Einzugsgebiet von Regen ab dem Zufluss des Chamb und dem gesamten Einzugsgebiet der Naab. Ebenso zeigt das Einzugsgebiet des Mains mit Ausnahme der nördlichen Zuflussgebiete und dem Gebiet der Regnitz schwache Abnahmen. Deutliche Abnahmen dagegen sind im Einzugsgebiet der Regnitz oberhalb des Pegels Pettstadt vorhanden. Die Nahe in Rheinland-Pfalz dagegen weist flächendeckend deutliche Zunahmen auf.

- Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ des Sommer-Halbjahres: Im Sommer-Halbjahr treten die abnehmenden Tendenzen des Niedrigwasserabflusses verstärkt hervor und sind auch räumlich deutlich ausgeprägter verteilt. Mit Ausnahme von schwachen Abnahmen, die in Teilgebieten südlich der baden-württembergischen Donau, den westlichen Zuflussgebieten zum Bodensee sowie den nordwestlichen gelegenen Teilgebieten von Enz, nördlichem Oberrhein und nördlichen Zuflüssen im Unterlauf des Neckars auftreten, ergeben sich in Baden-Württemberg vorwiegend deutliche Abnahmen. Deutliche Abnahmen sind auch in Bayern großräumig vertreten. Betroffen sind dabei vor allem die Einzugsgebiete von Naab, Oberer Main sowie von Regnitz und der Oberlauf der Tauber. Deutliche Abnahmen zeigt auch der Gewässerlauf des Unteren Main. Schwache Abnahmen ergeben sich lediglich in den östlich gelegenen Gebieten (Einzugsgebiet des Regens und östlich gelegene Teilgebiete von Pfreimd und Schwarzbach im Einzugsgebiet der Naab) und in den nördlichen Zuflussgebieten zum Main (Rodach im Osten und Fränkischer Saale im Westen). Die Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt an der Glan deutliche Zunahmen und im restlichen Einzugsgebiet bis zur Mündung in den Rhein schwache Zunahmen.

#### 4 Jährlicher Niedrigwasserabfluss

Zur Beurteilung des jährlichen Niedrigwasserabflusses wurden auf Basis der jährlich niedrigsten Abflüsse  $NQ(J)$  der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss MNQ und die T-jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ_T$  für Jährlichkeiten von  $T = 2, 5, 10, 20, 50$  und  $100$  Jahren ausgewertet. Die T-jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ_T$  ergaben sich über eine Anwendung der Methoden der Extremwertstatistik. Abb. 8 zeigt exemplarisch die Extremwertstatistik im Wahrscheinlichkeitsnetz für die jährlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Rockenau/Neckar. Dargestellt sind hierin die jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(J)$  aus der Simulation (schwarz) sowie die  $NQ(J)$ -Werte abgeleitet aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün). Zu beachten ist hierbei, dass im Gegensatz zu der Simulation (schwarz) die  $NQ(J)$ -Werte aus dem Klimamodell sowohl für den Ist- als auch für den Zukunfts-Zustand über jeweils 600 Realisationsjahre vorliegen. Wie der Vergleich der Datenpunkte („plotting positions“) zeigt, stimmt das Klimamodell für den Ist-Zustand (blau) sehr gut mit der Simulation (schwarz) überein. Der Zukunfts-Zustand (grün) weist dagegen über den gesamten Abflussbereich kleinere Niedrigwasserabflüsse auf. Dabei zeigt sich die Tendenz, dass mit steigender Jährlichkeit (kleinere Abflüsse) die beiden Klimamodellvarianten sich allmählich annähern.



Zur Ermittlung der zu erwartenden Veränderungen und auch zu deren räumlichen Bewertung wurden analog zu den Auswertungen der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse  $NQ(m)$  für die verschiedenen abgeleiteten Kennwerte jeweils das Verhältnis des Kennwerts für den Zukunfts-Zustand zum Ist-Zustand ermittelt. Die Klassifikation der Verhältnisse  $f$  erfolgte ebenfalls nach Tabelle 2. Zusammenfassend sind in Tabelle 4 die statistischen Kenngrößen für den mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  sowie für den 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss ( $NQ_{10}$ ,  $NQ_{100}$ ) aufgelistet. Hieraus ergibt sich:

- Beim mittleren Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  zeigen 121 Standorte Änderungsfaktoren  $f$  zwischen dem Zukunfts-Zustand und dem Ist-Zustand, die alle deutlich unter der Neutralitätsgrenze von  $f = 1,0$  liegen. Lediglich der Pegel Sachsenheim/Wern in Bayern weist einen Faktor von  $f = 1,02$  (geringe Zunahme) auf. Im Mittel über alle Standorte ergibt sich eine Abnahme von 10% ( $f_{mit} = 0,90$ ).
- Beim 10-jährlichen Niedrigwasserabfluss  $NQ_{10}$  ergibt sich im Mittel über alle 122 Standorte ebenfalls eine mittlere Abnahme von 10% ( $f = 0,90$ ).
- Bis zum 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss  $NQ_{100}$  werden die Abnahmen etwas kleiner. Der Mittelwert über alle Standorte liegt bei  $f_{mit} = 0,92$  (8% Abnahme). Von Zunahmen sind beim 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss insgesamt 14 Standorte betroffen und 20 Standorte weisen Änderungen auf, die im Bereich  $\pm 2,5\%$  liegen. Bei diesem Vergleich reduziert sich die Gesamtanzahl der Standorte um den Pegel Laufermühle/Aisch, da an diesem Pegel die Abflüsse ab dem 50-jährlichen Niedrigwasserabfluss  $NQ_T = 0 \text{ m}^3/\text{s}$  aufweisen.

Insgesamt zeigt der Vergleich der Abflussberechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand und Zukunfts-Zustand, dass eine deutliche Tendenz zur Abnahme der mittleren jährlichen Niedrigwasserabflüsse  $MNQ$  vorhanden ist. Diese Tendenz nimmt mit steigender Jährlichkeit leicht ab, wobei die Abnahmen auch bei großen Jährlichkeiten deutlich überwiegen.

Zur räumlich differenzierten Bewertung der Ergebnisse wurden auch bei diesen Kennwerten Regionen abgeleitet, in denen die Pegel und Gewässerstellen vergleichbare Tendenzen aufweisen. Dabei wurde zur Klassifizierung der Veränderungen bezüglich der Faktoren die Bereichseinteilung aus Tabelle 3 in Schritten von jeweils 10% vorgenommen. Durch Anwendung dieser Klassifikation können die zu erwartenden Veränderungen beim Niedrigwasserabfluss räumlich dargestellt und interpretiert werden. In Abb. 9 sind für den mittleren Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  (obere Karte) und für den 100-jährlichen Niedrigwasserabfluss (untere Karte) die zu erwartenden Veränderungen räumlich dargestellt. Aus diesen Ergebnisdarstellungen ergibt sich:

- Beim mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  sind in allen einbezogenen Einzugsgebieten von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz Abnahmen im Niedrigwasserabfluss zu erwarten. Diese Abnahmen weisen sowohl schwache und deutliche als auch starke Veränderungen auf. Von starken Abnahmen betroffen sind die Zuflussgebiete zum südlichen Oberrhein zwischen der Wiese und der Elz.

Deutliche Abnahmen treten zunächst auf in einem Streifen, der sich vom Südwesten in Baden-Württemberg zum Nordosten von Bayern erstreckt. In diesem Streifen liegen der Oberlauf der Donau bis zum Pegel Kirchen-Hausen, die nördlichen Zuflüsse zur badenwürttembergischen Donau und der Gewässerlauf der Donau bis zur Einmündung der Iller. Am Neckar betrifft es den gesamten Oberlauf bis oberhalb der Enz. Im weiteren Verlauf des Neckars sind es die östlichen Zuflüsse bis unterhalb der Jagst und infolge davon der anschließende Neckarlauf bis zur Einmündung in den Rhein. Die deutlichen Abnahmen finden ihre Fortsetzung über das obere Einzugsgebiet der Tauber (oberhalb des Pegels Archshofen) ins Regnitz-Gebiet sowie in die Einzugsgebiete des Roten Mains und des Oberlaufs der

Naab oberhalb des Pegels Wildenau/Haidennaab. Weiterhin sind von deutlichen Abnahmen betroffen die Einzugsgebiete von Argen und Schussen als Zuflüsse zum Bodensee.

Schwache Abnahmen sind in den restlichen Gebieten von Baden-Württemberg und Bayern vorhanden. Auch das gesamte Einzugsgebiet der Nahe weist bei den mittleren Niedrigwasserabflüssen flächendeckend schwache Abnahmen auf.

- Der 100-jährlicher Niedrigwasserabfluss  $NQ_{100}$  zeigt in Baden-Württemberg und Bayern sehr ähnliche räumliche Tendenzen, wobei die Abnahmen jedoch insgesamt schwächer sind. Der oben genannte Streifen vom Südwesten von Baden-Württemberg zum Nordosten von Bayern ist zwar noch erkennbar, wobei die Änderungstendenzen jedoch deutlich abgeschwächt sind. Die starken Abnahmen im Bereich des südlichen Oberrheins gehen auf deutliche Abnahmen zurück. Im Oberlauf der Donau oberhalb des Zusammenflusses von Brigach und Breg treten dagegen starke Abnahmen auf. Deutliche Abnahmen verbleiben in Baden-Württemberg in den Zuflussgebieten zum südlichen Oberrhein oberhalb der Elz, in den Einzugsgebieten von Argen, Schussen, den westlichen Zuflüssen zur Iller und dem Einzugsgebiet der Rot oberhalb der Einmündung der Iller in die Donau. Deutliche Abnahmen verbleiben weiterhin im Oberlauf der Tauber oberhalb des Pegels Archshofen sowie im Einzugsgebiet der Regnitz.

Ein Wechsel zu keinen bzw. sehr schwachen Veränderungen zeigen sich im mittleren Verlauf der baden-württembergischen Donau unterhalb der Einmündung der Bära und oberhalb der Großen Lauter. Auch der Unterlauf der Donau oberhalb der Einmündung der Iller zeigt schwache Abnahmen. In Bayern sind im Einzugsgebiet des Schwarzen Regens oberhalb der Einmündung des Chamb keine Veränderungen zu erwarten. Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz treten im Teileinzugsgebiet der Glan keine Veränderungen auf. Im restlichen Einzugsgebiet der Nahe ist ein Wechsel zu schwachen Zunahmen vorhanden.

Zusammenfassend ergibt sich für den jährlichen Niedrigwasserabfluss, dass flächendeckend in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz beim Zukunfts-Zustand bezogen auf die Zeitspanne 2021 - 2050 bei häufigen Niedrigwassersituationen Abnahmen zu erwarten sind. Diese sind beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ insgesamt sehr stark ausgeprägt. Werden die Niedrigwassersituationen seltener (steigende Jährlichkeit) schwächen sich die Veränderungen allmählich ab. Bei der 100-jährlichen Situation tendieren bereits einige Gebiete zum Niedrigwasserverhalten des heutigen Zustands. Im Einzugsgebiet der Nahe ist mit Ausnahme der Glan bereits ein Wechsel zu deutlichen Zunahmen vorhanden.

## 5 Niedrigwasserperioden

Neben dem Niedrigwasserabfluss ist zur Beurteilung von Niedrigwasserverhältnissen auch die Dauer von Niedrigwasserperioden von wesentlicher Bedeutung. Zur Untersuchung und zur Beurteilung der Auswirkung der Klimaänderung auf die Dauer von Niedrigwasserperioden wurden aus den verschiedenen Abflusszeitreihen als maßgebliche Kennwerte die jährlich längste Niedrigwasserdauer  $ND(J)$ , die jährlichen Unterschreitungszahlen  $UZ(J)$  und die jährlich längste Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$  herangezogen. Diese Abflusskennwerte wurden jeweils auf einen Abflussschwellenwert  $Q_S$  bezogen, der dem mittleren jährlichen Niedrigwasserabfluss MNQ entspricht. Stellvertretend werden hier die Ergebnisse für die jährliche Dauer des Abflussdefizits  $QD(J)$  dargestellt. Die statistische Auswertung dieser Kennwerte erfolgte analog zu den Niedrigwasserabflüssen  $NQ(J)$ .

Abb. 10 zeigt exemplarisch für den Pegel Rockenau/Neckar die Extremwertstatistik im Wahrscheinlichkeitsnetz mit den jährlichen Dauern des Abflussdefizits  $QD(J)$  aus der Simulation (schwarz). Im Vergleich hierzu sind eingetragen die  $QD(J)$ -Werte aus dem Klimamodell für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand bezogen auf den Schwellenwert  $MNQ_{Zuk}$  (grün)



und auf den Schwellenwert  $MNQ_{Ist}$  (braun). Dieser Vergleich zeigt, dass das Klimamodell für den Ist-Zustand im Mittel die  $QD(J)$  der Simulation recht gut wiedergibt. Die Dauern für den Zukunfts-Zustand bezogen auf Schwellenwert  $MNQ_{Zuk}$  stimmen mit dem Ist-Zustand im Bereich der Jährlichkeiten von ca.  $T > 20$  a gut mit dem Ist-Zustand überein. Bei größeren Jährlichkeiten sind tendenziell kürzere Dauern des Abflussdefizits vorhanden. Da an diesem Pegel der zukünftige mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss  $MNQ$  abnimmt, ergibt sich eine Zunahme in der Dauer des Abflussdefizits beim Schwellenwert  $MNQ_{Ist}$ . Diese Zunahme drückt sich deutlich in den nahezu parallel verschobenen Datenpunkten aus. Somit zeigt dieser Pegel insbesondere bei den kleineren Jährlichkeiten eine Verlängerung der Dauer einer Niedrigwasserperiode im Vergleich zum Ist-Zustand.

Über alle einbezogenen Pegel und Gewässerstellen sind die zu erwartenden Veränderungen in der Dauer des Abflussdefizits  $QD$  in Tabelle 6 bezogen auf die Schwellenwerte  $MNQ_{Zuk}$  und  $MNQ_{Ist}$  für die mittlere jährliche Dauer  $MQD$  sowie für die 10- und 100-jährlichen Dauern ( $QD_{10}$ ,  $QD_{100}$ ) zusammengestellt. Hieraus ergibt sich bezogen auf die beiden untersuchten Schwellenwerte:

- Die mittlere Dauer des Abflussdefizits  $MQD$  bezogen auf den Schwellenwert  $MNQ_{Zuk}$  zeigt im Mittel eine Zunahme von 5% ( $f_{mit} = 1,05$ ). Dabei sind an 40 der 122 Standorten Abnahmen und an 82 Standorten Zunahmen vorhanden, wobei für 47 Standorte die Veränderungen mit  $f = 1 \pm 0,05$  unbedeutend sind. Beim 10-jährlichen Wert  $QD_{10}$  ergibt sich zunächst eine geringe Zunahme auf 8% ( $f_{mit} = 1,08$ ) und beim 100-jährlichen Wert  $QD_{100}$  sind im Mittel Abnahmen von 4% ( $f_{mit} = 0,96$ ) vorhanden. Die Anzahl der Standorte mit Abnahmen steigt dabei auf 81 an und die Anzahl mit Zunahmen nimmt dementsprechend auf 41 ab. Dabei geht die Anzahl der Standorte mit unbedeutenden Veränderungen ( $f < 1 \pm 0,05$ ) auf 35 zurück.
- Bei der jährlichen Dauer des Abflussdefizits  $QD$  bezogen auf den Schwellenwert  $MNQ_{Ist}$  (Ist-Zustand) ist die zukünftige Veränderung der Dauer von Niedrigwasserperioden am deutlichsten ausgeprägt. Die mittlere Dauer des Abflussdefizits  $MQD$  beträgt  $f_{mit} = 1,71$  und drückt somit eine mittlere Zunahme von 71% aus. Zunahmen bis 50% ( $f = 1,0-1,5$ ) zeigen 23 Standorte und an 98 Standorten sind die Zunahmen größer als 50% ( $f > 1,5$ ). Mit steigender Jährlichkeit gehen die Zunahmen deutlich zurück. Beim 10-jährlichen Kennwert  $QD_{10}$  ergibt sich eine mittlere Änderung von  $f_{mit} = 1,61$  (Zunahme von 61%) und beim 100-jährlichen Wert  $QD_{100}$  nur noch eine mittlere Änderung von  $f_{mit} = 1,19$  (Zunahme von 19%). Dies wird wiederum bestätigt durch die Anzahl von Standorten in den verschiedenen Änderungsklassen. Während bei der 10-jährlichen Dauer  $QD_{10}$  38 Standorte in der Klasse  $f = 1,0-1,5$  (Zunahme bis 50%) und 82 Standorte in der Klasse  $f > 1,5$  (Zunahme größer 50%) liegen, weist der 100-jährliche Kennwert  $QD_{100}$  in der Klasse  $f = 1,0-1,5$  83 Standorte und in der Klasse  $f > 1,5$  15 Standorte auf. Mit steigender Jährlichkeit erhöht sich gleichzeitig wiederum die Anzahl der Pegel und Gewässerstellen mit Abnahmen. Beim 10-jährlichen Kennwert  $QD_{10}$  betrifft dies 2 Standorte und bis zum 100-jährlichen Kennwert  $QD_{100}$  steigt die Anzahl in dieser Klasse auf 24 Standorte an.

Die Auswertung des Zukunfts-Zustands, bezogen auf den Abflussschwellenwert  $MNQ_{Zuk}$ , zeigt somit für die betrachteten Kennwerte der Dauer einer Niedrigwasserperiode, dass keine signifikanten Veränderungen zu erwarten sind. Lediglich bei hohen Jährlichkeiten ist eine gewisse abnehmende Tendenz vorhanden. Wird die Dauer des Abflussdefizits für den Zukunfts-Zustand jedoch auf den Schwellenwert  $MNQ_{Ist}$  (Ist-Zustand) bezogen, sind infolge des Klimawandels erhebliche Zunahmen in der Dauer von Niedrigwasserperioden zu erwarten. Häufige Niedrigwasserperioden sind dabei am stärksten betroffen. Mit steigender Jährlichkeit nimmt die zunehmende Tendenz jedoch deutlich ab.

Zur räumlich differenzierten Bewertung der Ergebnisse wurden auch bei diesen Kennwerten Regionen abgeleitet, in denen die Pegel und Gewässerstellen vergleichbare Tendenzen auf-

weisen. Dabei wurde zur Klassifizierung der Veränderungen bezüglich der Faktoren die Bereichseinteilung aus Tabelle 5 in Schritten von jeweils 25% vorgenommen. Durch Anwendung dieser Klassifikation können die zu erwartenden Veränderungen bei der Dauer einer Niedrigwasserperiode räumlich dargestellt und interpretiert werden. In Abb. 11 sind für die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD (obere Karte) und für die 100-jährliche Dauer  $QD_{100}$  (untere Karte), jeweils bezogen auf den Schwellenwert  $MNQ_{Ist}$  (Ist-Zustand), die zu erwartenden Veränderungen räumlich dargestellt. Aus diesen Ergebnisdarstellungen ergibt sich:

- Die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD zeigt in allen betrachteten Flussgebieten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, dass großräumig deutliche und starke Zunahmen vorhanden sind. Von starken Zunahmen betroffen ist der gesamte süd- und südöstliche Bereich des Untersuchungsgebiets unterhalb einer Linie, die sich vom Westen von Baden-Württemberg an der Pfinz zum Nordosten in Bayern an der Rodach erstreckt. Die Gebiete oberhalb dieser Linie weisen deutliche Zunahmen einschließlich dem Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz auf. Ausgenommen hiervon sind lediglich die Einzugsgebiete im Kraichgau mit schwachen Zunahmen.
- Mit steigender Jährlichkeit ergeben sich bei der Dauer von Niedrigwasserperioden deutliche Veränderungen. Bei der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits  $QD_{100}$  reicht die Spannweite der Veränderungen von deutlichen Zunahmen bis zu schwachen Abnahmen. Deutliche Zunahmen ergeben sich in Baden-Württemberg in den gesamten Zuflussgebieten zum Rhein ab der Hauensteiner Alb am Hochrhein bis oberhalb der Einmündung des Neckars am Oberrhein. Weitere deutliche Zunahmen sind im Südosten an der Donau ab der Baierzer Rot, in den Zuflussgebieten zur Iller sowie an der Argen und der Wolfegger Ach vorhanden. Im Einzugsgebiet des Neckars zeigen die östlichen Zuflüsse zum Neckar ab der Fils bis zur Jagst und in der östlichen Fortsetzung auch der Oberlauf der Tauber bis zum Pegel Bad Mergentheim diese Zunahmeklasse. In Bayern ergeben sich deutliche Zunahmen im Oberlauf der Regnitz oberhalb des Pegels Hüttendorf sowie im östlich orientierten Teilgebiet von Warmbach, Pfreimd und im weiteren Verlauf der Naab bis zur Einmündung in die Donau. Ebenso ist das südlich anschließende Einzugsgebiet des Chamb von dieser Klasse betroffen.

Schwache Zunahmen ergeben sich im Süden von Baden-Württemberg in einem Band, das sich von den Zuflussgebieten von Riß und Rottum zur Donau über die Zuflussgebiete zum Bodensee westlich von Argen und Wolfegger Ach bis zur Wutach am Hochrhein erstreckt. Weitere schwache Zunahmen zeigen das restliche Einzugsgebiet des Neckars mit Ausnahme des Oberlaufs oberhalb des Pegels Horb. In Bayern treten diese Veränderungen vor allem in den Einzugsgebieten am Unteren Main und an der unteren Regnitz auf. Weitere kleinere Bereiche sind das im Nordosten gelegene Einzugsgebiet der Rodach und im östlichen Teil des Untersuchungsgebiets die Vils und der Oberlauf der Naab sowie der Regen unterhalb des Chamb.

Keine signifikanten Veränderungen ergeben sich in Bayern in den Einzugsgebieten von Schwarzem Regen, Main oberhalb der Rodach und Itz. In Baden-Württemberg sind keine Veränderungen vorhanden im Oberlauf des Neckars oberhalb des Pegels Horb sowie an der Donau linksseitig unterhalb der Lauchert und rechtsseitig zwischen Ablach und oberhalb Riß. Schwache Abnahmen ergeben sich in Baden-Württemberg in den Einzugsgebieten entlang der Donau zwischen dem Zusammenfluss von Brigach und Breg bis unterhalb der Lauchert und in der nördlichen Fortsetzung an der Eyach im Neckar-Gebiet.

Im Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz sind drei verschiedene Tendenzen vorhanden. Der Oberlauf der Nahe oberhalb der Glan zeigt schwache Zunahmen, die Glan weist keine signifikanten Veränderungen auf und der Unterlauf der Nahe zeigt zwischen dem Pegel Boos und der Einmündung in den Rhein schwache Abnahmen.





Zusammenfassend ergibt sich aus der räumlichen Bewertung der zu erwartenden Veränderungen bei den Kennwerten der Niedrigwasserperiode: Häufige Niedrigwasserperioden, die über die mittlere Dauer des Abflussdefizits MQD erfasst sind, treten im gesamten Untersuchungsgebiet von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz großräumig mit starken Zunahmen auf. Mit steigender Jährlichkeit schwächen sich die Zunahmen kontinuierlich deutlich ab. Bei den 100-jährlichen Kennwerten findet in verschiedenen Regionen für die zu erwartenden Veränderungen ein Wechsel sowohl in die Klasse „keine Veränderung“ als auch in die Klasse „schwache Abnahmen“ statt.

## 6 Zusammenfassung

Für die Planung und Bemessung von wasserwirtschaftlichen Nutzungen und Abflussregelungen an Gewässern werden zur Beurteilung des Abflussgeschehens verschiedene Abfluss-Kennwerte herangezogen. Für nachhaltige, zukunftsorientierte Betrachtungen ist die Kenntnis darüber von besonderer Bedeutung, wie sich die Abfluss-Kennwerte infolge des Klimawandels zukünftig verändern können. Im Rahmen des KLIWA-Projekts B 2.2.6 „Niedrigwasserverhältnisse - Auswertung der Abflusssimulationen“ wurde das zukünftige Niedrigwasserverhalten ausgewählter Einzugsgebiete in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz untersucht. Die Klimaprojektion hierzu wurde aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 für das Szenario A1B abgeleitet und über das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf die Einzugsgebietskala übertragen. Über Wasserhaushaltsmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie ASGI/ WaSiM-ETH in Bayern) lassen sich aus den Vorgaben des Klimamodells Abflusszeitreihen berechnen, die einerseits den heutigen Klimazustand (1971 - 2000) und andererseits den zukünftigen Klimazustand (2021 - 2050) repräsentieren.

Zur Untersuchung der Veränderung von Niedrigwasserverhältnissen wurden insgesamt 121 Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern (Main-, Regen- und Naab-Gebiet) und Rheinland-Pfalz (Nahe-Gebiet) einbezogen. Betrachtete Kennwerte für das Niedrigwasserverhalten waren die monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) und die daraus abgeleiteten Jahres- und Halbjahresmittelwerte, die jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(J) sowie drei verschiedene Kennwerte für die Dauer von Niedrigwasserperioden. Die Klimaprojektion wurde aus dem globalen Klimamodell ECHAM5 für das Szenario A1B abgeleitet und über das regionale Klimamodell WETTREG-2006 auf die Einzugsgebietskala übertragen. Über Wasserhaushaltsmodelle (LARSIM in Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz sowie ASGI/WaSiM-ETH in Bayern) lassen sich aus den Vorgaben des Klimamodells Abflusszeitreihen berechnen, die einerseits den heutigen Klimazustand (1971 - 2000) und andererseits den zukünftigen Klimazustand (2021 - 2050) repräsentieren.

Zusammenfassend ergibt sich für die einbezogenen Einzugsgebiete:

- Die Niedrigwasserabflüsse nehmen in Baden-Württemberg und Bayern flächendeckend ab. Dabei ist die größte Veränderung bei den häufigen Niedrigwassersituationen vorhanden. Mit zunehmender Jährlichkeit schwächen sich die Abnahmen allmählich ab.
- Infolge der Abnahme der Niedrigwasserabflüsse steigt die Dauer von Niedrigwasserperioden bezogen auf den heutigen Klimazustand erheblich an. Auch diese Tendenz ist bei mittleren (häufigen) Niedrigwasserperioden am stärksten ausgeprägt. Werden die Niedrigwasserperioden seltener (steigende Jährlichkeit) nehmen auch hier die Veränderungen kontinuierlich ab.
- Das Einzugsgebiet der Nahe in Rheinland-Pfalz zeigt bei häufigen Niedrigwasserverhältnissen eine zunehmende Tendenz in den Abflüssen. Erst mit steigender Jährlichkeit sind auch in diesem Gebiet abnehmende Niedrigwasserabflüsse zu erwarten.

## 7 Literatur

- Hennegriff, W.; Ihringer, J.; Kolokotronis, V.; (2008): Prognose der Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg; Korrespondenz Wasserwirtschaft, 2008(1), Nr. 6
- IWG (2007): Auswirkung des Klimawandels auf Mittlere Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse; Projektbericht HY 5/4 im Auftrag der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe
- KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz - Untersuchungen an ausgewählten Pegeln und Gewässerstellen; Arbeitskreis KLIWA, KLIWA-Berichte Heft 14
- UBA (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen - das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG; Umwelt-Bundesamt 2007



## Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 1: Einbezogene Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

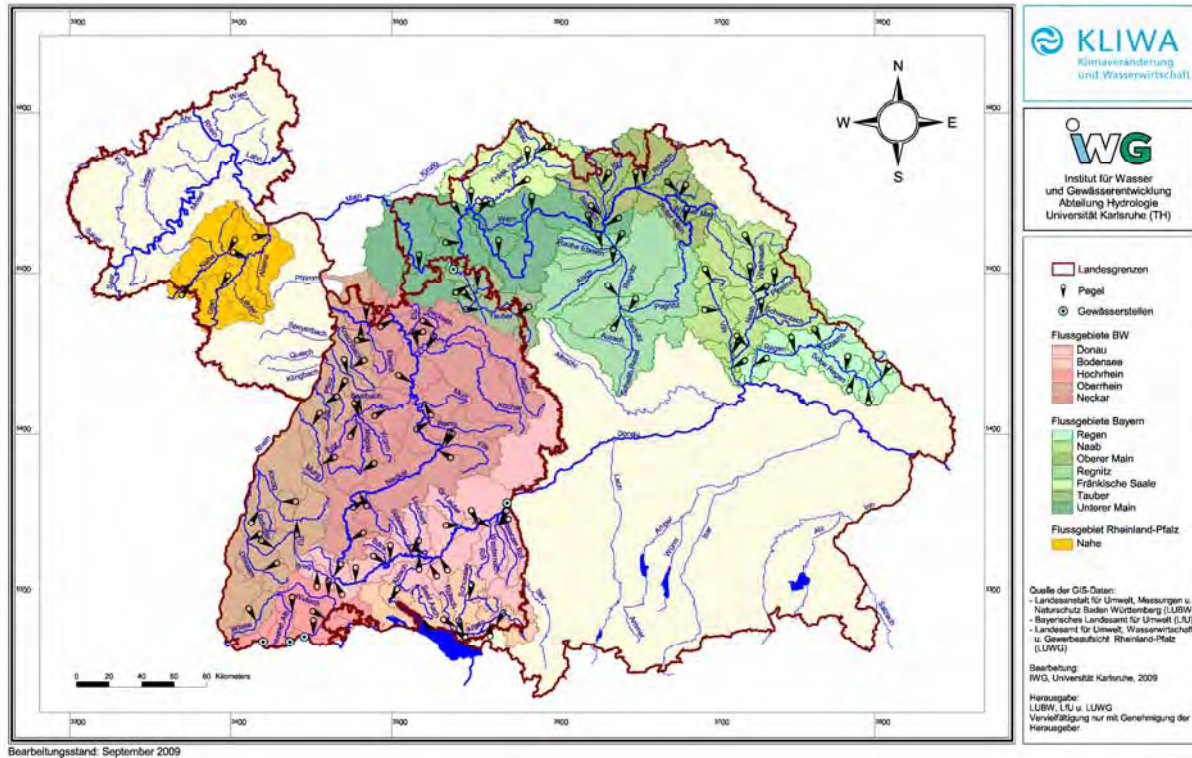


Abb. 1: Einbezogene Pegel und Gewässerstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

Tab. 1: Anzahl der einbezogenen Pegel und Gewässerstellen in den untersuchten Flussgebieten und Spannweite der Einzugsgebietsflächen  $A_{E0}$

Flussgebiet	Anzahl der Pegel und Gewässerstellen	Spannweite der Einzugsgebietsfläche $A_{E0}$ [km <sup>2</sup> ]
Donau	17	134 - 5 427
Bodensee	8	140 - 782
Hoch- und Oberrhein	20	97 - 1 138
Neckar	22	156 - 13 760
Regen	7	174 - 2 660
Naab	10	226 - 5 424
Oberer Main	8	245 - 4 244
Regnitz	5	946 - 2 671
Tauber	6	109 - 1 790
Unterer Main	13	146 - 21 480
Nahe	5	320 - 4 001
<b>gesamt</b>	<b>121</b>	<b>97 - 21 480</b>

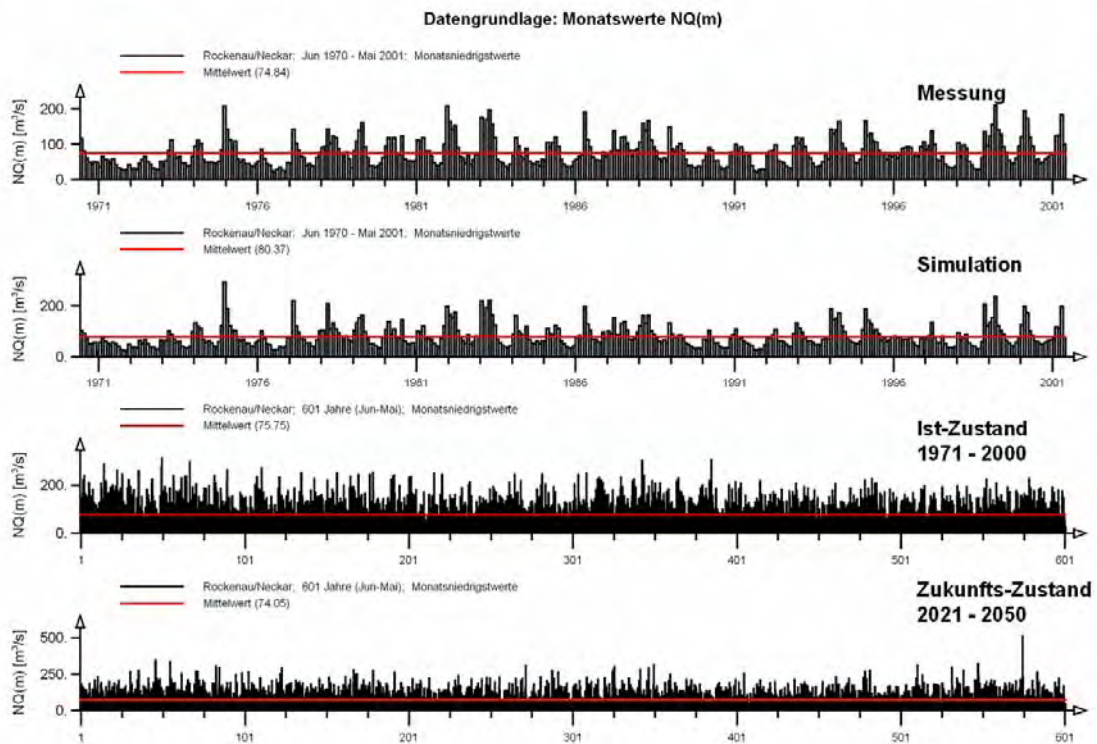


Abb. 2: Monatliche Niedrigwasserabflüsse NQ(m) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und die Simulationen sowie für den Ist- und Zukunftszeitraum aus dem Klimamodell

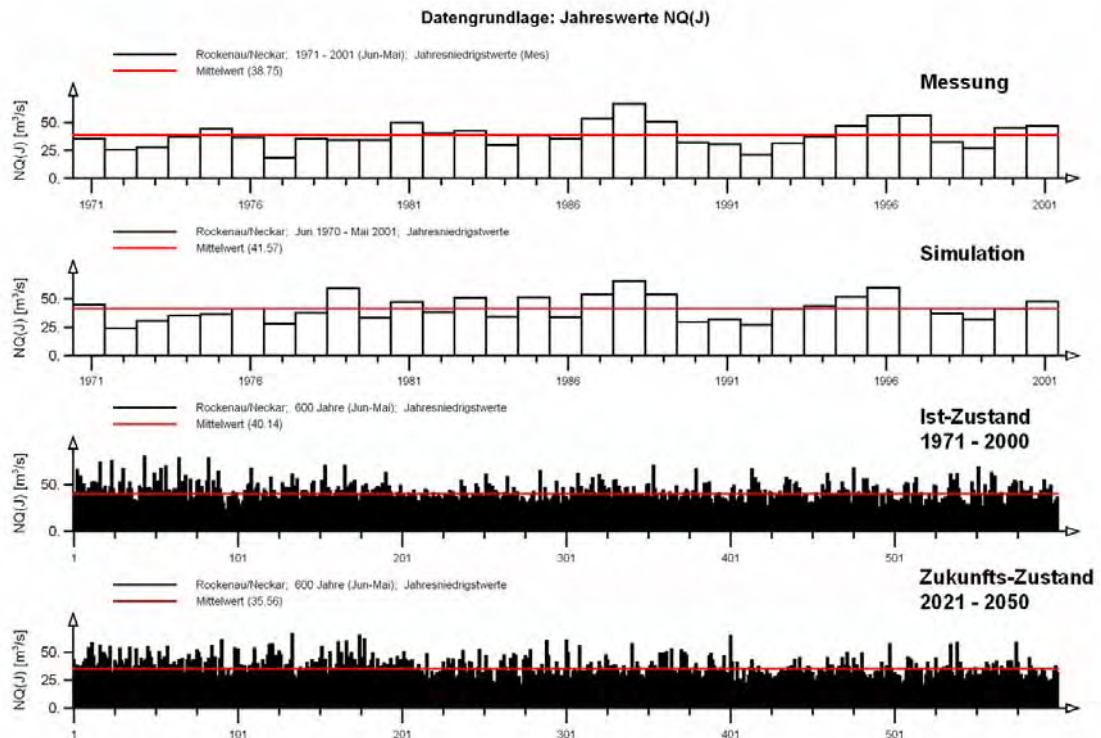


Abb. 3: Jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ(J) am Pegel Rockenau/Neckar für die Messwerte und die Simulationen sowie für den Ist- und Zukunftszeitraum aus dem Klimamodell

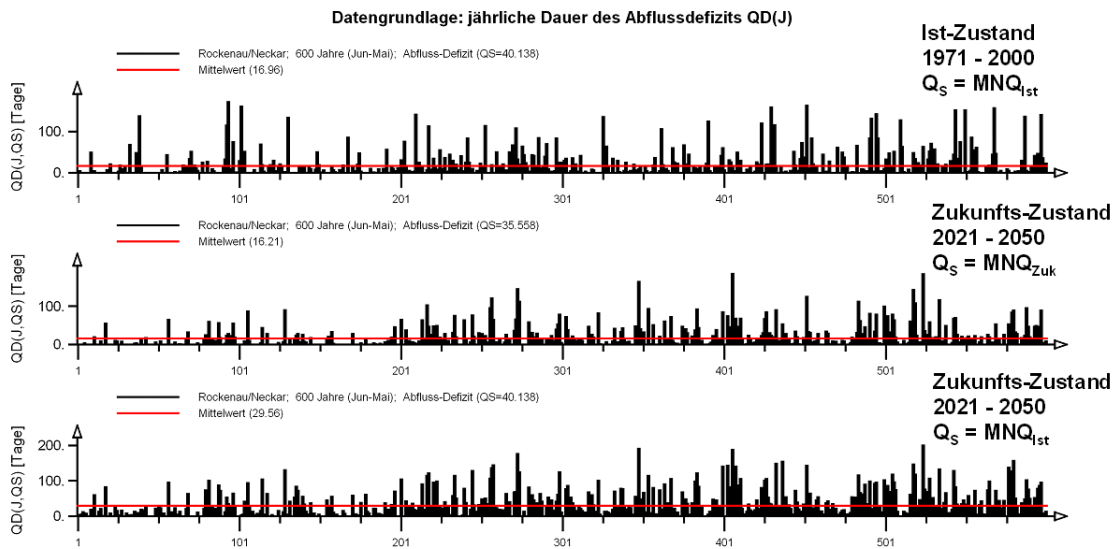
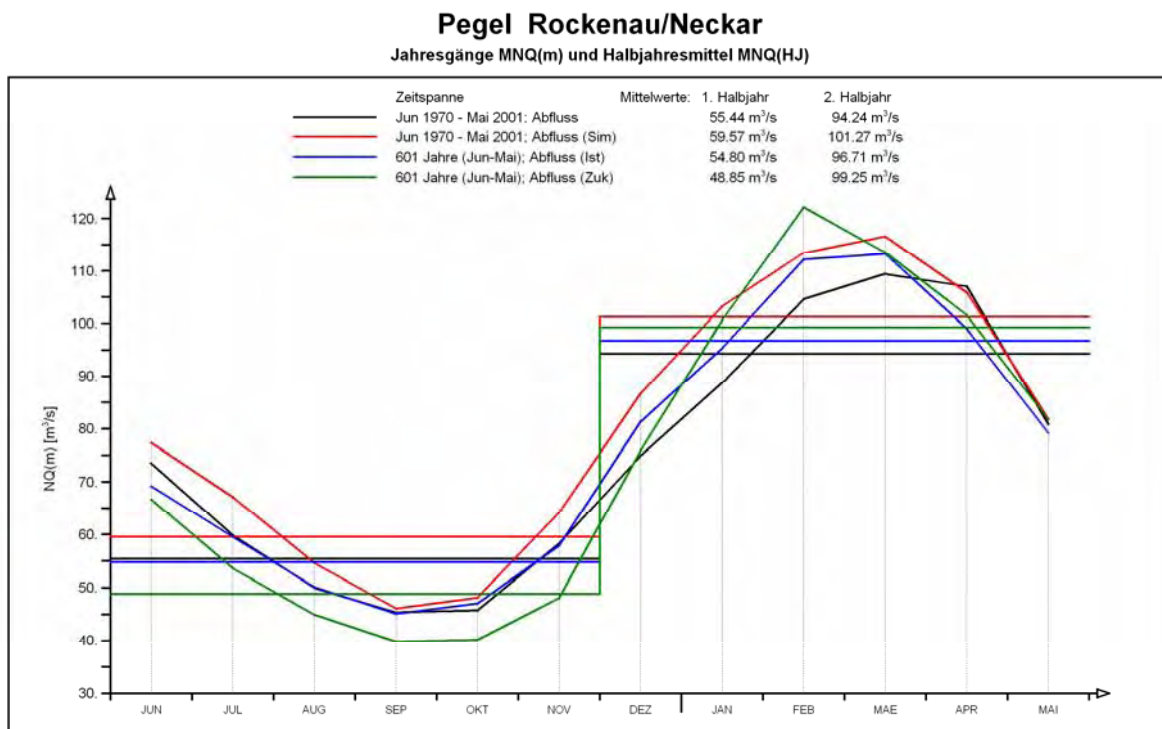


Abb. 4: Jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J) am Pegel Rockenau/Neckar für den Ist-Zustand bezogen auf  $MNQ_{Ist}$  (Ist-Zustand) sowie für den Zukunfts-Zustand bezogen auf  $MNQ_{Zuk}$  (Zukunfts-Zustand) und auf  $MNQ_{Ist}$  (Ist-Zustand)



lfd.-Nr.: 64

Abb. 5: Jahresgang der mittlerer monatlichen Niedrigwasserabflüsse NQ(m) am Pegel Rockenau/Neckar für Messdaten (schwarz), Simulation (rot), Ist-Zustand (blau) und Zukunfts-Zustand (grün) mit den zugehörigen Halbjahresmittelwerten

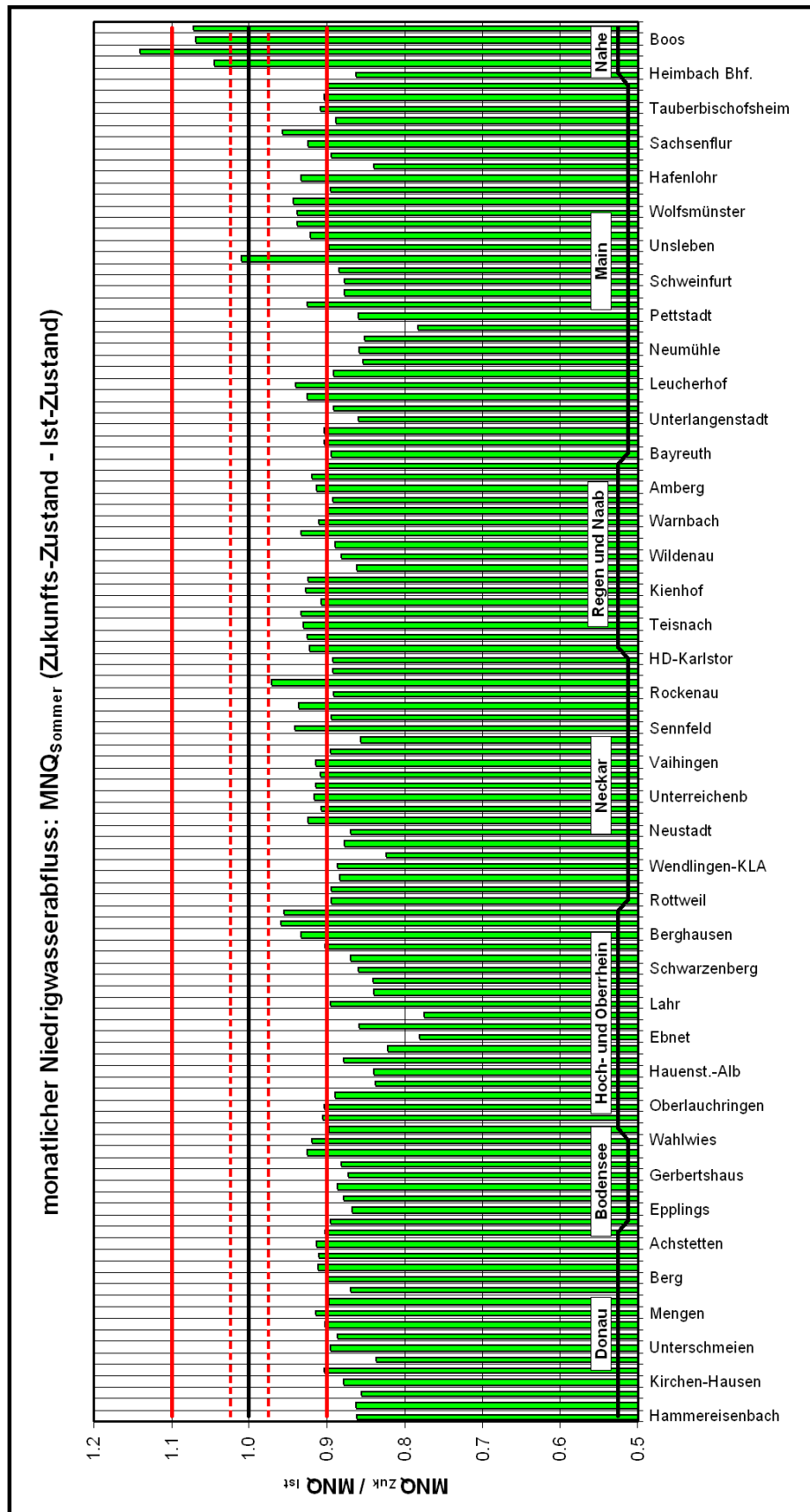


Abb. 6: Verhältnis des mittleren Niedrigwasserabflusses  $MNQ$  im Sommer-Halbjahr (abgeleitet aus den mittleren Monatsniedrigstwerten) von Zukunfts-Zustand (2021-2050) zum Ist-Zustand (1971-2000)



Tab. 2: Klassifikation der Veränderungen der mittleren jährlichen und halbjährlichen Niedrigwasserabflüsse MNQ, abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(m) zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen

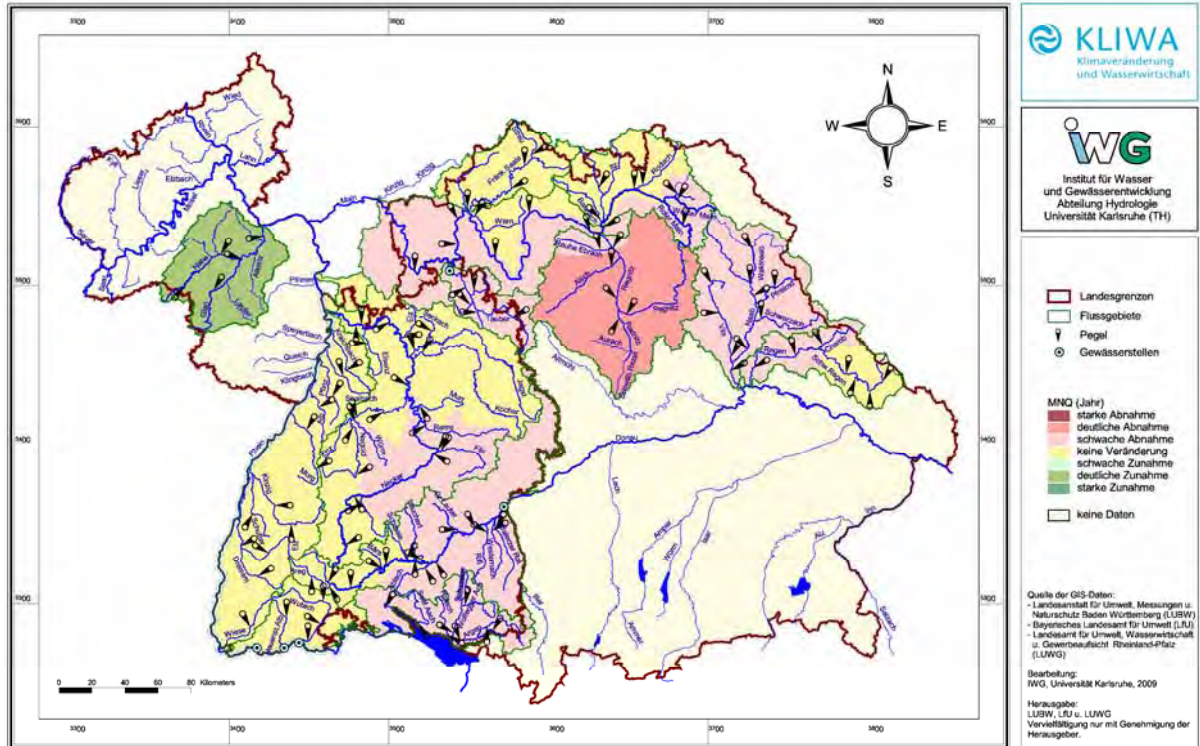
Klasse	Tendenz	Veränderung
< 0,8	starke Abnahme	> 20%
0,8 - 0,9	deutliche Abnahme	10% - 20%
0,9 - <1	schwache Abnahme	< 10%
$1 \pm 0,025$	keine signifikante Veränderung	< 2,5%
>1 - 1,1	schwache Zunahme	< 10%
1,1 - 1,2	deutliche Zunahme	10% - 20%
> 1,2	starke Zunahme	> 20%

Tab. 3: Vergleich der mittleren Niedrigwasserabflüsse des Jahres und der beiden Halbjahre: Mittelwert des Verhältnisses  $f$  der jährlichen und halbjährlichen Mittelwerte MNQ zwischen den unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ( $f < 1$ ), für Zunahmen ( $f > 1$ ) und für geringe Abweichungen ( $f = 1 \pm 0,025$ )

Kennwert	Jahr	Sommer	Winter
Vergleich Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand: $f = \text{MNQ}_{\text{Zuk}} / \text{MNQ}_{\text{Ist}}$			
Anzahl gesamt	122	122	122
Anzahl mit $f < 0,8$	0	3	0
Anzahl mit $f: 0,8 - 1,0$	98	114	38
Anzahl mit $f: 1,0 - 1,2$	24	5	83
Anzahl mit $f > 1,2$	0	0	1
Anzahl mit $f: 1 \pm 0,025$	57	1	42
Mittelwert $f_{\text{mit}}$	0,98	0,90	1,02

### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 2: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050

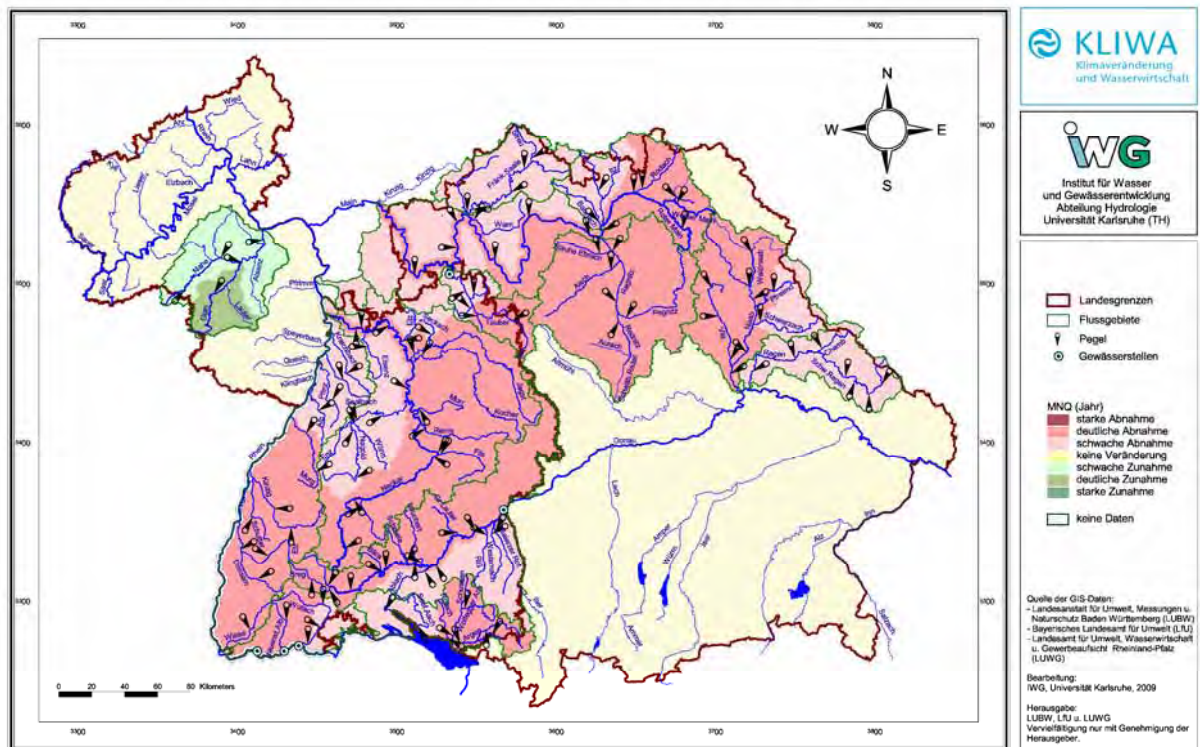


Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 3: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ im Sommer-Halbjahr für den Zeitraum 2021 - 2050



Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

Abb. 7: Veränderung des mittleren Niedrigwasserabflusses MNQ des Jahres (obere Abbildung) und des Sommer-Halbjahres (untere Abbildung) für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000; abgeleitet aus den monatlichen Niedrigwasserabflüssen MNQ(m)



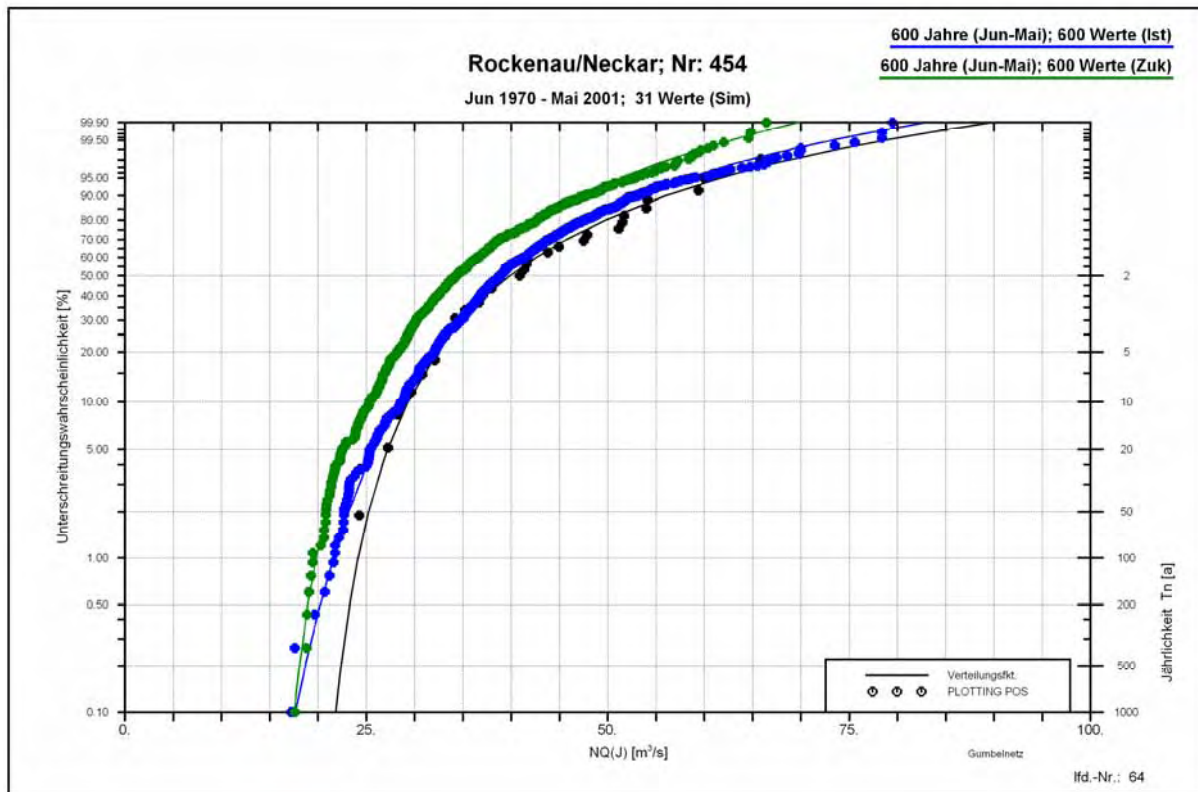


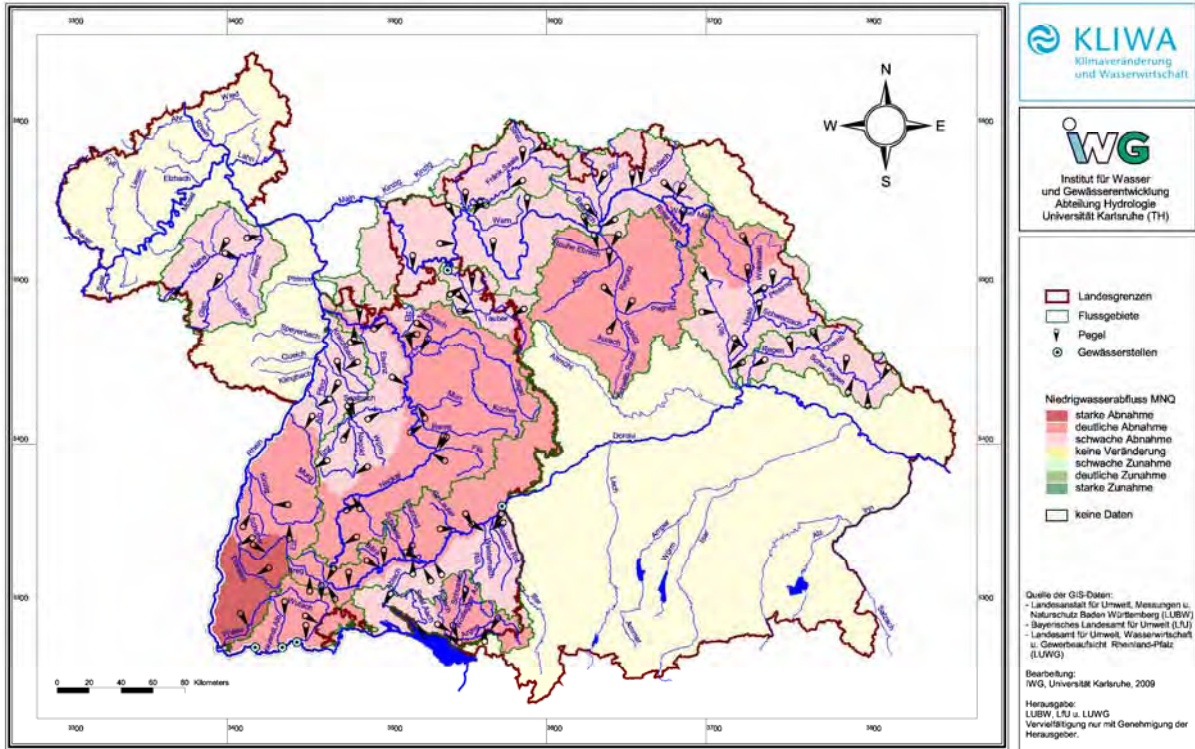
Abb. 8: Vergleich der Extremwertstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) und den Zukunfts-Zustand (grün) am Pegel Rockenau/Neckar

Tab. 4: Vergleich des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ sowie der 10- und 100-jährlichen Niedrigwasserabflüsse NQ<sub>10</sub> und NQ<sub>100</sub>: Mittelwert des Verhältnisses f der jeweiligen Kennwerte sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen bzw. Unterschätzungen (f < 1), Zunahmen bzw. Überschätzungen (f > 1) und geringe Abweichungen (f = 1 ± 0,025)

Kennwert		MNQ	NQ <sub>10</sub>	NQ <sub>100</sub>
Vergleich: Zukunfts-Zustand und Ist-Zustand: $f = NQ_{Zuk} / NQ_{Ist}$				
Anzahl	gesamt	122	122	121
Anzahl mit f:	< 0,8	4	8	7
Anzahl mit f:	0,8 - 1,0	117	113	100
Anzahl mit f:	1,0 - 1,2	1	1	14
Anzahl mit f:	> 1,2	0	0	0
Anzahl mit f:	1 ± 0,025	1	3	20
Mittelwert	f <sub>mit</sub>	0,90	0,90	0,92

### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 6: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ für den Zeitraum 2021 - 2050

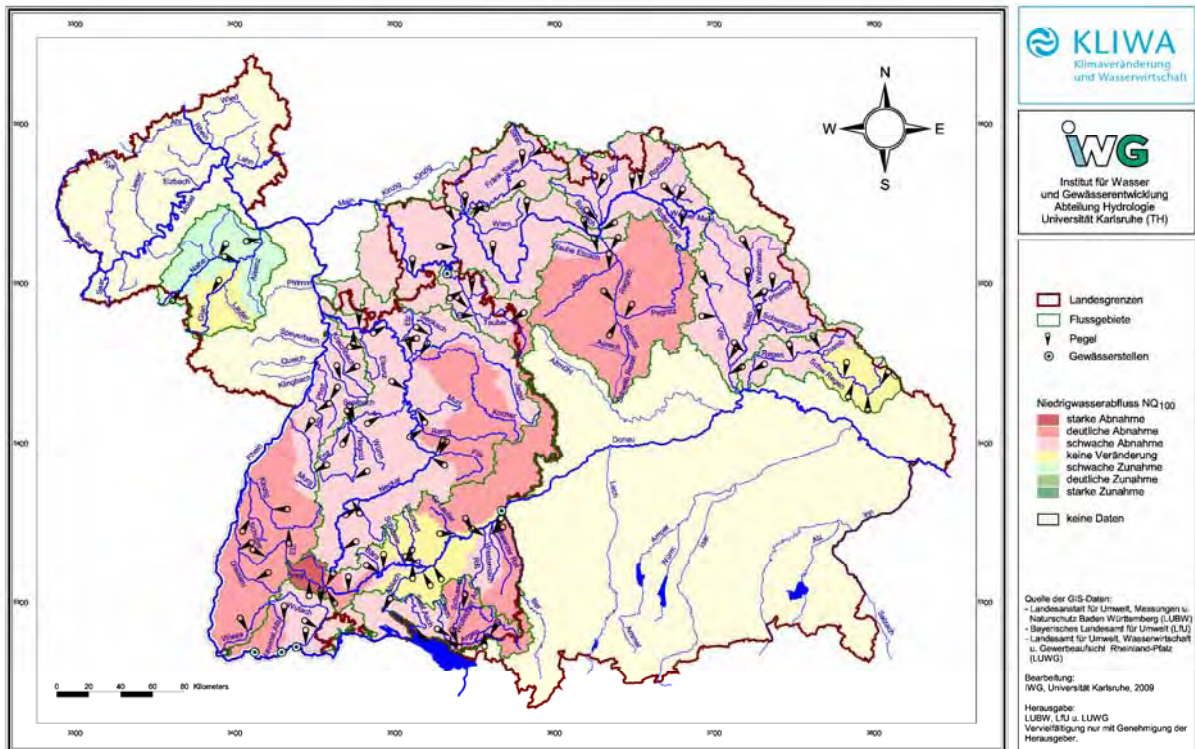


Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 8: Veränderung des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ<sub>100</sub> für den Zeitraum 2021 - 2050



Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

Abb. 9: Veränderung des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ (obere Abbildung) und des 100-jährlichen Niedrigwasserabflusses NQ<sub>100</sub> (untere Abbildung) für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf 1971 - 2000; abgeleitet aus den jährlichen Niedrigwasserabflüssen NQ(J)

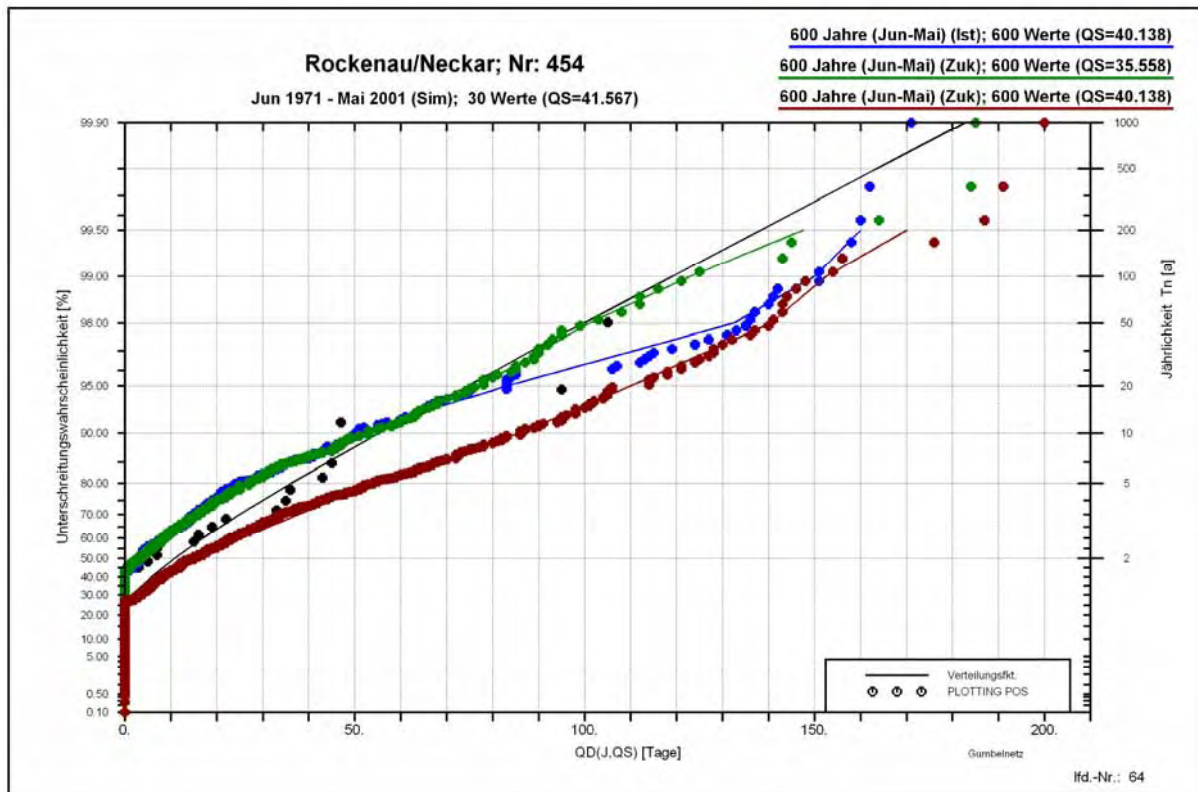


Abb. 10: Vergleich der Extremwertstatistiken für die jährliche Dauer des Abflussdefizits QD(J), abgeleitet aus den Simulationen (schwarz) und den Berechnungen auf Basis des Klimamodells für den Ist-Zustand (blau) sowie für den Zukunfts-Zustand mit  $Q_S=MNQ_{Zuk}$  (grün) und  $Q_S=MNQ_{Ist}$  (braun) am Pegel Rockenau/Neckar

Tab. 5: Klassifikation der Veränderungen der Kennwerte der Niedrigwasserperiode zur räumlichen Darstellung und Interpretation der Tendenzen

Klasse	Tendenz	Veränderung
< 0,5	starke Abnahme	> 50%
0,5 - 0,75	deutliche Abnahme	25% - 50%
0,75 - <1	schwache Abnahme	< 25%
$1 \pm 0,05$	keine signifikante Veränderung	< 5%
>1 - 1,25	schwache Zunahme	< 25%
1,25 - 1,5	deutliche Zunahme	25% - 50%
> 1,5	starke Zunahme	> 50%

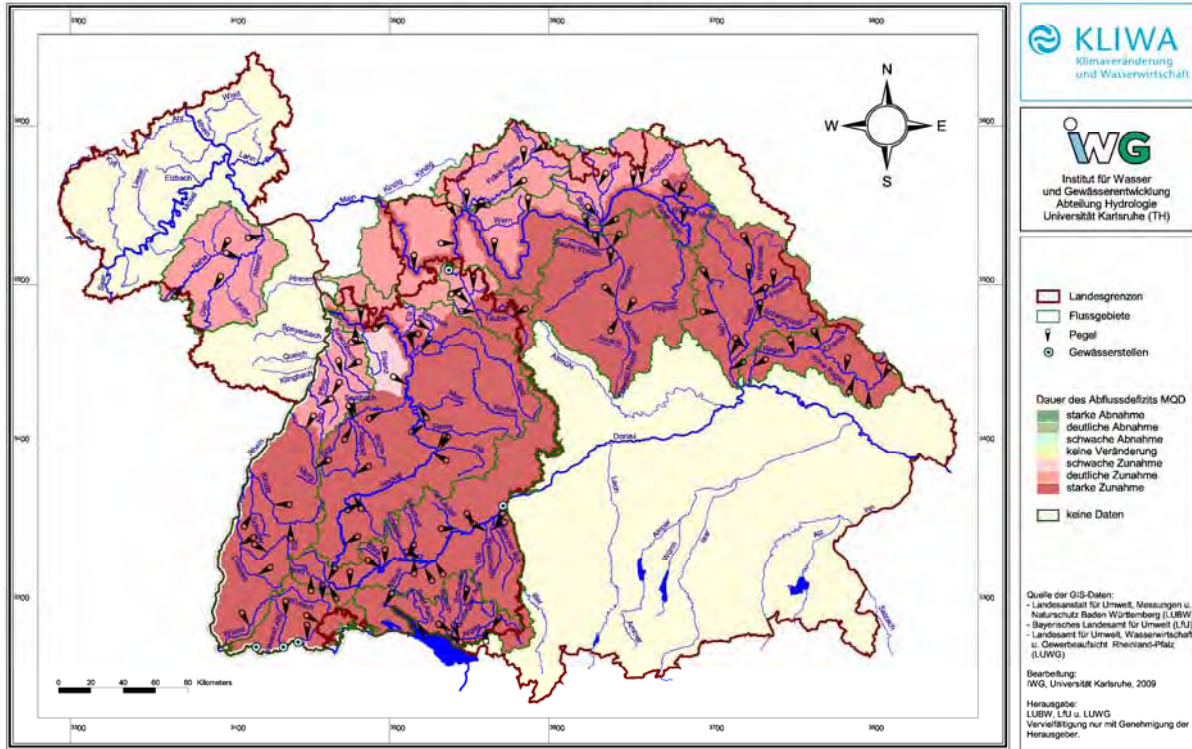
Tab. 6: Vergleich der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD sowie dessen 10- und 100-jährliche Werte  $QD_{10}$  und  $QD_{100}$  zwischen dem Zukunfts-Zustand bezogen auf den Schwellenwert  $MNQ_{Zuk}$  und  $MNQ_{Ist}$  und dem Ist-Zustand: Mittelwert des Verhältnisses  $f$  der jeweiligen Kennwerte abgeleitet aus unterschiedlichen Abflusszeitreihen sowie gesamte Anzahl der einbezogenen Standorte und Anzahl mit Faktoren für Abnahmen ( $f < 1$ ), für Zunahmen ( $f > 1$ ) und für geringe Abweichungen ( $f = 1 \pm 0,05$ )

<b>Vergleich: Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand</b>				
Schwellenwert: $Q_{S,Zuk} = MNQ_{Zuk}$				
<b>Kennwert</b>		<b>MQD</b>	<b><math>QD_{10}</math></b>	<b><math>QD_{100}</math></b>
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	40	35	81
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	82	86	41
Anzahl mit f:	> 1,5	0	1	0
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	47	31	35
Mittelwert	$f_{mit}$	1,05	1,08	0,96
Schwellenwert: $Q_{S,Zuk} = MNQ_{Ist}$				
<b>Kennwert</b>		<b>MQD</b>	<b><math>QD_{10}</math></b>	<b><math>QD_{100}</math></b>
Anzahl	gesamt	122	122	122
Anzahl mit f:	< 0,50	0	0	0
Anzahl mit f:	0,50 - 1,0	1	2	24
Anzahl mit f:	1,0 - 1,50	23	38	83
Anzahl mit f:	> 1,5	98	82	15
Anzahl mit f:	$1 \pm 0,05$	0	1	22
Mittelwert	$f_{mit}$	1,71	1,61	1,19



### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 12: Veränderung der mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MOD für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ des Ist-Zustandes

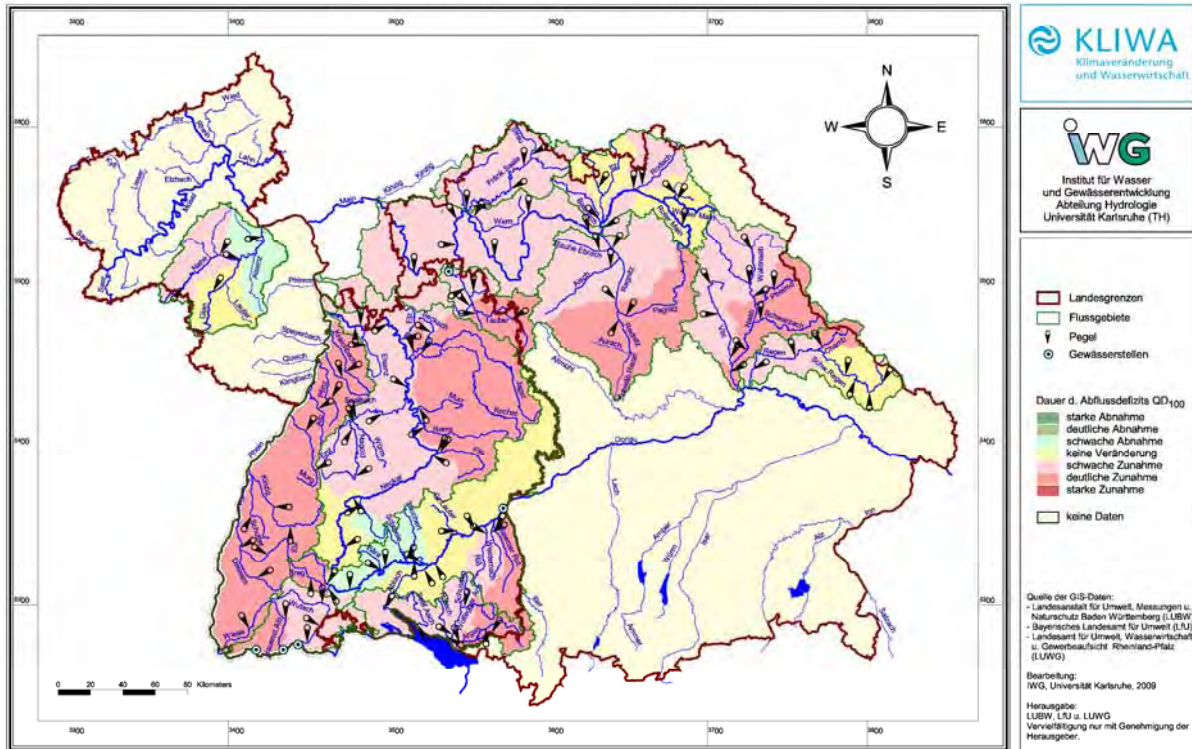


Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

### Einfluss der Klimaänderung auf Niedrigwasserverhältnisse

Karte 14: Veränderung der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD<sub>100</sub> für den Zeitraum 2021 - 2050 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ des Ist-Zustandes



Bearbeitungsstand: September 2009

Die dargestellten Ergebnisse basieren auf der Klimaprojektion "WETTREG - 2006 / A1B" und beziehen sich auf den Zeitraum 2021 - 2050

Abb. 11: Veränderung des mittleren jährlichen Dauer des Abflussdefizits MQD (obere Abbildung) und der 100-jährlichen Dauer des Abflussdefizits QD<sub>100</sub> (untere Abbildung) für den Zeitraum 2021 - 2050 gegenüber 1971 - 2000 bezogen auf den mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ<sub>Ist</sub> des Ist-Zustandes

## **Klimawandel und Niedrigwasser – Möglichkeiten der Anpassung**

Wolfgang Hennegriff

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

### **1 Einleitung**

In den Sommermonaten werden gemäß den Klimaprojektionen nach dem WETTREG-Verfahren bis zur Mitte dieses Jahrhunderts die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse deutlich bis stark abnehmen. Die Niedrigwasserperioden werden sich deutlich verlängern. Die negative Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse wird in ihrer Bedeutung verstärkt durch das gleichzeitige Auftreten von Niedrigwasserabfluss und dem Anstieg der Wassertemperaturen. Diese Entwicklungen haben nicht nur Auswirkungen auf die wasserwirtschaftlichen Bereiche Gewässerökologie und Gewässergüte, Siedlungswasserwirtschaft, Wasserversorgung und Wasserkraftnutzung sondern bewirken darüber hinaus eine hohe Betroffenheit sehr bedeutender wirtschaftlicher Aktivitäten wie Binnenschifffahrt, Landwirtschaft und Energiewirtschaft.

Diese projizierten Niedrigwasserentwicklungen werden erhebliche Auswirkungen auf Gewässernutzungen haben. Von daher besteht die Notwendigkeit, Gewässernutzungen an die Entwicklungen infolge des Klimawandels anzupassen.

### **2 Analyse der meteorologischen und hydrologischen Entwicklungen in der Vergangenheit**

In den vergangenen Jahren wurden in Baden-Württemberg bereits mehrere Trockenperioden beobachtet, die zu Niedrigwasser in den oberirdischen Gewässern führten. Durch die Untersuchung von gemessenen Zeitreihen ausgewählter meteorologischer, hydrometeorologischer und hydrologischer Kenngrößen wird daher versucht, Hinweise zu erhalten, ob diese extremen Trockenperioden als Phänomene natürlicher Variabilität oder ob sie als Auswirkungen von klimatischen Veränderungen zu bewerten sind. In den vergangenen Jahrzehnten wurden Trockenperioden und Hitzewellen durch eine Kombination antizyklonaler Großwetterlagen verursacht. Die Entwicklung dieser Großwetterlagen weisen hochsignifikante zunehmende Trends auf, wobei diese Entwicklung seit 1985 sehr dynamisch voranschreitet. Aber nicht nur die Entwicklung dieser Kombination von Hochdruckbrücken sollten Besorgnis auslösen, sondern auch die Entwicklung der mittleren Lufttemperatur seit den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts im KLIWA-Untersuchungsraum. Die mittlere Lufttemperatur hat im Winterhalbjahr im Mittel ca. 1,2 °C, im Sommer mit ca. 1,0 °C zugenommen. Die Gebietsniederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr haben im Untersuchungsraum größtenteils abgenommen oder haben sich nur wenig verändert, während die Starkniederschläge mit der Niederschlagsdauer 1 Tag größtenteils zugenommen haben. Die Entwicklungen mit zunehmenden mittleren Lufttemperaturen und zunehmenden Starkniederschlägen haben durch höhere Verdunstungsraten und ein höheres oberirdisches Abflussverhalten negative Auswirkungen auf den Gebietswasserhaushalt.

Aus den dargestellten Entwicklungen der Hochdruckwetterlagen, der mittleren Lufttemperatur, der Gebietsniederschläge und der Starkniederschläge kann die Folgerung gezogen werden, dass die meteorologischen und hydrologischen Verhältnisse im Untersuchungsraum sich überwiegend ungünstig entwickelt haben, die dazu geführt haben, dass die Entstehung von Niedrigwassersituationen wahrscheinlicher werden.



### 3 Regionale Klimaprojektionen für das Jahr 2050

Nach dem vierten Sachstandsbericht des IPCC wird eine mittlere globale Klimaerwärmung von ca. + 1,5 °C +/- 0,4 °C für das Szenario A1B im Jahr 2050 bezogen auf das Temperaturmittel der beiden Dekaden 1980 bis 1999 erwartet.

Um die Auswirkungen dieser Klimaerwärmung auf die Wasserwirtschaft abschätzen zu können, werden mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen die Auswirkungen der meteorologischen und hydrometeorologischen Veränderungen mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen auf die Hydrologie untersucht. Die Berechnungsergebnisse sind also Resultate einer dreistufigen Modellkette. Von daher sind von vornherein Überlegungen anzustellen, welche globalen und regionalen Klimamodelle und welche Wasserhaushaltsmodelle für die Berechnungen in Betracht kommen.

Zunächst soll kurz begründet werden, warum die Arbeitsgruppe KLIWA das Verfahren WETTREG als Basis für die regionalen Klimaprojektionen ausgewählt haben. Ein Multi-Modell-Ansatz schied für die KLIWA-Arbeitsgruppe allein aus Kostengründen aus. Von daher mussten Kriterien für die Auswahl eines geeigneten regionalen Klimamodells herangezogen werden. Als Mindestanforderung hinsichtlich der Modellgüte wurden die Reproduktion der Ist-Zeit sowohl hinsichtlich Entwicklung der mittleren Lufttemperaturen und der Wiedergabe der Niederschlagsverhältnisse in der zeitlichen und räumlichen Verteilung gestellt.

Die dynamischen regionalen Klimamodelle, die in KLIWA (REMO, CLM und COSMO-CLM) weiter ausgewertet worden sind, haben derzeit das Problem hinsichtlich der Überschätzung der Gebietsniederschlagshöhen und der zutreffenden Wiedergabe in der zeitlichen und räumlichen Verteilung der Niederschläge für die Simulation der gegenwärtigen Verhältnisse. Da solche Modellschwächen die Zustände der Gebietswasserhaushaltsgehalte verfälschen, sind daher diese Modelle für Betrachtungen von Niedrigwasserverhältnissen derzeit ungeeignet, da die Niedrigwasserabflüsse während der Trockenperioden gerade aus den Gebietsspeichern gespeist werden. Ebenso bereitet die Reproduktion der Ist-Zeit Probleme bezüglich der Temperaturentwicklung. Das WETTREG-Verfahren kann die Ist-Zeit dagegen sehr gut reproduzieren, was natürlich rein verfahrensbedingt der Fall sein sollte. Eine Cross-Validierung, bei der Projektionen aus der Vergangenheit auf die Ist-Zeit bewertet wurden, bestätigt diese Modellgüte hinsichtlich dieses Anforderungskriteriums.

