
3. KLIWA-Symposium

am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart

Fachvorträge
Klimaveränderung und
Konsequenzen für
die Wasserwirtschaft

KLIWA-Berichte

Heft 10



KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

3. KLIWA-Symposium

am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart

Fachvorträge

Klimaveränderung und
Konsequenzen für
die Wasserwirtschaft

KLIWA-Berichte

Heft 10



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
Herausgabedatum	September 2007
ISBN	978-3-88251-325-7
Bearbeitung	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe
Redaktionelle Bearbeitung	Vassilis Kolokotronis, Martin Treis, LUBW, Karlsruhe, Referat 43
Umschlaglayout	Stephan Riedlberger - Graphik Design, München
Druck	E&B Engelhardt und Bauer, 76131 Karlsruhe
Umwelthinweis	Druck auf Recyclingpapier
Bezug über	Vertragsauslieferung der LUBW bei der JVA Mannheim – Druckerei Herzogenriedstr. 111, 68169 Mannheim, Telefax: (0621) 398-370

Nachdruck - auch auszugsweise - nur mit Zustimmung der Herausgeber unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.
Die inhaltliche Verantwortung für den einzelnen Beitrag liegt bei dem jeweiligen Autor.

3. KLIWA-Symposium

Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft

Inhaltsverzeichnis	Seite
Vorbemerkung	7
Begrüßung Margareta Barth, Präsidentin der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	9
Grußwort Dirk Thürnau, Bürgermeister der Stadt Stuttgart.....	11
Klimawandel und Klimaschutz in Baden-Württemberg Tanja Gönner, Umweltministerin Baden-Württemberg, Stuttgart	15
Klimawandel und Klimaschutz in Bayern Werner Schnappauf, Bayerischer Staatsminister für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz, München	21
Globale Aspekte des Klimawandels Mojib Latif, Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel.....	27
Klimawandel und Klimaforschung	
Künftige Klimaänderungen in Deutschland - ein Anlass zur Sorge? Petra Mahrenholz, Umweltbundesamt Dessau	33
KLIWA - Regionale Untersuchungen für die Wasserwirtschaft Bernd Katzenberger, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	45
Klimawandel und Hochwasser	
Starkniederschläge und Schneeschmelze in Süddeutschland Gabriele Malitz, Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Berlin	55
Simulation von Hochwasserereignissen in Baden-Württemberg Manfred Bremicker, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	71
Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen im bayerischen Maingebiet Alexander Kleinhans, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof Winfried Willems, Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn	79

Handlungsempfehlungen bei der Festlegung des Bemessungshochwassers in Baden-Württemberg Wolfgang Hennegriff, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	91
Das EU-Projekt ESPACE: Hochwasserschutzplanung für die Fränkische Saale unter Berücksichtigung des Klimawandels Leonard Rosentritt, Wasserwirtschaftsamt Bad Kissingen	105
Historische Hochwasserinformationen und deren Nutzung Helmut Straub, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	113
Untersuchung zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Süddeutschland Hans Weber, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof	131

Klimawandel und Wasserwirtschaft

Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland Winfried Willems, Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik, Ottobrunn	143
Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland Jörg Neumann, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof Thomas Gudera, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	163
Entwicklung einer Methodik zur Berücksichtigung des Klimawandels bei der Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Entwässerungssystemen Joachim Ruf, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	175
Folgen des Klimawandels für die Gewässerbeschaffenheit in Süddeutschland Uwe Matthias, Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe	179
Auswirkungen der Klimaveränderung auf Binnenseen am Beispiel des Bodensees Bernd Wahl, Institut für Küstenforschung des Grossforschungszentrums GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH, für das Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Langenargen	185
Das EU-Projekt RIVERTWIN-Neckar: Ein Beitrag zum integrierten Flussgebietsmanagement Thomas Gaiser, Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Stuttgart	199

Klimawandel in anderen Regionen

Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hessen Gerhard Brahmer, Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden.....	211
Climate Change and the river Thames catchment Tim Reeder, Environment Agency UK, London	223
Die Schweiz im Jahre 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft und auf andere wichtige Bereiche Bruno Schädler, Bundesamt für Umwelt, Bern.....	229
Folgerungen und Ausblick für das Vorhaben KLIWA Hansjörg Strähle, Umweltministerium Baden-Württemberg, Stuttgart	241

Kurzstatements zur Podiumsdiskussion von Experten zum Problemkreis „Gesellschaftliche Auswirkungen des Klimawandels“

Claudia Kemfert, Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin	245
Nico Stehr, Zeppelin-Universität Friedrichshafen.....	247
Armin Grunwald, ITAS-Forschungszentrum Karlsruhe	249
Eberhard Faust, Münchener Rück, München.....	251
Christiane Markard, Fachbereichsleiterin „Gesundheitlicher Umweltschutz, Schutz der Ökosysteme“ des Umweltbundesamtes Dessau.....	253
Markus Disse, Lehrstuhl für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz der Universität der Bundeswehr München	255



Vorbemerkung

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.

Seit einiger Zeit setzt sich auf breiter Front zunehmend die Erkenntnis durch, dass wir auf unserem Planeten derzeit schon einen spürbaren Klimawandel erleben, der sich in der Zukunft verstärkt fortsetzen wird. Die Aussagen 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, fehlen weitgehend.

Da dies auch für Süddeutschland gilt, haben die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Bayern zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst Anfang 1999 ein gemeinsames längerfristig angelegtes Vorgehen zum Themenkomplex „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) vereinbart. Damit werden die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in den Flussgebieten und Grundwasserlandschaften beider 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 der interessierten Fachwelt vorgestellt. Beim 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26. Oktober 2006 in Stuttgart standen neu gewonnene Ergebnisse, Erkenntnisse und Schlussfolgerungen im Vordergrund.





Begrüßung

Margareta Barth

Präsidentin der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

Ich freue mich, Sie im Namen der LUBW – der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg zum 3. KLIWA-Symposium begrüßen zu dürfen. Ich freue mich über die große Resonanz. Herzlich willkommen heißen möchte ich Frau Tanja Gönner, die Umweltministerin von Baden-Württemberg und Herrn Dr. Werner Schnappauf, den bayrischen Staatsminister für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz. Ich danke Ihnen, Frau Ministerin Gönner und Herr Minister Dr. Schnappauf, dass unser Symposium noch einen Platz in Ihrem vollen Terminkalender gefunden hat und Sie nachher über den Klimawandel und den Klimaschutz in Baden-Württemberg bzw. Bayern referieren. Aus dem Landtag Baden-Württemberg begrüße ich die Abgeordneten Dr. Gisela Splett, Dieter Ehret und Werner Raab. Herzlich willkommen auch Herr Bürgermeister Dirk Thürnau, der heute das Grußwort der Stadt Stuttgart sprechen wird.

Es ist mir eine besondere Freude, Herrn Professor Dr. Latif vom Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität in Kiel zu begrüßen. Ich danke Ihnen, dass Sie heute zu unserem Symposium gekommen sind und den Eröffnungsvortrag halten werden.

Vom Deutschen Wetterdienst begrüße ich den Vizepräsidenten des DWD, Herrn Prof. Dr. Gerhard Adrian.

Besonders begrüßen möchte ich auch alle Referenten und mich für ihr Kommen bedanken. Ich freue mich, dass so viele Vertreter von Behörden, aus der Wissenschaft und von Ingenieurbüros aus dem ganzen Bundesgebiet und dem benachbarten Ausland den Weg hierher nach Stuttgart gefunden haben.

Das Kooperations-Projekt KLIWA nahm Anfang 1999 seine Arbeit auf, zu einer Zeit, als für viele das Thema Klimawandel lediglich ein Streit unter Experten war. Die Länder Bayern und Baden-Württemberg sowie der Deutsche Wetterdienst fanden sich als Partner zusammen, um das Thema Klimaveränderung insbesondere im Hinblick auf die Auswirkungen in der Wasserwirtschaft in Angriff zu nehmen. Von Anfang an war auch die Bundesanstalt für Gewässerkunde dabei.

Das Projekt KLIWA hat von den langjährigen Wetter- und Pegeldaten profitiert, die seit Mitte des 19. Jahrhunderts aufgezeichnet werden. Wir hatten das Glück, auf langjährige meteorologische und hydrologische Zeitreihen zurückgreifen zu können, Zeitreihen, die uns für eine Datenanalyse zur Verfügung standen. Erste Ergebnisse der Datenanalyse dieser historischen Daten lagen schon beim 1. KLIWA-Symposium im November 2000 in Karlsruhe vor. Dabei konnte klar belegt werden, dass sich insbesondere die Zahl der Extremereignisse in den 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts deutlich erhöht hat.

Nach diesem Blick in die Vergangenheit richten wir den Blick in die Zukunft, mit der Berechnung von Klima-Szenarien für den Zeitraum 2021 bis 2050. Drei verschiedene Modelle mit unterschiedlichen Berechnungsansätzen führten im Grundsatz zum gleichen Ergebnis: Die Klimaveränderung ist bereits da und wird sich in den kommenden Jahrzehnten noch verstärken. Dies war die Kernaussage beim 2. KLIWA-Symposium im Mai 2004 in Würzburg.

Heute beim 3. KLIWA-Symposium sind wir alle auf die neuen Ergebnisse gespannt. Ich freue mich hierbei besonders auf den Eröffnungsvortrag von Herrn Professor Latif über die globalen Aspekte des Klimawandels. Danach fokussieren wir unseren Blick zunächst auf Deutschland und



dann auf den süddeutschen Raum. Dabei stehen die erstmaligen Untersuchungen regionaler Klimaszenarien im Vordergrund.

Der heutige Nachmittag steht ganz im Zeichen des Hochwassers.

Wir sind stolz darauf, dass wir zu den Ersten gehören, die für die Abschätzung künftiger Hochwässer die Ergebnisse aus Klimaszenarien mit Wasserhaushaltsmodellen kombiniert haben, was uns regional differenzierte Aussagen erlaubt. So können wir detaillierte Handlungsempfehlungen für die Planer geben. Dabei verfolgen wir die Strategie „flexible and no regret“, d.h. zu späterer Zeit erforderliche Baumaßnahmen zwar vorbereiten, aber heute noch nicht durchführen.

Es ist ja nicht nur das Hochwasser, das uns als Extremereignis in Zukunft treffen wird, sondern auch das Niedrigwasser. Einen Vorgeschmack hatten wir schon im Sommer 2003 landesweit und im Herbst 2004 am Bodensee

Weitere Themen, die in KLIWA angegangen wurden, sind das Grundwasser, die Stadthydrologie sowie die Gewässerbeschaffenheit und die Limnologie. Über den derzeitigen Stand der Untersuchungen werden wir morgen Vormittag im Teil „Klimawandel und Wasserwirtschaft“ informiert werden.

Im letzten Block werden wir über den Tellerrand blicken und hören, wie die Kollegen aus England, der Schweiz und Hessen das Problem einschätzen. An dieser Stelle darf ich recht herzlich begrüßen: Herrn Tim Reeder von der Environment Agency London, Herrn Dr. Bruno Schädler vom Bundesamt für Umwelt in Bern und Herrn Dr. Gerhard Brahmer vom Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie. Herzlichen Dank für Ihre Bereitschaft, über den Klimawandel und die Auswirkungen in Ihren Ländern zu referieren.

Den abschließenden Höhepunkt bildet morgen die Podiumsdiskussion mit hochrangigen Fachleuten zum Problemkreis „Gesellschaftliche Auswirkungen des Klimawandels“, moderiert von Inge Niedeck vom ZDF.

Meine Damen und Herren, aus unserer Sicht ist KLIWA das Erfolgsmodell einer Kooperation. Dies betrifft zum einen die sehr gute, vertrauensvolle Zusammenarbeit der Beteiligten untereinander. Zum anderen ist KLIWA auch ein sehr schönes Beispiel dafür, wie die Ergebnisse wasserwirtschaftlicher Untersuchungen unmittelbar in konkrete Handlungsanleitungen für die Verwaltungspraxis umgesetzt werden. Nicht zuletzt liefert KLIWA zahlreiche Grundlagendaten für andere Untersuchungen zum Klimawandel in Süddeutschland.

Ich darf allen, die zum Gelingen dieses Symposiums beigetragen haben, nochmals für die hervorragende Arbeit danken, die sie geleistet haben. Besonders danke ich allen Referenten, die heute und morgen ihre Ergebnisse präsentieren.

Dem 3. KLIWA-Symposium wünsche ich einen guten Verlauf und interessante Diskussionen. Ich hoffe, dass Sie meine Damen und Herren, zahlreiche Anregungen mit nach Hause nehmen.