Als Vergleich werden die Auswertungen des EU-Projektes ENSEMBLES herangezogen, wie sie Mitte November 2009 beim Schluss-Symposium vorgestellt worden sind. In diesem Projekt wurden insgesamt Projektionen von 16 verschiedenen Regionalmodellen ausgewertet. Danach nimmt die mittlere Lufttemperatur in den Sommer-Monaten Juni, Juli und August zwischen 3 °C und 4 °C in den beiden Dekaden 2040 bis 2059 zu.

Die Klimaprojektionen nach dem WETTREG-2006-Verfahren, die das Umweltbundesamt bundesweit zur Verfügung gestellt hat, projizieren dagegen eine Zunahme der mittleren Lufttemperatur in den Ländern Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern für den Zeitraum 2021 bis 2050 für das hydrologische Sommerhalbjahr von + 0,7 °C. Diese Projektionen zur Entwicklung der Lufttemperatur sind nicht direkt mit den Auswertungen von ENSEMBLES vergleichbar, da die Zeitintervalle verschieden sind. Dennoch kann man sagen, dass die WETTREG-2006-Projektion ein eher schwaches Temperaturänderungssignal gegenüber den gemittelten Projektionen der regionalen Klimamodelle, die im ENSEMBLES-Projekt ausgewertet worden sind, zeigt.

Ähnlich verhält es sich mit den Auswertungen zum Niederschlagsverhalten. Während nach den ENSEMBLES-Auswertungen die Niederschläge in den Sommermonaten Juni, Juli und August um 20% für die beiden Dekaden 2040 bis 2059 abnehmen werden, werden die Niederschlagshöhen nach dem WETTREG-2006-Verfahren um 9% für das Sommerhalbjahr im Zeitraum 2021 bis 2050 abnehmen.

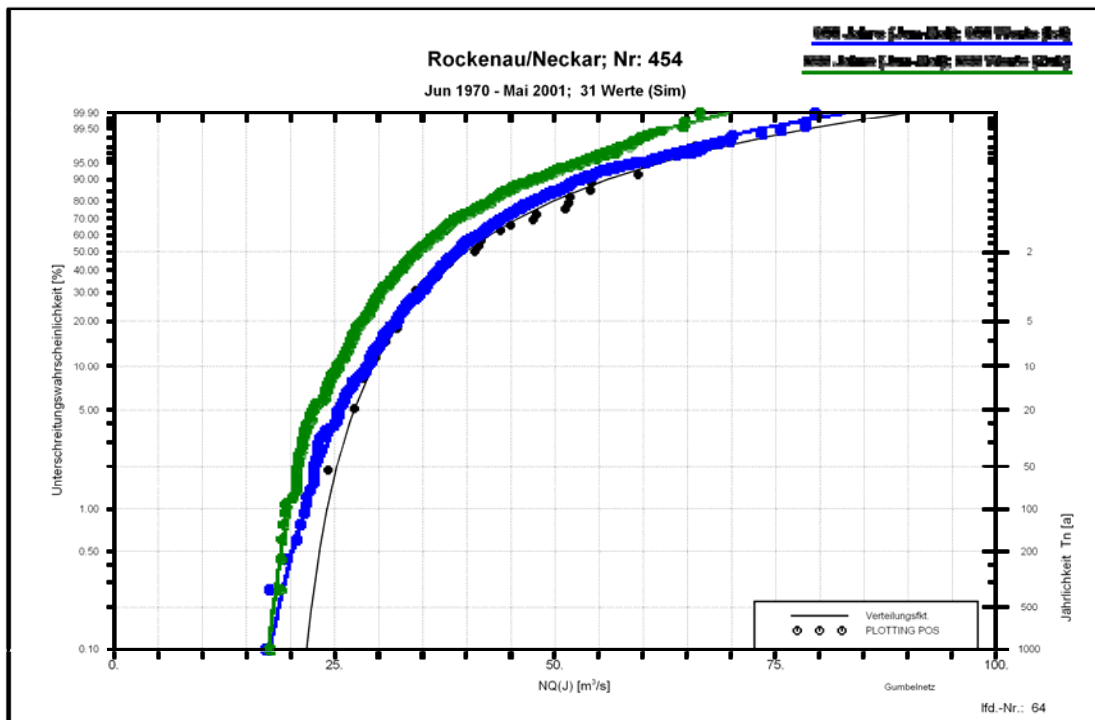


Abb. 1: Vergleich der Niedrigwasserstatistiken für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres NQ(J), abgeleitet aus den Messwerten (schwarz) und den Abfluss-Simulationen für den Ist-Zeitraum (blau) und den Zukunft-Zeitraum (grün).

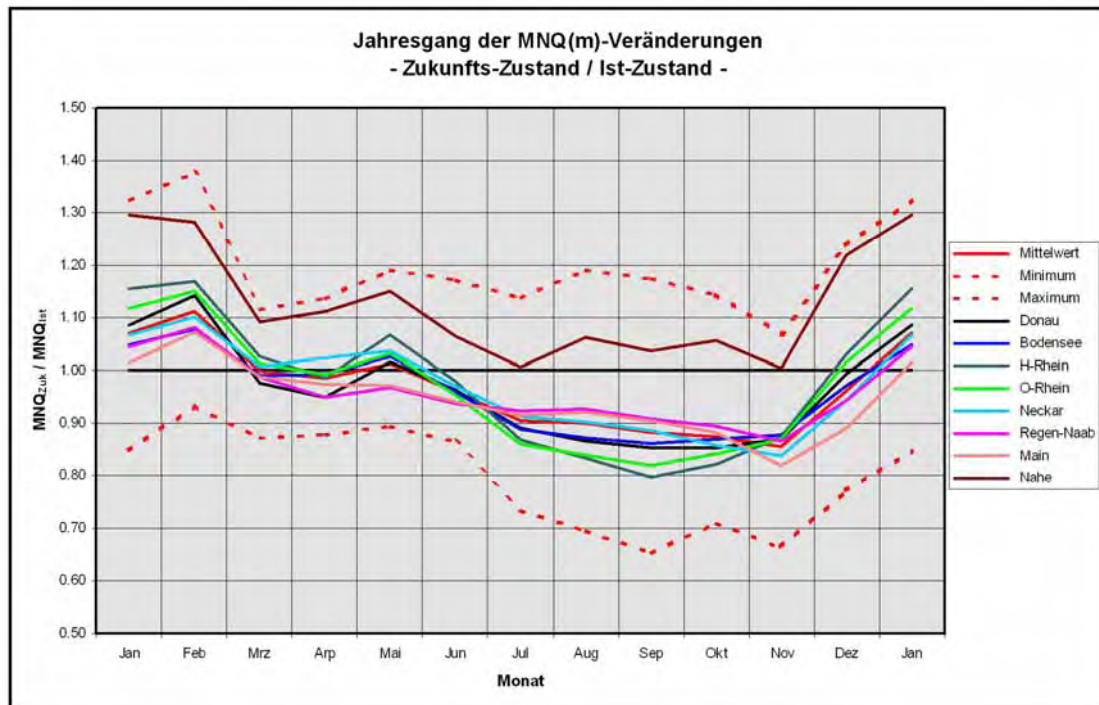


Abb. 2: Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse in den Gewässern in den betrachteten Teileinzugsgebieten. Die Angaben Hoch- und Oberrhein sind als aggregierte Werte der einzelnen Rheinzuflüsse zu betrachten. Für den Rheinstrom selbst liegen noch keine Untersuchungen vor. Die Angaben zur Donau beziehen sich auf die Gebiete der baden-württembergischen Donau.





Wie die Abbildung 1 zeigt, bildet das WETTREG-Verfahren nicht nur die Verteilung des Abflusskontinuums in der Ist-Zeit sondern auf die Extreme sehr gut ab. Kritisch wird das gegenüber den ENSEMBLES-Projektionen schwache Temperaturänderungssignal gesehen, das eher den unteren Rand der Bandbreite möglicher Temperaturänderung abbildet. Um so mehr muss betont werden, dass bei diesen eher schwach ausgeprägten Änderungen der meteorologischen Kenngrößen die Niedrigwasserkennwerte, wie sie im KLIWA-Bericht Heft 14 dargestellt sind, sich dennoch deutlich ändern.

Dennoch ist diese projizierte Temperaturänderung nach dem WETTREG-2006-Verfahren als nicht unrealistisch zu bewerten. In der Betrachtung, dass seit 1931 die mittlere Temperatur im KLIWA-Untersuchungsraum um 1,1 °C angestiegen ist, wird mit diesem weiteren projizierten Temperaturanstieg nahezu das 2,0 °C - Ziel bereits 2050 erreicht sein.

#### **4 Möglichkeiten der Anpassung**

Möglichkeiten der Anpassung beziehen sich in diesem Referat auf ausschließlich hydrologische Aufgabenfelder. Der Wasserkreislauf ist dasjenige System, das durch den Klimawandel mit am stärksten beeinflusst wird. Die Hydrometeorologie und die Hydrologie haben also bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien an die Folgen des Klimawandels eine Schlüsselposition inne. Deshalb ist hinsichtlich Anpassung insbesondere die Hydrometeorologie und die Hydrologie besonders gefordert, damit die hydrometeorologischen und hydrologischen Datensätze den tangierten Fachbereichen die notwendigen Daten zur Verfügung gestellt werden können, damit diese für Ihre Bereiche ihre spezifische Anpassungsstrategie entwickeln können. Dieser Beitrag behandelt also nicht, wie z. B. die Wasserversorgung, die Siedlungswasserwirtschaft oder Land- oder Energiewirtschaft ihre möglichen und notwendigen Anpassungen unter dem Aspekt Niedrigwassersituationen vornehmen sollte, sondern vielmehr die Rolle der Hydrologie bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien. Die Fragestellung lautet also: Was kann und sollte die Hydrologie in Zeiten des Klimawandels in ihrem eigenen Aufgabenbereich und als Dienstleistung für die tangierten Fachbereiche leisten, damit diese für die Entwicklung ihrer spezifischen Anpassungsstrategien eine notwendige Grundlage erhalten?

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat in Ihrer „Richtlinie für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement“ (2007) bereits eine Strategie zur Verminderung der Auswirkungen von Niedrigwasser ausgearbeitet. Dabei hat sie mögliche Handlungsfelder identifiziert. Diese unterteilt sie in die Bereiche Niedrigwasservorsorge und Niedrigwassermanagement. Für diese beiden Bereiche hat die LAWA die möglichen Maßnahmen zur Anpassung an Niedrigwassersituationen zusammengestellt. Um jedoch eine Entscheidung darüber zu treffen, welche Maßnahmen vordringlich und mit hoher Priorität vorzunehmen sind, sind Abschätzungen über die quantitativen Veränderungen der Niedrigwasserabflüsse und – perioden notwendig. Bisher lagen solche quantitative Abschätzungen über die Entwicklung von Niedrigwasserkenngrößen infolge des zukünftigen Klimawandels nicht vor. Erst mit diesen quantitativen Angaben über die möglichen Änderungsgrößen können weitergehende Untersuchungen und Entscheidungen angestellt werden. Das stellt den Wert der Untersuchungen zu den quantitativen Veränderungen von Niedrigwasser-Kenngrößen in KLIWA, die für den Zeithorizont 2021 bis 2050 simuliert worden sind, dar.

Zunächst stellt sich die Frage, auf welche Grundlagen die Hydrologie für die Entwicklung einer Anpassungsstrategie sich stützen sollte. Im Wesentlichen bieten sich drei Vorgehensweisen an:

1. Orientierung an vergangenen extremen Niedrigwasserereignissen wie zum Beispiel August 2003 oder Juli 2006, die die Verletzlichkeit und Schwachstellen in den tangierten Bereichen vor Augen geführt hat. Dokumentationen von extremen Niedrigwassersituationen haben daher einen hohen Stellenwert, damit diese Belastungssituationen im Nachhinein ausgewertet werden können. Nach dieser Vulnerabilitätsanalyse können anschließend Maßnahmen zur Anpassung ausgearbeitet werden. Mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen können diese Vorschläge hinsichtlich ihrer Tauglichkeit getestet werden, in dem diese hydrologische Belastungssituation mit diesen Abhilfemaßnahmen modelltechnisch simuliert werden, um ihre Wirkung aufzuzeigen und bewerten zu können. Mit Hilfe der Wirkungsanalyse können verschiedene Varianten oder eine Kombination von verschiedenen Maßnahmen getestet werden, ob die Zielsetzungen damit erreicht werden. Die Wirkungsanalyse bildet eine geeignete Grundlage für die Auswahl geeigneter Maßnahmen.
2. Als zweite mögliche Methode kann die Betrachtung von Fallstudien angesehen werden. Diesen Fallstudien werden definierte Situationen von Lastfällen zugrunde gelegt. Als Lastfälle können beispielsweise die projizierten Veränderungen der meteorologischen, hydro-meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen angenommen werden. Für diese Belastungsannahmen werden die Wirkungen auf das hydrologische System mit Hilfe der Wasserhaushaltsmodelle simuliert. Mit diesen Ergebnissen können dann anschließend spezifische Simulationsmodelle (Wassergütemodelle, Grundwassermodelle, Bodenwasserhaushaltsmodelle, Wärmehaushaltsmodelle) eingesetzt werden. Nach der Ermittlung der Reaktionen und Veränderungen können in analoger Vorgehensweise wie in 1. Maßnahmen in verschiedenen Varianten oder Kombinationen von Maßnahmen zur Anpassung an die angenommenen Veränderungen getestet und beurteilt werden. Auch hier bildet die Wirkungsanalyse eine hilfreiche Entscheidungsgrundlage für die Varianten, die für die darauffolgenden Planungs- und Entscheidungsprozesse ausgewählt worden sind. Gerade für die Beurteilung von Gewässernutzungen können solche Fallstudien zu Lastfällen sehr konkrete Hinweise liefern, wie auch in der Zukunft die Gewässernutzungen auf die Gewässer sich auswirken werden. Bei Gewässernutzungen von hoher Bedeutung oder hoher Nutzungsintensität können die Erkenntnisse aus den Fallstudien eine notwendige Entscheidungsgrundlage bilden, wie Auflagen und Nebenbestimmungen zu gestalten sind sowie Art, Umfang und Dauer einer beantragten Gewässernutzung in wasserrechtlichen Entscheidungen festzulegen sind.
3. Als dritte Möglichkeit der Herangehensweise bietet sich die Situationsanalyse in Regionen, in denen heute bereits ein ähnliches Klima herrscht, das wir bis zum betrachtenden zukünftigen Zeithorizont erwarten, an. Mit Hilfe von Klimadiagrammen können beispielsweise solche Regionen identifiziert werden. In diesen Vergleichsregionen lassen sich Vulnerabilitäten erkennen, die in unseren Regionen erst noch in der Zukunft auftreten können. Für einen Städteplaner, der beispielsweise für Karlsruhe ein Stadtentwicklungskonzept zu entwerfen hat, bietet eine Analyse von ereigneten oder bestehenden klimatischen oder klimabedingten Belastungssituationen mit einer oberitalienischen Stadt in der Poebene mit Sicherheit wertvolle Erkenntnisse, die der Stadtplaner als neue Erkenntnisse in seine Arbeit einfließen lassen kann. Es ist davon auszugehen, dass solche Erfahrungswerte und Erkenntnisgewinne auch für hydrologische Analysen in den Vergleichsregionen durchaus möglich sind. Ein direkter Vergleich von ähnlichen Klimaten in verschiedenen Regionen ist grundsätzlich mit einer kritischen Distanz anzustellen. Extremsituationen und hydrologische Stressfaktoren, die heute bereits in der Poebene auftreten, können jedoch als zukünftige Warnsignale für unsere Region eher erkannt, leichter analysiert und bewertet werden. Ein solcher Vergleich bietet den wesentlichen Vorteil, dass er auf Erfahrungen basiert und nicht wie in den beiden ersten Methoden auf Simulationsergebnissen von numerischen Model-



len. Die notwendige öffentliche Kommunikation über den Klimawandel und seinen Folgen sind daher auf der Grundlage von solchen Erfahrungen verständlicher und anschaulicher zu führen.

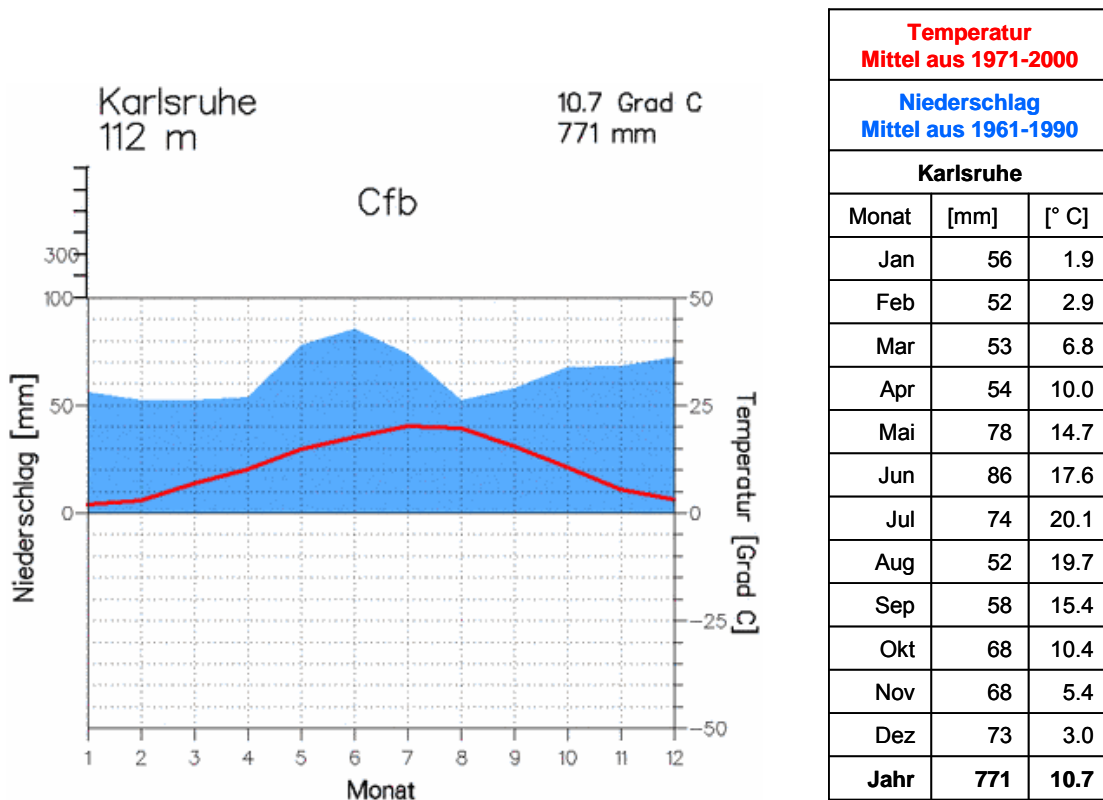


Abb. 3: Klimadiagramm für Karlsruhe/Oberrhein

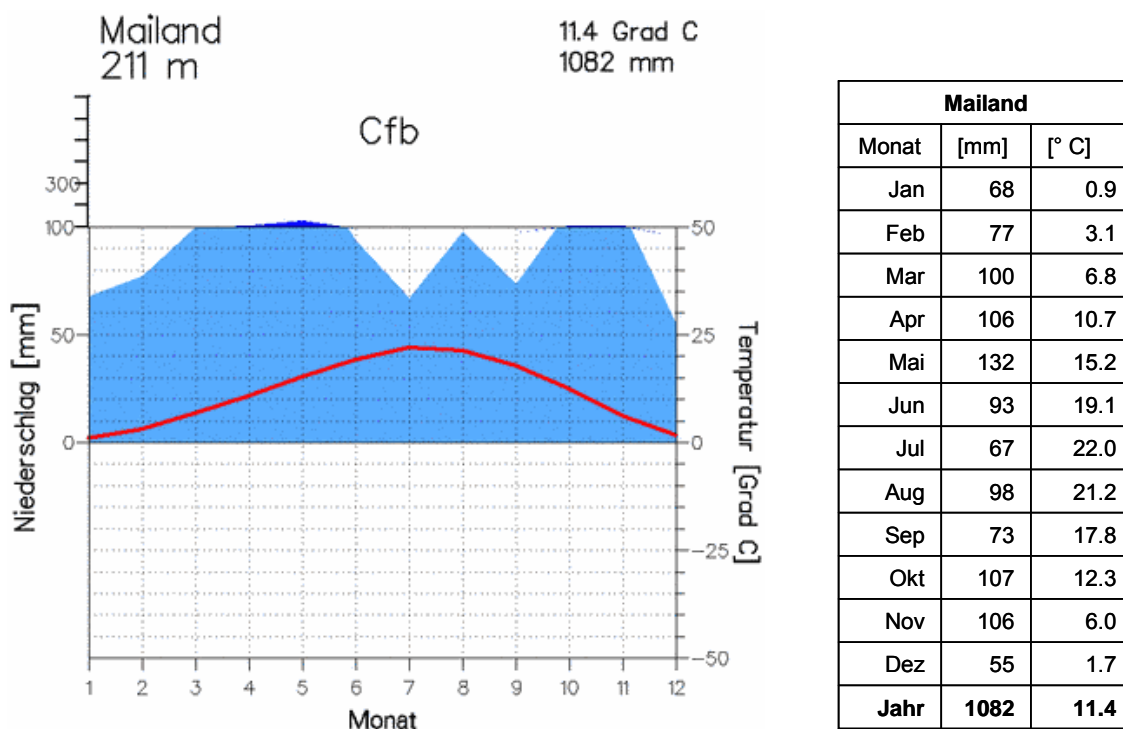


Abb. 4: Klimadiagramm für Mailand/Poebene

Generell muss beachtet werden, dass in den Wasserhaushaltssimulationen die derzeitigen Landnutzungen realisiert sind. Mit dem fortschreitenden Klimawandel werden jedoch auch diese Landnutzungen sehr wahrscheinlich sich verändern. Diese sind daher bei den Projektionen des hydrologischen Systems für die zukünftigen Zeithorizonte im Wasserhaushaltsmodell entsprechend zu modellieren. Da die zukünftigen Landnutzungen noch ungewiss sind, sind dafür entsprechende Annahmen zu treffen oder Entwicklungsszenarien zu zukünftigen Landnutzungen zu definieren. Diese Projektionen von Entwicklungsszenarien werden im Wesentlichen von den tangierten Fachbereiche vorzunehmen sein, da in diese Entwicklungsszenarien der Landnutzungen die möglichen spezifischen Anpassungsmaßnahmen eingebunden werden sollten. Dieser Prozess ist einerseits sehr interdisziplinär geprägt, andererseits ist er als iterative Vorgehensweise zu betrachten, da die spezifischen Anpassungsmaßnahmen und Entwicklungsszenarien in gegenseitiger Abhängigkeit stehen und diese nicht a priori bekannt sind. Für die Projektionen in die Zukunft sind also die Wasserhaushaltsmodelle weiter zu entwickeln, was bislang bei hydrologischen Untersuchungen von zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels nicht der Fall war. Dazu gehört nicht nur die modelltechnische Abbildung zukünftiger Landnutzungen für Land- und Forstwirtschaft und Siedlungswesen sondern auch die Implementierung von sich verändernden biotischen Veränderungen wie Veränderungen der Vegetationsperiode oder der Blattverdunstung, die den Wasserhaushalt beeinflussen werden.

## 5 Zusammenfassung

Das Klima in Baden-Württemberg hat sich im 20. Jahrhundert nachweisbar verändert. Vermehrt werden in den Sommern Trockenperioden beobachtet, die an zahlreichen Gewässern zu Niedrigwassersituationen führen. Die Veränderungen von meteorologischen, hydrometeorologischen und hydrologischen Kenngrößen wurden im Kooperationsvorhaben KLIWA untersucht und die Auswirkungen auf die Abflussverhältnisse in den Fließgewässern im KLIWA-Untersuchungsgebiet aufgezeigt. Sie zeigen, dass die Auftretenswahrscheinlichkeit einer extrem trockenen Vegetationsperiode und ausgeprägter Niedrigwasserperioden im Vergleich zum Zeitraum vor 1985 deutlich angestiegen ist. Für die weitere Zukunft 2021 bis 2050 wurden die Projektionen der Abflussverhältnisse für das Zukunftsszenario A1B/ECHAM5 erstellt und statistisch ausgewertet. In einem Großteil der betrachteten Flussgebiete wird sich die Verschärfung der Niedrigwasserverhältnisse weiter fortsetzen. Verminderungen der Niedrigwasserabflüsse und eine Verlängerung der Niedrigwasserperioden werden in den meisten Einzugsgebieten sehr wahrscheinlich in der Zukunft zu beobachten sein.

Mit den verwendeten Klimaprojektionen sind Unsicherheiten verbunden, die sich in der Modellkette globales Klimamodell – regionales Klimamodell – Wasserhaushaltsmodell fortpflanzen. Insofern sind die Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen entsprechend kritisch zu bewerten. Mit den statistischen Auswertungen der Abflusssimulationen auf der Grundlage der Klimaprojektion für das Emissionsszenario A1B/ECHAM5 können die Veränderungen der Niedrigwasserverhältnisse jedoch quantifiziert werden, auch wenn die Quantifizierung zunächst als Abschätzung der möglichen Veränderungen zu betrachten ist. Diese quantitativen Angaben über die möglichen Veränderungen können die von den Auswirkungen betroffenen Fachbereiche dazu verwenden, um das Ausmaß der spezifischen Auswirkungen abzuschätzen und zu bewerten. Dabei können die Untersuchungen von Fallstudien eine wesentliche Bewertungs- und Entscheidungsgrundlage in den betroffenen Fachgebieten darstellen. Für den wasserwirtschaftlichen Bereich werden die Niedrigwasserprojektionen Auswirkungen auf Gewässernutzungen haben.

Solche auf Gewässernutzungen orientierten Fallstudienbetrachtungen können in wasserrechtlichen Genehmigungsverfahren eine hilfreiche Entscheidungsgrundlage darstellen, um beurteilen zu können, wie in der Zukunft Gewässernutzungen auf die Gewässer auswirken können. Sie können Hinweise darauf liefern, bei welchen Niedrigwassersituationen kritische Schwellen-



werte in qualitativen und quantitativer Hinsicht erreicht werden können. Auf der Grundlage der Ergebnisse von Fallstudien können ebenso Strategien zur Anpassung entwickelt werden.

Dabei zeigt sich die Notwendigkeit, dass die Entwicklung von Klimamodellen weiter vorangetrieben werden muss und die weitere Entwicklung weiter zu verfolgen ist. Die Meteorologie und Hydrologie kann und sollte in diesem Punkt eine wesentliche Unterstützung für die anderen tangierten Fachgebiete anbieten. Weiterhin besteht die Notwendigkeit, die derzeit bestehenden Unsicherheiten in den Klima- und Wasserhaushaltsprojektionen durch Weiterentwicklungen und Verbesserungen der eingesetzten Modelle weiter zu reduzieren, damit Anpassungsstrategien in den berührten Fachdisziplinen insbesondere in der Wasser-, Land-, und Energiewirtschaft und Binnenschifffahrt weiterentwickelt werden und auf einer verbesserten Datenbasis aufgebaut werden können.

## 6 Literatur

KLIWA (2009): Auswirkung des Klimawandels auf Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz, KLIWA-Berichte Heft 14, Karlsruhe

LAWA (2007): Leitlinie für ein nachhaltiges Niedrigwassermanagement

Caspary (2007): Trockenperioden, Niedrigwasser und Hitzewellen in Südwestdeutschland auslösende „kritische“ Wetterlagen (Studie im Auftrag der LUBW, unveröffentlicht), LUBW, Karlsruhe

Hennegriff, W., Kolokotronis, V.: Klimawandel und Niedrigwasserentwicklung in Baden-Württemberg – Ursachen und Projektionen, WasserWirtschaft 1-2/2009, S pp.32 - 39

Hennegriff, W., Ihringer, J., Kolokotronis, V. (2008): Prognose von Auswirkungen des Klimawandels auf die Niedrigwasserverhältnisse in Baden-Württemberg, Korrespondenz Wasserwirtschaft 2008 Nr. 6, S pp. 309 - 314

## Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen – Periodizitäten und Korrelation mit Klimasignalen

Winfried Willems  
IAWG, Ottobrunn

### 1 Einleitung

Kenntnisse zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen sind von großer Bedeutung für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen. Im Rahmen von zwei aufeinander aufsetzenden KLIWA-Projekten werden daher umfangreiche statistische Untersuchungen zum Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen durchgeführt. Auftraggeber der Studien sind die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), das Bayerische Landesamt für Umwelt (BLfU) sowie das Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (LUWG RLP). Als Datengrundlage stehen lange Messreihen von 127 Stationen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz zur Verfügung. Darüber hinaus werden Beziehungen des Langzeitverhaltens zu den Klimakenngrößen Lufttemperatur, Niederschlag und Wasserdarangebot aus Schnee, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer sowie den weiteren Variablen NAO-Index und Sonnenfleckenanzahl untersucht.

Als statistische Methoden kommen zahlreiche, zum Teil neuere Ansätze zum Einsatz, so unter anderem kontinuierliche Waveletanalysen, instationäre Wahrscheinlichkeitsanalysen, auf dem Mann-Kendall-Test aufsetzende Trenddreiecke, zirkularlineare, trigonometrische und lokal gewichtete Regressionen, Kreuzkorrelationsanalysen sowie Clusteranalysen. Sowohl die Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen als auch die jeweils zugeordneten Klimazeitreihen werden zunächst univariat im Hinblick auf lokale oder abschnittsweise lineare Trends, auf großskalige Periodizitäten oberhalb der Jahresschwingung sowie auf Phasenverschiebungen im Jahresgang analysiert. Mittels bi- und multivariater Betrachtungen wird dann untersucht, inwieweit die in den Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten aufgedeckten Instationaritäten anhand der Klimavariablen erklärbar sind. Die Erkenntnisse werden genutzt zum Aufbau stochastischer Grundwassermodelle.

Im hier vorliegenden Artikel werden nur ausgewählte Aspekte der beiden Studien dargestellt.

### 2 Datengrundlagen und Datenaufbereitung

#### 2.1 Datengrundlagen

Tab. 1 liefert eine Übersicht über die verwendeten Daten. Das Höhenmodell mit 90m-Auflösung ist Grundlage für die weiter unten kurz erläuterte räumliche Interpolation meteorologischer Größen sowie für die hier durchgeführte Schneemodellierung.



Tab. 1: Zeitbezogene, raum-zeitbezogene und raumbezogene Daten

Datenart	Anzahl / Auflösung / Zeitraum	Datenherkunft
<b>Zeitbezogene Daten</b>		
Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten	127 Messstellen, Tages- oder Wochenwerte, max. Zeitraum 1913-2007	Bayerischen Landesamt für Umwelt (BY), Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (BW), Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz (RP)
Klimadaten	601 Stationen, Tageswerte, Max. Zeitraum 1931- 2008	Deutscher Wetterdienst (DWD)
NAO-Daten	1 Zeitreihe, Monatswerte Zeitraum 1824-2008	Climatic Research Unit (CRU) <a href="http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm">http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm</a> sowie <a href="http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm">http://www.cru.uea.ac.uk/~timo/projpages/nao_update.htm</a>
Sonnenflecken	1 Zeitreihe, Monatswerte Zeitraum 1749-2008	National Geophysical Data Center (NGDC) <a href="http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html">http://www.ngdc.noaa.gov/stp/SOLAR/ftpsunspotnumber.html</a>
<b>Raum- und zeitbezogene Daten</b>		
REGNIE-Daten	Raster, 1km, Tagessummen, Zeitraum 1931-2007	Deutscher Wetterdienst
<b>Raumbezogene Daten</b>		
Höhenmodell	90-m-Raster	Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Elevation Dataset
Hydrogeologische Karte	Maßstab: 1:1 Mio.	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR)
<b>Raumbezogene Daten für Messstellen</b>		
Hydrogeologische Daten	127 Messstellen	Daten zur hydrogeologischen Klassifikation der Messstellen, übergeben von den drei Auftraggebern BW, BY und RP

Neben den in der Tabelle dargestellten Daten stellen die Auftraggeber auch hydrogeologische Klassifikationen zur Kennzeichnung der Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessstellen zur Verfügung. Im Einzelnen handelt es sich um

- Daten zur Art des Hohlraums, bestehend aus vier Klassen,
- Daten zur Charakterisierung der Durchlässigkeit, bestehend aus neun Klassen, sowie
- Daten zur Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung, bestehend aus drei Klassen.

## 2.2 Datenaufbereitung

### 2.2.1 Aufbereitung der Zeitreihendaten

Die Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten liegen in der Regel in Form von Wochenwerten vor. Kleinere Datenlücken werden mittels Akima-Interpolation geschlossen. Um korrelative Betrachtungen zwischen den Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten zu den meteorologischen Zeitreihen möglich zu machen, werden letztere wie folgt aufbereitet:

- Sie werden ebenfalls zu Wochenwerten aggregiert.

- Sie werden auf die Koordinaten der 127 Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessreihen räumlich interpoliert, so dass im Ergebnis lagegleiche Zeitreihen der Klimaelemente und der Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten vorliegen.

Die gewählte Interpolation ist abhängig vom betrachteten Klimaelement. Im Fall der Lufttemperatur wird External-Drift-Kriging (s. z.B. Goovaerts 1997) zur Interpolation jedes Zeitschrittes von 1931 bis 2008 eingesetzt, wobei die Geländehöhe als Driftvariable dient. Abb. 1 zeigt das Höhenmodell und die Lagekoordinaten der 601 Klimamessstellen.

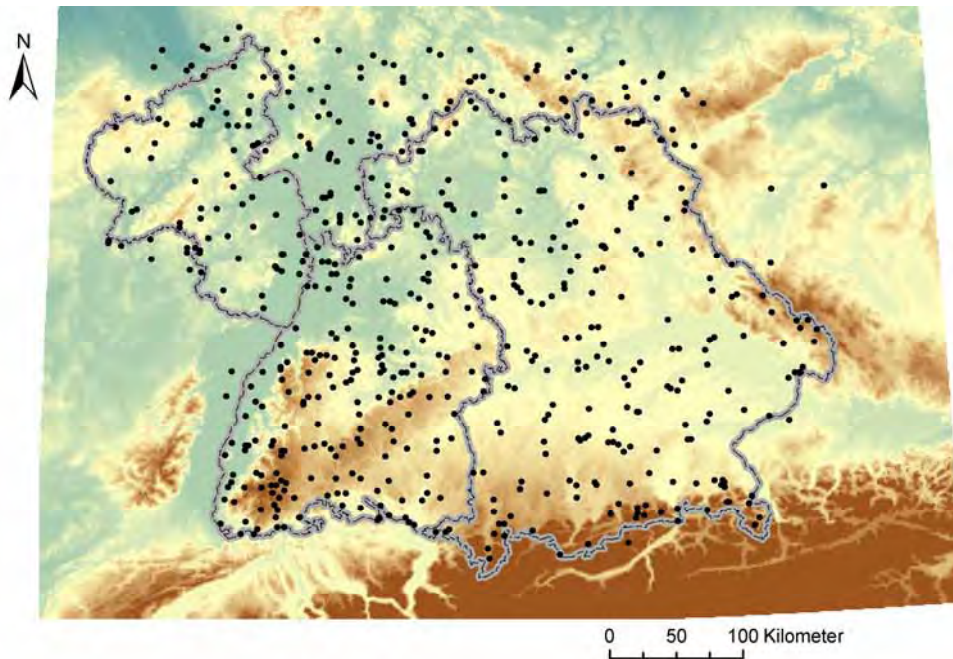


Abb. 1: SRTM -Höhenmodell, aggregiert auf 1×1km und 601 Klimamessstellen des DWD

Im Fall der Niederschlagsdaten kann auf den REGNIE-Datensatz des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen werden, so dass die Gewinnung der 127 Niederschlagszeitreihen in diesem Fall durch Abfrage des der jeweiligen Koordinate zugeordneten REGNIE-Rasters erfolgt.

### 2.2.2 Schneemodellierung

Daten zur Wasserabgabe aus Schnee liegen beim DWD nur stationsbezogen vor, wobei die Zeitreihen nicht vor 1961 beginnen. Aus diesem Grund wird die Wasserabgabe aus Schnee hier durch Modellierung mittels der Schneekomponente des USGS-Modells INFIL3.0 (Hevesi et al. 2002, USGS 2008) ermittelt. Dabei wird der Schneeschmelzprozess konzeptionell in Tageschritten und räumlich hochaufgelöst auf Gridzellen abgebildet. Die Gridzellen haben hier eine Ausdehnung von 1×1 Kilometer. Methodisch handelt es sich bei dem Schneemodell im Kern um eine Temperaturindex-Methode mit expliziter Modellierung von Akkumulations- und Sublimationsprozessen. Das Modell wird in eine Umgebung eingebunden, die die Optimierung freier Parameter mit dem Ziel der Minimierung einer vorgegebenen Zielfunktion erlaubt. Als Zielfunktion wird der Nash-Sutcliffe-Koeffizient verwendet, wobei die Abweichung zwischen berechneten und gemessenen Wasseräquivalenten minimiert wird. Der Tag-Grad-Faktor SNOPAR wird als Zeitfunktion behandelt (s. dazu auch Kokkonen et al. 2006) und dabei mittels der trigonometrischen Funktion  $SNOPAR(D) = A_0 + A_1 \cdot \sin(D) + A_2 \cdot \cos(D) + A_3 \cdot H_i$  beschrieben. Dabei ist  $D$  der Tag im Jahr (1, ..., 365) und  $H_i$  die Geländehöhe an der Gridzelle  $i$ . Optimiert werden die Parameter  $A_0$ ,  $A_1$  und  $A_2$ , so dass eine zeitabhängige Beschreibung bei sparsamer Parameteranzahl möglich ist. Als Optimierungsverfahren werden das auf der Evolutionsstrategie basierende und





im Rahmen hydrologischer Fragestellungen weit verbreitete SCE-Verfahren (z.B. Duan et al. 1994) sowie das klassische Quasi-Newton-Verfahren angewandt. Insgesamt werden sechs Parameter innerhalb enger, physikalisch sinnvoller Grenzen optimiert. Die mit den kalibrierten Parametern berechneten Wasseräquivalente für die Station Freudenstadt im Schwarzwald zeigt Abb. 2. Darin sind auch die über den gleichen Zeitraum gemessenen Wasseräquivalente sowie die mittels des DWD-Schneemodells SNOW-K ermittelten Wasseräquivalente dargestellt.

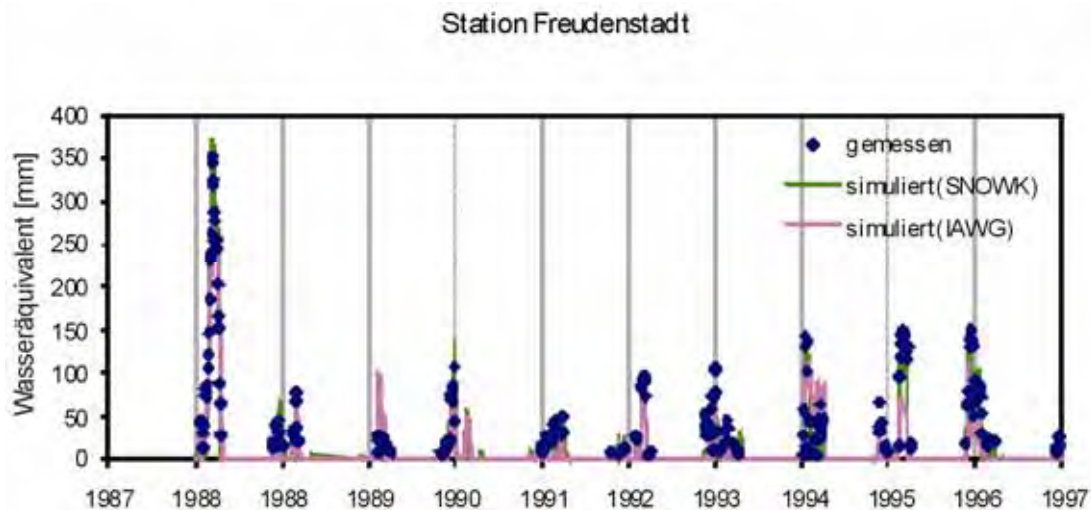


Abb. 2: Gemessene und berechnete Wasseräquivalente für die Messstelle Freudenstadt

Insgesamt wird bei der über den Gesamtzeitraum von 1931 bis 2008 durchgeführten Schneemodellierung eine Performanz erreicht, die – gemessen am Nash-Sutcliffe-Koeffizienten – derjenigen von SNOW-K etwa vergleichbar ist. Da das Modell flächendeckend für die drei Länder angewandt wird, steht damit neben den REGNIE-Niederschlagsdaten auch das Wasserdargebot aus Schnee an allen Koordinaten der Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessstellen zur Verfügung.

### 3 Angewandte statistische Methoden

#### 3.1 Regression

##### 3.1.1 Lokal gewichtete und trigonometrische Regression zur Beschreibung von Instabilitäten

Das Trendverhalten hydrometeorologischer Zeitreihen kann in der Regel durch Anwendung linearer Regressionen auf die Zeit nicht adäquat beschrieben werden, da eine über den Gesamtzeitraum vorliegende, lineare Beziehung meist nicht gegeben ist. Eine Möglichkeit, mit Nichtlinearitäten im Trendverhalten umzugehen, besteht in der Anwendung der lokal gewichteten Regression (s. Cleveland 1979). Im Prinzip kann man sich das Verfahren als ein sukzessive über die Datenreihe verschobenes Datenfenster mit jeweils innerhalb des Fensters durchgeführten Regressionsrechnungen vorstellen (die konkrete Implementierung nach Cleveland erfolgt in abgewandelter Form). Vom Ergebnis her ist die lokale Regression mit der Tiefpassfilterung einer Zeitreihe vergleichbar, ohne jedoch deren Nachteil aufzuweisen, dass am Anfang und am Ende der Datenreihe Werte verloren gehen. Während die Stärke der Glättung beim Tiefpassfilter über die Filterlänge bestimmt wird, erfolgt dies bei der lokalen Regression anhand des so genannten Smoothing-Parameters, der empirisch festgelegt wird.

Viele geophysikalische Zeitreihen sind durch Zyklen unterschiedlicher Periodizität charakterisiert. Neben dem meist dominanten Jahreszyklus werden zum Beispiel der elfjährige Sonnenfleckenzyklus oder die zweijährige „Quasi-Biennial Oscillation“ (QBO) in der Fachliteratur beschrieben. Sind die Periodenlängen  $T_k$  von insgesamt  $M$  Perioden,  $k=1, \dots, M$  bekannt, dann lassen sich diese statistisch auf der Grundlage einer trigonometrischen Regression nachbilden, also durch lineare Überlagerung gewichteter Sinus- und Kosinusanteile:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^M \left( a_k \cos\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) + b_k \sin\left(\frac{2\pi t}{T_k}\right) \right)$$

$T_k$  k-te Periodizität  
 $M$  Anzahl der Periodizitäten  
 $a_i, b_i$  Regressionskoeffizienten

### 3.1.2 Schrittweise Regression zur Modellidentifikation multivariater Modelle

Regressionsmodelle dienen der Prognose metrischer Zielgrößen durch eine oder mehrere Prädiktorvariablen. Bei der linearen multiplen Regression wird die Zielgröße  $Y$  als Linearkombination von  $p$  erklärenden Variablen  $X$  dargestellt. Dabei liegt das folgende Modell zugrunde:

$$\eta(Y) = a_0 + \sum_{i=1}^p a_i \lambda_i(X_i) + \varepsilon_i$$

mit:

$Y$	Zielgröße
$X$	erklärende Variable
$p$	Anzahl der berücksichtigten erklärenden Variablen
$a_0$ bis $a_p$	Parameter des multiplen Regressionsmodells
$\varepsilon_i$	Residuum
$\eta(), \lambda()$	Transformationsvorschriften, z.B. Logarithmus

Die Auswahl (einer möglichst kleinen Zahl) erklärender Variablen aus der Gesamtheit (einer möglichst großen Zahl) potentiell erklärender Variablen (sogenannte Modellidentifikation) ist eine zentrale Fragestellung beim Aufbau von Regressionsmodellen. Dazu gibt es eine Reihe von Strategien, wobei hier die kriterienbasierten Methoden (AIC und BIC) im Rahmen einer schrittweisen Regression betrachtet werden.

Informationskriterien (IC) stellen eine Kombination des Maximum-Likelihood-Prinzips mit informationstheoretischen Überlegungen dar. Die Güte eines Regressionsmodells bei einer Stichprobe des Umfangs  $n$  und der Fehlervarianz  $\sigma^2$  wird dabei anhand einer Funktion beurteilt, die bei der Schätzung von  $p$  Parametern mit Hilfe der Kleinstquadratmethode folgende Form annimmt:

$$IC = n \cdot (\ln(2\pi) + 1) + n \cdot \ln(\sigma^2) + k(p + 2)$$

Dabei spricht man von AIC, wenn  $k$  in der obigen Formel den Wert zwei annimmt ( $k=2$ ) und von BIC, wenn  $k$  festgelegt wird als  $k=\ln(n)$ . AIC und BIC nehmen theoretisch Werte zwischen minus und plus unendlich an. Je kleiner der Wert, desto besser ist die Anpassung. Anders als das bekanntere Bestimmtheitsmaß, das der durch das Modell erklärten Varianz entspricht und daher bei Hinzunahme weiterer Variablen stetig größer wird, wird bei AIC und BIC eine möglichst optimale Anzahl  $p$  von Variablen gesucht. Dies erkennt man in obiger Formel daran, dass neben der Fehlervarianz  $\sigma^2$  auch die Anzahl  $p$  der im Modell verwendeten Variablen einfließt und einem überparametrisierten Modell entgegenwirkt. Dabei tendiert BIC allgemein zu Modellen mit



weniger Parametern als AIC. Bei der schrittweisen Regression werden nun sukzessive Modelle unterschiedlicher Komplexität anhand von AIC bzw. BIC bewertend verglichen, um so zu einer optimalen Auswahl der letztlich zu verwendenden, erklärenden Variablen zu gelangen.

### 3.2 Wavelets

Spektralanalysen (z.B. Schönwiese 2006) sind ein seit vielen Jahren etablierter Zweig der statistischen Analyse von Zeitreihen mit dem Ziel der Aufdeckung von Periodizitäten. Dabei wird die Darstellung der Werte gegen die Zeit in eine Darstellung der Werte gegen die zugrunde liegenden Frequenzen transformiert (Spektraldichte). Der Zeitbezug der Daten geht also verloren. Bereits daran erkennt man, dass bei der Spektralanalyse die Annahme zugrunde liegt, dass die betrachteten Reihen stationär sind. Diese Voraussetzung ist bei den hier betrachteten Reihen nicht erfüllt. Das derzeit wohl am weitesten ausgearbeitete Verfahren zur Detektion von nicht stationären Periodizitäten ist die Analyse auf der Grundlage von Wavelets (z.B. Carmona et al. 1998, Torrence / Compo 1998). Anschaulich betrachtet handelt es sich bei Wavelets um mathematische Funktionen („kleine Wellen“), mit deren Hilfe eine gegebene Zeitreihe im Hinblick auf die in ihr enthaltenen Frequenzbestandteile untersucht werden kann. Zu diesem Zweck werden die Wavelets skaliert (also gestreckt bzw. gestaucht) und systematisch entlang der Zeitreihe verschoben, wobei jeweils die Übereinstimmung mit der Zeitreihe erfasst wird. Auf diese Weise entsteht eine zweidimensionale Abbildung der Zeitreihe (Wavelet-Powerspektrum), bei der signifikante Periodizitäten (y-Achse) gegen die Zeit (x-Achse) aufgetragen werden. Damit werden Veränderungen der Periodizitäten im Zeitverlauf erkennbar. Die zahlreichen, in der neueren Fachliteratur beschriebenen Waveletanalysen von hydrologischen Zeitreihen verdeutlichen, dass dem Verfahren aktuell eine große Bedeutung beigemessen wird (s. Übersicht in Labat 2005). Eine im Zusammenhang mit kontinuierlichen Waveletanalysen schwierig zu beantwortende Frage ist die nach der Signifikanz der Waveletkoeffizienten. Häufig werden die von Torrence / Compo (1998) eingeführten Formeln angewandt, um signifikante Periodizitäten zu extrahieren. Dabei wird im Prinzip jeder einzelne Koeffizient des Powerspektrums hinsichtlich der Signifikanz beurteilt, ohne dabei die im Spektrum benachbarten Punkte zu betrachten (punktbezogener Test). Insbesondere Maraun (2006) setzt sich mit der Frage der Signifikanzberechnungen bei der kontinuierlichen Waveletanalyse intensiv auseinander und kommt zum Schluss, dass die punktweise Betrachtung wegen der hohen Redundanz des Powerspektrums in vielen Fällen zu einer deutlichen Überschätzung der Anzahl signifikanter Koeffizienten führt. Aus diesem Grund entwickelt Maraun (2006) einen flächenbezogenen, auf Monte-Carlo-Simulation aufsetzenden Test und weist nach, dass dieser Signifikanztest dem punktbezogenen überlegen ist. Dieser flächenbezogene Test, zu dessen mathematischer Darstellung hier auf die Originalliteratur verwiesen sei, wird bei den nachfolgend durchgeführten Waveletanalysen stets zugrunde gelegt.

### 3.3 SARIMAX-Modelle

Die in der Zeitreihenanalyse verbreiteten ARIMA-Modelle bezeichnen lineare Modelle für stationäre, zeitdiskrete stochastische Prozesse. ARIMA ist dabei ein Akronym für „Auto-Regressive Integrated Moving Average“. Die grundlegende Gleichung lautet

$$y_t = \sum_{i=1}^p a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t$$

wobei der erste Term dem autoregressiven Teil und der zweite Term dem Moving-Average-Teil des Modells entspricht.  $\varepsilon$  ist ein weißes Rauschen und  $p$  und  $q$  bezeichnen die Ordnung der entsprechenden Modellteile. Wesentliche Teile der Literatur über ARIMA-Modelle beschäftigen sich mit den Fragen, wie die Ordnungen  $p$  und  $q$  bestimmt werden sollten und wie die Parameter des Modells zu schätzen sind. Im Standardwerk der Zeitreihenanalyse von Box / Jenkins (1970) sind die Autokorrelations- und partiellen Autokorrelationsfunktionen maßgeblich für die Festlegung der Ordnungen. Die dort erläuterten Techniken werden hier nicht im Detail dargestellt, sie werden aber bei der späteren Anwendung der Modelle zugrunde gelegt. Gehen nicht

unmittelbar die  $y$ -Werte, sondern deren Differenzen ( $y_t - y_{t-1}$ ) in das Modell ein, so dass hinterher die Modellprognosen wieder "integriert" (also aufsummiert) werden müssen, spricht man von ARIMA-Modellen. Das I steht dann für "Integrated". Die Differenzbildung soll dabei zur Stationarität der differenzierten Zeitreihe führen.

ARIMA-Modelle sind in verschiedener Weise erweitert worden. Bei der hier betrachteten ARIMAX-Variante werden eine oder mehrere exogene Variablen mit in das Modell einbezogen. Dabei erweitert sich die Modellschätzung so, dass neben den Parametern für den AR- und den MA-Teil auch die Parameter für die exogenen Variablen simultan geschätzt werden. Dies erfolgt in der Regel durch nichtlineare Optimierungstechniken. Wird schließlich auch die Saisonfigur, also der Jahreszyklus, mit in die exogene Komponente des Modells aufgenommen, dann spricht man von SARIMAX-Modellen, wobei das „S“ den saisonalen Modellteil symbolisiert.

Speziell in der Grundwasserstatistik werden die durch eine exogene Komponente erweiterten stochastischen Modelle mitunter auch als Transferfunktionsmodelle bezeichnet. Anwendungen dieser Modellklasse im Bereich der Grundwasserhydrologie finden sich zum Beispiel bei Tankersley et al. (1993), Van Geer / Zuur (1997) sowie Yi / Lee (2004).

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Lokale Trends und veränderliche Periodizitäten in Klimazeitreihen

#### 4.1.1 Lokale Trends

Mittels lokal gewichteter Regressionen auf die Zeit wird nachfolgend das Änderungsverhalten der Klimazeitreihen von Lufttemperatur und Wasserdargebot an den Koordinaten der Grundwasserstands- und Quellschüttungsmessstellen betrachtet. Um dabei zu möglichst aussagekräftigen Darstellungen zu kommen und das gleichartige Verfahren später auch auf die Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen anwenden zu können, wird wie folgt vorgegangen: Jede einzelne Zeitreihe von Wochenwerten wird z-transformiert (Division der mittelwertbereinigten Reihe durch die Standardabweichung), so dass die transformierten Reihen einen Mittelwert von Null und eine Standardabweichung von Eins haben. Die lokale Regression wird dann auf die transformierten Reihen angewandt. Sämtliche lokalen Trends werden in einer einzigen Grafik zusammengeführt.

Das Ergebnis der Vorgehensweise zeigt Abb. 3 bezogen auf die Lufttemperatur und Abb. 5 für den Niederschlag. Bei beiden Variablen fällt der relativ gleichartige Verlauf der 127 lokalen Trends auf. Bei der Lufttemperatur gilt dies nicht für den Zeitraum vor 1940, bei dem sowohl Zu- als auch Abnahmen zu verzeichnen sind (in der Abbildung rot bzw. schwarz eingefärbt). Wie in Abb. 4 zu erkennen, zeigen diese andersartigen Trends in den 1930er Jahren eine eindeutige räumliche Differenzierung: die Abwärtstrends treten eher im Norden des Untersuchungsgebietes auf, die Aufwärtstrends im Süden. Ein deutlicher Anstieg der Lufttemperaturen ist erst ab 1980 zu verzeichnen.

Die lokalen Trends der z-transformierten Zeitreihen des Niederschlags unterscheiden sich im Zeitraum 1930-1940 sowie ab 2000 deutlich voneinander, während dazwischen starke Konformitäten im Verlauf bei den meisten Reihen erkennbar sind. Wie Abb. 6 deutlich macht, zeigen die Reihen im Osten häufig Aufwärtstrends in beiden fraglichen Zeiträumen, während bei den Stationen im Westen eher Abwärtstrends nach 2000 zu verzeichnen sind.

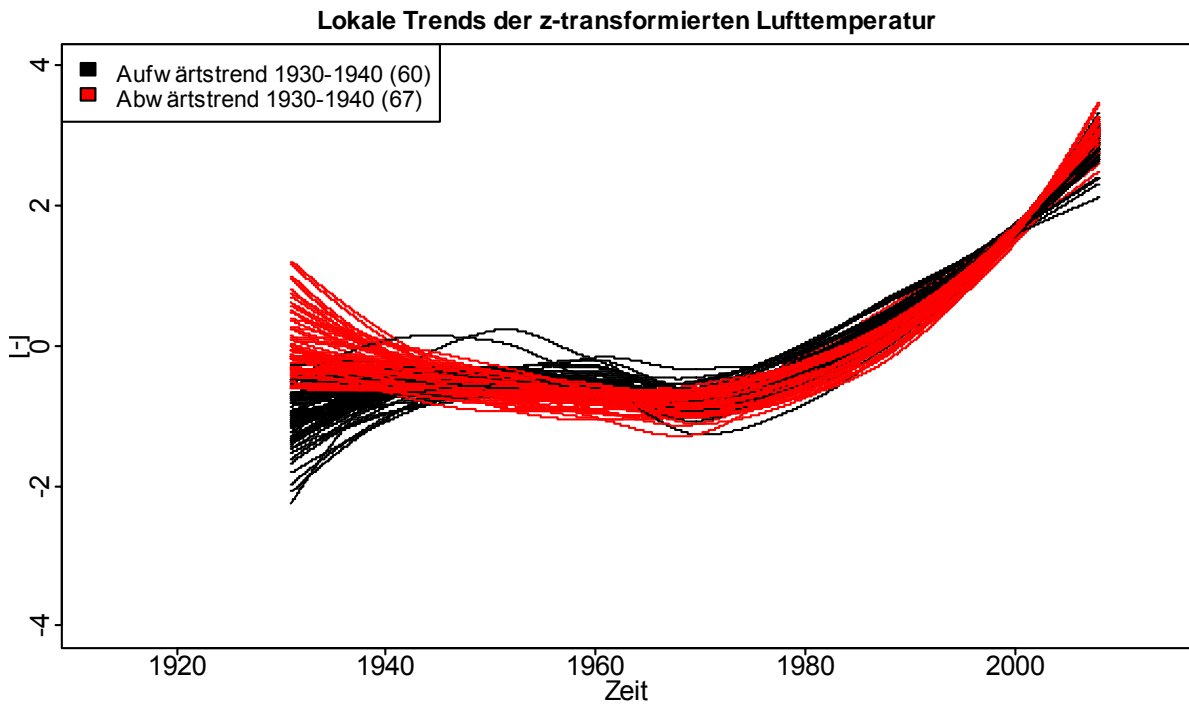


Abb. 3: Lokale Trends für 127 Zeitreihen der z-transformierten Lufttemperatur

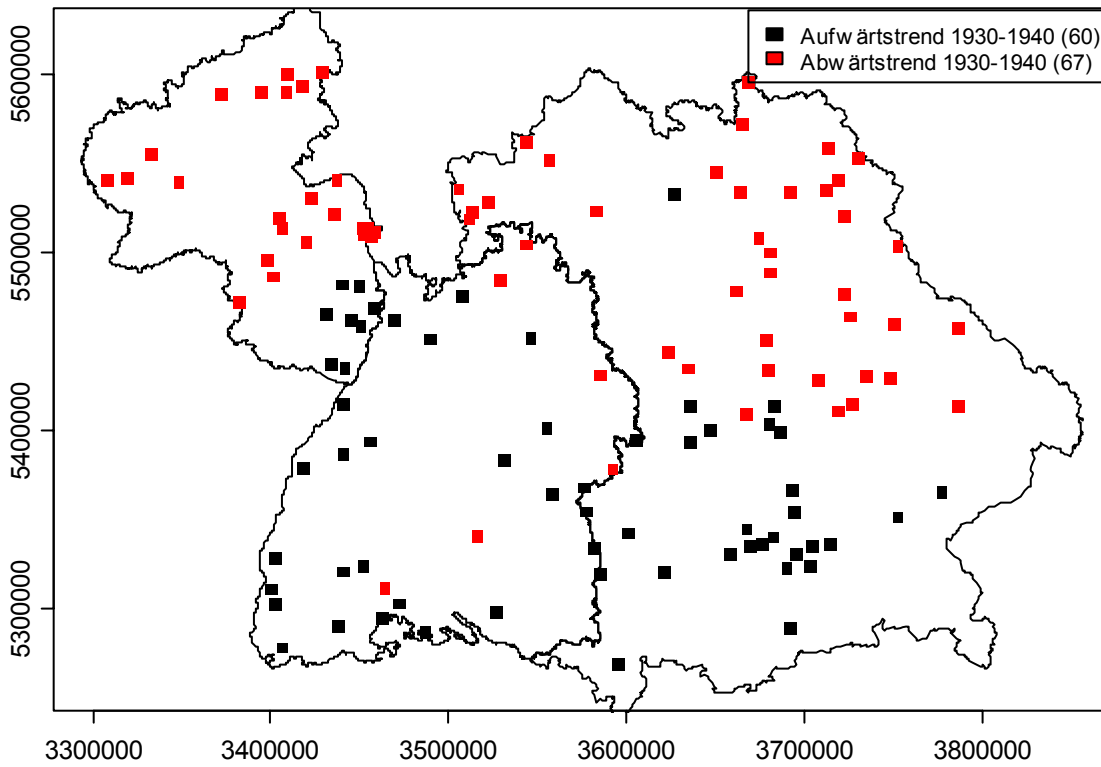


Abb. 4: Verhalten der Lufttemperatur im Zeitraum 1930-1940

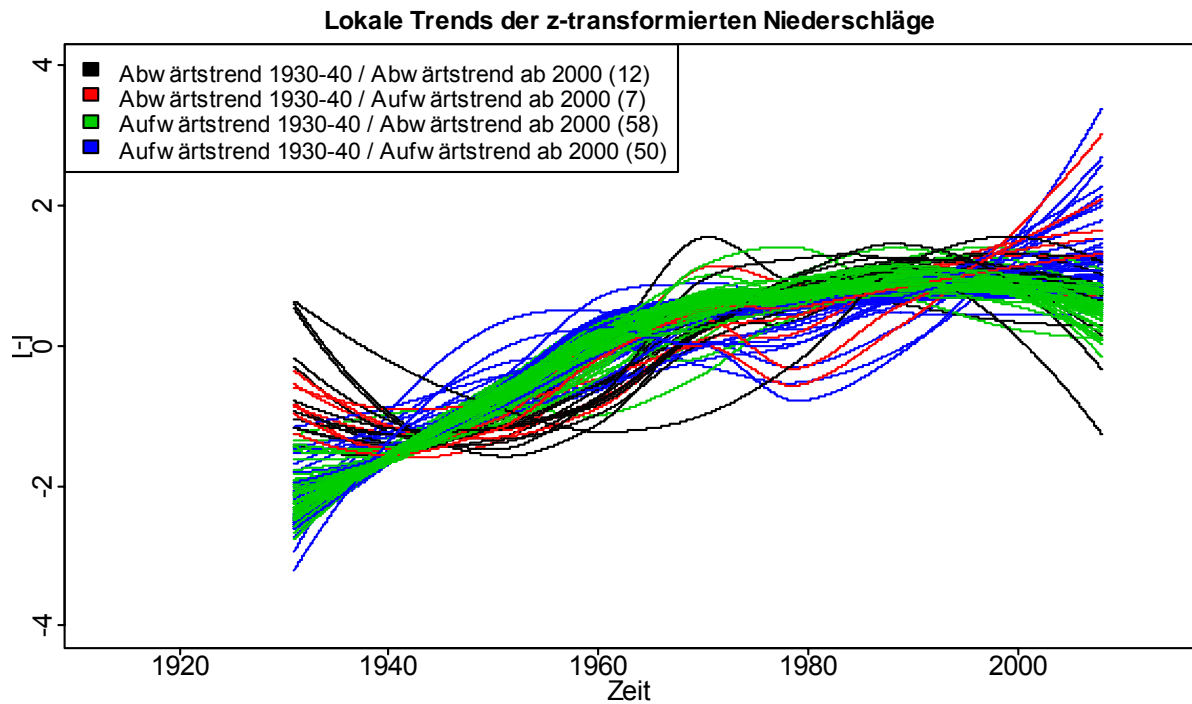


Abb. 5: Lokale Trends für 127 Zeitreihen des z-transformierten Niederschlags

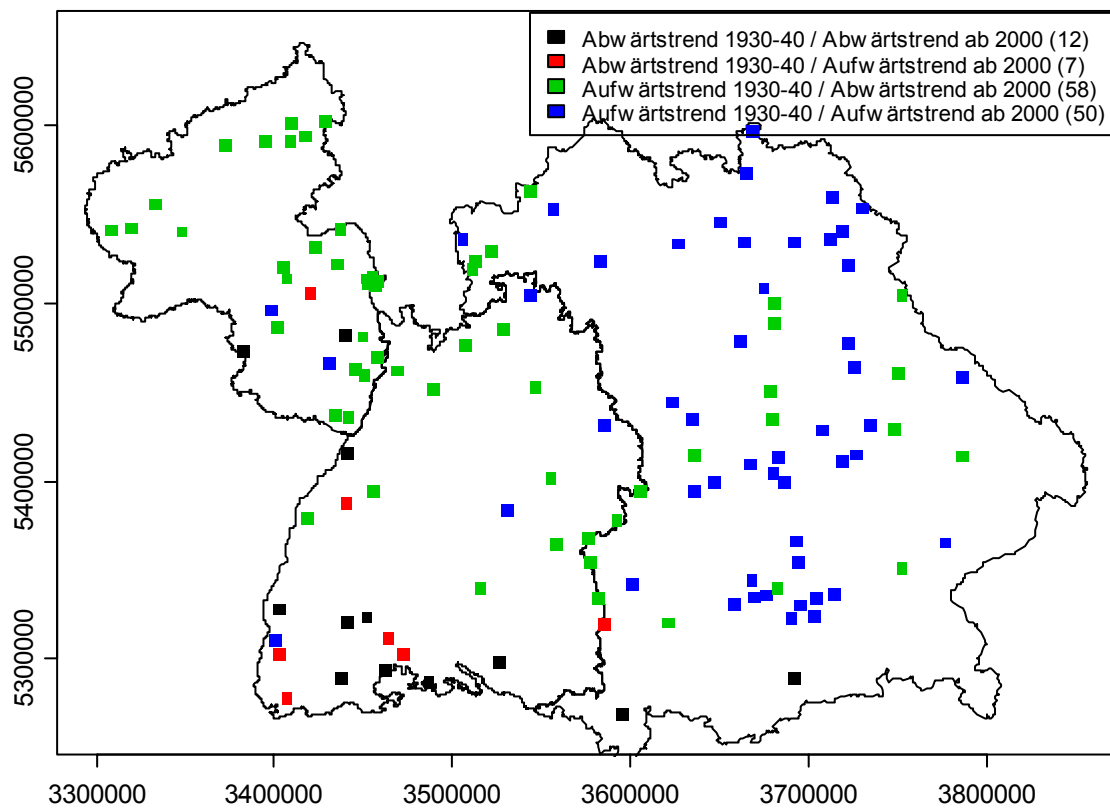


Abb. 6: Verhalten des Niederschlags im Zeitraum 1930-1940 sowie nach 2000



#### 4.1.2 Veränderungen im Jahresgang

Auf der Grundlage der in Abschnitt 2 erläuterten trigonometrischen Regression wird untersucht, ob sich Veränderungen im Jahresgang der Variablen eingestellt haben. Betrachtet wird also die Periodizität ( $M=1$ ) der Dauer  $T_1=365$  d. Dabei werden die beiden Regressionskoeffizienten für den Sinus- und Kosinusanteil der Schwingung für gleitend verschobene Siebenjahreszeitfenster ermittelt und jeweils Phaseninformation abgegriffen, um auf diese Weise zeitliche Verschiebungen im Jahresgang detektieren zu können. Im Ergebnis erhält man den mittleren Tag im Jahr, an dem der Höchstwert auftritt, für jedes Jahr der betrachteten Reihe. Das Ergebnis, zusammengefasst für alle 127 Messstellenpunkte und die drei Variablen Lufttemperatur, Niederschlag und Wasserdargebot, zeigt Abb. 7. Zur Erzeugung der Grafik wurden zunächst die mittleren Eintrittstage für jede Messstelle durch eine Linie verbunden und gegen die Zeit aufgetragen, so dass 127 Linienverläufe für eine Variable resultieren. Dargestellt sind diese Linienvläufe bezogen auf die Lufttemperatur in grüner Einfärbung, für den Niederschlag in schwarz und für das Wasserdargebot in rot. Folgendes lässt sich anhand der Abbildungen erkennen: Hinsichtlich der Lufttemperatur zeigt sich an keiner einzigen Messstelle eine Veränderung des Eintrittszeitpunktes der mittleren Maximaltemperatur, so dass alle 127 Linien über den gesamten Betrachtungszeitraum fast deckungsgleich um den 200. Tag des Jahres aufeinander liegen. Beim Niederschlag und dem Wasserdargebot zeigen sich demgegenüber deutliche Verschiebungen, die beim Niederschlag fast ausschließlich und beim Wasserdargebot mit Ausnahme weniger Messstellen zu einem späteren Eintritt des mittleren Maximalwertes im Jahr führen. Die Verläufe der Veränderungen sind dabei in der Regel näherungsweise linear. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Verschiebungen ist dabei festzustellen, dass sich der Eintrittszeitpunkt in der Regel umso stärker zu späteren Zeitpunkten im Jahr verschiebt, je weiter nördlich und westlich man sich im Untersuchungsgebiet befindet.

#### Verschiebung des Tages im Jahr mit maximalem, mittleren Wochenwert

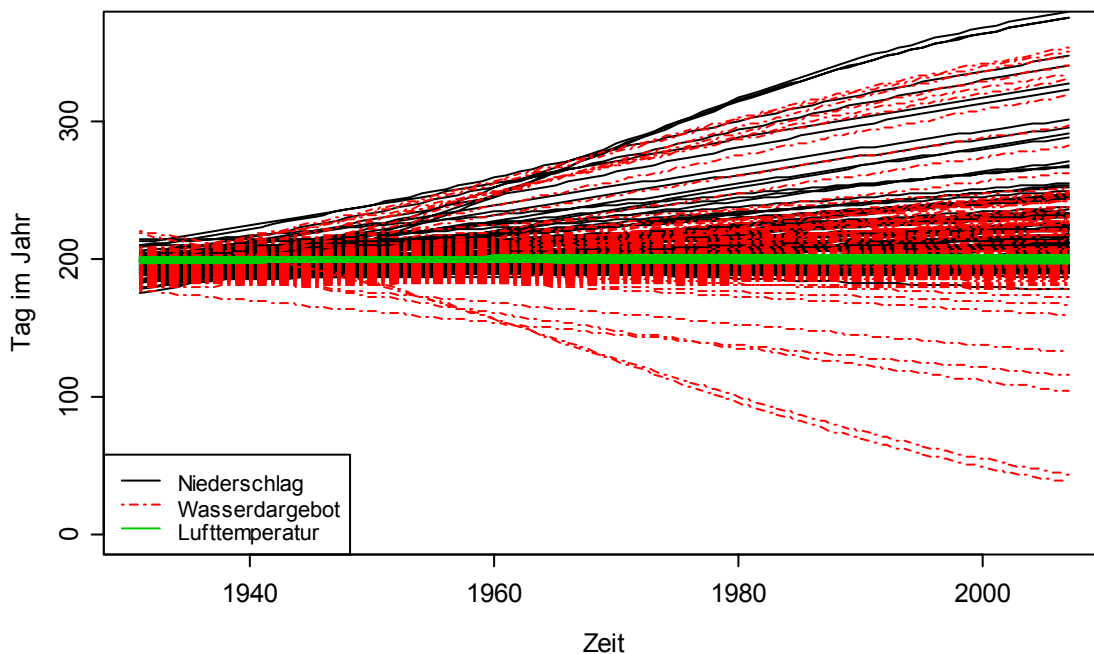


Abb. 7: Phasenverschiebungen von Lufttemperatur (grün), Niederschlag (schwarz) und Wasserdargebot (rot) an den 127 Messstellenkoordinaten

### 4.1.3 Veränderungen langskaliger Periodizitäten

In Abb. 8, links, ist das Ergebnis der in Abschnitt 2 erläuterten Wavelettransformation auf die Niederschlagsreihe an der Messstelle Hohenstadt in Form eines Waveletspektrums dargestellt. Neben einem nicht durchgängig markant ausgeprägten Jahresgang erkennt man signifikante Achtjahresschwingungen im Zeitraum 1980 bis 2000 und signifikante Vierjahresschwingungen im Zeitraum 1960 bis 1975. Auf der rechten Seite der Abbildung sind die Ergebnisse der Waveletuntersuchungen für alle 127 Niederschlagsreihen zusammengefasst. Dazu werden alle erzeugten Powerspektren überlagert und die signifikanten Bereiche ausgezählt, so dass dargestellt werden kann, bei wie viel Prozent der Reihen im jeweiligen Zeitraum und der jeweiligen Skala signifikante Ergebnisse auftreten. Die für Hohenstadt festgestellten Ergebnisse treten also, wie der rechte Teil der Abbildung zeigt, bei sehr vielen Niederschlagsreihen in ähnlicher Weise auf. Wendet man demgegenüber die Wavelettransformation auf die Lufttemperaturreihen an, so ist alleine der Jahresgang als signifikante Periodizität ermittelbar, signifikante längerskalige Schwingungen sind nicht feststellbar.

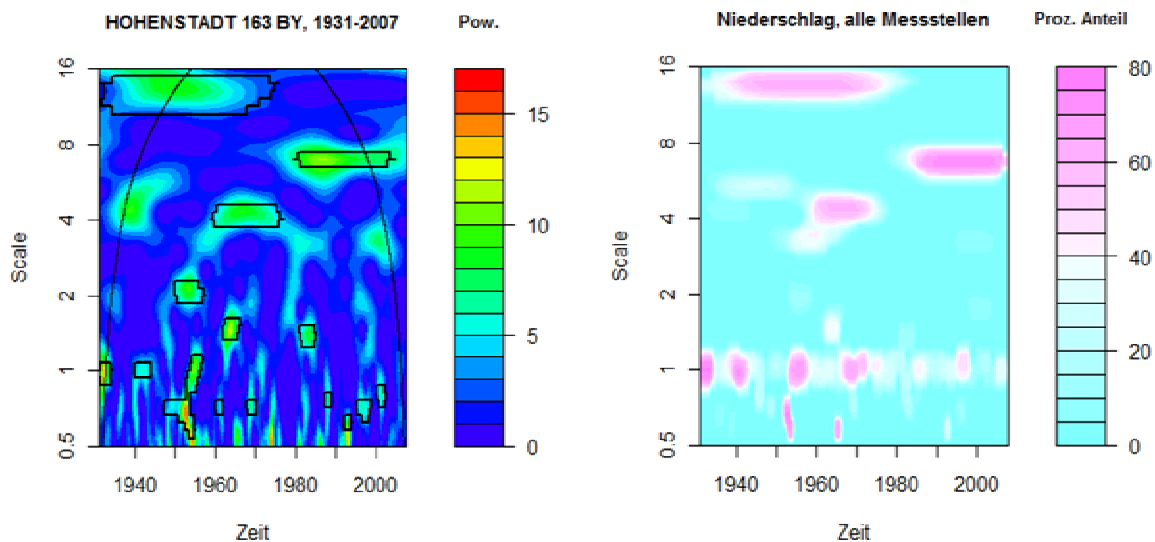


Abb. 8: Waveletspektrum des Niederschlags bei Hohenstadt (links) sowie Anzahl signifikanter Ergebnisse der Waveletuntersuchungen an allen 127 Messstellenkoordinaten (rechts)

## 4.2 Trends und Periodizitäten in Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten

### 4.2.1 Lokale Trends

Die lokal gewichteten Regressionen von z-transformierten Zeitreihen auf die Zeit werden auch auf sämtliche Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen angewandt. Wegen der z-Transformation können dabei nicht nur sämtliche Grundwasserstandszeitreihen in einer Grafik zusammengeführt werden, auch die Quellschüttungszeitreihen lassen sich mit aufnehmen (Abb. 9).



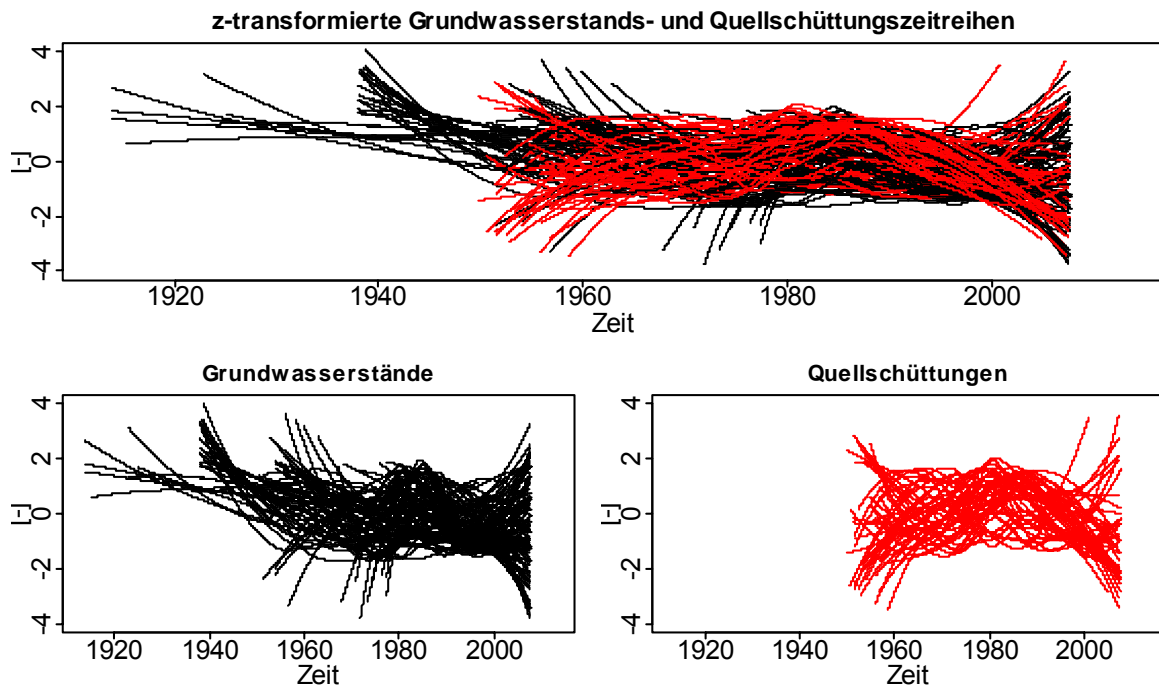


Abb. 9: Lokale Trends für 127 Zeitreihen z-transformierter Grundwasserstände und Quellschüttungen

Im Vergleich zu den Klimavariablen Lufttemperatur und Niederschlag fällt die wesentlich stärkere Inkonformität der Einzelverläufe auf. Viele Quellschüttungszeitreihen zeigen näherungsweise steigende Tendenzen von den 1960er bis zu den 1980er Jahren und Abnahmen ab etwa 1980 oder 1990. Bei den Grundwasserstandsganglinien sind generelle Verläufe in der Grafik schwer erkennbar.

Der Versuch, die unterschiedlichen Verläufe anhand von hydrogeologischen Gebietsmerkmalen und räumlicher Nähe zu erklären, führt zu keinen verwertbaren Ergebnissen. Aus diesem Grund wird eine rein datenorientierte Gruppierung mittels Clusteranalyse vorgenommen, wobei sämtliche 127 Zeitreihen (Grundwasserstand und Quellschüttungen) als Variablenmerkmale eingeführt werden. Bei Extraktion von vier Gruppen ergibt sich eine Aufteilung entsprechend Abb. 10.

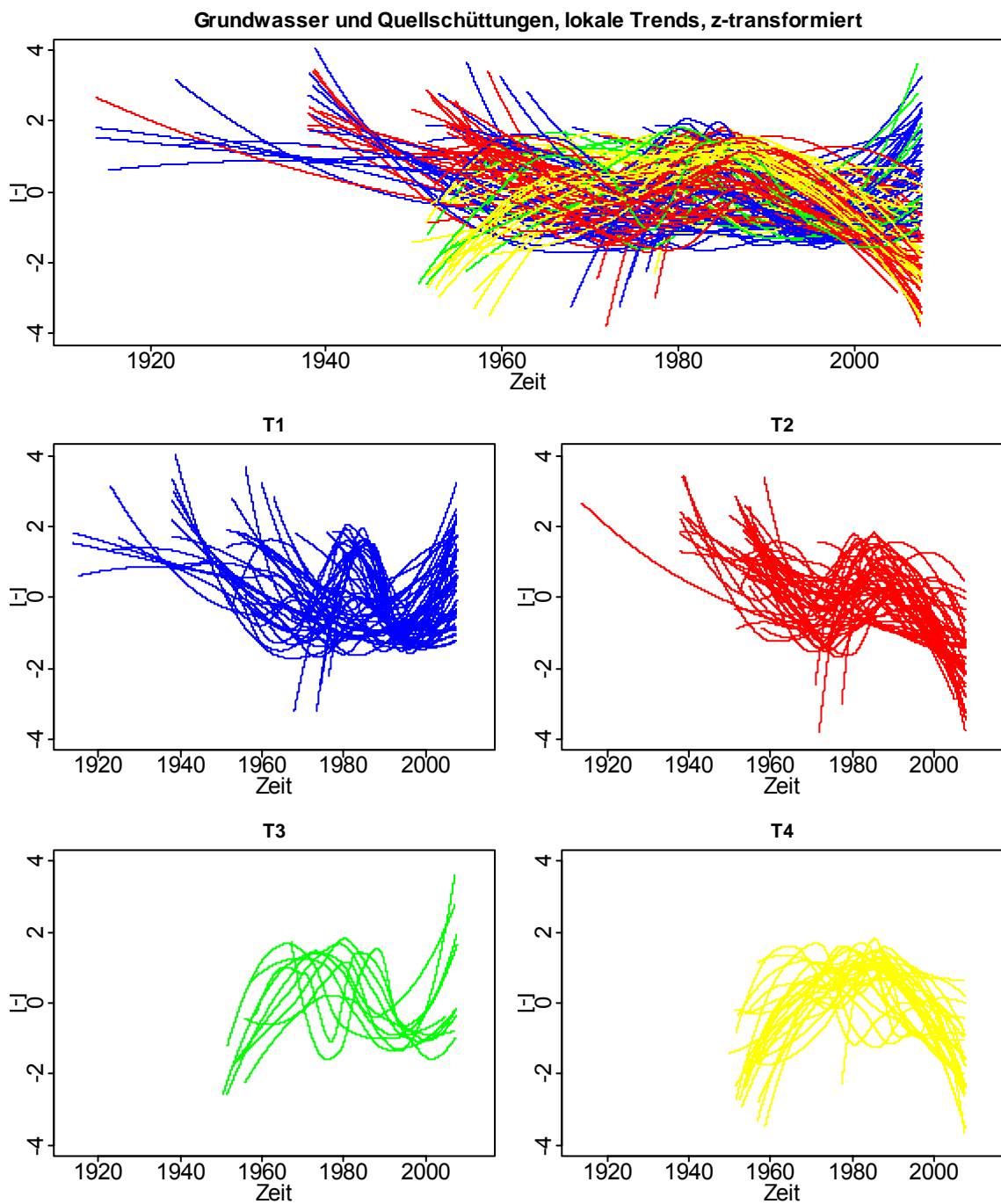


Abb. 10: Gruppierte lokale Trends z-transformierter Grundwasserstände und Quellschüttungen

Die Gruppe T1 ist gekennzeichnet durch Anstiege von 1970 bis 1980 und ab 2000 sowie durch Rückgänge bis 1970 und zwischen 1980 und 1990. Gruppe T2 zeigt Rückgänge bis 1970, Anstiege bis 1980 und danach Rückgänge, Gruppe T3 weist früher beginnende Anstiege ab 1950, Rückgänge bis 2000 und seither Anstiege, Gruppe T4 Anstiege bis 1980 und seither Rückgänge auf. In der Gruppe T3 befinden sich fast ausschließlich Quellschüttungsmessstellen. Alle 4 Typen zeigen tendenziell ein lokales Maximum im mittleren Verhalten um 1980.

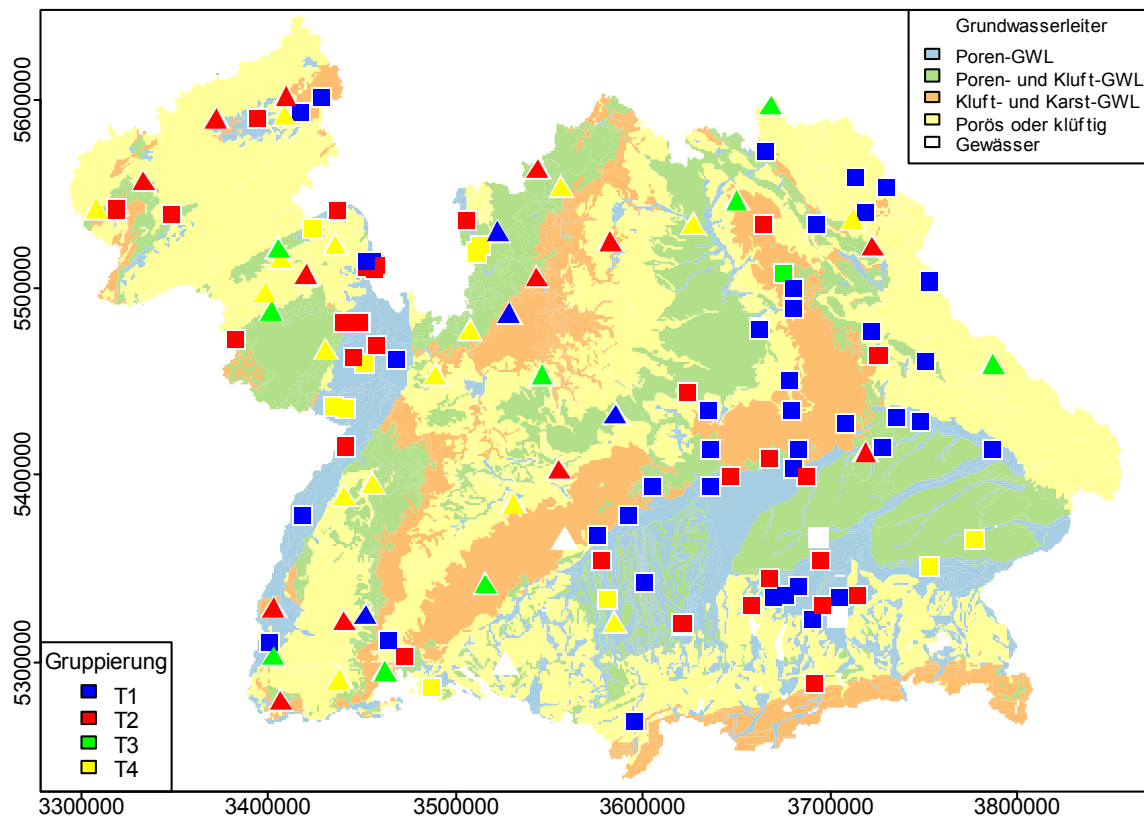


Abb. 11: Räumliche Verteilung der Gruppen lokaler Trends von Grundwasserständen und Quellschüttungen, zeitreihenbasiert gruppiert; Grundwassermessstellen sind durch Quadrate, Quellen durch Dreiecke dargestellt.

Die räumliche Verteilung der Gruppen ist in Abb. 11 dargestellt. Ein klares räumliches oder hydrogeologisch begründbares Muster der Gruppierung ist nicht leicht identifizierbar. Im Bereich nördlich der bayerischen Donau dominiert Typ T1. Auffallend sind speziell im Bereich der Porengrundwasserleiter auftretende, divergierende Richtungen des Trendverhaltens seit dem Jahr 2000 trotz oft gleichartiger, geringer Grundwasserflurabstände und räumlicher Nähe (Kreise in der Karte). Möglicherweise liegen hier zumindest teilweise anthropogene Beeinflussungen vor.

#### 4.2.2 Veränderungen im Jahresgang

Die Anwendung der trigonometrischen Regression auf die Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen zeigt, dass das Maximum des Jahresgangs in der überwiegenden Zahl der Reihen in den Monaten März bis Mai auftritt. Wendet man das Verfahren auf gleitende Siebenjahresfenster der Reihen an und betrachtet dann die Veränderlichkeit des Eintrittszeitpunktes des Maximums, so ergibt sich das in Abb. 12 dargestellte Ergebnis. Vor allem in Bayern lässt sich demnach die klare Tendenz erkennen, dass das Jahresmaximum früher im Jahr eintritt.

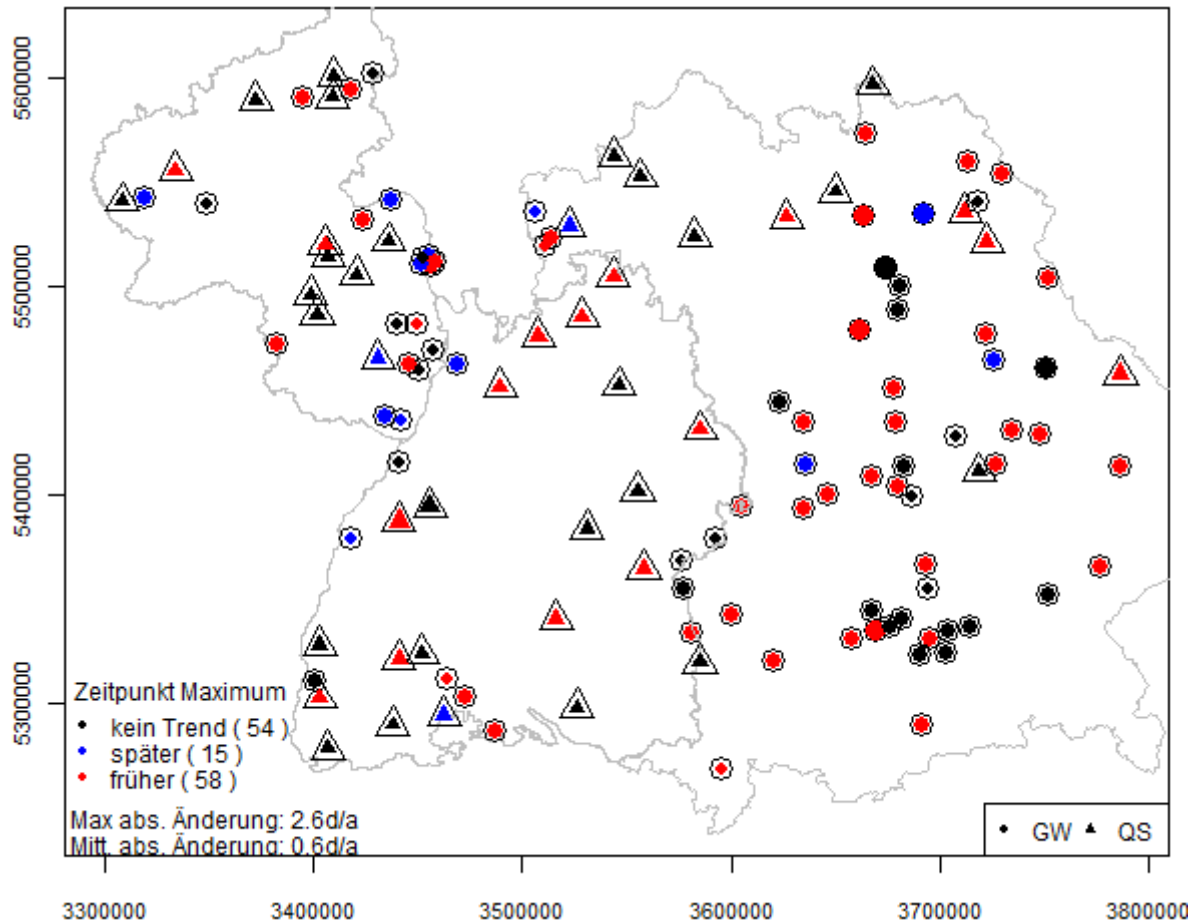


Abb. 12: Veränderungen im Jahresgang von Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen

#### 4.2.3 Langskalige Periodizitäten

Waveletuntersuchungen können in der Regel nur für lückenfreie Zeitreihen durchgeführt werden. Dies stellt bei den Waveletuntersuchungen der Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen nicht selten ein Problem dar, weil viele Messreihen Lücken über nicht einfach schließbare Dauern aufweisen. Aus diesem Grund wird das Verfahren jeweils nur auf die längsten zusammenhängenden Zeiträume angewandt.

In Abb. 13 wird dargestellt, bei welchen Messstellen signifikante, langskaligere Periodizitäten identifizierbar sind. Dabei werden die Periodizitäten dann einer Station zugeordnet, wenn zumindest 15% der Waveletkoeffizienten im entsprechenden Skalenbereich die Signifikanzgrenze überschreiten.

Man erkennt, dass Vier- und Achtjahreszyklen in erster Linie bei Grundwassermessstellen im Bereich von Porengrundwasserleitern oder bei Quellschüttungsmessstellen auftreten. Offensichtlich wird das in den Niederschlags- und Wasserdargebotszeitreihen auftretende Signal (Abb. 8) bei anderen hydrogeologischen Verhältnissen in der Regel herausgefiltert.

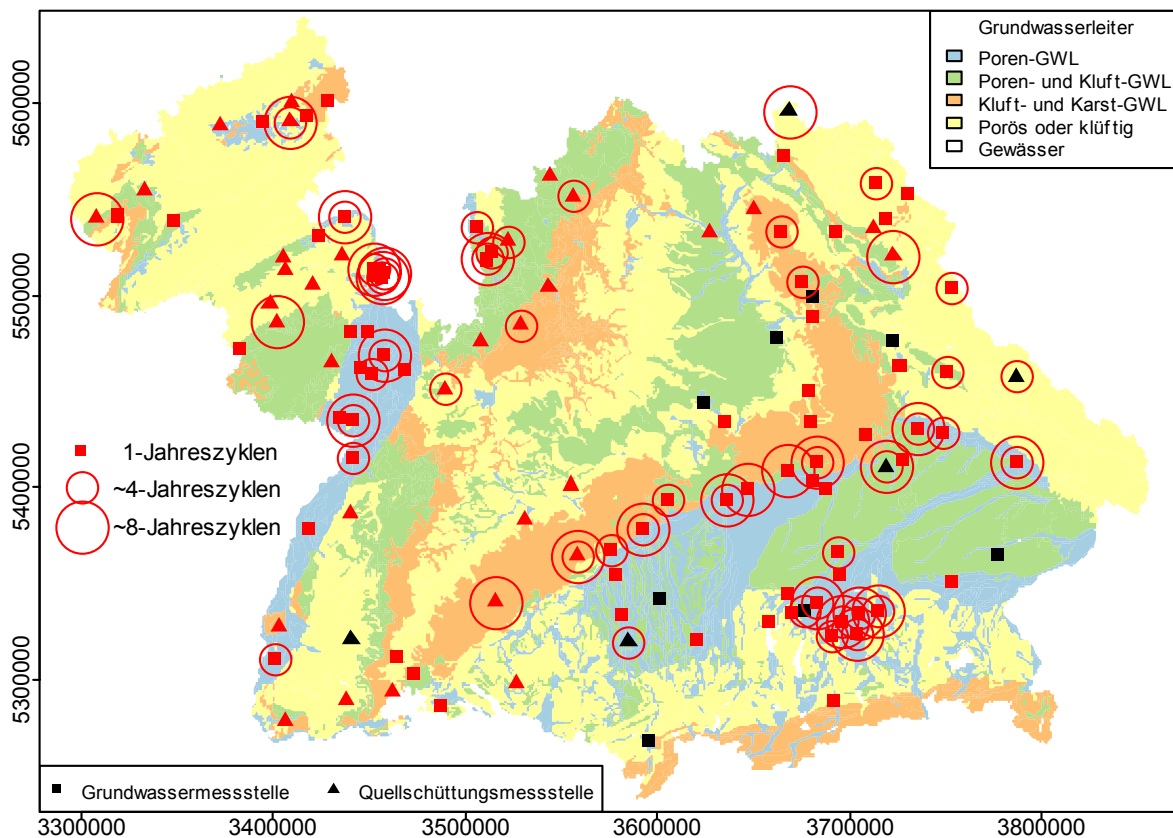


Abb. 13: Räumliche Verteilung des Auftretens dominanter Jahreszyklen sowie von Periodizitäten der Länge von ca. 4 und ca. 8 Jahren

### 4.3 Multivariate Betrachtungen und Prognosemodelle

#### 4.3.1 Multivariate Betrachtungen

Mittels der multivariaten Regressionsanalyse wird nachfolgend geprüft, inwieweit die in den Grundwasserständen und Quellschüttungen auftretenden Veränderlichkeiten durch Linearkombination mehrerer erklärender Variablen beschrieben werden können. Um die statistisch bedeutsamen erklärenden Variablen zu ermitteln, wird das Verfahren der schrittweisen Regression mit AIC-Kriterium (s. Abschnitt 2) getrennt für jede der 127 Messstellen eingesetzt, es werden also 127 separate Regressionsmodelle identifiziert. Die folgenden Variablen werden dabei als potentiell erklärende Variablen verwendet:

- der NAO-Index (überregionale Zeitreihe, Kürzel NAO),
- Sonnenflecken (globale Zeitreihe, Kürzel SO),
- Sonnenscheindauer (regionale Zeitreihe, Kürzel SD),
- Windgeschwindigkeit (regionale Zeitreihe, Kürzel WI),
- Relative Luftfeuchte (regionale Zeitreihe, Kürzel RF),
- Lufttemperatur (Zeitreihe an Messstellenkoordinate, Kürzel LT)
- Wasserdargebot (Zeitreihe an Messstellenkoordinate, Kürzel WA).

In Abb. 14 wird das Ergebnis des Verfahrens in Kartenform visualisiert. Dazu werden signifikante erklärende Variablen durch schwarze und nichtsignifikante Variablen durch rote Symbole gekennzeichnet. Folgendes wird bei Betrachtung der Karten deutlich: Alle sieben Variablen sind



offensichtlich bedeutsam für die Erklärung der Varianz von Grundwasserständen bzw. Quellschüttungen. Dies erkennt man daran, dass alle Variablen bei zumindest 92 der 127 Messstellen in die jeweiligen Regressionsmodelle einfließen. Am seltensten werden dabei interessanterweise die Zeitreihen der Sonnenfleckenzeitreihe und der Windgeschwindigkeiten aus den Modellen entfernt. Beim Wasserdargebot tritt ein räumliches Muster auf: Die Zeitreihen werden im östlichen Teil des Untersuchungsgebietes häufig aus den Regressionsmodellen entfernt. Möglicherweise resultiert dies daher, dass hier negative Korrelationen zu Beginn der Betrachtungsperiode durch positive am Ende neutralisiert werden.

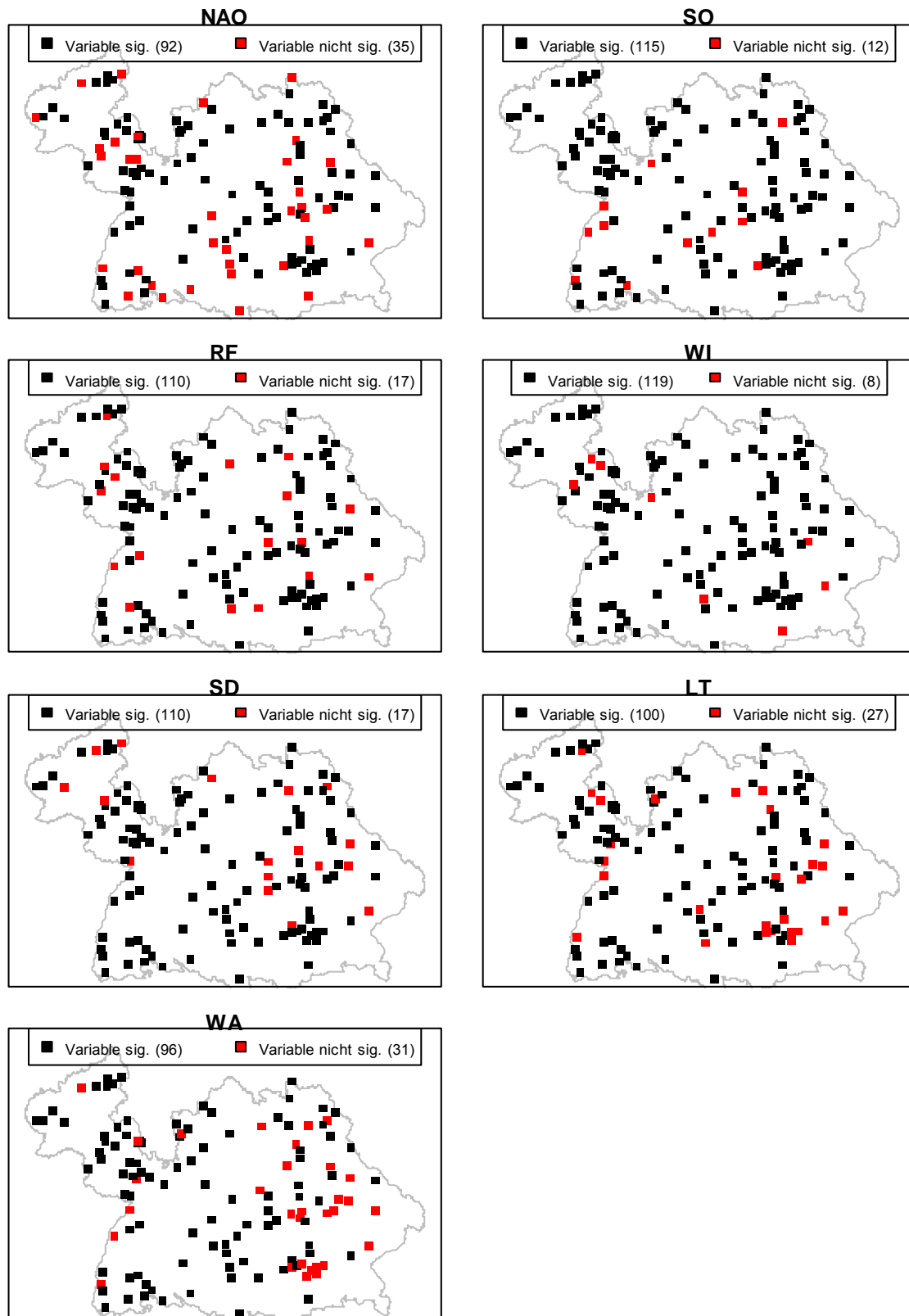


Abb. 14: Ergebnis der Variablenselektion für 127 Regressionsmodelle

### 4.3.2 Prognosemodelle

Im Rahmen der Untersuchungen werden SARIMAX-Modelle für die Grundwasserstände von 12 Messstellen aufgestellt, bei denen die in den vorangegangenen Kapiteln behandelten Zusammenhänge in geeigneter Form berücksichtigt werden. Um dies zu realisieren, werden die in den Messreihen feststellbaren, lokalen Trends als exogene Komponente (X-Komponente des SARIMAX-Modells) modelliert. Darüber hinaus wird auch der Jahresgang deterministisch modelliert, so dass sich die exogene Komponente insgesamt aus den Variablen NAO\_tr, SO\_tr, RF\_tr, WI\_tr, LT\_tr, WA\_tr, sowie einem Sinus- und einem Kosinusterm zusammensetzt. Die an die Klimavariablenkürzel angehängten Bezeichner „tr“ weisen dabei darauf hin, dass nicht die Variablen selbst sondern deren lokale Trends eingebunden werden. Die Festlegung der Ordnung  $p$  der AR-Komponente und der Ordnung  $q$  der MA-Komponente erfolgt auf der Grundlage von Auswertungen der Autokorrelations- und der partiellen Autokorrelationsfunktionen. Unter Berücksichtigung der exogenen Variablen und des Ordinatenabschnitts (Intercept) sind insgesamt für jede betrachtete Messstelle  $p+q+7$  Parameter zu schätzen. Die Schätzung erfolgt simultan mittels nichtlinearer Optimierungsmethoden.

Das Ergebnis wird am Beispiel der Messstelle Kesselbronn erläutert. Identifiziert wird in diesem Fall ein Modell der AR-Ordnung 3 und der MA-Ordnung 0, so dass insgesamt 13 Parameter zu schätzen sind. Diese nehmen die in Tab. 2 dargestellten Werte an.

Tab. 2: Koeffizienten des SARIMAX-Modells für die Messstelle Kesselbronn

SARIMAX - Komponente	Parameter	Parameterwert
AR	AR1	1.22
	AR2	0.062
	AR3	-0.296
MA	-	-
Intercept	Intercept	6340
X	NAO_tr	-360.4
	SO_tr	-88.075
	RF_tr	-20.35
	WI_tr	1168.8
	SD_tr	-1378.6
	LT_tr	523.6
	WA_tr	85.112
S	SIN	-1.209
	COS	-1.417

Wie Validierungsbetrachtungen zeigen, bilden die Modelle nicht nur die Autokorrelations- und partielle Autokorrelationsfunktion der Originaldaten nach, sondern es werden auch die Waveletspektren mit signifikanten Zyklen im langwelligen Bereich erhalten. Offensichtlich werden also die in den Niederschlägen auftretenden Zyklen über die exogene Komponente auf die synthetischen Grundwasserstandsdaten übertragen.

Die dargestellten SARIMAX-Modelle lassen sich für verschiedene Zwecke einsetzen:

1. zur Erzeugung einer beliebigen Anzahl von Realisationen wöchentlicher Grundwasserstände für den in den Messreihen abgebildeten Beobachtungszeitraum
2. zur Erzeugung einer beliebigen Anzahl von Realisationen wöchentlicher Grundwasserstände für Zukunftszeiträume sowie
3. in erweiterter Form auch zur mittelfristigen Echtzeitvorhersage von Grundwasserständen (vgl. dazu Wingerling 2007)

In Abb. 15 wird die Anwendung des Modells bezogen auf den Anwendungsfall 1 am Beispiel der Messstelle Kesselbronn demonstriert. Dazu werden drei neue Realisationen wöchentlicher Grundwasserstände erzeugt. In der Abbildung sind neben der Originalreihe (schwarz) die drei





synthetischen Realisationen dargestellt (grau). Man erkennt, dass der generelle Verlauf der Grundwasserstände und auch der stochastische Charakter der Daten durch die synthetischen Daten zutreffend nachgebildet wird. Auch der Verlauf der synthetischen Daten im Bereich der Messlücke Mitte der 1970er Jahre erscheint plausibel.

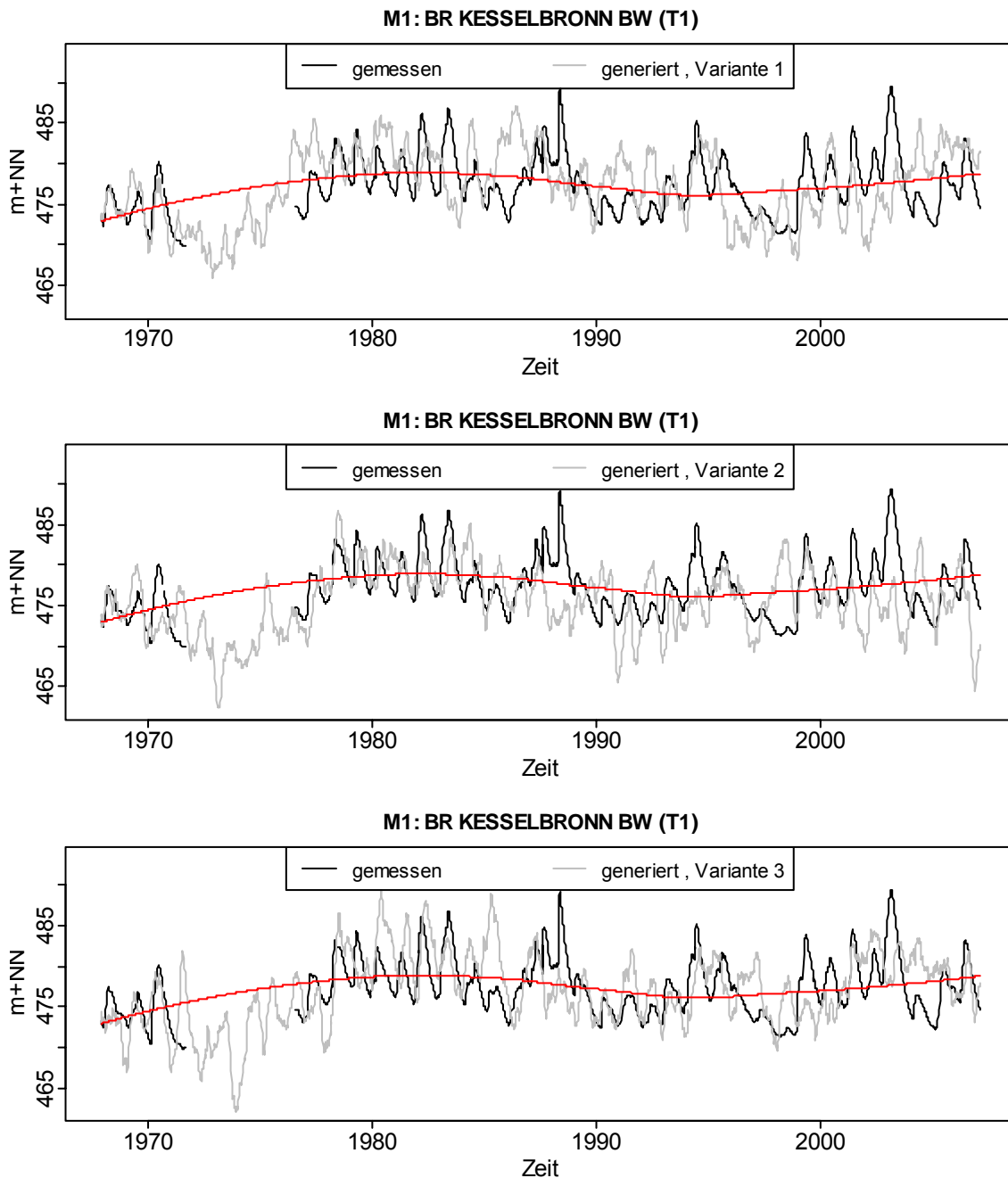


Abb. 15: Gemessene Grundwasserstände an der Messstelle Br Kesselbronn sowie 3 Realisationen von synthetischen Daten, die mit dem SARIMAX-Modell generiert wurden

Auf der Grundlage derartiger Datenreihen lassen sich beispielsweise Fragen danach beantworten, wie wahrscheinlich es ist, dass innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne ein, zwei oder mehr Jahre mit Grundwasserständen unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwertes aufeinander folgen.

Der zweite Anwendungsfall ergibt sich anhand folgender Überlegung: Die Instationaritätskomponenten der SARIMAX-Modelle sind an die Veränderlichkeiten aller maßgeblichen Klimavariablen und der Sonnenflecken gebunden. Daher ist es prinzipiell denkbar, mittels der Modelle Grundwasserstandsdaten für Zukunftsszenarien zu generieren und dabei die exogenen Variablen aus Klimamodellen heraus zu übernehmen.

## 5 Zusammenfassung

Es werden Periodizitäten und Klimasignale in langen Messreihen der Grundwasserstände und Quellschüttungen von insgesamt 127 Messstellen in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz untersucht. Dazu werden auch lange Zeitreihen zu den Klimaelementen Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenscheindauer und relative Luftfeuchte, Niederschlag und Wasserabgabe aus Schnee sowie Zeitreihen des NAO-Index und der Sonnenflecken mit einbezogen. Die statistischen Untersuchungen gliedern sich in Untersuchungen zu sich verändernden Periodizitäten, Phasen und Trends in den exogenen Variablen, Untersuchungen zu sich verändernden Periodizitäten und Trends in den Grundwasserständen und Quellschüttungen sowie bi- und multivariate Untersuchungen mit den Zielen der Aufdeckung von statistischen Zusammenhängen und des Aufbaus von Prognosemodellen. Es werden zahlreiche, zum Teil neuere statistische Verfahren eingesetzt.

Wesentliche Ergebnisse der Untersuchungen sind:

- Sowohl die Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten als auch die untersuchten exogenen Variablen zeigen Instationaritäten in zum Teil erheblichem Ausmaß.
- Während die Lufttemperaturen keinerlei Phasenverschiebungen im Jahresgang aufweisen, treten die Jahresgangmaxima des Niederschlags vor allem im Nordwesten des Untersuchungsgebietes später im Jahr auf, wobei es seit 1930 zu Verschiebungen von zum Teil mehr als einen Monat kommt. Je weiter man nach Süden und Osten im Gebiet kommt, um so weniger macht sich diese Phasenverschiebung bemerkbar.
- In den Niederschlags- und Wasserdargebotszeitreihen sind großskalige Periodizitäten (im wesentlichen Vier- und Achtjahresschwingungen) detektierbar. Diese treten nicht permanent über die gesamte Beobachtungsperiode auf, sondern zeigen Phasen stärkerer und schwächerer Ausprägung.
- Die Veränderungen der Grundwasserstands- und Quellschüttungszeitreihen lassen sich anhand von vier Verlaufstypen charakterisieren, wobei die Gruppierungen allerdings nicht auf einfache hydrogeologische Stationsmerkmale zurückgeführt werden können.
- Die in den Niederschlags- und Wasserdargebotszeitreihen aufgedeckten, großskaligen Periodizitäten finden sich in den Grundwasserstandsmessstellen im Bereich von Porengrundwasserleitern sowie in Quellschüttungsmessreihen.
- Im Hinblick auf den Jahresgang zeigen Grundwasserstands- und Quellschüttungsreihen vor allem in Bayern die klare Tendenz, dass das Jahresmaximum früher im Jahr eintritt.
- Die Veränderungen der betrachteten Klimavariablen korrelieren in der Regel signifikant mit den Veränderungen der Grundwasserstands- und Quellschüttungsdaten.

Letzteres wird zum Aufbau von SARIMAX-Modellen für ausgewählte Grundwassermessstellen genutzt, deren instationäre Komponenten mittels exogener Variablen modelliert werden. Als exogene Variablen werden dabei Zeitreihen verschiedener Klimaelemente zugrunde gelegt, so dass es möglich ist, die Modelle auch unter veränderten Klimabedingungen zur Projektion zukünftiger Grundwasserstände einzusetzen.



## 6 Literatur

- Box, G.E.P. and Jenkins, G.M. (1970): Time series analysis: Forecasting and control, San Francisco: Holden-Day
- Carmona, R., Hwang, W.-L. and Torresani, B. (1998): Practical Time-Frequency Analysis. Gabor and Wavelet Transforms. London.
- Cleveland, W. S. (1979): Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *J. Amer. Statist. Assoc.* 74, p. 829–836.
- Duan, Q. Sorooshian, S. and Gupta, V.K. (1994): Optimal Use of the SCE-UA Global Optimization Method for Calibrating Watershed Models, *Journal of Hydrology*, Vol.158, 265-284
- Goovaerts, P. (1997): Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press.
- Hathaway, D.H., Wilson, R.M. and Reichmann, E.J. (1999): A synthesis of solar cycle prediction techniques. *Journal of Geophysical Research*, V. 104, p. 22,375 – 22,338.
- Hevesi, J. A., Flint, A.L. and Flint, L.E. (2002): Preliminary Estimates of Spatially Distributed Net Infiltration and Recharge for the Death Valley Region, Nevada–California. Water-Resources Investigations Report 02-4010
- Kokkonen, T., Koivusalo, H., Jakeman, A. and Norton, J. (2006): Construction of a degree-day snow model in the light of the ten iterative steps in model development. In: Voinov, A., Jakeman, A.J., Rizzoli, A.E. (eds). Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software". International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, July 2006.
- Labat, D. (2005): Recent advances in wavelet analyses: Part 1. A review of concepts. *Journal of Hydrology* 314 (2005) p. 275-288.
- Maraun, D. (2006): What Can We Learn from Climate Data? Methods for Fluctuation, Time/Scale and Phase Analysis. Dissertation in der Wissenschaftsdisziplin Nichtlineare Dynamik, Universität Potsdam.
- Schönwiese, Ch. D. (2006): Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler. Berlin, Stuttgart.
- Tankersley, C. D., Graham, W. D. and Hatfield, K. (1993): Comparison of univariate and transfer function models of groundwater fluctuations. *Water Resources Research*, Volume 29, Issue 10, p. 3517-3534
- Torrence, Ch. and Compo, G.P. (1998): A Practical Guide to Wavelet Analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*. Vol. 79, No. 1, p. 61–78
- U.S. Geological Survey (2008): Documentation of Computer Program INFIL3.0—A Distributed-Parameter Watershed Model to Estimate Net Infiltration Below the Root Zone. Scientific Investigations Report 2008–5006
- Van Geer, F.C. and Zuur, A.F.(1997): An extension of Box-Jenkins transfer/noise models for spatial interpolation of groundwater head series. *Journal of Hydrology*, 192, 65-80
- Wingering, M. (2007): Ein empirisches Verfahren zur Vorhersage von Grundwasserständen und Quellschüttungen. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 51, S. 8-16.
- Yi, M.-J. and Lee, K.-K.(2004): Transfer function-noise modelling of irregularly observed groundwater heads using precipitation data. *Journal of Hydrology* 288, 272–287

## Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung – Ergebnisse von Szenarienrechnungen

Thomas Gudera

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)

### 1 Einführung

Im Rahmen des Kooperationsprojektes KLIWA wurden für die drei beteiligten Länder Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern Simulationen auf Basis von regionalen Klimaszenarien mit einem Bodenwasserhaushaltsmodell durchgeführt. Die Bearbeitung erfolgte methodisch länderübergreifend abgestimmt. Die vorliegende Datengrundlage in den Ländern, bestehend aus Antriebsdaten und physiographischen Daten, war identisch bzw. in weiten Teilen vergleichbar. Ergebnisse dieser in den Jahren 2008 und 2009 durchgeführten Untersuchungen werden in diesem sowie im nachfolgenden Beitrag vorgestellt und erläutert.

### 2 Bodenwasserhaushaltsmodell

Das eingesetzte Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW ist ein deterministisches, flächendifferenziertes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge. In den einzelnen Teilmodulen kommen sowohl physikalisch basierte als auch konzeptionelle Ansätze zur Berechnung von Verdunstung und Sickerwasserbildung zur Anwendung. Die berechnete Sickerwasserbildung entspricht in Gebieten mit vernachlässigbaren schnellen lateralen Abflusskomponenten der Grundwasserneubildung, in Gebieten mit nennenswerten schnellen lateralen Abflusskomponenten ist eine Reduktion mit dem sog. Baseflow-Index (BFI) erforderlich, um die Grundwasserneubildung zu ermitteln. Hierauf geht der folgende Beitrag (Neumann, 2010) näher ein. Die Kurzbezeichnung GWN-BW (Grundwasserneubildung-Bodenwasserhaushalt) beschreibt den gesamten Bearbeitungsprozess, also die zeitlich hochaufgelöste Simulation des Bodenwasserhaushalts mit der daraus resultierenden Sickerwasserbildung und die darauf basierende Ableitung der Grundwasserneubildung.

Zur Berechnung der Pflanzenverdunstung stehen im Transpirationsmodul inzwischen verschiedene Varianten zur Verfügung. Neben dem bereits früher verwendeten Verdunstungsansatz TRAIN (Menzel 1997, 1999) werden zwei auf Penman-Monteith basierende Varianten angeboten, die mit statisch höhenabhängiger bzw. mit dynamisierter phänologischer Pflanzenentwicklung arbeiten. Im Rahmen der KLIWA-Szenarienberechnungen wurde die dynamisierte temperatursummengesteuerte Variante gewählt, um der für die Zukunft unterstellten Lufttemperaturzunahme und den sich hieraus ergebenden veränderten Eintrittszeitpunkten in der Pflanzentwicklung Rechnung zu tragen. In der Tat ergeben sich in einzelnen Jahren sehr unterschiedliche phänologische Eintrittszeitpunkte mit allerdings sehr geringer Auswirkung auf die berechnete aktuelle Verdunstung.

Das Bodenmodul simuliert die Auffüllung und Entleerung des Bodenspeichers, der durch die landnutzungsabhängige nutzbare Feldkapazität im effektiven Wurzelraum ( $nF_{k_{we}}$ ) parametrisiert wird. Das Bodenmodul ist dem Niederschlags-Abfluss-Modell HBV entlehnt.

Der meteorologische Antrieb besteht aus den Parametern Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windstärke. Alternativ werden Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit unterstützt. Bereitzustellen sind Tageswerte d. h. Tagessummen wie beim Niederschlag oder der Sonnenscheindauer bzw. Tagesmittelwerte wie bei allen anderen Parametern. Normalerweise besteht der meteorologische Antrieb aus stationsbezogenen Zeitreihen für die o. g. Parameter, aus welchen im Tagesschritt räumliche Verteilungen interpoliert werden,

um damit für jede Rasterzelle oder Grundfläche des Modellgebiets die eindimensionale Simulation des Bodenwasserhaushalts durchzuführen. Für den Niederschlag besteht optional die Möglichkeit tägliche Niederschlagsverteilungen wie z. B. REGNIE einzulesen.

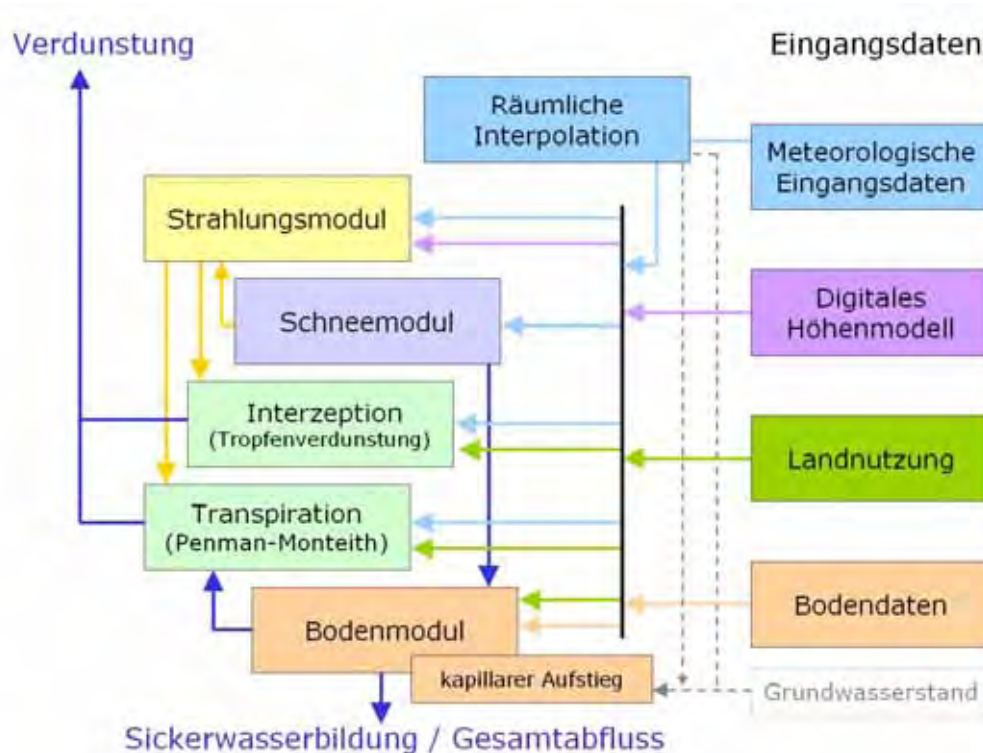


Abb.1: Modularer Aufbau des Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW und benötigte Eingangsdaten

### 3 Physiographische Eingangsdaten

GWN-BW benötigt für die Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes sowie zur Bestimmung der Sickerwassermenge physiographische Daten, die aus der Landnutzung, der Bodenkarte und dem Höhenmodell (Topographie) abgeleitet werden.

Als Landnutzung wurde die europaweit vorliegende CORINE Landcover 2000 Klassifikation mit 31 Nutzungsklassen verwendet (Abb. 2), die für GWN-BW in 16 simulationsrelevante Nutzungsklassen übersetzt wurden (Abb. 3). Dominierende Landnutzungen im Untersuchungsgebiet sind Wald- und Ackerflächen mit einem Anteil von jeweils rd. 40% an der Gesamtfläche. Siedlungsflächen werden im Modell zwar in 5 nach angenommener Versiegelung unterschiedener Klassen abgebildet, sind jedoch mit einem Gesamtanteil von lediglich 5% von untergeordneter Bedeutung bei dieser großräumigen Betrachtung des Bodenwasserhaushalts

Für die KLIWA-Szenarienrechnungen wurden für Rheinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern Grundflächen erzeugt, welche aus der Verschneidung der Landnutzung mit der jeweils besten verfügbaren Bodenübersichtskarte hervor gingen. Im Ergebnis entstanden somit 166.466 Grundflächen mit jeweils einheitlicher Landnutzungs-nFk<sub>we</sub>-Kombination (Abb. 4), welche die drei Landesflächen von insgesamt 126.171 km<sup>2</sup> abdecken.

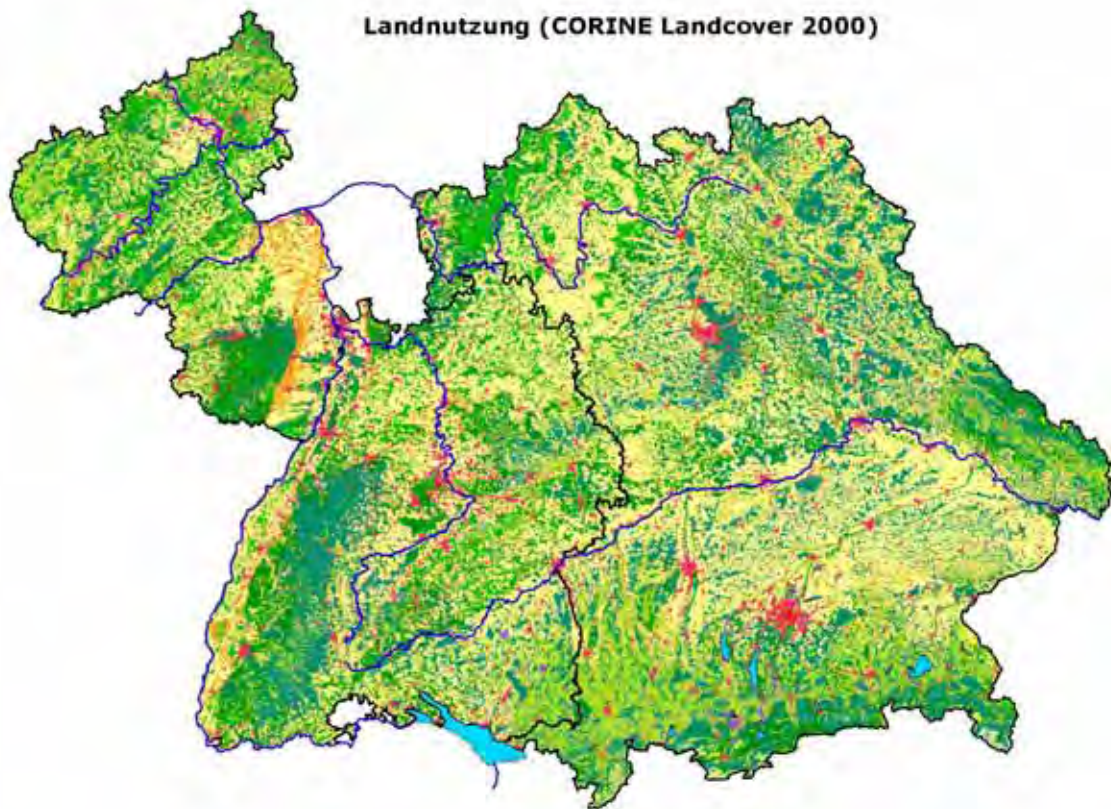


Abb. 2: Landnutzungsverteilung (CORINE Landcover 2000) im KLIWA-Untersuchungsgebiet

Code»	CORINE-Nutzungs-klasse»	Bayern [km²]»	BaWu [km²]»	RLP [km²]»	Nr.»	Klasse-in-GWN-BWH»
111»	durchgängig-städtische-Prägung»	42,7	17,7	9,1	1»	Gebäude-und-Freiflächen (75 %)»
112»	nicht-durchgängig-städt.-Prägung»	3233,6	2347,2	1067,2	2»	Gebäude-und-Freiflächen (50 %)»
121»	Industrie-und-Gewerbe-flächen»	326,1	252,7	157,0	2»	Gebäude-und-Freiflächen (50 %)»
122»	Straßen, Eisenbahnen»	21,2	15,2	7,4	2»	Gebäude-und-Freiflächen (50 %)»
123»	Hafengebiete»	3,4	12,7	3,7	2»	Gebäude-und-Freiflächen (50 %)»
124»	Flughafen»	67,7	38,3	36,4	4»	Gebäude-und-Freiflächen (20 %)»
131»	Abbauflächen»	103,7	49,4	42,7	5»	Gebäude-und-Freiflächen (-)»
132»	Deponien-und-Abraumhalden»	3,3	3,0	4,6	5»	Gebäude-und-Freiflächen (-)»
133»	Baustellen»	7,4	3,8	9,8	3»	Gebäude-und-Freiflächen (30 %)»
141»	Städtische-Grünflächen»	55,5	19,4	6,5	6»	Bäume-und-Straucher»
142»	Sport-und-Freizeitanlagen»	120,7	68,3	42,7	4»	Gebäude-und-Freiflächen (20 %)»
211»	nicht-bewässertes-Ackerland»	20632,5	8842,6	4985,3	7»	Äcker»
221»	Weinbauflächen»	61,0	326,7	839,4	8»	Wein-und-Obst»
222»	Obst-und-Beerenobstbestände»	192,7	496,5	93,1	8»	Wein-und-Obst»
231»	Wiesen-und-Weiden»	9571,8	3816,6	2508,1	9»	Grünland»
242»	komplexe-Parzellenstrukturen»	7523,4	4673,5	1208,5	7»	Äcker»
243»	Landwirtsch.-&-natürl.-Bodenbed.»	1999,2	720,1	458,9	7»	Äcker»
311»	Laubwälder»	2739,8	2754,6	2845,7	10»	Laubwald»
312»	Nadelwälder»	15939,7	6237,8	1741,3	11»	Nadelwald»
313»	Mischwälder»	5516,2	4739,6	3446,3	12»	Mischwald»
321»	natürliches-Grünland»	557,5	117,2	65,5	14»	Freiland»
322»	Heiden-und-Moorheiden»	189,1	3,8	3,2	14»	Freiland»
324»	Wald-Strauch-Übergangsstadien»	494,6	13,7	137,5	6»	Bäume-und-Straucher»
331»	Strände, Dünen-und-Sandflächen»	0,3	»	»	15»	Ödland»
332»	Felsflächen-ohne-Vegetation»	167,2	»	»	16»	Felsflächen-ohne-Vegetation»
333»	Flächen-mit-spärlicher-Vegetation»	137,7	0,8	0,9	15»	Ödland»
335»	Gletscher-und-Dauerschneegebiete»	0,3	»	»	16»	Felsflächen-ohne-Vegetation»
411»	Sümpfe»	93,7	48,7	7,1	14»	Freiland»
412»	Torfmoore»	150,6	29,5	»	14»	Freiland»
511»	Gewässerläufe»	140,5	51,1	99,1	13»	Wasserflächen»
512»	Wasserflächen»	484,2	38,2	28,6	13»	Wasserflächen»

Abb. 3: Landnutzungs-klassen CORINE (linker Teil, n=31) und Zuordnung zu simulations-relevanten Nutzungs-klassen (rechter Teil, n=16)

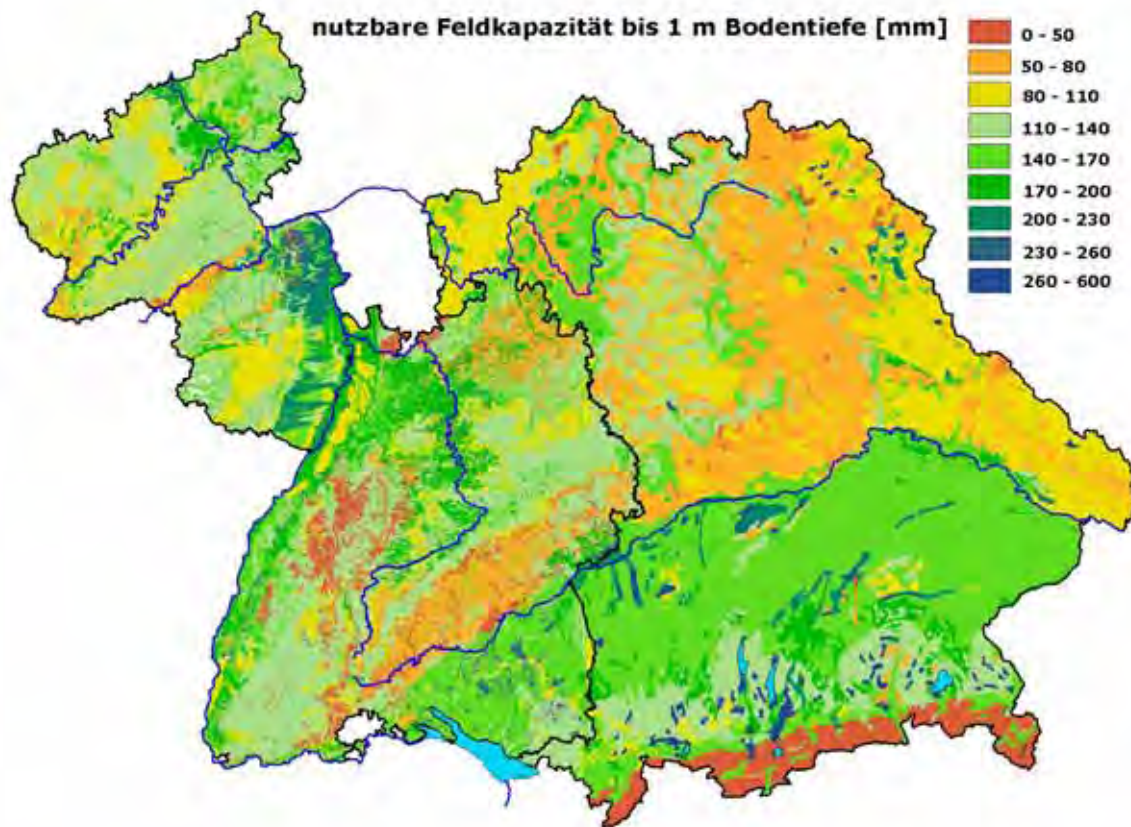


Abb. 4: Verteilung der nutzbaren Feldkapazität [mm] bis 1m Bodenprofil

#### 4 Szenariendaten

Im Rahmen der KLIWA-Kooperation wird derzeit in den Wasserhaushaltsmodellierungen vor allem die mit WETTREG-2006 erzeugte regionale Klimaprojektion verwendet, die vom UBA beauftragt wurde und somit deutschlandweit vorliegt. Daher wurde auch für die hier vorgestellte Bodenwasserhaushaltsmodellierung der WETTREG-Szenariendatensatz verwendet, welcher sich auf Wetterlageninformationen aus dem aktuellen Globalmodell ECHAM-5 mit dem Emissionsszenario A1B stützt. Es wurden Berechnungen für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100) durchgeführt. Ergänzend wurden auf Grundlage des seinerzeit von KLIWA beauftragten Szenariendatensatzes WETTREG-2003 ECHAM-4-B2 Berechnungen durchgeführt, die sich jedoch auf die „alten“ KLIWA-Länder Bayern und Baden-Württemberg beschränken mussten, da diese Antriebsdaten für Rheinland-Pfalz nicht vorliegen. Im Mittelpunkt der Auswertungen zu Bodenwasserhaushalt, Sickerwasser- und Grundwasserneubildung standen jedoch die mit WETTREG-2006 ECHAM-5-A1B erzeugten Ergebnisse für die nahe Zukunft.

WETTREG ist ein statistisches Regionalisierungsverfahren, das mit Stationsdaten arbeitet und für diejenigen Stationen Ergebnisse liefert, an denen auch Messreihen zur Verfügung stehen. Eingangsdaten sind meteorologische Daten von 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen in ganz Deutschland. WETTREG bestimmt das Klimasignal nicht direkt aus den Szenariorechnungen des globalen Klimamodells, sondern über die Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des Klimamodells, die hohe oder tiefe Temperaturwerte und geringen oder starken Niederschlag verursachen.

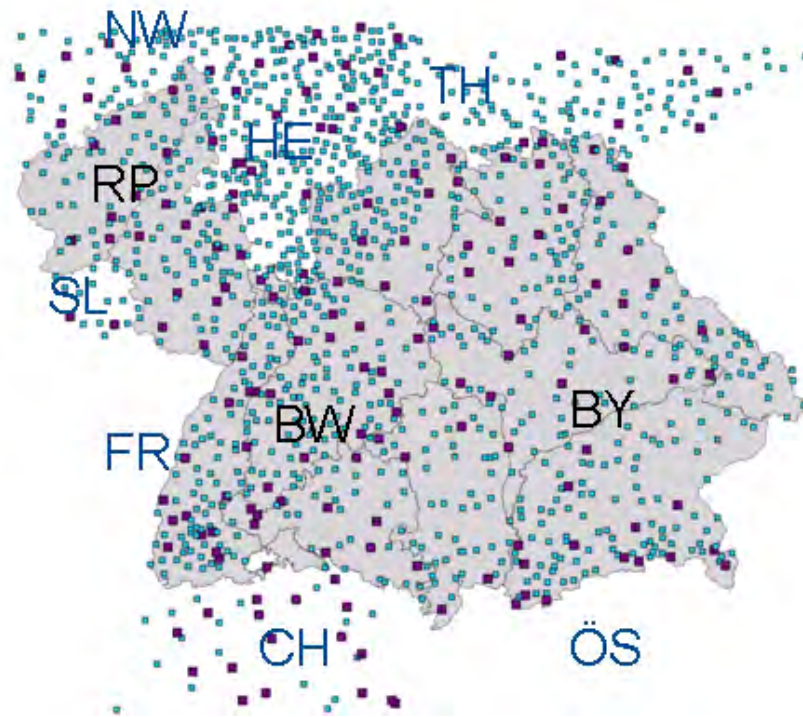


Abb. 5: Räumliche Verteilung der Niederschlags- und Klimastationen, WETTREG-2006 ECHAM-5-A1B

Der für die KLIWA-Szenarienrechnungen verwendete WETTREG-2006 ECHAM-5-A1B Datensatz umfasst 183 Klima- und 1292 Niederschlagsstationen (Abb. 5), welche auch die an das KLIWA-Untersuchungsgebiet angrenzenden Länder Saarland, Nordrhein-Westfalen, Hessen, Thüringen und die Schweiz teilweise abdecken. Für Frankreich, Österreich und Tschechien lagen keine Daten vor. Zusammen mit den homogenisierten Messreihen (1971-2000) und den Extrakten „feucht“, „normal“, „trocken“ lagen somit 2070 Jahre mit Tageswerten für Niederschlag, Lufttemperatur, relativer Luftfeuchte, Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit vor, die im Rahmen der notwendigen Konvertierung in das Zielformat auch einer umfassenden Plausibilitätsprüfung unterzogen wurden.

## 5 Ergebnisse der Bodenwasserhaushaltssimulationen

Um die Simulationsergebnisse einer übersichtlichen regionalen Auswertung zu unterziehen wurden drei Gliederungsebenen eingeführt, welche drei Länder, 9 KLIWA-Regionen (Abb. 6) und 25 naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (Abb. 7) differenzieren. Betrachtet wurden die Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, aktuelle Verdunstung, Gesamtabfluss- und Sickerwasserbildung, Grundwasserneubildung, Trockenheitsindex sowie Wasseräquivalent der Schneedecke. Die Veränderungen vom Ist-Zustand zur nahen und fernen Zukunft wurden mit absoluten und prozentualen Werten dokumentiert, wobei als statistische Kenngrößen insbesondere die mittleren Jahreswerte, Halbjahreswerte (hydrologisch) und Monatswerte jeweils für den Gesamtzeitraum und die Einzeldekaden zugrunde gelegt wurden. Einen kleinen Teil dieser Ergebnisse erläutern die nachfolgenden Kap. 5.1 und 5.2.



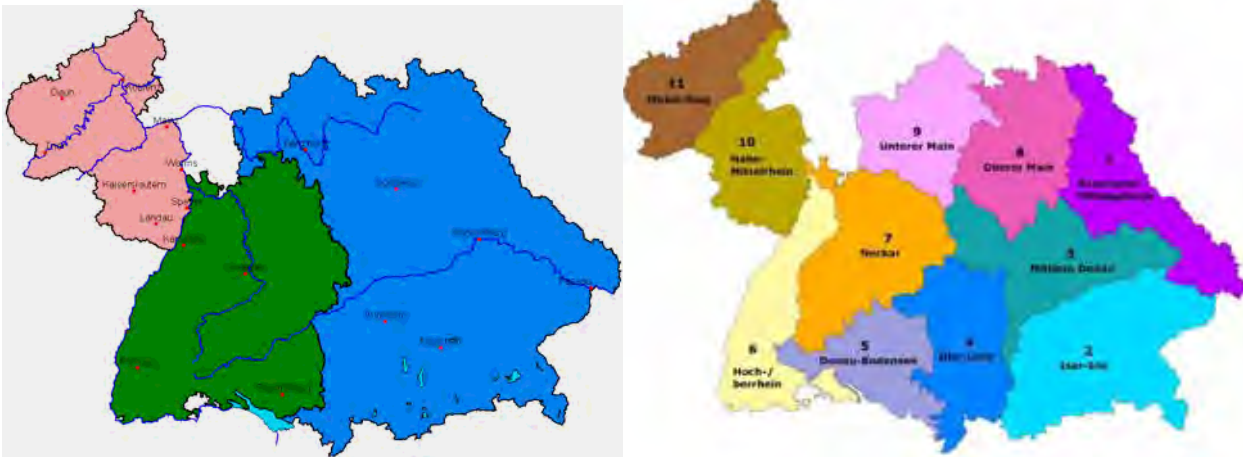


Abb. 6: Gliederungsebene Land (n=3) und KLIWA-Region (n=9) für die räumliche Auswertung der Szenariensimulationen



Abb. 7: Gliederungsebene naturräumlich-hydrogeologische Einheiten (n=25) für die räumliche Auswertung

### 5.1 Ergebnisse für den Zeitraum 1971-2000 („Ist-Zustand“)

Die für die Zukunft anzunehmenden bzw. zu unterstellenden Änderungen wurden durch Vergleiche (absolut, prozentual) mit dem Ist-Zustand, der ebenso wie die nahe und ferne Zukunft durch einen aus 600 Jahren bestehenden Datensatz beschrieben wird, analysiert. Für den Ist-Zustand wurde zunächst anhand der 30-jährigen Jahresmittel untersucht, wie gut dieser durch

die vorliegenden 10 Realisierungen des statistischen Modells beschrieben wird. Dies ist in der nachfolgenden Tabelle 1 und den Abb. 8 bis 12 dokumentiert.

Tab. 1: Vergleich der Jahresmittelwerte von Lufttemperatur, Niederschlag, aktueller Verdunstung, Gesamtabfluss und Sickerung berechnet auf Basis von Messreihen und auf Basis der Realisationen des statistischen Modells (1971-2000, 10 Realisationen)

Bundesland	Lufttemperatur [°C]		Niederschlag [mm/a]		akt. Verd. [mm/a]		Gesamtabfluss [mm/a]		Sickerung [mm/a]	
	Messdaten	1971-2000 10 R	Messdaten	1971-2000 10 R	Messdaten	1971-2000 10 R	Messdaten	1971-2000 10 R	Messdaten	1971-2000 10 R
Bayern	7.8	7.7	925.2	922.6	498.0	502.4	427.7	420.1	398.6	391.3
Baden-Württemberg	8.4	8.3	961.3	966.1	534.4	541.7	427.4	424.3	396.6	393.4
Rheinland-Pfalz	9.0	8.9	775.8	764.7	487.1	492.4	288.5	272.2	267.5	251.4

Die Abb. 8 und 9 zeigen plausible räumliche Verteilungen des Jahresmittels 1971-2000 der Lufttemperatur und des Niederschlags berechnet auf Basis von Messwerten. Die mit Abstand niedrigste Jahresmitteltemperatur liegt mit 5,8 °C im Bereich der Nordalpen (Naturraum 1, siehe Abb. 7) vor, im Oberrheingraben und im Mainzer Becken (15, 16, 17) liegt die Jahresmitteltemperatur etwas über 10 °C. Das Jahresmittel des Niederschlags, bezogen auf die naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten (vgl. Abb. 7) reicht von rd. 550 mm/a im Mainzer Becken bis zu knapp 1700 mm/a in den Nordalpen, der Schwarzwald (14) weist einen Gebietsmittelwert von rd. 1370 mm/a auf.

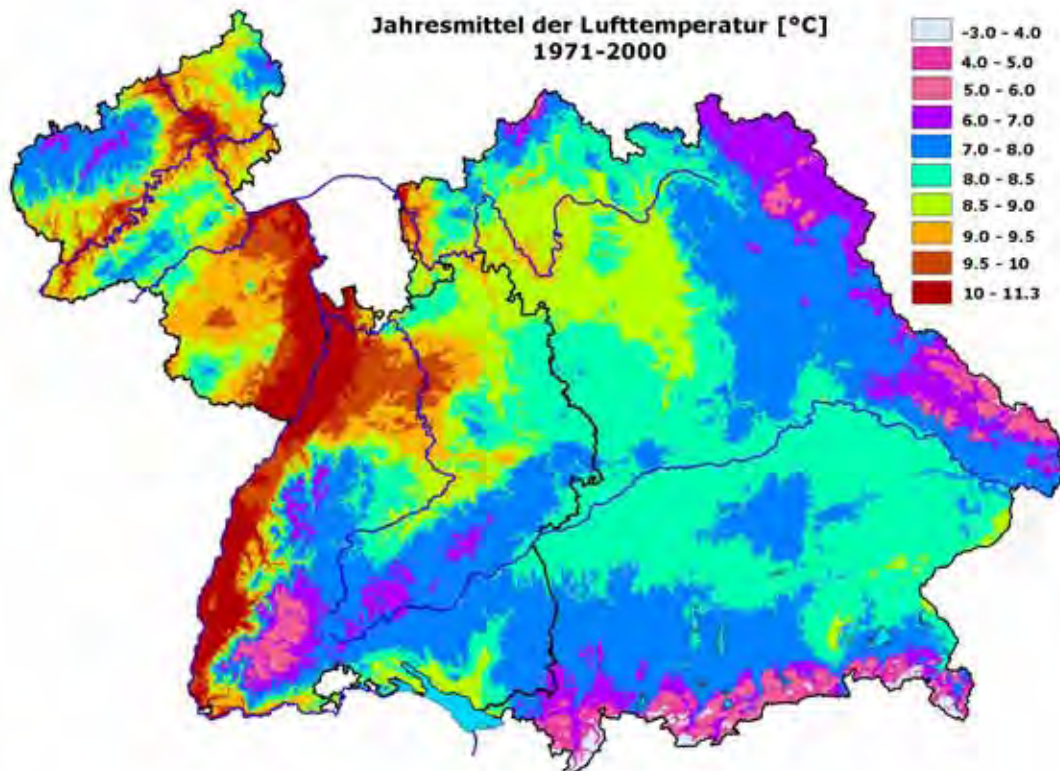


Abb. 8: Jahresmittel der Lufttemperatur für den Ist-Zustand berechnet auf Basis der homogenisierten Messwerte

Die berechnete aktuelle Verdunstung ist vor allem von Temperatur, Niederschlagsangebot und Bodeneigenschaften abhängig und von entscheidender Bedeutung für die Höhe und jahreszeitliche Verteilung der verschiedenen Abflusskomponenten. Die räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Verdunstungshöhe zeigt die Abb. 10. Die Bandbreite reicht von rd. 430 mm/a in der Nordwesteifel und der Fränkischen Alb (22, 7) bis zu rd. 580 mm/a im südlichen Oberrheingraben und im Moränenland (15, 2) bzw. 615 mm/a im Schwarzwald (14).

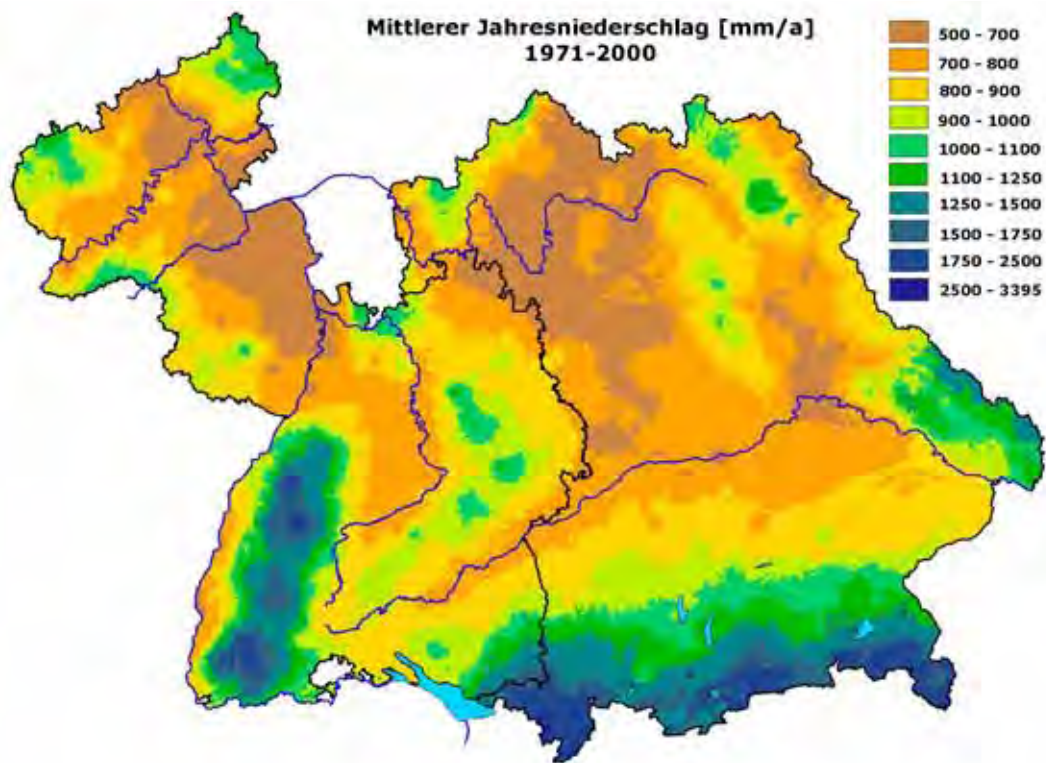


Abb. 9: Mittlerer Jahresniederschlag für den Ist-Zustand berechnet auf Basis der homogenisierten Messwerte

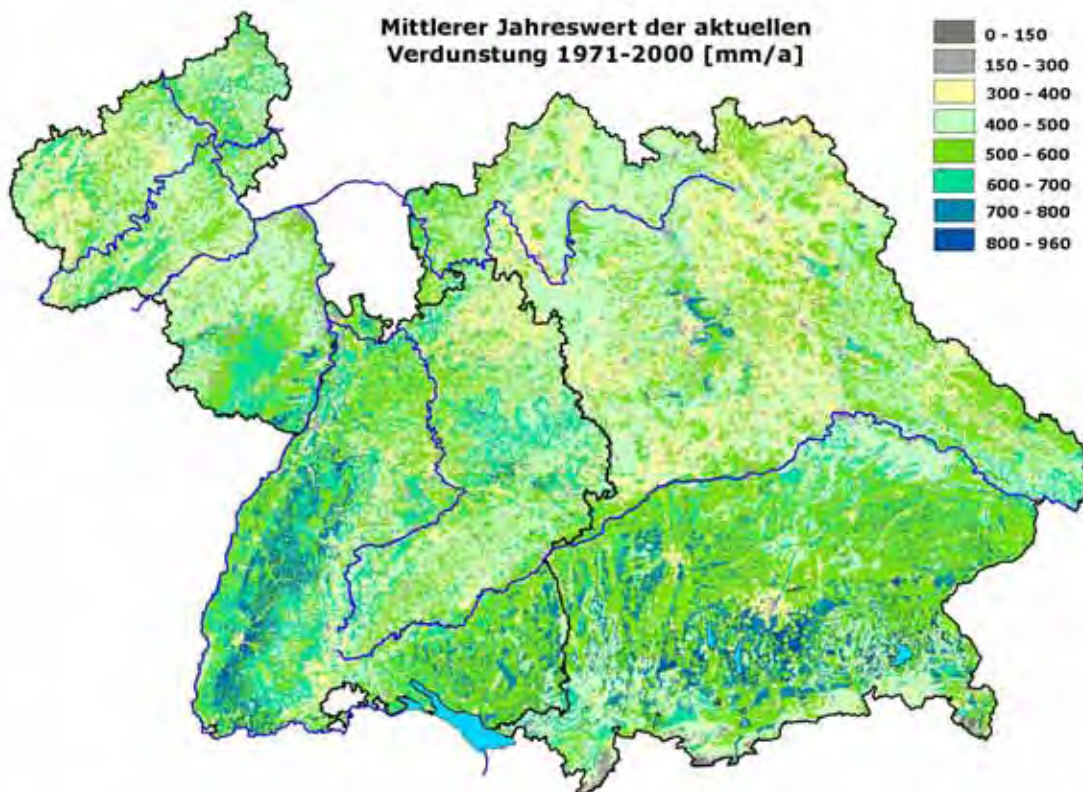


Abb. 10: Mittlerer Jahreswert der aktuellen Verdunstung für den Ist-Zustand berechnet auf Basis der homogenisierten Messwerte

Aus dem um die aktuelle Verdunstung reduzierten Niederschlagsangebot ergeben sich die Gesamtabflusshöhe und die aus dem Bodenspeicher abgegebene Sickerwasserrate. In den Abb. 11 und 12 sind die räumlichen Verteilungen dieser beiden Komponenten dargestellt, die sich nur in Bereichen mit dichter Besiedlung und mit Felsflächen (Nordalpen) sichtbar unterscheiden, da nur dort der Direktabfluss eine nennenswerte Größe annimmt. Die Bandbreite beim mittleren Gesamtabfluss reicht von etwa 100 mm/a im Mainzer Becken (17) bis zu knapp 1200 mm/a in den Nordalpen (1), der Schwarzwald (14) weist eine Gesamtabflusshöhe von rd. 760 mm/a auf. Die Bandbreite der mittleren Sickerwasserbildung reicht von etwa 70 mm/a im Mainzer Becken bis zu rd. 1100 mm/a in den Nordalpen, der Schwarzwald weist eine durchschnittliche Sickerwasserrate von rd. 730 mm/a auf. Gerade in den beispielhaft aufgeführten Gebieten mit sehr hohem Gesamtabfluss bzw. sehr hoher Sickerwasserbildung wird ein großer Anteil der Sickerwasserrate in schnelle Abflusskomponenten transformiert was somit die Grundwasserneubildung entsprechend reduziert (siehe Neumann, 2010).

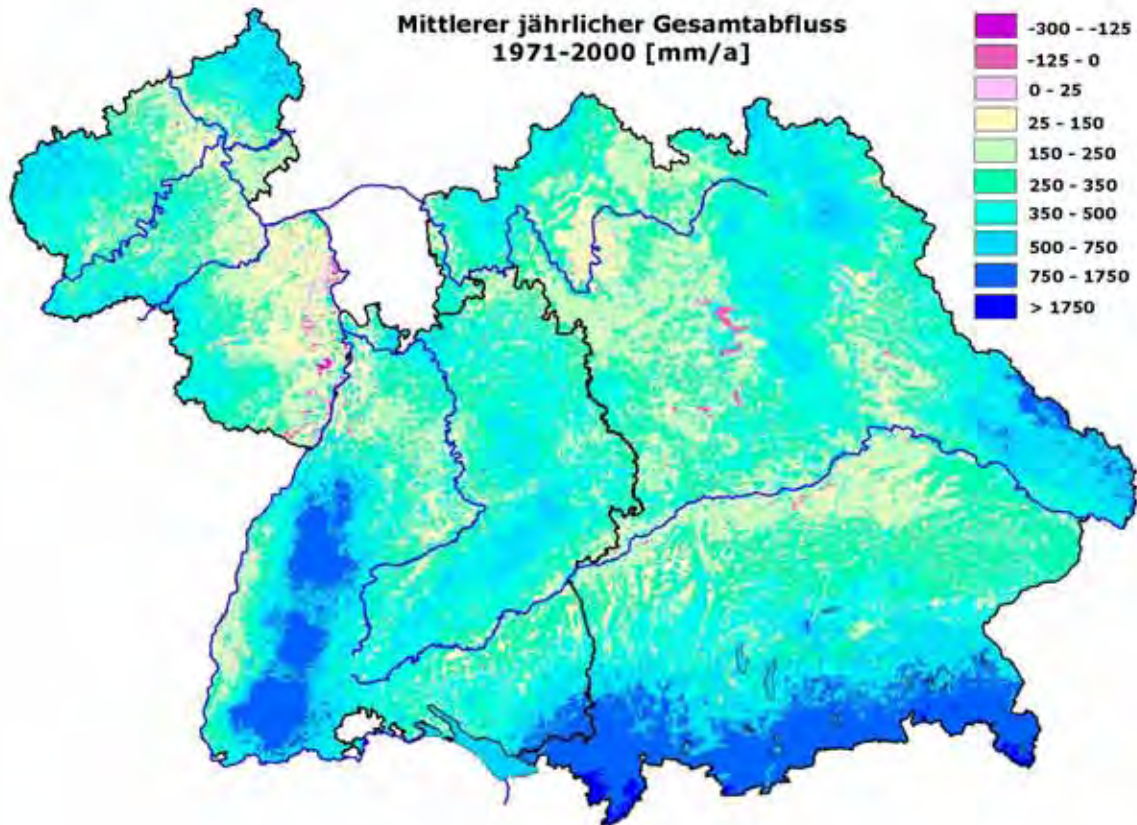


Abb. 11: Mittlerer jährlicher Gesamtabfluss für den Ist-Zustand berechnet auf Basis der homogenisierten Messwerte

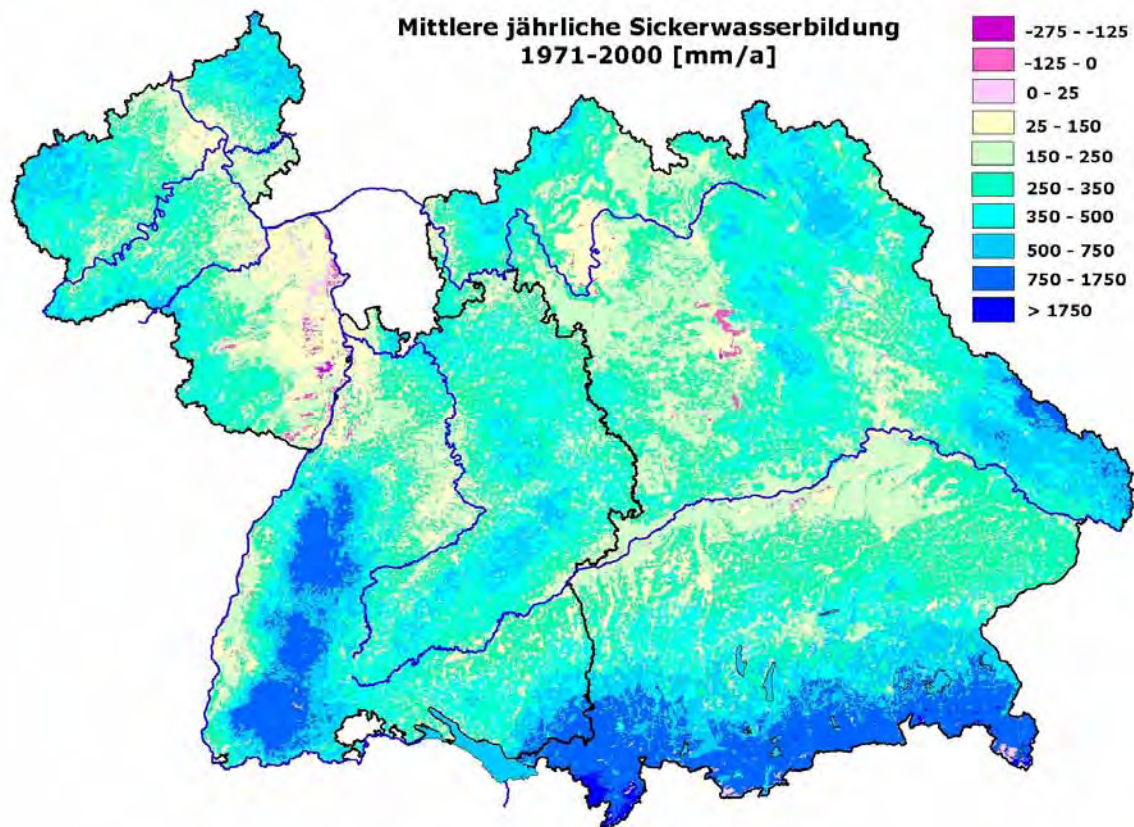


Abb. 12: Mittlere jährliche Sickerwasserbildung für den Ist-Zustand berechnet auf Basis der homogenisierten Messwerte

## 5.2 Ergebnisse für den Zeitraum 2021-2050 („Nahe Zukunft“)

Die Szenarien ergaben für den Zeitraum 2021-2050 über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg knapp ein Grad Lufttemperaturzunahme gegenüber dem Vergleichszeitraum 1971-2000.

Beim mittleren Jahresniederschlag ergeben sich relativ geringe Unterschiede gegenüber dem Ist-Zustand, mit Abnahmen im Südosten und Zunahmen im Nordwesten (Abb. 13). Die größte Abnahme mit knapp 50 mm/a ergibt sich für den Bereich der Nordalpen (1) während im Bereich der Südwesteifel (21) mit etwas über 40 mm/a die größte Zunahme auftritt. Die prozentuale Veränderung fällt dabei im Südosten des KLIWA-Gebietes durch das hohe Niederschlagsniveau mit knapp 3% vergleichsweise gering aus, während im Nordwesten durch das deutlich niedrigere Niederschlagsniveau die prozentuale Veränderung über 5% beträgt. Deutlicher sind die sich ergebenden Unterschiede der Niederschlagshöhe wenn man die hydrologischen Halbjahre heranzieht. Die Abb. 14 zeigt für alle drei Länder eine Zunahme der Niederschlagshöhe im Winter und eine Abnahme im Sommer, d. h. eine innerjährliche Verschiebung vom Sommer in den Winter. Für die Darstellung dieser Veränderung wurde bewusst die Einheit [l/skm<sup>2</sup>] verwendet, um von den verschiedenen Bezugszeiträumen in den Kreisringen unabhängig zu sein. Eine mittlere Niederschlagszunahme von beispielsweise 2,3 l/skm<sup>2</sup> in Rheinland-Pfalz bedeuten rd. 36 mm/a mehr Winterniederschlag im Nordwesten des KLIWA-Gebiets.

Die Veränderung der für die nahe Zukunft berechneten aktuellen Verdunstung zeigt in ihrer räumlichen Verteilung die Abb. 15. Es ergeben sich überwiegend geringe Zunahmen und nur in

4 der insgesamt 25 Naturräume sehr geringe Abnahmen. Diese sehr gleichförmigen Veränderungen zeigen sich auch in den auf die Länder bezogenen Mittelwerte von etwa 5 mm/a (+1%) in Bayern und jeweils rd. 9 mm/a (+ 2%) in Rheinland-Pfalz und Baden-Württemberg. Die Veränderung der mittleren Jahreshöhe setzt sich aus einer Abnahme im Sommer und einer Zunahme im Winter zusammen, was in Anbetracht der generellen Temperaturzunahme und der im Sommer zu erwartenden zunehmenden Trockenperioden, welche die Pflanzenverdunstung begrenzen, plausibel erscheint.