Grußwort

Dirk Thürnau
Bürgermeister der Stadt Stuttgart

Sehr geehrte Frau Ministerin Gönner,
sehr geehrter Herr Minister Schnappauf, den ich an dieser Stelle sozusagen virtuell begrüßen darf, weil er noch auf der Autobahn unterwegs ist,
sehr geehrte Frau Präsidentin Barth,
meine Damen und Herren,

ich freue mich, Sie in der Landeshauptstadt Stuttgart zum 3. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ im Namen von Oberbürgermeister Schuster und auch im Namen des Gemeinderates hier begrüßen zu dürfen. Stuttgart selbst soll in diesem Zusammenhang nicht nur ein attraktiver und angenehmer Tagungsort sein, sondern auch wir als Kommune sind sehr an den Ergebnissen ihrer Forschung zum Klimawandel interessiert. Sind wir doch speziell im technischen Referat, für das ich als Bürgermeister verantwortlich zeichne, auch selbst vielfältig betroffen.

Das Thema Hochwasserschutz, von Frau Barth eben kurz gestreift, trifft uns als Stadt besonders, da das baden-württembergische Wassergesetz die Bundeswasserstraße Neckar leider nicht als Gewässer erster Ordnung einstuft und wir damit in der Verantwortung für den Hochwasserschutz stehen. Der Klimawandel führt aber nicht nur zu veränderten Hochwasserereignissen, sondern auch zu Niedrigwasserperioden, was zur Folge hat, dass die Wasserqualität der Gewässer extrem beeinflusst wird. Gerade am staugeregelten Neckar, der durch einen Ballungsraum fließt, in den viele Kläranlagen einleiten und aus dem einige Kraftwerke ihr Kühlwasser entnehmen, kann Niedrigwasser zum Problem in Sachen Gewässergüte führen. Hier kann nur ein durchgängiges Konzept, das über die Region Stuttgart hinausreicht, Abhilfe schaffen. Aber auch als Betreiber eines großen Kanalnetzes und mehrerer Kläranlagen wollen wir die Gewässergüte erhalten und ggfs. noch verbessern. Dies wird im Hinblick auf die häufigeren Regenerereignisse noch wichtiger als bisher. Im Stuttgarter Mischsystem müssen deshalb die Möglichkeiten zur Rückhaltung von Niederschlagswasser auch auf privatem Gelände zur Reduzierung der Gewässerbelastung durch Einleitung aus dem Kanalnetz verstärkt in Erwägung gezogen werden. Konkrete Daten und Fakten, wie Sie sie eben beschrieben haben, Frau Barth, zur Niederschlagshäufigkeit und Intensität, geben uns hier die notwendigen Bemessungs- und Planungssicherheiten für die Zukunft.

Doch vom Klimawandel sind nicht nur unsere Gewässer, sondern auch die Trinkwasserversorgung betroffen. So werden Änderungen der Grundwasserneubildung, Auswirkungen auf Gewässerstände und damit auch die Trinkwasserversorgung langfristig haben. Und auch vor dem Bodensee, wir haben das vorhin schon gehört, der uns bisher als unerschöpfliches Grundwasserreservoir galt, machen klimatische Veränderungen leider keinen Halt, wenn auch die Trinkwasserversorgung aus der heutigen Perspektive, ich möchte sagen, als langfristig noch gesichert gilt.

Die Einflüsse eines möglichen Klimawandels treffen uns in vielen Bereichen und nur durch einen langfristigen Aktionsplan, der auf fundierten Erkenntnissen beruht, kann richtig und wirtschaftlich auf die Herausforderungen reagiert werden. Grundlage hierfür ist ein Forum wie ihres. Hier haben sich Kräfte zusammengeschlossen, die mit ihrer Fachkompetenz ein Konzept entwickelt haben, mit dem die Beurteilung und Bewertung der aktuellen Situation und möglicher Zukunftsszenarien für uns als Kommunen möglich werden. Durch die Zusammenarbeit der beiden Länder Bayern und Baden-Württemberg sowie des Deutschen Wetterdienstes konnten Know-



how und finanzielle Mittel konzentriert werden, um eine Aufgabenstellung wie diese auch erst bewältigen zu können.

Das Thema Klimaänderung ist international. Herr Latif wird uns sicherlich daher noch einige Ausführungen dazu machen und macht an keiner denkbaren Grenze halt. Die Auswirkungen der Klimaänderungen treffen uns aber lokal und Reaktionen auf diese veränderten Situationen sind nur wenig befriedigend, da sie an den Ursachen nichts verändern. Es gilt deshalb auch, die Hauptursache für die Klimaveränderungen wirkungsvoll zu bekämpfen. Wir können dies erreichen, indem wir das weitere Ansteigen der klimaschädlichen Immissionen verhindern, die zum Großteil durch Verbrennung fossiler Energieträger entstehen. Städte und ihre Einwohner spielen bei der Reduzierung der Treibhausgase eine bedeutende Rolle, denn hier gibt es erhebliche Potentiale. CO₂ und andere Treibhausgase zu minimieren.

Die Landeshauptstadt Stuttgart hat hierzu ein Klimaschutzkonzept erarbeiten lassen, das Vorschläge zu Einsparungen in allen Bereichen enthält. Ergänzt wird dieses Konzept durch ein 10 Punkteprogramm zum Klimaschutz. Zu den Maßnahmen, um hier nur einige zu nennen, gehört die Einrichtung eines von verschiedenen Organisationen getragenen Energieberatungszentrums als eine unabhängige Einrichtung, welche Hausbesitzer bei der Planung von Energiesparmaßnahmen berät. Ebenso ist das kommunale Altbausanierungsprogramm zu nennen, durch das energetisch sinnvolle Sanierungen gefördert werden und somit ein attraktiver und aktiver Beitrag zur Verminderung des Ausstoßes von CO₂ geleistet wird. Im Zeitraum von 1998 bis 2005 konnten in diesem Programm ca. 10 Mio. € bewilligt werden, mit denen insgesamt Investitionen in Höhe von 58 Mio. € ausgelöst wurden. Klimaschutz ist somit auch ein Programm für die örtliche Wirtschaftsförderung.

Doch die Stadt möchte nicht nur private Eigentümer zu Investitionen in Energiesparmaßnahmen und damit zum Klimaschutz ermutigen, sie leistet natürlich auch selbst einen großen Beitrag. Teil dieses Klimaschutzkonzeptes ist auch, das nun schon seit mehr als 25 Jahren bestehende städtische Energiemanagement, welches das Ziel hat, die städtischen Liegenschaften energiesparend zu betreiben. So ist ein weiterer Schwerpunkt die Sanierung von städtischen Gebäuden, besonders von Schulen, die in Bezug auf Wärmedämmung und den Einsatz von energieeffizienten und umweltfreundlichen Heizanlagen und zum größten Teil sogar mit erneuerbaren Energien, wie z.B. Hackschnitzeln oder Klärgas betrieben werden. Seit 1977 ist daher der Energieverbrauch in den städtischen Liegenschaften um ca. 45 % zurückgegangen. Im Verkehrsbereich, Frau Ministerin hat es eben über die Schulter hinweg schon angesprochen, haben wir ein schönes Thema, Stuttgart 21, es sollte sehr zur Reduzierung von CO₂ und Treibhausgasen beitragen, aber dazu möchte ich jetzt an dieser Stelle aufgrund der Aktualität keine weiteren Ausführungen machen. Im Verkehrsbereich gibt es heute Einrichtungen in dieser Stadt, wie z.B. die Mobilitätszentrale, die Bürgerinnen und Bürgern kompetent in allen Fragen der Mobilität berät. So wurde ein Fahrgemeinschaftsvermittlungssystem aufgebaut, das so genannte Pendlernetz Stuttgart, um den Menschen einfache Hilfestellung zu geben, wie sie ihren Arbeitsweg, auch unabhängig vom PKW, gestalten können.

Inzwischen hat man erkannt, dass der Klimawandel nicht mehr zu vermeiden ist. Daher spielt natürlich auch das Thema Anpassung an den Klimawandel eine zunehmend bedeutende Rolle. Die Landeshauptstadt Stuttgart arbeitet gemeinsam mit nationalen und internationalen Partnern am EU-Projekt AMICA, in dem Strategien zur Anpassung an die zu erwartenden Klimaänderungen gesucht werden. In diesem Projekt leitet Stuttgart die Arbeitsgruppe Strategien gegen zunehmende Hitze. Sie erinnern sich noch an den Hitzesommer 2003, Frau Barth hat ihn soeben angesprochen, mit europaweit vielen Todesfällen, aber auch mit der Situation, dass wir hier in der Stadt aufgrund vermehrt betriebener Klimalanlagen einen höheren Strombedarf hatten und die Kraftwerke mit dem Kühlwasserproblem im Neckar zu kämpfen hatten. Solche Sommer könnten künftig immer häufiger werden. Die Stuttgarter Bemühungen sind auch auf diesem Gebiet vorbildhaft.



Nennen möchte ich die Bemühungen der Stadtklimatologen im Rahmen der Bauleitplanung, da mache ich ein bisschen Werbung für die Stadt. Die Stadt zwischen Wald und Reben, eine wunderbare topographische Lage hier in der Großstadt zu leben, sich teilweise wie im Grünen zu befinden, aber auch ein großer Nutzungsanspruch an die Fläche, an die Stadträumlichkeiten immer wieder der Druck, neue Baulandflächen auszuweisen und dort mit dem Klima entsprechend umzugehen. Großzügige Begrünungen und der Erhalt von Kaltluftschneisen in Bebauungsplänen sind ein wichtiger Aspekt. Ein Förderprogramm zur Dachbegrünung sowie die Begrünung auch von Stadtbahntrassen sind in diesem Zusammenhang zu erwähnen.

Großen Wert legen wir auch auf das Thema Öffentlichkeitsarbeit im Klimaschutz. Dazu gehört ein Energiesparwettbewerb, den wir mit der Bevölkerung durchführen, ebenso wie eine Aktion zum Verkauf von Energiesparlampen. Auch die Umweltberatung nimmt sich regelmäßig dieses Themas an. Es sind, meine Damen und Herren Bürgerinnen und Bürger, aber auch Betriebe und viele andere mehr angesprochen und aufgefordert, die Umsetzung von Maßnahmen in ihrem Einflussbereich in Angriff zu nehmen. Die Senkung der Treibhausgasemission in Stuttgart ist nur durch gemeinsame Anstrengungen der Stadt, der Wirtschaft und der Bürgerrinnen und Bürger möglich. Klimaschutz geht also alle an und mehr Klimaschutz bedeutet, weniger Risiken für die Zukunft.

Wir werden unsere Bemühungen um den Klimaschutz konsequent fortsetzen. Wenn sich das Klima ändert, dann können oder besser müssen wir es auch tun. Doch dazu benötigen wir konkrete Prognosen sowie Daten und Fakten, an denen wir unser Handeln ausrichten können. Informationen also, die die Länder übergreifend zum Thema Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft gemeinsam erarbeiten werden. Ich hoffe, dass die Erkenntnisse ihrer Untersuchungen auch über Stuttgart, Bayern und Baden-Württemberg hinaus Gehör finden und damit Grundlage für weitere wegweisende Diskussionen werden. Ich wünsche Ihnen allen ein interessantes, erfolgreiches und im besten Sinne nachhaltiges Klimasymposium hier in Stuttgart.





Klimawandel und Klimaschutz in Baden-Württemberg

Tanja Gönner
Umweltministerin Baden-Württemberg

Sehr geehrter lieber Werner Schnappauf,
sehr geehrter Herr Bürgermeister Thürnau,
sehr geehrte Frau Präsidentin Barth,
sehr geehrter Herr Prof. Latif,
sehr geehrte Landtagsabgeordnete,
lieber Werner Raab,
liebe Frau Dr. Splett,
meine sehr geehrten Damen und Herren,

zunächst einmal möchte auch ich Sie hier heute herzlich begrüßen. Ich freue mich, dass Sie in dieser großen Zahl dieser Einladung zum zweitägigen Symposium gefolgt sind. Besonders begrüßen möchte ich dich, lieber Werner, dass du den Weg hierher nach Stuttgart gefunden hast, um noch einmal deutlich zu machen, wie wichtig uns die gemeinsame Arbeit an diesem Projekt ist. Es ist gut, dass Baden-Württemberg und Bayern diesen Weg gemeinsam beschreiten, weil wir natürlich auch wissen, dass es viele Dinge gibt, die uns bei diesem Thema verbinden, wie z.B. den Bodensee, der bereits von der Präsidentin, aber auch vom Herrn Bürgermeister angesprochen wurde oder auch unsere grenzüberschreitenden Flüsse. Deswegen herzlichen Dank dafür, dass Du den Weg heute Morgen von München hierher gemacht hast.

Meine sehr geehrten Damen und Herren, die Anzeichen einer globalen Umweltveränderung mehren sich. Jahrhunderthochwasser 2002 an der Elbe, das im Übrigen im Frühjahr dieses Jahres erneut zu sehen war, also insofern stellt sich immer die Frage, wann wir noch von Jahrhundert sprechen. Der Jahrhundertsommer 2003 - im Juli dieses Jahres war man sich nicht sicher, ob man den nächsten Jahrhundertsommer erleben wird. Hurrikan Katrina 2005 mit immensen Schäden in New Orleans, mit im Übrigen auch weitergehenden Auswirkungen in Amerika, was die Frage der Wahrnehmung des Klimawandels angeht, und man könnte diese Liste fortsetzen.