Abb. 13: Veränderung des mittleren Jahresniederschlags in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten

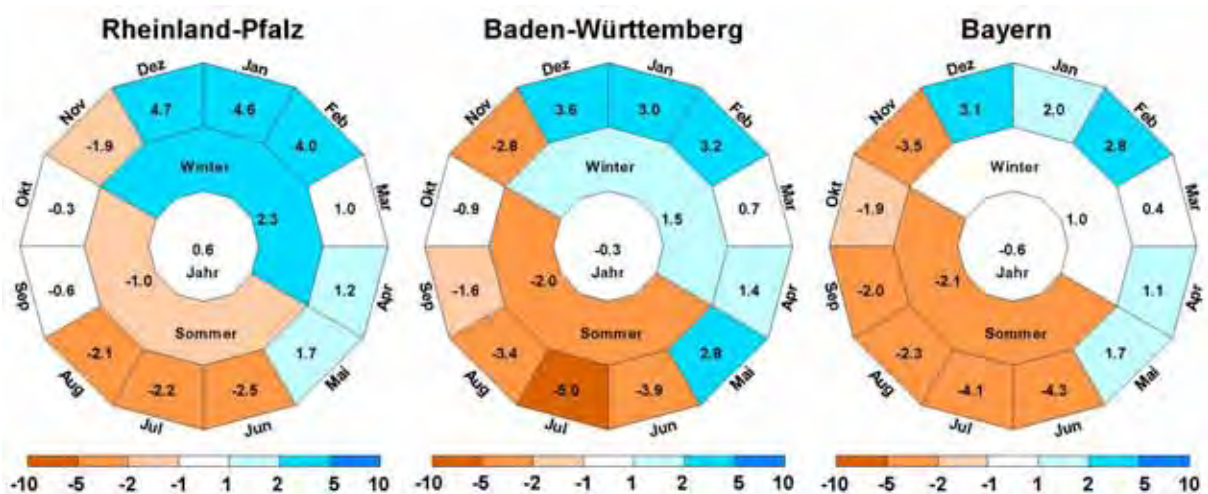


Abb. 14: Absolute Änderung des Niederschlags [l/s/km<sup>2</sup>] in der nahen Zukunft (2021-2050) gegenüber dem IST Zustand (1971-2000) auf Basis WETTREG ECHAM5/A1B

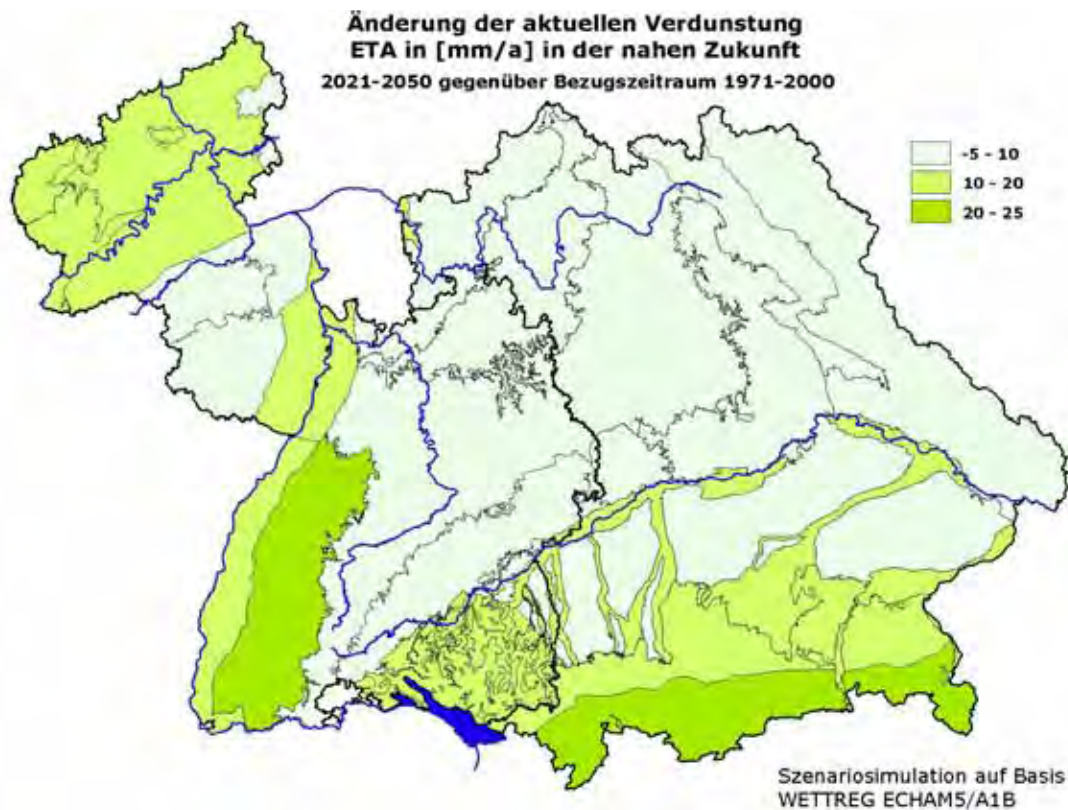


Abb. 15: Veränderung des mittleren Jahreswerts der aktuellen Verdunstung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten

Bei der Gesamtabflussbildung ergibt sich die in Abb. 16 dargestellte Verteilung mit den höchsten absoluten jährlichen Veränderungen von fast 70 mm/a (Abnahme, rd. 6%) im Bereich der Nordalpen (1). Im Nordwesten in den Bereichen Nordwest- und Südwesteifel (22, 21) werden Zunahmen der durchschnittlichen jährlichen Gesamtabflussbildung von rd. 25 mm/a ermittelt, was prozentualen Veränderungen von etwa 5% bzw. 8% entspricht. In den Ländern Bayern und Baden-Württemberg reduziert sich die mittlere jährliche Gesamtabflussbildung in der nahen Zukunft um rd. 20 mm/a entsprechend rd. 4 bis 5% während in Rheinland-Pfalz diese um rd. 10 mm/a entsprechend rd. 4% zunimmt.

Eine sehr ähnliche Verteilung wie die der Gesamtabflussänderung zeigt die Veränderung der mittleren jährlichen Sickerwasserbildung in der nahen Zukunft (Abb. 17). Abnahmen von rd. 65 mm/a (6%) in den Nordalpen (1), rd. 32 mm/a (6%) im Moränenland (2) oder rd. 26 mm/a (7%) auf der Schwäbischen Alb (9) stehen Zunahmen von 20 bis 25 mm/a im Nordwesten des KLIWA-Gebietes in der Eifel (21, 22) und im Nordpfälzer Bergland (19) gegenüber. Auch an dieser Stelle sei wieder darauf hingewiesen, dass gerade in den beispielhaft aufgeführten Gebieten mit sehr hohem Gesamtabfluss bzw. sehr hoher Sickerwasserbildung ein großer Anteil in schnelle Abflusskomponenten transformiert wird und somit die Grundwasserneubildung reduziert (siehe Neumann, 2009). Die durchschnittlichen innerjährlichen Veränderungen bei der Sickerwasserbildung soll die Abb. 18 zeigen. Entsprechend der Darstellung für den Niederschlag wurden Sickerwasserraten in der Dimension [l/skm<sup>2</sup>] in Form von Ringdiagrammen ausgewertet um die zu erwartende innerjährliche Verteilung in der nahen Zukunft zu veranschaulichen. Zu erkennen ist beispielsweise, dass sich die Zunahme der jährlichen Sickerwasserbildung in Rheinland-Pfalz wie zu erwarten aus den Wintermonaten ergibt. In Bayern und Baden-Württemberg nehmen die Sickerwasserraten über das gesamte Winterhalbjahr nur minimal zu, in einem Teil der Wintermonate scheint eine Tendenz zu stärkeren Zunahmen erkennbar, was jedoch durch Abnahmen im anderen Teil der Wintermonate wieder kompensiert wird. Die hydrologischen Sommerhalbjahre und die einzelnen Sommermonate sind in beiden Ländern durch abnehmende Sickerwasserbildung gekennzeichnet.

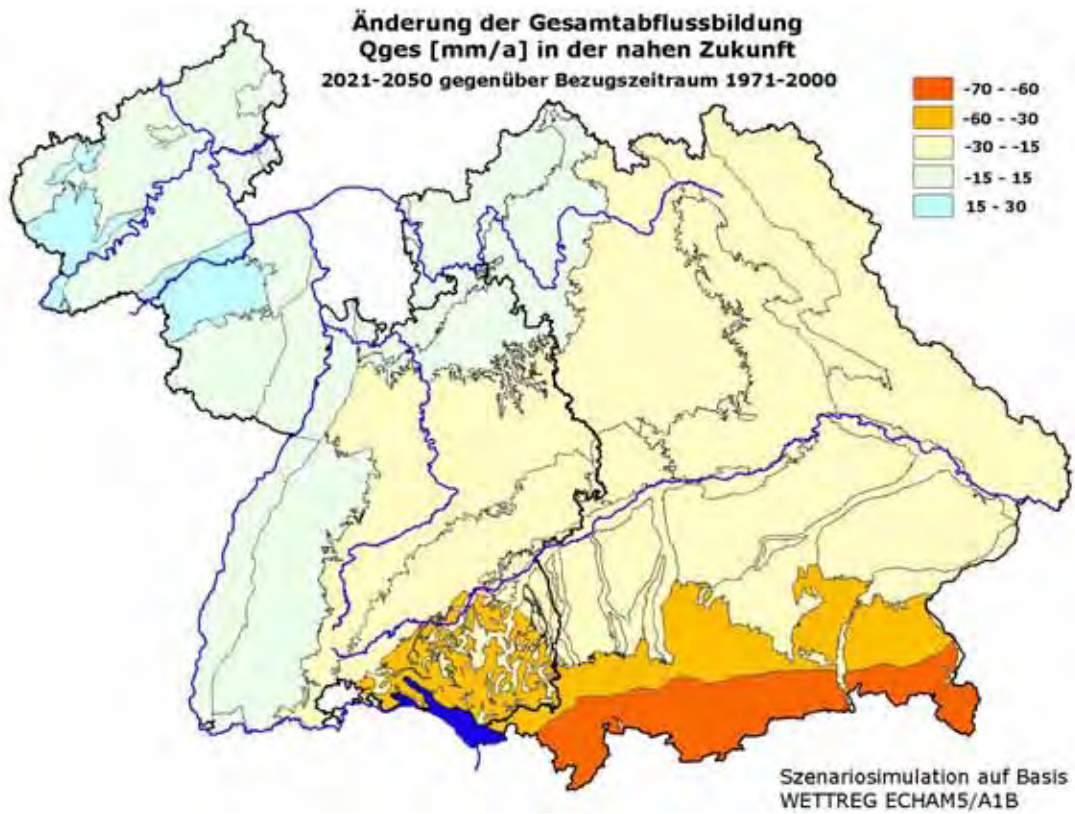


Abb. 16: Veränderung der mittleren jährlichen Gesamtabflusshöhe in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten

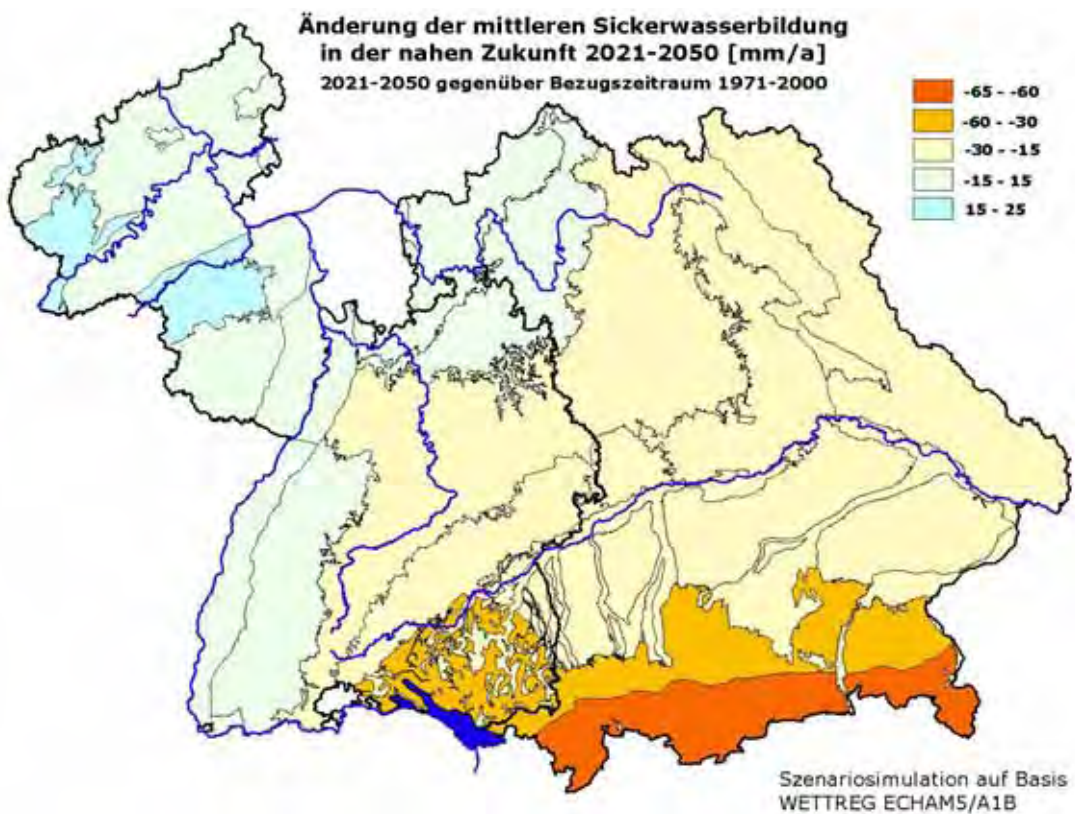


Abb. 17: Veränderung der mittleren jährlichen Sickerwasserbildung in den naturräumlich-hydrogeologischen Einheiten



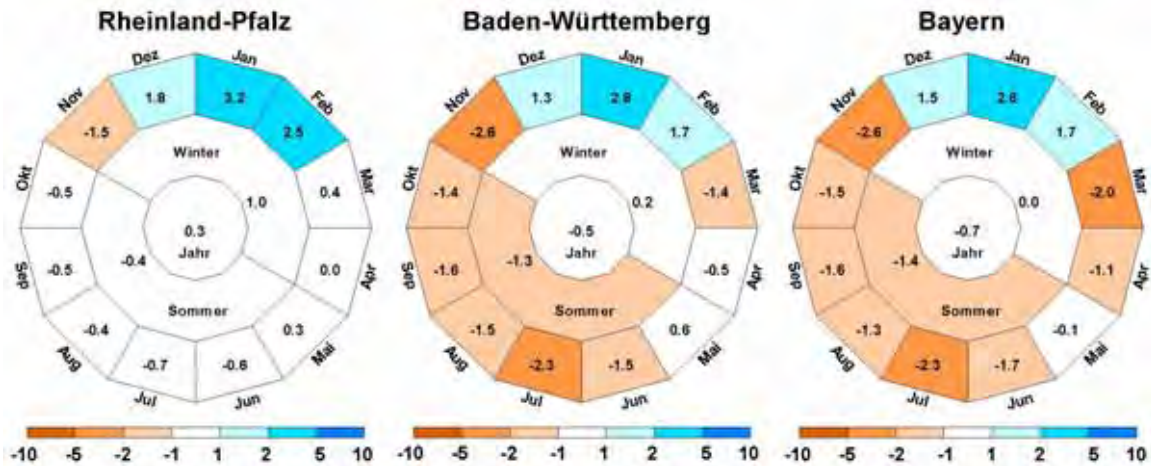


Abb. 18: Absolute Änderung der Sickerwasserbildung [l/s/km<sup>2</sup>] in der nahen Zukunft (2021-2050) gegenüber dem IST Zustand (1971-2000) auf Basis WETTREG ECHAM5/A1B

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellten Szenarienbetrachtungen mit dem Bodenwasserhaushaltsmodell GWN-BW wurden dreiländerübergreifend abgestimmt und auf einer einheitlichen Datengrundlage durchgeführt. Da die durchgeführten Untersuchungen nur auf einem kleinen Teil der heute zur Verfügung stehenden Szenarienvielfalt basieren (Emissionen, globale Modelle, Regionalisierungen), sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren und zu verwenden. Auch im Bereich der Bodenwasserhaushaltsmodellierung, der Abschätzung der Grundwasserneubildung sowie der Grundwasserhaushaltsbetrachtungen wird deshalb die Tendenz zu Ensemble-Betrachtungen und darauf basierenden Aussagen zu Bandbreiten gehen müssen.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus der Simulation des Bodenwasserhaushalts auf Grundlage der verwendeten regionalen WETTREG Klimaszenarien lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- die WETTREG Szenarien auf Basis des aktuellen Globalmodells ECHAM5/A1B unterstellen für den Zeitraum 2021-2050 über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg knapp ein Grad Erwärmung gegenüber dem Vergleichszeitraum 1971-2000.
- beim Niederschlag erhalten wir auf Basis der ECHAM5/A1B Szenarien gegenüber dem Ist-Zustand im landesweiten Mittel über Bayern zwei Prozent geringere Jahressummen, in Baden-Württemberg eine minimale Abnahme von 1%, in Rheinland-Pfalz dagegen 2.5% höhere Werte. Im Prinzip ist also ein leichter Nordwest-Südost Gradient erkennbar. Die Änderungen liegen in den betrachteten Regionen und Naturräumen im Bereich von plus 5 bis minus drei Prozent. Allerdings findet eine Verschiebung vom Sommer (-3 bis -7%) ins Winterhalbjahr (+3 bis +10%) statt.
- die simulierte Verdunstung auf Basis der ECHAM5/A1B Szenarien erhöht sich nur geringfügig gegenüber dem Ist-Zustand und wirkt in ihrer innerjährlichen Veränderung ausgleichend auf die Abflussbildung. Die Größen Gesamtabfluss und Sickerwassermenge folgen konsequenter Weise der Änderung des Niederschlags: in Bayern und Baden-Württemberg etwa 5% Abnahme, in Rheinland-Pfalz rund 4% Zunahme. Auch hier ist ein leichter Nordwest-Südost-Gradient erkennbar.
- bei der Sickerwasserbildung ergibt sich der deutlichste Rückgang für den Südosten, eine Zunahme für den Nordwesten des KLIWA Projektgebietes. Aufgrund des höheren durch-

schnittlichen Niederschlags in den Wintermonaten und des geringeren durchschnittlichen Niederschlags in den Sommermonaten wird die Sickerwasserbildung im Winter zu- und im Sommer abnehmen.

## 7 Literatur

- UBA (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG, Dessau
- 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 SRESSzenarios B1, A1B und A2, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des UBA, Dessau
- Morhard, A. (2009): Simulation des Bodenwasserhaushalts und Ermittlung der flächenhaften Grundwasserneubildung auf Grundlage der regionalen WETTREG Klimaszenarien für die Länder Bayern, Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz (unveröffentlicht), GIT Hydros Consult GmbH im Auftrag des Bayerischen Landesamts für Umwelt, Hof
- Neumann, J. (2010): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 15: 203-210.
- Menzel, L. (1997): Modellierung der Evapotranspiration im System Boden-Pflanze-Atmosphäre. Zürcher Geographische Schriften 67, ETH Zürich
- Menzel, L. (1999): Flächenhafte Modellierung der Evapotranspiration mit TRAIN. Potsdam Institute for Climate Impact Research (PIK) Report 54, Potsdam
- Neumann, J. & Gudera, T. (2007): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 10: 163-173.
- WaBoA (2007): Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg, 3. Auflage, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart



## Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland

Jörg Neumann  
Bayerisches Landesamt für Umwelt

### 1 Einleitung

Die Grundwasserneubildung ist wasserwirtschaftlich von großer Bedeutung und ein wichtiges Maß für die „natürliche Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen. Als Restglied der Wasserbilanz ist sie besonders empfindlich für Änderungen aller weiteren Wasserhaushaltsgrößen, z.B. im Zusammenhang mit dem Klimawandel. So haben die Untersuchungen gezeigt, dass eine Änderung des mittleren Niederschlags von lediglich 5% in weiten Teilen Süddeutschlands bereits ein mehr als doppelt so großes Änderungssignal bei der Grundwasserneubildung bewirken kann. Um die zukünftigen Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse räumlich und zeitlich möglichst präzise beschreiben zu können, wurden detaillierte Szenariosimulationen durchgeführt. Grundlage der Modellrechnungen sind die bereits im vorhergehenden Beitrag (Gudera, 2010) beschriebenen Szenarien und Modelle, die hier noch methodisch erweitert wurden. Ausgewählte Ergebnisse für den Grundwasserbereich und daraus resultierende Konsequenzen für die Wasserwirtschaft werden im weiteren Verlauf dargestellt und diskutiert.

### 2 Methodik

Ein wesentliches Ergebnis der Bodenwasserhaushaltsmodellierung mit GWN-BW ist die tatsächliche Verdunstungshöhe. In Verbindung mit der regionalisierten Niederschlagshöhe lässt sich daraus die Gesamtabflusshöhe ableiten, die die maximal für die Grundwasserneubildung zur Verfügung stehende Wassermenge darstellt (Abb. 1). Die im Gesamtabfluss noch enthaltenen, nicht neubildungsrelevanten Direktabflussanteile können mit Hilfe des flächendifferenzierten Baseflow-Index ( $BFI = \text{Basisabfluss}/\text{Gesamtabfluss}$ ) herausgerechnet werden. Voraussetzung dafür ist die Betrachtung mehrjähriger Mittelwerte, da Grundwasserneubildung und Basisabfluss zeitlich verzögert erfolgen und für kürzere Zeitabschnitte nicht gleichgesetzt werden können.

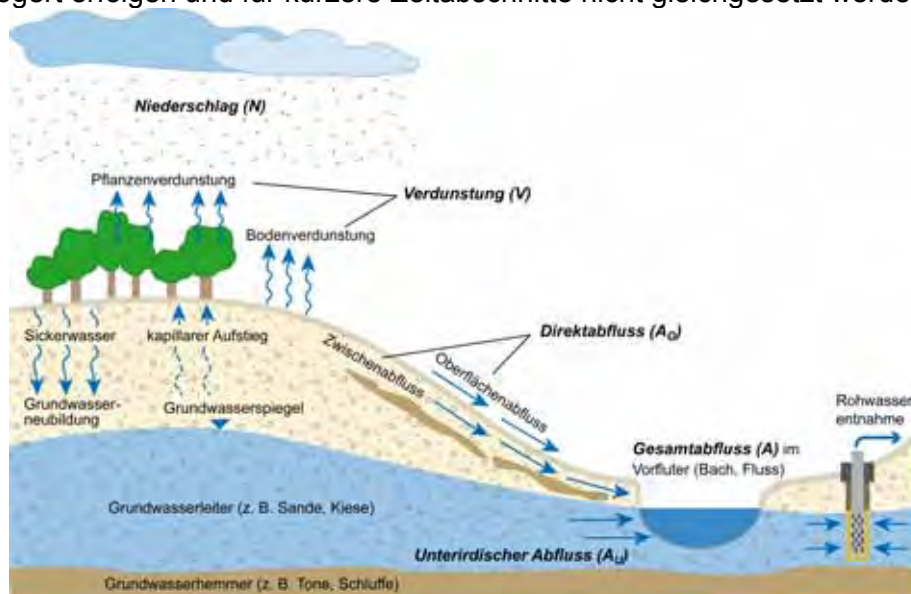


Abb. 1: Schematische Darstellung des Grundwasserhaushalts unter Berücksichtigung der wichtigsten modellrelevanten Bilanzgrößen



Der BFI als nachgeschalteter Reduktionsfaktor wird maßgeblich durch die hydrogeologischen Standorteigenschaften beeinflusst und wurde in allen drei Bundesländern einzugsgebietsbezogen aus gemessenen Pegeldaten abgeleitet (Abb. 2). Als Referenzgröße für den Basisabfluss wurden die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MoMNO), modifiziert nach Kille (1970), zu Grunde gelegt. In Baden-Württemberg und Bayern sind zur Regionalisierung zusätzlich multiple lineare Regressionsanalysen erfolgt. Die gesamte Vorgehensweise zur Durchführung von Szenariosimulationen der Grundwasserneubildung ist bei Neumann & Gudera (2007) näher beschrieben. Die auf diese Weise ermittelten dreißigjährigen Grundwasserneubildungsraten wurden in Baden-Württemberg (UVM, 2004) und Bayern (Neumann & Sprenger, 2009) auch als landesweite Übersichtskarten publiziert.

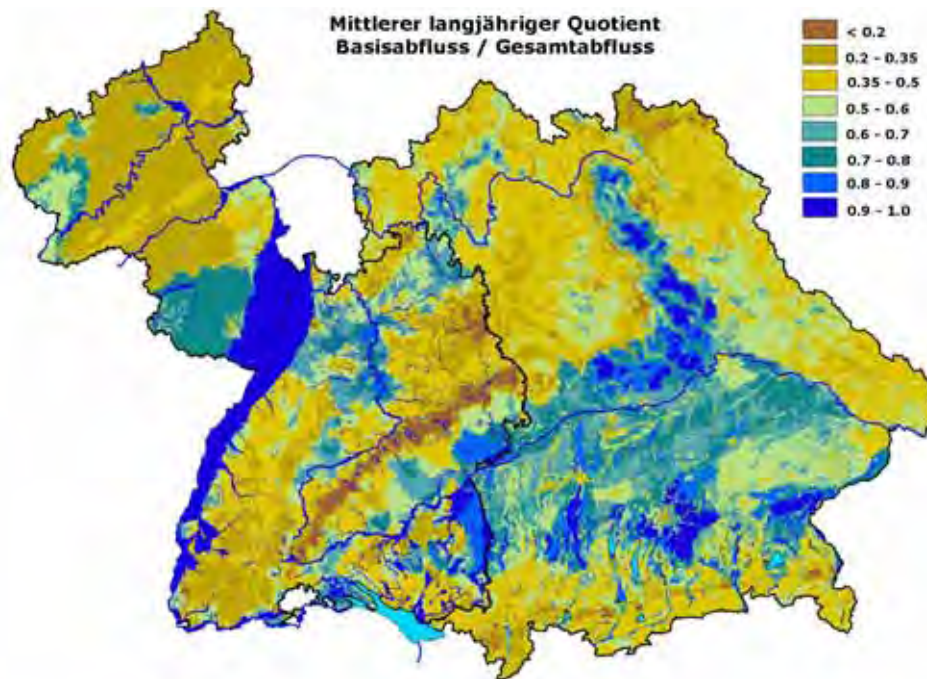


Abb. 2: Darstellung des länderbezogen ermittelten Baseflow-Index (Quotient Basisabfluss/Gesamtabfluss) von Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz

### 3 Ergebnisse der Szenariosimulationen

Für Baden-Württemberg und Bayern lagen bereits eigenständige landesweite Modelle für den Zeitraum 1971-2000 vor, die als Grundlage für ein gemeinsames „KLIWA-Modell“ verwendet werden konnten. Rheinland-Pfalz wurde in vergleichbarer Weise ergänzt, so dass alle drei Bundesländer über ein methodisch konsistentes Bodenwasserhaushaltsmodell verfügen. Geringe Unterschiede bestehen insbesondere noch hinsichtlich der verwendeten bodenkundlichen Grundlagendaten und der damit verbundenen leicht unterschiedlichen räumlichen Auflösung. Nachfolgend wird der Grundwasserhaushalt mit seinen maßgeblichen Bilanzgrößen für den Ist-Zustand sowie die Änderungssignale für die Zukunft beschrieben.

#### 3.1 Ergebnisse für den Zeitraum 1971-2000 („Ist-Zustand“)

In Abbildung 3 ist die Grundwasserneubildung als dreißigjähriges Mittel (1971-2000) für den Untersuchungsraum dargestellt. Die räumliche Differenzierung zeigt deutlich den Einfluss der regionalen klimatischen Verhältnisse. So zeichnet sich z.B. das niederschlagsreiche Südbayern durch hohe Grundwasserneubildungsraten von ca. 300-500 mm/a aus. Demgegenüber stehen

z.B. große Teile von Rheinland-Pfalz, die niederschlagsbedingt nur eine sehr geringe bzw. keine nennenswerte Grundwasserneubildung aufweisen. Kleinräumig sind Neubildungsrelevante Effekte von Boden, Landnutzung, Relief und Hydrogeologie erkennbar. Als anschauliches Beispiel sei auf die Fränkische bzw. Schwäbische Alb mit Werten von 200-300 mm/a hingewiesen. Dieser Bereich hebt sich trotz ähnlicher Niederschläge deutlich vom Albvorland mit seiner sehr geringen Grundwasserneubildung ab. Die genannten Beispiele veranschaulichen, in welcher Weise der „Bilanzrest“ Grundwasserneubildung je nach Standort durch Niederschlag, Verdunstung und schnelle Abflusskomponenten beeinflusst wird.

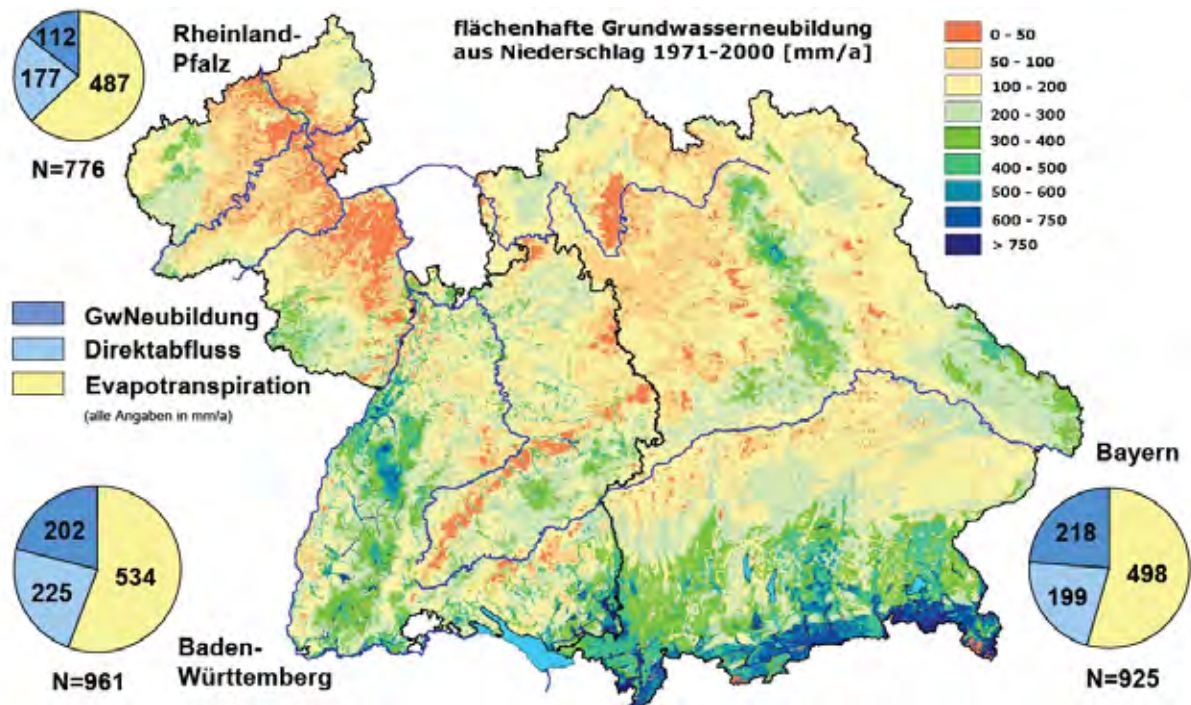


Abb. 3: Flächendifferenzierte Darstellung der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1971-2000 (Ist-Zustand) in mm/a in Verbindung mit den mittleren Wasserbilanzen für die drei Bundesländer (N=Niederschlag).

### 3.2 Ergebnisse für den Zeitraum 2021-2050 („Nahe Zukunft“)

Die dreißigjährigen Mittelwerte der Grundwasserneubildung zeigen für die nahe Zukunft eine ähnliche Entwicklung und räumliche Verteilung, wie bereits für den Niederschlag und die Sickerwasserrate beschrieben. Leichten Zunahmen von wenigen mm/a im Nordwesten (Rheinland-Pfalz) stehen Bereiche mit geringen Abnahmen insbesondere am Alpenrand gegenüber (Abb. 4). Dazwischen befinden sich weite Teile Baden-Württembergs und Bayerns, die kein eindeutiges Änderungssignal bzw. nur sehr geringe Abnahmen aufweisen. Insgesamt kann man somit von einer Nordwest-Südost-Differenzierung innerhalb des KLIWA-Untersuchungsraums sprechen (Abb. 4). Im Hinblick auf das zukünftige Grundwasserdargebot werden diese räumlichen Entwicklungstendenzen voraussichtlich nicht zu einer überregionalen Verschärfung der Situation beitragen.

Die Bereiche, in denen bisher großräumig die geringsten Neubildungsraten zu verzeichnen waren, könnten vielmehr durch eine leichte Verbesserung der Verhältnisse gekennzeichnet sein. Demgegenüber treten die deutlichsten Abnahmen dort auf, wo bisher die höchsten Grundwasserneubildungsraten beobachtet wurden. Betrachtet man die Wasserbilanzen dekadenweise (Abb. 5), so bewegen sich die Werte der Einzelgrößen im Mittel in einer Größenordnung, die



bereits aus der Vergangenheit bekannt ist. Signifikante Änderungssignale zeigen sich bereits im Jahresgang der in der Vergangenheit gemessenen Grundwasserstände und Quellschüttungen (Willems, 2010) und sind in verstärktem Maße auch in Zukunft zu erwarten. Ähnliches gilt für die weitere Entwicklung in der „fernen Zukunft“.

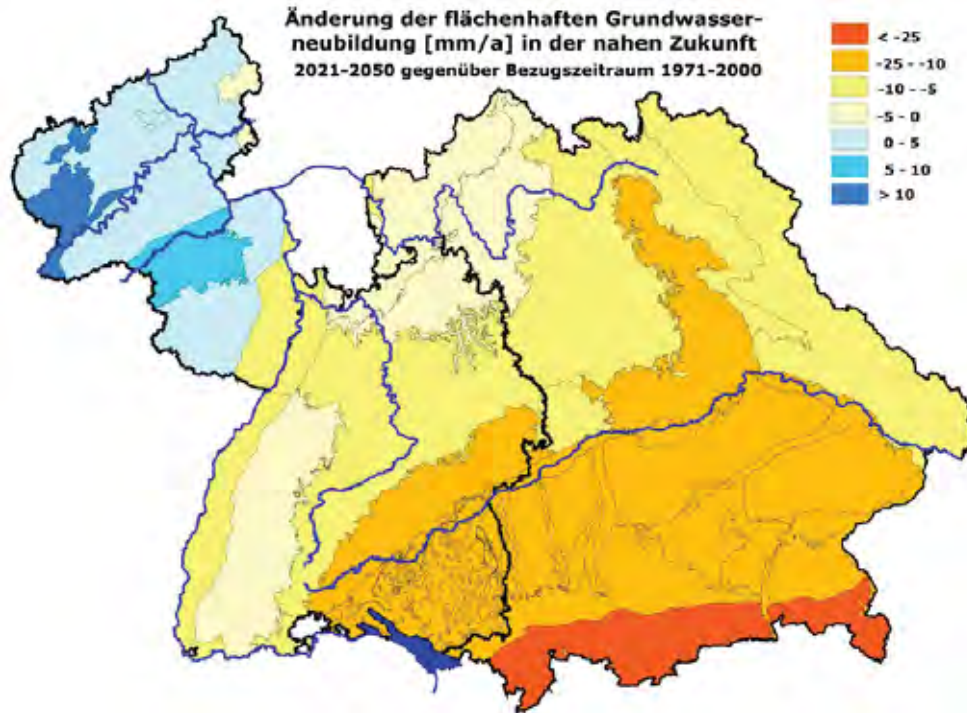


Abb. 4: Absolute Änderung der Grundwasserneubildung in der nahen Zukunft (2021-2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971-2000) in mm/a

### 3.3 Ergebnisse für den Zeitraum 2071-2100 („Ferne Zukunft“)

Neben der „nahen Zukunft“, wurden auch Szenariosimulationen für den Zeitraum 2071-2100 („ferne Zukunft“) durchgeführt. Da die verwendeten regionalen Klimaszenarien auf Sicht von 60-90 Jahren mit nochmals deutlich höheren Unsicherheiten als bereits in der nahen Zukunft behaftet sind, soll hier lediglich ein kurzer Überblick ohne weitergehende Interpretation gegeben werden. Grundsätzlich ist zu erwarten, dass sich bei allen Bilanzgrößen die für die nahe Zukunft aufgezeigten Entwicklungen noch verstärken werden. Das bedeutet insgesamt eine weitere Zunahme der Verdunstung sowie regional unterschiedliche Tendenzen bei Niederschlag, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung. Für mittlere Verhältnisse (dekadenweise) ist festzuhalten, dass die simulierten Wasserbilanzen immer noch nahezu im Bereich der Vergangenheit liegen (Abb. 5).

Neben den in Abbildung 5 dargestellten Mittelwerten ist zu berücksichtigen, dass sich die bereits beobachtete innerjährliche Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr auch in der fernen Zukunft noch weiter verstärken könnte. Die mit dieser Gesamtentwicklung verbundenen möglichen Konsequenzen für die Wasserwirtschaft werden im folgenden Kapitel diskutiert.

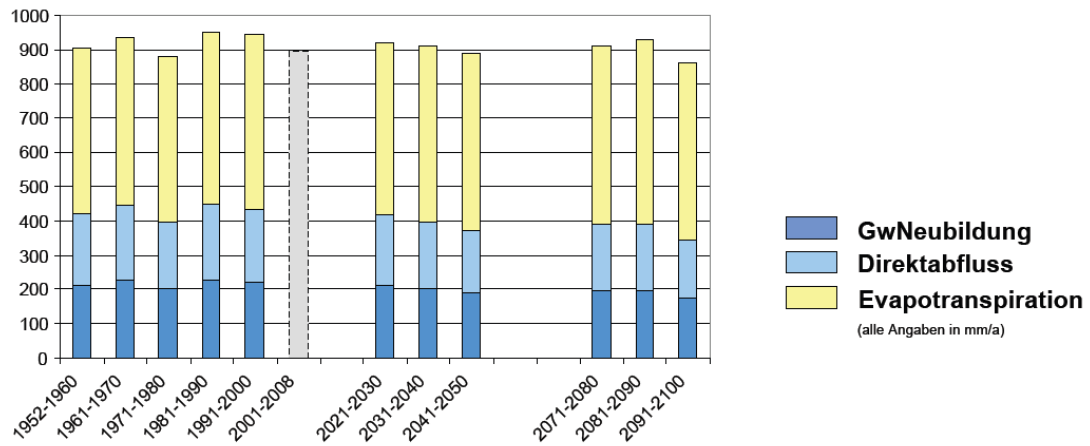


Abb. 5: Mittlere Wasserbilanzwerte in Bayern (dekadenweise), basierend auf einer Langzeitsimulation für die Vergangenheit von 1952-2000, sowie Szenariosimulationen für die Zukunftszeiträume 2021-2050 („nahe Zukunft“) und 2071-2100 („ferne Zukunft“). Die Angabe für den Zeitraum 2001-2008 basiert ausschließlich auf einer Abschätzung des Niederschlags.

#### 4 Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

Die beschriebenen Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt sind auf Seiten der Wasserwirtschaft vor allem für die Wasserversorgung von Interesse. Dies wird besonders deutlich, wenn man berücksichtigt, dass das Trinkwasser in den drei Bundesländern zum überwiegenden Teil aus Grund- und Quellwasser gewonnen wird. Die Betrachtung mittlerer Bilanzwerte ist dabei nur bedingt geeignet, um die tatsächlichen Konsequenzen für die Trinkwasserversorgung aufzuzeigen. Ein mindestens ebenso entscheidender Faktor ist deshalb auch die zeitliche Dynamik der Dargebotsentwicklung. Nachfolgend soll dies mit Hilfe des Indikators „Trockenheitsindex“, der ebenfalls Ergebnis der Simulationen ist, veranschaulicht werden.



Abb. 6: Flächendifferenzierte Darstellung des Trockenheitsindex (Zahl der Tage mit relativer Sättigung des Bodenspeichers von  $< 30\% nFK_{we}$ ) für den Zeitraum 1971-2000 (Ist-Zustand)





Das Bodenwasserhaushaltsmodell simuliert zeitlich hoch aufgelöst die Auffüllung des Bodenwasserspeichers über den Niederschlag sowie seine Entleerung durch Verdunstung und Sickerwasser. Betrachtet man die Zahl der Tage, in denen nur eine vergleichsweise geringe Teilsättigung des Speichers vorliegt, so lassen sich indirekt Rückschlüsse auf die Entwicklung der Dargebotssituation ziehen. Im vorliegenden Fall wurde als Schwellenwert eine 30%ige Füllung des Bodenwasserspeichers (bezogen auf die nutzbare Feldkapazität  $nFK_{we}$ ) definiert. Die Anzahl der Tage, in denen dieser Schwellenwert unterschritten wird, wird hier als Trockenheitsindex bezeichnet. Der Trockenheitsindex beschreibt damit die Zahl der Tage pro Jahr, in denen die Vegetation unter Trockenstress steht und in der Regel auch ein deutlich erhöhter anthropogener Wasserverbrauch zu verzeichnen ist. Im Gegensatz zur eigentlichen Grundwasserneubildung, die methodisch bedingt nur dekadenweise ausgewertet werden kann, liefert der Trockenheitsindex zeitlich hoch aufgelöste Ergebnisse.

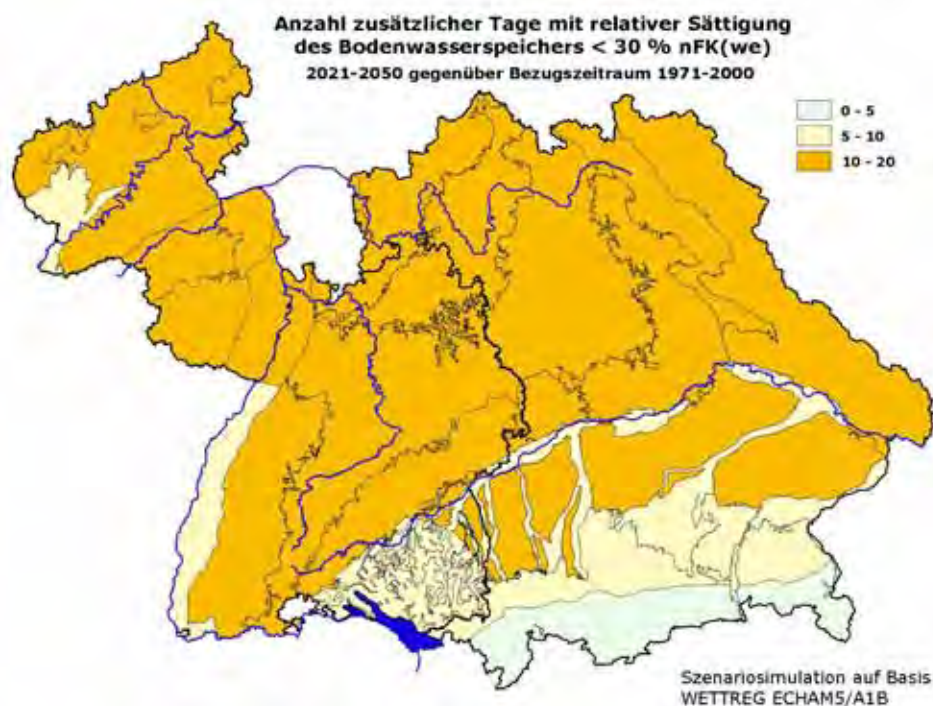


Abb. 7: Absolute Änderung des Trockenheitsindex (Zahl der Tage mit relativer Sättigung des Bodenwasserspeichers von  $< 30\% nFK_{we}$ ) in der nahen Zukunft (2021-2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971-2000)

Betrachtet man den Trockenheitsindex für den Ist-Zustand 1971-2000 (Abb. 6), so fällt eine deutliche räumliche Differenzierung auf. Während sich der Lockergesteinsbereich südlich der Donau sowie Schwarzwald und Bayerischer Wald durch verhältnismäßig niedrige Werte auszeichnen, weichen weite Teile im nördlichen Untersuchungsgebiet (insbesondere Unterfranken und Rheinland-Pfalz) spürbar davon ab. Als Ursache muss die in Folge der Bodenverhältnisse regional unterschiedliche Größe des Bodenwasserspeichers in Verbindung mit den jeweiligen Niederschlags- und Verdunstungsverhältnissen angesehen werden. Dies erklärt, warum Rheinland-Pfalz den Schwellenwert im Mittel etwa 12 Wochen pro Jahr unterschreitet, während Bayern und Baden-Württemberg hier lediglich im Bereich von etwa 6-8 Wochen pro Jahr liegen.

Tab. 1: Änderung des Trockenheitsindex im Zeitraum 2021-2050 gegenüber dem Bezugszeitraum 1971-2000 in den drei Bundesländern

	<b>Baden-Württemberg</b>	<b>Bayern</b>	<b>Rheinland-Pfalz</b>
<b>Zeitraum 1971-2000</b>	<b>30</b>	<b>37</b>	<b>61</b>
<b>Szenario 2021-2050</b>	<b>43</b>	<b>48</b>	<b>75</b>
<b>Änderung, absolut</b>	<b>+13</b>	<b>+11</b>	<b>+14</b>
<b>Änderung, proz.</b>	<b>+43</b>	<b>+30</b>	<b>+23</b>

Für den Szenariozeitraum 2021-2050 ergibt sich für die drei Bundesländer ein vergleichsweise einheitliches Bild (Abb. 7). So ist in den drei Bundesländern im Mittel mit einer Zunahme des Trockenheitsindex in einer Größenordnung von etwa 11-14 Tagen pro Jahr zu rechnen (Tabelle 1). Auch wenn die konkreten Auswirkungen regional sehr unterschiedlich ausfallen können, handelt es sich im Hinblick auf die Wasserversorgung um ca. 2-3 Wochen pro Jahr zusätzlich, die prinzipiell wie folgt gekennzeichnet sind:

- Kein vertikaler Wassertransport in Richtung Grundwasser (ausbleibende Grundwasserneubildung),
- Zugleich fortschreitende Entleerung der Grundwasservorkommen über den Basisabfluss und Grundwasserentnahmen, z.B. durch die Wasserversorgung (abnehmendes Dargebot),
- Erhöhter anthropogener Wasserbedarf z.B. durch öffentliche Wasserversorgung und ggf. Landwirtschaft

Wo sich die Wasserversorgung auf ergiebige Grundwasservorräte oder Verbundsysteme stützen kann, müssen geringere Sommerniederschläge und eine zunehmende Zahl von Trockentagen derzeit nicht als kritisch angesehen werden. Hohe Winterniederschläge sind hier in der Lage, die sommerlichen Defizite zu kompensieren. Vor allem im Bereich wenig ergiebiger Grundwasservorkommen, wie sie z.B. von Quellwasserversorgungen im Kristallin genutzt werden, ist diese Situation jedoch deutlich differenzierter zu bewerten. Das Speichervermögen des Untergrundes reicht hier zum Teil nicht aus, um sommerliche Trockenperioden zu überbrücken, selbst wenn die Grundwasserspeicher nach den Winterniederschlägen maximal gefüllt sind. Wie bereits in der Vergangenheit (z.B. 2003) sind in diesen Bereichen auch zukünftig, und vermutlich sogar häufiger als bisher, Engpässe zu erwarten. Die Erfahrungen der letzten Extremjahre werden auf Seiten der Wasserversorger deshalb auch für die Zukunft von großer Bedeutung sein (siehe auch Haakh, 2010).

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des Bodenwasserhaushaltsmodells GWN-BW wurden Szenariosimulationen der Grundwasserneubildung für die drei KLIWA-Länder Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz auf der Grundlage der WETTREG-2006-Daten (Globalmodell ECHAM5, Emissionsszenario A1B) durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass sich die langjährigen Mittelwerte aller Wasserbilanzgrößen vorerst („nahe Zukunft“) weiter im Größenordnungsbereich vergangener Dekaden bewegen werden. Zu berücksichtigen ist, dass leichten Zunahmen im Nordosten des Untersuchungsgebietes geringfügige Abnahmen im Süden und Südosten gegenüberstehen.

Deutlichere Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserverhältnisse werden jedoch durch die Änderung der innerjährlichen Niederschlagsverteilung mit zukünftig feuchteren Win-



tern und trockeneren Sommern erwartet. Die daraus resultierenden Änderungssignale wurden zeitlich hoch aufgelöst mit Hilfe des Trockenheitsindex (= geringe Füllung des Bodenwasserspeichers) quantifiziert. Für die Wasserversorgung sind die durch den Trockenheitsindex beschriebenen Zeitabschnitte von besonderer Bedeutung, da sie durch eine erhöhte Nachfrage und ein abnehmendes Grundwasserdargebot gekennzeichnet sind. Für alle drei Bundesländer werden für den Zeitraum 2021-2050 Zunahmen des Trockenheitsindex im Bereich von 2-3 Wochen pro Jahr gegenüber dem Zeitraum 1971-2000 prognostiziert. Mengenmäßig negative Auswirkungen auf die Wasserversorgung sind insbesondere im Bereich wenig ergiebiger Aquifere und Quelleinzugsgebiete zu befürchten. Die vorliegenden länderübergreifenden Modellergebnisse dienen im Rahmen von Fallstudien als Grundlage für vertiefte Untersuchungen in ausgewählten Teilbereichen. Sie stellen damit auch die fachliche Basis für weitergehende Überlegungen zu möglichen Handlungsempfehlungen aus wasserwirtschaftlicher Sicht dar.

## 6 Literatur

- Gudera, T. (2010): Bodenwasserhaushalt und Sickerwasserbildung – Ergebnisse von Szenarienrechnungen. – KLIWA-Berichte Heft 15: 187-201.
- Haakh, F. (2010): Anpassungsstrategien der Wasserversorgung an klimabedingte Veränderungen am Beispiel einer Fernwasserversorgung – KLIWA-Berichte Heft 15: 221-233.
- Kille, K. (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse. – Z. Dt. Geol. Ges., Sonderh. Hydrogeol. Hydrochem.: 89-95.
- Neumann, J. & Gudera, T. (2007): Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland. – KLIWA-Berichte Heft 10: 163-173.
- Neumann, J. & Sprenger, W. (2009): Mittlere Grundwasserneubildung aus Niederschlag (1971-2000). - in: Wagner, B., Kus, G., Kainzmaier, B., Spörlein, T., Wilferth, T., Veit, W., Fritsch, P., Wrobel, M., Lindenthal, W., Neumann, J., Sprenger, W., (2009): Hydrogeologische Karte von Bayern 1 : 500 000. - Augsburg (Bayer. L.-Amt f. Umwelt)
- UVM (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg) (ed.) (2004): WaBoA – Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. – 2. Lfg., Stuttgart.
- Willems, W. (2010): Langzeitverhalten von Grundwasserständen und Quellschüttungen – Periodizitäten und Korrelation mit Klimasignalen. – KLIWA-Berichte Heft 15: 165-186.

## Anpassungsmaßnahmen für die Grundwasserbewirtschaftung am Beispiel des Hessischen Rieds

Mario Hergesell  
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden

### 1 Einführung

Das Grundwasser spielt in Hessen eine ganz besondere Rolle. Rund 95% der öffentlichen Trinkwasserversorgung wird durch das Grundwasser sichergestellt. Die Grundwasserbewirtschaftung ist jedoch in hohem Maße vom Witterungsverlauf abhängig. Das Witterungsgeschehen beeinflusst sowohl das nutzbare Wasserdargebot als auch den Wasserbedarf. Die durch den Klimawandel bedingten Veränderungen im Grundwasserhaushalt haben daher Auswirkungen auf die verschiedenen Wassernutzungen und können zur Verschärfung von **grundwasser-verbundenen Nutzungskonflikten** führen.

Im Hessischen Ried findet aufgrund der intensiven Landnutzung mit konkurrierenden Interessen die Grundwasserbewirtschaftung in einem ausgeprägten Spannungsfeld auf engstem Raum statt.

Das Hessische Ried erstreckt sich im Süden Hessens als Teil des nördlichen Oberrheingrabens über eine Fläche von ca. 1200 km<sup>2</sup>. Es wird begrenzt durch den Main im Norden, den Rhein im Westen, den Odenwald im Osten und die Landesgrenze zu Baden-Württemberg im Süden. Das verkehrsgünstig im Rhein-Main-Gebiet gelegene Hessische Ried ist ein wichtiger Wirtschaftsstandort mit entsprechend hohem Bedarf an Siedlungs- und Naherholungsflächen. Zusätzlich findet im Hessischen Ried eine intensive landwirtschaftliche Nutzung mit zunehmendem Anbau von bewässerungsintensiven Kulturen statt. Die großen zusammenhängenden Waldbestände des Hessischen Rieds besitzen eine hohe Schutz- und Erholungsfunktion für die Region. Gleichzeitig stellt der mächtige Porengrundwasserleiter im Hessischen Ried einen guten Grundwasserspeicher dar, der im großen Umfang zur lokalen und regionalen Wasserversorgung des Rhein-Main-Ballungsraums genutzt wird.

Das Hessische Ried zeichnete sich in der Vergangenheit durch eine große Schwankungsbreite in den Jahressummen der Grundwasserneubildung aus. Während in Trockenjahren die Grundwasserneubildung sehr gering ist bzw. gar nicht stattfindet, erreicht sie in Nassjahren mehrere 100 mm/a. Entsprechend ausgeprägt sind auch die Schwankungen der Grundwasserstände zwischen nassen (1981-1983, 1987-1988, 2001-2003) und trockenen (1971-1976, 1990-1993) Witterungsperioden. Neben den klimatischen Verhältnissen werden die Grundwasserstände maßgeblich durch die Grundwasserförderung beeinflusst. Die Grundwasserstandsschwankungen sind also auf die Überlagerung beider Einflussfaktoren zurückzuführen. In Zeiten **extrem niedriger Grundwasserstände** wurden im Hessischen Ried grundwasserabhängige Biotope und Waldgebiete geschädigt; durch Absenkungen an der Oberfläche kam es zu Setzrissschäden an Gebäuden und Verkehrsinfrastruktur (Abb.1).



Abb. 1: Trockenheitsschäden im Wald und Setzrissschäden an Verkehrswegen und Gebäuden infolge extrem niedriger Grundwasserstände



In Zeiten **extrem hoher Grundwasserstände** kam es wiederholt zu Kellervernässungen, Überflutung von Straßen und Vernässungen der landwirtschaftlichen Nutzflächen (Abb. 2).



Abb. 2: Vernässung in Siedlungen und Überflutung von Straßen und landwirtschaftlicher Nutzflächen infolge extrem hoher Grundwasserstände

Aufgrund der vielfältigen Nutzungskonflikte zwischen der Land- und Forstwirtschaft, dem Naturschutz, dem Siedlungs- und Verkehrswesen und der Wasserversorgung wurden im Hessischen Ried frühzeitig Strategien und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement etabliert. Im Jahr 1999 wurde der „Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried“ zur Vermeidung von Schäden infolge niedriger Grundwasserstände aufgestellt (Regierungspräsidium Darmstadt, 1999). Als umfassendes Maßnahmenpaket in Hinblick auf Vernässungsschäden infolge hoher Grundwasserstände wurde 2002 ein 10-Punkte-Programm vom Hessischen Umweltministerium beschlossen.

Die im Hessischen Ried vorherrschende komplexe wasserwirtschaftliche Problematik wird in der Informationsbroschüre des Hessischen Umweltministeriums „Das Hessische Ried zwischen Vernässung und Trockenheit“ detailliert beschrieben. Die Broschüre kann von der Internetseite des HLUg heruntergeladen werden.

([http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw\\_artikel.htm](http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw_artikel.htm))

## 2 Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserbewirtschaftung

Die ersten Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt in Hessen wurden im Rahmen des Integrierten Klimaschutzprogrammes von Hessen **INKLIM 2012** (Baustein II) im Jahr 2005 durchgeführt (Berthold & Hergesell, 2005). Die verwendeten Klimaprojektionen für den Zeitraum bis 2050 basierten auf dem globalen Klimamodell (GCM) ECHAM4, dem regionalen Klimamodell (RCM) WETTREG-2003 und dem moderaten SRES-Emissionsszenario B2.

In dem durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt „**AnKliG** – Anpassungsstrategien an Klimatrends und Extremwetter und Maßnahmen für ein nachhaltiges Grundwassermanagement“ haben sich das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), die Hessenwasser GmbH & Co. KG sowie die Brandt Gerdes Sitzmann (BGS) Umweltplanung GmbH gemeinsam das Ziel gesetzt, die Klimawirkungen auf den Grundwasserhaushalt modellhaft für die Regionen Hessisches Ried und angrenzender Odenwald auf der Grundlage verschiedener regionaler Klimaszenarien bis zum Jahr 2100 zu untersuchen (Kämpf et al., 2008). Zusammenfassend werden im Rahmen des BMBF-Projektes folgende Ziele im Sinn eines integrierten Grundwassermanagements verfolgt:

- Ermittlung der zukünftig nutzbaren Grundwasserressource
- Quantifizierung der Veränderungen im Wasserbedarf
- Untersuchung der zukünftigen Grundwasserstandsentwicklung
- Analyse der zu erwartenden grundwasserverbundenen Nutzungskonflikte
- Aufzeigen von Möglichkeiten und Grenzen einer integrierten Grundwasserbewirtschaftung

Da das Projekt zum Zeitpunkt des KLIWA-Symposiums noch nicht abgeschlossen war, werden im Folgenden einige bereits vorliegende Zwischenergebnisse vorgestellt, wobei der Fokus hier auf dem Betrachtungszeitraum bis 2050 liegt.

Die betrachteten Klimaprojektionen zeigen, dass die Jahresniederschlagssummen in Hessen bis 2050 weitgehend unverändert bleiben. Allerdings kommt es zu einer deutlichen saisonalen Umverteilung, sodass die Sommer zukünftig trockener und die Winter niederschlagsreicher ausfallen. Die wesentlichen **Klimatrends** für Hessen sind beispielhaft für das SRES-Emissionsszenario A1B (ECHAM5, WETTREG-2006) in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Klimatrends für Hessen (SRES-A1B, ECHAM5, WETTREG-2006)

	2021-2050 vs. 1971-2000	2071-2100 vs. 1971-2000
Temperatur (Jahr)	+ 0.8 °C	+ 2.3 °C
Niederschlag (Jahr)	+0.5 %	+ 7.2 %
Niederschlag (Hydr. SHJ)	- 5.4%	-10.6 °C
Niederschlag (Hydr. WHJ)	+6.9%	+ 26.3 °C

Im Rahmen des BMBF-Projektes hat das HLOG die **Grundwasserneubildung** auf der Grundlage der drei SRES-Emissionsszenarien A2, A1B und B1 landesweit modelliert. Die Klimaprojektionen basieren auf dem globalen Klimamodell (GCM) ECHAM5 und den statistischen regionalen Klimamodellen (RCM) WETTREG-2006 und STAR2.

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung in Hessen kommt ein zweistufiges, GIS-gestütztes Verfahren zum Einsatz, bei dem ein Bodenwasserhaushaltsmodell mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell (Hergesell & Berthold, 2005) gekoppelt wird.

In Abb. 3 sind die Dekadenmittelwerte der Grundwasserneubildung für Hessen für die Beobachtungsdaten und für das „Mini-Ensemble“ aller bisher betrachteten Projektionen dargestellt.

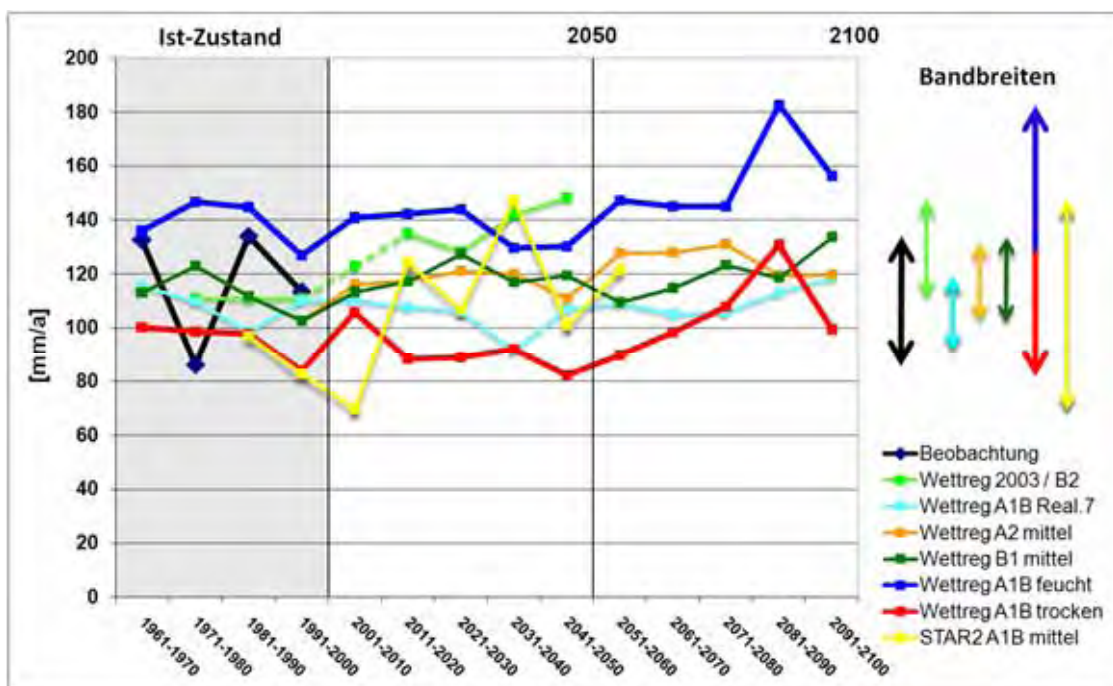


Abb. 3: Dekadenmittelwerte der Grundwasserneubildung für Hessen



Die Beobachtungsdaten zeigen eine deutliche dekadische Variabilität. Die ersten Szenarien-Ergebnisse von 2005 (SRES-Emissionsszenario B2, GCM-ECHAM4, RCM-WETTREG-2003) zeigten zunächst einen deutlichen Anstieg der Grundwasserneubildung bis zum Jahr 2050. Die aktuellen Ergebnisse, die auf dem GCM ECHAM5 und dem RCM WETTREG-2006 basieren, geben diesen Trend dagegen nicht wieder. Für das A1B-Szenario ist bis 2050 sogar eher ein rückläufiger Trend für die Grundwasserneubildung zu beobachten. Für das A1B-Szenario wurde die Realisation 7 ausgewertet und nicht das Mittel aus den 10 verfügbaren Realisationen. Dieser Einzellauf zeichnet sich durch die stärkste Variabilität und größte Amplitude für das A1B-Szenario aus. Die Ergebnisse für die gemittelten Läufe der SRES-Emissionsszenarien A2 und B1 liegen zwischen den beiden erst genannten Szenarien-Ergebnissen und deutlich innerhalb des Schwankungsbereiches der Beobachtungsdaten. Die dekadische Variabilität bzw. Bandbreite der Beobachtungsdaten wird von keinem einzelnen WETTREG-Lauf wiedergegeben. Um Aussagen über die Variabilität und den Schwankungsbereich von WETTREG-Klimaprojektionen treffen zu können, müssen alle 10 Realisationen eines Szenarios betrachtet werden, was aufgrund der langen Rechenzeiten und großen Datenmengen nicht praktikabel erscheint. CEC Potsdam GmbH hat daher für die WETTREG-basierten Klimaprojektionen neben den 10 Einzelläufen sogenannte Feucht- und Trockenläufe zur Verfügung gestellt. Die in Abb. 3 für das A1B-Szenario dargestellten Feucht- und Trockenläufe approximieren die Bandbreite der 10 einzelnen WETTREG-Realisationen. Die so angenäherte Bandbreite für das A1B-Szenario entspricht bis 2050 in etwa der Bandbreite der Beobachtungsdaten. Für das SRES-Emissionsszenario A1B wurden zusätzlich Klimaprojektionen des statistischen Regionalmodells STAR2 für die Ermittlung der Grundwasserneubildung verwendet (Abb. 3). Im Gegensatz zu den WETTREG-Ergebnissen wird die Schwankungsbreite der Beobachtungsdaten durch die STAR2-Ergebnisse überschritten. Allerdings erscheinen die Ergebnisse nicht plausibel. So fallen z.B. die Niederschlagshöhen für den Zeitraum 1981-2000 viel zu niedrig aus, obwohl der für diesen Zeitraum für das Regionalisierungsverfahren vorgegebene Temperaturtrend auf Beobachtungsdaten beruht. Die Ursache hierfür liegt vermutlich an der geringen Korrelation zwischen den Klimagrößen Temperatur und Niederschlag.

Zusammenfassend kann auf der Grundlage der bisher betrachteten Klimaprojektionen festgehalten werden, dass bis zum Jahr 2050 kein eindeutiger Trend für die Grundwasserneubildung erkennbar ist und die Ergebnisse sich innerhalb der Schwankungsbreite der auf den Beobachtungsdaten beruhenden Ergebnisse bewegen. In der zweiten Hälfte des Projektionszeitraums deutet sich ein zunehmender Trend für die Grundwasserneubildung ab. Allerdings sind die Modellergebnisse mit großen Unsicherheiten behaftet und das hier dargestellte „Mini-Ensemble“ stellt nur einen Bruchteil der möglichen unterschiedlichen Modellketten-Varianten (SRES-Emissionsszenario → GCM → RCM → Hydrologisches Wirkmodell) dar.

Die Entwicklung der **Grundwasserstände** im Hessischen Ried wird im Rahmen des genannten BMBF-Projektes durch das Ingenieurbüro BGS Umweltplanung GmbH mit Hilfe eines instationären Grundwassermodells auf Grundlage unterschiedlicher Klimaprojektionen untersucht. Neben den WETTREG- und STAR2-Klimaprojektionen werden auch Klimaprojektionen des dynamischen Regionalmodells CLM verwendet, um so den Einfluss der unterschiedlichen Regionalisierungsverfahren bewerten zu können. Da die Simulationsrechnungen der Grundwasserstände zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen sind, können hierzu noch keine abschließenden Aussagen gemacht werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass sich die grundwasserverbundenen Nutzungskonflikte infolge des Klimawandels zukünftig noch verschärfen und damit die Anforderungen an eine nachhaltige und integrierte Grundwasserbewirtschaftung zunehmen werden.

Die aus den Klimaszenarien projizierten klimatischen Änderungen werden dazu führen, dass bei feuchteren Wintern und trockeneren Sommern die Grundwasserneubildung und die Grundwasserstände gegenüber heute größeren saisonalen Schwankungen unterliegen werden. Ein eindeutiger Trend zu höheren oder niedrigeren Grundwasserständen ist auf Grundlage des gegenwärtigen Kenntnisstands bzw. der bis jetzt betrachteten Klimaprojektionen nicht erkennbar.

Für die **Trinkwasserversorgung** ist neben dem zukünftigen Wasserdargebot die Entwicklung des zukünftigen Wasserbedarfs von Bedeutung. Daher hat die Hessenwasser GmbH & Co. KG eine Wasserbedarfsprognose bis zum Jahr 2100 erstellt. Die maßgeblichen Einflussgrößen für den Wasserbedarf sind die demographische Entwicklung und die Entwicklung des Pro-Kopf-Verbrauchs. Der Pro-Kopf-Verbrauch wird wiederum durch das Verbraucherverhalten und den technologischen Fortschritt bestimmt. Für die aufzustellende Wasserbedarfsprognose wurden verschiedene Prognosen der Bevölkerungsentwicklung mit verschiedenen Varianten des zukünftigen Pro-Kopf-Bedarfs kombiniert.

Da der jährliche bzw. mittlere Wasserbedarf (Grundlast) stärker von der Bevölkerungsentwicklung und dem Pro-Kopf-Verbrauch als vom Klimawandel beeinflusst wird, ist zukünftig von einem moderaten Bedarfsrückgang auszugehen. Allerdings ist infolge der zukünftig wärmeren und trockeneren Sommer mit einem Anstieg des Spitzenwasserbedarfs zu rechnen.

Anders als im Hessischen Ried ist die Situation in den angrenzenden Festgesteinsgrundwasserleitern des Odenwalds, wo die Wasserversorgung vielerorts auf Quellen beruht. Aufgrund der trockeneren Sommer ist zukünftig mit rückläufigen Quellschüttungen zu rechnen, so dass die dezentrale Trinkwasserversorgung durch Quellwasser in den Sommermonaten zunehmend gefährdet ist. Durch die Zunahme von Starkniederschlagsereignissen können die Quellrohässer durch Trübung qualitativ beeinträchtigt werden.

Die **landwirtschaftliche Beregnung** im Hessischen Ried ist neben der Trinkwassergewinnung eine dominierende Kenngröße der Grundwasserentnahme. Unter den klimatischen Bedingungen des Hessischen Rieds ist eine wirtschaftliche Pflanzenproduktion schon heute nur durch eine intensive landwirtschaftliche Beregnung möglich. Bezogen auf die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche beträgt der prozentuale Anteil der erschlossenen Beregnungsflächen 96% (Abb. 4). Als Beregnungswasser kommt zum überwiegenden Teil Grundwasser aus Beregnungsbrunnen zum Einsatz (Tab. 2).

Tab. 2: Herkunft der Beregnungswässer

Beregnungsflächen im Ried	Fläche in ha	Fläche in %
Grundwasser	27.725	83,9
aufbereitetes Rheinwasser	5.233	15,8
aufbereit. Oberflächenwasser	91	0,3
Gesamte Beregnungsfläche	33.049	100

Daneben stammt ein nicht unerheblicher Teil des Beregnungswassers aus der Rheinwasseraufbereitungsanlage des Wasserverbands Hessisches Ried bei Biebesheim. Die Grundwasserentnahmen für die landwirtschaftliche Beregnung liegen zwischen wenigen Mio. m<sup>3</sup>/a (Nassjahre) und rund 35 Mio. m<sup>3</sup>/a (Trockenjahre). Diese Zahlen belegen, dass die Witterung einen extremen Einfluss auf die verabreichte Menge an Beregnungswasser ausübt. Der Grundbedarf an Beregnungswasser hat sich in den letzten 15 Jahren von 3,5 Mio. m<sup>3</sup> auf 10 Mio. m<sup>3</sup> erhöht. Es ist anzunehmen, dass der Bedarf an Beregnungswasser in der Landwirtschaft infolge trockenerer und wärmerer Sommer sowie verlängerter Vegetationsperioden deutlich zunehmen wird. Der erhebliche Mehrbedarf an Beregnungswasser kann eine direkte Konkurrenzsituation zwischen der Trinkwasserversorgung einerseits und landwirtschaftlicher Beregnung andererseits bewirken.



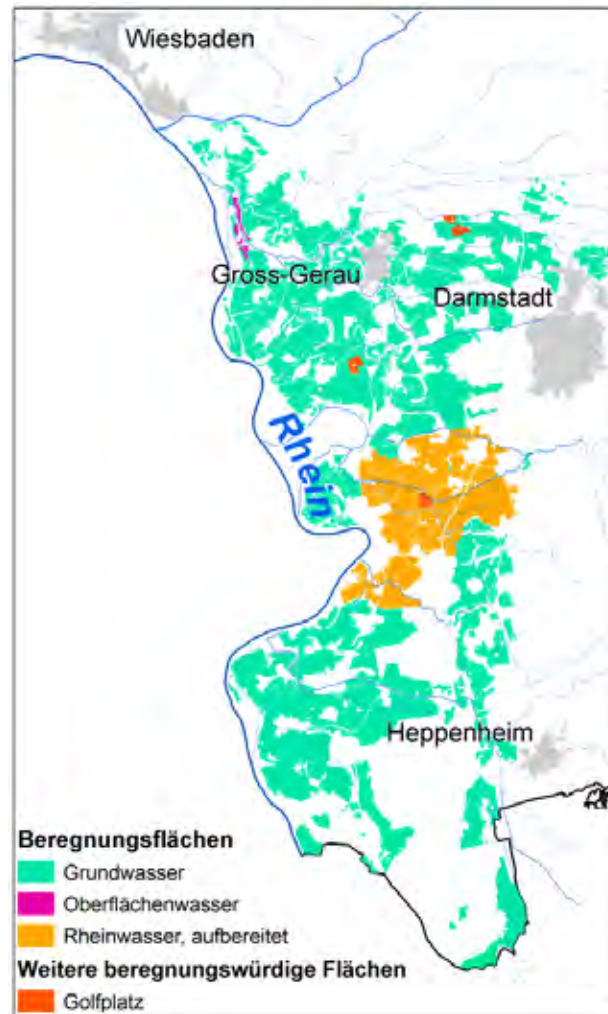


Abb. 4: Berechnungsflächen im Hessischen Ried (Stand 2008)

### 3 Steuerungsinstrumente und mögliche Anpassungsmaßnahmen

Im Rahmen des BMBF-Projektes AnKliG sollen das zu erwartende Ausmaß von grundwasser-verbundenen Nutzungskonflikten quantifiziert und abschließend Strategien und Maßnahmen zur Einbeziehung der klimabedingten Veränderung im Grundwasserhaushalt in ein integriertes Wassermanagement entwickelt werden.

Mögliche Anpassungsmaßnahmen und Strategien dürfen hierbei nicht getrennt für die unterschiedlichen Wirkungsbereiche entwickelt werden, sondern müssen im Gesamtzusammenhang betrachtet werden. Auch muss bei der Entwicklung von Anpassungsstrategien den großen Unsicherheiten und Bandbreiten der Modellergebnisse Rechnung getragen werden.

Die vorgestellten unterschiedlichen Ergebnisse der Grundwasserneubildung (Abb. 3) zeigen die Schwierigkeit auf, konkrete und quantifizierbare Anpassungsmaßnahmen auf der Grundlage regionaler Klimaprojektionen zu formulieren. Da nicht bekannt ist, welche Modellketten-Variante (SRES-Emissionsszenario → GCM → RCM → Hydrologisches Wirkmodell) die zukünftige Entwicklung am genauesten beschreibt, ist die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen auf der Grundlage einer einzigen Modellketten-Variante problematisch. Folgt man dem Rat der Klimamodellentwickler und praktiziert den sehr zeit- und rechenintensiven Multimodellansatz (Abb. 5),

erhält man Ergebnisbandbreiten, für die ein ganzes Spektrum unterschiedlicher, unter Umständen sogar gegensätzlicher Anpassungsmaßnahmen erforderlich wären.

Die erforderliche Anzahl an Ensemble-Mitgliedern bzw. Modellvarianten, um statistisch abgesicherte Trends ableiten zu können, erscheinen zum gegenwärtigen Zeitpunkt für die hydrologische Impact-Modellierung auf Grund der hierzu benötigten Rechenkapazitäten und des erforderlichen Zeitaufwandes nicht praktikabel. Anpassungsstrategien sollten daher zum gegenwärtigen Zeitpunkt möglichst flexibel gestaltet werden („flexible and no regret strategies“). Durch den kontinuierlichen Erkenntniszuwachs und die Weiterentwicklung der Klimamodelle müssen die Anpassungsstrategien sukzessive nachjustiert und an den aktuellen Kenntnisstand angepasst werden.

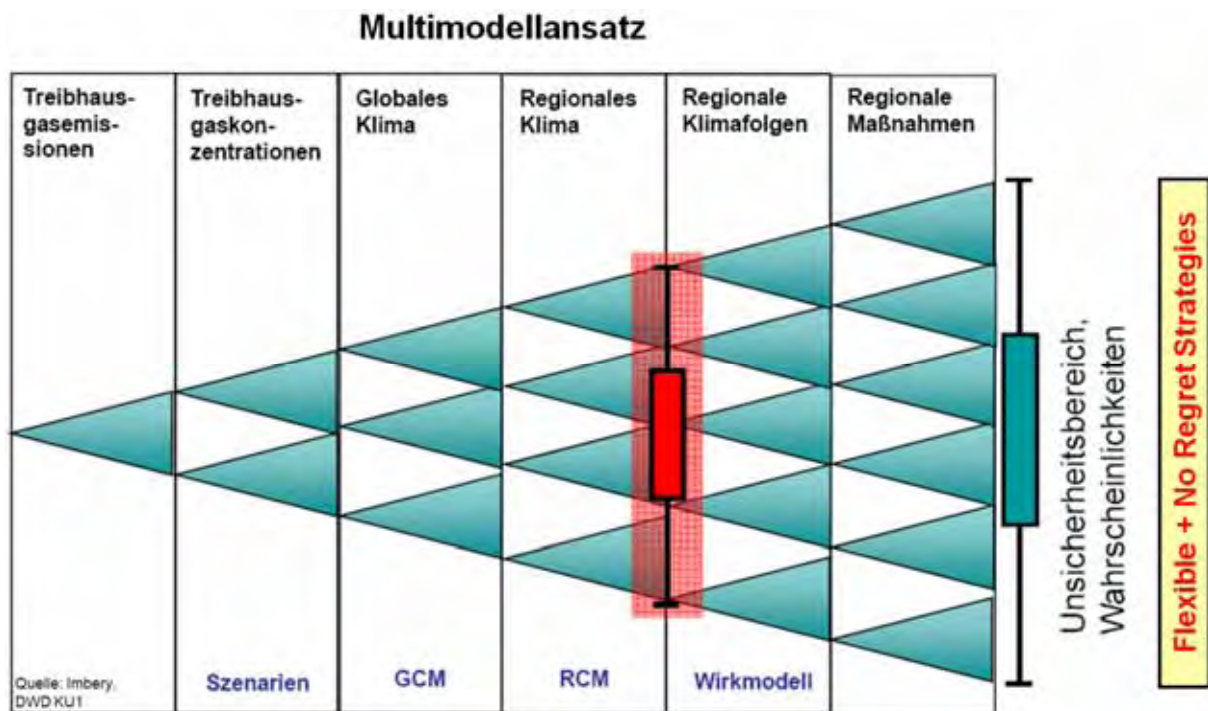


Abb. 5: Unsicherheitsbereich beim Multimodellansatz

In Anbetracht dessen, dass die Klimatrends für Temperatur und Niederschlag auf der Grundlage der bisher berücksichtigten Klimaprojektionen keine dramatische Entwicklung für Hessen bis 2050 aufzeigen und sich die bisher vorliegenden Szenarienergebnisse der Grundwasserneubildung bis 2050 innerhalb der Schwankungsbreite der auf Beobachtungsdaten beruhenden Ergebnisse bewegen, verfügt Hessen bereits heute über Steuerungsinstrumente und Maßnahmenpläne, die zukünftig unter geänderten klimatischen Bedingungen eine zunehmend wichtige Rolle für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung in Südhessen spielen werden.

In dem bereits 1999 in Kraft getretenen Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried hat das Land Hessen Maßnahmen zur Stabilisierung der Grundwasserstände vorgesehen, um die im Hessischen Ried vorherrschenden grundwasserverbundenen Nutzungskonflikte zu minimieren und gleichzeitig die örtliche und regionale Wasserversorgung dauerhaft sicherzustellen. Für 46 ausgewählte Referenzmessstellen wurden unter Abwägung der nutzungsspezifischen Anforderungen an den Grundwasserstand anzustrebende Richtgrundwasserstände und zugehörige untere Grenzgrundwasserstände festgelegt. Das zentrale Instrument zur Stabilisierung der Grundwasserstände ist die künstliche Grundwasseranreicherung durch den Wasserverband Hessisches Ried (WHR). Hierzu wird im Wasserwerk Biebesheim zunächst Rheinwasser zu einem Wasser mit Trinkwasserqualität aufbereitet, welches anschließend gezielt in den Bereichen der Absenkrichter der großen Wasserwerke über Infiltrationsanlagen versickert wird. Ein



Teil des aufbereiteten Rheinwassers wird für die landwirtschaftliche Beregnung bereit gestellt und entlastet somit die Grundwasservorkommen. Der zukünftig weiter steigende Beregnungsbedarf könnte durch Erhöhung der Kapazitäten der Rheinwasseraufbereitung kompensiert werden.

Die Grundwasseranreicherung wird durch kontinuierliches Monitoring der Grundwasserstände und unter Berücksichtigung der klimatischen Entwicklung dynamisch gesteuert. Durch die Infiltration lassen sich klimatisch bedingte Schwankungen der Grundwasserstände ausgleichen. In trockenen Witterungsperioden werden die Infiltrationsmengen erhöht, in nassen Witterungsperioden wird die Grundwasseranreicherung verringert bzw. eingestellt. Durch die Infiltration sollen die im Bewirtschaftungsplan festgelegten Richtgrundwasserstände erreicht werden. Durch festgelegte Abschaltwerte ist gewährleistet, dass bei hohen Grundwasserständen die Infiltration rechtzeitig eingestellt wird. Die Möglichkeit der Vernässung in Siedlungsbereichen infolge der Infiltration kann daher ausgeschlossen werden.

Durch die künstliche Grundwasseranreicherung ist die Wasserversorgung auch in trockenen Witterungsperioden sichergestellt. Sie trägt auch zur Vermeidung von Setzrissschäden und zur Verbesserung der ökologischen Verhältnisse bereits geschädigter grundwasserstandsabhängiger Vegetationsbereiche bei.

Als Maßnahmen, die in nicht infiltrationsgestützten Bereichen beim Erreichen des unteren Grenzgrundwasserstandes zur Stabilisierung des Grundwasserstandes eingeleitet werden können, kämen die Reduzierung der Grundwasserentnahme, die Umverteilung der Fördermengen in Verbundwasserwerken sowie der Fremdbezug über einen Leitungsverbund in Frage.

Die nachfolgende Grundwasserstandsganglinie (Abb. 6) zeigt für die Grundwassermessstelle Einhausen ab dem Jahr 2000 das Erreichen des im Grundwasserbewirtschaftungsplan festgelegten Richtwertes infolge der dynamischen Entnahme- und Infiltrationssteuerung.



Abb. 6: Grundwasserstandsentwicklung bei Einhausen

Weitere Lösungsansätze und Maßnahmen, die bereits heute in Südhessen bereichsweise umgesetzt bzw. zukünftig für ein nachhaltiges Grundwassermanagement zunehmend erforderlich sein werden, wären beispielhaft:

- Ausweitung des quantitativen und qualitativen Monitorings
- Bau von technischen Anlagen zur Grundwasseranreicherung
- Bau von technischen Anlagen zur Begrenzung des Grundwasseranstiegs
- Ausbau des Verbundnetzes zur Wasserversorgung
- Grundwasserstandsorientierte Verteilung der Fördermengen in Verbundwasserwerken
- Pflege, Umgestaltung und Ausbau der Fließgewässer und Entwässerungsgräben
- Optimierung der Beregnungssteuerung in der Landwirtschaft
- Anbau neuer bzw. trockenresistenter Kulturen in der Landwirtschaft

Als **Beispiel für eine integrierte Grundwasserbewirtschaftung** im Hessischen Ried ist das sogenannte „Westwald-Projekt“ zu nennen. Mit einer technisch aufwendigen Anlagensteuerung konnten in diesem Projekt die unterschiedlichen, nutzungsspezifischen Interessen in Einklang gebracht werden. Wegen ansteigender Grundwasserstände in Siedlungsgebieten von Weiterstadt und Griesheim wurden zum Schutz vor Kellervernässungen in den Ortsrandlagen Brunnengalerien errichtet (Abb. 7). Durch die Brunnen lässt sich der Grundwasseranstieg nach oben begrenzen und dadurch die Vernässungsgefahr zukünftig vermeiden. Die Brunnen wurden an das bestehende Beregnungsnetz der Landwirtschaft angeschlossen und bis in die Waldgebiete hinein verlängert. Das in den Brunnen geförderte Grundwasser kann somit für die Landwirtschaft verwendet und in den geschädigten Waldgebieten zur Anhebung der Grundwasserstände versickert werden. Projekte dieser Art könnten mit ihren integrierten Lösungsansätzen zukünftig im Kontext des Klimawandels zunehmend an Bedeutung gewinnen.



Abb. 7: Integrierte Grundwasserbewirtschaftung in Weiterstadt und Griesheim



#### 4 Fazit und Ausblick

Die Klimatrends für Temperatur und Niederschlag zeigen auf Grundlage der bisher berücksichtigten regionalen Klimaprojektionen für Hessen keine dramatische Entwicklung bis zum Jahr 2050. Die Entwicklung der Grundwasserneubildung zeigt bis zum Jahr 2050 keinen eindeutigen Trend. Eine deutliche Veränderung der Grundwasserneubildung ist eher nicht zu erwarten. Der Schwankungsbereich der Vergangenheit scheint nicht wesentlich überschritten zu werden. Die hier vorgestellten Modellergebnisse sind mit großen Unsicherheiten verbunden und weitere Klimaprojektionen bzw. Modellketten-Varianten (Multimodell-Ensemble) sollten in Betracht gezogen werden. Für die Entscheidungsträger und die Öffentlichkeit ergibt sich aus dem Multimodell-Ansatz die Notwendigkeit zum Umgang mit Bandbreiten statt wie bisher mit konkreten Einzelwerten. Die Formulierung konkreter bzw. quantifizierbarer Anpassungsmaßnahmen erscheint auf der Grundlage der verfügbaren regionalen Klimaprojektionen und den damit verbundenen großen Unsicherheiten und Bandbreiten zum gegenwärtigen Zeitpunkt schwierig. Aufgrund der nutzungsspezifischen, unterschiedlichen Anforderungen an die Grundwasserstände im Hessischen Ried sind keine isolierten Maßnahmen anzustreben, sondern integrative Lösungsansätze erforderlich. Hessen ist mit seinen Forschungsaktivitäten (INKLIM, AnKliG) und den bereits vorhandenen Steuerungsinstrumenten und Maßnahmenplänen für eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung in Südhessen auch in der Zukunft gut aufgestellt.

#### 5 Literatur

- Berthold, G., Hergesell, M. (2005): Flächendifferenzierte Untersuchungen zu möglichen Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung in Hessen. In: Hess. Landesamt für Umwelt und Geologie: Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012, Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen, Abschlussbericht: 16-22
- Hergesell, M., Berthold, G. (2005): Entwicklung eines Regressionsmodells zur Ermittlung flächendifferenzierter Abflusskomponenten in Hessen durch die Regionalisierung des Baseflow-Index (BFI). Jahresbericht 2004 des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie: 47-66
- Hessisches Ministerium für Umwelt, ländlichen Raum und Verbraucherschutz (2005): Das Hessische Ried zwischen Vernässung und Trockenheit, 70 S. [http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw\\_artikel.htm](http://www.hlug.de/medien/wasser/grundwasser/gw_artikel.htm)
- Kämpf, M., Gerdes, H., Mikat, H., Berthold, G., Hergesell, M., Roth, U. (2008): Auswirkungen des Klimawandels auf eine nachhaltige Grundwasserbewirtschaftung. In: DVGW energie|wasser-praxis 1/2008: 49-53
- Regierungspräsidium Darmstadt (1999): Grundwasserbewirtschaftungsplan Hessisches Ried

## **Anpassungsstrategien der Wasserversorgung an klimabedingte Veränderungen am Beispiel einer Fernwasserversorgung**

Frieder Haakh  
Zweckverband Landeswasserversorgung

### **0 Kurzfassung**

Die Zunahme von Hitze- und Trockenperioden, der Winterniederschläge und auch der Hochwässer sowie steilere Gradienten und größere Amplituden der hydrologischen Größen sind die wesentlichen klimabedingten Störgrößen auf das System „Wasserversorgung“. Besonders stark werden die Rohwasserqualität, das Rohwasserdargebot und die Versorgungssicherheit durch den Klimawandel beeinflusst werden. Der Beitrag baut auf den bekannten Szenarien hinsichtlich der Veränderung der hydrologischen Größen auf. Anhand einer Systemanalyse werden die Einflüsse auf die einzelnen Systemgrößen sowie Rückkopplungen aufgedeckt und einer Risikoanalyse zugänglich gemacht. Die Risikoanalyse ist wiederum Basis für die Anpassungsstrategien, wobei hinsichtlich der Risiken unterschieden werden muss in investitionsrelevante Risiken und die managementbasierte Risikobeherrschung. Investive Maßnahmen in der Wasserversorgung müssen aufgrund der längeren Umsetzungsphasen und im Hinblick auf die notwendigen Finanzierungsmöglichkeiten frühzeitig geplant werden. Im Beitrag wird darauf eingegangen, inwieweit dies die einzelnen Wertschöpfungsketten der Trinkwasserversorgung betrifft und welche konkreten Maßnahmen sich daraus ableiten lassen.

### **1 Einleitung**

Die Wasserversorgung muss sich in besonderem Maße mit den Auswirkungen des Klimawandels auseinandersetzen, da der Klimawandel unmittelbar Einfluss auf den Wasserhaushalt nimmt und die Wasserversorgung eben die wasserressourcenabhängige Dienstleistung der Daseinsvorsorge ist. Der Schwerpunkt der Handlungsoptionen der Wasserversorgung liegt auf Anpassungsstrategien und weniger auf Vermeidungsstrategien, da sich der CO<sub>2</sub>-Ausstoß infolge des Energiebedarfs der öffentlichen Wasserversorgung, der bei nur etwa 1,5% des Gesamtbedarfs Deutschlands liegt, vergleichsweise gering ausnimmt. Allerdings ist das System „Klimawandel und Wasserversorgung“ komplexer Natur. Im Beitrag wird die Systematik der Systemanalyse angewandt, um die stärksten Einflussfaktoren aufzudecken, aber auch um mögliche Handlungsspielräume zu erkennen. So wird wohl jeder im Zusammenhang mit Klimawandel eine Verknappung des Rohwassers für die öffentliche Wasserversorgung vermuten, aber nicht unmittelbar die Sicherheit der Stromversorgung oder eine Beeinträchtigung der Rohwasserqualität ins Kalkül ziehen.

Im Beitrag wird wiederholt Bezug genommen auf konkrete Maßnahmen, die sich auf die Landeswasserversorgung als großes Fernwasserversorgungsunternehmen in Baden-Württemberg beziehen. Die Landeswasserversorgung ist die älteste Fernversorgung in Deutschland. Sie schöpft aus vier voneinander unabhängigen Ressourcen etwa 90 – 100 Millionen Kubikmeter Rohwasser zur Versorgung von etwa 2,7 Millionen Einwohnern im Verbandsgebiet in Württemberg. Mit 800 km<sup>2</sup> Wasserschutzgebietsfläche verfügt die Landeswasserversorgung über die größten Wasserschutzgebiete in Deutschland. Darüber hinaus wird Donaurohwasser in einem komplexen Verfahren zu Trinkwasser bester Qualität aufbereitet, sodass hier auch eine unmittelbare Abhängigkeit vom Donauabfluss gegeben ist. Bei der Landeswasserversorgung ist die Betroffenheit durch den Klimawandel bereits heute erkennbar und auf mehreren Ebenen gegeben. Beispielsweise ist seit Jahrzehnten eine trendbehaftete Entwicklung zu höheren Temperaturen und Winterniederschlägen in den Trinkwassereinzugsgebieten der LW zu beobachten.

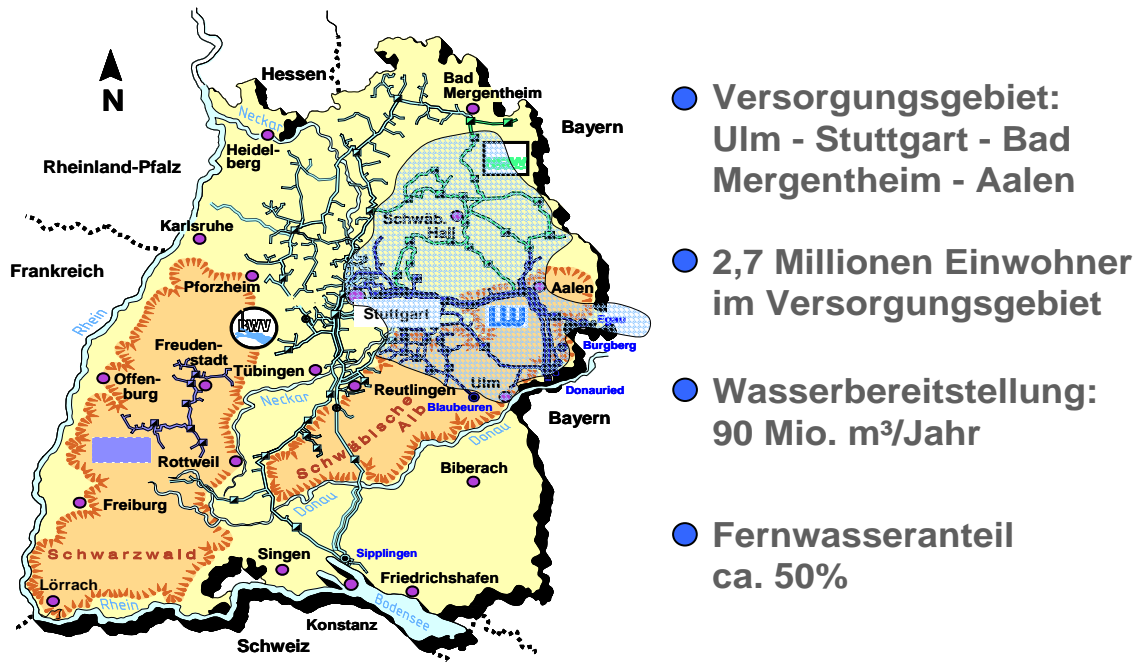


Abb. 1: Fernwasserversorgung in Baden-Württemberg und Versorgungsgebiet der Landeswasserversorgung

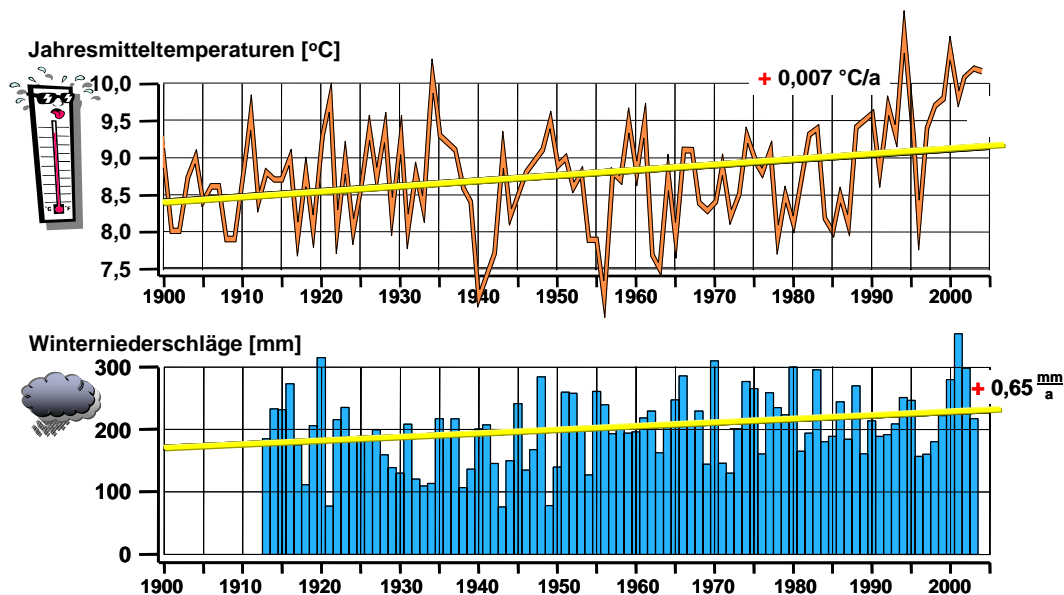
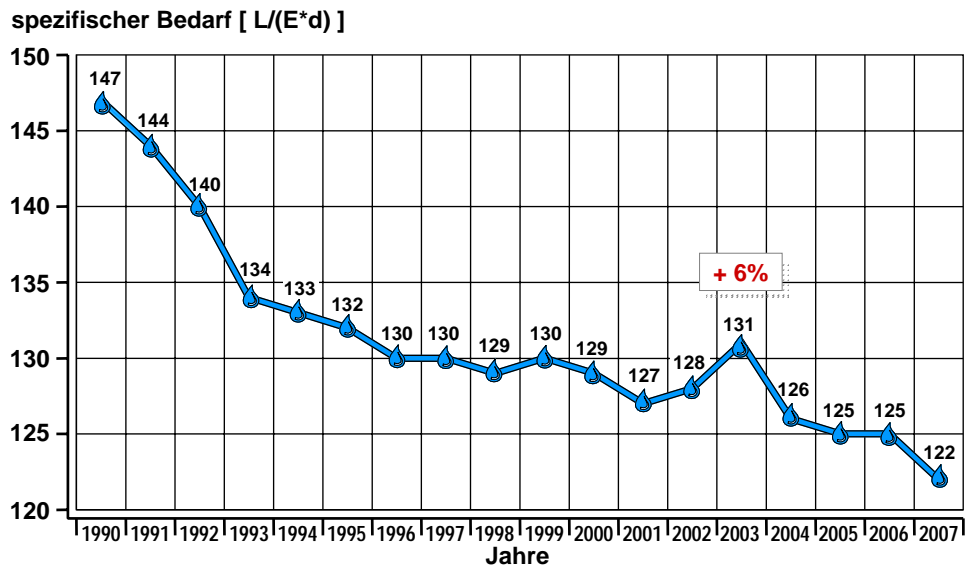


Abb. 2: Entwicklung der Jahresmitteltemperaturen Echterdingen und der Winterniederschläge im Wasserschutzgebiet Donauried-Hürbe (Klimastation Niederstotzingen)

## 2 Klimawandel und Wasserversorgung – einige Fakten

Die allgemein festzustellende Besorgnis, ob durch den Klimawandel das Rohwasserdargebot auch in Zukunft ausreichen wird, muss in den Kontext der Bedarfsentwicklung gestellt werden. So ist seit Anfang der 90er Jahre in Deutschland ein kontinuierlicher Rückgang des spezifischen Bedarfs pro Einwohner und Tag festzustellen, der aktuell mit 122 Liter im Bundesdurchschnitt sicher noch nicht den Endpunkt markiert. Bezogen auf die Jahresmittelwerte hat auch

der „Jahrhundertssommer“ 2003 nur zu einem Anstieg von plus 6% im Vergleich zum Jahr 2002 geführt.



Quelle: BDEW-Wasserstatistik des jeweiligen Jahres, bezogen auf Haushalte und Kleingewerbe

Abb. 3: Entwicklung der spezifischen Wassernutzung in Deutschland

Dies darf aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass mit länger andauernden klimawandelbedingten Hitze- und Trockenperioden der Spitzenfaktor, d. h. der Quotient aus maximaler Tagesbereitstellung im Vergleich zur Jahresdurchschnittsbereitstellung, deutlich ansteigt. Dieser hatte beispielsweise bei der Landeswasserversorgung im August 2003 einen Wert von 1,47 erreicht. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist auch, dass seit den 80er Jahren bei der Landeswasserversorgung die Spitzenabgabe auch in absoluten Zahlen ansteigt, sodass wiederum im August 2003 mit über 410.000 m<sup>3</sup> Tagesbereitstellung der höchste Wert in der annähernd 100-jährigen Unternehmensgeschichte der Landeswasserversorgung erreicht wurde.

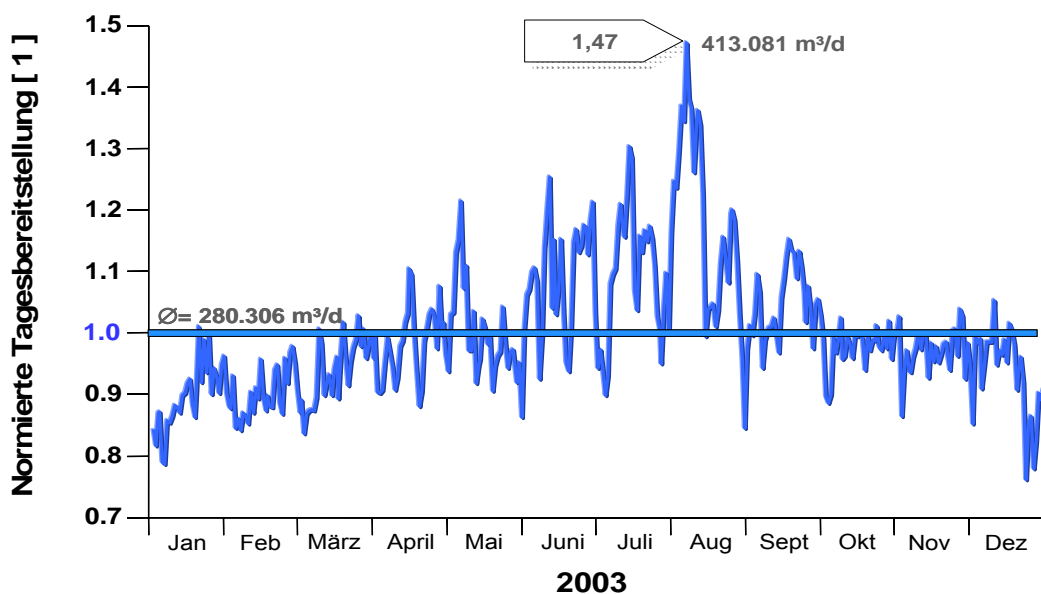


Abb. 4: Normierte Tagesbereitstellung der Landeswasserversorgung im Jahr 2003



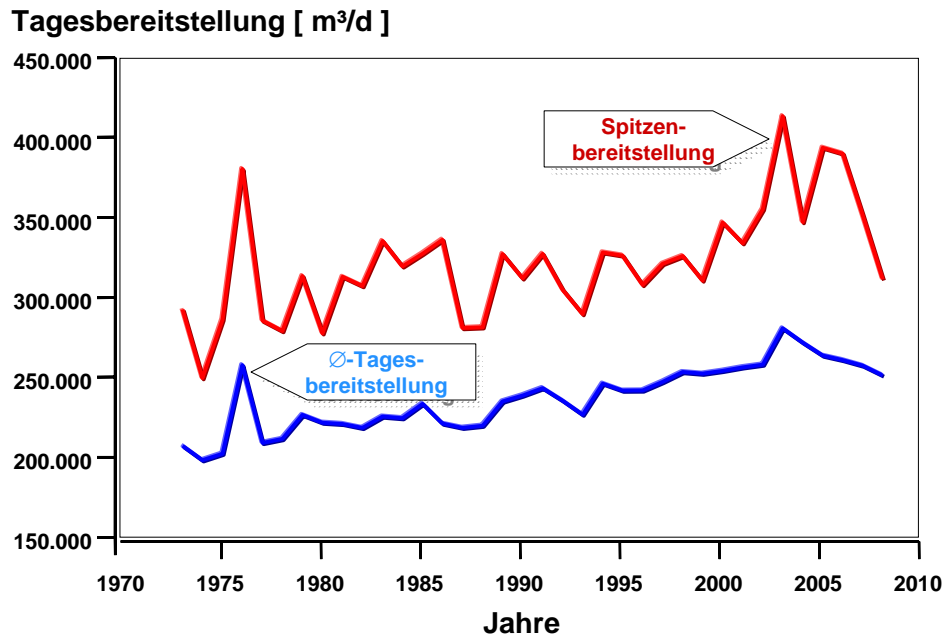


Abb. 5: Entwicklung von durchschnittlicher und maximaler Tagesbereitstellung bei der LW

Weiterhin bedeutsam ist, dass nicht nur in Baden-Württemberg zahlreiche Gemeinden auf „Versorgunginseln“ sitzen, d. h. über kein zweites Standbein der Wasserversorgung mittels Fern- oder Gruppenwasserversorgung verfügen. So ist es bereits im Jahr 2003 in einigen Gemeinden in Wassermangelgebieten Baden-Württembergs zu Versorgungsengpässen gekommen. Diese Situation wird sich durch den Klimawandel verschärfen und stellt den Vorrang der ortsnahen Wasserversorgung zumindest in Frage.

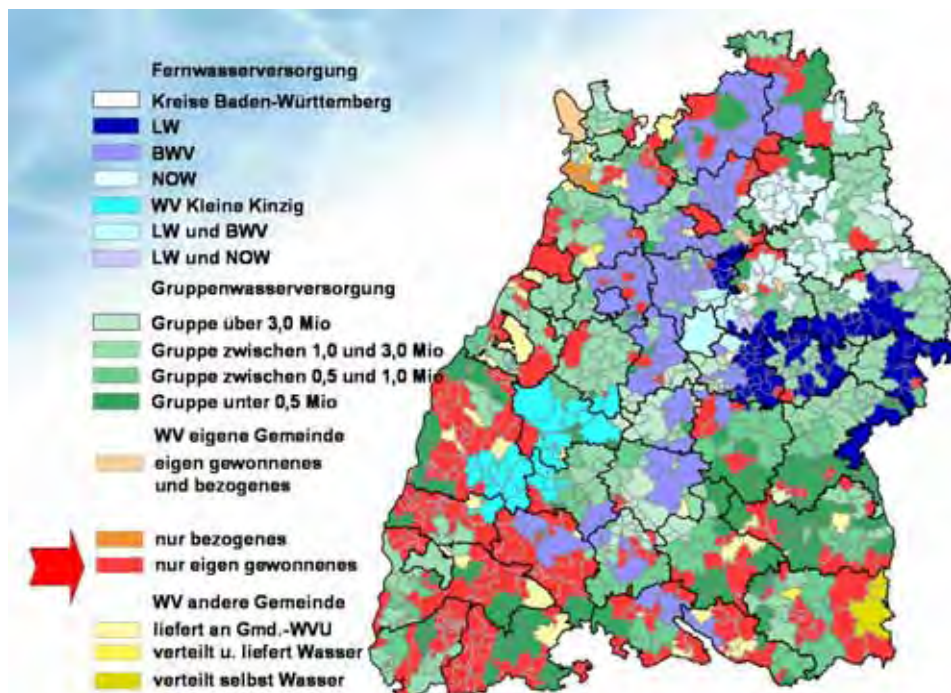


Abb. 6: Wasserbereitstellungsstruktur der Städte und Gemeinden in Baden-Württemberg

Des Weiteren ist der Klimawandel bereits heute schon mit einer abnehmenden Rohwasserqualität in Verbindung zu bringen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass trockenheiße Sommer mit den bisherigen Fruchtfolgen in der Landwirtschaft zu Ertragsausfällen führen. Dadurch verbleibt Stickstoffdünger, der im Hinblick auf eine „normale“ Bestandsentwicklung und Ertragsersparnis ausgebracht wurde, auf den Flächen, er kann aufgrund der Trockenheit von den Pflanzen nicht mehr aufgenommen werden. Gleichzeitig mineralisiert in hohem Maße organische Substanz im Boden, was die Nitratgehalte weiter erhöht, und zudem steigt der Schädlingsdruck, sodass der Pflanzenschutzmitteleinsatz zunimmt. Besonders augenscheinlich wird dies anhand der sog.  $N_{min}$ -Werte im Boden am Ende der Vegetationsperiode im Zusammenhang mit den Niederschlägen ab Ernte der Hauptfrucht bis zur  $N_{min}$ -Probenahme. Es ist mittlerweile statistisch belegt, dass je geringer die Grundwasserneubildung ab Ernte der Hauptfrucht, desto höher der  $N_{min}$ -Wert und damit desto höher die potenzielle Nitratbelastung durch das Grundwasser (vgl. Abb. 7).

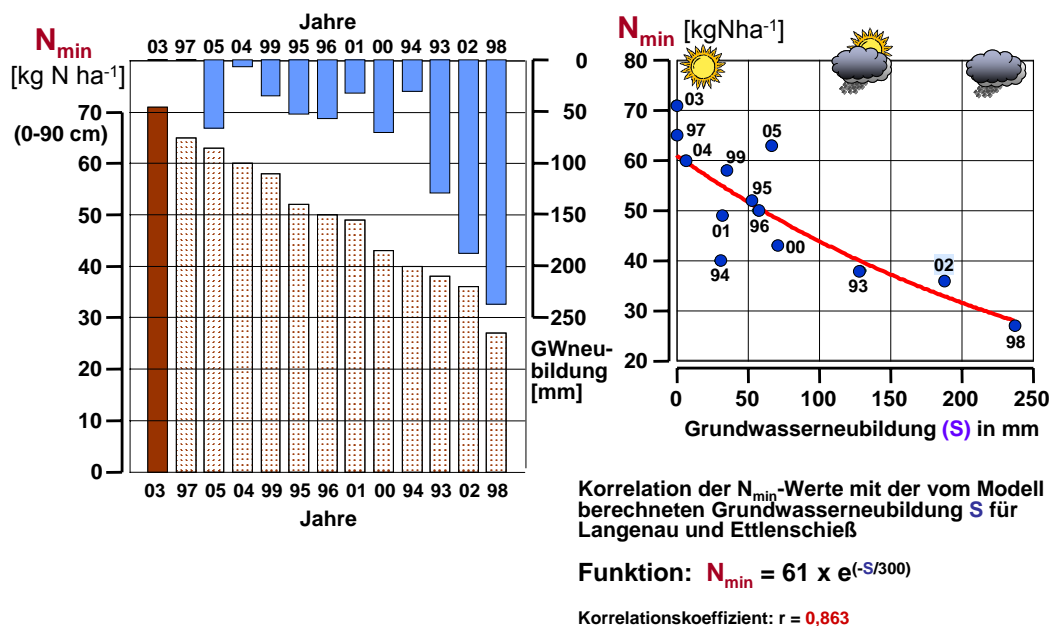


Abb. 7:  $N_{min}$ -Werte und Grundwasserneubildung ab der Ernte bis zur  $N_{min}$ -Beprobung

Weitere Beeinträchtigungen im Hinblick auf die Rohwasserqualität ergeben sich dort, wo durch verminderte Druckgradienten bei mehreren Grundwasserstockwerken höher mineralisierte, tiefer gelegene Wässer aufsteigen können. Ähnliche Phänomene ergeben sich durch Salzwasserintrusionen in Küstennähe. Aber auch bei Talsperren kann durch veränderte Temperaturprofile die Rohwasserqualität nachteilig beeinflusst werden.

Eine weitere potenzielle Störgröße liegt ebenfalls außerhalb der Sphäre der Wasserversorgung. So ist die Wasserversorgung auf eine zuverlässige Stromversorgung zwingend angewiesen. Hier waren aber bereits durch den Jahrhundertssommer 2003 erste Engpässe spürbar, als sich, bedingt durch die Niedrigwassersituation während bzw. nach dem Jahrhundertssommer, die Kühlwassersituation für die Kraftwerke zugespitzt hat und es in Europa ein zunehmendes Problem geworden ist, die Kraftwerksleistung innerhalb des Verbundnetzes an den richtigen Ort zu bringen, was sich seinerseits wieder in stark ansteigenden Strompreisen im letzten Quartal des Jahres 2003 niederschlug.

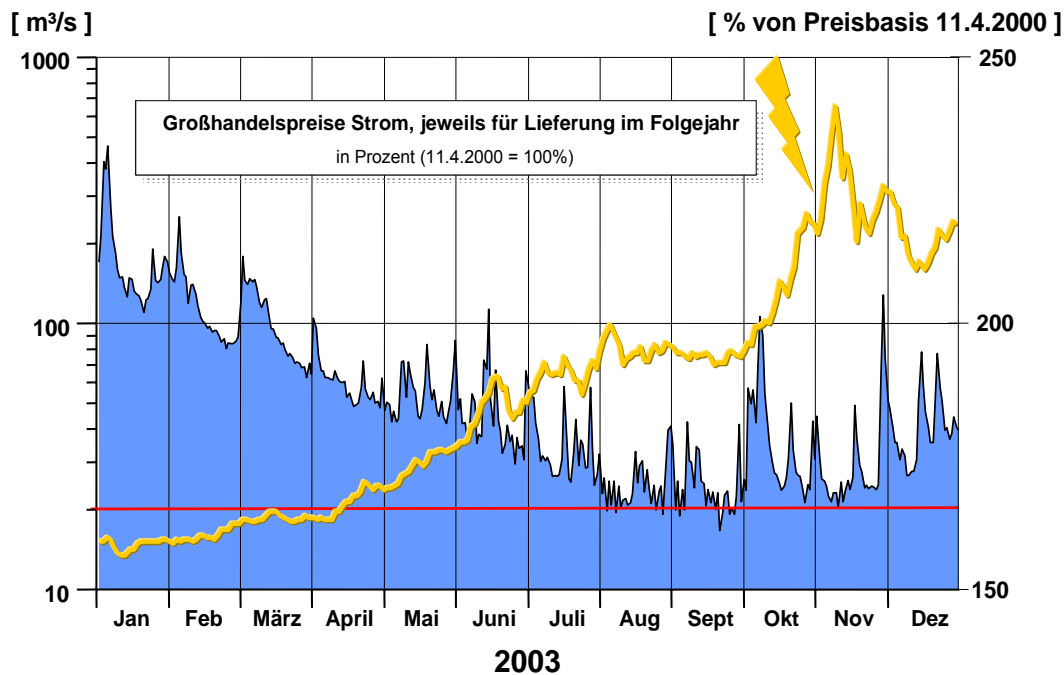


Abb. 8: Abfluss des Neckars bei Lauffen und Forwards zur Strombeschaffung im Jahr 2003

Anhand der geschilderten Systemgrößen dürfte deutlich geworden sein, dass es sich um ein komplexes System handelt, wenn über Klimawandel und Wasserversorgung gesprochen wird. Nachfolgend soll dieses System näher beleuchtet werden.

### 3 Systemanalyse „Klimawandel und Wasserversorgung“

Die Abbildung 9 zeigt, welche Größen auf das System Wasserversorgung wirken und welchen Bereichen diese zuzuordnen sind. Um die Interaktion der Systemgrößen zu erkennen, empfiehlt sich eine Systemanalyse [1]. Die nach Vester durchgeführte Systemanalyse fragt zunächst, wie eine Veränderung einer Systemgröße auf die anderen Systemgrößen wirkt. Dies kann semi-quantitativ durch die Vergabe von Bewertungsziffern von 0 (keine Auswirkungen) bis 3 (sehr hohe Auswirkungen) geschehen. Anhand einer Matrix (vgl. Abb. 10) werden die Systemgrößen in Zeilen und Spalten gegenübergestellt und abgefragt: „Wie wirkt eine Veränderung beispielsweise der Systemgröße 1 auf die Systemgrößen 2, 3, 4, 5 usw.“



Abb. 9: Klimawandel und Wasserversorgung: Welche Größen wirken im System?

Als ein erstes Ergebnis erhält man die sog. „Aktivsumme“ der Systemgrößen. Aktivsumme bedeutet: „Ändere ich diese Variable, so tut sich im System allerhand.“ Dem steht die sog. „Passivsumme“ gegenüber, die ihrerseits ausdrückt: „Ändert sich im System irgendetwas, so reagiert diese Variable sehr stark darauf.“

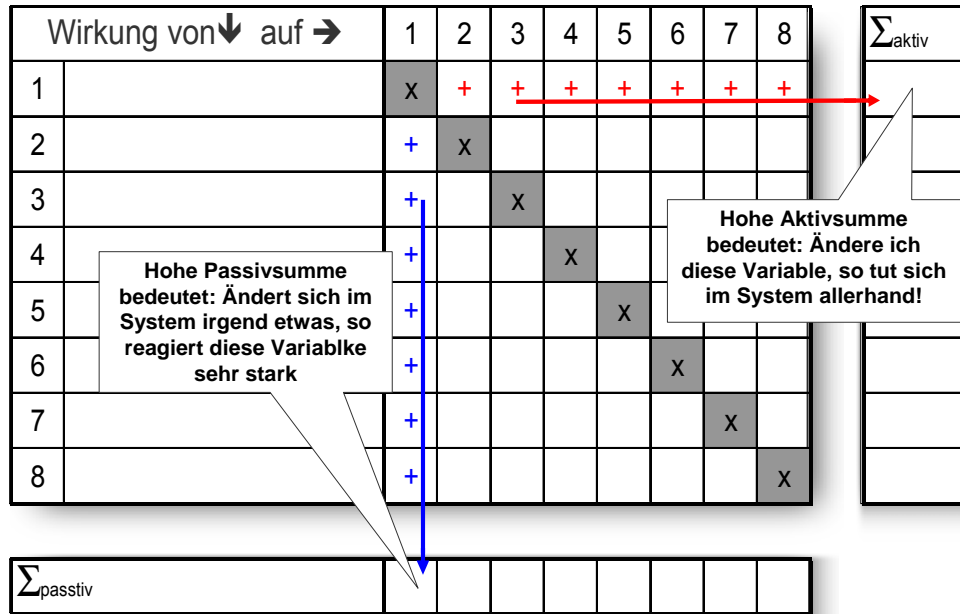


Abb. 10: Die Einflussmatrix hilft das System besser zu verstehen (nach VESTER [1])

Der erste Schritt besteht somit im Zusammentragen der relevanten Systemgrößen, der zweite Schritt in der Analyse mittels der sog. Einflussmatrix. Die Auswertungen zeigen, dass längere Trockenperioden die Zunahme von heißen Tagen und insgesamt höhere Amplituden der hydrologischen Größen die stärksten Einflussfaktoren darstellen. Sehr stark reagieren die Rohwasserqualität und die Versorgungssicherheit auf die Veränderung der erstgenannten Größen. Diese besagen, ob eine Variable „viel“ im System zu sagen hat. Die Analyse ergab, dass die Zunahme der heißen Tage und längere Trockenperioden hier die herausragenden Systemgrößen im Hinblick auf die Wasserversorgung sind.

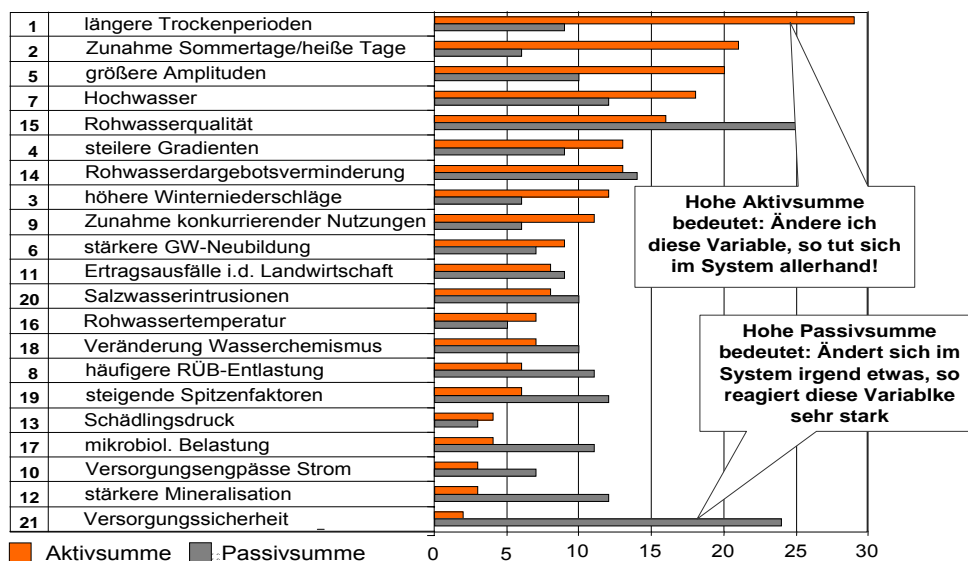
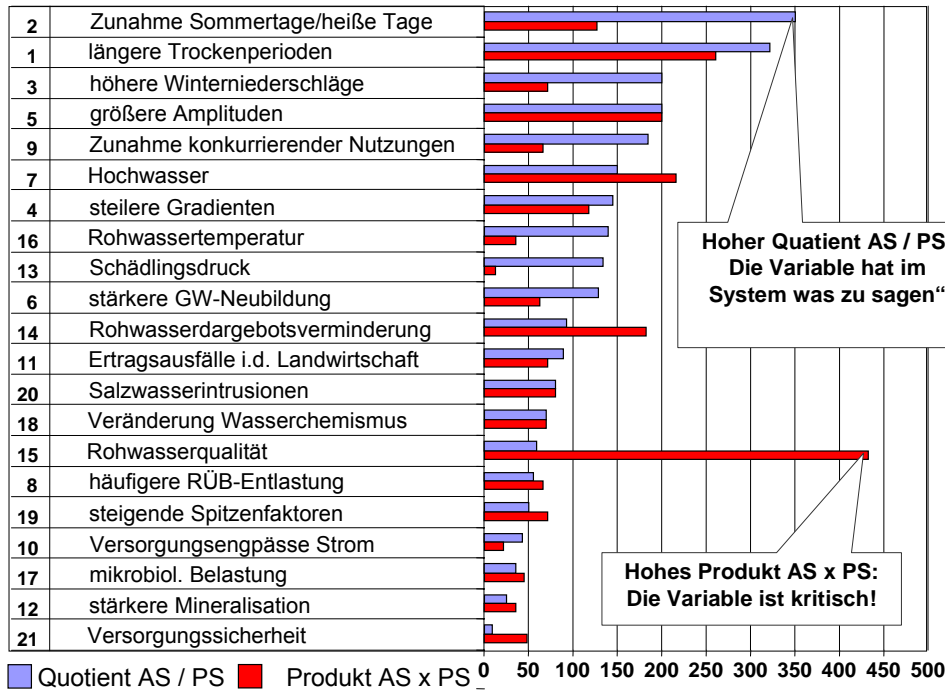


Abb. 11: Aktiv- und Passivsumme der Systemgrößen

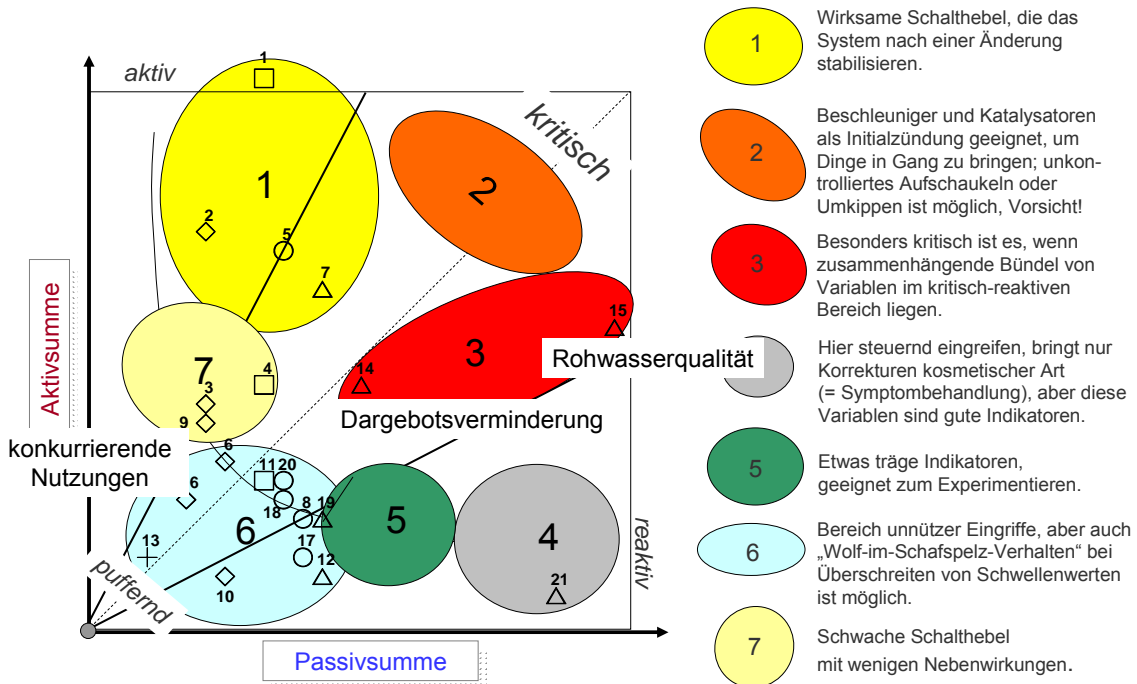


Hoher Quotient AS / PS:  
Die Variable hat im System was zu sagen“

Hohes Produkt AS x PS:  
Die Variable ist kritisch!

Abb. 12: Einflussindex der Systemgrößen

Weiterhin kann analysiert werden, wie „kritisch“ die einzelnen Variablen sind. Die geeignete Kennzahl hierfür ist das Produkt aus Aktivsumme mal Passivsumme. Die hier dominierenden Systemgrößen müssten besonders im Auge behalten werden. Für das System „Wasserversorgung und Klimawandel“ sind dies die Rohwasserqualität, Hochwassersituationen und Dargebotsminderungen.



- 1 Wirksame Schalthebel, die das System nach einer Änderung stabilisieren.
- 2 Beschleuniger und Katalysatoren als Initialzündung geeignet, um Dinge in Gang zu bringen; unkontrolliertes Aufschaukeln oder Umkippen ist möglich, Vorsicht!
- 3 Besonders kritisch ist es, wenn zusammenhängende Bündel von Variablen im kritisch-reaktiven Bereich liegen.
- 4 Hier steuernd eingreifen, bringt nur Korrekturen kosmetischer Art (= Symptombehandlung), aber diese Variablen sind gute Indikatoren.
- 5 Etwas träge Indikatoren, geeignet zum Experimentieren.
- 6 Bereich unnützer Eingriffe, aber auch „Wolf-im-Schafspelz-Verhalten“ bei Überschreiten von Schwellenwerten ist möglich.
- 7 Schwache Schalthebel mit wenigen Nebenwirkungen.

Abb. 13: Analyse des Systems „Klimawandel und Wasserversorgung“

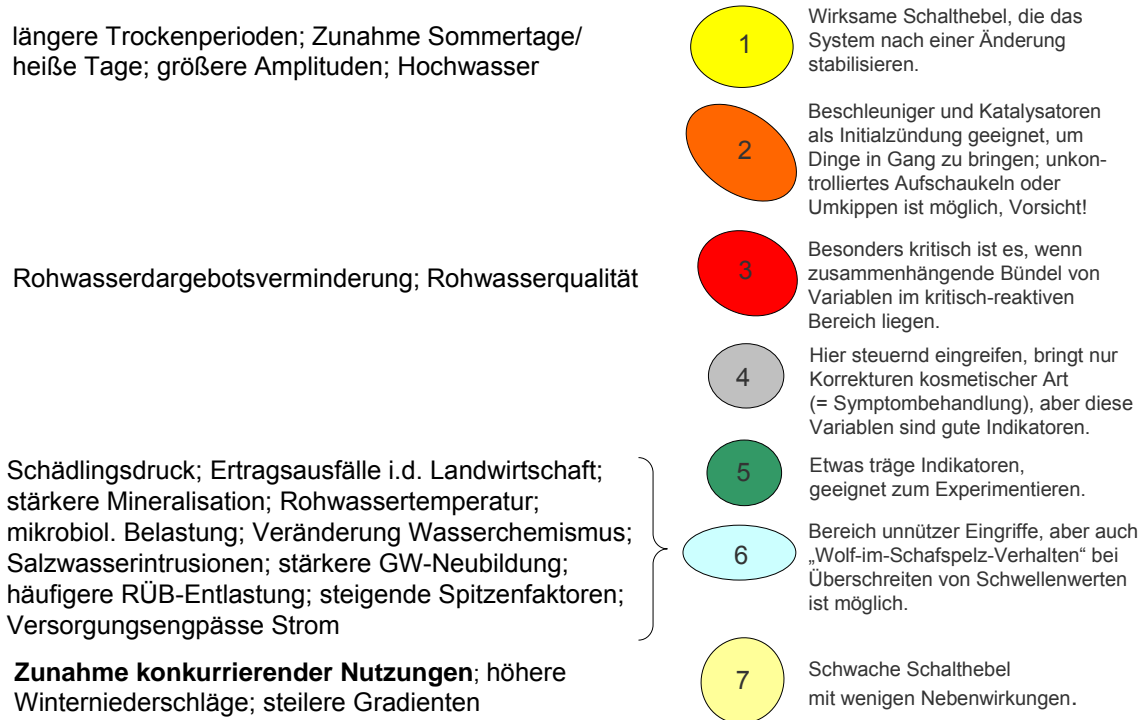


Abb. 14: Analyse des Systems „Klimawandel und Wasserversorgung“

Die Ergebnisse der Auswertungen lassen sich graphisch in einem Gesamtüberblick stellen, in dem man die Passiv- und Aktivsummen der Systemgrößen gegeneinander aufträgt (vgl. Abb. 11). Daran wird Folgendes deutlich: Die Treiber im System sind die hydrologischen Größen. Kritische Parameter sind die Dargebotsminderung und die Rohwasserqualität. Es ist weiterhin feststellbar, dass die meisten Größen puffernd wirken bzw. reaktiven Charakters sind. Bemerkenswert ist, dass als einziger Schalthebel die konkurrierenden Nutzungen verbleiben. Nur hier kann aktiv Einfluss genommen werden auf nachteilige Veränderungen durch den Klimawandel im Hinblick auf die Wasserversorgung.

Die Systemanalyse liefert somit die Grundlagen, wo besonders kritische Größen vorzufinden sind und wo die besonderen Risiken im Hinblick auf die Wasserversorgung im Zusammenhang mit dem Klimawandel auszumachen sind. Dies ist die Basis für eine dann notwendige Risikoanalyse.

#### 4 Risikoanalyse und Anpassungsstrategien

Mit dem Klimawandel sind somit zusätzliche Gefährdungen für die Wasserversorgung verbunden. Wäre dies nicht so, bräuchte man sich mit dem Thema nicht auseinanderzusetzen. Diese Gefährdungen können einer Risikoanalyse unterzogen werden. Bei der Risikobetrachtung geht es also um die genannten Gefährdungen und die Zuordnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten gemäß der Definition des Risikos als Eintrittswahrscheinlichkeit mal Schadenshöhe. Diese grundsätzliche Definition lässt sich auch auf die Auswirkungen des Klimawandels anwenden. Hierzu ist es keinesfalls notwendig, dass die Schadenshöhe und die Eintrittswahrscheinlichkeit exakt quantifiziert werden. Vielmehr genügt es bereits, Schadenshöhe und Eintrittswahrscheinlichkeit zueinander in Relation zu stellen, um auch hier wieder die dominanten Effekte herauszufiltern. Geeignet hierfür ist eine Darstellung in Form einer Risikomatrix. Hierzu werden die Eintrittswahrscheinlichkeit auf der Abszisse und die Schadenshöhe auf der Ordinate aufgetragen.

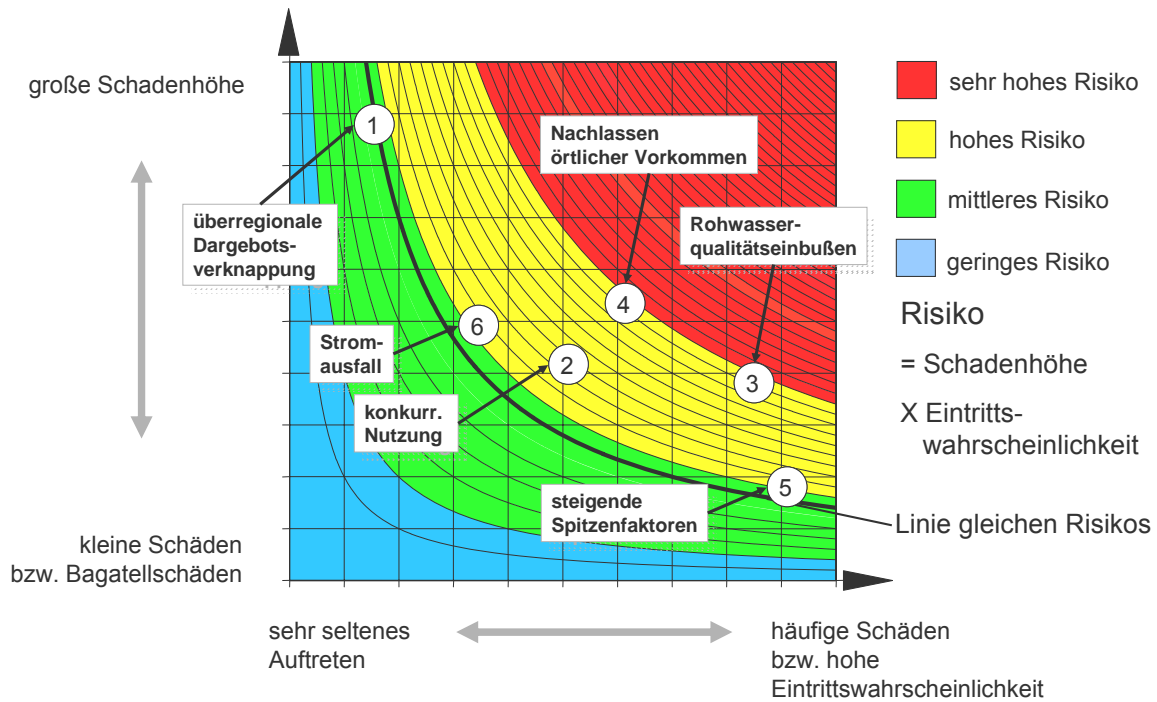


Abb. 15: „Klimawandel und Wasserversorgung“ - Risikoanalyse

Nach der Risikoidentifikation und Risikobewertung erfordert das Risikomanagement die Risiko- steuerung und -kontrolle. Das heißt, jedem Risiko müssen geeignete Maßnahmen zugeordnet werden, wie dieses beherrscht bzw. gesteuert werden kann. Für die Wasserversorgung bedeutet dies, dass den einzelnen Risiken konkrete Maßnahmen in der Sphäre der Wasserversorgung oder auch darüber hinaus zugeordnet werden müssen. Die einzelnen Maßnahmen gehen aus der nachstehenden Tabelle hervor.

Tab. 1: „Klimawandel und Wasserversorgung“ – Risiken und Anpassungsmaßnahmen

Risiken	Maßnahme
<b>Wassergewinnung/Ressourcenschutz</b>	
überregionale Dargebotsverknappung	GW-Modelle für Bewirtschaftungstools Abschätzen der Ressourcenverfügbarkeit Ertüchtigen GW-Fassungen Verbund
konkurr. Nutzung	Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung
Rohwasserqualitätseinbußen	angepasste Fruchtfolgen, Vorrang Wasserschutz, Ertüchtigen der Aufbereitung
Nachlassen örtlicher Vorkommen	Verbund
<b>Wasserförderung/-verteilung/-speicherung</b>	
steigende Spitzenfaktoren	ausreichende Förderkapazitäten Redundanzen in Transportnetzen erhöhen Verbund ausreichendes Behältervolumen
Ausfall Stromversorgung	Notstromversorgung; Verbund

So erfordert die überregionale Dargebotsverknappung, dass Modelle für Bewirtschaftungstools entwickelt werden. Darin muss die Ressourcenverfügbarkeit abgeschätzt werden können. Auch gilt es, Grundwasserfassungen zu ertüchtigen und den Verbund auszubauen. Hinsichtlich konkurrierender Nutzungen ist der klare Vorrang der öffentlichen Trinkwasserversorgung einzufordern. Nachdem die Landwirtschaft den stärksten Einfluss auf eine abnehmende Rohwasserqualität nehmen wird, sind hier angepasste Fruchtfolgen auch im Interesse der Landwirtschaft zu entwickeln und eine zusätzliche Belastung durch Nitrat- und Pestizideinträge in die Rohwasserressourcen zu vermeiden. Ganz grundsätzlich muss aber der Wasserschutz Vorrang vor anderen Nutzungen genießen.

Als Ultima ratio kann auch eine Ertüchtigung der Aufbereitung in Frage kommen. Von besonderer Bedeutung ist auch eine weitere Vernetzung der Wasserversorgungsinfrastruktur, Stichwort „Verbund“. Aber auch von der rechtlichen Seite müssen die notwendigen Rahmenbedingungen, beispielsweise durch ausreichende Wasserrechte, geschaffen werden. Steigende Spitzenkapazitäten erfordern ausreichende Förder- und Transportkapazitäten in Transportnetzen sowie entsprechende Redundanzen.

Von besonderer Bedeutung ist die sichere Stromversorgung der Trinkwasserversorgung in Trockenzeiten. Die Anpassungsstrategien für die Bereiche Wassergewinnung und –aufbereitung, Wasserförderung sowie Wassertransport und –speicherung gehen aus der nachfolgenden Tabelle hervor.

Tab. 2: Anpassungsstrategien Wassergewinnung und Wasseraufbereitung, Wasserförderung, Wassertransport und –speicherung

Bereich	Maßnahme
Wassergewinnung und Wasseraufbereitung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Monitoring anpassen</li> <li>➤ Strategien zur Ressourcennutzung auf Basis von Grundwassermodellrechnungen entwickeln</li> <li>➤ Grundwasserfassungen ertüchtigen</li> <li>➤ Größere Saughöhen berücksichtigen (NPSH-Werte!)</li> <li>➤ höhere Rohwassertemperatur → geringere Viskosität → höhere Filterspülgeschwindigkeiten</li> <li>➤ Abnehmende Rohwasserqualität und „neue“ Mikroorganismen → Vollaufbereitung für alle Rohwässer</li> <li>➤ Ausreichende Desinfektionskapazität vorhalten</li> </ul>
Wasserförderung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Anpassen der Pumpensätze an den Spitzenbedarf</li> <li>➤ Anpassen der Pumpensätze zur energiewirtschaftlichsten Wasserförderung</li> <li>➤ Wasserförderung im Verbund</li> <li>➤ Aufbau von Redundanzen bei der Stromversorgung</li> <li>➤ Aufbau einer Notstromversorgung</li> </ul>
Wassertransport und -speicherung	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ ausreichendes Speichervolumen vorhalten</li> <li>➤ Ertüchtigen der Transportleitung zur Spitzenbedarfsdeckung</li> <li>➤ Erhöhen der Redundanzen („Rückwärtsversorgung“)</li> <li>➤ Schaffen von Verbundmöglichkeiten auf Ebene der Fernwasserversorger und darunter</li> </ul>





## 5 Zusammenfassung

Die Zunahme von längeren Hitze- und Trockenperioden, der Winterniederschläge aber auch der Hochwässer sowie steilere Gradienten und größere Amplituden der hydrologischen Größen sind die wesentlichen klimabedingten Störgrößen auf das System „Wasserversorgung“. Besonders stark werden die Rohwasserqualität, das Rohwasserangebot und die Versorgungssicherheit beeinflusst werden. Es ist aber auch mit Veränderungen bei der mikrobiologischen Belastung und des Wasserchemismus, mit Stromversorgungsengpässen sowie einem Ansteigen der Spitzenfaktoren zu rechnen.

Es ist abzuklären, wie die genannten Einfluss- und Systemgrößen auf die einzelnen Prozessstufen der Wasserversorgung wirken. Bereits heute sind steigende Spitzenfaktoren bei gleichzeitig rückläufiger durchschnittlicher Wasserabgabe, Einflüsse auf die Rohwasserqualität nach trockenheißen Sommern (z.B. 2003) sowie Veränderungen der Rohwasserqualität, insbesondere bei Oberflächengewässern durch Niedrigwasser- und Hochwasserereignisse festzustellen. Aufgrund der Verknüpfungen und Rückkoppelungen ist mit weiterreichenden Veränderungen im Gesamtsystem zu rechnen, weswegen sich auch die Anpassungsstrategien auf alle Komponenten der Wertschöpfungskette Wasserversorgung erstrecken müssen.

Nachdem Veränderungen häufig auch an Investitionen mit langfristigen Wirkungen gekoppelt sind, ist ein Risikomanagement aufzubauen, das auch die genannten klimabedingten Einflüsse berücksichtigt. Im Bereich Rohwassermanagement gilt es durch ein gezieltes und modifiziertes Monitoring die qualitativen und quantitativen Veränderungen des Rohwassers zu erfassen. Die Ressourcenbewirtschaftung erfordert verlässliche Szenarien für Extremsituationen (Hochwasser- bzw. Niedrigwasserhältnisse), um daraus Betriebsreglements abzuleiten, z. B. durch die Fortentwicklung regionaler Grundwassermodelle auf der Basis der vorliegenden Prognosen zum Klimawandel. Die Anpassungsstrategien im Bereich der Wasserförderung bedingen, dass einerseits die höheren Spitzenfaktoren sicher bedient werden können, andererseits eine energieoptimierte Bereitstellung den insgesamt rückläufigen Wasserbedarf berücksichtigt. Die Landeswasserversorgung (LW) hat hier beispielsweise vor wenigen Jahren das Hauptförderwerk im Wasserwerk Langenau grundlegend erneuert und mit neuen energieoptimierten Pumpensätzen ausgestattet. Den größten Stressfaktor im Bereich Wassertransport und -verteilung erkennt man in den zunehmenden Spitzenfaktoren. Um den Spitzenbedarf über längere Zeit für die prognostizierten Hitzeperioden sicher bereitstellen zu können, sind Redundanzen in den Netzen erforderlich. Besonders wichtig sind leistungsfähige und vermaschte Transportleitungen. Insbesondere auf der Ebene unterhalb der Fernwasserversorgung wird der Verbund zwischen Fernwasserversorgung, Gruppenwasserversorgung und ortsnaher Wasserversorgung eine wieder zunehmende Bedeutung erlangen. Versorgungsinseln müssen dringend mit einem zweiten Standbein ausgestattet werden.

Mögliche neue Krankheitserreger im mikrobiologischen Artenspektrum des Rohwassers, höhere Nitrateinträge nach Ertragsausfällen in der Landwirtschaft und höhere Spritzmittelbelastungen durch zunehmenden Schädlingsdruck stellen neue Anforderungen an den Rohwasserschutz und die Trinkwasseraufbereitung. Die LW hat daher den Bau einer weiteren Aufbereitungsstufe im Wasserwerk Langenau beschlossen, so dass jeder Tropfen LW-Wasser einer Vollaufbereitung unterzogen werden kann.

Ausgangspunkt der Anpassungsstrategien in der Wasserversorgung ist in jedem Fall eine Risikoanalyse, aus der hervorgehen muss, mit welchen investiven bzw. managementorientierten Maßnahmen die zusätzlichen, klimabedingten Risiken beherrscht werden können. Investive Maßnahmen müssen aufgrund der längeren Umsetzungsphasen und im Hinblick auf die notwendigen Finanzierungsmöglichkeiten bereits heute geplant werden. Die LW hat das Szenario „Klimawandel“ frühzeitig in die Risikobetrachtung mit aufgenommen und bedeutende investive Maßnahmen bereits auf den Weg gebracht.

## 6 Literatur

- [1] Vester, Frederic: Die Kunst, vernetzt zu denken, Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität; Der neue Bericht an den Club of Rome, dtv-TB, 2008
- [2] bdew; Kurz-Stellungnahme zum „Weißbuch „Anpassung an den Klimawandel: ein europäischer Aktionsrahmen“ KOM(2009)147 vom 1. April 2009; BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin, 2009
- [3] Haakh, Frieder: Klimawandel und Wasserversorgung – Auswirkungen auf das Wasserdargebot, die Wasserqualität und die Versorgungssicherheit; Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft; Band 192 Oldenbourg Industrieverlag GmbH, 2009; ISBN 978-3-8356-3152-6



## Auswirkungen des Klimawandels auf hydrologische Extreme

András Bárdossy  
Universität Stuttgart

Wasserwirtschaftliche Entscheidungen sind zum Großteil nicht von Mittelwerten, sondern von Häufigkeiten der Extreme abhängig. Die derzeitigen Klimavorhersagen deuten auf eine Änderung der mittleren Temperatur und des Niederschlags hin, aber diese sind nicht so gravierend, dass dadurch grundsätzliche Änderungen in der Wasserwirtschaft notwendig wären. Vorhersagen über die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Extreme sind sehr unsicher, die Konsequenzen von veränderten Hoch- und Niedrigwasserhäufigkeiten auf die wasserwirtschaftliche Planung jedoch schwerwiegend. Aussagen über Veränderungen im Extremwertverhalten sind deshalb von großer Bedeutung.

Zwei Vorgehensweisen sind möglich, um das zukünftige Extremwertverhalten abzuschätzen: die Analyse und Fortführung der Trends aus der Vergangenheit oder die Nutzung von Klimamodellergebnissen. Das Erkennen von Änderungen und das Weiterführen von Trends ist sowohl ein statistisches wie auch ein praktisches Problem. Nur ein Teil der Änderungen können als statistisch signifikant nachgewiesen werden und da in statistische Analysen kein physikalisches Wissen eingeht, es ist fragwürdig, ob diese Trends in die Zukunft extrapoliert werden können. Klimamodelle weisen systematische Fehler beim Niederschlag auf und können Extremwerte nicht gut wiedergeben. Stochastische Downscalingmodelle bieten eine Möglichkeit, um die Vorteile der beiden Ansätze zu kombinieren.

In diesem Beitrag werden Trendanalysen von Extremen für ausgewählte Einzugsgebiete vorgestellt. Eine für hydrologische Zwecke entwickelte Wetterlagenklassifikation dient als Grundlage für das Downscaling von regionalen Klimamodellen (RCM). Das Prinzip dieser Methode und deren Anwendung für drei verschiedene RCMs wird für das Rheineinzugsgebiet vorgestellt. Eine Kombination von Trendanalyse und Downscaling wird anhand der Erzeugung von hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen (NIEDSIM-KLIMA) diskutiert.

*(Anmerkung der Redaktion: Aus nachvollziehbaren persönlichen Gründen war es Herrn Prof. Bárdossy nicht möglich, eine Langfassung zu erstellen. Die dargestellten Folien entsprechen dem auf dem 4. KLIWA-Symposium gehaltenen Vortrag.)*

### Einführung

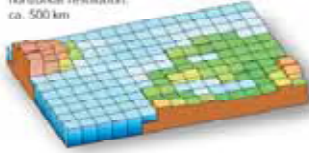
---

- Planung: für die Zukunft
- Wie wird die Zukunft ?
- Beobachtungen aus der Vergangenheit
- Zukunft = Vergangenheit (statistisch)
- Wird die Zukunft so wie die Vergangenheit es war?
- Änderungen:
  - Beobachtet:
    - Warme Jahre
    - Warme nasse Winter
  - Vorhergesagt
    - Klimamodelle
- Konsequenzen ?

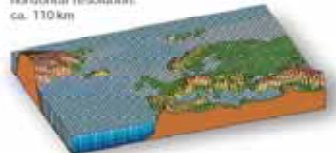


## Regionale Klimamodelle

**Model T21**  
horizontal resolution:  
ca. 500 km



**Model T106**  
horizontal resolution:  
ca. 110 km



## Regionale Klimamodelle

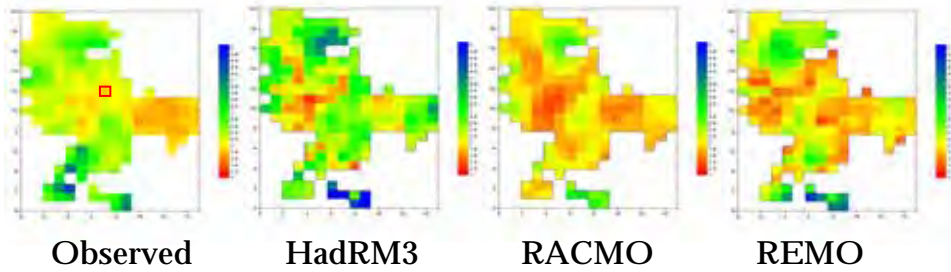
- RCMs:
  - HadRM3 (Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Met office UK),
  - RACMO2 (Royal Netherlands Meteorological Institute, KNMI)
  - REMO (Max-Planck-Institute für Meteorologie, MPI)



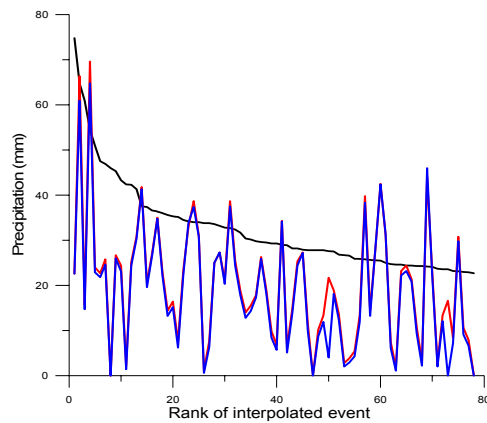
## Rhein Einzugsgebiet: 172 blocks 25 km x 25 km



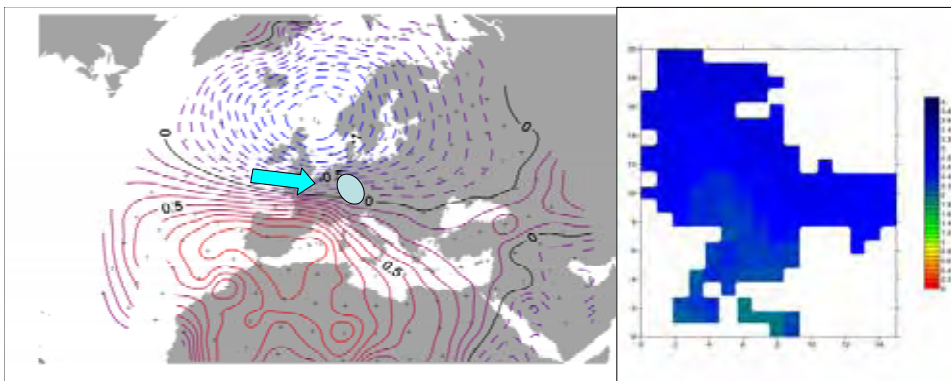
### Mittlerer Tagesniederschlag für 1961-80



### Größte Ereignisse 9 Blöcke - Vergleich

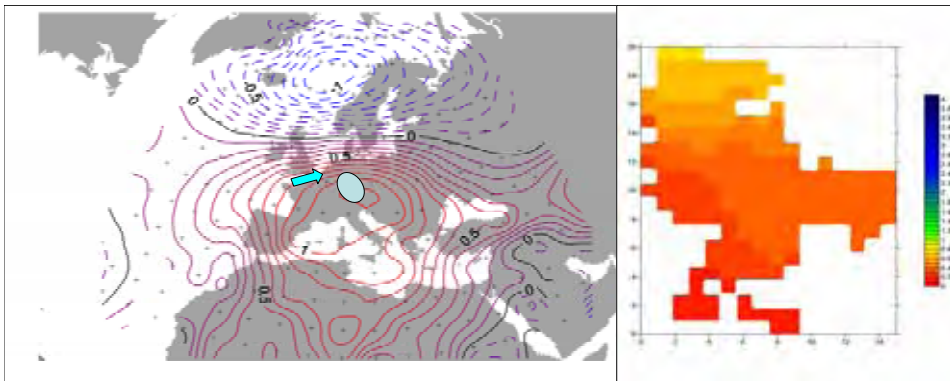


### CP18 & Niederschlagsverteilung: 1961-80

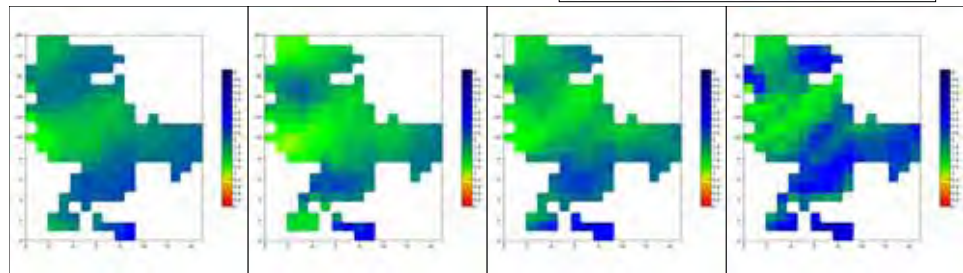
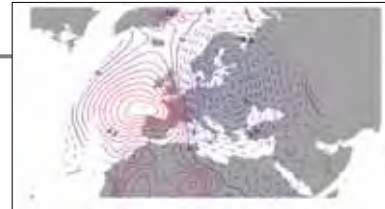




### CP20 & Niederschlagsverteilung: 1961-80



### Mittlerer Tagesniederschlag CP07: 1961-80



Observed

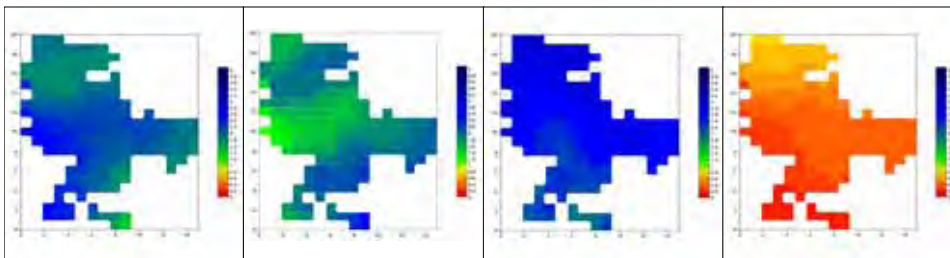
HadRM3

RACMO

REMO



### Feuchteindex 1961-80: Beobachtungen



CP06

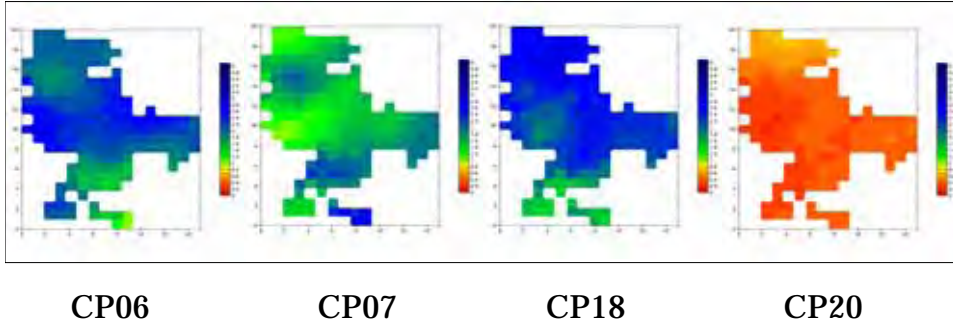
CP07

CP18

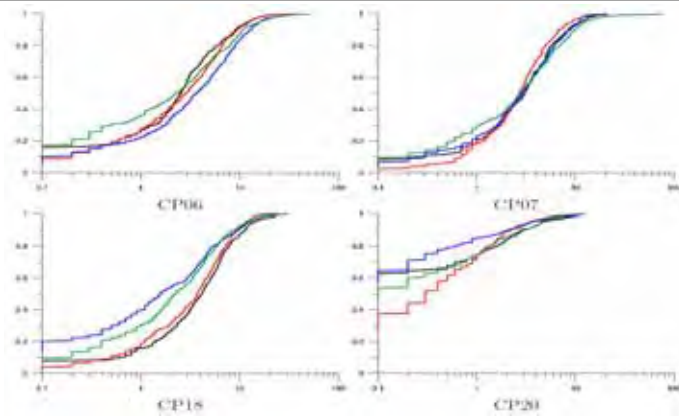
CP20



**Feuchteindex 1961-80:  
HadRM3**



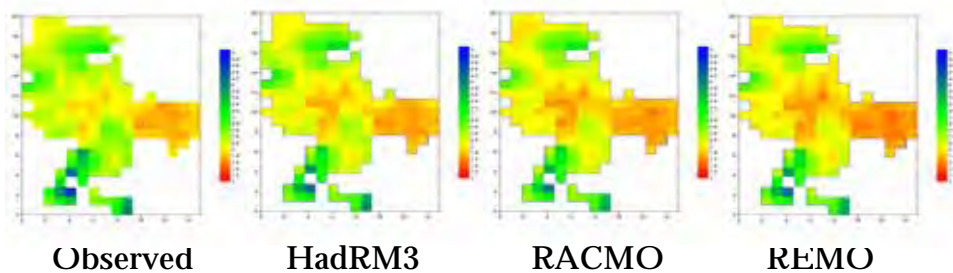
**Verteilung der Niederschläge: Block 104: 1961-80**



Observed ■ HadRM3 ■ RACMO ■ REMO ■



**Mittlerer Tagesniederschlag für 1961-80  
nach Downscaling**





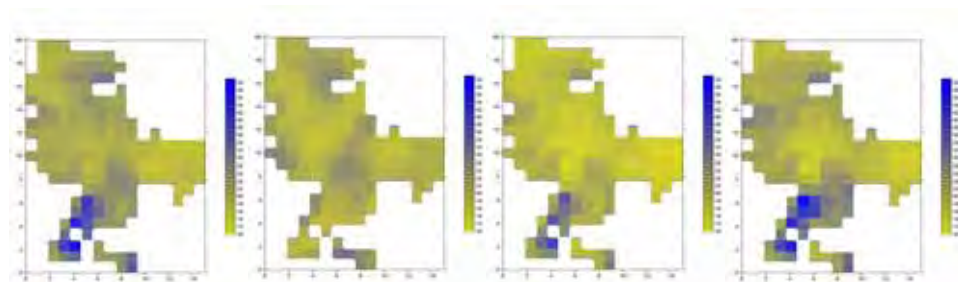


**Gebietsniederschlag: Jahresmaxima  
Validierung (1981-1990)**

	Observed	Hadley		RACMO		REMO	
		Uni-versal	CP-based	Uni-versal	CP-based	Uni-versal	CP-based
Rhine	<b>19.5</b>	17.2	17.7	17.1	<b>17.8</b>	16.7	17.1
Neckar	<b>22.9</b>	20.4	20.7	21.0	<b>21.9</b>	20.6	20.7
Main	<b>20.2</b>	19.1	19.0	18.5	<b>19.3</b>	18.2	18.3



**Mean Maximum Winter Rainfall: RACMO: validation  
period: 1981-90**

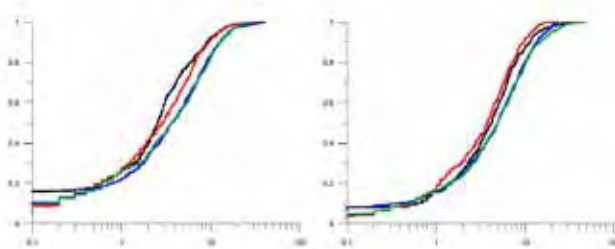


Observed RACMO (raw) RACMO (univ) RACMO (CP)



**CP abhängige Niederschlagsverteilung 2021-2050**

Observed ■ HadRM3 ■ RACMO ■ REMO ■

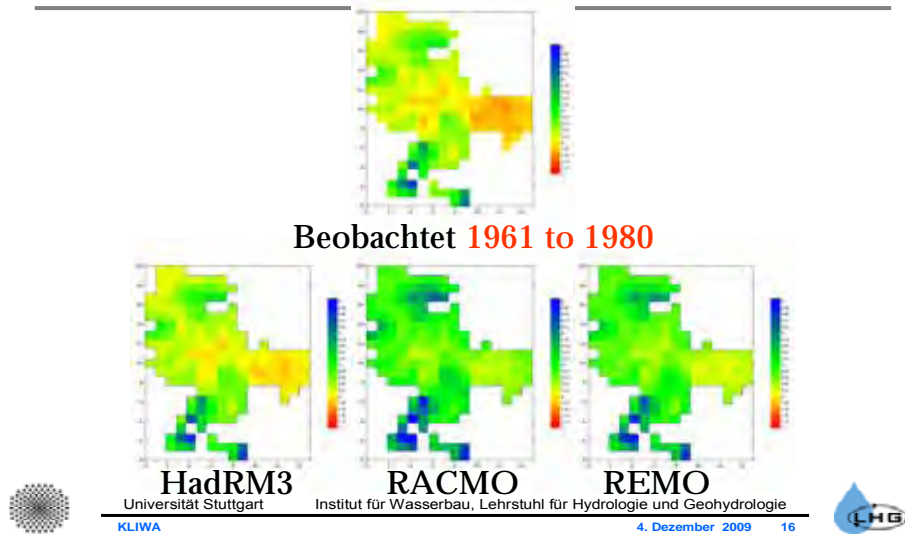


CP06

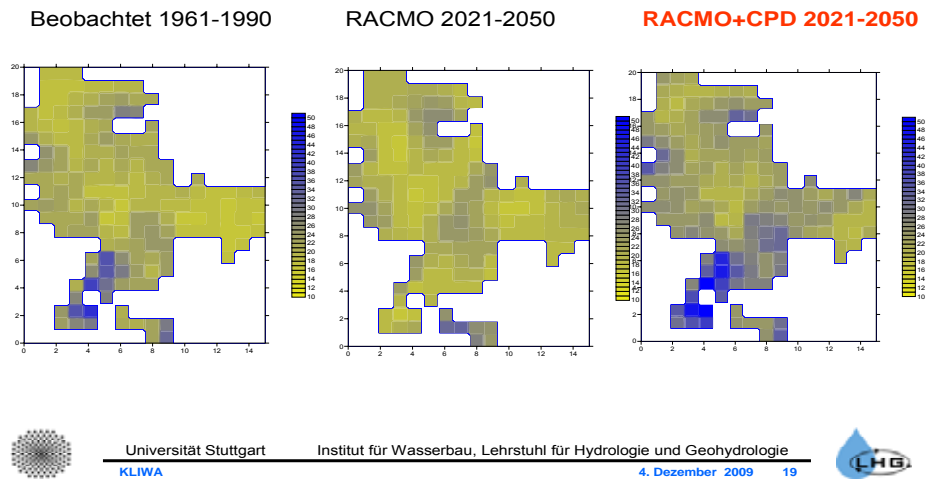
CP18



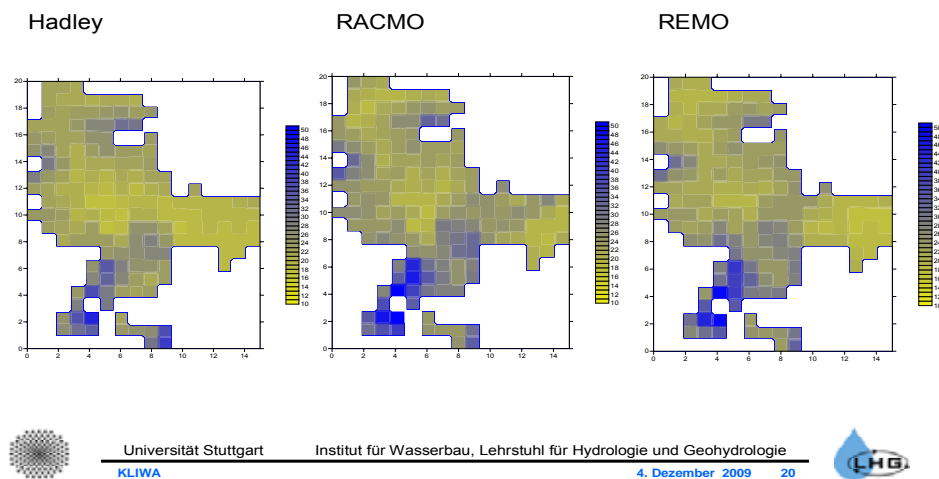
### CP-basiertes Downscaling RCMs: 2021-2050



### Mittelwert der Tagesextreme (Winter)



### Mittlere Tagesextreme 2021-2050 (Winter)



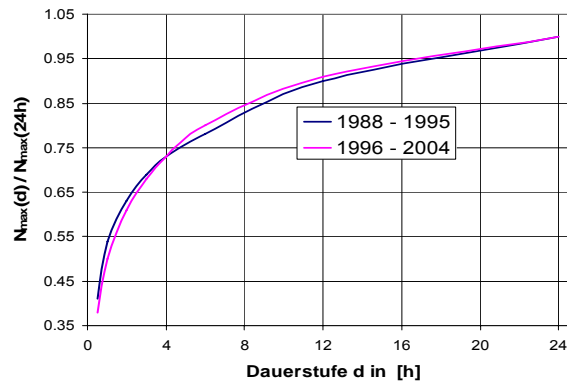


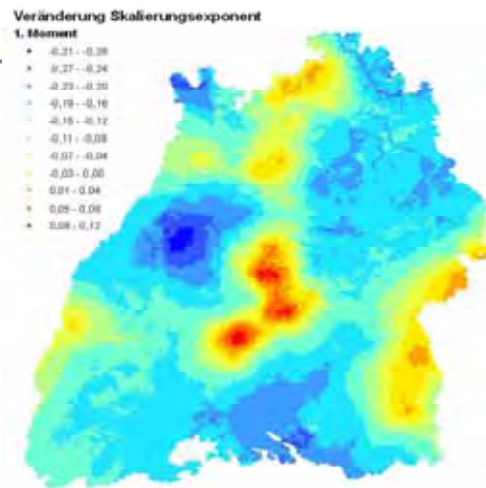
### Extremniederschlag

- Kürzere Dauerstufen:
  - 5 min, 1h, 3h
  - Stadthydrologie
  - Kleine Einzugsgebiete
- Unterschiedliche räumliche Skalen
- Niesim KLIMA --- LUBW



### Dauerstufen – beobachtete Änderungen





### Zusammenfassung

- Klimaänderung führt zu Änderung der Extreme
- Regionale Modelle können den Niederschlag nicht genau nachbilden
- CP basierte Quantil-Quantil Transformation ermöglicht
  - die systematische Korrektur der Verteilungen
  - die unterschiedliche Änderung des Niederschlagsverhaltens
- Realistische Szenarios – auf RCM Skala
- Skalierung auf andere Skalen für Bemessungszwecke möglich und notwendig
- Alle Aussagen nur so gut wie die Klimamodelle



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!