Dabei brach vor allen Dingen das Jahr 2005 alle Negativrekorde. Noch nie wurden so viele Naturkatastrophen beobachtet und noch nie waren sie für die Volkswirtschaft so teuer. Nach Auswertungen der Münchner Rückversicherung steigt die Anzahl der jährlich beobachteten Naturkatastrophen seit 1960 dramatisch an. Aber eben nicht nur die Anzahl, sondern auch die Intensität der Ereignisse nimmt zu. Gleichzeitig steigt, glaube ich, nachvollziehbar auch die Höhe der Schadenssummen an, die nicht selten im Milliardenbereich liegen und damit im Übrigen deutlich auch volkswirtschaftliche Auswirkungen haben.

Die Menschheit steht aus meiner Sicht mit der fortschreitenden Erderwärmung vor einer ihrer größten Herausforderungen. Der Klimawandel mag für uns hier in Deutschland zunächst mit weniger Schrecken verbunden sein, aber weltweit sind schon heute mehr Menschen vor den Folgen des Klimawandels auf der Flucht, als aufgrund von kriegerischen Auseinandersetzungen. Heute wird von allen namhaften Wissenschaftlern und überregionalen Organisationen bestätigt, dass die Klimaänderung weltweit in Gange ist. Aber wie fällt der Klimawandel regional aus? Welche Auswirkungen sind in Süddeutschland zu erwarten und was bedeutet dies dann auch speziell für die Wasserwirtschaft?

Um genau diese Fragen beantworten zu können, haben sich Bayern und Baden-Württemberg im Jahre 1999 mit dem Deutschen Wetterdienst zum Projekt KLIWA, Klimaänderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft, zusammengefunden. Ziel ist es, die Auswirkungen der



Klimaänderung gerade auf den Wasserhaushalt zu untersuchen. Deswegen freue ich mich, dass Sie alle hierher gekommen sind, um über die aktuellen Ergebnisse des KLIWA-Projektes zu sprechen, nachdem Zwischenergebnisse bereits auf den ersten beiden Symposien in Karlsruhe und Würzburg vorgestellt wurden. Ich glaube, dass Sie in den nächsten zwei Tagen ein gutes Programm mit der Beleuchtung vieler Fassetten haben. Genau die Fragen, mit denen wir uns auch jetzt beschäftigen sollten.

Meine Damen und Herren, gerade beim Hochwasserschutz wissen wir seit dem vergangenen Jahr aber nun genau, was uns in den nächsten Jahren erwarten wird. Mit einer Verschärfung der Hochwassersituation ist zu rechnen. Gerade im Winterhalbjahr wird es häufiger zu Überflutungen im kleineren und mittleren Ausmaße kommen, wobei die einzelnen Regionen in Baden-Württemberg völlig unterschiedlich betroffen sind. Dies war für uns Anlass genug, zu handeln. Wenn wir bereits heute wissen, dass wir spätestens in 50 Jahren mit erhöhten Hochwasserabflüssen rechnen müssen, wäre es unverantwortlich für künftige Generationen, nicht alles zu unternehmen, was bereits heute möglich ist, um die Auswirkungen zu lindern. So haben wir im vergangenen Jahr für die Bemessung von technischen Hochwasserschutzanlagen den Klimaänderungsfaktor in Baden-Württemberg eingeführt. Bereits bei der Planung wird jetzt geprüft, wie sich die lokal unterschiedlichen Klimaänderungsfaktoren auf das zu realisierende Bauwerk auswirken. D.h. dass entweder die Anlage bereits heute entsprechend größer dimensioniert oder aber so geplant wird, dass bei Bedarf später wirtschaftlich nachgerüstet werden kann und gerade das ist ja auch entscheidend, denn die Nachrüstung ist das eine, die Frage der wirtschaftlichen Nachrüstung das andere und genau deswegen achten wir darauf bereits heute.

Der Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen ist nach wie vor ein vorrangiges Ziel in Baden-Württemberg, wozu erhebliche Investitionen notwendig sind. Dies gilt umso mehr, weil es um die Verhütung von Schäden und um den Erhalt von Arbeitsplätzen, aber vor allen Dingen auch um volkswirtschaftlich außerordentlich rentierliche Investitionen geht. Ich habe mich daher gerade in den letzten Wochen im Zuge der anstehenden Haushaltsberatungen in Baden-Württemberg für den Doppelhaushalt 2007/2008, auch bei knappen Kassen und den von allen unterstützten und wichtigen Zielen der Nettoullverschuldung bis zum Jahr 2011, um eine ausreichende Finanzausstattung eingesetzt. Dies ist natürlich nicht immer ganz einfach, das will ich durchaus zugeben. Allerdings weise ich auch immer gern darauf hin, dass Baden-Württemberg in den vergangenen Jahren ungewöhnliches Glück hatte, bei der Frage von Hochwasserereignissen, wobei häufig natürlich die Gefahr besteht, wenn man kein Wasser sieht, dass man glaubt, es kommt nie wieder. Aber auch dort haben wir natürlich andere Erfahrungen.

Wir tun aus unserer Sicht, meine sehr geehrten Damen und Herren, gut daran, nicht nur auf Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu setzen, sondern auch mit aller Kraft den Klimaschutz voranzubringen, also ganz bewusst Vermeidung und Anpassung. Anpassung deswegen, weil der Klimawandel bereits heute erkennbar ist, weil er eingetreten ist, weil wir uns darauf einstellen müssen, aber Anpassung ist das eine, wir müssen Vermeidungsstrategien auch entsprechend voranbringen. Konkret heißt dies, dass wir die Treibhausgasemissionen reduzieren müssen. Heute bestreiten nur noch Außenseiter, es gibt sie noch, dass jedenfalls der größte Teil der festgestellten Temperaturerhöhungen menschlichen Ursprungs ist, auch wenn natürliche Einflüsse, wie periodische Veränderungen der Sonneneinstrahlung hinzukommen.

Deswegen müssen wir im Zusammenhang mit Klimaschutz vor allen Dingen über Energie sprechen. Unser hoher Energieverbrauch in Zahlen. Jeder Deutsche emittiert fünf Mal mehr Kohlendioxid als ein Mensch aus einem Entwicklungs- oder Schwellenland. Jeder Amerikaner sogar die zehnfache Menge. Den Menschen der Entwicklungs- und Schwellenländer müssen wir aber auch eine Perspektive eröffnen. Wir müssen in den kommenden Jahren einen steigenden Energieverbrauch genau diesen Menschen zugestehen. Noch immer sind ca. 1,8 Mrd. Menschen auf der Erde ohne Zugang zu elektrischer Energie und darin zeigt sich auch, welchen



Bedarf und welche Dimension der Bedarf hat, mit dem wir uns beschäftigen müssen. Heute schon liegt die Verantwortung für die Reduzierung der Treibhausgase im besonderen Maße bei denen, die gerade in der Vergangenheit am meisten zu den Emissionen beigetragen haben, also an uns. Angesichts des steigenden Energiebedarfs werden wir unsere Anstrengungen zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen erheblich steigern müssen. Hohe Preise könnten ein Weg sein, um die Reduktion des Energieverbrauchs und damit der Emission von Treibhausgasen zu erzwingen. Die Akzeptanz in der Bevölkerung aber auch in Deutschland stößt jedoch zunehmend an ihre Grenzen, wenn ein Großteil des Familieneinkommens für eine warme Wohnung ausgegeben werden muss. Die Teilnehmer des vorletzten Energiegipfels in Berlin haben sich im April dazu bekannt, die zunehmende Abhängigkeit von Energieimporten, das Problem steigender Energiepreise und den Kampf gegen den globalen Klimawandel gemeinsam anzugehen. Daraus lassen sich einige Grundlinien ableiten, die von einem breiten Konsens getragen werden.

1. Die erneuerbaren Energien sollen bis zum Jahre 2020 einen Anteil an der Stromerzeugung von 20 % sowohl im Bund als auch auf Landesebene erreichen. Hierbei wird in Baden-Württemberg auch der Ausbau der Wasserkraftnutzung notwendig sein. Wir müssen die regenerativen Energien aber auch bei der Wärme und dem Kraftstoffbereich verstärkt einsetzen. Neben weiteren Anstrengungen in Baden-Württemberg setzen wir uns daher, was den Wärmebereich angeht, auf Bundesebene, für die Einführung eines regenerativen Wärmegesetzes ein. Wir sind auch bei der Frage der biogenen Kraftstoffe in Forschungsprojekten in Baden-Württemberg unterwegs, weil wir glauben, dass dies eines der wesentlichen Themen für die Zukunft ist.

2. Die Energieeffizienz kann und muss deutlich gesteigert werden. Wir wollen in Baden-Württemberg den pro Kopf Energieverbrauch in den nächsten 10 Jahren um 20 % senken. Die Bundesregierung ihrerseits hat eine Innovationsoffensive und ein Aktionsprogramm Energieeffizienz angekündigt. Dies zeigt, dass die Energieeffizienz in den nächsten Jahren verstärkt in den Mittelpunkt rücken wird. Ohne Ausschöpfung dieser „Energiequelle“, der Energieeffizienz, werden wir weder den Ausstoß an Klimagasen noch unsere Abhängigkeit von Öl und Gas entscheidend verringern können. Im Übrigen glaube ich, sollte es unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit einleuchtend sein, dass das, was ich einsetze, so einsetze, dass ich möglichst den größten Nutzen daraus gewinne.

3. Der Klimaschutz ist nicht nach unten verhandelbar. Wir stehen gemeinsam zu der Verpflichtung, die Kyotozielsetzung zu erfüllen. Nur so bleiben wir im Bund wie im Land glaubwürdig, gerade gegenüber den Entwicklungs- und Schwellenländern, die wir im Übrigen ebenso wie die USA und Australien, für eigene Minderungsbeiträge gewinnen müssen. Den Entwicklungs- und Schwellenländern, ich habe es vorher bereits gesagt, müssen wir einen steigenden Energieverbrauch und damit verbunden insgesamt höhere CO₂-Emissionen zugestehen. Es gilt bereits heute, die richtigen Ansätze für die Zeit nach 2012 zu finden und zu vereinbaren.

Deswegen geht es im Kern, gerade aus Sicht des Klimaschutzes um die zentrale Frage, ob es uns in den nächsten Jahren gelingen wird, eine nachhaltige Energieversorgung bei uns und darüber hinaus aber auch weltweit aufzubauen, damit wir zumindest einen Teil des Problems dann auch entsprechend angehen können. Meine Damen und Herren, ich hoffe sehr, dass uns Maßnahmen zum Klimaschutz helfen werden, den Klimawandel beherrschbar zu machen. Wir werden ihn aber, das habe ich vorhin angesprochen, nicht verhindern, denn er ist bereits in vollem Gange. Wir müssen uns deshalb mit ebenso großer Intensität mit den bereits eingetretenen und den noch zu erwartenden Folgen auseinandersetzen.

Deswegen haben wir neben KLIWA vor drei Jahren das Projekt KLARA, Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassung gestartet. Mit KLARA konnte gezeigt werden, dass der Klimawandel in vielerlei Auswirkungen auf Ökologie und Ökonomie haben wird. Wir können aber davon



ausgehen, dass in Baden-Württemberg eine Anpassung möglich sein wird. Es ist zu hoffen und zu erwarten, dass sich in manchen Bereichen, wie etwa dem Sommertourismus oder dem Weinbau, sogar Vorteile ergeben, zumindest in dem mit KLARA betrachteten moderaten Zukunftsszenario. Dort wo Probleme ins Haus stehen sollen möglichst früh Anpassungsmaßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Mit der Einführung eines Frühwarnsystems für Hitzeperioden haben wir gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst dies bis auf das besonders sensible Feld der Gesundheitsvorsorge im vergangenen Jahr schnell und effektiv gezeigt. Auch dies war eine Reaktion auf den schon angesprochenen Hitzesommer des Jahres 2003 mit den auch vom Bürgermeister angesprochenen europaweiten Todesopfern.

Die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung auf das Hochwassergeschehen haben wir dann im Projekt KLIWA weitgehend untersucht. Der von mir genannte Klimaänderungsfaktor für Hochwasserschutzmaßnahmen ist die konkrete Antwort genau darauf. Gerade im Zusammenhang mit den zu erwartenden Auswirkungen sind jedoch auch die Instrumente der Hochwasservorsorge besonders wichtig. Ich nenne hier die Erstellung der Hochwassergefahrenkarten, die in Baden-Württemberg bis 2010 abgeschlossen sein sollen. Erfolgreich sind auch die Hochwasserpartnerschaften, die einen wichtigen Beitrag zu Kontinuität und zur Wissensvermittlung bei den Betroffenen vor Ort leisten. Und gerade die Betroffenen vor Ort sind diejenigen, die wir einbinden müssen, wenn es dann doch zu einem größeren Hochwasserereignis kommt.