## Klimawandel und Bodenerosion

Raimund Kohl, Stefanie Groh  
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

### 1 Einleitung

Böden sind als Lebensgrundlage für den Menschen wie auch als zentraler Bestandteil der Ökosysteme in vielfältiger Weise vom Klimawandel betroffen. In diesem Geschehen sind Böden in ihrer Funktion als Kohlenstoffspeicher und –senke von besonderer Bedeutung. Klimaänderungen wirken sich direkt auf den Wasser- und Stoffkreislauf, Bodenbildungsprozesse sowie Erosionsprozesse aus, wodurch die natürlichen Bodenfunktionen beeinträchtigt werden können (Bundesregierung, 2008). Das Schutzgut Boden stellt daher ein eigenes Handlungsfeld in der „Deutschen Anpassungsstrategie“ (DAS) dar.

Das KLIWA Forschungsvorhaben „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ betrachtet die regional unterschiedliche Veränderung des potenziellen Erosionsrisikos durch die projizierte Änderung der Niederschlagshäufigkeit und –intensität. Neben der unmittelbaren Schädigung der Böden und deren natürlichen Funktionen durch verstärkte Erosion muss auch mit sogenannten „off site Schäden“ wie Überschwemmungen oder Gewässer-eutrophierung gerechnet werden (vgl. auch UBA, 2008).

### 2 Forschungsvorhaben „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“

Ziel des KLIWA-Forschungsvorhabens „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ ist die Abschätzung des gegenwärtigen und zukünftigen potenziellen Erosionsrisikos an Modellstandorten in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz. Auf Grundlage der am Einzelstandort ermittelten Erosionsszenarien sollen für definierte Zeiträume Aussagen zur regionalen Betroffenheit abgeleitet und letztendlich Vorsorgeempfehlungen zum künftigen Erosionsschutz ausgearbeitet werden. Das Projekt gliedert sich in drei Stufen:

- Stufe I: Konzept- und Machbarkeitsstudie
- Stufe II: Erosionsmodellierung
- Stufe III: Bewertung, Ableitung gebietsbezogener Aussagen, Handlungsempfehlungen

In der ersten Stufe des Projekts werden in Form einer Machbarkeitsstudie

- aktuell und in absehbarer Zeit verfügbare Daten von Niederschlagsmessstationen in den beteiligten Ländern sowie regionale Klimamodelle und Downscalingverfahren auf ihre räumliche und zeitliche Auflösung analysiert,
- regionale Klimamodelle mit sowohl statistischem wie auch physikalisch-dynamischem Ansatz, ausgewählte Downscalingverfahren sowie Erosionsmodelle auf ihre Eignung bewertet und
- potenzielle Modellstandorte mit umfangreichen Boden- und Standortkennwerten für die Erosionsmodellierung ermittelt.

Da Erosionsschäden maßgeblich durch einzelne Starkregenereignisse verursacht werden und kleinräumig variieren, müssen die Niederschlagssummen in einer möglichst hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung (z.B. 1 km<sup>2</sup>, 10 min) vorliegen. Gleiches gilt für Erosionsmodelle, wenn individuelle Erosionsereignisse abgebildet werden sollen.



### 3 Stufe I: Konzept- und Machbarkeitsstudie

Im Verlauf der ersten Projektstufe wurden regionale Klimamodelle hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung von Niederschlagsereignissen untersucht, um durch die Kopplung mit geeigneten Erosions- und Abflussmodellen die Auswirkungen auf das Erosions- und Abflussgeschehen in kleineren bis mittleren Gewässereinzugsgebieten abschätzen zu können. Zur exemplarischen Modellierung und Evaluierung der Ergebnisse wurden Modellstandorte in den einzelnen Bundesländern identifiziert. Das Konzept beschreibt Ansätze für Übertragungsverfahren, mit welchem die exemplarischen Modellierungen zu flächendeckenden Aussagen und Handlungsstrategien führen können. Die Ausarbeitung der Konzeptstudie erfolgte unter Federführung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit und des Ministeriums für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz durch das Konsortium geomer GmbH, Bodengut: Büro für nachhaltige Bodennutzung und Süddeutsches Klimabüro.

#### 3.1 Klimamodelle

Im Rahmen der Konzeptstudie wurden sowohl statistische als auch dynamische regionale Klimamodelle auf ihre Eignung für eine Kopplung mit einem Erosionsmodell untersucht. Die folgende Tabelle fasst die wichtigsten Kenndaten der untersuchten Klimamodelle zusammen:

Tab. 1: Kenndaten der untersuchten Modelle

Kenndaten	dynamisch		statistisch		
	COSMO-CLM 4.8	REMO 5.7	NiedSim/ NiedSim-Klima	WETTREG 3.0.2.2	STAR 2.1
Simulationszeitraum	1971-2000 2011-2040	1971-2000 2021-2050	1961-1990 2010-2030*	1961-2100	1961-2055
Emissions-szenario	A1B	A1B, A2, B1	A1B, A2, B1	A1B, A2, B1	A1B, A2, B1
Räumliche Auflösung	7 x 7 km	10 x 10 km	1 km	Stationsdichte	Stationsdichte
Zeitliche Auflösung	1 h	1 h	1 h / 5 min	1 d**	1 d
Simulationsgebiet	Mitteleuropa	Mitteleuropa	Baden-Württemberg***	Deutschland	Deutschland

\* im Evaluierungsprozess

\*\* für ein Projekt wurden Daten in 5 min Auflösung erzeugt (Michael, 2008)

\*\*\* nur NiedSim-Klima

Statistisch-empirischen Modelle haben den Vorteil, dass sie aus statistischen Beziehungen abgeleitet sind und so, bei Vorliegen langjähriger Messreihen, die zuverlässigeren Ergebnisse liefern. Durch eine hohe zeitliche Auflösung sind sie gut in der Lage das Klima an einem bestimmten Punkt wiederzugeben. Für die Verwendung in der Bodenerosionsmodellierung allerdings müssten die Ergebnisse eines Standorts auf die Fläche übertragen werden. Vor allem in stark gegliedertem Gelände bringt dies eine zusätzliche Unsicherheit. Auch wenn alle verfügbaren Messstationen herangezogen werden, reicht die Dichte der Stationen in kleineren Einzugsgebieten in der Regel nicht aus.

Physikalisch-dynamische Modelle liefern Ausgabedaten, die für eine bestimmte Fläche repräsentativ sind. Wenn der Gitterpunktstand eines Modells soweit verringert werden kann, dass viele Flächen die örtlichen Eigenschaften gut wiedergeben, ist das Modell für die Bodenerosi-

onsmodellierung geeignet. Zudem sind sie durch die direkte Abbildung atmosphärischer Prozesse in der Lage, zukünftig neu auftretende Extrema zu simulieren (Jacob, 2009).

Für den maximalen Gitterpunktabstand wird 1 km mit einem maximalen Ausgabezeitschritt von 15 Minuten vorgeschlagen. Diese hohe räumliche Auflösung lässt sich nur mit einem nicht-hydrostatischen Modell erreichen. Aus dem Grund eignet sich COSMO-CLM am besten für die Kopplung an die Bodenerosionsmodellierung. Die gegenwärtige offizielle Modellversion der CLM-Community ist das COSMO-CLM 3. Die Anwendung des Modells erstreckt sich heute auf Zeithorizonte von Jahrhunderten und auf eine räumliche Auflösung von 7 bis 50 km in verschiedenen Regionen der Welt. Das COSMO-CLM 4 befindet sich derzeit im Evaluationsprozess ([www.clm-community.eu](http://www.clm-community.eu)). Das zeitliche Ausgabeintervall der Parameter beträgt beim COSMO-CLM derzeit 1 Stunde. Ein kürzerer Ausgabezeitschritt als 1 Stunde ist technisch problemlos möglich, derzeit aber noch nicht realisiert worden. Die neueste Version 4.8 ist ebenfalls nicht auf eine höhere Auflösung ausgelegt. Der Ergebnisse müssen zunächst überprüft werden. Zudem bedingt eine derart hohe räumliche und zeitliche Auflösung bei einer Simulationsdauer von 30 Jahren einen enormen Rechenaufwand. Die Alternative zu einer Simulation mit höherer Auflösung ist ein statistisch-dynamisches Downscaling mit dem COSMO-CLM. Dabei könnten aus den Simulationen des Laufes mit 7 km horizontaler Auflösung alle Wetterlagen ausgewählt werden, die möglicherweise Bodenerosionsbestimmende Niederschlagsereignisse beinhalten. Diese werden anschließend separat in höherer Auflösung neu berechnet. Dabei könnte eine horizontale Gitterweite von 1 km und ein Ausgabezeitschritt von 15 Minuten realisiert werden.

### 3.2 Erosionsmodelle

Für die Ermittlung eines geeigneten Erosionsmodells wurden sowohl empirische als auch physikalisch-prozessbasierte Erosionsmodelle auf Basis von Handbüchern, Literaturstudien und Expertenbefragungen inhaltlich und technisch untersucht und bewertet.

Empirische Modelle sind relativ einfach in ihrer Anwendung, berechnen jedoch nur langfristige mittlere Sedimenteinträge. Erosion wird in der Regel durch Starkniederschlagsereignisse ausgelöst und empirische Erosionsmodelle können den Abtrag von Einzelereignissen, die Herkunftsflächen des Bodenabtrags sowie die durch die Erosion verursachten off-site-Schäden nicht abschätzen. Dagegen berücksichtigen physikalisch-basierte Modelle alle Teilprozesse der Bodenerosion. Sie weisen meist eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung auf und eignen sich für die Abschätzung von on- und off-site-Schäden und damit für die Maßnahmenplanung. Nachteile der physikalischen Modelle sind der hohe Datenbedarf, der mit Fehlern und Ungenauigkeiten behaftet sein kann, und der zumeist sehr hohe rechentechnische Aufwand (DVWK 1999, Hebel 2003, Scherer 2008).

Die Vor- und Nachteile der Modelltypen sind in Tabelle 2 aufgeführt:

Tab. 2: Vor- und Nachteile von empirischen und physikalisch-basierten Erosionsmodellen

	Empirische Modelle	Physikalische Modelle
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- relativ wenige Modellparameter notwendig</li> <li>- einfache Anwendbarkeit</li> <li>- Abschätzung von on-site-Schäden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- höhere räumliche und zeitliche Auflösung</li> <li>- Einzelereignis</li> <li>- Berechnung von Erosion, Transport und Deposition</li> <li>- Räumliche Übertragbarkeit</li> <li>- Abschätzung von on- und off-site-Schäden</li> </ul>
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> <li>- langjähriger Mittelwert</li> <li>- schlechte Übertragbarkeit</li> <li>- keine Berechnung von Transport und Deposition</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- hohe Anzahl an Eingabeparametern</li> <li>- meist sehr hoher rechentechnischer Aufwand</li> </ul>
Beispiele	RUSLE, ABAGflux, AGNPS	CATFLOW-SED, EROSION-3D, LISEM, EUROSEM, KINEROS, WEPP





Neben dem Modelltyp spielen die räumliche und zeitliche Auflösung bei der Modellauswahl eine entscheidende Rolle. Bei räumlich ungegliederten Bodenerosionsmodellen, d.h. Modelle, die nicht alle drei Dimensionen des Raumes wiedergeben können, werden für das gesamte Einzugsgebiet statistische Mittelwerte der räumlich variablen Parameter angenommen. Bei gegliederten Modellen wird das Einzugsgebiet in mehrere Teilgebiete oder Hydrotope (Teilgebietsmodell) oder in Raster (Rastermodell) eingeteilt, so dass differenzierte Eingabedaten für die einzelnen Teilgebiete verwendet werden können. Der Vorteil von rasterbasierten Modellen ist ihre Verarbeitungsmöglichkeit in einem Geographischen Informationssystem (GIS), und außerdem lassen sich lineare Erosionserscheinungen (Fließwege, Abflussverteilung und Erosionsrinnen) modellieren und Satellitendaten (vor allem für die Vegetation) integrieren.

Die zeitliche Dimension wird durch Ereignis- und Kontinuumsmodelle ausgedrückt. Vor allem bei Starkniederschlags- sowie Hochwasserereignissen ist es wichtig, dass das Modell Einzelergebnisse, aber auch Ereignissequenzen widerspiegeln kann, da diese das Erosionsgeschehen, die Erfassung von kurzzeitigen Off-Site-Schäden wie der Schadstoffaustrag in Oberflächengewässer sowie den Wasserhaushalt einzelner Hochwasserereignisse nachbilden können. Dafür müssen für jedes einzelne Ereignis die jeweiligen Eingangsdaten angegeben werden. Die Simulation verläuft im Minuten- oder Stundenintervall. Bei Kontinuumsmodellen beträgt die zeitliche Auflösung einen Tag oder ein Jahr. Sie sind vor allem für die Simulation unterschiedlicher Szenarien geeignet und werden bei der Maßnahmenplanung sowie bei der Erfassung langjähriger On-Site-Schäden eingesetzt (Klisch 2003).

Nach einer ersten Einordnung anhand einer Bewertungsmatrix (siehe Tabelle 3) wurden die vier physikalisch basierten Modelle LISEM, EROSION 3D, WEPP und CATFLOW-SED im Detail betrachtet. Als Ergebnis werden für den hier beschriebenen Anwendungsfall die Modelle LISEM und EROSION 3D empfohlen. Die Nutzung des Modells CATFLOW-SED ist für praktische Fragestellungen aufgrund des hohen Datenbedarfs nur eingeschränkt möglich (Scherer, 2008). Die Anwendung erfordert derzeit noch die Unterstützung der Modellentwickler (Scherer, 2009). Das Modell WEPP benötigt ebenfalls einen hohen Dateninput (DVWK, 1999). Die Modelle LISEM und EROSION 3D wurden fachlich und inhaltlich als gleichwertig beurteilt.

### 3.2.1 Erosion und Landschaftswasserhaushalt

Der Erosionsprozess ist sehr eng an die verschiedenen Komponenten des Wasserhaushalts gekoppelt. Im Rahmen unterschiedlicher Wasserhaushaltsmodelle (für Hoch- wie auch für Niedrigwasser) liegen bereits vielfältige Daten und operationell erstellte Informations-Layer vor (vor allem aus LARSIM für alle drei beteiligten Bundesländer). Für Erosionsmodelle werden Parameter benötigt, die auch in entsprechenden Wasserhaushalts- bzw. Niederschlag-Abfluss-Modellen Eingang finden.

Von besonderer Bedeutung ist dabei die Ermittlung der Vorbodenfeuchte. Die Erosionsmodelle reagieren relativ sensibel auf diesen Parameter und eine Abschätzung ohne vorherigen Modelllauf ist schwierig und macht die Modellergebnisqualität sehr von der Erfahrung der Modellierer abhängig. Wird die Vorbodenfeuchte aus LARSIM für die Nachrechnung vergangener Ereignisse eingesetzt hat man eine quasi-standardisierte und nachvollziehbarere Grundlage für die Festlegung der Modell-Startbedingungen.

Offene Fragen entstehen im Bereich der unterschiedlichen räumlichen Auflösung. Während die Wasserhaushaltsmodelle in der größten Detaillierung Rasterflächen von 1 km<sup>2</sup> oder vergleichbare unregelmäßige Einzugsgebietseinheiten auflösen, rechnen Bodenerosionsmodelle mit Rastern von 100 m<sup>2</sup> und kleiner. Eine 1:1-Übertragung der erhaltenen Werte ist daher nicht möglich, sondern es müssen entsprechende Übertragungsverfahren entwickelt werden.

Zwischen Wasserhaushalts- und Klimamodellen ist die Auflösung vergleichbar. Einige der physikalischen Klimamodelle (inkl. COSMO CLM) verfügen über ein eigenes Bodenmodul, das den entsprechenden Energie- und Wasseraustausch zwischen Boden und Atmosphäre regelt. Hier ist ein direkter Vergleich berechneter Parameter denkbar. Ein Vergleich vor allem der Bodenfeuchte sollte in jedem Fall durchgeführt werden.

Tab 3: Bewertungsmatrix der Erosionsmodelle

	Gewichtung	ABAFIUX	AGNPS	ANSWERS	CATFLOW-SED	CREAMS	EPIC	EROSION 2D	EROSION 3D	EUROSEM	KINEROS	LISEM	OPUS	RUSLE	SWAT	USLE	WATER/SDEM	WEPP/GeoWEPP	Wunschmodell
<b>Modeleigenschaften</b>																			
Modelansatz	3	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	2	0	0	2	2
Zeitspanne	2	0	1	2	2	2	0	1	2	2	2	1	1	0	0	0	0	2	2
Maßstab	2	1	2	2	2	1	2	1	2	2	2	2	2	1	2	1	2	2	2
bearbeitbare Gebietsgröße	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	1	2	0	2	2	2	1	1	2
Räumliche Auflösung	2	2	2	2	1	2	0	2	2	2	2	1	1	0	1	1	2	2	2
Zeitliche Auflösung	2	0	0	2	2	1	0	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	2	2
Erosionsminderungsmaßnahmen	3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
punktueller Retentionsmaßnahmen	2	2	2	2	0	2		2	2	2	2	2	2	0	2	0	2	2	2
Anzahl der Niederschlagsstationen	2	2	2	2	2	0		2	2	2	2	2	2		2				2
Vertikale Differenzierung	2	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		2				2
Prozesse USLE unabhängig	2	0	0	0	2	0	0	2	2	2	2	0	0	0	0	0	0	2	2
Aufwand der Parameterbestimmung	3	2	0	1	0	0	0	2	1	0	0	0	0	2	0	2	1	1	2
Betriebssystem	1	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2
Open source	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	2
GIS-Schnittstelle	3	2	2	2	2	0	2	2	2	2	2	2	0	0	2	0	2	2	2
Handbuch/Dokumentation	2	0	2	1	0	0	1	2	2	1	1	1	1	1	2	1	1	2	2
Benutzerfreundlichkeit	2	2	1	2	0		2	2	2	0		2			2		1	2	2
Weiterentwicklung	3	2	2	0	2	0	2	2	2	0	2	2	0	2	2	0	2	2	2
Support	2	2	1	1	1		1	2	0	0	1	1							2
Kosten	2	1	2	2	1		2	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<b>Summenwert Modelleigenschaften</b>		53	51	62	57	30	43	63	76	60	62	72	35	31	59	27	44	70	88
<b>Übertrag Summenwert verfügbarer Output</b>		1	16	7	15	9	8	8	12	13	7	19	5	3	8	1	7	11	24
<b>Gesamtsumme (absolut)</b>		54	67	69	72	39	51	71	88	73	69	92	40	34	67	28	51	81	112
<b>Gesamtbewertung (relativ zu Wunschmodell)</b>		48%	60%	62%	64%	35%	46%	63%	79%	65%	62%	82%	36%	30%	60%	25%	46%	72%	100%

Bei den nicht gekennzeichneten Feldern liegen zum bisherigen Zeitpunkt keine Informationen vor



### 3.3 Modellstandorte

Auf den Modellstandorten sollen in der zweiten Projektphase exemplarische Modellierungen des Klimas und der Niederschlagsreihen sowie der Bodenerosion mit Wasserabfluss durchgeführt werden. Um die letztendlich ausgewählten Modelle betreiben, evaluieren und ggf. kalibrieren zu können, ist eine detaillierte Datengrundlage erforderlich. Die Anforderungen hierfür sind wiederum von den gewählten Modellen abhängig.

Eine Analyse von 25 potenziellen Modellstandorten hat ergeben, dass die Standorte „Scheyern“ in Bayern und „Weiherbach“ in Baden-Württemberg aufgrund der Datenbasis und der zumindest phasenweise hochwertigen Niederschlagsaufzeichnungen als Referenzstandorte in der Gruppe der Modellstandorte für die weiteren Untersuchungen in der Projektphase II am besten geeignet sind. In Rheinland-Pfalz ist kein Standort mit vergleichbaren Voraussetzungen verfügbar. Allerdings könnten die Standorte „Mertesdorf“ und „Rodenbach“ innerhalb der Gruppe von Modellstandorten als Vergleichsstandorte zwecks Verfahrensprüfung unter anderen Standortbedingungen genutzt werden, da hier Informationen und Voraussetzungen vorliegen, die gut für die Untersuchungen zur Übertragbarkeit nutzbar sind.

### 3.4 Ausblick

Für die Erosionsmodellierung in kleinen Einzugsgebieten lassen sich prinzipiell zwei Modellierungsoptionen unterscheiden:

- Modellierung mit einem empirischen Modell (z.B. ABAG)

Empirische Modelle benötigen nur eine geringe Rechnerkapazität sowie wenige Input-Daten und erlauben so eine schnellere landesweite Übertragbarkeit der Ergebnisse. Nachteilig wirkt sich aus, dass keine durch Starkregen verursachten, erosiven Einzelereignisse abgebildet werden können, zumal diese das Ergebnis entscheidend determinieren. Weiterhin können die Veränderungen im Erosionsprozess nicht identifiziert werden, wodurch die Maßnahmenplanung erschwert wird (siehe auch Kapitel 3.2).

- Modellierung mit physikalischen Modellen

Physikalische Modelle erlauben die Abbildung von Extremereignissen. Dem steht der große Bedarf an Bodeneingangsdaten gegenüber, wodurch eine landesweite Übertragung erschwert wird.

Da für die Abbildung der Effekte des Klimawandels auf die Bodenerosion insbesondere die Extremereignisse von Interesse sind, wird im Folgenden zunächst nur die Modellierung mit physikalischen Modellen betrachtet.

Die dafür vorgeschlagenen Arbeitsschritte umfassen:

- Klimamodellierung

Da in der Erosionsmodellierung hoch aufgelöste Daten benötigt werden, wäre das statistisch dynamische Downscaling mit COSMO-CLM eine mögliche Vorgehensweise. Dafür wird das Regionalmodell in ein Globalmodell (ECHAM 5/MPIOM1) mit höherer Auflösung (7 km) für eine längere Periode (z.B. 1971-2000 und 2021-2050) genestet. Die für die Erosionsmodellierung wichtigen Niederschlagsereignisse werden ermittelt und erneut mit einer Auflösung von 1 km<sup>2</sup> und 10-15 min simuliert.

- Erosionsmodellierung

Zunächst ist eine detaillierte Beschreibung der Modellstandorte erforderlich (Relief, Bodenkarten). Ein weiterer Einflussfaktor ist die Landnutzung / Fruchtfolge. Hier kann für die Retrospektive die reale Landnutzung oder die typische Nutzungsverteilung aus CORINE/Landsat-, DOP- und Statistik-Daten für die Retrospektive und die Projektion generiert werden. Für die Prognose wäre dann gegebenenfalls eine zu erwartende Verschiebung der Nutzungen zu berücksichtigen.

gen. Für die Retrospektive könnte die Nutzung/Feldfrucht berücksichtigt werden, welche auf der Fläche im Jahr des untersuchten Extremereignisses auch angebaut wurde. Für die Projektion könnte entweder eine Dauerkultur oder zwei und mehr Feldfrüchte je Klimaereignis angenommen werden. Neben der Niederschlagsmenge eines Ereignisses ist gerade der Zeitpunkt des Starkregens im Hinblick auf den Bedeckungsgrad des Bodens durch die Feldfrucht für das Abfluss- und Erosionsgeschehen von Bedeutung. Eine Sensitivitätsanalyse mit Niederschlagsereignissen unterschiedlicher zeitlicher Verteilungsmuster sollte zumindest für einen Standort durchgeführt werden.

Für die Erosionsmodellierung kommen entsprechend Kapitel 3.3 zwei Referenzstandorte zur Verfahrensentwicklung mit umfangreicher und vieljähriger Datenlage sowie in Grundzügen vergleichbarer Standorteigenschaften (Scheyern, Weiherbach) in Betracht. Erste Informationen zur Übertragbarkeit des Verfahrens könnten zwei Vergleichsstandorte zur Verfahrenserprobung und -anpassung mit eingeschränkter Datenlage, aber anderer Standorteigenschaft und Standortnutzung (Rodenbach und Mertesdorf) liefern. Als erster Schritt für eine landesweite Übertragung der Ergebnisse werden Testmodellierungen mit reduziertem Aufwand an 10-15 weiteren, repräsentativen Vergleichsstandorten vorgeschlagen, um das Standort- und Nutzungsspektrum der beteiligten Bundesländer besser abzubilden. Auf dieser Grundlage lässt sich zum einen eine anwendbare Vorgehensweise für die Modellierung weiterer Gebiete wie auch ein Regelwerk für die Anpassungsstrategie erarbeiten. Da für die Maßnahmenplanung die Modellierung der gesamten Landesfläche, unterteilt in Teileinheiten bearbeitbarer Größe, einen enormen Aufwand darstellen würde, wäre die direkte Übertragung der Maßnahmen auf Regionen mit ähnlichen naturräumlichen und landwirtschaftlichen Bedingungen eine Alternative. Eine detaillierte Modellierung würde nur dann eingesetzt, wenn bei der Umsetzung der Maßnahmen dazu ein Bedarf besteht. Vorteil ist hier, dass sehr schnell mit der Umsetzung einer Anpassungsstrategie begonnen werden kann. Nachteilig ist, dass hierdurch gewisse Unsicherheiten entstehen, da für den einzelnen Standort keine direkten Modellergebnisse vorliegen, sondern nur aus den Vergleichsflächen übertragen wurden.

#### **4 Zusammenfassung**

Durch die projizierte Zunahme von Starkregenereignissen und der winterlichen Niederschlagsmengen ist in regional unterschiedlicher Ausprägung mit einer Veränderung des potenziellen Erosionsrisikos zu rechnen. Im Rahmen des Projekts „Bodenabtrag durch Wassererosion in Folge von Klimaveränderungen“ soll an sensiblen Modellstandorten oder Kleineinzugsgebieten in den Ländern Rheinland-Pfalz, Bayern und Baden-Württemberg sowohl die retrospektive als auch die künftige Entwicklung des potenziellen Erosionsrisikos betrachtet werden. Im Ergebnis der in 2009 abgeschlossenen Konzeptstudie wurden die Standorte „Scheyern“ in Bayern und „Weiherbach“ in Baden-Württemberg als Referenzstandorte für die Erosionsmodellierung vorgeschlagen. In Rheinland-Pfalz könnten die Standorte „Mertesdorf“ und „Rodenbach“ genutzt werden. Zur Berechnung der Erosionsszenarien kommen die physikalischen Erosionsmodelle LISEM oder EROSION 3D, gekoppelt mit dem dynamischen Klimamodell COSMO-CLM in Betracht.



## 5 Literatur

- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel
- DVWK (Hrsg.) (1999): Einflüsse land- und forstwirtschaftlicher Maßnahmen auf den Hochwasserabfluss - Wissensstand, Skalenprobleme, Modellansätze. Materialien 7/1999. Bonn
- Hebel, Bernd. (2003): Validierung numerischer Erosionsmodelle in Einzelhang- und Einzugsgebiet-Dimension. Dissertation. Basel
- Jacob, Daniela. (2009): Methoden, Möglichkeiten und Grenzen der regionalen Klimamodellierung, KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - 1. Statuskonferenz, 18. und 19. März 2009 in Bonn
- Klisch, Anja (2003): Ableitung von Blattflächenindex und Bedeckungsgrad aus Fernerkundungsdaten für das Erosionsmodell EROSION 3D, Dissertation, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät Universität Potsdam
- Michael, Anne (2008): „Wirkung des Klimawandels auf die Bodenerosion durch Wasser“ Vortrag im Rahmen der Veranstaltung „Wassererosion in Sachsen – Vorsorge und Gefahrenabwehr“ am 18. September 2008 im Blockhaus Dresden
- Scherer, Ulrike. (2008): Prozessbasierte Modellierung der Bodenerosion in einer Lösslandschaft. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur,- Geo und Umweltwissenschaften Universität Karlsruhe
- Scherer, Ulrike (2009): persönliche Mitteilung
- UBA (2008): UBA-Workshop „Böden im Klimawandel – Was tun?!“. UBA-Texte 25/08
- [www.clm-community.eu](http://www.clm-community.eu), Stand 04.01.2010

## Veränderung der Beschaffenheit von Fließgewässern

Birgit Wolf<sup>1</sup>, Folker Fischer<sup>1</sup>, Sonja Jähmig<sup>2</sup>, Michael Altmayer<sup>1</sup>

### 1 Einleitung

Erste Auswertungen von Zeitreihen der Wassertemperatur in Fließgewässern deuten auf eine flächendeckende Temperaturerhöhung hin. An den Gewässern häufen sich plötzliche Massentwicklungen von Wasserpflanzen verschiedenster Art, die sich nicht durch Änderungen der Nährstoffeinträge erklären lassen. Neobiota finden sich nicht nur in Schifffahrtsstrecken, sondern auch in Nebengewässern. Anlass genug für KLIWA, sich der Thematik Klimawandel und Beschaffenheit von Fließgewässern zuzuwenden. Unter Federführung des Bayerischen Landesamtes für Umwelt führen die KLIWA Kooperationspartner eine Untersuchung zum Thema „Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität und erste Vulnerabilitätseinschätzung“ durch. Hierzu wurde ein Auftrag an die Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung in Kooperation mit der Universität Duisburg-Essen vergeben.

Die funktionellen Zusammenhänge im Bereich der Gewässerqualität sind bekanntermaßen komplex und sehr vielschichtig. Für eine erste Annäherung an das Thema sollte daher eine Literaturlauswertung den Stand des Wissens im KLIWA-Gebiet erfassen. Zur Diskussion und Festlegung der weiteren Projektschritte wurde am 06.10.2009 in Würzburg ein Expertenworkshop durchgeführt.

### 2 Beschreibung des Projektes

Das Vorhaben verfolgt das Ziel, regionalisierte Aussagen zu klimabedingten Veränderungen von Parametern der Gewässerqualität, vor allem im Hinblick auf die Empfindlichkeit von Arten, Biozönosen und Gewässertypen zu machen. Diese Veränderungen können sich auf künftige Bewertungen der Gewässerqualität (z.B. Bewertung nach EG-Wasserrahmenrichtlinie) auswirken, so dass eine Abschätzung der sich hieraus ergebenden Trends unerlässlich ist.

In einem ersten Schritt wurde eine ausführliche Literaturrecherche für den süddeutschen Raum durchgeführt, die neben internationalen Literaturdatenbanken (SCI, SCOPUS) auch Dissertationen / Abschlussarbeiten, nationale Literatur und bei Behörden verfügbare Literatur berücksichtigt. In Ergänzung zu bereits existierenden Studien dieser Art wurden bei der Literaturlauswahl bevorzugt Dokumente mit lokalem Bezug und auch graue Literatur berücksichtigt. Auch inhaltlich berücksichtigte der Schwerpunkt regionale Charakteristika und Besonderheiten des KLIWA-Gebietes und stellte insbesondere einen starken Bezug zu Gewässertypen dieses Raumes her.

#### 2.1 Auswertung der Information anhand von Wirkungsketten

Das EU-Projekt Euro-Limpacs lieferte die Idee zur Auswertung der Literatur: die Darstellung von Wirkungsketten. Hierbei wurde im Vorfeld eine begrenzte Anzahl von Schlagworten festgelegt, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel die unterschiedlichen Glieder einer Kette von den Ursachen zur Wirkung beschreiben. Die sich aus den Schlagworten ergebenden Wirkungsketten bilden Ursachen-Wirkungsbeziehungen zwischen Klimawandel und Biozönose ab. Es werden sowohl direkte Folgen des Klimawandels (z.B. Erhöhung der Lufttemperatur) berücksichtigt als auch indirekte Auswirkungen über Verstärkung bzw. Abschwächung vorhandener Belastungsfaktoren (z.B. Eutrophierung). Endpunkt der Wirkungsketten sind jeweils einzelne Biokomponenten, wie sie zur Bewertung des ökologischen Zustands der Fließgewässer herangezogen werden. Die Literaturzitate werden auf die Schlagworte hin durchsucht und geordnet. Durch grafische Darstellung, bei der Mehrfachnennungen von Beziehungen besonders hervorgehoben



werden, ergibt sich eine Zusammenschau, die den gegenwärtigen Kenntnisstand zum Thema beschreibt.

## 2.2 Aufbau einer Datenbank

Mittels einer Datenbank werden die Literaturzitate einschließlich der Angabe der Schlagworte gespeichert. So wird eine Abfrage zu bestimmten Schlüsselbegriffen einschließlich deren Beziehungen zueinander ermöglicht.

Ursachen und Effekte werden anhand der beschriebenen Schlagwortliste erfasst. Die Effekte werden zusätzlich im Detail charakterisiert hinsichtlich Stärke, Ausmaß, Wahrscheinlichkeit sowie Richtung. Die Effekte können negativ, positiv oder neutral sein. Die ausgewerteten Studien wurden ferner nach dem Zeitraum einer ableitbaren Prognose, der Methodik (Art der Studie, z.B. Laborexperiment, Feldstudie, Modellierung) und der Art der Aussage (qualitativ, quantitativ) klassifiziert.

## 3 Erste Ergebnisse

Rund 240 Literaturzitate konnten im Rahmen der Recherche ausgewertet werden. Hierin werden über 700 Zusammenhänge zwischen Ursachen und Wirkungen untersucht.

Nur wenige Studien beschreiben die komplette Kette von Klimafaktoren zu biozönotischen Folgen. Meist sind Teilketten oder auch nur Zusammenhänge zwischen zwei Parametern Gegenstand der Untersuchung. Vielfach fehlen Informationen zu Regionalität und Gewässertypen. Nur selten sind konkrete Zeithorizonte für Veränderungsprozesse genannt und eine Wahrscheinlichkeit für deren Eintreffen angegeben. Inhaltlich lassen sich jedoch eindeutige Schwerpunkte erkennen: so werden für die Biokomponente Makrozoobenthos 193 Beziehungen zu klimarelevanten Parametern beschrieben. Hingegen zeigen sich deutliche Defizite in der Beschreibung des Zusammenhangs bei anderen Biokomponenten und zwischen den Faktoren Morphologie und Physiko-Chemie.

Im Rahmen eines Expertengesprächs am 06.10.2009 in Würzburg wurden die bisherigen Ergebnisse aus dem Projekt vorgestellt und diskutiert. Die von Projektseite identifizierten Wirkungsketten wurden von den Experten grundsätzlich als plausibel eingestuft. Um die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gewässerqualität künftig besser prognostizieren zu können, besteht weiterer Forschungsbedarf. Hierbei ist eine Differenzierung der Ursachen unter Berücksichtigung klimarelevanter Faktoren erforderlich. So beschäftigen sich eine Vielzahl an Studien mit mittleren Verhältnissen eines Einflussparameters, nicht jedoch mit den für die Klimaforschung relevanten Extrema sowie deren Saisonalität. Beispiele hierfür sind die Temperatur oder das Abflussregime.

Deutliche Wissensdefizite konnten die Experten auch auf biologischer Seite ausfindig machen. So werden meist einfache Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussfaktoren und dem Vorkommen bestimmter Arten dargestellt. Es ist jedoch zu befürchten, dass der Klimawandel in seiner Multikausalität ganze Prozesse und Funktionen, wie etwa die Nahrungsnetze zu verändern vermag.

Die Experten schlagen für die weitere Bearbeitung die gezielte Beschäftigung mit bestimmten Gewässertypen vor. Aufgrund der hohen Bedeutung als Refugialräume für kälteliebende Arten wird eine exemplarische Beschäftigung mit kleinen Oberläufen der Alpen und des Mittelgebirges vorgeschlagen. Zusätzlich sollen besonders große Flüsse und Ströme in die weiteren Betrachtungen einfließen, da hier der Einfluss der Temperatur auf die Produktion dieser Gewässer als bedeutend anzusehen ist.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt „Einfluss des Klimawandels auf die Fließgewässerqualität und erste Vulnerabilitäts einschätzung“ wurde im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt von der Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung in Kooperation mit der Universität Duisburg-Essen eine Literaturstudie durchgeführt. Ein Produkt dieses Projekts wird eine Datenbank sein, die nach Beziehungen zwischen klimabedingten Ursachen und deren Wirkungen abgefragt werden kann. Diese Datenbank soll sukzessive durch neue Zitate erweitert werden.

Aus den in der Literatur beschriebenen Zusammenhängen lassen sich Wirkungsketten ableiten. Während einzelne Zusammenhänge als belegt gelten können, muss das besondere Augenmerk künftiger Klimaforschung auf die Berücksichtigung von Extremereignissen sowie auf die Betrachtung von Auswirkung auf biologische Prozesse und Funktionen sowie deren Steuerung gelegt werden.

Dies sollte zunächst am Beispiel besonders empfindlicher Gewässertypen und Biozönosen, etwa den Lebensgemeinschaften kühler Oberläufe der Alpen und Mittelgebirge erfolgen. In einem nächsten Schritt sollten auch Seen in die Untersuchungen einbezogen werden.

Die Beschreibung und Erforschung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Qualität unserer Gewässer stellt aufgrund der geschilderten Komplexität eine besondere Herausforderung für die Zukunft dar. Die vorgestellte Studie liefert erste Anhaltspunkte für ein besseres Verständnis der relevanten Zusammenhänge. Sie belegt jedoch auch vorhandene Wissenslücken. Nur durch weitere Forschung wird eine verlässliche Prognose der zu erwartenden Veränderungen möglich sein. Erste Empfehlungen hierfür können aus den vorgestellten Ergebnissen abgeleitet werden.

<sup>1</sup> Bayerisches Landesamt für Umwelt  
Hans-Högn-Str 12  
95030 Hof

<sup>2</sup> Abteilung Limnologie und Naturschutzforschung  
Senckenberg Gesellschaft für Naturforschung  
Clamecyststraße 12  
63571 Gelnhausen





## Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz (KlimLandRP)

Ulrich Matthes

Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz

### 1 Einleitung

Der Klimawandel wirkt in der Fläche und betrifft sämtliche Umweltsektoren sowie die gesamte Landnutzung, wobei die Effekte regionalspezifisch sein werden (Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz, 2007). In dem interdisziplinären Landesprojekt KlimLandRP zum Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz wird untersucht, welche Folgen der Klimawandel für Umwelt und Landnutzung in Rheinland-Pfalz haben kann, welche Risiken, evtl. aber auch Chancen sich ergeben und welche Anpassungsoptionen dem Klimawandel in einem zukunftsorientierten Landschaftsmanagement entgegengesetzt werden können. Das Forschungsprojekt wird vom Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz (MUFV) getragen und ist auf dreieinhalb Jahre von April 2008 bis September 2011 angelegt (Matthes et al., 2009).

### 2 Projektstruktur von KlimLandRP

Die zentralen Forschungsthemen werden in KlimLandRP in den fünf Modulen Boden, Wasser, Landwirtschaft, Wald und Biodiversität interdisziplinär bearbeitet. Grundlage sind möglichst hoch aufgelöste regionale Klimaprojektionen, die die Bandbreite möglicher Klimaveränderungen in zwei Projektionszeiträumen bis 2050 und bis 2100 abbilden. Neben landesweiten Aussagen ist vor allem die regionalspezifische Entwicklung des Klimawandels Gegenstand der Untersuchungen. Folgende Themenfelder werden in den einzelnen Modulen bearbeitet:

<b>Modul Boden</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Veränderung der Bodenfunktionen</li><li>• Erosionsproblematik</li><li>• Wasserspeichermöglichkeit und Wasserhaushalt von Böden</li><li>• Kohlenstoffvorräte von Böden</li></ul>	<b>Modul Wasser</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Bodenwasserhaushalt für ausgewählte Waldstandorte</li><li>• Landschaftsbezogene Wasserhaushaltsmodellierung</li><li>• Schadstoffdynamik in Gewässern und Veränderung der Fließgewässerbiozöosen</li><li>• Rückkopplungseffekte des Bodenwasserhaushaltes auf Land- und Forstwirtschaft</li></ul>
<b>Modul Wald</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• zukünftige Baumartenwahl (incl. Herkunft)</li><li>• Veränderung der Waldzusammensetzung auf Landschaftsebene – Multifunktionalität der Wälder</li><li>• Veränderungen von Nutzungspotentialen</li><li>• aktuelle und künftige Konflikträume (Sturmgefährdung, Waldbrandgefahr, Schadinsekten)</li><li>• Anpassungsoptionen</li></ul>	<b>Modul Landwirtschaft</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Ist-Analyse der Landnutzung</li><li>• Veränderungen des Standorts (Erosion, Bodenfruchtbarkeit) und Effekte auf Kulturen</li><li>• Ertragsrisiken durch wetterbedingte Extremereignisse</li><li>• Auftreten von Schadorganismen und Strategien der Eindämmung</li><li>• Anpassungsoptionen</li></ul>
<b>Modul Biodiversität</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Arten- und Arealverschiebungen</li><li>• Funktionsfähigkeit von Ökosystemen</li><li>• Habitatansprüche von Arten</li><li>• „ecological niche models“</li><li>• Veränderungen der Biodiversität</li></ul>	



### 3 Module Boden und Wasser

Der Klimawandel wird sehr wahrscheinlich zu einer differenzierten Veränderung der Standortbedingungen führen - von der Veränderung des Bodenwasserhaushaltes mit Auswirkungen auf den gesamten Landschaftswasserhaushalt über den Nährstoffhaushalt und die Dynamik der Humusvorräte der Böden bis zu ihrer Gefährdung durch Erosion oder Verdichtung. Im Modul Boden wird u.a. das derzeitige und künftige Risiko für Bodenerosion großräumig quantifiziert. Ein geeigneter Ansatz hierfür ist die Allgemeine Bodenabtragungsgleichung (ABAG, Schwertmann et al., 1987). Mit dem Modell Stoffbilanz (Gebel et al., 2005) wurde der potenzielle Bodenabtrag für den Referenzzeitraum 1961-1990 für Rheinland-Pfalz berechnet. Während Landschaftsräume wie Südwestpfalz, Haardtrand oder Rheinhessen partiell ein „sehr hohes“ Risiko für Bodenabtrag haben, ist in der stark bewaldeten Landschaft Pfälzerwald flächendeckend ein „sehr geringer“ Bodenabtrag zu erwarten.

Mindestens zwei der Faktoren, nämlich der Regenerositätsfaktor (R) und die Bodenbedeckung/Bearbeitung (C), sind klimaabhängig. Eine erste Projektion in die Zukunft mit dem WETTREG-Szenario A1B (normal) hat für den Zeitraum 2071-2100 eine Erhöhung des R-Faktors um 1 bis 2 Stufen ergeben. Die Intensität des Niederschlags erreicht in der Regel von Mai bis September die höchsten Werte. Bei einer – vergleichsweise geringen Erosionsschutz bietenden – Kulturart wie Winterweizen ist die kulturspezifische und von der Bodenbearbeitung abhängige Empfindlichkeit des Bodens von Ende August bis Dezember am höchsten. Mit steigenden Temperaturen verlängert sich die Vegetationszeit, die Einsaat des Winterweizens wird 2050 mehrere Wochen früher erfolgen als heute. Damit verlängert sich nicht nur die Zeitspanne einer erhöhten Boden-Empfindlichkeit, sondern die Phase der Bodenbearbeitung fällt zunehmend in den Zeitraum erhöhter Erosivität. Dieser Entwicklung kann durch geeignete Verfahren der Bodenbearbeitung (z.B. Direktsaat ohne Pflügen) und Erosion vermeidende Untersaaten entgegengewirkt werden.

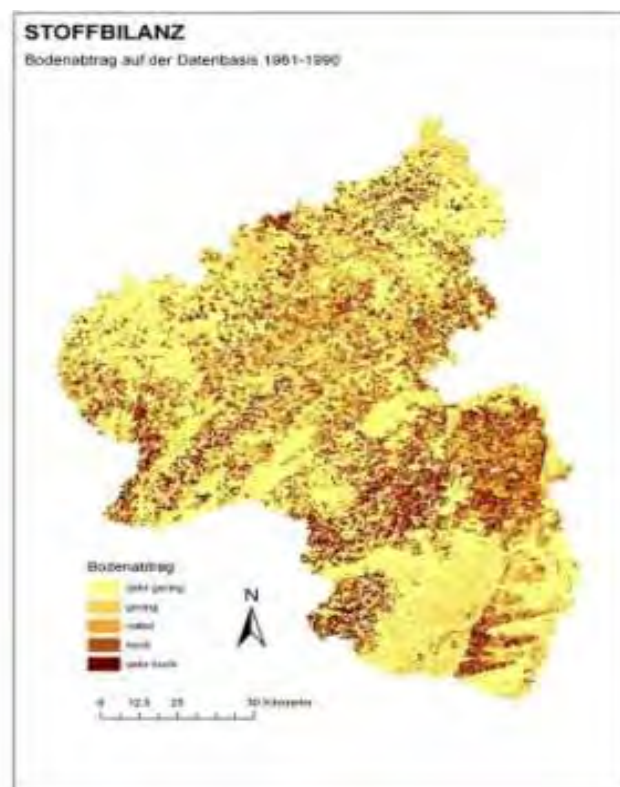


Abb. 1: Bodenabtrag in Rheinland-Pfalz, berechnet mit dem Modell Stoffbilanz auf der Datenbasis 1961-1990.

Infolge erhöhter Temperaturen und veränderter Niederschläge wird sich der Klimawandel auf Oberflächengewässer, Grundwasser und Bodenwasser auswirken. Das Modul Wasser erforscht die damit zusammenhängenden Teilaspekte auf verschiedenen räumlichen Skalen. Synergien mit KLIWA werden gezielt genutzt. Flächendeckend für Rheinland-Pfalz erfolgt eine klimasensitive Simulation des Wasserhaushalts und der Stoffbilanz für Phosphat und Nitrat. Kleinräumig wird für das Einzugsgebiet der Nahe untersucht, inwiefern sich klimatische Extremereignisse auf den Wasserhaushalt und die Biozönose auswirken.

Wie kann die Standortkartierung „klimaflexibel“ gemacht werden? Diese Frage versucht das Modul Wasser zu beantworten, indem der Bodenwasserhaushalt fiktiver Standardböden mit dem Wasserhaushaltsmodell WASIM-ETH 8.4 (Schulla und Jasper, 2007) modelliert wird. Als Klimaantrieb und Referenz werden die Daten der DWD-Stationen verwendet und mit dem Regionalmodell WETTREG in die Zukunft projiziert. Das Set zu untersuchender Standard-Böden resultiert aus der Kombination von vier fiktiven nFK-Werten (50, 100, 150 und 200) und der Exposition (jeweils Schatthang, Sonnhang und ebene Lage), so dass insgesamt 12 Kombinationen pro Standort/Station analysiert werden.

Für das Pflanzenwachstum ist von entscheidender Bedeutung, inwieweit künftig die Wasserverfügbarkeit durch sommerliche Trockenperioden eingeschränkt sein wird. Als Indikator für Trockenstress kann die Bodensaugspannung herangezogen werden. Die Abbildung 2 zeigt für zwei Standorte mit unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität (nFK) an einem Sonnhang im Bereich der Klimastation Trier den Jahresverlauf der Bodensaugspannung für ein trockenes und ein feuchtes Jahr. Die Dynamik der Bodensaugspannung deutet darauf hin, dass die Pflanzen im feuchten Jahr 1987 kaum Einschränkungen in der Wasserversorgung hatten, während die Verfügbarkeit von Wasser im Trockenjahr 1976 über Wochen bis Monate zum Teil stark eingeschränkt gewesen sein muss. Auf dem Standort mit geringer nFK ist die Bodensaugspannung dabei nicht nur im Oberboden höher. Daraus kann der Schluss gezogen werden, dass tief wurzelnde Baumarten/Pflanzen an einem Standort mit hoher nFK auch in einem Trockenjahr kaum trockenstressgefährdet sind, wohingegen Flachwurzler wie die Fichte bei dieser Konstellation einem erhöhten Trockenstressrisiko ausgesetzt sein werden.

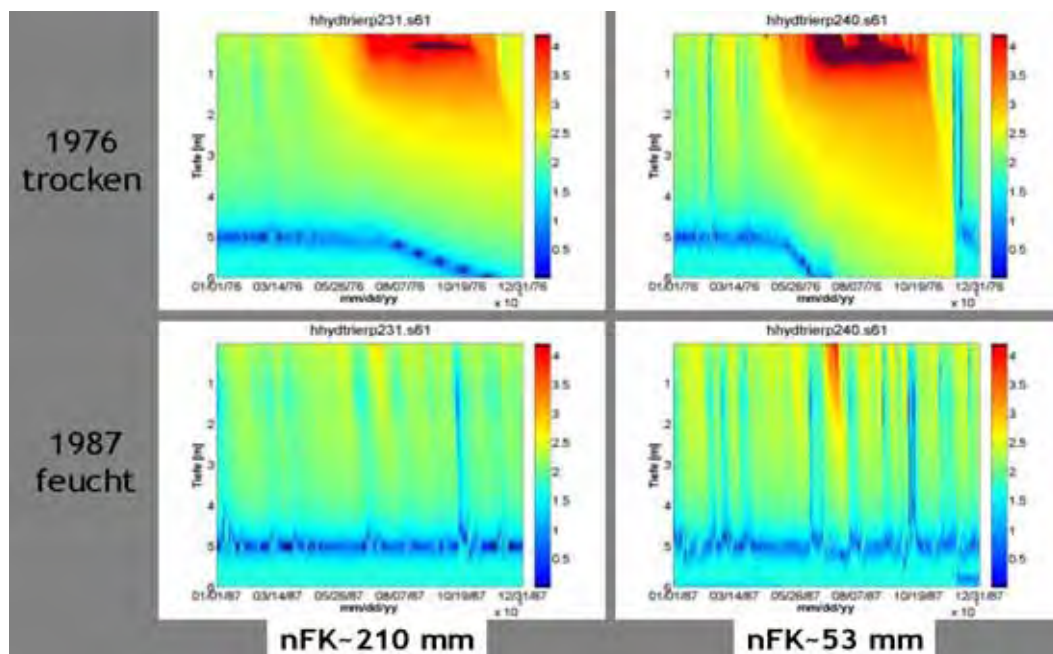


Abb. 2: Simuliertes Tiefenprofil der Bodensaugspannung im Vergleich eines Trocken- und eines Feuchtjahres auf zwei Standorten mit unterschiedlicher nutzbarer Feldkapazität im Bereich der Klimastation Trier.

#### 4 Module Landwirtschaft und Wald

Die Land- und Forstwirtschaft müssen sich darauf einstellen, dass extreme Witterungsereignisse wie Stürme, Starkniederschläge und längere Trockenperioden zunehmen werden (Zebisch et al., 2005). Etwa 36% der Landesfläche ist landwirtschaftlich genutzt. Mögliche Folgen des Klimawandels sind neben einer Veränderung von Standorteigenschaften (z.B. Bodenwasser- und Humusgehalt) und einer verlängerten Vegetationszeit ein erhöhter Schädlingsbefall z.B. im Obst- und Weinbau. Ausgehend vom Ist-Zustand der Landnutzung werden im Modul Landwirtschaft landesweit und in repräsentativen Landschaftsräumen Szenarien der künftigen Landnutzung bei unterschiedlichen Klimaprojektionen entwickelt.

Eine GIS-basierte Standortanalyse geht von der tatsächlichen Nutzung des einzelnen Flurstücks aus (INVEKOS-Daten), dessen Standort durch die Wasserversorgung, Temperatur, Boden und Relief charakterisiert werden kann. Analog zum Modul Wald werden kulturspezifische Standorthüllen („Wohlfühlbereiche“) ermittelt.

Eine flurstücksbezogene multikriterielle Standortmodellierung berücksichtigt kleinräumige Einflussfaktoren wie Exposition, Höhenlage, Hangneigung und Bodenfeuchteindex zur Ermittlung der Standorteignung für Kulturarten (Meyer, 2002; Thiere und Deumlich, 2004). Eine erste erfolgreiche Validitätsprüfung hat das Modell bereits durchlaufen. In einem Landschaftsausschnitt liegen die tatsächlichen Weinbauflächen nahezu vollständig in der für Weinbau besonders geeigneten, simulierten Standortkulisse. Abschließend werden mit Experten Anpassungsoptionen z.B. hinsichtlich Fruchtarten/Sorten erarbeitet (Abb. 3).

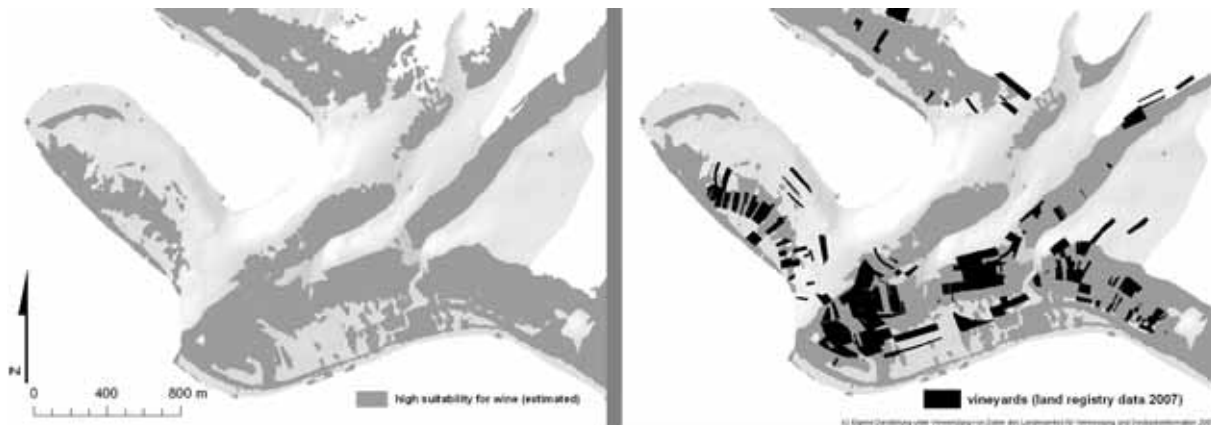


Abb. 3: links: Multikriteriell modellierte Standorteignung für Weinbau mit den Einflussfaktoren Höhe über NN, Besonnung und topographischer Bodenfeuchteindex; rechts: tatsächliche Weinbauflächen im Jahr 2007 (Eigene Darstellung, Liegenschaftskataster RLP, Folie 21).

Rheinland-Pfalz ist mit 42% Waldanteil das walddreichste Bundesland in Deutschland. Das Modul Wald befasst sich vor allem mit der Frage, wie sich der forstliche Standort (insbesondere Bodenwasserhaushalt) im Klimawandel ändern könnte und welche Baumarten/Waldtypen einschließlich ihrer genetischen Herkunft anpassungsfähig sind, um die vielfältigen gesellschaftlichen Ansprüche an den Wald zu erfüllen (s. Bolte und Ibisch, 2007). Besondere Beachtung gilt der Erstellung baumartenspezifischer Risikokarten flächendeckend für Rheinland-Pfalz. Eine klimasensitive Modellierung repräsentativer Waldtypen bildet das Waldwachstum heute und in Zukunft ab (Rötzer und Moshammer, 2008).

Die vielfältigen Informationen zum Waldstandort und zur derzeitigen sowie geplanten Waldzusammensetzung definieren den Ist-Zustand, aus dem sich GIS-basiert aktuelle Konflikträume identifizieren lassen. Unter Anwendung von Klimaprojektionen sind Standortveränderungen und damit Folgen für die Baumarteneignung abschätzbar, woraus sich künftige Konflikträume z.B.

hinsichtlich Trockenstress oder Waldbrandgefährdung ableiten lassen. Die Erkenntnisse werden in waldlandschaftsökologische Handlungsoptionen einfließen.

Zur Abschätzung der künftigen Baumarteneignung in Rheinland-Pfalz bieten sich unterschiedliche methodische Ansätze an, die im Projekt weiter entwickelt und in geeigneter Weise kombiniert werden. Ein Beispiel soll dies verdeutlichen. In der ursprünglichen Form zeigen Klimahüllen (climate envelopes) den Wohlfühlbereich einer Baumart, wie er sich ergibt, wenn man sämtliche Kombinationen von Jahresdurchschnittstemperatur und mittlerem Niederschlag pro Jahr im natürlichen Verbreitungsgebiet einer Baumart als Fläche darstellt (Kölling, 2009). Somit wird ausschließlich das ökologische Potenzial einer Baumart unter natürlichen Konkurrenzbedingungen abgebildet, nicht jedoch ihre physiologischen Möglichkeiten (Bolte et al., 2008). Der natürliche Wohlfühlbereich z.B. der Fichte bewegt sich im Spektrum von ca. -4 bis 9° C Jahresdurchschnittstemperatur bei einer Niederschlagsspanne von 400 bis 1200 mm. Das gegenwärtige Klima in Deutschland kann diesen Ansprüchen nur teilweise gerecht werden; künftig würde sich die für die Fichte geeignete Gebietskulisse weiter deutlich verringern, indem die Klimahülle den Wohlfühlbereich der Baumart zunehmend verlässt (s. Abb. 4).

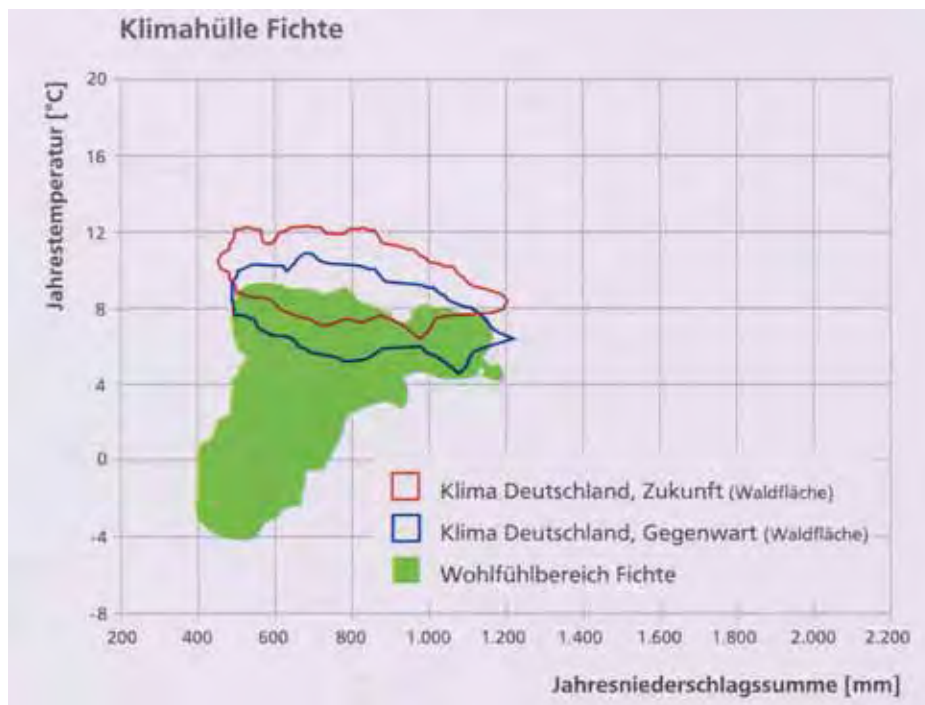


Abb. 4: Klimahülle für die Baumart Fichte (erstellt mit Temperatur- und Niederschlagskombinationen im natürlichen Verbreitungsgebiet der Baumart) im Vergleich zum heutigen und künftigen Klima in Deutschland (Kölling, 2009).

Die Buche würde – von wenigen Ausnahmen abgesehen – heute wie künftig geeignete Bedingungen vorfinden. Für die Eiche würde sich die Situation sogar verbessern. Bei diesen Befunden ist jedoch zu beachten, dass wichtige Einflussfaktoren wie der Bodenwasserhaushalt oder künftige Wirt-Parasit-Verhältnisse (Auftreten von Schadinsekten) sowie das physiologische Potenzial der Baumarten nicht berücksichtigt sind. Andere im Modul eingesetzte methodische Verfahren beziehen solche Faktoren zum Teil ein (z.B. Roloff und Grundmann, 2008), so dass durch Methodenkombination belastbare Aussagen zur Baumarteneignung erzielt werden können.



## 5 Modul Biodiversität

Neben direkt wahrnehmbaren Erscheinungen wie Arealerweiterungen bei wärmeangepassten Arten oder Rückzug kälteangepasster Arten beeinflussen Klimaveränderungen die Zusammensetzung von Lebensgemeinschaften und Biotopen und damit die funktionellen Eigenschaften der Ökosysteme (etwa Beckage et al., 2008). Im Modul Biodiversität werden für ausgewählte Tier- und Pflanzenarten die Ansprüche an den Lebensraum z.B. hinsichtlich Wärme und Art der Landnutzung abgeleitet. Mit sog. „ecological niche models“ ist es möglich, die Dynamik von Arten und Lebensgemeinschaften im Klimawandel zu prognostizieren (s. Heikkinen et al., 2006; Pearce und Boyce, 2006) Daraus sind Aussagen zur künftigen Biodiversität ableitbar, ebenso wie Anpassungsoptionen für das künftige Habitat- und Schutzgebietsmanagement einschließlich Populationsvernetzung. Die ausgewählten taxonomischen Artengruppen sind auf Rheinland-Pfalz unterschiedlich verteilt, wie Abb. 5 am Beispiel der Heuschrecken und Moose zeigt. Einen maßgeblichen Einfluss unter mehreren zu prüfenden Faktoren scheinen bei den Heuschrecken die Januartemperatur und Pflanzendiversität der einzelnen Messtischblätter (Quadranten der Topografischen Karte) zu haben (positive Korrelation), bei den Moosen die Januartemperatur und der Anteil landwirtschaftlicher Flächen (negative Korrelation).

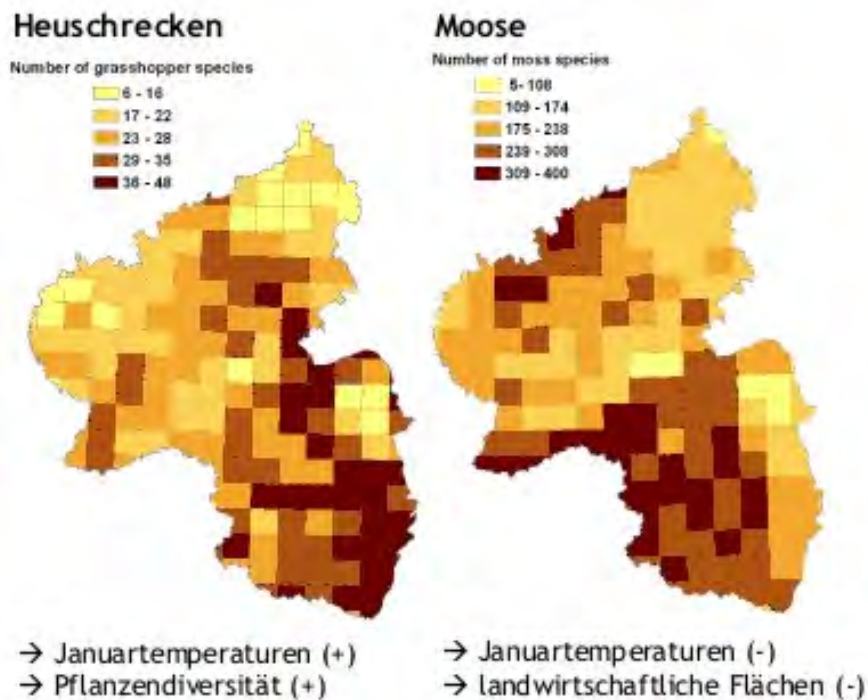


Abb. 5: Artendiversität (=n) von Heuschrecken und Moosen in Rheinland-Pfalz, differenziert nach Messtischblättern (Quadranten der jeweiligen Topografischen Karte 1:25.000).

## 6 Stakeholderanalyse

Ein wesentliches Ziel von KlimLand ist es, Anpassungsoptionen transdisziplinär, d.h. im Dialog mit Stakeholdern zu entwickeln (vgl. Stock, 2007). In einer ersten Phase der Stakeholderanalyse wurden landesweit und in Schwerpunktregionen (Pfälzerwald, Eifel, Mosel und Vorderpfalz) 43 Akteure nach ihrer Sichtweise zum Klimawandel, bereits gemachten Erfahrungen und den Umgang mit Unsicherheiten gefragt. Auffallend waren sektorspezifische Unterschiede in der Betroffenheit und im Umgang mit dem Klimawandel. Die zweite Phase wird im Projekt entwickelte Anpassungsoptionen z.B. für die Land- und Forstwirtschaft gemeinsam mit den Stakeholdern in sektorspezifischen Workshops beraten.

## 7 Vernetzung von KlimLandRP

Die Abb. 6 vermittelt einen Überblick über die Einbindung von KlimLandRP in die vielfältigen Aktivitäten und Gremien im Bereich der Klimawandelforschung, sowohl auf regionaler/landesweiter Ebene als auch auf der Ebene des Bundes.

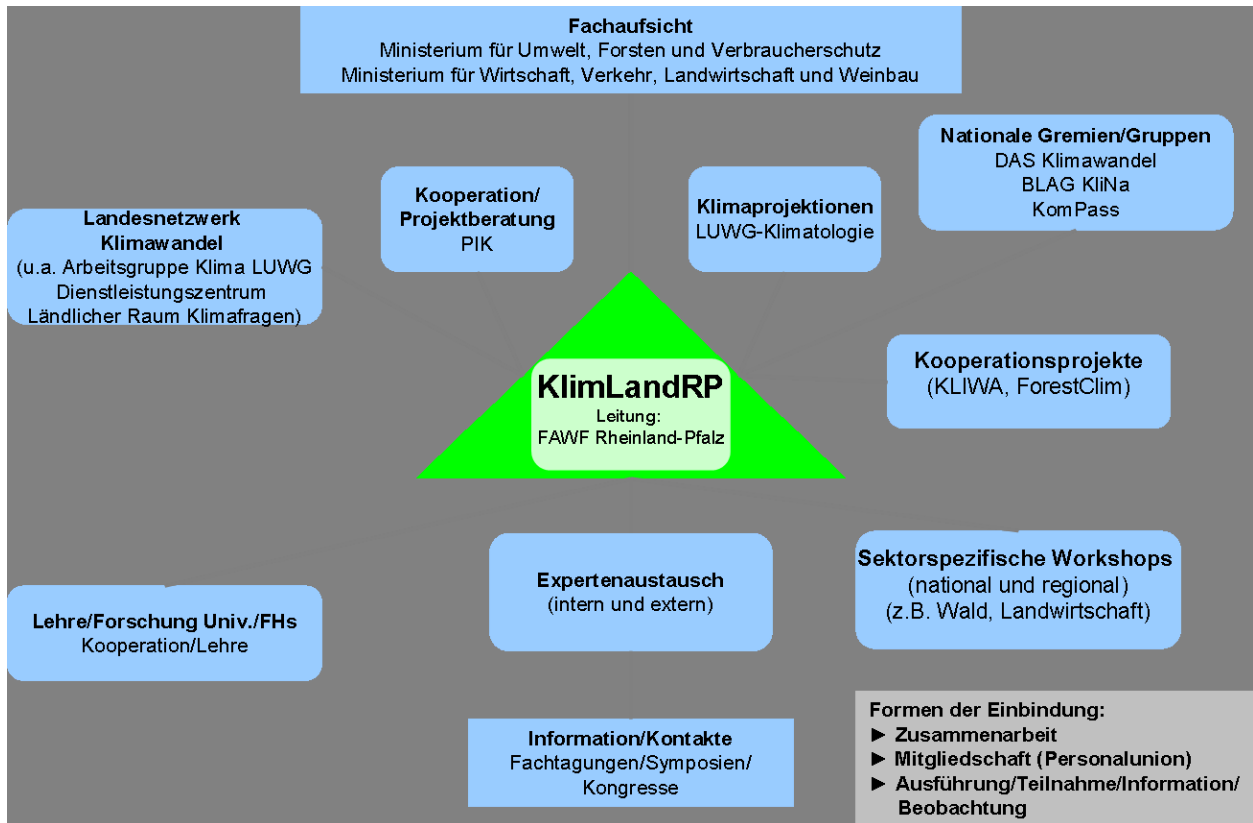


Abb. 6: Netzwerkstruktur von KlimLandRP.

## 8 Zusammenfassung

Die Folgen und Wirkungen des Klimawandels auf die Landnutzung, auf die Umweltressourcen Wasser und Boden sowie auf die Biodiversität untersucht das Projekt KlimLandRP interdisziplinär in fünf Modulen. Die Projektstruktur und die Themenfelder der Module werden dargestellt. Anschließend werden die verfolgten methodische Ansätze und erste Ergebnisbeispiele präsentiert. Die Abbildung der Bodenerosion im Klimawandel bildet einen Schwerpunkt des Moduls Boden, im Modul Wasser steht u.a. die Veränderung des Bodenwasserhaushalts im Mittelpunkt. Die Landnutzungsmodule Wald und Landwirtschaft befassen sich anhand von Standorthüllen mit der Frage, welche Baum- und Kulturarten künftig auf welchen Standorten unter der Annahme unterschiedlicher Klimaprojektionen angebaut werden können. Das Modul Biodiversität setzt ökologische Nischenmodelle ein, um die Habitateignung ausgewählter Artengruppen zu ermitteln – als Grundlage für die Abschätzung der künftigen Biodiversität, für Habitatmanagementstrategien und für Strategien zur Populationsvernetzung. Integraler Bestandteil des Projekts ist eine Stakeholderanalyse, die dazu dient, die Betroffenheit und Sichtweisen von Akteuren zu ermitteln und Anpassungsoptionen im gesellschaftlichen Dialog zu entwickeln.





## 9 Literatur

- Beckage, B., Osborne, B., Gavin, D.G., Pucko, C., Siccama, T., Perkins, T. (2008): A rapid upward shift of a forest ecotone during 40 years of warming in the Green Mountains of Vermont. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105, pp. 4197-4202.
- Bolte, A., Ibisch, P. (2007): Die Anfälligkeit der Wälder Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. – *AFZ-DerWald*, 11/2007, S. 572-576.
- Bolte, A., Ibisch, P., Menzel, A., Rothe, A. (2008): Was Klimahüllen uns verschweigen. *Allgemeine Forstzeitung – Der Wald* 15/2008, S. 800-803.
- Gebel, M., Halbfass, S., Kaiser, M., Grunewald, K. (2005): Mesoskalige Modellierung diffuser Nährstoffeinträge in Flussgebieten mit dem Modell STOFFBILANZ - Entwicklungsstand und Perspektiven. In: Wittmann, J., Nguyen Xuan Thinh (Hrsg.): *Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften - Workshop Dresden 2005*, ASIM-Mitteilung AMB 91, S. 159-168, Aachen.
- Heikkinen, R.K., Luoto, M., Araujo, M.B., Virkkala, R., Thuiller, W., Sykes, M. T. (2006): Methods and uncertainties in bioclimatic envelope modelling under climate change. *Progress in Physical Geography* 30, pp. 751-777.
- Kölling, C. (2009): Die Klimahüllen unserer Waldbäume. *PdN-Bios* 1/58, S. 22-23.
- Matthes, U., Vasconcelos, A.C., Konold, W., Grigoryan, G., Casper, M., Sauer, T., Spies, E.-D., Tintrup, G., Trapp, M., Buse, J., Griebeler, E.-M., Seitz, A., Kraus, C., Bücking, M. (2009): Klima- und Landschaftswandel in Rheinland-Pfalz. Projekt zur Vulnerabilitätsanalyse und zur Entwicklung landesspezifischer Strategien zur Anpassung, S. 57-69. IN: *Archiv f. Forstwesen u. Landschaftsökologie* 43(2009)
- Meyer, B.-C. (2002): Multikriterielle Landschaftsoptimierung – Ermittlung nachhaltiger Landnutzung auf Basis funktionaler Landschaftsbewertung. In: DECH, S., Mehl, H., Strunz, G. (Hrsg.), *Tagungsband 19. DFD-Nutzerseminar 15.-16.10.2002*, Oberpfaffenhofen, S. 139-148.
- Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (Hrsg.) (2007): *Klimabericht Rheinland-Pfalz*. Mainz, 98 S. und Anhang.
- Pearce, J.L., Boyce, M.S. (2006): Modelling distribution and abundance with presence-only data. *Journal of Applied Ecology* (43), pp. 405-412.
- Roloff, A., Grundmann, B. (2008): *Klimawandel und Baumarten-Verwendung für Waldökosysteme*. Forschungsbericht. Technische Universität Dresden, Institut für Forstbotanik und Forstzoologie, Professur für Forstbotanik. Tharandt, 46 S.
- Rötzer, T., Moshammer, R. (2008): *Waldentwicklungsszenarien für die Dübener Heide*. *Forst und Holz* (63) 10, S. 18-22.
- Schulla, J. und Jasper, K. (2007): *Model description WaSiM-ETH*. Zürich.
- Schwertmann, U., Vogl, W., Kainz, M. (1987): *Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*, Stuttgart.
- Stock, M. (2007): *Akteure im Wald und ihre Gemeinwohlleistungen – Brauchen wir sie im Klimawandel?*, Eberswalder Forstliche Schriftenreihe Band XXXIII, S. 14-20.
- Thiere, J., Deumlich, D. (2004): *Standortbeurteilungen und Standortvergleiche nach Programm „VERMOST“ (Vergleichsmethode Standort)*, Müncheberg.
- Zebisch, M., Grothmann, T., Schröter, D., Hasse, C., Fritsch, U., Cramer, W. (2005): *Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme*, Umweltbundesamt, Dessau.

## Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland (KLIWAS)

Enno Nilson, Maria Carambia, Peter Krahe, Thomas Maurer, Hans Moser  
Bundesanstalt für Gewässerkunde

### 1 Einleitung

Als Folge der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung Deutschlands und Europas sowie der Globalisierung der Märkte wird die Nachfrage nach Verkehrsleistungen in Deutschland zukünftig steigen. Besonders stark werden die Seeverkehre zunehmen, jedoch schätzen langfristige Prognosen auch für die Binnenschifffahrt eine erhebliche Steigerung sowohl des Verkehrsaufkommens von 237 Mio. t (2005) auf 357 Mio. t (2050) als auch der Verkehrsleistung von 64 Mrd. tkm (2005) auf 100 Mrd. tkm (2050) (ICKERT et al., 2007). See- und Binnenschifffahrt werden somit unverzichtbare Bestandteile des deutschen, europäischen und globalen Verkehrssystems bleiben, das auf wachsende Verkehre einzustellen ist.

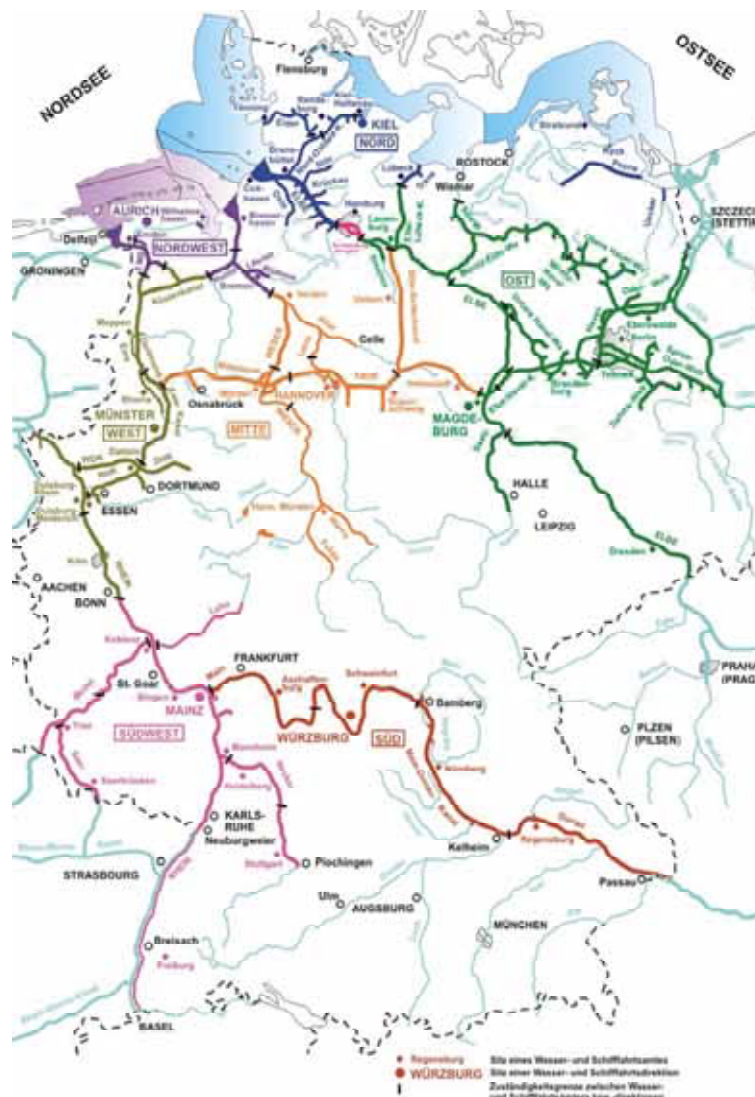


Abb. 1: Übersicht der Wasserstraßen in Deutschland. Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung, 1999.



Das Netz der Wasserstraßen in Deutschland besteht zu einem erheblichen Teil aus frei fließenden Flüssen mit einem natürlichen Abflussregime (Abbildung 1). Änderungen der klimatischen Randbedingungen können sich daher über das Wasserdargebot auf die Fahrwasserbedingungen und die Binnenschiffsverkehre auswirken. Auch der Küsten- und Seeverkehr ist klimaabhängig. Hier spielen Wind, Seegang, Strömungen und der Meeresspiegel eine wichtige Rolle.

Die gegenwärtig verfügbaren Klimaprojektionen lassen weit reichende Auswirkungen für die Schifffahrt und Wasserstraßen in Mitteleuropa möglich erscheinen. Allerdings bestehen noch große Unsicherheiten bzgl. (1) der regionalen Ausprägung des Klimawandels, (2) seiner Konsequenzen im hydrologischen System der Küste und des Binnenbereichs, (3) der Sensitivität der Gewässerqualität und -ökologie sowie der schifffahrtsabhängigen Wirtschaft (BMVBS, 2007).

Aktuelle Äußerungen zum Klimawandel aus dem medialen aber teilweise auch dem wissenschaftlichen Raum lassen oft eine klare Trennung von gesichertem Wissen (z.B. der Zunahme der beobachteten globalen bodennahen Lufttemperatur) und ungesicherten Aussagen (z.B. hinsichtlich konkreter wasserwirtschaftlicher Folgen einer möglichen zukünftigen klimatischen Entwicklung) vermissen. Ebenso werden bei der Diskussion von Anpassungsmaßnahmen Zusammenhänge und Rückkopplungen innerhalb eines Wirkungsgefüges oft außer Acht gelassen (Abbildung 2). Wie wirken sich Maßnahmen in einem Teilsystem auf andere Teilsysteme aus? Sind die vorgeschlagenen Maßnahmen überhaupt geeignet, um das Problem in den Griff zu bekommen? Was genau verursacht überhaupt „das Problem“? Sind mittlere Bedingungen oder Extremereignisse ausschlaggebend?



Abb. 2: Ausschnitt aus dem „Wirkungsgefüge Wasserstraße“. Eckige Boxen repräsentieren Teilsysteme. Runde Boxen repräsentieren ausgewählte Einflüsse auf das Wirkungsgefüge (nach Moser et al. 2008, verändert)

Der Kenntnisstand zu diesen Aspekten wird aktuell im Rahmen des BMVBS-Forschungsprogramms KLIWAS<sup>3</sup> zusammengetragen, bewertet und hinsichtlich der Möglichkeit

<sup>3</sup> KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland – Entwicklung von Anpassungsoptionen.

und Notwendigkeit für konkrete Anpassungsmaßnahmen seitens des Wasserstraßenmanagements ausgewertet (BMVBS, 2009). Dabei wird das System „Binnenwasserstraße“ in seiner ökologischen und ökonomischen Dimension sowie mit seiner Vielzahl von Funktionen ganzheitlich erfasst. Sensitivitäten und Anpassungskapazitäten als Reaktion auf zukünftige Veränderungen werden auf Grundlage der derzeit verfügbaren Informationen zum Klimawandel analysiert. Erst die vollständige Systemanalyse in Kombination mit einer Quantifizierung der Bandbreite und der Unsicherheiten der Klima- und Abflussprojektionen kann zur Formulierung und Bewertung angemessener Anpassungsmaßnahmen führen (Säulen A bis C in Abbildung 3). Diese Vorgehensweise ist in aktuellen Überlegungen zu nationalen (Bundeskabinett, 2008) und europäischen Klimaanpassungsstrategien (European Communities, 2009) als „good practice“ niedergelegt. Während die Erarbeitung der Grundlagen und Sensitivitäten vornehmlich in der Verantwortung wissenschaftlicher Projekte liegt, können Entscheidungen zur Umsetzung konkreter Maßnahmen oder Maßnahmenbündel (Säule D in Abbildung 3) hingegen nur im politischen und wirtschaftlichen Raum getroffen werden.

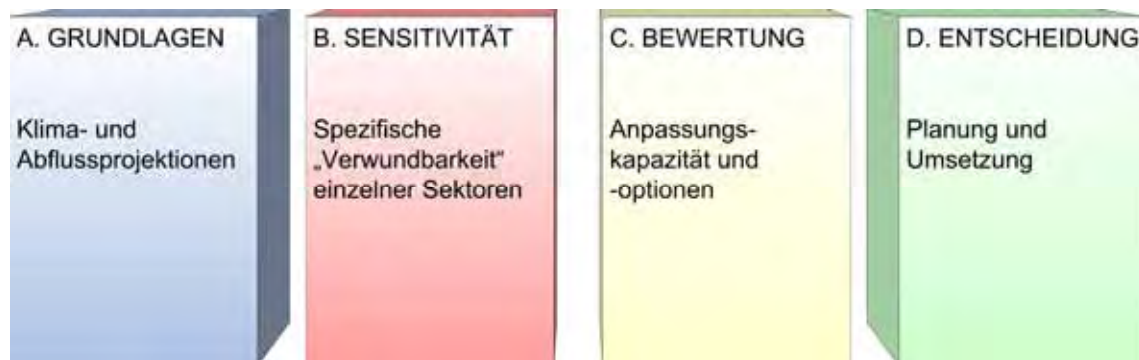


Abb. 3: Schema zur Erreichung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel.