Derzeit entwickeln wir zusammen mit dem Innenministerium, also dem für den Katastrophenschutz zuständigen Ministerium, ein landeseinheitliches Gefahrenabwehrsystem. Das soll den Verantwortlichen vor Ort ermöglichen, bei Hochwasserereignissen gezielt Informationen abzurufen und damit fundiert und umfassend zu handeln.

Aber, meine sehr geehrten Damen und Herren, weitere wichtige Punkte sind noch offen. So stellt sich beispielsweise die Frage, welche Auswirkungen die Klimaänderung auf die Grundwasserneubildung haben wird. Müssen wir verstärkt mit Niedrigwassersituationen wie im Jahr 2003 rechnen, mit im Übrigen vielfältigen Auswirkungen? Wie wirkt sich die Klimaänderung auf die Siedlungsentwässerung aus? Welche Auswirkungen sind auf den Bodensee und damit auf den größten Trinkwasserspeicher in Deutschland zu erwarten? Über den Stand der Untersuchungen werden Sie, meine sehr geehrten Damen und Herren, in den nächsten beiden Tagen beim 3. KLIWA-Symposium hier sicher mehr erfahren. Die neuesten Erkenntnisse des Programms können sie der druckfrischen Broschüre „Unser Klima verändert sich, Folgen, Ausmaße, Strategien“ entnehmen, die pünktlich zu diesem Symposium erschienen ist.

Als kritisch hat sich aber auch die noch erhebliche Unsicherheit über das Auftreten extremer Wetterphänomene wie Sturm, Starkregen oder auch Hagel herausgestellt. Hier besteht dringender Forschungsbedarf, den wir durch ein neues Forschungsprogramm „Herausforderung Klimawandel“ nachkommen werden. Die Vorbereitung des Programms läuft bereits. Die Ausschreibung ist erfolgt. Im Mittelpunkt der Forschung werden die besonderen Risiken, die von Extremereignissen ausgehen, stehen. Hochwässer und Stürme zeigen uns immer wieder, welch ungeheures Schadenspotential in diesen Wetterereignissen liegt. So werden wir beispielsweise der Frage nachgehen, wie durch waldbauliche Methoden unter dem Klimawandel bei dem mit einer zunehmenden Sturmhäufigkeit zu rechnen ist, das Sturmschadensrisiko für Wälder in Baden-Württemberg reduziert werden kann. Dazu soll auch eine Karte mit potentiell sturmgefährdeten Waldstandorten in Baden-Württemberg erstellt werden.

Darüber hinaus werden wir versuchen, mit diesem Forschungsprogramm genau die Erkenntnisse, die wir aus KLARA gewonnen haben, auch im Sinne einer Umsetzung entsprechend anzugehen. Baden-Württemberg hat diverse Aktivitäten gestartet, um sowohl die Auswirkungen des Klimawandels zu begrenzen, als auch den Klimaschutz voran zu bringen. Ich sichere Ihnen zu, Baden-Württemberg wird seinen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Wir werden uns den Konsequenzen des Klimawandels stellen und werden unsere Verantwortung für die kommenden Ge-



nerationen ernst nehmen. Die regionale Zusammenarbeit mit Bayern und dem Deutschen Wetterdienst hat sich im Rahmen von KLIWA bestens bewährt. Diese Zusammenarbeit werden wir konsequent fortsetzen. Ich bin sicher, dass unsere Partner ebenfalls engagiert am Ball bleiben werden.

In diesem Sinne, meine sehr geehrten Damen und Herren, wünsche ich Ihnen bei diesem 3. KLIWA-Symposium anregende Stunden, spannende Vorträge, viele neue Impulse und wie heißt es so schön, die Erweiterung der Erkenntnis, um dann gestärkt wieder zurückzugehen und zu überlegen, welche Herausforderungen und welcher Umsetzung es bedarf, um auch den Ergebnissen gerecht zu werden. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen zwei interessante Tage hier in Stuttgart und hoffe, dass Sie es nicht bereuen, hierher gekommen zu sein.
Herzlichen Dank.





Klimawandel und Klimaschutz in Bayern

Werner Schnappauf
Bayerischer Staatsminister für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Wir bereuen natürlich nie, nach Stuttgart zu kommen, liebe Kolleginnen, liebe Tanja Gönner, meine sehr verehrten Damen und Herren, Frau Präsidentin, Herr Bürgermeister, sehr geehrter Herr Professor Latif, meine sehr verehrten Gäste, liebe Kolleginnen und Kollegen. Zunächst einmal möchte ich mich recht herzlich bedanken bei Tanja Gönner und ihrem Team des baden-württembergischen Umweltministeriums. Auch Frau Präsidentin Barth für die Gastfreundschaft und für die Ausrichtung dieses Kongresses. Mein Dank geht auch an alle Kolleginnen und Kollegen in den beteiligten Verwaltungen in Baden-Württemberg und in Bayern für die Arbeit an diesem KLIWA-Projekt. Wir sind stolz, dass Sie mit ihrer Kompetenz einen Beitrag leisten zur Lösung, zur Anpassung an die Herausforderungen der Klimaerwärmung. Herzlichen Dank auch Herrn Adrian und an die Partner des Deutschen Wetterdienstes. Und wir sind froh, dass wir heute einen so hochrenommierten, internationalen Klimaforscher wie Herrn Dr. Latif bei uns haben, um das Thema damit unter uns heute zu diskutieren, aber auch um die Öffentlichkeit einmal mehr wach zu rütteln.

Denn, meine sehr verehrten Damen und Herren, Kollegin Tanja Gönner hat in mehreren Beispielen schon darauf hingewiesen: Worauf warten wir eigentlich? Wenn man nur diese Schlagzeilen der letzten Tage, der letzten Wochen nimmt: Im Juli hieß es in einem Report des Deutschen Wetterdienstes: Nie war es heißer und sonniger in Deutschland. Im Augustreport hieß es dann: Rekordverdächtig, nass und trübe. Für morgen ist der heißeste Oktobertag seit Temperatureaufzeichnungen gemacht werden oder jedenfalls seit vielen Jahren vorhergesagt. Die Schlagzeilen überschlagen sich sozusagen und immer mehr dringt in das Bewusstsein der breiten Öffentlichkeit, dass hier die Klimaveränderung mitten im Gange ist. Die Frage stellt sich in der Tat immer stärker: Worauf warten wir national und international, um konsequent gegen die Klimaerwärmung vorzugehen, aber auch konsequent die unvermeidliche Anpassung voranzutreiben?

Lassen Sie mich aus bayerischer Sicht und aus dem Projekt KLIWA ein paar ergänzende Anmerkungen machen, wobei ich vor allem feststellen möchte, dass wir, Baden-Württemberg und Bayern, eine gemeinsame Sprache sprechen; dass wir eine völlig übereinstimmende Auffassung in Sachen Klimaschutz haben. Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich glaube, wir sollten uns allen und unserer Öffentlichkeit bewusst machen, dass das Klimathema nicht etwas ist, was nur Küstenregionen berührt. Ich habe auf dem Weg hierher die Tageszeitung von heute studiert, eine in Süddeutschland erscheinende große Tageszeitung, wo es heißt: Angst vor dem Untergang. Durch den Klimawandel steigt der Meeresspiegel an und bedroht die Inseln im Südpazifik. Viele Bewohner müssen bald fliehen. Diese Inseln liegen nur wenige Zentimeter über dem Meeresspiegel und alle Forscher, Herr Prof. Latif, sagen uns, der Meeresspiegel steigt um 3 mm jährlich an und in 10 Jahren um 3 cm. Es ist absehbar, dass in 10, 20 Jahren diese Inselgruppe nicht mehr auf der Karte sein wird. Es wäre allerdings völlig falsch, wenn wir das Thema der Klimaerwärmung reduzieren auf die Bedrohung von Inselgruppen oder Küstenregionen. So war ja die Diskussion vor einigen Jahren mehr oder weniger zu verstehen.

Unsere Kolleginnen und Kollegen der Wasserwirtschaftsverwaltungen in Baden-Württemberg und Bayern haben sich sehr viel Mühe gemacht und die Entwicklung der Temperaturen und der Niederschläge in Süddeutschland 70 Jahre lang zurückverfolgt. Dafür möchte ich mich noch einmal besonders bedanken. Damit können wir mit Daten und Fakten aus den vergangenen sieben Jahrzehnten konkret den Klimawandel in unseren Regionen belegen. Und dabei hat sich für mich hoch interessant eines gezeigt: Die Welttemperaturerhöhung im letzten Jahrhundert lag im Schnitt bei 0,7 °C. Die Temperaturerhöhung in Süddeutschland in den letzten 70 Jahren



bei 1,2 °C. Wer in der breiten Öffentlichkeit hätte das, außer vielleicht der Wissenschaft und der Forschung, vor Jahren vermutet, dass die Entwicklung in Süddeutschland intensiver verlaufen ist als im globalen Durchschnitt. Ja im Monat Dezember war die Temperaturerhöhung in Süddeutschland in diesen letzten 70 Jahren im Schnitt sogar 2,7 °C. Wir erleben eine Beschleunigung dieses Zustands mit unwahrscheinlichen Auswirkungen. Ich darf das mal an einem bayerischen Beispiel deutlich machen: Ich war in diesem Hitzesommer im Juli 2006 auf der Zugspitze. Und wenn man dann unseren letzten Gletscher auf der Zugspitze sieht, der in einem Hitze-monat wie Juli für das bloße Auge sichtbar an einem einzigen heißen Tag um 10 cm abschmilzt und dabei ca. 35 Millionen Liter Wasser verliert. Das ist die gleiche Menge Wasser, die eine Stadt wie Augsburg an einem Tag verbraucht. Eine unvorstellbare Menge. In 15 - 20 Jahren, spätestens bis in 25 Jahren rechnen wir damit, dass auch der letzte Gletscher, den wir in Bayern noch haben, verschwunden sein wird. Und auch die Gletscher im Alpenraum insgesamt schmelzen signifikant ab.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, ich möchte den Blick jetzt von den letzten 70 Jahren auf die Prognose der nächsten 40 bis 50 Jahre, bis zum Jahre 2050 richten und nochmals aus den Erkenntnissen unserer KLIWA-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter zwei Beispiele hervorheben. Nenne ich mal eine Stadt im Allgäu und eine Stadt im fränkischen, im Maingebiet: Würzburg und Oberstdorf. In den letzten 70 Jahren hatten wir in Würzburg eine Temperaturzunahme von 0,7 °C. Die Prognose für die nächsten 44 Jahre bis 2050 sagt: 1,6 °C zusätzliche Temperatur im Schnitt. Das gleiche Bild für Oberstdorf in den letzten 70 Jahren: + 0,8 °C; in den nächsten Jahren bis 2050: + 1,8 °C. Das heißt, wenn ich nur diese zwei Parameter vergleiche, zeigt sich, dass der Temperaturanstieg davongaloppiert, noch schneller als im letzten Jahrhundert. Noch schneller als in den letzten 70 Jahren, die betrachtet worden sind. Das gleiche gilt bei den Sommertagen und bei den heißen Tagen. Würzburg hat bislang 42 Sommertage, d. h. Tage mit mehr als 25 °C. Sie werden sich erhöhen auf 62. Oberstdorf bisher 28 Sommertage, künftig 47. Das gleiche Bild bei den Hitzetagen. Würzburg heute 9, künftig 15. Oberstdorf heute 3, künftig 6. Man kann also sagen, die Zahl der Hitzetage wird sich tendenziell in den nächsten vier Jahrzehnten verdoppeln. Und wenn man dann noch die Niederschlagsentwicklung sieht, dann wird es vor allem im Winterhalbjahr höhere Niederschläge geben. Für Würzburg werden bis 2050 20 - 30 % mehr prognostiziert, für Oberstdorf 10 - 20 % mehr. Das heißt also eine weitere Beschleunigung des Trends.

Immer höhere Temperaturen und speziell im Winter mit mehr Niederschlägen speziell im süddeutschen Raum. Das bedeutet, dass die Hochwassergefahren steigen, wie Tanja Gönner an Beispielen schon deutlich gemacht hat. Wir erleben ganz besonders, dass die so genannten Wetterextreme, die Starkregenereignisse signifikant zunehmen, quasi „wie aus heiterem Himmel“, wenn ich das so in Anführungszeichen sagen darf. Diesen Sommer hatten wir im Raum Bayreuth, Kulmbach, Wunsiedel, also im Fichtelgebirgsraum - ich nehme an, dass einige Kollegen auch aus dem Hofer Gebiet da sind, wo wir unser neues Landesamt für Umwelt etabliert haben - also praktisch vor der Haustüre von Hof extrem starke Niederschläge, während an anderen Stellen praktisch nichts war. Wir erinnern uns an Meldungen aus Berlin, wo in einigen Stadtteilen Überflutungen waren, in anderen praktisch nichts. Diese lokal außerordentlich zugespitzten Starkregenereignisse stellen die Wasserwirtschaft vor eine große Herausforderung. Wir rechnen insgesamt damit, dass im westlichen Mainfranken das so genannte 100jährige Hochwasser bis zum Jahr 2050 um 15 bis 20 % ansteigen wird. Das heißt also, aus diesen Prognosen ist schon heute konkreter Handlungsbedarf abzuleiten. Das gleiche gilt für die Donau und die Donauzuflüsse. Auch dort rechnen wir mit steigenden Wassermengen.

Umgekehrt - meistens wird in diesem Zusammenhang ja nur über Hochwasser diskutiert - will ich aber auch deutlich machen, dass wir durch das Abschmelzen der Gletscher, durch immer weniger Schnee und immer weniger „eiserne, kalte Reserve“ von gebundenem Wasser bis hinein ins Frühjahr, mit Problemen bei unseren Gebirgsflüssen rechnen, also bei Isar und Inn und all denen, die aus dem Allgäu und aus dem Oberbayerischen der Donau zufließen. Wir hatten

jetzt schon, wenn Sie sich erinnern, im August den Antrag eines Energieversorgers, die Isar stärker aufheizen zu dürfen. D.h. die Kühlwasserproblematik wird sich für die Energiewirtschaft und auch für Energie- und Gewerbebetriebe tendenziell zuspitzen. Auch die Frage von Restwassermengen für die Ökologie, für die Fische und andere Wassertiere wird sich tendenziell eher weiter zuspitzen, weil der Nachschub von Schneeschmelzwasser in den Gebirgsflüssen zunehmend fehlen wird. D.h. also auch hier zeigt sich, wie vielfältig die Auswirkungen sind und dass sie im Grunde genommen den gesamten Lebensbereich erfassen. Das ist die Frage des Hochwassers, der Wasserwirtschaft, was heute hier beim KLIWA-Symposium verstärkt und konzentriert diskutiert wird, aber es ist auch die Energiewirtschaft, es ist die Wirtschaft insgesamt; Tanja, du hast den Tourismus angesprochen. Es sind Land- und Forstwirtschaft; also alle Lebensbereiche werden damit erfasst und deshalb will ich genau wie Kollegin Tanja Gönner auch für Bayern noch einmal die Schlussfolgerung ziehen im Sinne einer Doppelstrategie.

Wir müssen an zwei großen Stellschrauben arbeiten. Das erste ist die konsequente Vermeidungs- und Reduktionsstrategie hinsichtlich der Klimagase, insbesondere CO₂. Hier ist international, national und regional Handlungsbedarf gegeben. Meine sehr verehrten Damen und Herren, der KLIWA-Kongress findet ja sozusagen im Vorfeld der Weltklimakonferenz in Nairobi statt, wo, wie Tanja Gönner gesagt hat, vor allem über die Frage diskutiert wird: Wie geht es weiter nach 2012? Es ist nicht nachvollziehbar, dass nach wie vor die Vereinigten Staaten sich nicht in den internationalen Prozess verstärkt einklinken, dass man das den Bundesstaaten wie jetzt zuletzt Kalifornien, aber auch den Neuenglandstaaten und anderen überlässt, sich um Klimaschutz auch völkerrechtlich verbindlich zu engagieren. Herr Schwarzenegger, der Gouverneur von Kalifornien, hat ja angekündigt, er möchte sich mit Europa zusammenschließen und z.B. sich im Emissionshandel engagieren. Ich würde das sehr begrüßen. Wir hatten bei der letzten Konferenz in Montreal doch eine Vereinbarung mit amerikanischen Bundesstaaten getroffen und wenn, wie Kalifornien, auch andere mit Europa zusammen im Kyotoprozess und im europäischen Immissionshandel mitmachen wollen, dann sind sie herzlich willkommen. Wir müssen ein Zeichen setzen, dass die wirtschaftlich entwickelten Staaten dieser Erde den Klimaschutz ernst nehmen und die Reduktion vorantreiben, um damit auch den sich so stark entwickelnden Ländern wie China keinen Vorwand zu geben, dass sie sich nicht einklinken. Es ist immer wieder das gleiche Spiel. Bei allen Klimakonferenzen heißt es: Ja so lange die Amerikaner nicht dabei sind, warum soll ich dann, nachdem ich gerade die Schwelle vom Entwicklungsland hinter mich gebracht habe und eine Boomregion in Asien darstelle, warum soll ich mich dann international engagieren. Das muss als eine Weltstaatengemeinschaftsaufgabe verstanden werden, um den rasant steigenden CO₂-Ausstoß weltweit in den Griff zu kriegen. Denn gerade diese Boomregionen Asiens emittieren CO₂ in ungeahntem Ausmaß mit einer rasanten Entwicklung. 20 Jahre jeweils jährlich 10 % Wirtschaftswachstum bei 20 % mehr Energieverbrauch, bei 1,3 Mrd. Menschen allein in China, ähnlich viele in Indien; dann ist das, was wir hier, Herr Bürgermeister Thürnau, in Stuttgart und, liebe Tanja, in Baden-Württemberg leisten und wir in Bayern tun, am Ende im globalen Kontext eher ein Tropfen auf den heißen Stein. Aber wir müssen diesen Tropfen beibringen, um zu zeigen, dass es geht, wirtschaftliches Wachstum zu ermöglichen, ohne Klima weiter aufzuheizen, dass wir entkoppeln. Wirtschaftswachstum und ökologische Verträglichkeit und damit, meine sehr verehrten Damen und Herren, ist die eine Stellschraube nochmals angesprochen: Konsequente CO₂-Vermeidungs- und Reduktionsstrategie regional, national und international. Aber genau so wichtig ist es, dass wir gleichzeitig an der zweiten großen Stellschraube arbeiten müssen, an der Anpassungsstrategie, dass wir uns auf die weitere Erwärmung einstellen und die damit verbundenen Folgen. Denn die Bremsspur ist lang. Wir wissen, dass das mindestens 40, 50 Jahre sind, in denen die Aufheizung auf jeden Fall weiterläuft, egal wie erfolgreich wir mit einer Vermeidungs- und Reduktionsstrategie sind. Deshalb müssen wir uns einstellen auf mehr Starkregenereignisse, auf mehr Stürme, auf mehr Hochwasser, auf die weitere Aufheizung.

Wir haben deshalb in Bayern ein Aktionsprogramm 2020 aufgelegt mit einem Volumen von 2,3 Mrd., um den Hochwasserschutz in Bayern weiter auszubauen. Als eine Konsequenz aus dem



gemeinsamen KLIWA-Projekt haben auch wir einen Hochwasserzuschlag für neue Planungen von + 15 %: Wenn heute neue Hochwasserschutzanlagen in Bayern geplant werden, dann werden sie auf einen 15 % höheren Abfluss dimensioniert, weil wir uns auf größere Niederschlagsmengen einrichten. Wir haben speziell für 2006, 2007 und 2008 die in Bayern zum Einsatz kommenden Mittel auf 450 Mio. angehoben und viele einzelne weitere Projekte gestartet. Sie alle aufzuzählen, würde jetzt zu weit führen. Georisk als ein Beispiel, um auch Murenabgänge, Hangrutschungen etc. frühzeitig zu erkennen. Auch da darf ich vielleicht noch mal aus der heutigen in Süddeutschland erscheinenden Zeitung kurz zitieren. Auf dem Weg hierher schlage ich die Bayernseite auf und sehe einen großen Artikel: Rutschender Hang bedroht Immenstadt. Das ist so ein gutes Beispiel für das, was momentan geschieht. Unsere Geologen vom Landesamt für Umwelt sind vor Ort und sagen, die Ursache für den Erdrutsch dürfte im Dauerregen vom August vergangenen Jahres zu suchen sein. Damals war es in weiten Teilen Südbayerns zu Überschwemmungen gekommen. In Immenstadt hatten sich Erdschichten im Berg mit Wasser voll gesogen und nach der Frostperiode im März setzte sich dann darüberliegendes Gestein in Bewegung. Jetzt droht also eine Mure, die Wege zerstört, den Wildbach aufstaut und zu großen Schäden führen kann. Als ein Beispiel ganz aktuell und ganz konkret am bayerischen Alpenrand, also nicht nur im Südpazifik, sondern hier und heute in den Medien nachzulesen.

Deshalb, meine sehr verehrten Damen und Herren, ist das, was Sie tun mit diesem KLIWA-Kongress, das was unsere Mitarbeiter erarbeitet haben und weiter erarbeiten werden, von großer Bedeutung für das, was in den nächsten Jahrzehnten vor uns liegt. Wir wollen deshalb, wie Tanja Gönner gesagt hat, das auch gemeinsam fortsetzen. Wir sind auch offen, wenn weitere Partner sich einbringen wollen. Wir hören, dass Rheinland-Pfalz z.B. Interesse haben könnte. Denn es ist ein gesamtgesellschaftliches Thema, das alle angeht und deshalb wollen wir das Know-how von unseren Verwaltungen auch nutzen, um uns rechtzeitig darauf einzustellen. Ich glaube, es hat Sie gefreut, dass der baden-württembergische Energieversorger EnBW jetzt im September einen großen Kongress zum Thema Klimaschutz in Berlin gemacht hatte, und damit auch die Energiewirtschaft zeigt, dass Klimaschutz auch und gerade hier Thema ist. Das begrüße ich sehr.

Wir sollten auch noch viel stärker im Verkehrssektor in der Reduktions- und Vermeidungsstrategie vorankommen, auch Baden-Württemberg und Bayern. Stichwort Wasserstoff als ein für mich wichtiges Stichwort. So sollten wir alles daran setzen, um zu reduzieren und um anzupassen und Vorsorge zu treffen, dass das Klima nicht gänzlich aus den Fugen gerät und dass durch die Folgen der Erwärmung nicht große Schäden in unserem Land eintreten. Lassen Sie uns deshalb auf einem wissenschaftlich gesicherten Niveau das fortführen, was die Wissenschaft begonnen hat, an Erkenntnissen beizutragen. Lassen Sie uns aber dann der Wissenschaft auch vertrauen. Wenn die Wissenschaft heute sagt - und lassen Sie mich damit schließen -, dass wir eine Temperaturerhöhung von + 2 °C als Obergrenze akzeptieren könnten, dafür aber notwendig wäre, dass wir mindestens 50 % CO₂ reduzieren müssten, dann ist das, was wir mit Kyoto auf den Weg gebracht haben mit 5,2 % ein Tropfen auf den heißen Stein.

Wir sind also erst ganz am Anfang und deshalb, meine sehr verehrten Damen und Herren, glaube ich, ist ein solcher Kongress auch wichtig, um unsere Öffentlichkeit wachzurütteln. Denn am Ende müssen die politischen Entscheidungsträger genau so wie die gesamte Bevölkerung die Sensibilität haben, dass es hier um ein Zukunftsthema par excellence geht und im Grunde eine Änderung des Lebensstils erforderlich ist. Eine Änderung des Lebensstils dahin, dass er klimaverträglich und nachhaltig ist; dass wir also wirtschaftliches Wachstum nicht nur und immer wieder generieren mit höheren Treibhausgasemissionen, sondern dass wir das entkoppeln können; dass wir also wegkommen von diesem Immer-mehr an Klimagasen, insbesondere an CO₂, und damit die Risiken gerade für die Hochwassergefahren, für die Wasserwirtschaft immer weiter vergrößern. Lassen Sie uns deshalb Hand in Hand diese Entwicklung weiter vorantreiben: wissenschaftsbasiert, und damit meine ich: weg von einer Ökoideologie hin zu einem wis-



senschaftsbasierten ökologisch verantwortlichen Handel. Wir bedanken uns, Tanja Gönner und ich, Baden-Württemberg und Bayern, bei dem großen Know-how, das unsere Mitarbeiter von Umweltschutz, Klimaschutz und Wasserwirtschaft hier einbringen und damit einen tollen Beitrag leisten, dass wir fundiert an dieses große Zukunftsthema herangehen.
Herzlichen Dank und der Tagung guten Erfolg.



Globale Aspekte des Klimawandels

Mojib Latif

Leibniz-Institut für Meereswissenschaften an der Universität Kiel

Die Klimaproblematik

Das Klimaproblem hat seinen Ursprung darin, dass der Mensch durch seine vielfältigen Aktivitäten bestimmte klimarelevante Spurengase in die Atmosphäre entlässt. Diese Spurengase führen zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Luftschichten, dem "anthropogenen Treibhauseffekt". Von größter Bedeutung ist dabei das Kohlendioxid (CO_2), das vor allem durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe (Erdöl, Kohle, Erdgas) in die Atmosphäre entweicht. Der weltweite CO_2 Ausstoß ist eng an den Welt-Energieverbrauch gekoppelt, da die Energiegewinnung vor allem auf fossilen Energieträgern basiert. Andere wichtige Spurengase sind vor allem Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O) und die Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (FCKW). Das Kohlendioxid hat einen Anteil von ca. 60 % an dem durch den Menschen verursachten (anthropogenen) Treibhauseffekt. Vom Menschen in die Atmosphäre emittiertes CO_2 hat eine typische Verweildauer von ca. 100 Jahren, was die Langfristigkeit des Klimaproblems verdeutlicht.