Das Forschungsprogramm KLIWAS hat eine Laufzeit von fünf Jahren (2009-2013). Die nachfolgenden Ausführungen fußen auf dem Pilot-Projekt „KLIWAS - Hydrologie und Binnenschifffahrt“, das bereits seit 2007 grundlegende Konzepte und beispielhafte Ergebnisse zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Rhein und seine schiffbaren Nebenflüsse erarbeitet.

## 2 Datengrundlagen und Vorgehensweise

Die globale und regionale Klimamodellierung sowie die Klimafolgenforschung hat in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte erzielt. Jedoch sind die Ergebnisse aus prinzipiellen Gründen mit großen Unsicherheiten behaftet. Teils sind diese Unsicherheiten systeminhärent (aleatorisch, objektiv), teils durch unvollkommenes Wissen bedingt (epistemisch, subjektiv; vgl. Krahe et al., 2009 und dort zitierte Literatur). Die genannten Fortschritte beziehen sich auf die Bestimmung der Unsicherheiten bzw. auf Konzepte zum Umgang mit nicht bestimmbar Unsicherheiten beider Kategorien. So werden die aleatorischen Unsicherheiten durch Szenariotechniken bzw. eine größere Anzahl von Modellläufen, die probabilistische Analysen ermöglichen, abgeschätzt. Über den Einsatz verbesserter Modellierungskonzepte, geeignete Korrekturen des Bias dynamischer Klimamodelle sowie eine intensiven Validierung wird eine Bewertung der epistemischen Unsicherheiten möglich. Für beide Kategorien gilt:

- Aussagen zum Klimawandel und damit auch zu Klimafolgen werden immer eine gewisse Bandbreite und Unsicherheiten aufweisen.
- Den idealen Modelllauf gibt es nicht.
- Die Verwendung einzelner Modellläufe („Single Modell“-Ansatz) kann zu keinen belastbaren Aussagen von Klimafolgen führen.



- (d) Die Unsicherheiten und die daraus resultierende Bandbreite sind mit Ensembletechniken, wie beispielsweise Multi-Modell-Ansätzen sowie gezielten Störungen der Parameter bzw. der Anfangsbedingungen eines Modells bzw. einer Modellkette, abzuschätzen.

Richtungweisend sind in diesem Zusammenhang insbesondere das „Coupled Model Intercomparison Project“ (CMIP, 2009), das u.a. eine Vielzahl globaler Klimaprojektionen für die Sachstandsberichte des IPCC zusammenstellt (z.B. IPCC, 2007), sowie die europäischen Projekte PRUDENCE (2007) und ENSEMBLES (2009). Beispielsweise wurden ausgehend von ausgewählten globalen Projektionen eine Vielzahl regionaler Klimaprojektionen vorgelegt und Konzepte zu einer probabilistischen Be- und Auswertung der Modellergebnisse aufgezeigt.

Neben diesen gehen einige weitere, vornehmlich im Rahmen nationaler und länderbezogener Klima- und Klimafolgenprojekte erzielten Datengrundlagen in die Untersuchungen im Rahmen von KLIWAS ein. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Emissionsszenarien, globalen Klimamodelle, Regionalisierungsverfahren, Biaskorrekturverfahren und Wasserhaushaltsmodelle, die im Rahmen von KLIWAS vergleichend untersucht werden sollen.

Die bisher erzielten Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

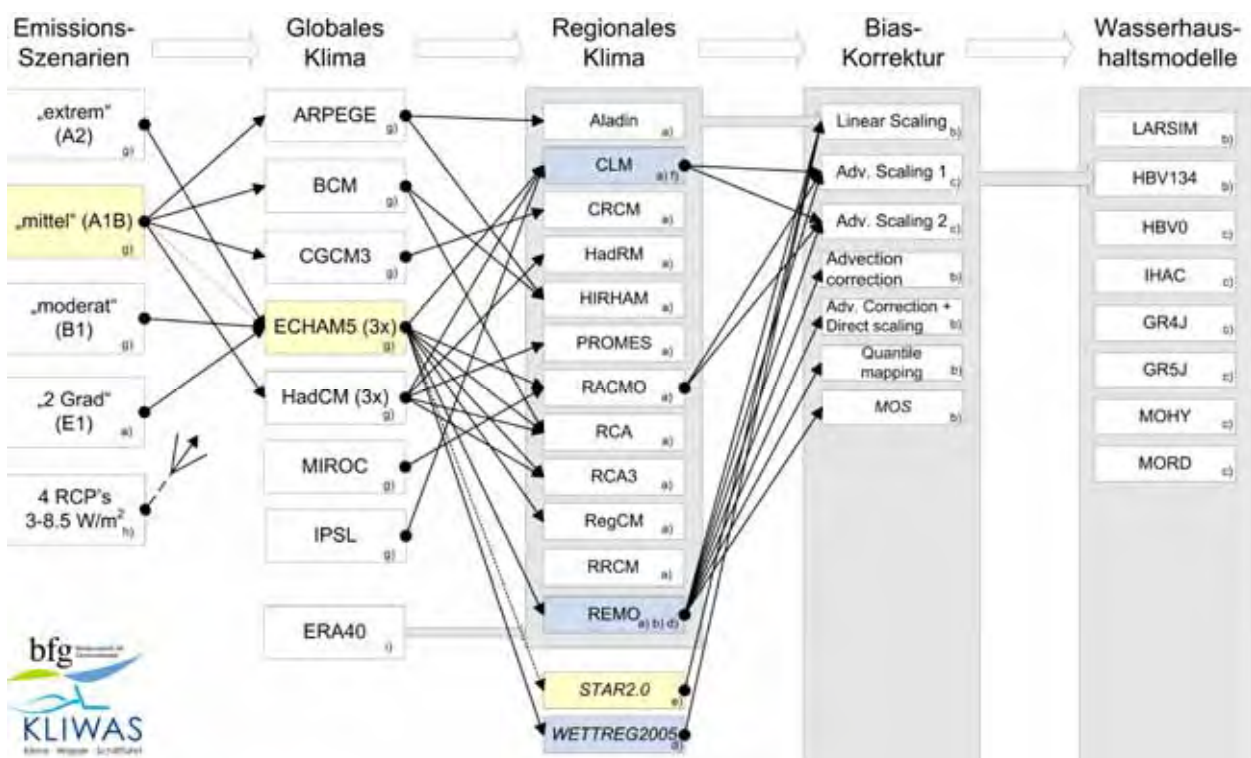


Abb. 4: Modellkette und jeweils verwendete Datengrundlagen für den in KLIWAS „Hydrologie und Binnenschifffahrt“ verfolgten Multi-Modell-Ansatz. Die Abfolge der gelben Boxen repräsentiert einen in der deutschen Forschungslandschaft stark verwerteten „Single Modell“-Ansatz. Die blau gekennzeichneten Modelle repräsentieren weitere in Deutschland gebräuchliche Regionalisierungsverfahren. Die grauen Boxen fassen Datengrundlagen zusammen, deren weitere Prozessierung einheitlich erfolgt (grauer Pfeil). Quellen: (a) EU-ENSEMBLES, (b) BMVBS-KLIWAS, (c) KHR-Rheinblick2050, (d) REMO\_UBA, (e) PIK-STAR, (f) BMBF-CLM, (g) CMIP3/IPCC\_AR4, (h) CMIP5/IPCC\_AR5, (i) ECMWF.

### 3 Bandbreiten: Bisherige Ergebnisse

Die vielfältigen Datengrundlagen zeigen aufgrund der genannten Unsicherheiten eine Bandbreite, die zusammengenommen die Aussageschärfe des derzeitigen Kenntnisstandes zum Klimawandel widerspiegelt. Die nachfolgenden Abbildungen 5 bis 8 illustrieren anhand der projizierten mittleren Niederschläge und Abflüsse die Bandbreiten entlang der in Abbildung 4 gezeigten Modellkette für:

- vier Emissionsszenarien,
- 18 globale Klimamodelle (Emissionsszenario SRES\_A1B; IPCC, 2007),
- 10 dynamische Downscalingverfahren (ERA-40-Antrieb) und
- 8 hydrologische Modelle.

#### Bandbreite der Emissionsszenarien

Die Bandbreite der Emissionsszenarien schließt neben den gebräuchlichen Marker-Szenarien des IPCC (Abbildung 5; Nakicenovic, et al., 2000) auch das neue E1-Szenario ein, das im Rahmen des Ensembles unter der hypothetischen Annahme erstellt wurde, dass das politisch angestrebte „2°C-Ziel“ erreicht wird (van Vuuren et al., 2007). Die CO<sub>2</sub>-Konzentrationen, die sich aus den Szenarien ableiten, liegen mit Ausnahme des E1-Szenarios bis Mitte des aktuellen Jahrhunderts noch relativ eng zusammen, fächern sich bis 2100 dann allerdings erheblich auf.

Die Frage, gemäß welchem Szenario sich die tatsächliche Entwicklung vollziehen wird, kann wissenschaftlich nicht beantwortet werden. Sie hängt u.a. von politischen Entscheidungen ab, die die Rahmenbedingungen für die globale Entwicklung und den Klimaschutz setzen. Auch die Antwort auf die Frage, welches Szenario für die Analyse von Klimafolgen und Anpassungsoptionen relevant ist, kann die Wissenschaft alleine nicht geben. Sie muss in Zusammenhang mit der Frage, welches Maß an Sicherheit und an volkswirtschaftlichem Aufwand sowie an Veränderungen des Naturhaushaltes eine Gesellschaft bereit ist zu akzeptieren, in der Politik behandelt werden. Aufgabe der Wissenschaft ist es, den Korridor möglicher Entwicklungen, die Sensitivitäten einzelner Schutzgüter auf Klimaänderungen sowie die Kosten möglicher Anpassungsmaßnahmen aufzuzeigen.

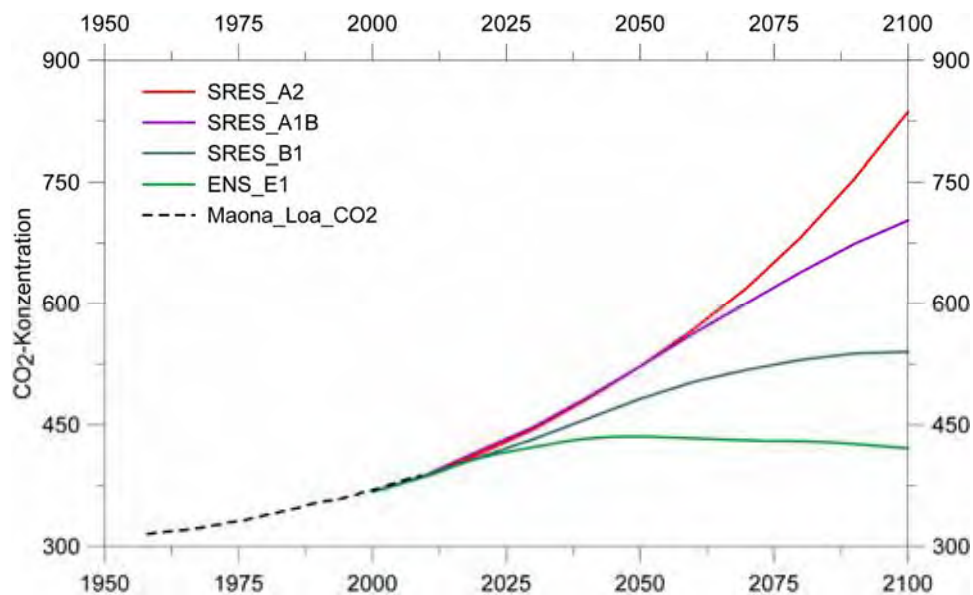


Abb. 5: Bandbreite gemessener und auf der Basis definierter Emissionsszenarien berechneter globaler CO<sub>2</sub>-Konzentrationen zwischen 1950 und 2100. Quellen: SRES (Nakicenovic, et al., 2000); ENS (van Vuuren et al., 2007, ENSEMBLES, 2009); Maona Loa (Tans, 2009).



### Bandbreite der globalen Klimamodelle

In Abbildung 6 sind die Änderungen der vieljährig gemittelten Niederschlagshöhen von 18 globalen Klimamodellen, die auf demselben Emissionsszenario beruhen, für das Rheingebiet im Zeitraum 1950-2100 dargestellt. Die Bandbreite ist sowohl auf die unterschiedlichen Modellkonzepte sowie auf der dem Klimasystem innewohnenden internen Variabilität zurückzuführen.

Für die Zukunft zeigt das Multimodell-Ensemble bis 2050 keine eindeutige Tendenz im erweiterten Rheingebiet (Abbildung 6). Erst gegen Ende des 21. Jahrhunderts gibt eine deutliche Mehrzahl der globalen Projektionen eine sommerliche Abnahme und eine winterliche Zunahme der Niederschläge wieder: Die Bandbreite weist je nach betrachtetem Halbjahr Änderungen von 0 bis etwa +/- 20% auf.

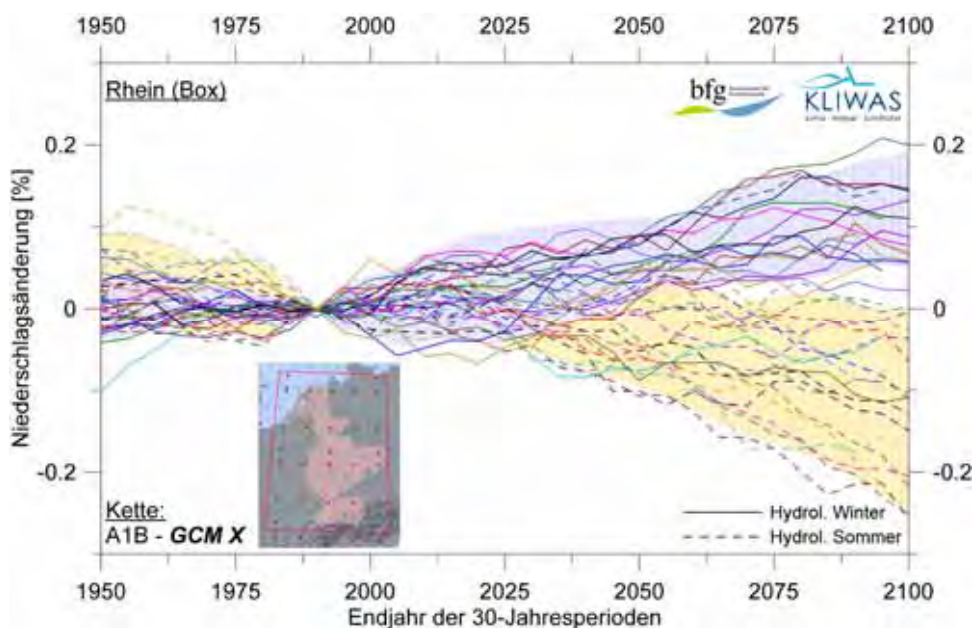


Abb. 6: Bandbreite der saisonalen Niederschlagsänderungen in der gekennzeichneten Box um das Rheingebiet zwischen 1950 und 2100 gemäß 18 globalen Klimamodellen des vierten Sachstandsberichts des IPCC unter Annahme des SRES\_A1B. Dargestellt sind Änderungen der Gebietsmittel relativ zur Periode 1961-1990 in fünfjährig gleitenden 30-Jahresmitteln. Aufgrund der unterschiedlichen Gitterweiten der einzelnen globalen Klimamodelle sind zwischen 3 und 49 Gitterpunkte (meist 9-20) in die Betrachtung eingeflossen. Modelle: CGCM3.1(T47), CNRM-CM3, CSIRO-Mk3.0, ECHO-G, FGOALS-g1.0, GFDL-CM2.0, GFDL-CM2.1, GISS-AOM, GISS-EH, UKMO-HadCM3, UKMO-HadGEM1, INM-CM3.0, INGV-SXG, IPSL-CM4, MIROC3.2(hires), ECHAM5/MPI-OM, MRI-CGCM2.3.2, CCSM3.

### Bandbreite der regionalen Klimamodelle

Die Bandbreite, die sich aus der Verwendung unterschiedlicher dynamischer Regionalisierungsverfahren ergibt, ist beispielhaft in Abbildung 7 anhand der sog. Validierungsläufe dargestellt. Hier wurden die regionalen Klimamodelle mit den selben globalen atmosphärischen Randbedingungen, den sog. Reanalysedaten ERA40, angetrieben, so dass die Bandbreite auf die spezifischen Eigenschaften der einzelnen dynamischen Klimamodelle zurückzuführen ist. Der Vergleich mit Beobachtungsdaten zeigt, dass der Jahresgang des Niederschlags überwiegend getroffen wird. Die systematischen Abweichungen (der sog. Bias) ist jedoch bei einigen Modellen erheblich, und variiert darüber hinaus von Monat zu Monat sowie in Abhängigkeit von der betrachteten Region. Bei der Bewertung des Bias ist anzumerken, dass auch die Niederschlagsmessungen insbesondere im Hochgebirgsraum systematische Messfehler im zweistelligen Prozentbereich aufweisen können (vgl. Richter, 1995).

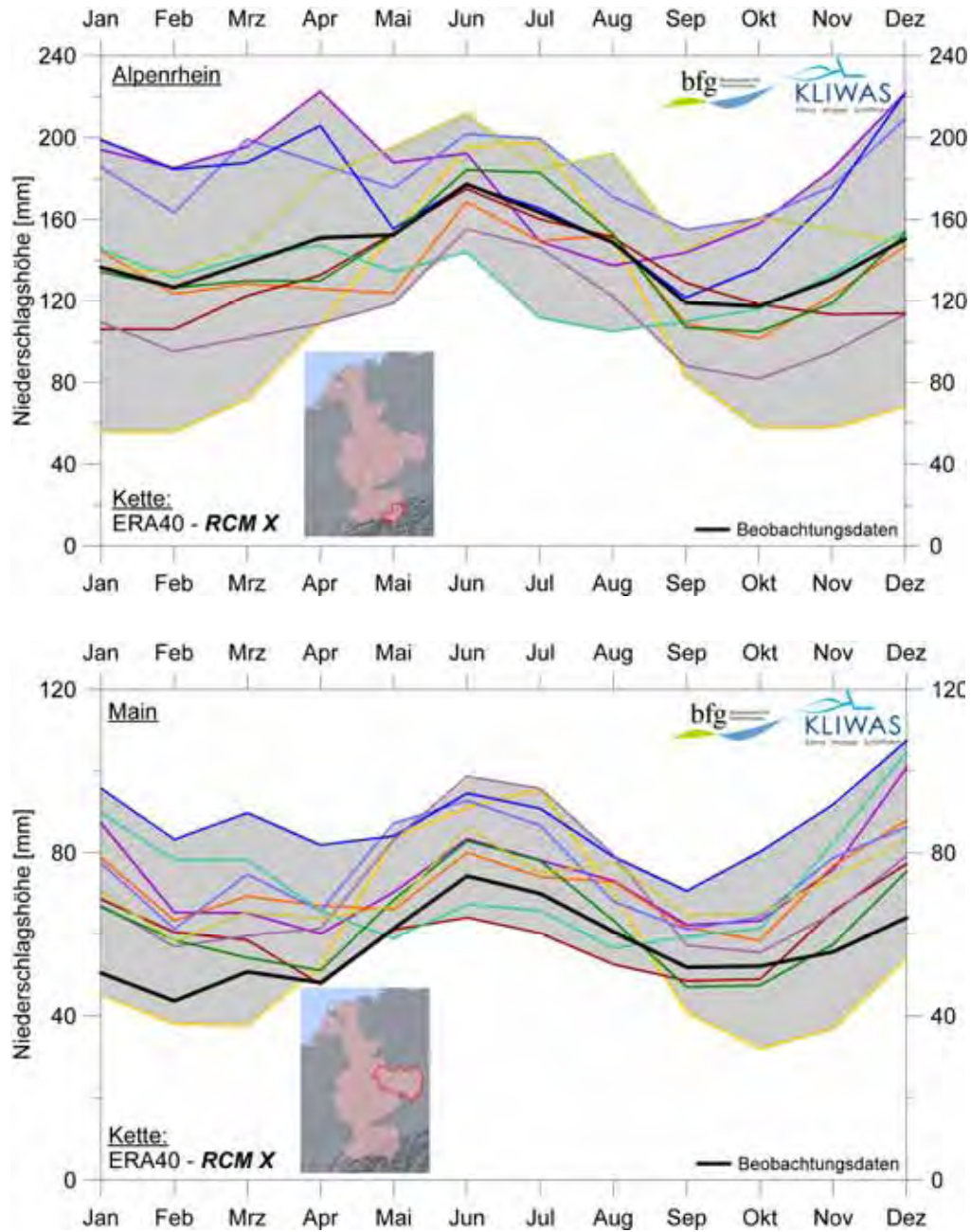


Abb. 7: Vieljährig (1971-2000) gemittelte monatliche Gebietsniederschlagshöhen in Teileinzugsgebieten des Rheins gemäß 10 unterschiedlichen dynamischen regionalen Klimamodellen (ENSEMBLES, 2009) bei einheitlichem Antrieb mit Reanalysedaten. Die schwarze Linie beruht auf Beobachtungsdaten. Alpenrhein ( $A_{E0} = 6100 \text{ km}^2$ ; oben); Main ( $A_{E0} = 27200 \text{ km}^2$ ; unten). Modelle: ALADIN, DMI\_HIRHAM, CLM, HADRM, REGCM, RACMO, METNO\_HIRHAM, CRCM, REMO, RCA. Quelle: Bülow et al (2009), Krahe et al. (2009)

#### Bandbreite der Wasserhaushaltsmodelle

Auch die Wahl unterschiedlicher hydrologischer Modelle erzeugt eine Bandbreite, wenngleich in relativ geringem Ausmaß. Abbildung 8 stellt die Simulationsergebnisse von 8 Wasserhaushaltsmodellen gegenüber, die mit beobachteten hydrometeorologischen Daten angetrieben wurden. Die Bandbreite resultiert teilweise aus den unterschiedlichen hydrologischen Modellen und teilweise (im Fall von LARSIM18) aus unterschiedlichen meteorologischen Beobachtungsdaten, mit denen die Modelle angetrieben wurden. Sie beträgt für den dargestellten Pegel Köln





je nach Monat zwischen etwa 300 und 650 m<sup>3</sup>/s. Im hydrologischen Sommerhalbjahr beträgt sie im Mittel etwa 400 m<sup>3</sup>/s, im hydrologischen Winterhalbjahr knapp 450 m<sup>3</sup>/s.

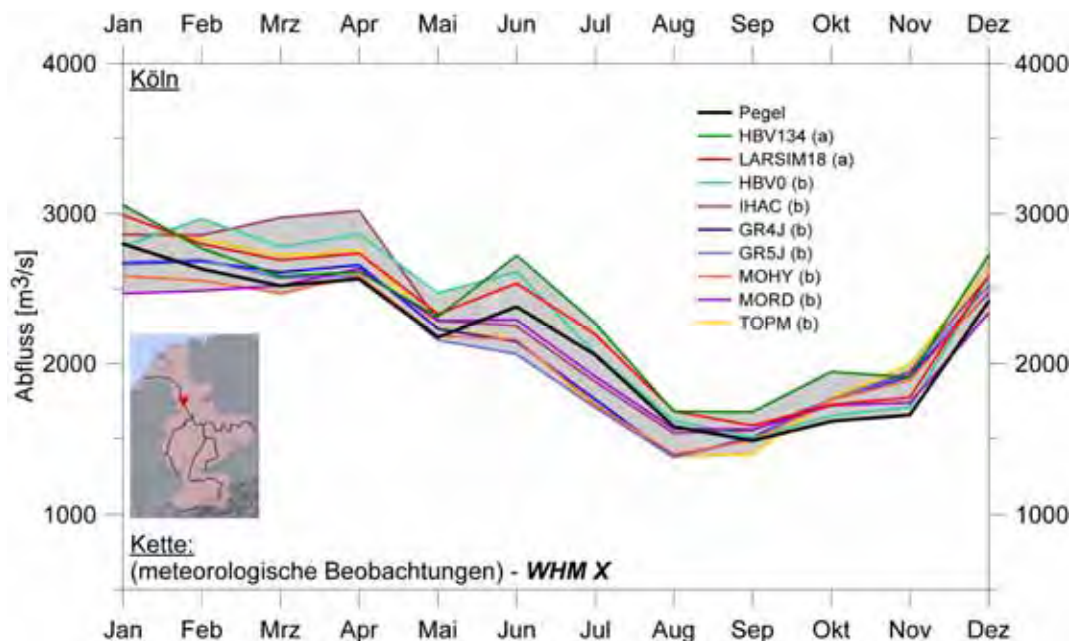


Abb. 8: Vieljährig (1980-1995) gemittelte monatliche Abflüsse am Pegel Köln gemäß 8 unterschiedlichen Wasserhaushaltsmodellen bei weitgehend einheitlichem hydrometeorologischem Antrieb (Ausnahme: LARSIM18). Die schwarze Linie beruht auf Pegeldata. Datenquellen: a) KLIWAS, b) RheinBlick2050 (Görgen et al., 2010 in Vorbereitung).

Bezogen auf die gesamte Modellierungskette bleibt festzuhalten, dass die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen zum Teil erheblich sind und sich entlang der Modellkette kaskadierend aufaddieren können (vgl. Viner et al., 2002). Krahe et al. (2009) legten ein Auswertungsschema vor, mit dem verschiedene Unsicherheitsquellen innerhalb der Modellkette *Emissionsszenario* → *Globales Klimamodell* → *Regionales Klimamodell* → *Wasserhaushaltsmodell* in ihrer relativen Bedeutung für die Bandbreite der Abflussprojektionen ausgewiesen werden können. Die Datengrundlagen der genannten Untersuchung sind noch zu ergänzen, sowie einer weiteren Analyse und Bewertung zu unterziehen. Es zeigt sich jedoch, dass bei der Diskussion der möglichen Änderung im Abflussverhalten großer Flüsse in Folge des globalen Klimawandels weder die dem Klimasystem innewohnende Variabilität noch die sich aus der Modellierung des globalen Klimas ergebende Unsicherheit vernachlässigt werden darf. Die Unsicherheit, die aus der Wahl der Regionalisierungsverfahren resultiert, scheint im Vergleich dazu gering.

#### 4 Abflussprojektionen: Bisherige Ergebnisse

Kontroll- und Validierungsexperimente machen deutlich, dass die Ergebnisse aus verschiedenen Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen erheblich von den Beobachtungen abweichen können (vgl. z.B. Abbildung 7). Krahe et al. (2009) werteten diesen sogenannten Bias für verschiedene Kombinationen der in Abbildung 4 aufgeführten Modelle unter hydrologischen Gesichtspunkten in 134 Teileinzugsgebieten des Rheins aus. Es zeigt sich, dass die Größenordnung dieser systematischen Fehler eine direkte Verwendung der simulierten hydrometeorologischen Daten als Randbedingung in hydrologischen Modellen unmöglich macht. In vielen Fällen ergeben sich bereits im Kontrollzeitraum unrealistische hydrologische Systemzustände. Da zu befürchten ist, dass entsprechend auch die Änderungssignale der Ab-

flussprojektionen nicht belastbar wären, müssen die Klimavariablen für die Verwendung in hydrologischen Modellen vorab korrigiert werden.

Wie in Abbildung 4 in der Spalte „Bias-Korrektur“ angedeutet, existieren zahlreiche Korrekturverfahren, mit denen die Ergebnisse der verschiedenen Kombinationen von globalen und regionalen Klimamodellen nachbehandelt werden können. Die verschiedenen Verfahren sind jeweils für unterschiedliche Anwendungsfälle optimiert. Einige sind leicht implementierbar (z.B. das „Linear Scaling“; Lenderink et al., 2007), aber nur für die Korrektur von vieljährigen monatlichen bis jährlichen Mittelwerten in größeren Gebietsaggregaten geeignet, andere stellen einen Stationsbezug her, sind aber relativ aufwändig (z.B. Regressionsverfahren wie MOS; Kusserow et al., 2009). Die in Abbildung 4 genannten Verfahren werden in aktuellen Programmen und Projekten (u.a. KLIWAS, AdaptAlp, RheinBlick 2050) für regionale Klimaprojektionen angewendet und hinsichtlich ihrer Eignung für die wasserwirtschaftliche Klimafolgenforschung vergleichend untersucht. Eine wesentliche Anforderung an alle Verfahren ist, dass Sie die epistemischen Unsicherheiten und damit die Bandbreite der Klimasimulationen im Kontrollzeitraum reduzieren.

Dennoch bleibt auch nach der Korrektur eine Bandbreite von Informationen erhalten. Dies zeigten Carambia & Frings (2009) anhand eines (noch unvollständigen) Ensembles von Abflussprojektionen. Abbildung 9 stellt eine Auswertung der mittleren saisonalen Abflüsse am Pegel Raunheim (Main) für verschiedene Kopplungen von Emissionsszenarien, globalen Klimamodellen und Regionalisierungsverfahren für den Kontrollzeitraum, die nahe und die ferne Zukunft dar.

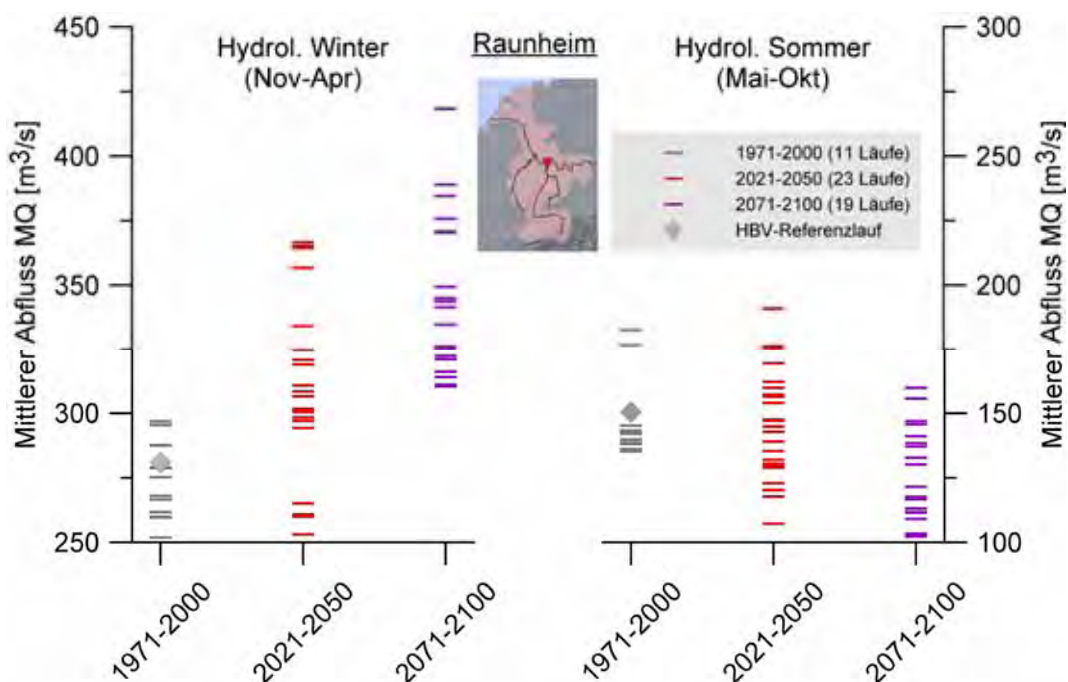


Abb. 9: Bandbreite der vieljährig gemittelten halbjährlichen Abflüsse am Pegel Raunheim (Main) basierend auf einem (noch unvollständigen) Ensemble von Abflussprojektionen. Die zugrundeliegenden hydrometeorologischen Projektionen der Klimamodelle wurden mittels eines „Linear Scaling“ korrigiert (s. Lenderink et al., 2007; Krahe et al., 2009). Folgende Antriebe des Wasserhaushaltsmodells HBV134 (Eberle et al., 2005) wurden verwendet (vgl. Abbildung 4 und Krahe et al., 2009):

A1B: HADCM-CLM und -HADRM, BCM-HIRHAM, ECHAM5-r1-CLM, -r2-CLM, -r1-REMO-UBA, -r2-REMO-BFG, -r3-REMO-ENSEMBLES, -STAR-feucht, -STAR-mittel, -STAR-trocken, r1-WETTREG-feucht, -r2-WETTREG-mittel, -r1-WETTREG-trocken; A2: ECHAM5-r1-REMO-UBA, -WETTREG-50, WETTREG-60, WETTREG-70; B1: ECHAM5-r1-CLM, -r1-REMO-UBA, -r1-WETTREG-50, WETTREG-60, WETTREG-70.



Bekannte Tendenzen (sommerliche Abflussabnahme, winterliche Zunahme) zeichnen sich insbesondere in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts ab. Quantitative Aussagen sind aber nicht ohne weiteres möglich. Zukünftige Arbeiten innerhalb des Forschungsprogramms KLIWAS schließen probabilistische Auswertungen des Ensembles ein. Die Ergebnisse werden so hinsichtlich einer „subjektiven“ - d.h. auf das vorliegende Ensemble bezogenen Wahrscheinlichkeit - interpretierbar. Objektiv probabilistische Aussagen sind aus prinzipiellen und praktischen Gründen (Szenariotechnik, begrenztes Ensemble) nicht möglich.

Neben der Anwendung statistischer Biaskorrekturverfahren auf die Ergebnisse der Klimamodelle, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Bestimmung der relativen Änderungen vieljähriger Abflusskennwerte der Zukunftsperiode in Bezug auf einen Kontrollzeitraum („Ist-Klima“) mit einer Reduzierung der Fehler einer Modellkette einhergeht. Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, ist dies jedoch nicht automatisch mit einer Reduzierung der Bandbreite und damit einer Präzisierung der Zukunftsaussagen verbunden. Das dargestellte Ensemble der Änderungssignale für Köln lässt als einzige Gemeinsamkeit aller Projektionen eine winterliche Abflusszunahme für den Zeitraum 2021-2050 erkennen. Aktuell wird das Ensemble durch die weiteren in Abbildung 4 skizzierten Modellläufe ergänzt.

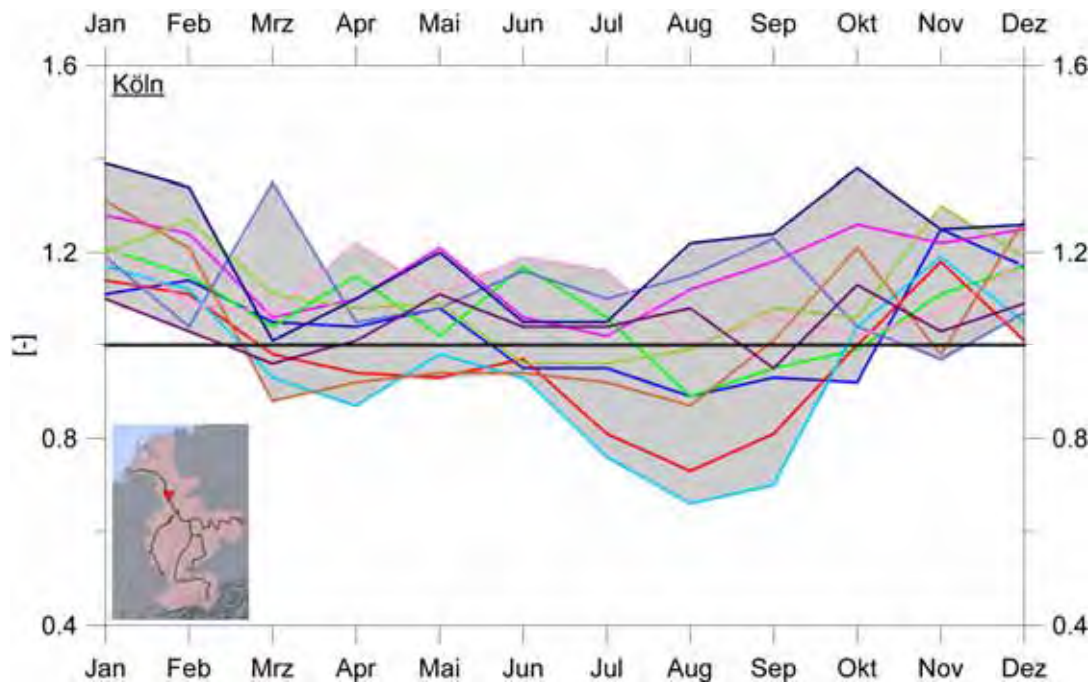


Abb. 10: Bandbreite der mittleren monatlichen Abflussänderungssignale am Pegel Köln für den Zeitraum 2021-2050 (Referenzperiode: 1971-2000; Krahe et al. 2009). Datenquellen: ENSEMBLES, BMBF-CLM. Folgende Modellläufe liegen zugrunde (vgl. Abbildung 4 und Krahe et al., 2009):

A1B: HADCM-CLM und -HADRM, BCM-HIRHAM, ECHAM5-r1-CLM, -r2-CLM, -r1-REMO-UBA, -r2-REMO-BFG, -r3-REMO-ENSEMBLES; A2: ECHAM5-REMO-UBA; B1: ECHAM5-r1-CLM, -r1-REMO-UBA.

## 5 Schlussbemerkung

Trotz aller Unsicherheiten bieten insbesondere die dynamischen Klimamodelle gegenüber einer einfachen Fortschreibung des gegenwärtigen Zustandes bzw. historischer Trends einen deutlichen Mehrwert, insbesondere, wenn es um Projektionen der fernen Zukunft geht. Die Heraus-

forderung besteht darin, die Ergebnisse für die verschiedenen Anwendergruppen interpretierbar und für die Entscheidungsfindung nutzbar zu machen. Wichtige Schritte hierzu sind

- (a) die Validierung der Modelle anhand wasserwirtschaftlich relevanter Raumeinheiten und Kenngrößen,
- (b) die Quantifizierung der Unsicherheiten und der Bandbreiten mit einer Zuordnung zu den verschiedenen epistemischen und aleatorischen Unsicherheitsquellen,
- (c) die Nutzung verschiedener Regionalisierungsverfahren,
- (d) die Korrektur systematischer Modellfehler (Bias) der Klimamodelle und
- (e) die problembezogene Aufbereitung und zielgruppengerechte Kommunikation der wissenschaftlichen Ergebnisse.

Insbesondere der letzte Punkt(e) bedarf noch weitergehender Analysen, in die jenseits der eigentlichen Klimafolgenforschung insbesondere auch eine Abwägung der Gefährdungspotentiale, des Nutzens etwaiger Gegenmaßnahmen und ihrer Kosten eingehen muss. Diese Analysen sind nicht ohne Beteiligung der für die jeweiligen Gesellschaftsbereiche zuständigen Interessenvertreter (Stakeholder) und politischen Entscheidungsträger möglich.

Der Wissenschaft fällt die verantwortungsvolle Aufgabe zu, Grundlagen für eine rational begründete Entscheidung zu schaffen. Sie muss die wissenschaftliche Bearbeitung der Thematik vorantreiben und den jeweils aktuellen Kenntnisstand der nationalen und internationalen Klima- und Klimafolgenforschung den potentiell Betroffenen bzw. den Entscheidungsträgern in einer angemessenen und sachlichen Weise zugänglich machen. Dabei muss sie sich von den allgemeinen Prinzipien wissenschaftlicher Arbeit leiten lassen, d.h. u.a. die heute verfügbaren naturwissenschaftlichen Methoden nach den Regeln der Kunst (*lege artis*) anwenden, alle Ergebnisse konsequent selbst anzweifeln, Resultate dokumentieren und Primärdaten archivieren um Nachprüfbarkeit zu gewährleisten (DFG, 1998).

Hinsichtlich der Kommunikation des Kenntnisstandes zum Klimawandel und seiner Folgen muss die heute häufig überzeichnende Darstellung des Themas durch Medien (und Teilen der Wissenschaft) in Einklang gebracht werden mit einem Wissenschaftsverständnis im oben beschriebenen Sinne (Abbildung 11). An die Stelle pauschaler und z.T. dramatischer Aussagen müssen rational begründete Beurteilungen für einzelne potentiell verwundbare Sektoren treten. KLIWAS ist bestrebt, mit einem Fokus auf die Verkehrswasserwirtschaft einen entsprechenden Beitrag für die Klimafolgenforschung zu leisten.

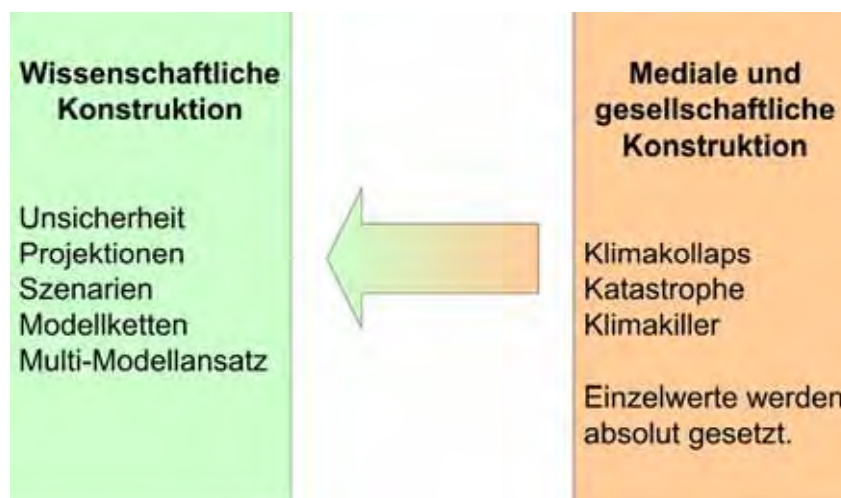


Abb. 11: Die Kommunikation des Themas „Anpassung an den Klimawandel“ muss versachtlicht werden.



## 6 Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse resultieren aus dem Pilotprojekt „KLIWAS - Hydrologie und Binnenschifffahrt“, welches im Rahmen des Forschungsprogramms KLIWAS ([www.kliwas.de](http://www.kliwas.de) des BMVBS gefördert wird (Projekt KLIWAS 4.01).

Die ENSEMBLES Daten, die in diesem Projekt benutzt werden, sind im Rahmen des EU FP6 Integrated Project ENSEMBLES (Contract number 505539) erstellt worden. Die REMO-UBA und WETTREG Daten wurden vom MPI-M in Hamburg und der Firma CEC Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes erstellt. Die CLM Klimaprojektionen wurden im Rahmen des BMBF- Förderschwerpunkts „klimazwei – Forschung für den Klimaschutz und Schutz vor Klimawirkungen“ berechnet. Wir bedanken uns bei den Projektförderern und bei den beteiligten Projektnehmern für die Unterstützung bei der Bereitstellung der Klimaprojektionsdaten. Weiterhin danken wir Herrn Prof. Gerstengarbe (PIK) für die Bereitstellung der STAR-Klimaprojektionsdaten.

Für die Bereitstellung der hydrologischen und meteorologischen Beobachtungsdaten sei den wasserwirtschaftlichen Behörden im internationalen Rheineinzugsgebiet sowie den jeweiligen nationalen Wetterdiensten gedankt.

## 7 Literatur

- BMVBS (2007): Schifffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels - Bestandsaufnahme. 58 S.
- BMVBS (2009): KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Tagungsband der ersten KLIWAS - Statuskonferenz. 166 S.
- Bülow, K., Jacob, D., Tomassini, L. (2009): Vergleichende Analysen regionaler Klimamodelle für das heutige und zukünftige Klima. In: BMVBS, 2009: KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Tagungsband der ersten KLIWAS - Statuskonferenz. S. 96-105.
- Bundeskabinett (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. URL: [www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php](http://www.bmu.de/klimaschutz/downloads/doc/42783.php)
- Carambia, M., Frings, R. (2009): Abflussszenarien für den Rhein des 21. Jahrhunderts. In: BMVBS, 2009: KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Tagungsband der ersten KLIWAS - Statuskonferenz. S. 105-109.
- CMIP (2009): Coupled Model Intercomparison Project. URL: <http://cmip-pcmdi.llnl.gov/>
- DFG (1998): Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis. Denkschrift der DFG-Kommission "Selbstkontrolle in der Wissenschaft" der Deutschen Forschungsgemeinschaft. Wiley VCH. 85 S.
- Eberle, M., Buitefeld, H., Wilke, K., Krahe, P. (2005): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part III – Daily HBV Model for the Rhine Basin. Bericht BFG-1451. Koblenz
- ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. Abschlussbericht ENSEMBLES. 164 S.
- European Communities (2009): River basin management in a changing climate – a Guidance document No. 24. 134 S.
- Görgen, K., Beersma J., Boudhria, H., Brahma, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Kwadijk, J., Nilson, E., Perrin, C., Pfister, L., Schädler, B., Volken, D. (2010, in Vorbereitung): RheinBlick2050 – Ein grenzübergreifend abgestimmtes Vorgehen zur Ableitung von Klima- und Abflussprojektionen für den Rhein. Bericht der Kommission zur Hydrologie des Rheins (KHR).
- Ickert, L., Matthes, U., Rommerskirchen, E., Weyand, E., Schlesinger, M., Limbers, J. (2007): Abschätzung der langfristigen Entwicklung des Güterverkehrs in Deutschland bis 2050. Schlussbericht. Basel. 141 S.
- IPCC (2007): Fourth Assessment – Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contri-

- bution of Working Group I of the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., Miller, H. L. (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Krahe, P., Nilson, E. (2009): Von der Klimaprojektion zum hydrologischen Szenario: Methodische Aspekte. In: BMVBS, 2009: KLIWAS - Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland - Tagungsband der ersten KLIWAS - Statuskonferenz. S. 109-114.
- Krahe, P., Nilson, E., Carambia, M., Maurer, T., Tomassini, L., Bülow, K., Jacob, D., Moser, H. (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 5/2009. S. 316-331.
- Kusserow, B., Hense, A., Römer, U. (2009): Statistische Nachbehandlung von regionalen Klimasimulationen. Interner Bericht der BfG im Rahmen von KLIWAS 4.01. 36 S.
- Lenderink, G., Buishand T. A., Van Deursen, W. (2007): Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. Hydrology & Earth System Sciences, 11(3), S. 1145-1159.
- Moser, H., Krahe, P., Maurer, T., Nilson, E. (2008): Wasserstraßen - Handlungsoptionen für Wirtschaft und Binnenschifffahrt. Beitrag zum Symposium „Klimaänderung - Was kann die Wasserwirtschaft tun?“ am 24./25 Juni 2008 in Nürnberg. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA (FgHW). Heft 24.08 (ISBN: 978-3-940173-97-3)
- Nakicenovic, N., Davidson, O., Davis, G., Grübler, A., Kram, T., Lebre La Rovere, E., Metz, B., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Sankovski, A., Shukla, P., Swart, R., Watson, R., Dadi, Z. (2000): IPCC Special report on Emission Scenarios. Summary for Policy-makers. ISBN: 92-9169-113-5. 27 S.
- PRUDENCE (2007): Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects – PRUDENCE EVK2-CT2001-00132. Final Report. 269 S.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Meßfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, 93 S.
- Tans, P. (2009): Trends in Atmospheric Carbon Dioxide - Mauna Loa. NOAA/ESRL. URL: [www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/](http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/)
- van Vuuren, D. P., den Elzen, M. G. J., Lucas, P. L., Eickhout, P., Strengers, B. J., van Ruijven, B., Wonink, S., van Houdt, R. (2007): Stabilizing greenhouse gas concentrations at low levels: an assessment of reduction strategies and costs. Climatic Change. 81. S. 119-159.
- Viner, D. (2002): A qualitative assessment of the sources of uncertainty in climate change impacts assessment studies. In: Beniston, M. (Hrsg.): Climatic Change. 10. Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management. Kluwer Academic Publishers. The Netherlands. S. 139-149.



## CCHydro – Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserressourcen und die Gewässer in der Schweiz

David Volken  
BAFU, Schweiz

### 1 Einleitung

Die Schweiz gilt als Wasserschloss Europas und besitzt auf ihrer gesamten Fläche verteilt eine Wasserreserve von 230 Milliarden Kubikmeter (Gletscher, Seen und Grundwasser, Abbildung 1).

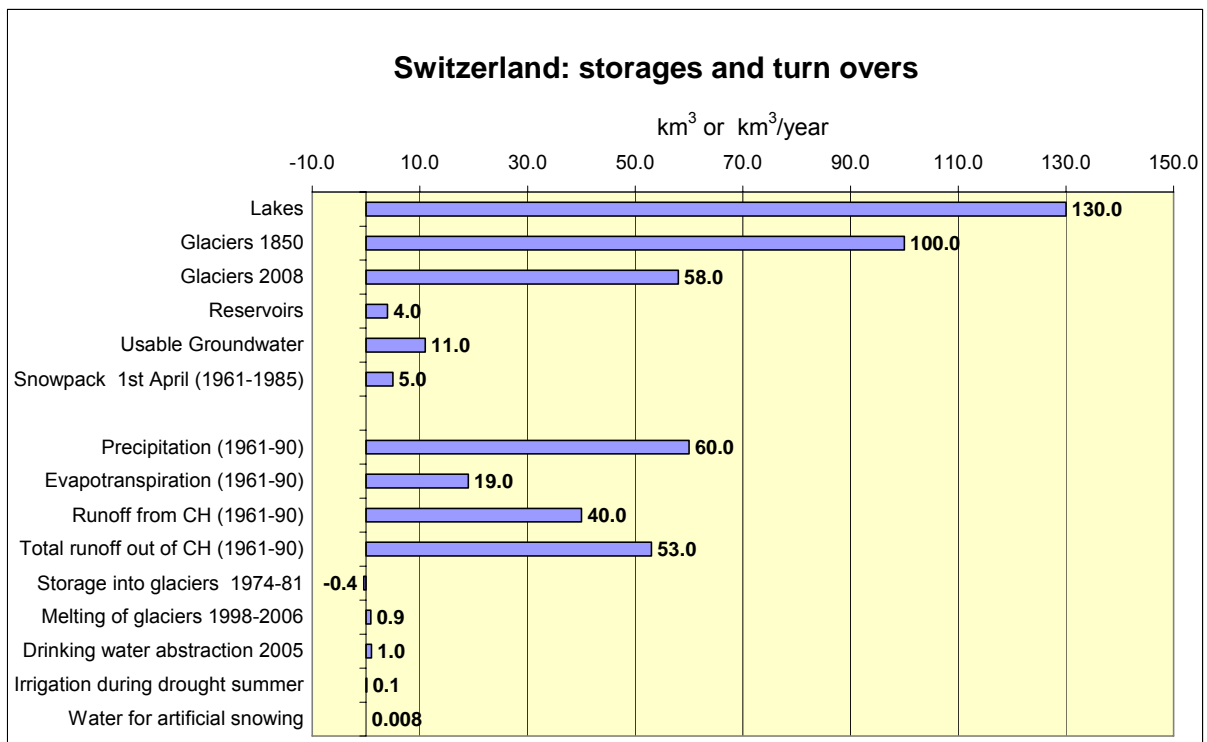


Abb. 1: Schweizer Wasserreserven der verschiedenen Speicher, jährliche Umsätze der Wasserhaushaltskomponenten, sowie jährlicher Wasserverbrauch für verschiedene Nutzungen.

Dieses Volumen gleichmäßig auf die Schweiz verteilt ergäbe einen See von 5,6 m Tiefe. Im 20. Jahrhundert wurden in der Schweiz jährlich im Durchschnitt 1429 mm Niederschlag beobachtet. Davon sind rund 31 Prozent, also 448 mm pro Jahr verdunstet. Da in dieser Zeit die Gletscher stark zurückgeschmolzen sind, haben sie jährlich etwa 9 mm zum Abfluss beigetragen, so dass sich dieser auf 990mm pro Jahr erhöhte (Abbildung 2). Trotz dieses Wasserreichtums existieren in der Schweiz bis heute keine umfassenden Modellierungen des hydrologischen Kreislaufes, weder für das gesamte Territorium der Schweiz noch für ihre Flussgebiete und ihre kleineren und mittleren Einzugsgebiete, basierend auf moderne hoch aufgelöste Klimaszenarien. In verschiedenen Publikationen sind hauptsächlich qualitative Aussagen über die Auswirkungen in Bezug auf Hochwasser (KOHS, 2007), Niedrigwasser und Wasserwirtschaft (OcCC, 2007) gemacht worden. Quantitativen Aussagen bezüglich Veränderung der Hoch- und Niedrigwasser sind nicht verfügbar. Ebenfalls sind heute in der Schweiz nur sehr wenige verlässliche quantitative Aussagen bezüglich Veränderung der Eisreserven und der Abflüsse stark vergletschelter Einzugsgebiete vorhanden. Insbesondere fehlen diesbezügliche Untersuchungen der großen Gletscher.





Abb 2: Wasserhaushalt der Schweiz, Mittelwerte für das 20. Jahrhundert

Ziel des BAFU-Projekt CCHydro (Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz) ist es, basierend auf den heutigen Klimaszenarien, für die verschiedenen Klimaregionen, Höhenstufen und geomorphologischen Ausprägungen in der Schweiz zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufes und der Abflüsse für die Zeitperiode bis 2050 zur Verfügung zu stellen. Darauf basierend können Analysen der Veränderungen der Abfluss-Extremwerte (Hoch- und Niedrigwasser), der Wasserressourcen und ihrer jahreszeitlichen Verteilung (Regimes) der Grundwasserinfiltration und des Bodenwassergehaltes sowie der Wassertemperatur durchgeführt werden.

## 2 Projektmodule CCHydro

Das Projekt CCHydro gliedert sich in 7 Projektmodule, welche nachfolgend genauer beschrieben werden:

- (1) Klimaszenarien für die Schweiz bis 2050
- (2) Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete
- (3) Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten
- (4) Klimaänderung und Niedrigwasser
- (5) Abflussmodellierung von Schweizer Gletschern
- (6) Klimaänderung und Hochwasser
- (7) Klimaänderung und Wassertemperatur (Pilotstudie)

Die Projektmodule (1) bis (5) wurden im Herbst 2008, Projektmodule (6) und (7) im Herbst 2009 gestartet. Die Ergebnisse zu den Klimaszenarien für die Schweiz bis ins Jahr 2050 liegen Ende 2009 vor und dienen als Grundlage zur hydrologischen Modellierung bei den Projektmodulen (2) bis (7). Der Projektabschluss von CCHydro ist im Dezember 2011 geplant. CCHydro liefert zudem einen Beitrag zum KHR Projekt Rheinblick 2050 und zum Interreg Projekt AdaptAlp WP4.

### 2.1 Klimaszenarien für die Schweiz bis 2050

Hydrologische Klimastudien in kleinen Einzugsgebieten benötigen Informationen zur Klimaänderung mit einer hohen zeitlichen und räumlichen Auflösung. Regionale Klimamodelle (RCMs)

mit ihrer momentanen horizontalen Auflösung von rund 25 km sind zurzeit die beste verfügbare Datenquelle. Diese Auflösung ist jedoch einerseits immer noch zu grob für kleinskalige hydrologische Klimastudien, und andererseits weisen RCM-Daten gegenüber Messdaten beträchtliche Fehler auf. Es ist deshalb notwendig, RCM-Daten mit statistischen Verfahren aufzubereiten, bevor sie für hydrologische Klimastudien verwendet werden. Bisher stellten die Klimaszenarien aus dem EU-Projekt PRUDENCE die aktuellsten Prognosen dar, welche für die Schweiz aufbereitet wurden. Für CCHydro werden nun in diesem Modul (1) die Klimaszenarien des EU-Folgeprojektes ENSEMBLE verwendet. Diese Klimaszenarien stellen den neuesten Stand der regionalen Klimamodellierung dar. Sie werden mit Hilfe statistischer Methoden aufbereitet und dienen als Grundlage für die hydrologische Modellierung bei den Projektmodulen (2) bis (7).

## **2.2 Natürlicher Wasserhaushalt der Schweiz und ihrer bedeutendsten Grosseinzugsgebiete**

Dieses Projektmodul befasst sich mit einem innovativen gesamtschweizerischen hydrologischen Simulationsexperiment. Es wird angestrebt, die klima- und landnutzungsbedingten Veränderungen des natürlichen Wasserhaushalts der Schweiz gegenüber der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts für die kommenden Jahrzehnte zu bestimmen und statistisch auszuwerten. Das Modul wird in drei Teilprojekte gegliedert, um eine bestmögliche Anknüpfung an vergangene und gegenwärtige Projekte zu ermöglichen und dem „state of the art“ gerecht zu werden. Das Teilprojekt Hydro befasst sich mit der Realisierung des hydrologischen Experiments und der Verknüpfung mit den Klima-, Waldentwicklungs-, und Gletscherschwundszenerarien. Bei dem Teilprojekt GLAC geht es um die Bestimmung der veränderten Gletscherflächen für die gesamte Schweiz unter Berücksichtigung des individuellen Verhaltens der Gletscher. Im Teilprojekt WALD werden die Veränderungen der Waldflächen sowie der Veränderungen des Mischungsgrades von Laub- und Nadelbäumen für die ganze Schweiz ermittelt.

## **2.3 Klimaänderung und Wasserhaushalt in sensitiven Bilanzierungsgebieten**

Ziele dieses Moduls sind die Ermittlung der klimasensitiven Einzugsgebiete einerseits und die Quantifizierung der Änderungen des Wasserhaushalts andererseits (Teilprojekt A). Hiervon ausgehend werden Detailanalysen in repräsentativen, klimasensitiven Einzugsgebieten durchgeführt, die insbesondere die Veränderungen im Hochwasserverhalten untersuchen sollen, sowie die Inputsensitivität in Bezug auf veränderte Gletscher- und Waldflächenanteile (Teilprojekt B). Untersuchungsgegenstand sind ca. 200 Einzugsgebiete mit einer mittleren Grösse von 150 km<sup>2</sup>, für welche mit dem prozessorientierten hydrologischen Modellsystem PREVAH (Precipitation-Runoff-EVAporation-Hydrotop based-model, Viviroli et al. 2007) Simulationen in stündlicher Auflösung erstellt werden.

## **2.4 Klimaänderung und Niedrigwasser**

Da bisher in der Schweiz meist genügend oder sogar viel Wasser verfügbar war, wurde die Erforschung der Niedrigwasserverhältnisse und der Niedrigwasserprozesse eher stiefmütterlich behandelt. Die Ereignisse im Jahr 2003 haben aber gezeigt, dass auch in der wasserreichen Schweiz ein gespanntes Verhältnis der Wassernutzung mit den natürlichen Kreisläufen entstehen kann. Das Ziel dieses Moduls ist es, in möglichst vielen repräsentativen Einzugsgebieten der Schweiz mögliche Auswirkungen des Global Change auf die Niedrigwasserverhältnisse zu untersuchen. Dies muss prozessorientiert, ausgehend von einer umfassenden Analyse der Niedrigwasserverhältnisse, erfolgen. Es werden einerseits jene Gebiete bzw. jene Typen von Einzugsgebieten identifiziert, welche besonders sensitiv auf eine Veränderung der Umweltbedingungen reagieren; andererseits wird eine Quantifizierung dieser Veränderungen angestrebt. Im Mittelpunkt der Analysen stehen Einzugsgebiete, deren Abflussverhältnisse nicht durch die Schnee- und Gletscherschmelze dominiert werden, um die Auswirkungen des veränderten Klimas auf die Hydrologie direkt studieren zu können. Im Weiteren interessieren hauptsächlich



Niedrigwasserphasen die zu Konflikten mit der bestehenden Nutzung führen. Deswegen werden ausschließlich Niedrigwasser im Sommer (1. Mai bis 31. Oktober) untersucht.

## 2.5 Abflussmodellierung von Schweizer Gletschern

Für Studien über den Wasserhaushalt in alpinen Einzugsgebieten sind zuverlässige Angaben über das Eisvolumen eines Gletschers und die Verteilung davon unerlässlich (Huss et al., 2008 b). Obwohl in den letzten Jahren die Schweizer Gletscher sehr viel Eis durch verstärkte Schmelze verloren haben (Abbildung 3), liegen in den Schweizer Alpen noch bedeutende Eismassen.

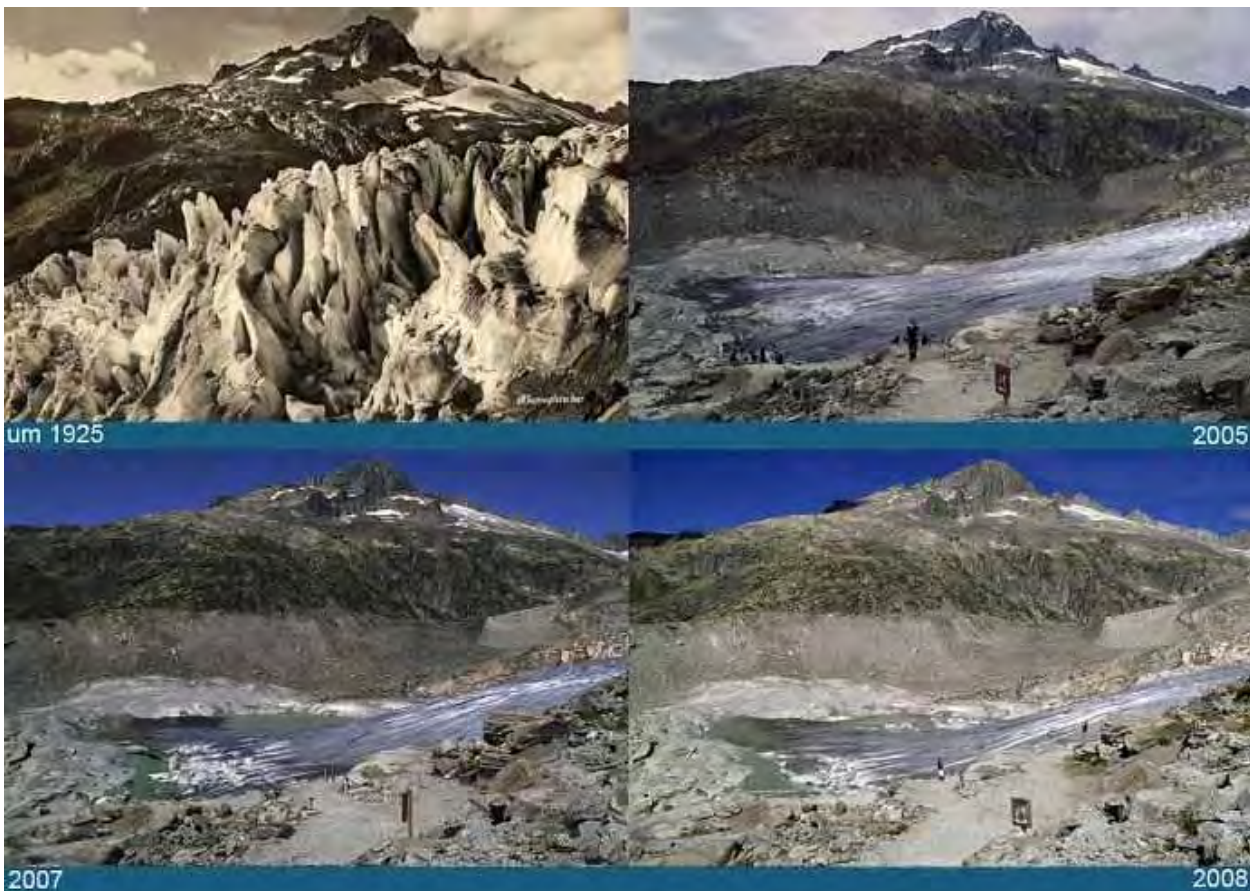


Abb 3: Rhonegletscher beim Hotel Belvédère um 1925, im Jahr 2005, 2007 und 2008

Das BAFU gibt im Magazin UMWELT in einem Artikel zum Thema „Abnehmende Wasserreserven in den Alpen“ (BAFU, 2006) für das Jahr 2005 ein vorhandenes Volumen von 45 Kubikmeter Wasser (oder 50 Kubikkilometer Eis) an. Heute sind nur sehr wenige verlässliche quantitative Aussagen bezüglich Veränderung der Eisreserven und der Abflüsse stark vergletschelter Einzugsgebiete vorhanden. Insbesondere fehlen diesbezügliche Untersuchungen der grossen Gletscher in der Schweiz. Die zu erwartenden mittleren Jahresabflüsse und die Änderung im Abflussregime werden für vergletscherte Einzugsgebiete in den Einzugsgebieten der Flüsse Rhone, Po, Aare, Rhein und Inn bis 2100 berechnet. Dafür werden die neusten Klimaszenarien des Moduls (1) genutzt. Das aktuelle totale Gletschervolumen der zu betrachtenden Einzugsgebiete umfasst ca. 30% der in der Schweiz geschätzten Eismenge.

## 2.6 Klimaänderung und Hochwasser

In den letzten Jahren wurden in der Schweiz in über 100 Einzugsgebieten Forschungsprojekte und hochwasserhydrologische Untersuchungen durchgeführt. Die Daten dieser Untersuchungen, in denen die Abflussbildung detailliert erfasst wurde, liegen vor. In zahlreichen Gebieten wurden die Messreihen durch historische Hochwasser ergänzt, so dass in günstigen Fällen das Hochwassergeschehen und die Variation der Hochwasserhäufigkeiten über mehrere 100 Jahre überblickt werden können.

Das Ziel des vorliegenden Projekts ist es, eine Synthese der vorhandenen Erkenntnisse vorzunehmen, die einzelnen Komponenten zu gewichten und deren Auswirkung auf die Bestimmung der Dimensionierungshochwasser abzuschätzen. Weiter soll untersucht werden, welche Einzugsgebiete sich bei extremen und extremsten Ereignissen der Vergangenheit wie verhalten haben um daraus abzuleiten, wie sie sich bei zukünftigen Ereignissen verhalten werden. Die Datengrundlage liefern die vorhandenen Untersuchungen, die ausgewertet und analysiert werden. Liegen die Untersuchungen schon weiter zurück, sollen sie mit neueren Hochwassern ergänzt werden. Zusätzlich sollen auch weitere Einzugsgebiete einbezogen werden, die sich durch ein auffälliges Verhalten auszeichnen. Danach werden die Einzugsgebiete anhand ihres Verhaltens klassifiziert. Welche haben stark reagiert, welche nicht. Zeigt sich in der Hochwasserstatistik, unter Berücksichtigung der historischen Hochwasser, ein Plateau, eine konsistente Verteilung oder extreme Ausreißer. Welche Gebiete zeigen welches Verhalten und wie lässt sich dieses mit Kenntnissen über Abflussbildung und Abflussprozesse erklären und wann tritt ein Bruch ein.

## 2.7 Klimaänderung und Wassertemperatur (Pilotstudie)

In dieser Pilotstudie wird die Möglichkeit einer umfassenden Studie zur Wassertemperatur untersucht. Das Ziel dieses Modul ist es, räumlich und zeitlich aufgelöste Vorhersagen der Wassertemperatur für die Periode bis ins Jahr 2050 zu gewinnen. Weiter werden diese in der Zukunft erwartenden Wassertemperaturen mit einer historischen Referenzperiode verglichen. Als Referenzperiode werden die letzten Jahrzehnte, seitdem Wassertemperaturmessungen verfügbar sind, benutzt.

## 3 Zusammenfassung

Die Schweiz gilt als Wasserschloss Europas. Trotz dieses Wasserreichtums gibt es in der Schweiz bis heute keine umfassenden Modellierungen des hydrologischen Kreislaufes. Verschiedene Studien und Publikationen haben gezeigt, dass in der Vergangenheit vor allem qualitative Aussagen über die Auswirkungen in Bezug auf Hochwasser, Niedrigwasser und Wasserwirtschaft gemacht wurden. Ziel des BAFU-Projekt CCHydro (Klimaänderung und Hydrologie in der Schweiz) ist es, basierend auf den heutigen Klimaszenarien, für die verschiedenen Klimaregionen, Höhenstufen und geomorphologischen Ausprägungen in der Schweiz zeitlich und räumlich hochaufgelöste Szenarien des Wasserkreislaufes und der Abflüsse für die Zeitperiode bis 2050 zur Verfügung zu stellen. Darauf basierend können Analysen der Veränderungen der Abfluss-Extremwerte (Hoch- und Niedrigwasser), der Wasserressourcen und ihrer jahreszeitlichen Verteilung (Regimes) der Grundwasserinfiltration und des Bodenwassergehaltes sowie der Wassertemperatur durchgeführt werden. Dazu wurden innerhalb des Projekts CCHydro 7 verschiedene Projektmodule ausgearbeitet. Das Modul (1) beinhaltet die neusten Klimaszenarien für die Schweiz bis ins Jahre 2050. Diese dienen als Grundlage für die hydrologische Modellierung bei den Projektmodulen (2) bis (7). Der Projektabschluss von CCHydro ist im Dezember 2011 geplant. CCHydro liefert zudem einen Beitrag zum KHR Projekt Rheinblick 2050 und zum Interreg Projekt AdaptAlp WP4.



#### 4 Literatur

- BAFU (2006). Abnehmende Wasserreserven in den Alpen. Magazin UMWELT 4/06 Wege des Wassers, Schmelzende Wasserreserven.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder, A., and Funk, M. (2008b): Modelling runoff from highly glaciated alpine catchment basins under climate change conditions. Hydrological Processes: 10. 1002/hyp.7055, vol. 22, number 19, p. 3888-3902.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz der Schweiz. Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz KOHS im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband  
**[http://www.swv.ch/media/downloads/Klima\\_und\\_Hochwasser.pdf](http://www.swv.ch/media/downloads/Klima_und_Hochwasser.pdf)**
- OcCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft. **[http://www.occc.ch/products/CH2050/CH2050-bericht\\_d.html](http://www.occc.ch/products/CH2050/CH2050-bericht_d.html)**
- Viviroli et al. (2007): The Hydrological Modelling PREVAH. Geographica Bernensia P40. Bern: Geographisches Institut der Universität Bern.

## The Impact of Climate Change on Water Management in Hungary

László Kóthay  
State Secretary for Water  
Ministry of Environment and Water, Hungary

Industrial and agricultural development, urbanisation and shifts in land use have caused significant changes in the state of waters. The effect of these factors and the foreseeable impacts of climate change will have to be viewed as a major challenge of the 21<sup>st</sup> century.

In 2010 and first half of 2011 Spain, Belgium and Hungary will give the EU Presidencies. In the water sector this Trio Presidency will set a road map with the consideration of the overall integration of water related issues into the Communities' framework programmes and policies generally and also with a special attention to critical water-related problems. A sustainable water policy is a priority for the EU with such comprehensive instrument as the Water Framework Directive. Adaptation to climate change will be the major challenge with regard to water management. All studies are indicating the increase of the risk of flooding, caused by a rising sea level and extreme weather events (incl. flash floods) and the decrease of precipitations, increasing the risk of suffering from water scarcity and droughts in some areas. Therefore, the increase of the frequency and intensity of floods and droughts, caused by climate change, will be the most important extreme event that water managers in Europe will have to cope with.

Water resources, their management and use, are known to be sensitive to variations in climate, and will be influenced by projected climatic change, but the climate change over the 21<sup>st</sup> century will not be the same everywhere. The recently experienced unfavourable meteorological and related events have caused significant loss to the economy also in Hungary. Although the available information is not overall enough, it is likely that the damage, the cost of the defence and recovery reach HUF 150-180 billion (600 – 700 million euros) a year, which is close to 1% of the GDP of Hungary. Since the global warming may result in more frequent and intense extreme events, and increasing losses, the most important tasks for the present and for the immediate future are to identify climate change impacts and possible adaptation strategies for water management systems in Hungary.

### An overview on trends in regional climate parameters over Hungary

#### Past and recent trends:

Derived from time series analysis of long-term trends of averages and extremes, it has been found that:

1. Decreasing trend of precipitation is typical, with lower number of precipitation events (see Figure 1);
2. Decreasing trend of monthly areal averages of precipitation in Hungary, but the time series analysis shows a large variability. (see Figure 2);

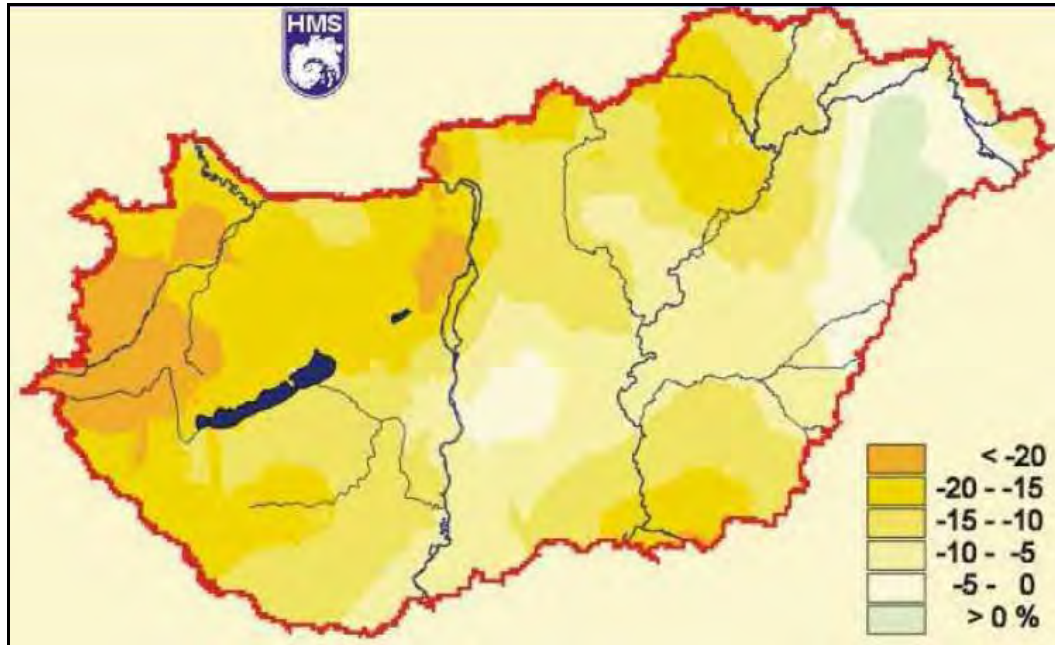


Figure 1. Trends of annual precipitation (%/54 years) for 1951-2004 (Hungarian Meteorological Service)

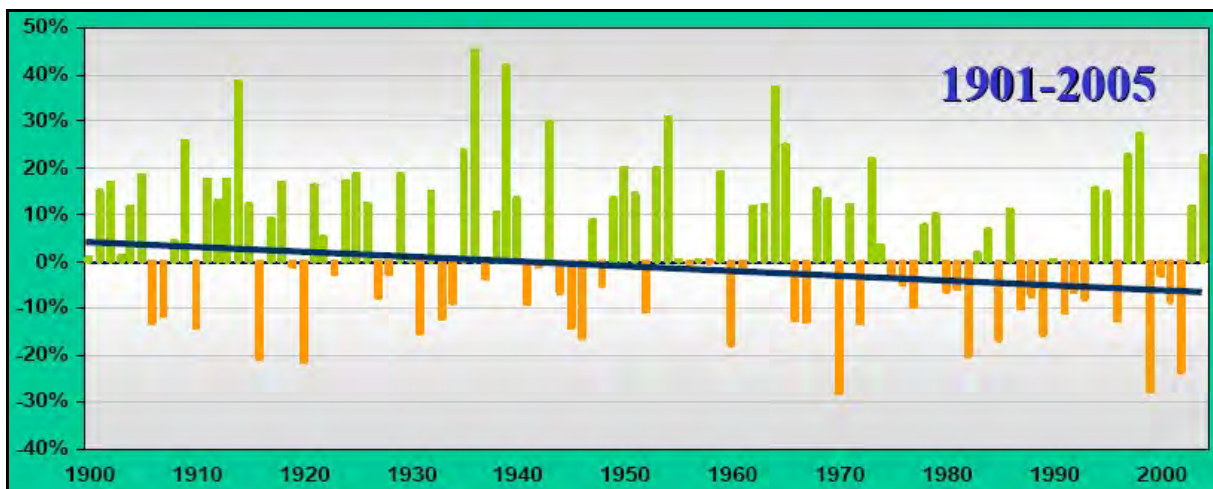


Figure 2. Monthly areal averages of precipitation in between 1901-2005

3. Slightly more precipitation is received from an event, but the time series analysis shows a large variability (see Figure 3);
4. Fairly contradictory spatial pattern of trends in temperature over Hungary, but there is trend in daily areal averages (see Figure 4).

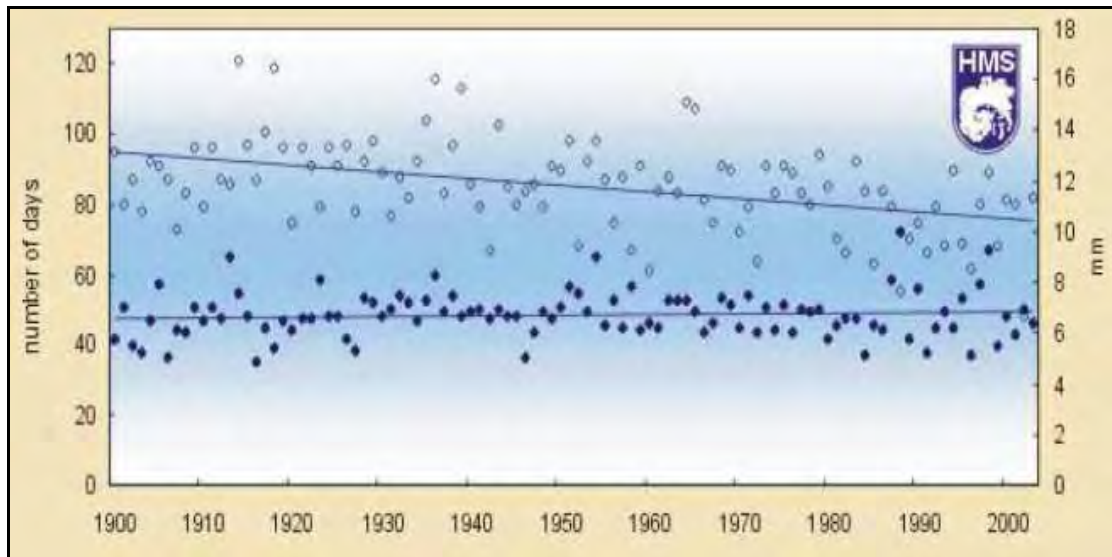


Figure 3. Number of wet days (> 1 mm/day – left axis) vs. mean amount of precipitation on wet days (right axis) 1901-2004 (Hungarian Meteorological Service)

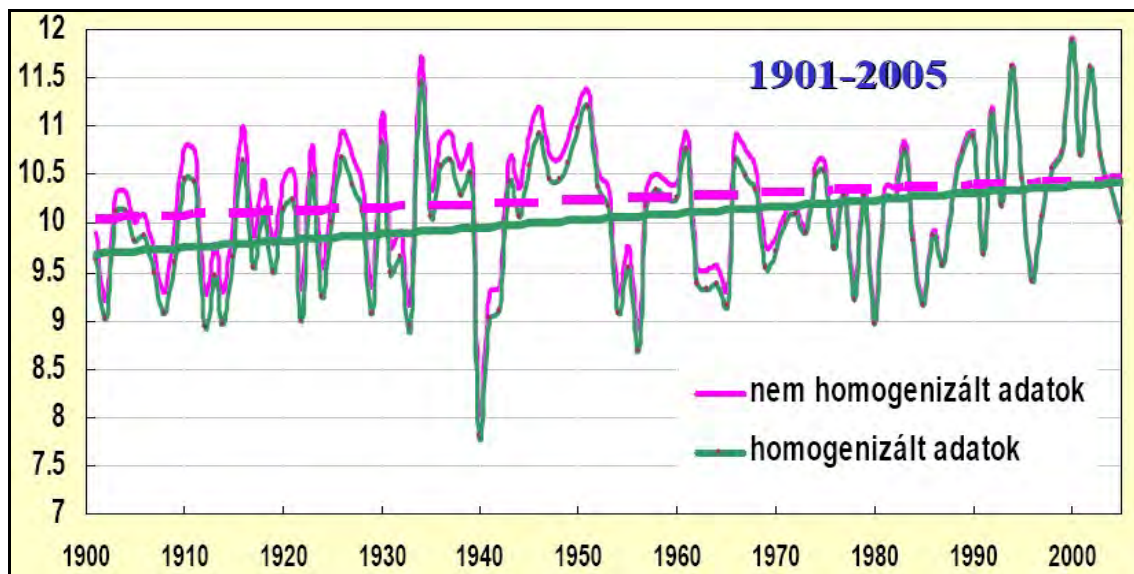


Figure 4. Daily areal averages of temperature in between 1901-2005

Predicted trends:

Based on regional climate modelling and analysis of expected climate over Hungary, it has been predicted that:

1. Faster than global mean temperature increases in all seasons (see Figure 5);



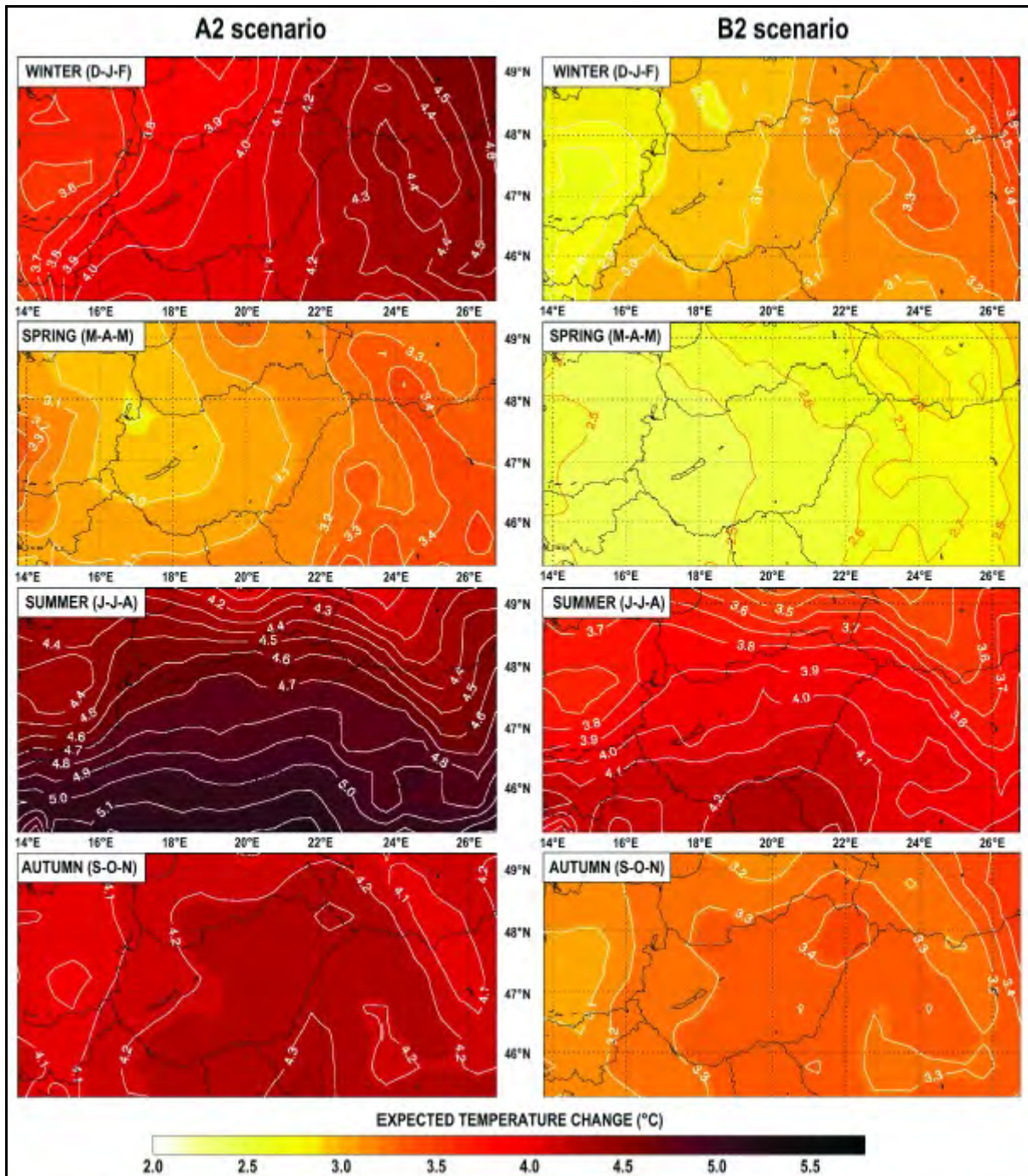


Figure 5. Seasonal temperature change (°C) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 and 8 RCM simulations in case of A2 and B2 scenarios, respectively (reference period: 1961–1990).