Der CO_2 Gehalt der Erdatmosphäre war seit Jahrhunderttausenden nicht mehr so hoch wie heute. Messungen belegen zweifelsfrei, dass sich die Konzentration von CO_2 in der Atmosphäre seit Beginn der industriellen Revolution rasant erhöht hat. Lag der CO_2 Gehalt um 1800 noch bei ca. 280 ppm (ppm: parts per million), so liegt er heute schon bei 380 ppm. Dass der Mensch für diesen Anstieg verantwortlich ist, ist unstrittig. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass der CO_2 Gehalt heute schon so hoch ist wie seit ca. 450.000 Jahren nicht mehr (Abbildung 1). Dabei hat man die Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre aus Eisbohrkernen der Antarktis rekonstruiert, indem man die im Eis eingeschlossenen Luftbläschen analysiert hat.

Der zusätzliche (anthropogene) Treibhauseffekt

Bei einer Erde ohne Atmosphäre wäre die Oberflächentemperatur ausschließlich durch die Bilanz zwischen eingestrahelter Sonnenenergie und der vom Boden abgestrahlten Wärme- (Infrarot-) Strahlung festgelegt. Diese Oberflächentemperatur würde im globalen Mittel etwa -18°C betragen. Selbst eine Atmosphäre aus reinem Sauerstoff und Stickstoff, die ja die Hauptkomponenten unserer Atmosphäre (ca. 99 %) bilden, würde daran nichts Wesentliches ändern. Dagegen absorbieren bestimmte Spurengase, wie Wasserdampf und Kohlendioxid, die von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung und emittieren ihrerseits auch in Richtung der Erdoberfläche langwellige Strahlung. Dies führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der Erdoberfläche (Abbildung 2). Die Temperatur der Erdoberfläche beträgt daher im globalen Mittel ca. $+15^\circ\text{C}$. Dieser natürliche Treibhauseffekt ist dafür mitverantwortlich, dass es Leben auf unserem Planeten gibt. Die beteiligten Gase werden als "Treibhausgase" bezeichnet.

Die Konzentration der langlebigen Treibhausgase nimmt systematisch zu: seit Beginn der Industrialisierung bis heute bei Kohlendioxid (CO_2) um ca. 30 %, bei Methan (CH_4) um 120 % und bei Distickstoffoxid (N_2O) um ca. 10 %. Hierdurch wird eine langfristige zusätzliche Erwärmung der Erdoberfläche und der unteren Atmosphäre angestoßen. Ein verstärkter Treibhauseffekt führt auch zu Veränderungen des Niederschlags, der Bewölkung, der Meereisausdehnung, der Schneebedeckung und des Meeresspiegels sowie der Wetterextreme, d.h. letzten Endes zu einer globalen Klimaveränderung. Für die Menschheit besonders wichtig ist hierbei die mögliche Änderung der Extremwertstatistik, was anhand der Elbe-Flut 2002 und der Dürre 2003 deutlich geworden ist. Aber auch die Veränderungen in den Gebirgsregionen können dramatische Ausmaße annehmen. Dies erkennt man vor allem an dem Rückzug der Gebirgsgletscher in den



Alpen, die bereits etwa die Hälfte ihres Volumens seit 1850 verloren haben. Die meisten Alpengletscher wären schon in etwa fünfzig Jahren unter Annahme eines "business as usual" (BAU)-Szenariums verschwunden, d.h. wenn keine Maßnahmen unternommen werden, um den anthropogenen Treibhauseffekt abzumildern.

Als Folge der globalen Erwärmung wird der Meeresspiegel ansteigen, zum einen infolge der Wärmeausdehnung der Meere (thermische Expansion) und zum anderen infolge der Eisschmelze. Der Anstieg des Meeresspiegels infolge der thermischen Expansion kann bis zum Jahr 2100 bis zu 50 cm betragen. Falls die großen Eispanzer Grönlands oder der Antarktis schmelzen sollten wären noch deutlich stärkere Anstiege zu erwarten. So würde beispielsweise ein komplettes Abschmelzen des grönländischen Eispanzers den Meeresspiegel um weltweit sieben Meter ansteigen lassen. Allerdings ist es strittig, wie schnell dies passieren kann.

Die Wissenschaft hat die Bringschuld erbracht

Es drängt sich nun die Frage auf, was man schon heute an Klimaänderung beobachten kann. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das Klima auf äußere Anregungen immer mit einer Zeitverzögerung von einigen Jahrzehnten reagiert. Die globale Mitteltemperatur der Erde zeigt aber bereits einen offensichtlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren (Abbildung 3) von etwa 0,8 °C, wobei das Jahr 2005 das wärmste Jahr seit 1880 war. Zusammen mit weiteren statistischen und auf Modellen basierenden Analysen (Fingerabdruckmethoden) kann man heute bereits sagen, dass der beobachtete Temperaturanstieg der letzten Jahrzehnte mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit vor allem auf den Menschen zurückgeht. Es hat zwar in der Vergangenheit immer wieder Klimaschwankungen gegeben, die nicht auf menschliche Aktivität zurückgehen, wie beispielsweise die mittelalterliche Warmzeit oder die kleine Eiszeit. Diese waren im Vergleich zum Anstieg der Temperatur der letzten Jahrzehnte allerdings deutlich schwächer, zumindest im globalen Maßstab.

Es wird immer wieder die Frage nach der Rolle der Sonne für die Erderwärmung gestellt. Die Sonneneinstrahlung unterliegt Schwankungen, die auch mit der Sonnenfleckenaktivität zusammenhängen. Gemittelt über die letzten 100 Jahre stieg die Solarkonstante an: Nach Schätzungen liegt sie zurzeit etwa 0,25 % höher als vor 100 Jahren. Klimamodellsimulationen zeigen, dass in den letzten 100 Jahren durch den Anstieg der Sonnenintensität ein Teil der beobachteten Erwärmung erklärt werden kann, allerdings mit etwa 0,2 °C nur ungefähr ein Viertel der Gesamterwärmung. Die Sonnenvariabilität allein kann also nicht für den beobachteten Temperaturanstieg der letzten 100 Jahre von ca. 0,8 °C verantwortlich sein, der überwiegende Anteil an der Erderwärmung ist vom Menschen verursacht. Dies ist Konsens in der internationalen Klimaforschung. Es gibt also einen erkennbaren Einfluss des Menschen auf das Klima. Insofern kann es heute nicht mehr darum gehen, ob der Mensch das Klima beeinflusst, sondern nur noch darum, in wieweit wir die Klimaveränderung noch minimieren können.

Ist das Klima überhaupt vorhersagbar?

In wieweit reagieren chaotische Systeme wie das Klima auf menschliche Einflüsse und können sie überhaupt berechnet werden? Am besten vergleicht man den Einfluss des Menschen auf das Klima mit einem gezinkten Würfel. Das Zinken besteht darin, dass wir die Temperatur der Erde infolge des Ausstoßes bestimmter klimarelevanter Gase, wie beispielsweise das Kohlendioxid, erhöhen. Dies führt zu mehr Wetterextremen, so wie der gezinkte Würfel mehr Sechsen hervorbringt. Wir können aber nicht sagen, wann die nächste Sechse kommt, denn die Reihenfolge der Zahlen bleibt zufällig. Ähnlich verhält es sich mit den Wetterextremen: Wir können zwar ihre Statistik berechnen, beispielsweise dass sie sich infolge der globalen Erwärmung häufen werden, wir wissen aber nicht, wann genau die Wetterextreme eintreten. Dies erklärt auch, warum längerfristige Klimavorhersagen möglich sind, obwohl Wettervorhersagen prinzipiell auf kurze Zeiträume beschränkt sind.



Das Beispiel des gezinkten Würfels verdeutlicht auch, dass die Tatsache, dass ein bestimmtes Ereignis schon einmal beobachtet worden ist, keinerlei Rückschlüsse auf die Eigenschaften des Würfels zulässt: Der Würfel hat auch vor dem Zinken schon Sechsen geliefert. Auf das Wetter übertragen bedeutet dies, dass die Tatsache, dass man beispielsweise schon einmal eine schwere Überschwemmung oder eine lang anhaltende Trockenperiode beobachtet hat, nicht bedeutet, dass sich die Statistik des Wetters nicht verändert hat. In der Tat zeigen Beobachtungen der letzten hundert Jahre, dass sich extreme Wetterereignisse weltweit häufen, wie von den Klimamodellen vorhergesagt. Und es ist genau diese Häufung extremer Wetterereignisse, die man der globalen Erwärmung zuordnen kann. Die Analogie zum gezinkten Würfel verdeutlicht darüber hinaus, dass es prinzipiell nicht möglich ist, einzelne Wetterextreme, wie die Elbe-Flut des Jahres 2002 oder den Rekordsommer 2003, der globalen Erwärmung zuzuschreiben, genauso wenig wie man eine bestimmte Sechse dem Zinken des Würfels zuordnen kann. Man muss immer die Statistik der Ereignisse betrachten, wie etwa die Anzahl von Wetterextremen über einen längeren Zeitraum, wenn man den Zusammenhang zwischen Wetterextremen und der globalen Erwärmung beleuchten möchte.

Wie wird das Klima in Europa im 21. Jahrhundert aussehen?

Die Folgen für das Klima der Erde können mit Hilfe von Computersimulationen abgeschätzt werden. Dazu werden globale Klimamodelle entwickelt, welche die Wechselwirkung zwischen den physikalischen Prozessen in Atmosphäre, Ozean, Meereis und Landoberflächen quantitativ beschreiben. Bis zum Jahr 2100 kann die globale Erwärmung je nach angenommenem Szenarium bis zu 5 °C im globalen Mittel betragen. Zusammen mit der heute bereits realisierten globalen Erwärmung von etwa 0,8 °C entspräche dies in etwa dem Temperaturunterschied von der letzten Eiszeit bis heute. Es würde sich also um eine für die Menschheit einmalig rasante globale Klimaänderung handeln, für die es seit wir Menschen diesen Planeten besiedeln kein Analogon gäbe.

Die globale Erwärmung hat eine Zunahme des atmosphärischen Wasserdampfs zur Folge sowie einen verstärkten Wasserdampftransport von den Ozeanen zu den Kontinenten und damit eine Zunahme des Niederschlags über den Landgebieten. Regional sind die Niederschlagsänderungen jedoch sehr verschieden. Dabei fällt generell mehr Niederschlag in hohen Breiten und in Teilen der Tropen, während die regenärmeren Subtropen noch weiter austrocknen. Damit vergrößern sich die Unterschiede zwischen den feuchten und trockenen Klimaten auf der Erde. Diese Aussage gilt auch für das Klima in Europa. Allerdings sind die Niederschlagstendenzen in den Winter- bzw. Sommermonaten sehr unterschiedlich. Während der Sommerniederschlag fast überall in Europa abnimmt, wird im Winter ein ausgeprägtes Nord-Süd-Gefälle vorhergesagt mit einer Abnahme im niederschlagsarmen Südeuropa und einer Zunahme im niederschlagsreichen Mittel- und Nordeuropa. Diese Zunahme hängt zusammen mit intensivierter winterlicher Sturmaktivität über dem Nordostatlantik und verstärkten Westwinden, die feuchte Luft vom Atlantik heranzuführen. Auffällig sind eine Häufung von Starkniederschlägen sowohl im Winter wie auch im Sommer und damit eine erhöhte Wahrscheinlichkeit von Überschwemmungen. Die Anzahl von Frosttagen wird in Europa bis zur Mitte dieses Jahrhunderts deutlich abnehmen, während sich die Anzahl von Hitzetagen (Temperaturen über 30 °C) um etwa dreißig Tage stark erhöhen wird. Nach neuesten Berechnungen mit hochauflösenden regionalen Klimamodellen wird sich die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von sehr trockenen und sehr warmen Sommern in Europa dramatisch erhöhen. Sommer, wie der des Jahres 2003, würden im Jahr 2070 im Mittel alle zwei Jahre auftreten.

Das Kioto-Protokoll, ein erster wichtiger Schritt

Die Klimaproblematik steht inzwischen an oberster Stelle auf der Agenda der Weltpolitik. Am 10. Dezember 1997 haben die Vertragsstaaten der Rahmenkonvention der Vereinten Nationen zu Klimaänderungen einstimmig das so genannte Kioto-Protokoll angenommen. Die Industrieländer verpflichten sich mit ihm, ihre Treibhausgasemissionen um im Mittel 5,2 % (bezogen auf



die Emission im Jahre 1990) bis zur Periode 2008 bis 2012 zu mindern. Mit der Ratifizierung Russlands im Februar 2005 ist das Kioto-Protokoll völkerrechtlich verbindlich. Die Europäische Union muss im Mittel um 8 % reduzieren, stärker als die USA mit 7 % oder Japan mit 6 %. Russland soll nur stabilisieren und Norwegen darf gar zulegen. Diese unterschiedlichen Minderungssätze sind Resultat nachweislich unterschiedlicher Bedingungen aber auch teilweise Folge des Verhandlungsgeschicks einzelner Länder. Die USA haben sich allerdings inzwischen vom Kioto-Protokoll losgesagt. Und auch die Schwellenländer, wie etwa China oder Indien, sind im Kioto-Protokoll nicht berücksichtigt. Dabei haben die USA und China zusammen einen Anteil an den weltweiten Kohlendioxid-Emissionen von etwa 40 %.

Den aus Sicht der Klimaforscher notwendigen Klimaschutz liefert das Kioto-Protokoll in der gegenwärtigen Form keineswegs. Um gravierende Klimaänderungen in den nächsten hundert Jahren zu vermeiden, müsste der Ausstoß von Treibhausgasen auf ein Bruchteil (< 10 %) des heutigen Ausstoßes bis zum Jahr 2100 reduziert werden. In der Zukunft muss daher der Einführung der regenerativen Energien mehr Gewicht beigemessen werden, denn nur diese, insbesondere die Sonnenenergie, stehen unbegrenzt zur Verfügung. Da das Klima nur auf unsere langfristige Strategie reagiert, kann der Umbau der Wirtschaft in Richtung der erneuerbaren Energien allmählich innerhalb der nächsten hundert Jahre erfolgen. Wichtig ist aber, dass wir heute bereits alle Energiesparpotentiale ausschöpfen und den Weg der Reduzierung der Treibhausgasemissionen beschreiten. In sofern ist das Kioto-Protokoll ein erster, wichtiger Schritt in die richtige Richtung.

Wenn wir heute die Weichen für eine nachhaltige Entwicklung stellen, dann ist dies auch in ökonomischer Hinsicht sinnvoll, denn es ist insgesamt billiger, Vorsorge zu treffen, als die sich in der Zukunft häufenden klimabedingten Schäden zu begleichen. Die Dimension der Schäden der Elbe-Flut hat uns dies nur zu deutlich vor Augen geführt. Darüber hinaus sollten wir nicht mit unserem Planeten experimentieren, da die Vergangenheit immer wieder gezeigt hat, dass vielerlei Überraschungen möglich sind. So wurde beispielsweise das Ozonloch über der Antarktis von keinem Wissenschaftler vorhergesagt, obwohl die ozonschädigende Wirkung der FCKWs schon lange bekannt war. Das Klimasystem ist ein nichtlineares System, das bei starken Auslenkungen verblüffende Lösungen bereithalten kann.

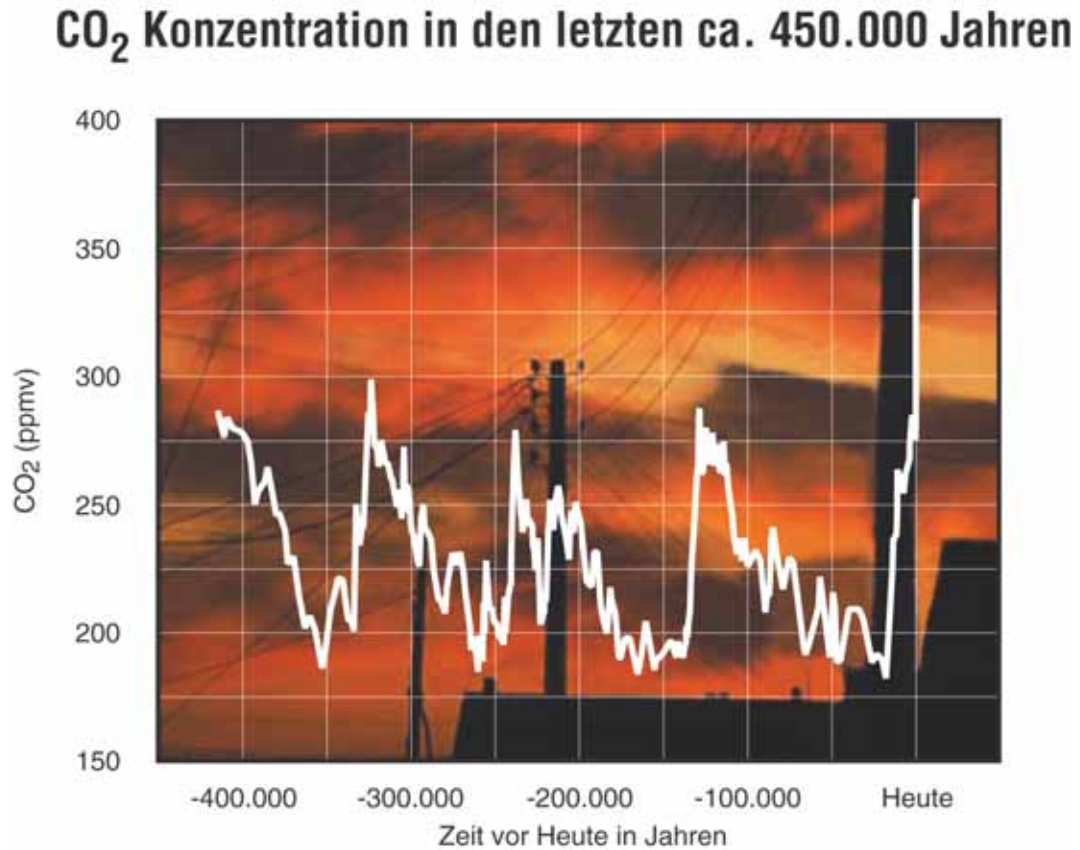


Abb. 1: Der Kohlendioxid (CO₂) Gehalt der Erde in den letzten ca. 450.000 Jahren. Der Anstieg der CO₂ Konzentration seit Beginn der Industrialisierung ist offensichtlich und auf den Menschen zurückzuführen. Quelle: IFM-GEOMAR.

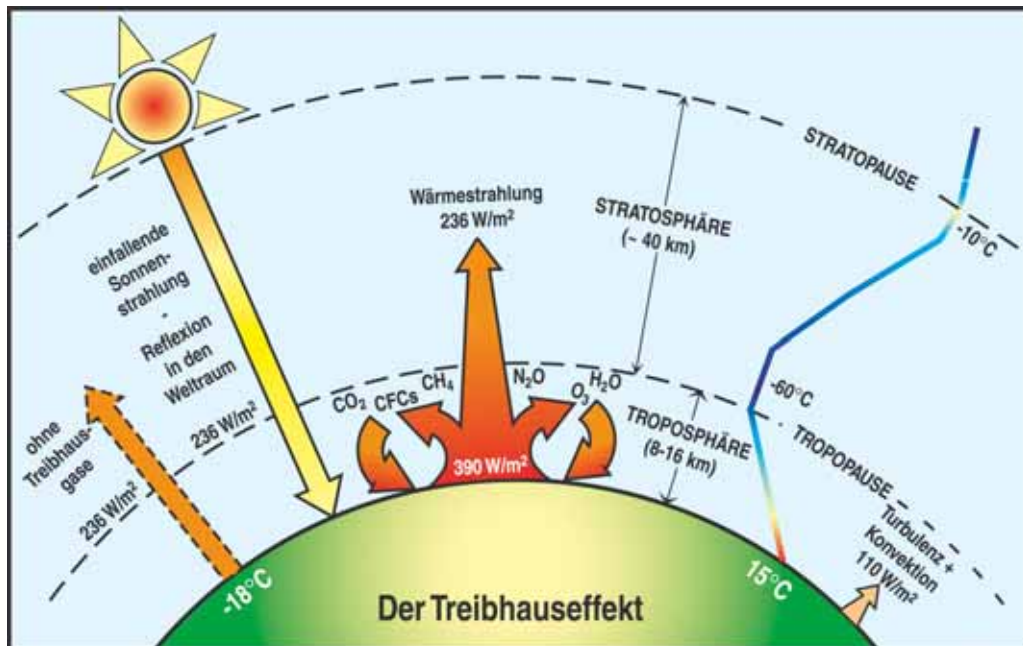


Abb. 2: Schematische Darstellung des Treibhauseffekts. Ohne ihn betrüge die Oberflächentemperatur der Erde ca. -18 °C, sie beträgt aber tatsächlich ca. +15 °C (natürlicher Treibhauseffekt). Der Anstieg der Treibhausgase durch den Menschen führt zu einer globalen Erwärmung und damit zu einer globalen Klimaveränderung (verstärkter Treibhauseffekt). Quelle: IFM-GEOMAR.

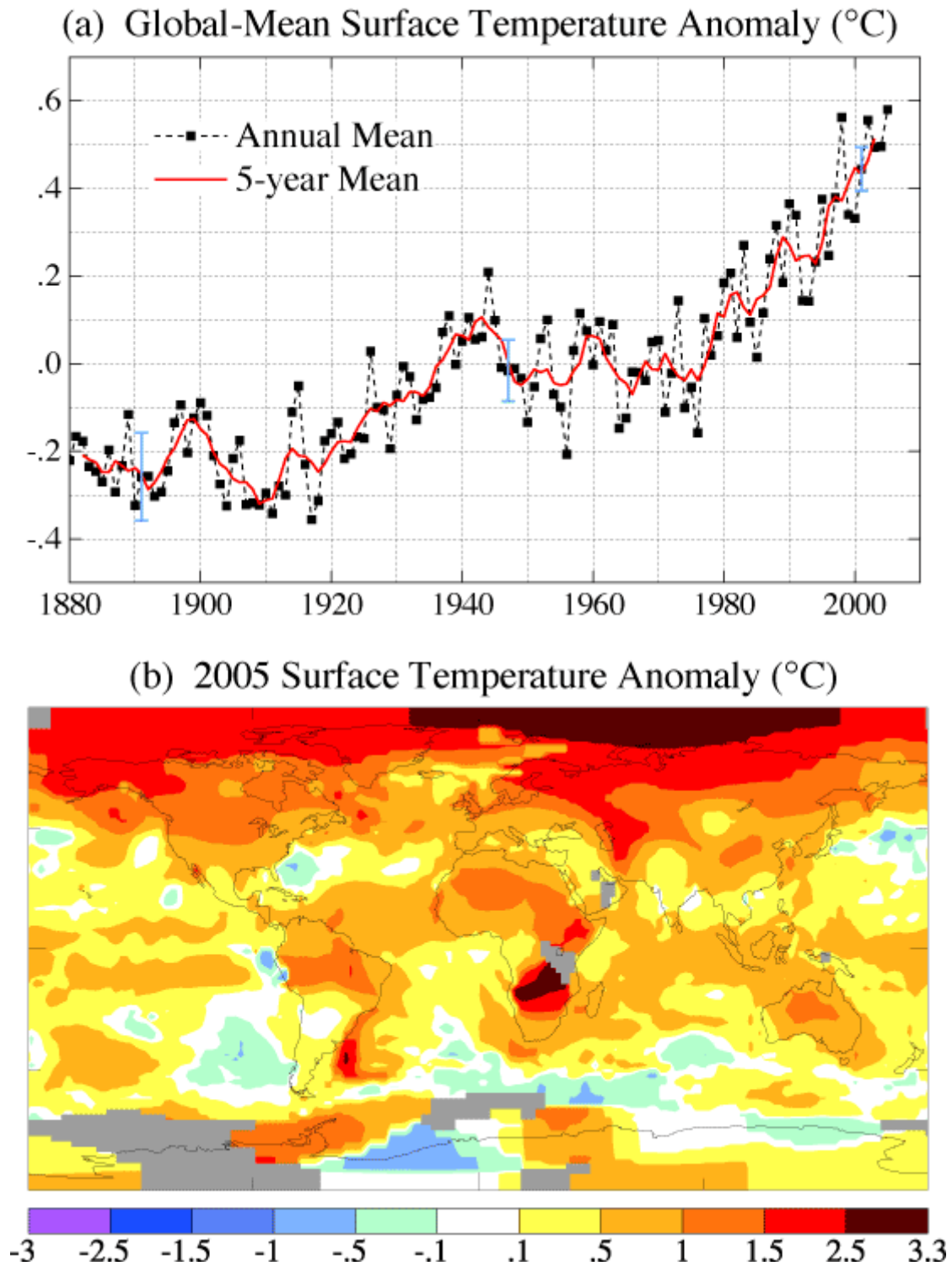


Abb. 3: Oben: Die globale Mitteltemperatur der Erde seit 1880. Man erkennt einen deutlichen Erwärmungstrend in den letzten 100 Jahren, wobei insbesondere die Erwärmung der letzten Jahrzehnte auf den Menschen zurückgeht. Die Werte sind Abweichungen vom Mittelwert der Jahre 1951-1980. Unten: Die Temperaturabweichung beobachtet im Jahr 2005. Quelle: NASA.

Künftige Klimaänderungen in Deutschland - ein Anlass zur Sorge?