2. With strongly decreasing precipitation in summer and autumn, but with increased amounts in winter and spring. (see Figure 6);

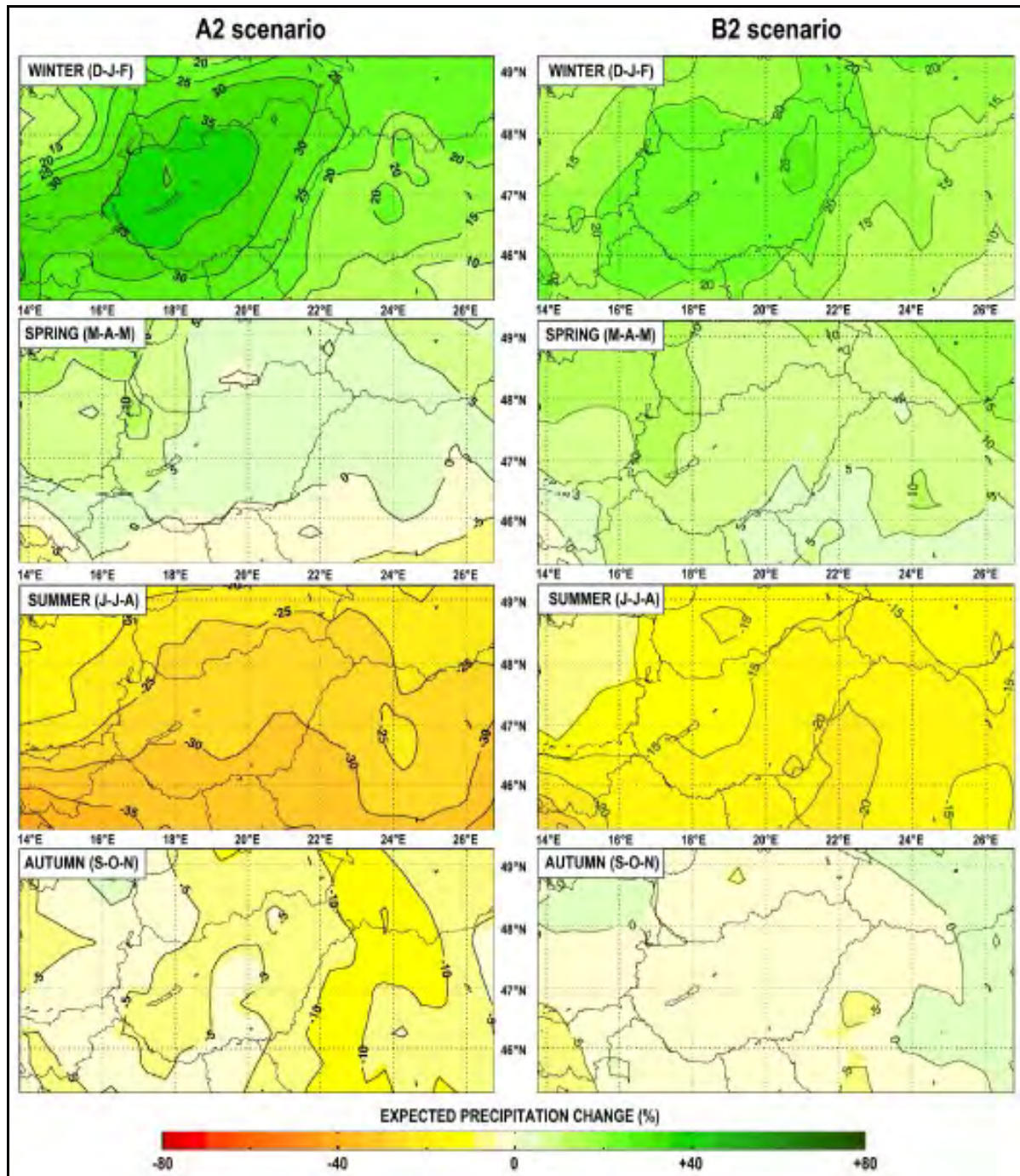


Figure 6. Seasonal precipitation change (%) expected by 2071–2100 for the Carpathian Basin using the outputs of 16 and 8 RCM simulations in case of A2 and B2 scenarios, respectively (reference period: 1961–1990).

3. There is also a fair agreement among the approaches (deterministic and empirical) in the frequency of high temperature extremes and in the maxima of daily precipitation totals in all regions of the country;
4. No ideal coincidence in frequency of the frozen days and in frequency of the wet days. The deterministic model-approaches indicate decrease in both variables, while the empirical analysis yields opposite results.



## An overview on the impact of climate change on water regime of Hungary

### Past and recent trends:

In recent past, the climate change impacts on water management has been analysed within numerous projects in Hungary. According to those results we can state, that:

1. Flood events are increasing in frequency, and the flood peaks are higher and higher event by event in the Tisza River and its tributaries (see Figure 7);

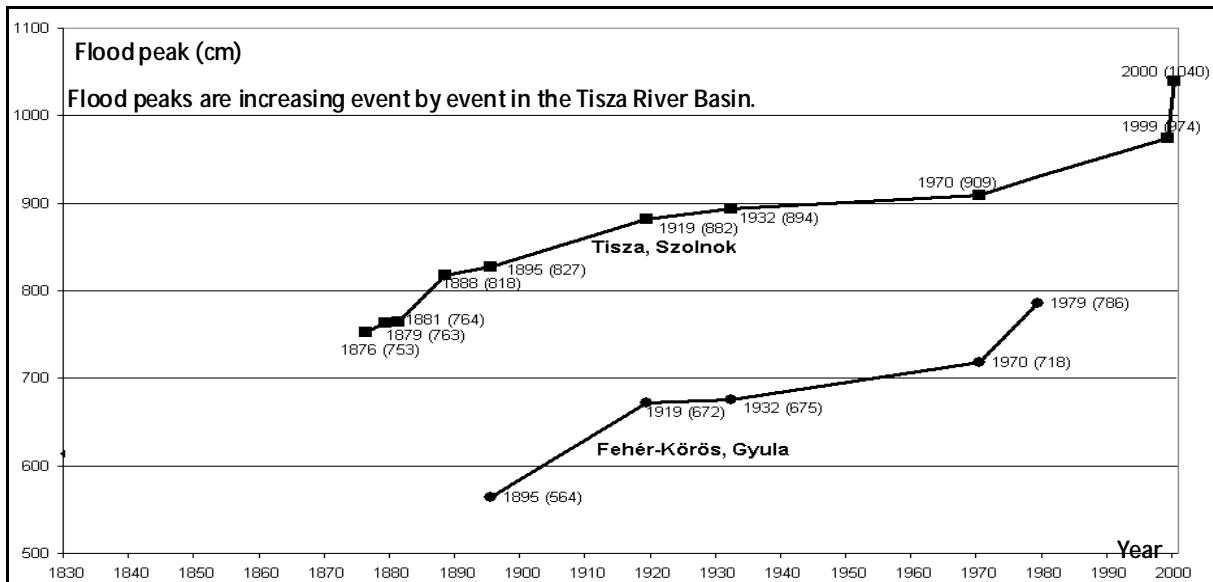


Figure 7.

2. Drought and inland-water events are increasing in both, frequency and duration, especially in the Great Hungarian Plain;
3. Long lasting drought periods were detected with a consequence in groundwater stage lowering in some areas in the country.

We must point out that there is no fair agreement among the results in the possible causes of the detected trends!

### Potential impacts:

In order to assess climate change driven impacts on the water sector, the ongoing and future climate changes were analyzed within many projects. As a result of the works, the following major conclusions can be drawn:

1. Impacts on the hydrological and agricultural regime (In the framework of CLAVIER project, WP3c):
  - Relatively large spatial variability of trends was projected;
  - Slight increase flow in Upper Tisza and tributaries (less than 5%);
  - No change or general decrease of the mean annual discharges, down to 15% for central Tisza and southern basins;
  - The mean seasonal discharges are increasing only in winter season, in all the basins but with significant variations (3 ÷ 42%);
  - For the spring – autumn period, the hydrological simulations indicate a decrease of the mean discharges for most of the catchments in southern sub-basins between - 15 ÷ -20%;

- The possibility of increase of the magnitude and frequency of winter and early spring floods especially at the upper Tisza reaches.
2. Impacts on sewerage (waste and rain water):
- The quantity and composition of waste water may change;
  - The raise of temperature in sewer speeds up biochemical processes, promotes the partial decomposition of easily degradable organic matter and the rotting of waste water, and increases the occurrence of odor problem and (bio)corrosion;
  - The frequency and intensity of flash flood on the catchments of settlements is increasing (design precipitation), this raises the risk of damages caused by water and inundation of facilities below ground level (cellars and garages in the basement), the spasmodic rain and pollutant load. Increased wash-out of sludge and the decrease of purification efficiency can be expected.
3. Impacts on waste water purification and discharge, water quality:
- Some technological processes of biological waste water purification are temperature dependent. We have got very few knowledge about the consequences of climate change, the raise of temperature generally has a positive effect on the efficiency of purification;
  - The self-purification capacity of surface water is decreasing, especially when the water is very low in the summer. This might force the improved purification of waste water and the modification (to more stringent) of limiting values of discharged effluent for some compounds;
  - The waste water, discharged into the recipients, might require improved purification (filtering, ozonisation) [+] and the need for hybrid bio-film and membrane biological techniques may increase due to decrease of natural self-purification capacity;
  - The conditions of deposition of sludge at dehydrating beds is improved due to increasing evaporation (dehydration time decreases, smaller beds), and the odour problem may increase.
4. Impacts on lake water:
- Erasing of water-temperature have an impact on the biological processes;
  - The erosion processes increases the nutrients loads (diffuse loads);
  - Loss of natural conservation values (biodiversity);

### Uncertainty and long-term planning

Policy formulation for climate change poses a great challenge because it presents a problem of decision-making under uncertainty. While continued basic research on the climate system to reduce uncertainties is essential, policy-makers also need a way to assess the possible consequences of different decisions, including taking no action, within the context of known uncertainties.

The major sources of uncertainty from the point of view of a decision-maker:

- a) *Causes of recently measured changes of trends:*  
Can we estimate the ratio of the possible causing components of trends?  
E.g.: Which one had more impact on water resources and/or flood frequency and peak discharge?
- The land-use change, or
  - the climate change, or
  - what else?



- b) *Predicted trends in climate:*  
The different climate change scenarios give different key-parameters, like:
- timing,
  - measure of trend,
  - spatial pattern of changes,
  - redistribution of precipitation within year,
  - and many more!
- c) *Expected impacts of climate change:*  
Non-negligible measure of uncertainties in hydrological models that can be applied to assess climate change impacts on water management.

So, water management faces major challenges to cope with potential global change impacts, fundamental uncertainties surrounding future developments, and a diversity of societal perspectives. Without robust management strategies and adaptation paths, human and natural services in the water sector of Hungary may suffer severe damage and we may be forced into sudden unplanned actions which are far more costly and less appreciated.

#### **Literature:**

Impacts and responses concerning global climate change in Hungary (project 2003 – 2006 launched by Ministry of Environment and Water together with the Hungarian Academy of Sciences; lead by Prof. Láng István)

Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe (CLAVIER) – EU FP6 project, 2006-2009 [www.clavier-eu.org](http://www.clavier-eu.org)

## Globaler Wandel des Wasserkreislaufs am Beispiel der Oberen Donau

Monika Prasch und Wolfram Mauser  
Department für Geographie, Ludwig-Maximilians-Universität München

### 1 Einleitung

Der Globale Klimawandel wird neben der zunehmenden Internationalisierung der Wirtschaft, Landnutzungsänderungen, dem demographischem Wandel uvm. die zukünftigen Lebensbedingungen der Menschen verändern (IPCC 2007, Mauser und Ludwig 2002). Dabei wird es verstärkt zu regionalen Veränderungen der Wasserressourcen kommen, die die Entwicklung der Region nachhaltig beeinflussen. Um die in den nächsten Jahren anstehenden, über Jahrzehnte wirksamen Zukunftsinvestitionen (z.B. im Energiesektor, in der Landwirtschaft, im Tourismus, in der Industrie) optimal zu gestalten, ist daher eine intensive Auseinandersetzung mit den Folgen des Klimawandels notwendig.

Der Projektverbund GLOWA (Globaler Wandel des Wasserkreislaufs, [www.glowa.org](http://www.glowa.org)) wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit dem Ziel ins Leben gerufen, die regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Wasserressourcen anhand ausgewählter Einzugsgebiete zu untersuchen und die dazu nötigen Entscheidungsunterstützungssysteme zu entwickeln, um ein nachhaltiges Management der Ressource Wasser zu ermöglichen. Innerhalb dieses Verbundes beschäftigt sich das Forschungs- und Entwicklungsprojekt GLOWA-Danube ([www.glowa-danube.de](http://www.glowa-danube.de), Mauser und Ludwig 2002) auf integrative Weise mit der umfassenden Analyse der regionalen Folgen des Klimawandels auf die Wasserverfügbarkeit im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Dabei wird zum einen untersucht, wie sich der Globale Wandel, d.h. sowohl der Klimawandel als auch der demographische sowie der ökonomische Wandel auf die Wasserressourcen der Oberen Donau im Zeitraum der nächsten 50 Jahre auswirken wird. Zum anderen werden im Rahmen eines intensiven Dialogs mit Stakeholdern aus Politik, Verwaltung und Wirtschaft geeignete regionale Handlungsoptionen für die Anpassung an und die Vermeidung von Klimafolgen identifiziert, simuliert und ihre Wirksamkeit überprüft. Dazu arbeiten Wissenschaftler aus verschiedensten Disziplinen der Natur-, Sozial- und Wirtschaftswissenschaften seit 2001 in einem interdisziplinären, universitären Kompetenznetzwerk zusammen.

Als Untersuchungsgebiet wurde das Einzugsgebiet der Oberen Donau gewählt, das durch den Pegel Achleiten bei Passau nach dem Zusammenfluss von Donau und Inn definiert ist (Abb.1). Mit mehr als 10 Millionen Einwohnern und einer Fläche von 77.000 km<sup>2</sup> zählt es zu einem der größten und bedeutendsten Alpen-Einzugsgebiete Europas. Das starke Relief mit Höhenunterschieden von bis zu 3600 m prägt die natürlichen hydrologischen und klimatologischen Verhältnisse der Oberen Donau und führt zu einer außergewöhnlich breiten Palette von Einflussfaktoren auf den Wasserhaushalt. Das Einzugsgebiet beinhaltet sowohl Gletscher als auch landwirtschaftlich intensiv genutzte Gebiete in den Vorländern. Hinzu kommt eine vielfältige und intensive Nutzung der Wasserressourcen für Wasserkraft, Landwirtschaft (zukünftig evtl. Bewässerung) und Tourismus (z.B. Schneekanonen). Das Einzugsgebiet der Oberen Donau bündelt somit in exemplarischer Weise viele Wassernutzungsprobleme Mitteleuropas und stellt deshalb ein hervorragend geeignetes, mesoskaliges Untersuchungsgebiet für die Auswirkungen des Klimawandels auf Gebirgs-Vorland Regionen in den temperierten Mittelbreiten dar.



Abb. 1: Das Untersuchungsgebiet der Oberen Donau.

## 2 Das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA

Um sowohl die regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels zu simulieren als auch geeignete Adaptionsmaßnahmen abzuleiten, wurde im Rahmen von GLOWA-Danube das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA (Barth et al. 2004) entwickelt.

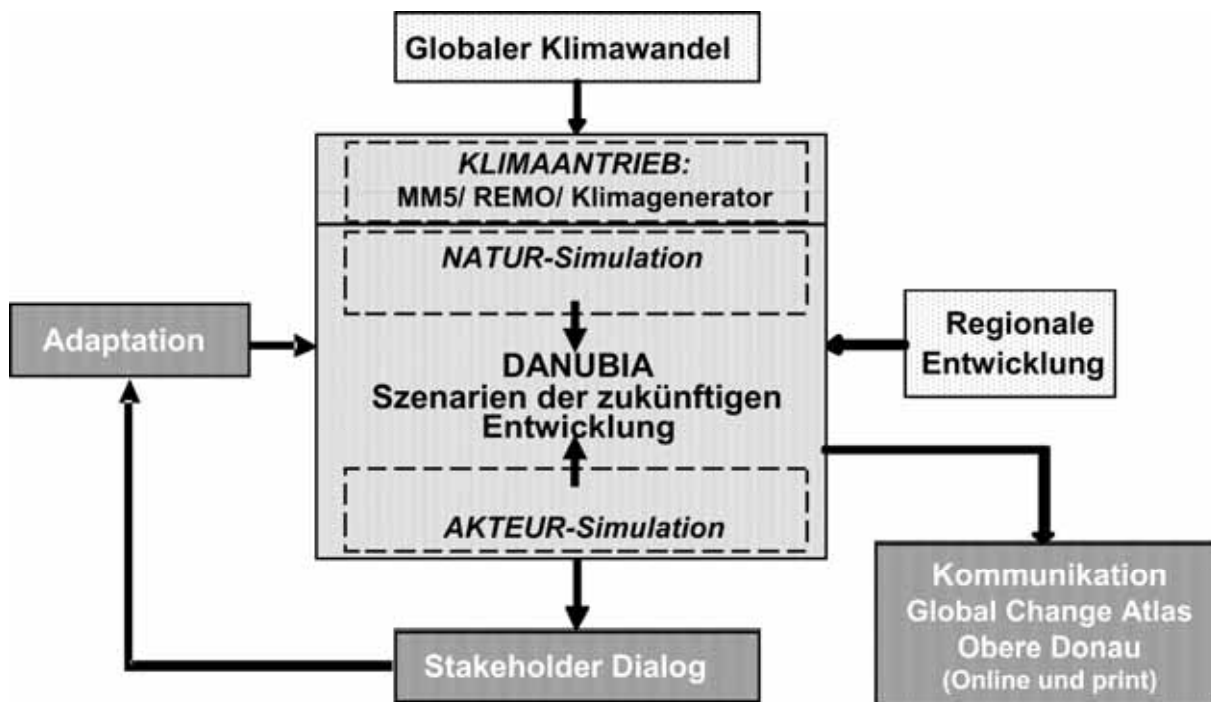


Abb. 2: Schematischer Aufbau des Entscheidungsunterstützungssystems DANUBIA.

DANUBIA ist ein integratives, gekoppeltes Simulationsmodell, das sich dadurch auszeichnet, dass es erstmals Modellkomponenten für naturwissenschaftliche und sozioökonomische Prozesse gemeinsam und in ihrer gegenseitigen Beeinflussung berücksichtigt. Um möglichst gute Vorhersagen zu erzielen, nutzt DANUBIA Ergebnisse regionaler Klimamodelle zur Prognose des Klimawandels. Physikalische und physiologische Komponenten beschreiben die natürlichen Prozesse (Hydrologie, Hydrogeologie, Pflanzenphysiologie, Ertrag sowie Glaziologie). Zur Simulation in den berücksichtigten Sektoren (Landwirtschaft, Wirtschaft, Wasserversorgungsunternehmen, private Haushalte und Tourismusunternehmen) benutzt DANUBIA tiefe Multi-Akteursmodelle, die Entscheidungen der beteiligten Akteure auf Grundlage der Gesellschaftsstruktur und der jeweiligen Rahmenbedingungen und Interessen abbilden. In einem intensiven Dialog mit Stakeholdern aus der Politik, Verwaltung und Wirtschaft werden die Simulationsergebnisse diskutiert und Handlungsoptionen entwickelt, die in den weiteren Simulationsläufen berücksichtigt werden. Die Ergebnisse werden schließlich durch den Global Change Atlas Obere Donau (GLOWA-Danube-Projekt 2009) sowohl in einer print- als auch in einer online-Version (<http://www.glowa-danube.de/atlas/index.php>) den Entscheidungsunterstützungsträgern zur Verfügung gestellt. Abb. 2 zeigt den schematischen Aufbau von DANUBIA.

DANUBIA wurde mit umfangreichen Datensätzen der Jahre 1971-2003 eingehend validiert. Stellvertretend dafür wird hier die Güte des modellierten täglichen Abflusses an verschiedenen Pegeln im Einzugsgebiet der Oberen Donau gezeigt. Vergleicht man den gemessenen mit dem modellierten täglichen Abfluss am Gebietsauslass in Achleiten, so ist eine hohe Übereinstimmung zu erkennen, wie die Abbildungen 3 und 4 zeigen. 87 Prozent der Varianz der Messwerte wird durch das Modell wieder gegeben, während ein Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (Nash und Sutcliffe 1970) von 0.84 erreicht wird. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass mit DANUBIA die tägliche Variabilität des Wasserhaushaltes wieder gegeben werden kann, auch wenn auf den Abbildungen 3 und 4 eine leichte Überschätzung der Hochwasserereignisse zu erkennen ist, die auf die fehlende Berücksichtigung von Überschwemmungsflächen und Dammbürchen zurück geführt werden kann (Mauser und Bach 2009).

Tabelle 1 zeigt die Gütemaße sowie die Charakteristika weiterer Pegel im Einzugsgebiet der Oberen Donau, die die Modellqualität von DANUBIA im Wesentlichen bestätigen.

Für die detaillierte Beschreibung der Teilmodelle von DANUBIA sowie die Validierung der Ergebnisse wird auf GLOWA-Danube-Projekt (2009) verwiesen.

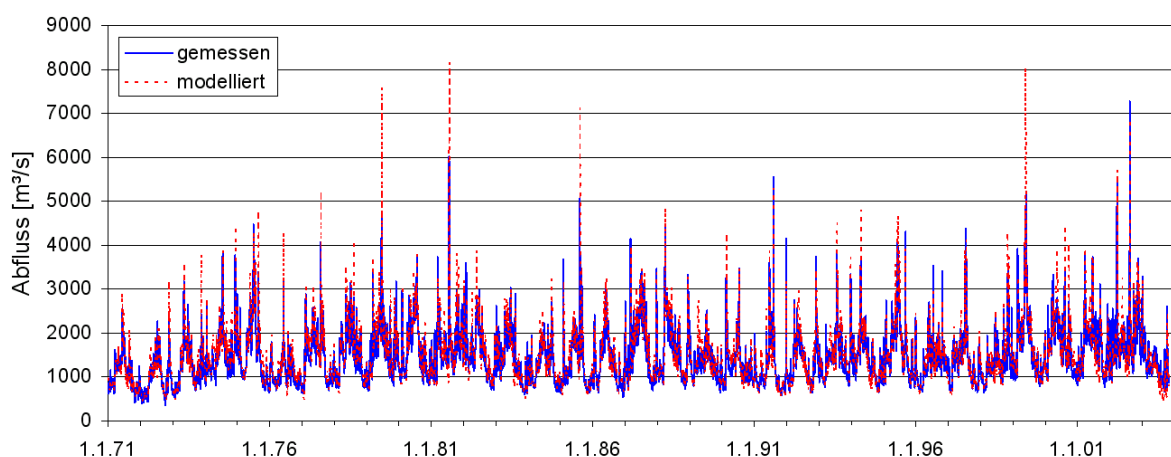


Abb. 3: Verlauf des gemessenen und modellierten täglichen Abflusses am Pegel Achleiten von 1971 bis 2003 (Mauser and Bach 2009).



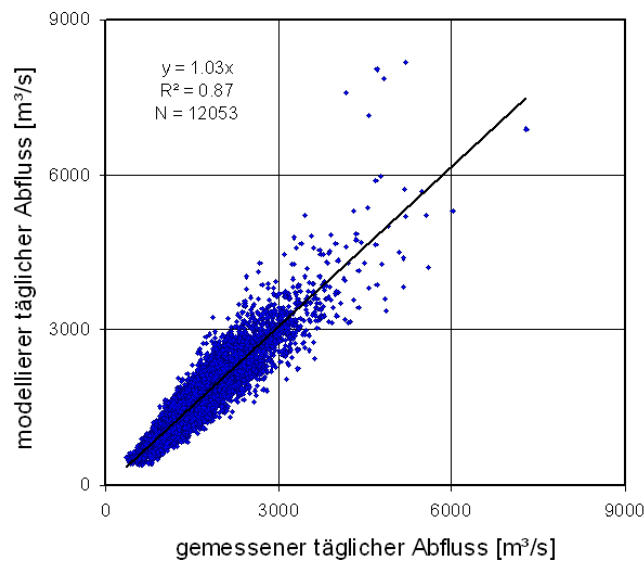


Abb. 4: Vergleich von gemessenem und modelliertem täglichem Abfluss am Pegel Achleiten an der Donau von 1971 bis 2003 (Mauser und Bach 2009).

Tab.1: Gütemaße der Validierung von modellierten mit gemessenen täglichen Abflüssen an verschiedenen Pegelstellen sowie deren Charakteristika im Einzugsgebiet der Oberen Donau (Mauser und Bach 2009).

Pegelname	Gewässer	Einzugsgebietsgröße [km <sup>2</sup> ]	Steigung der Regressionsgeraden	R <sup>2</sup>	Nash-Sutcliffe efficiency coefficient
Achleiten	Donau	76 673	1.03	0.87	0.84
Hofkirchen	Donau	46 496	1.11	0.87	0.81
Dillingen	Donau	11 350	1.13	0.84	0.72
Oberaudorf	Inn	9 715	0.94	0.81	0.80
Plattling	Isar	8 435	1.08	0.75	0.47
Laufen	Salzach	6 112	0.86	0.85	0.80
Heitzenhofen	Naab	5 431	0.99	0.78	0.79
Weilheim	Ammer	607	0.98	0.63	0.69

### 3 Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt an der Oberen Donau

Im Folgenden werden zuerst die GLOWA-Danube Szenarien als Klimaantrieb für DANUBIA vorgestellt. Die Ergebnisse der Simulation zeigen dann die Auswirkungen des Klimawandels unter den gewählten Szenarien auf den Wasserhaushalt der Oberen Donau.

#### 3.1 Die GLOWA-Danube Szenarien

Die GLOWA-Danube Szenarien beschreiben einen möglichen Verlauf sowohl des Klimas als auch der gesellschaftlichen Entwicklung in der Zukunft. Deshalb besteht sie zum einen aus einem Klimaszenario verschiedener Ausprägungen und zum anderen aus einem Gesellschaftsszenario. Die Klimaszenarien wiederum untergliedern sich in sogenannte Klimatrends und Klimavarianten, die aus Klimadaten der Vergangenheit mit Hilfe des Klimagenerators KLIMAGEN statistisch generiert wurden bzw. auf bias-korrigierten Ergebnissen regionaler Klimamodelle

beruhen. Alle beruhen auf der Annahme, dass sich die Emissionen nach dem globalen IPCC A1B Szenario (IPCC 2007) entwickeln werden und geben dann die regionalen Trends verschiedener regionaler Klimamodelle wieder. Deren künftige Temperatur- und Niederschlagsentwicklung ist in Abb. 5 mit aufgeführt. Die Klimavariante spezifiziert den generellen Klimatrend, wobei hier für bestimmte Fragestellungen hinsichtlich der Wasserressourcen interessante Varianten mit dem Klimagenerator zur Auswahl gestellt wurden. Schließlich unterscheiden die Gesellschaftsszenarien zwischen der Fortführung des Status-Quo, einer von freiem Wettbewerb gesteuerten Gesellschaft und einer, die sich auf die gesamtgesellschaftliche Verantwortung rückbesinnt.

Ein GLOWA-Danube Szenario setzt sich also aus der Kombination eines Klimatrends, einer Klimavariante und eines Gesellschaftsszenarios zusammen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, das Szenario mit einer sog. Maßnahme zu kombinieren. Unter einer Maßnahme wird ein gezielter Eingriff in die Entwicklung eines Szenarios, beispielsweise durch den Einsatz von Schneekanonen in Gebieten, in denen der Wintertourismus bedroht ist, verstanden. Damit können die von außen gesetzten Handlungsoptionen berücksichtigt werden. Die verschiedenen Kombinationen ermöglichen die Simulation eines Ensembles an Szenarien, deren Ergebnisse zusammen einen plausiblen Erwartungstrichter aufspannen. Um die Unsicherheiten der Szenarien einzugrenzen, deckt der Modellzeitraum die Zeitspanne von 2011 bis 2060 ab. Abb. 5 gibt einen Überblick über die einzelnen Auswahlkriterien, aus denen sich ein GLOWA-Danube Szenario zusammensetzt (GLOWA-Danube Projekt 2009).

Auswahl 1: Klimatrend	Auswahl 2: Klimavariante	Auswahl 3: Gesellschaftszenario	Auswahl 4: Maßnahme
<b>1. Trend – IPCC regional:</b> Temperaturanstieg: +3.3 Grad Niederschlagsänderung: +7% Winter, -14% Sommer	<b>1. Variante – Baseline:</b> mittlere Temperatur aus 5000 Realisierungen 2011 - 2035	<b>1. Szenario – Baseline:</b> Ein business as usual-Szenario, das den Status Quo weiterführt	Auswahl aus allen Modellparametern innerhalb der Teilmodelle, um einzelne vorhandene Variablen gezielt auf ihre Auswirkungen zu untersuchen. Diese Auswahlmöglichkeit ist optional.
<b>2. Trend – REMO regional:</b> Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: -4.9% Winter, -31.4% Sommer	<b>2. Variante – 5 warme Winter:</b> die 5 wärmsten aufeinander folgenden Winter 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen	<b>2. Szenario – Performance:</b> Szenario mit freiem Wettbewerb	
<b>3. Trend – MM5 regional:</b> Temperaturanstieg: +4.7 Grad Niederschlagsänderung: +7.7% Winter, -28.7% Sommer	<b>3. Variante – 5 heiße Sommer:</b> die 5 heißesten aufeinander folgenden Jahre 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen	<b>3. Szenario – Allgemeinwohl:</b> Szenario mit Rückbesinnung auf gesamtgesellschaftliche Verantwortung	
<b>4. Trend – Fortschreibung:</b> Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: +47% Winter, -69% Sommer aus Korrelation Niederschlag - Temperatur (1960-2006)	<b>4. Variante – 5 trockene Jahre:</b> die 5 trockensten aufeinander folgenden Jahre 2011 - 2035 innerhalb der oberen 5% von 5000 Realisierungen		
	<b>5. Variante – REMO skaliert &amp; biaskorrigiert:</b> Temperaturanstieg: +5.2 Grad Niederschlagsänderung: -1.4% Winter, -32.6% Sommer		
	<b>6. Variante – MM5 skaliert &amp; biaskorrigiert:</b> Temperaturanstieg: +4.7 Grad Niederschlagsänderung: +8.4% Winter, -29.4% Sommer		

Abb. 5: Szenariomatrix der GLOWA-Danube Szenarien, deren Zusammenstellung aus der Kombination der Auswahl 1 bis 3 und optional der Auswahl 4 bestehen (GLOWA-Danube Projekt 2009, S1).

### 3.2 Ergebnisse der Simulation mit DANUBIA

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse der Simulation mit DANUBIA vorgestellt, die zu erwartende Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Oberen Donau unter den gewählten Szenariobedingungen aufzuzeigen.

Die Jahresmitteltemperatur wird sich an der Oberen Donau je nach gewähltem Szenario zwischen 3,3°C und 5,2°C erhöhen, was eine Weiterführung des Temperaturanstieges von 1,6°C seit 1960 in diesem Gebiet bedeutet. Während bei der Niederschlagssumme im Sommer ein leichter Rückgang in der Vergangenheit verzeichnet wurde, kam es im Winter zu einer geringfügigen Erhöhung. Im Modellzeitraum setzt sich dieser Trend fort. So beträgt die Niederschlagserhöhung im Winter zwischen 8 und 47 Prozent, während im Sommer mit einer Abnahme von 14 bis 69 Prozent zu rechnen ist. Für die mittlere Jahressumme bedeutet das eine Reduzierung von 3.5 bis 16.4 Prozent. Dabei spielt nicht nur die Niederschlagssumme, sondern auch die Niederschlagsart eine entscheidende Rolle. So ist bereits in der Vergangenheit eine deutliche Abnahme des Anteils an Schneeniederschlag am Jahresniederschlag zu erkennen, die sich in Zukunft weiter fortsetzen wird, wie in Abb. 6 zu sehen ist. Zusammen mit dem Temperaturanstieg führt das zu einer Verkürzung der mittleren Schneedeckendauer um 30 bis 60 Tagen in allen Höhenlagen, so dass die Schneeverhältnisse, die heute in einer Höhe von ungefähr 1000m NN zu finden sind, zukünftig erst in etwa 2000m NN zu finden sein werden.

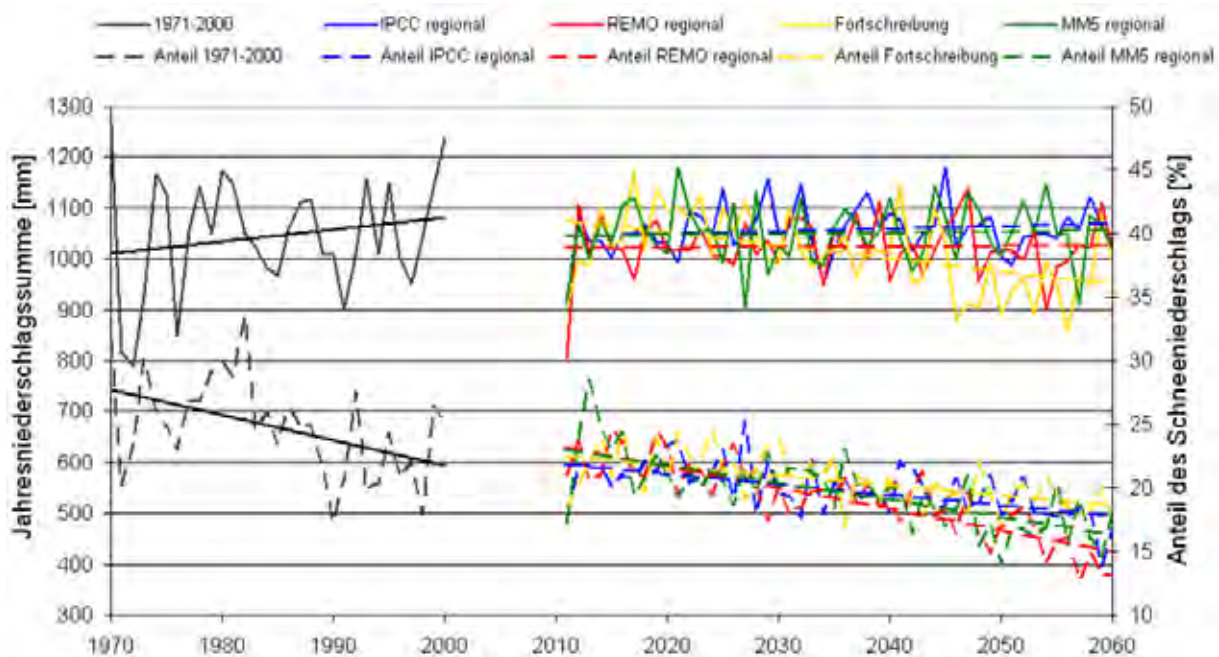


Abb. 6: Die Entwicklung des Jahres- und Schneeniederschlags im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Der zu erwartende Temperaturanstieg hat außerdem einen Anstieg der Verdunstungssumme von 10 bis 25 Prozent zur Folge, so dass zusammen mit der beschriebenen Niederschlagsentwicklung das Wasser an der Oberen Donau knapper werden wird. Am Pegel in Achleiten ist mit einer Abnahme von 5 bis 35 Prozent des Abflusses bis zum Jahr 2060 zu rechnen.

Regional betrachtet fällt dieser Rückgang besonders am Alpennordrand deutlich aus, wie die Differenz von Niederschlag, Evapotranspiration und Abfluss für den Simulationszeitraum von 2036 bis 2060 zur Vergangenheit von 1971 bis 2000 nach dem Szenario *REMO regional - Baseline* in Abb. 7 zeigt. So verringert sich hier einerseits der Niederschlag am stärksten, andererseits steigt die Verdunstung aufgrund einer längeren Vegetationsdauer deutlich an. In den nördlichen Regionen des Einzugsgebietes dagegen kommt es regional auch zu einer leichten Erhö-

hung der Wasserverfügbarkeit. Während hier die Änderungen der allerdings verhältnismäßig geringen Niederschlagssumme klein sind, kommt es aufgrund von Wasserstress zu einer Reduktion der Verdunstungssumme.

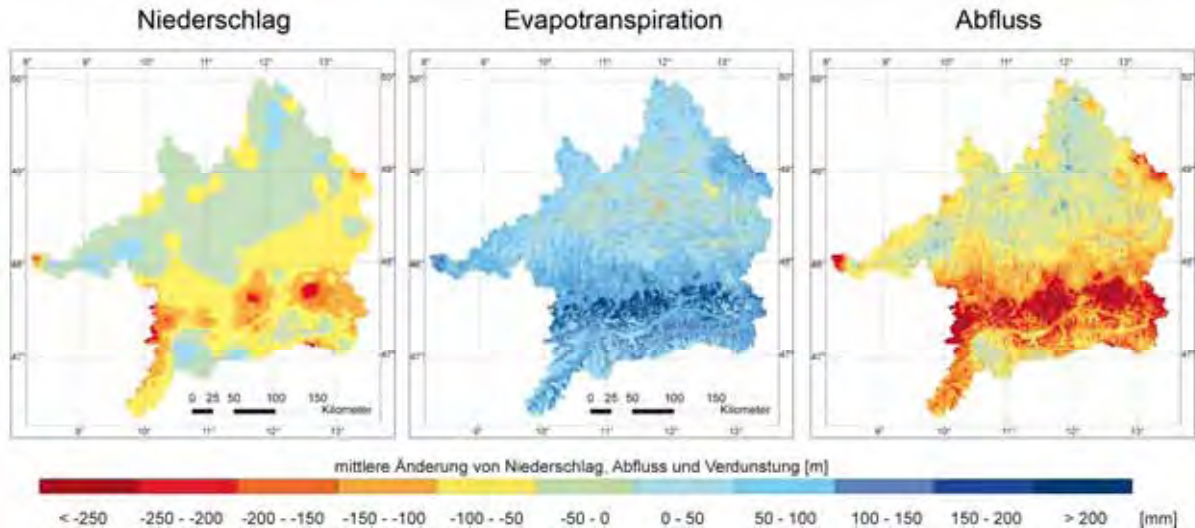


Abb. 7: Änderung des Wasserhaushaltes nach dem Szenario REMO regional - Baseline von 2036-2060 zu 1971-2000 im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Betrachtet man den jahreszeitlichen Verlauf des Abflusses am Gebietsauslass der Oberen Donau in Achleiten über die Dekaden von 1961 bis 2060 für das Szenario REMO regional – Baseline, so ist eine deutliche Verschiebung des Abflussmaximums vom Sommer in den Frühling zu sehen (Abb. 8, links). Da der Niederschlagsverlauf mit dem Sommermaximum gleich bleibt (Abb. 8, rechts), ist diese Verschiebung auf die Veränderungen des Schneespeichers sowie die erhöhte sommerliche Verdunstung zurückzuführen.

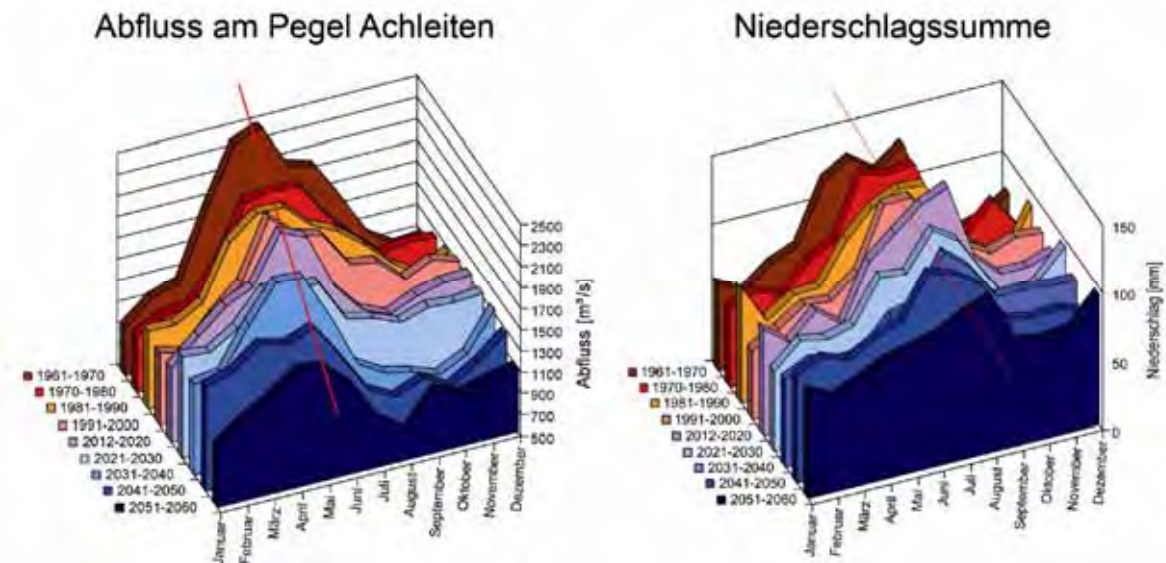


Abb. 8: Verlauf des monatlichen Abflusses (links) am Gebietsauslass in Achleiten sowie der Niederschlagssumme (rechts) des Einzugsgebietes der Oberen Donau nach dem Szenario REMO regional - Baseline von für die Dekaden von 1961 bis zum Jahr 2060



Die Auswirkungen auf Extremereignisse wie Niedrig- und Hochwasser wurden ebenfalls detailliert untersucht. So ist am Pegel in Achleiten mit einer Verringerung des Niedrigwasserabflusses um 25 bis 52 Prozent zu rechnen, während dieser starken Erniedrigung an der Donau eine Erhöhung der Niedrigwasserabflüsse in den Alpentälern gegenüber steht. Gründe dafür sind mehr Regenniederschlag sowie das Abschmelzen der Gletscher. Abb. 9 verdeutlicht die Veränderungen des Niedrigwasserabflusses in den Gewässern im Einzugsgebiet der Oberen Donau. Dargestellt ist der Quotient des  $NM7Q_{50}$  der zukünftigen Zeiträume von 2011-2035 und 2036-2060 nach dem Szenario *REMO regional – Baseline* zur Vergangenheit von 1971-2000 für Gerinne, für die bei der Berechnung des  $NM7Q_{50}$  ein Bestimmtheitsmaß von über 0.8 berechnet wurde. Gelb- bis Rottöne bedeuten eine Verschärfung der Niedrigwassersituationen, während Grün- und Blautöne eine Verringerung verdeutlichen.

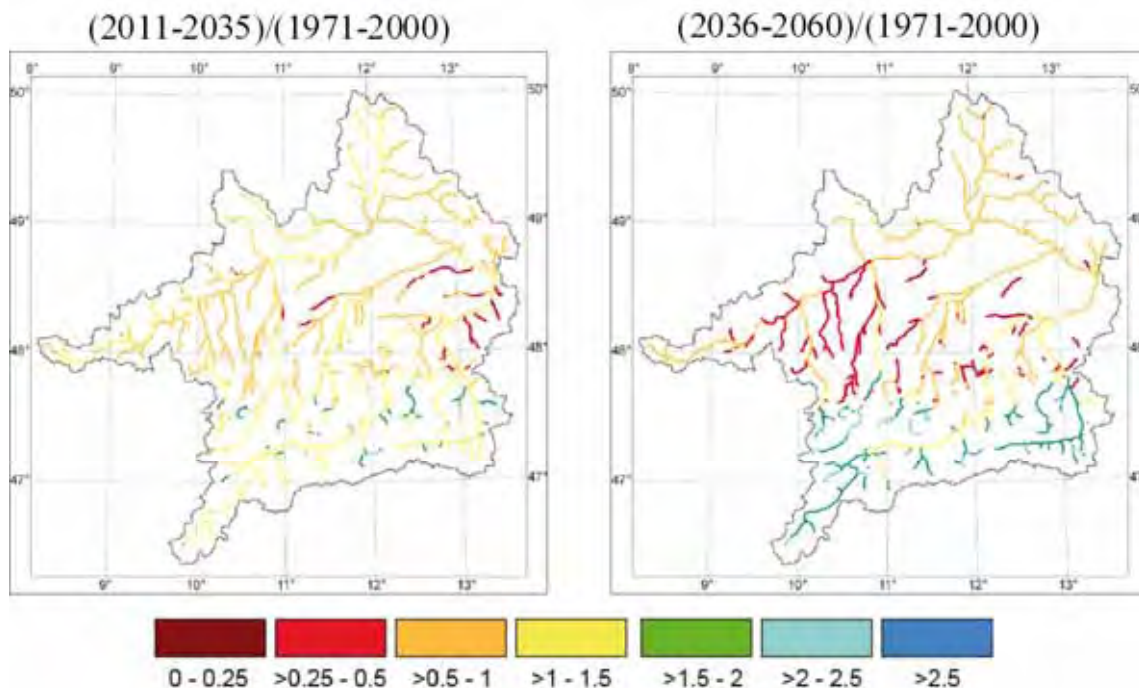


Abb. 9: Quotient aus  $NM7Q_{50}$  für die zukünftigen Zeiträume von 2011-2035 und 2036-2060 und die Vergangenheit von 1971-2000 nach dem Szenario *REMO regional – Baseline* im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

Analog zur Analyse des 50jährigen Niedrigwasserabflusses wurde das 100jährige Hochwasser  $HQ_{100}$  untersucht. Abb. 10 zeigt die Quotienten aus den zukünftigen und vergangenen  $HQ_{100}$  für den Mittelwert über alle 16 statistischen Klimavarianten für die Gerinne mit einem Bestimmtheitsmaß von über 0.8. Die Ergebnisse weisen auf eine Zunahme der Hochwasserspitzen in den Alpentälern und Kopfeinzugsgebieten hin (Grün-, Gelb- und Rottöne), während es im übrigen Einzugsgebiet kaum zu Änderungen kommt (Blautöne). Eine der Ursachen ist wiederum in der Veränderung der Niederschlagsart zu sehen, durch die in den Alpen weniger Wasser in Form von Schnee gespeichert werden wird.

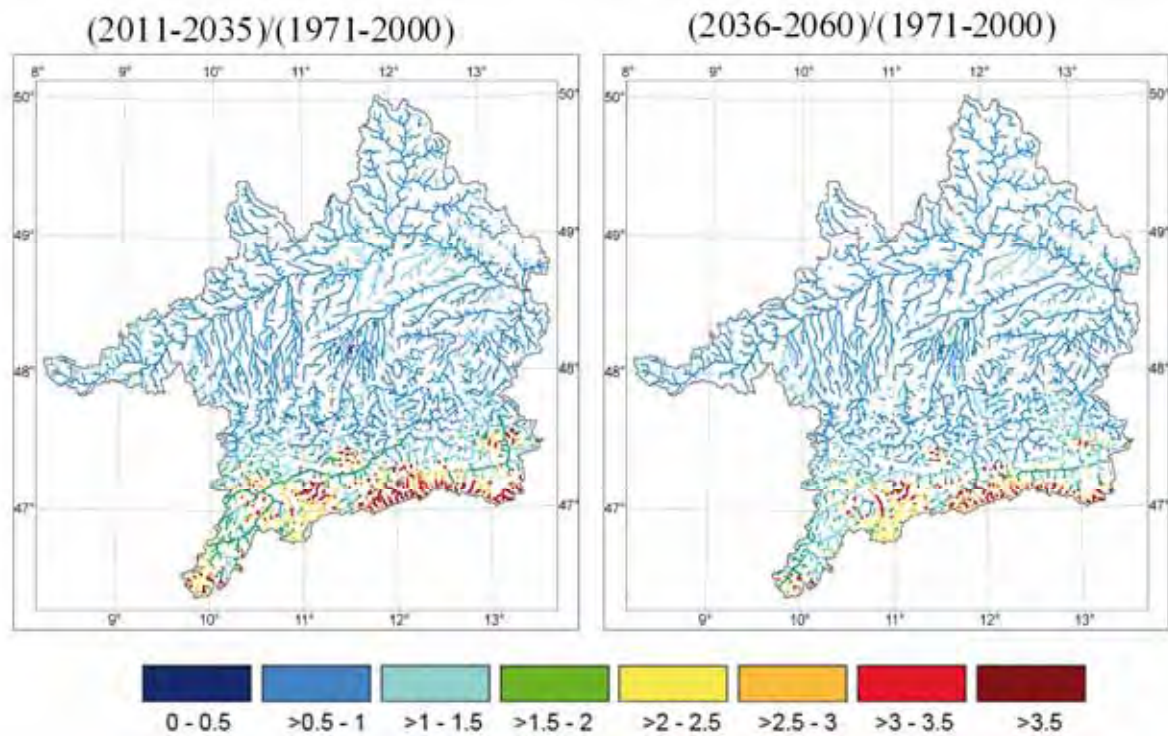


Abb. 10: Quotient aus  $HQ_{100}$  für die zukünftigen Zeiträume von 2011-2035 und 2036-2060 und die Vergangenheit von 1971-2000 nach dem Mittelwert über alle 16 statistischen Klimavarianten im Einzugsgebiet der Oberen Donau.

### 3.3 Folgen des Globalen Wandels im Einzugsgebiet der Oberen Donau

Die nach den gewählten Szenarien zu erwartenden Änderungen der Wasserressourcen an der Oberen Donau führen zu einer Verringerung des verfügbaren Wasserdargebotes, so dass das Wasser künftig knapper, jedoch nicht knapp werden wird. Neben zahlreichen weiteren Folgen wird es zu einer Reduzierung der Wasserkraftproduktion der vorhandenen Wasserkraftanlagen kommen. Für den derzeitigen Hauptträger der erneuerbaren Energie im Einzugsgebiet ist mit einem Rückgang zwischen 8 und 16 Prozent der Leistung zu rechnen. Des Weiteren reduziert sich aufgrund der verschärften Niedrigwassersituation in Verbindung mit steigenden Wassertemperaturen das Angebot an Kühlwasser für die Wärmekraftwerke im Sommer. Zudem ist mit einer Einschränkung der Schifffahrt in Niedrigwasserzeiten zu rechnen. Diese Folgen spielen nicht nur eine Rolle an der Oberen Donau, sondern sie werden sich auch auf die Unterliegerstaaten, die das Wasser des „Wasserschlosses“ der Oberen Donau intensiv nutzen, deutlich auswirken.

## 4 Zusammenfassung

Innerhalb des Forschungs- und Entwicklungsprojektes GLOWA-Danube wurden die Auswirkungen des Globalen Wandels auf die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Oberen Donau, das repräsentativ für ein alpin geprägtes Einzugsgebiet der Mittelbreiten angesehen werden kann, detailliert analysiert. Dazu wurde das Entscheidungsunterstützungssystem DANUBIA entwickelt, in dem sowohl naturräumliche als auch sozioökonomische Modelle miteinander gekoppelt werden, und somit eine integrative Betrachtung des Systems ermöglicht. Unter den gewählten Szenarien, die sich aus einer Kombination von Klima- sowie Gesellschaftsszenarien zusammensetzen, kommt es zu einer Verringerung des Wasserdargebotes an der Oberen Donau um 5 bis 35 Prozent, je nach gewähltem Szenario. D.h. das Wasser wird knapper, es wird jedoch nicht knapp werden, wie die Simulationsergebnisse zeigen. Gründe dafür sind neben der



leichten Verringerung der Niederschlagssumme die deutliche Abnahme des Schneesiederschlags sowie die starke Erhöhung der Verdunstung aufgrund der steigenden Temperaturen. Durch die Veränderung des Schneespeichers kommt es zu einer Verlagerung der sommerlichen Abflussspitzen vom Sommer in den Frühling, so dass eine Veränderung des Abflussregimes in Achleiten simuliert wurde. Für die künftige Entwicklung der Extremereignisse ist unter den gewählten Szenarien mit einer Verringerung der Niedrigwasserabflüsse im Einzugsgebiet zu rechnen, mit Ausnahme des Alpenraums, in dem eine Erhöhung zu erwarten ist. Für die künftige Hochwassersituation sind weitgehend geringe Veränderungen zu erwarten.

Neben zahlreichen weiteren Folgen kommt es zur Reduzierung der Wasserkraftproduktion sowie zu Einschränkungen der Schifffahrt. Die Veränderungen sind aufgrund der verringerten Wasserabgabe besonders auch für die Unterliegerstaaten der Oberen Donau von Bedeutung.

Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die vorgestellten regionalen Auswirkungen des Globalen Wandels unter der Annahme der gewählten Szenariobedingungen simuliert wurden und in diesem Sinne keine Prognose darstellen. D.h. unter geänderten Szenariobedingungen können die Effekte des globalen Wandels auf die Wasserressourcen im Einzugsgebiet der Oberen Donau sowohl stärker, aber auch schwächer sein.

## 5 Danksagung

Allen Projektpartnern wird für die Zusammenarbeit sowie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Freistaat Bayern und Ludwig-Maximilians-Universität München für die Förderung im Rahmen des GLOWA Verbundes herzlich gedankt. Außerdem gilt dem Deutschen Wetterdienst (DWD), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) ein Dank für die Bereitstellung von Daten.

## 6 Literatur

Barth, M., Hennicker, R., Kraus, A., Ludwig, M. (2004): DANUBIA: An Integrative Simulation System for Global Change Research in the Upper Danube Basin. *Cybnetics and Systems* 35(7-8), 639-666.

GLOWA-Danube-Projekt (Hrsg.)(2009): *Global Change Atlas Einzugsgebiet Obere Donau*. München.

IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change. Cambridge

Mauser, W., Bach, H. (2009): PROMET – Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds. *Journal of Hydrology* 376, 362-377

Mauser, W., Ludwig, R., 2002. GLOWA-DANUBE – a research concept to develop integrative techniques, scenarios and strategies regarding global changes of the water cycle. In: Beniston, M. (Ed.), *Climatic Change: Implications for the Hydrological Cycle and for Water Management*, *Advances in Global Change Research*, vol. 10. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht and Boston, 171–188.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models, a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 227, 33-51

## Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel (DAS)

Achim Daschkeit, Petra Mahrenholz  
Umweltbundesamt – Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass)

Die aktuelle Klimapolitik hat zwei komplementäre Schwerpunkte: Erstens die Reduktion der Emission von Klima beeinflussenden Gasen in die Atmosphäre (= Klimaschutz). Zweitens die Anpassung an den nicht mehr vermeidbaren Klimawandel. Wegen der Trägheit des Klimasystems wird es in den kommenden Jahrzehnten einen Klimawandel geben – selbst wenn ein sofortiger Stopp der treibhausgasrelevanten Emissionen erfolgen würde. Neben der Emissionsreduktion ist deswegen Anpassung an den Klimawandel notwendig. In seiner Konzeption zur Klimapolitik hat das Umweltbundesamt dargelegt, welche Weichen in der Klimapolitik durch wen zu stellen sind und wie Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel zusammenhängen (UBA 2009).

Im Dezember 2008 hat die Bundesregierung die Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel beschlossen (DAS). Sie ist zwischen den Bundesressorts unter Federführung Bundesumweltministeriums abgestimmt und mit den Bundesländern gemeinsam erarbeitet (Bundesregierung 2008). Im Beitrag werden die Inhalte der Deutschen Anpassungsstrategie skizziert sowie Perspektiven und Schwerpunkte der Umsetzung der DAS beschrieben.

### 1 Inhalte der Deutschen Anpassungsstrategie

Die DAS ist vor dem Hintergrund internationaler Vereinbarungen sowie europäischer Aktivitäten entstanden: Sowohl in der Klimarahmenkonvention von 1992 als auch im Kyoto-Protokoll von 1997 ist das Thema der Anpassung an den Klimawandel erwähnt (siehe für die offiziellen Dokumente: <http://unfccc.int/2860.php>).

Die Vertragsstaaten hatten bereits damals erkannt: Klimaschutz ist an der langfristigen Vermeidung möglicher Gefährdungen orientiert, Klimaanpassung an der überwiegend kurz- und mittelfristigen, zum Teil auch langfristigen Minimierung möglicher nachteiliger Effekte des Klimawandels. Auf europäischer Ebene hat die Kommission im Juli 2007 ein Grünbuch zur Anpassung an den Klimawandel vorgestellt und knapp zwei Jahre später (April 2009) ein Weißbuch ([http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/adaptation/index_en.htm)). Das Weißbuch umreißt zum einen die Notwendigkeit einer überstaatlichen Betrachtung von Klimaänderungen und Klimafolgen, beispielsweise im Hinblick auf Flusseinzugsgebiete oder großräumige Verschiebungen von Pflanzen- und Tierarten. Zum anderen betont die Kommission, dass voraussichtlich die kommunale Ebene innerhalb der Mitgliedsstaaten maßgeblich die konkrete Durchführung von Anpassung wird leisten müssen.

Auf nationaler Ebene wurde im Klimaschutzprogramm der Bundesregierung von 2005 festgeschrieben, dass die Aufstellung einer nationalen Anpassungsstrategie erfolgen soll. Die Bundesregierung beschloss die nationale Anpassungsstrategie und deren Umsetzung am 17. Dezember 2008.

Die DAS schafft einen Rahmen zur nationalen Anpassung an den Klimawandel und etabliert einen mittelfristig angelegten Prozess, in dem es um die Ermittlung des notwendigen Handlungsbedarfs, um die Definition von Anpassungszielen, um die Identifikation von Anpassungsmaßnahmen und deren Umsetzung, aber auch um das Erkennen von Zielkonflikten und deren Lösung bzw. Verminderung geht. Deshalb ist das zunächst allgemeine Ziel der DAS die Verminderung der Verwundbarkeit bzw. der Erhalt und die Steigerung der Anpassungsfähigkeit von ökologischen und sozialen Systemen gegenüber den Folgen von Klimaänderungen. Hierfür ist es u. a. notwendig, Gefahren und Risiken des Klimawandels erst einmal genau zu beschreiben und zu vermitteln, um so das Bewusstsein für die Notwendigkeit von Anpassung zu stärken





bzw. überhaupt erst einmal zu wecken. Genauso müssen Handlungsmöglichkeiten aufgezeigt und Verantwortlichkeiten abgestimmt werden.

Neben den bereits erkennbaren und den künftigen Klimaänderungen werden in der Anpassungsstrategie die möglichen Auswirkungen der Klimaänderungen sowie die Handlungsoptionen beschrieben – zum einen aus einer mehr sektoralen Perspektive für 13 Lebens-, Umwelt- und Wirtschaftsbereiche:

- Menschliche Gesundheit
- Bauwesen
- Wasserhaushalt und –wirtschaft, Küsten- und Meeresschutz
- Boden
- Biologische Vielfalt
- Landwirtschaft
- Wald- und Forstwirtschaft
- Fischerei
- Energiewirtschaft (Erzeugung, Transport, Versorgung)
- Finanzwirtschaft
- Verkehr, Verkehrsinfrastruktur
- Industrie und Gewerbe
- Tourismuswirtschaft

Zum anderen werden zwei Querschnittsthemen angesprochen: erstens der Bevölkerungs- und Katastrophenschutz sowohl in Hinblick auf Katastrophenvorsorge als auch in Hinblick auf den operativen Bereich und zweitens die Raum-, Regional- und Bauleitplanung – im weiteren Sinne also die Raumentwicklung und räumliche Planung.

Neben der sektoralen und sektorübergreifenden Betrachtung ist die regionale Perspektive von großer Bedeutung. Dies gilt nicht zuletzt deswegen, weil Klimaänderungen und Klimafolgen regional und lokal sehr unterschiedlich sein können und weil aller Voraussicht nach viele Anpassungsmaßnahmen auch auf regionaler und kommunaler Ebene durchgeführt werden müssen. Aus einer bundesweiten Perspektive können deshalb durchaus Regionen in Deutschland genannt werden, die im Vergleich zu anderen Regionen stärker von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein könnten, u. a. das nordostdeutsche Tiefland und die südostdeutschen Becken aufgrund eines künftig wahrscheinlich geringeren Wasserdargebots mit negativen Folgen für den Wasserhaushalt. Für den Alpenraum wird u. a. erwartet, dass sich Lebenszonen von Tieren und Pflanzen in höhere Lagen verschieben, sodass eine Gefährdung vieler Arten resultieren kann, da sie im Zuge des Klimawandels kaum Ausweichmöglichkeiten haben. Für Südwestdeutschland sind bspw. im Oberrheingraben eine deutliche Zunahme von heißen Tagen und Nächten sowie häufigere und länger andauernde Hitzeperioden zu erwarten. Durch die sich abzeichnende Verschiebung der Niederschläge vom Sommer in den Winter sowie einer möglichen Zunahme niederschlagsreicher Westwetterlagen nimmt in dieser Region die Gefahr für Hochwässer im Winterhalbjahr vermutlich zu. Auch die Küstenregionen in Deutschland können langfristig durch den Meeresspiegelanstieg und durch ein geändertes Sturmklima betroffen sein – auch wenn einige Aussagen zum Meeresspiegel und den künftigen Stürmen noch mit Unsicherheiten behaftet sind (vgl. Bundesregierung 2008, S. 46ff.).

## 2 Perspektiven der Umsetzung der Anpassungsstrategie

Die Bundesregierung hat mit der Verabschiedung der Anpassungsstrategie im Dezember 2008 einen Prozess gestartet, sich künftig aktiv mit Klimawandel und Anpassung auseinander zu setzen. Der nächste Meilenstein wird der Aktionsplan Anpassung, der bis April 2011 vorliegen soll. In diesem Aktionsplan sollen enthalten sein:

- Anpassungsmaßnahmen des Bundes sowie Maßnahmen des Bundes in Kooperation mit anderen Akteuren (hierfür bedarf es Grundsätze und Kriterien für eine Priorisierung von Handlungserfordernissen).
- Systematisierter Überblick über konkrete Maßnahmen anderer Akteure.
- Aussagen zur Finanzierung, insbesondere durch Integration der Anpassung in bestehende Förderprogramme.
- Konzeptvorschläge zur Erfolgskontrolle.
- Weiterentwicklung der Strategie und die darauf folgenden Schritte.

Der Aktionsplan Anpassung ist eine von drei Säulen des Umsetzungsprozesses der DAS - die anderen beiden Säulen sind die Verbesserung der Wissensbasis sowie der Dialog- und Kommunikationsprozess. Zur Unterstützung des Umsetzungsprozesses hat die Bundesregierung auf Ressortebene eine Interministerielle Arbeitsgruppe (IMA Anpassung) unter Federführung des Bundesumweltministeriums etabliert. Bund und Länder arbeiten seit Juni 2009 im Ständigen Ausschuss „Anpassung an die Folgen des Klimawandels“ (AFK) der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Klima, Energie, Mobilität – Nachhaltigkeit (BLAG KliNa, [www.umweltministerkonferenz.de/index.php?area=1&np=7,0,0,0,0,0,0,0#faq298](http://www.umweltministerkonferenz.de/index.php?area=1&np=7,0,0,0,0,0,0,0#faq298)) der Umweltministerkonferenz (UMK; [www.umweltministerkonferenz.de](http://www.umweltministerkonferenz.de)) gemeinsam an einer Vernetzung der Anpassungsaktivitäten und Strategien des Bundes und der Länder.

Darüber hinaus sind das in Aufbau befindliche Climate Service Center ([http://www.gkss.de/science\\_and\\_industrie/klimaberatung/csc/index.html.de](http://www.gkss.de/science_and_industrie/klimaberatung/csc/index.html.de)) und das Kompetenzzentrum Klimafolgen und Anpassung (KomPass) im Umweltbundesamt unterstützende Strukturen des Umsetzungsprozesses der DAS. Beide Organisationen übernehmen Aufgaben mit Blick auf eine Unterstützung der Verbesserung der Wissensbasis zu Klimafolgen und Anpassung. Das Bundesumweltministerium hat im Oktober 2006 KomPass beim Umweltbundesamt eingerichtet (siehe [www.anpassung.net](http://www.anpassung.net)), so dass hier schon mehrjährige Erfahrungen in Forschung zu notwendigen Umsetzungsprozessen der DAS und Politikberatung zu erforderlichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel sowie zur Unterstützung des Dialog- und Beteiligungsprozesses vorliegen. Abbildung 1 gibt einen Überblick zu den Angeboten der Kommunikationsplattform Klimafolgen und Anpassung von KomPass.

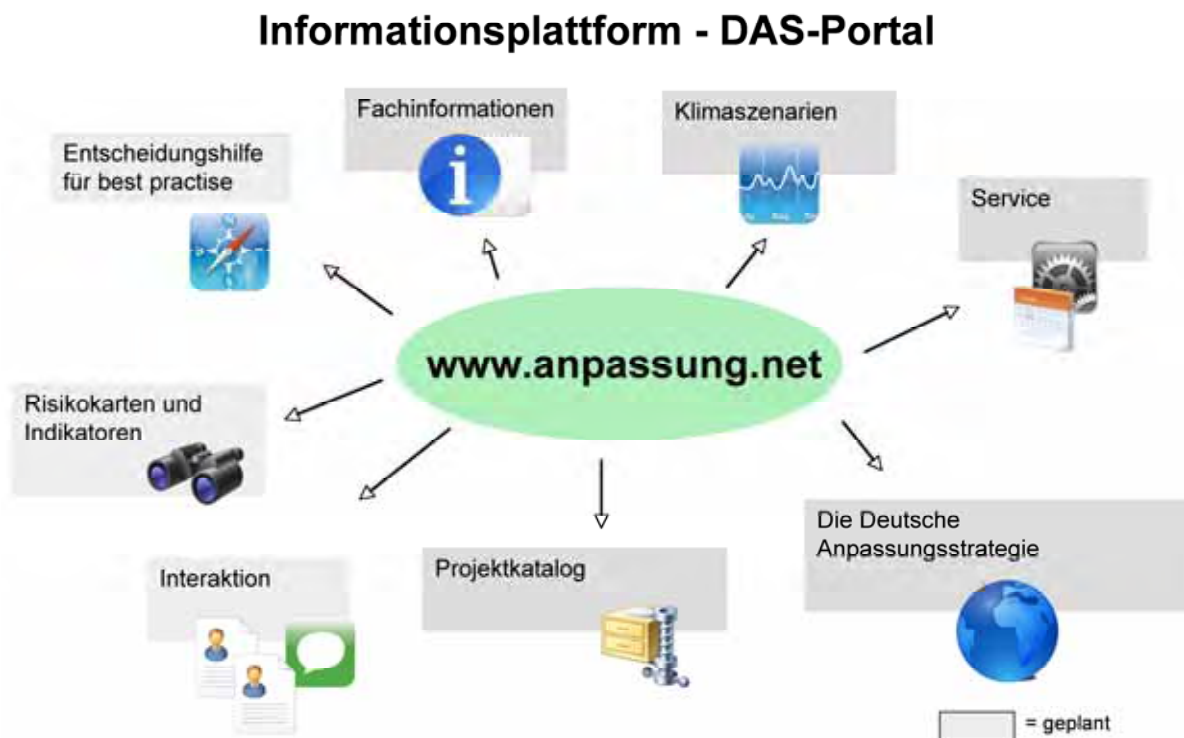


Abb. 1: Informationsplattform – DAS-Portal; Angebote KomPass zu Klimafolgen und Anpassung ([www.anpassung.net](http://www.anpassung.net)), Quelle: Entwurf C. Haße.

Für die Anpassungsstrategie und ihre Umsetzung ist die sektorübergreifende, integrierte Analyse von künftigen Risiken und Chancen des Klimawandels erforderlich – hierzu sind u. a. fachübergreifende Dialogprozesse mit und zwischen staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren im Anpassungsprozess erforderlich. KomPass unterstützte solche Dialogprozesse in den letzten drei Jahren, indem es Kommunikations-Plattformen für Verantwortliche in Bundes- und Landesbehörden, in Kommunen sowie in Verbänden und Unternehmen anbot und moderierte. Diese Plattformen – von Stakeholder Dialogen bis hin zu einer Internet gestützten Plattform – haben die Akteure mit bedarfsgerechten, oftmals zusammenfassend aufbereiteten und bewerteten Klimainformationen versorgt. Gleichzeitig konnte KomPass die Meinungen dieser Akteure zu sowie die Anforderungen an regionale und nationale Anpassungsprozesse erfassen und in den Politikprozess einspeisen. Die für den Anpassungsprozess erforderliche Wissensbasis kann sich bereits auf viele durch KomPass bereitgestellte Produkte, Informationen und Dienstleistungen stützen, wie den KomPass-Newsletter, Themenblätter, Broschüren und Flyer, deren Nutzung kontinuierlich wächst.

Zu den Aktivitäten des Umweltbundesamtes gehört auch die Durchführung und Veröffentlichung von Forschungsvorhaben, die zum Teil übergreifende Fragestellungen verfolgen, zum Teil auch detaillierte fachbezogene Themen behandeln. Ende 2009 wurde ein Vorhaben abgeschlossen, das sich mit wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien an den Klimawandel beschäftigte und ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt hat ([www.wasklim.de](http://www.wasklim.de)). Dieses Entscheidungsunterstützungssystem enthält u. a.

- hydrologische Kenngrößen (heutiges und künftiges Wasserdargebot sowie heutiger und künftiger Wasserbedarf),
- eine Bewertung der hydrologischen Kenngrößen auf der Basis von Stakeholderbefragungen in 3 Testgebieten und
- eine Bewertung möglicher Anpassungsmaßnahmen.

In dem Entscheidungsunterstützungssystem ist somit die ganze Kette der Entscheidungsvorbereitung abgebildet. Für die Bewertung wurden zudem innovative Methoden wie die Fuzzy-Logik eingesetzt.

Die Umsetzung und Weiterentwicklung der DAS steht vor großen Herausforderungen, u. a.:

1. In den nächsten Jahren wird sich zunehmend konkreter herausstellen, welchen Beitrag die verschiedenen Ebenen (Europäische Union, Bund, Bundesländer, Kommunen) zur Anpassung leisten können – bzw. leisten müssen. Das Geflecht der Beziehungen zwischen diesen Ebenen inkl. der Frage der Zuständigkeiten entwickelt sich derzeit, ohne dass schon im Einzelnen absehbar ist, wer genau für welche Maßnahmen und deren Umsetzung wann zuständig ist. Die Handlungsnotwendigkeiten sind in der Literatur beschrieben, bspw. für die europäische Ebene durch Ciscar (2009) und die EEA (2008). Auch die Bundesländer intensivieren ihre Aktivitäten zur Anpassung (vgl. zuletzt Sachsen-Anhalt mit einer Vulnerabilitätsstudie: Kropp et al. 2010). Damit sind vielerorts die Voraussetzungen für die Etablierung einer Governance-Struktur für einen Anpassungsprozess geschaffen, die Herausforderungen liegen im Detail der Anpassungspolitik (vgl. Scharpf 2009).
2. Die Identifikation von Anpassungsmaßnahmen ist ein Schritt auf dem Weg zum Aktionsplan Anpassung. Auf diesem Weg wird deutlich, dass es unterschiedliche Verständnisse darüber gibt, was eine Anpassungsmaßnahme ist. Im aktuellen Stadium der Diskussion erweist es sich als zweckmäßig, einen breiten Begriff von Anpassungsmaßnahmen zu verwenden, beispielsweise bedeutet das: Sowohl Informationskampagnen als auch bauliche Maßnahmen sind als Anpassungsmaßnahmen anzusehen, genauso wie ökonomische Anreizsysteme oder auch Frühwarnsysteme für witterungsbedingte Gefahren. Bei der Identifikation von Maßnahmen sind gleichermaßen sektorale wie sektorübergreifende sowie regionale und überregionale Informations-Quellen von großem Wert. Der KLIWA-Verbund gehört zu den regional übergreifenden Ansätzen, die bislang die Hochwasser-Problematik in den Mittelpunkt gestellt hat.
3. Neben der Identifikation von Anpassungsmaßnahmen ist auch die Frage relevant: In welcher Reihenfolge werden Anpassungsmaßnahmen umgesetzt? Hierzu ist es nötig, eine Priorisierung vorzunehmen. Jede Form der Priorisierung wird nach entweder impliziten oder expliziten Kriterien vorgenommen, beispielsweise können Anpassungsmaßnahmen den Kriterien der Nachhaltigkeit entsprechen oder sie werden nach ökonomischen Kriterien ausgewählt; oder eine Priorisierung von Maßnahmen bemisst sich danach, ob Synergien oder Konflikte z. B. mit dem Klimaschutz auftreten. Eine verbindliche „Liste“ von Kriterien zur Priorisierung von Anpassungsmaßnahmen inkl. der Operationalisierung dieser Kriterien gibt es nicht – und kann es auch nicht geben, denn die Auswahl und Anwendung von Priorisierungskriterien ist idealer Weise Gegenstand von demokratischen Prozessen. Inwieweit dieser demokratische Prozess geöffnet und wie transparent er gestaltet wird, liegt in der Verantwortung der Akteursgruppe, die jeweils das Mandat für den Anpassungsprozess hat.



### 3 Literatur

- Bundesregierung (2008): Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17. Dezember 2008 beschlossen. Berlin (Bundestagsdrucksache 16/11595 vom 19.12.2008).
- Ciscar, J.-C. (Ed.) (2009): Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project. Luxembourg: European Commission, Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, Institute for Environment and Sustainability
- EEA (European Environment Agency) (2008) Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment. Copenhagen (Joint EEA-JRC-WHO report; JRC Joint Research Centre, WHO World Health Organization; EEA Report No 4/2008; JRC Reference Report No JRC 47756)
- Kropp, J., Roithmeier, O., Hattermann, F., Rachimow, C., Lüttger, A., Wechsung, F., Lasch, P., Christiansen, E.S., Reyer, C., Suckow, F., Gutsch, M., Holsten, A., Kartschall, T., Wodinski, M., Hauf, Y., Conradt, T., Österle, H., Walther, C., Lissner, T., Lux, N., Tekken, V., Ritschie, S., Kossak, J. Klaus, M., Costa, L., Vetter, T., Klose, M. (2010): Klimawandel in Sachsen-Anhalt. Verletzlichkeiten gegenüber den Folgen des Klimawandels. Potsdam: Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Studie im Auftrag des MLU (Ministerium für Landwirtschaft und Umwelt) Sachsen-Anhalt
- Scharpf, F. (2009) Föderalismusreform. Kein Ausweg aus der Politikverflechtungsfalle? Frankfurt am Main, New York: Campus (Schriften aus dem Max-Planck-Institut für Gesellschaftsforschung)
- UBA (Umweltbundesamt) (2009): Konzeption des Umweltbundesamtes zur Klimapolitik. Notwendige Weichenstellungen. Umweltbundesamt: Dessau

**Verzeichnis der Referenten**

<p>Dr. Michael Altmayer Bayerisches Landesamt für Umwelt Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 86179 Augsburg</p> <p>Michael.Altmayer@lfu.bayern.de</p>	<p>Prof. Dr. Dr.-Ing. András Bárdossy Institut für Wasserbau Universität Stuttgart Pfaffenwaldring 61 40569 Stuttgart</p> <p>Bardossy@iws-stuttgart.de</p>
<p>Dr. Paul Becker Deutscher Wetterdienst Frankfurter Straße 135 63067 Offenbach</p> <p>Paul.Becker@dwd.de</p>	<p>Prof. Dr.-Ing. Hans J. Caspary Hochschule für Technik Stuttgart Schellingstraße 24 70174 Stuttgart</p> <p>Hans.Caspary@hft-stuttgart.de</p>
<p>PD Dr. Achim Daschkeit FG I 2.1 Klimaschutz Umweltbundesamt Postfach 14 06 06813 Dessau-Roßlau</p> <p>Achim.Daschkeit@uba.de</p>	<p>Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle Bayerisches Landesamt für Umwelt Bürgermeister-Ulrich-Straße 160 86179 Augsburg</p> <p>Albert.Goettle@lfu.bayern.de</p>
<p>Thomas Gudera Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Griesbachstraße 1 76185 Karlsruhe</p> <p>Thomas.Gudera@lubw.bwl.de</p>	<p>Dr. Frieder Haakh Zweckverband Landeswasserversorgung Postfach 10 55 52 70182 Stuttgart</p> <p>Haakh.F@lw-online.de</p>
<p>Wolfgang Hennegriff Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Griesbachstraße 1 76185 Karlsruhe</p> <p>Wolfgang.Hennegriff@lubw.bwl.de</p>	<p>Mario Hergesell Hessisches Landesamt für Umwelt und Geo- logie Rheingaustraße 186 65203 Wiesbaden</p> <p>Mario.Hergesell@hlug.hessen.de</p>



<p>Dr.-Ing. Jürgen Ihringer          Institut für Wasser und Gewässerentwicklung          Karlsruher Institut für Technologie (KIT)          76128 Karlsruhe</p> <p>Ihringer@iwg.kit.edu</p>	<p>László Kóthay, Staatssekretär          Ministry for Environment and Water          Fő utca 44 -50          1011 Budapest/Ungarn</p> <p>E-Mail über          Kapitanyg@mail.kvvm.hu</p>
<p>Raimund Kohl          Landesanstalt für Umwelt, Messungen und          Naturschutz Baden-Württemberg          Griesbachstraße 1          76185 Karlsruhe</p> <p>Raimund.Kohl@lubw.bwl.de</p>	<p>Dr. Hans-Jochen Luhmann          Wuppertal Institut für Klima, Umwelt,          Energie GmbH          Döppersberg 19          42103 Wuppertal</p> <p>Jochen.Luhmann@wupperinst.org</p>
<p>Dr. Ulrich Matthes          Forschungsanstalt für Waldökologie und          Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz          Hauptstraße 16          67705 Trippstadt</p> <p>Matthes@rhrk.uni-kl.de</p>	<p>Prof. Dr. Wolfram Mauser          Lehrstuhl für Geographie und geographische          Fernerkundung          Luisenstraße 37          80333 München</p> <p>W.Mauser@iggf.geo.uni-muenchen.de</p>
<p>Dr. Hans Moser          Bundesanstalt für Gewässerkunde          Am Mainzer Tor 1          56068 Koblenz</p> <p>Moser@bafg.de</p>	<p>Dr. Jörg Neumann          Bayerisches Landesamt für Umwelt          Bürgermeister-Ulrich-Straße 160          86179 Augsburg</p> <p>Joerg.Neumann@lfu.bayern.de</p>
<p>Dr.-Ing. Dieter Prellberg          Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft          und Gewerbeaufsicht          Kaiser-Friedrich-Straße 7          55116 Mainz</p> <p>Dieter.Prellberg@luwg.rlp.de</p>	<p>Dr. Bruno Rudolf          Deutscher Wetterdienst          Frankfurter Straße 135          63067 Offenbach</p> <p>Bruno.Rudolf@dwd.de</p>
<p>Dr. Gerd Schädler          Institut für Meteorologie und Klimaforschung          Karlsruher Institut für Technologie (KIT)          76128 Karlsruhe</p> <p>Gerd.Schaedler@imk.fzk.de</p>	<p>Dr. David Volken          Bundesamt für Umwelt (BAFU)          Abteilung Hydrologie          CH-3003 Bern</p> <p>David.Volken@bafu.admin.ch</p>
<p>Hans Weber          Bayerisches Landesamt für Umwelt          Bürgermeister-Ulrich-Straße 160          86179 Augsburg</p> <p>Hans.Weber@lfu.bayern.de</p>	<p>Dr. Winfried Willems          Institut für Angewandte Wasserwirtschaft          und Geoinformatik (IAWG)          Alte Landstraße 12 – 14          85521 Ottobrunn</p> <p>Willems@iawg.de</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.





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.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>