Petra Mahrenholz
Umweltbundesamt

1. Einleitung

Beobachtungen und Messungen lassen keinen Zweifel, dass das Klima sich ändert: Die globale Erwärmung und der Meeresspiegelanstieg haben sich in den letzten Dekaden beschleunigt, ebenso das Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen. In den letzten 100 Jahren hat sich die Erde im Mittel um 0,74 °C erwärmt. Elf der letzten zwölf Jahre (1995-2006) gehörten zu den zwölf wärmsten Jahren seit Beginn der Beobachtungen. Auch regionale Klimamuster ändern sich: Viele langfristigen Veränderungen wurden beobachtet, etwa bei den Temperaturverhältnissen sowie der Eisbedeckung in der Arktis, bei Umverteilungen des Niederschlags, Salzgehalten im Ozean und Windgeschwindigkeiten. Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürren sowie heftige Niederschläge sind häufiger geworden und die Intensität tropischer Stürme hat sich erhöht.

Das heutige Konzentrationsniveau der atmosphärischen Treibhausgase liegt deutlich höher als das natürliche Niveau in den letzten 650.000 Jahren. Es gilt als gesichertes Erkenntnis, dass menschliches Handeln seit 1750 das Klima erwärmt hat – vorrangig durch den fossilen Brennstoffverbrauch, die Landwirtschaft und eine geänderte Landnutzung.

Um Aussagen über mögliche künftige Klimaänderungen treffen zu können, wurden Klimamodelle entwickelt. In den letzten Jahren ist das Vertrauen in die Ergebnisse globaler und insbesondere auch regionaler Klimaprojektionen gestiegen, da die Klimamodelle verbessert sowie größere Rechenkapazitäten genutzt werden konnten und nunmehr ein großes Ensemble von Modellrechnungen zur Beurteilung möglicher künftiger Entwicklungen zur Verfügung steht. Die Klimamodelle zeigen, dass sich die bereits in den letzten 50 Jahren beobachteten regionalen Muster des Erwärmungstrends ohne Klimaschutz fortsetzen werden. Danach steigen die Temperaturen insbesondere über den Landmassen und den hohen nördlichen Breiten stärker als im globalen Durchschnitt (IPCC, 2007a).

2. Regionale Klimaänderungen in Deutschland

2.1 Bereits beobachtete Klimaänderungen

Die Jahresmitteltemperatur stieg in Deutschland im Zeitraum 1901 - 2000 um 1,0 °C. Der Erwärmungstrend beschleunigte sich im Laufe der vergangenen Jahrzehnte deutlich (Abbildung 1). Vor allem die Wintermonate wurden wärmer (Schönwiese und Janoschitz, 2005). Die letzten zehn Jahre des 20. Jahrhunderts waren das wärmste Jahrzehnt dieses Jahrhunderts. Wie im globalen Mittel waren auch in Deutschland die letzten zehn Jahre mit Ausnahme des Jahres 1996 wärmer als in der Referenzperiode. Sieben der letzten zehn Jahre gehörten zu den 20 wärmsten seit Beginn des 20. Jahrhunderts (Müller-Westermeier, 2006).

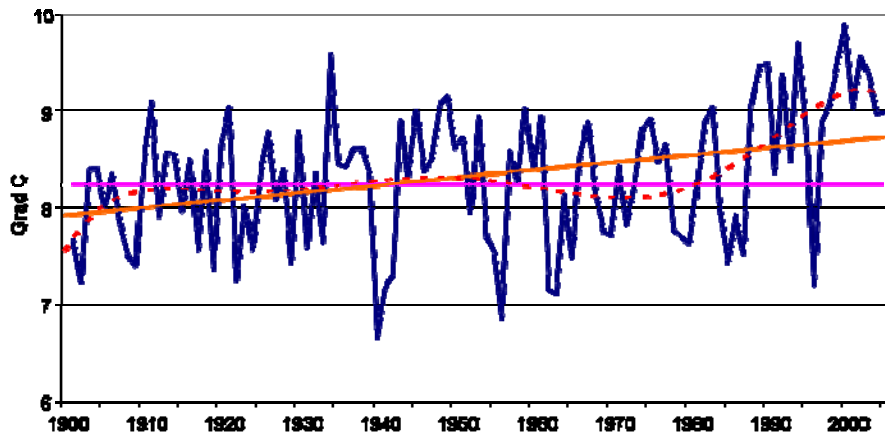


Abb. 1: Mittlere Tagesmitteltemperatur Deutschland 1901 – 2005 (Müller-Westermeier und Riecke 2006)

In den vergangenen 100 Jahren nahmen vor allem im Westen Deutschlands die Niederschläge deutlich zu. Am stärksten war diese Zunahme im Winter, für den Zeitraum 1971-2000 erreichte sie einen Wert von + 34 %. Im Osten hingegen nahmen vor allem die sommerlichen Niederschläge ab (Abbildung 2). Klimaänderungen zeigten sich auch in ungewöhnlichen Ausmaßen extremer Wetterereignisse, wie Hitzeperioden und Starkniederschläge. Diese treten jetzt länger, häufiger oder intensiver auf (Schönwiese et al., 2005). Wegen des hohen Schadenspotentials solcher Extremereignisse sind sie auch volkswirtschaftlich besonders bedeutsam.

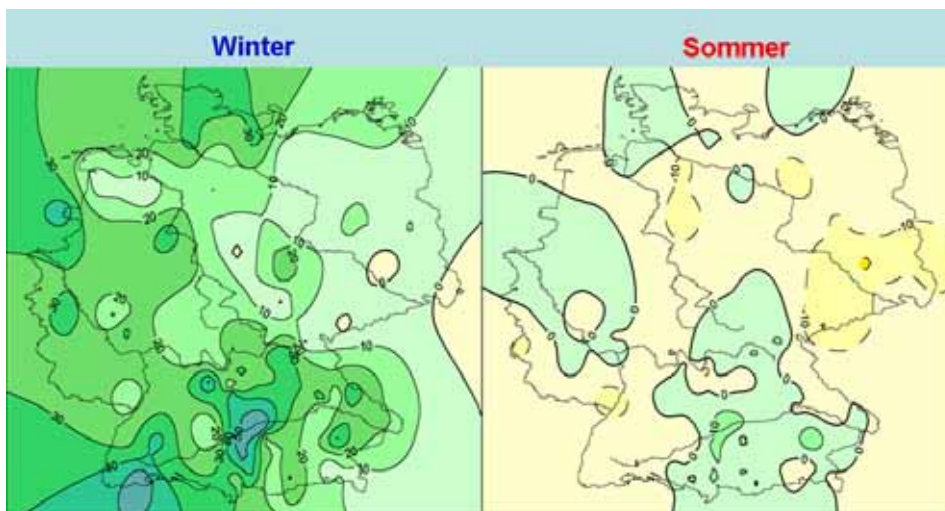


Abb. 2: Lineare Niederschlagstrends in Prozent im Winter sowie Sommer 1901-2000 (nach Schönwiese und Janoschitz, 2005)

2.2 Künftige Klimaänderungen

Zur Bewertung künftiger möglicher Klimaentwicklungen und damit als Grundlage für die Bewertung der Risiken und Chancen künftiger Klimaänderungen sowie notwendiger Anpassungsmaßnahmen in verschiedenen Sektoren benutzen Wissenschaft und Politik Klimamodelle. So lassen sich mögliche Entwicklungskorridore des künftigen Klimas untersuchen. Grundlage dafür sind verschiedene Szenarien zu Emissionen von Treibhausgasen und SO_2 , die unter anderem auf Annahmen über die zukünftige wirtschaftliche Entwicklung und das Bevölkerungswachstum basieren. Es gibt globale Klimamodelle, die das Klima der gesamten Erdoberfläche simulieren und regionale Klimamodelle, die Berechnungen für bestimmte Gebiete liefern.

Regionale Klimamodelle nutzen verschiedene Regionalisierungsverfahren. Grundsätzlich gibt es dabei zwei verschiedene Methoden: dynamische und statistische Verfahren. Beispiele dafür sind die vom UBA genutzten Modelle REMO und WETTREG: REMO – entwickelt und eingesetzt vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg - ist ein dynamisches und WETTREG – entwickelt und genutzt von den Firmen MeteorResearch sowie CEC Potsdam GmbH - ein statistisches Verfahren. REMO wurde in das globale Modell ECHAM5/MPI-OM eingebettet, WETTREG hingegen bestimmt das Klimasignal nicht direkt aus den Szenariorechnungen des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM sondern über die Kausalkette von sich ändernden Häufigkeiten der Wetterlagen in den täglichen Realisierungen des Klimamodells, die hohe oder tiefe Temperaturwerte sowie geringen oder starken Niederschlag verursachen. Mit den Ergebnissen beider Modelle lässt sich einschätzen, in welchem Bereich sich der Klimawandel in Deutschland ausprägen dürfte und welche Regionen von welchen Auswirkungen besonders betroffen sein könnten. REMO stellt die simulierten Daten in einer horizontalen Auflösung von etwa 10 x 10 km für Deutschland, Österreich und die Schweiz zur Verfügung. WETTREG liefert Modellergebnisse für 282 Klimastationen und 1695 Niederschlagsstationen in Deutschland. Unterstützt wurden die REMO-Simulationen durch das Deutsche Klimarechenzentrum Hamburg. Erste Ergebnisse beider Modelle für den Simulationszeitraum 1961-2100 und die IPCC SRES-Szenarien B1, A1B und A2 (weniger starker, mittlerer und sehr starker Anstieg des Strahlungsantriebs, vgl. IPCC, 2000) liegen vor.

Um die Güte der Modellergebnisse bewerten zu können, wurden die Ergebnisse beider Modelle mit Beobachtungen in der Kontrollperiode 1961-1990 verglichen. Beide Modelle sind in der Lage, die Klimaentwicklung in diesem Zeitraum realitätsnah abzubilden (Jacob, 2001; Jacob et al., 2007a; Spekat et al., 2007).

Beide Modelle zeigen für die zukünftige Temperaturentwicklung ein konsistentes Bild (Abbildung 3, 4 und 5): In Deutschland ist eine rasche Erwärmung sehr wahrscheinlich. Abhängig von der Höhe des künftigen globalen Treibhausgas-Ausstoßes, ist eine Erhöhung der Jahresmitteltemperatur bis zum Jahr 2100, im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990, um 1,5 bis 3,7 °C zu erwarten. Sehr wahrscheinlich ist dabei eine Erwärmung um 2 bis 3 °C. Diese Erwärmung würde sich saisonal unterschiedlich stark ausprägen. Der größte Temperaturanstieg wäre im Winter zu erwarten.

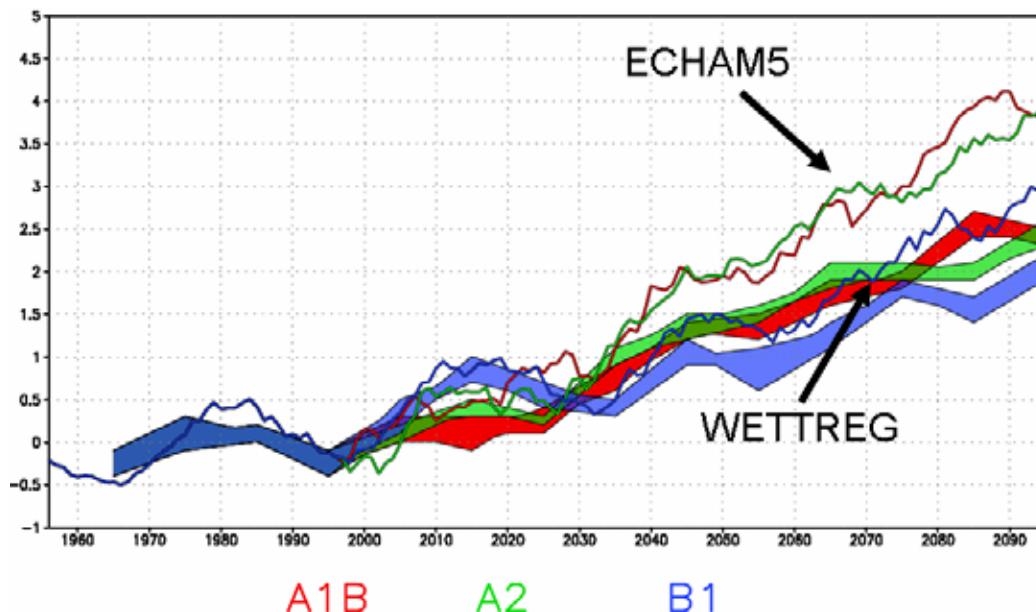


Abb. 3: WETTREG: Änderung der Jahrestemperatur ggü. 1961-1990 für die Szenarien B1, A1B und A2 jeweils für 10 WETTREG-Simulationen. Zum Vergleich die entsprechenden Simulationen des Globalmodells für die Deutschlandboxen (Jacob, Kreienkamp et al., 2006)

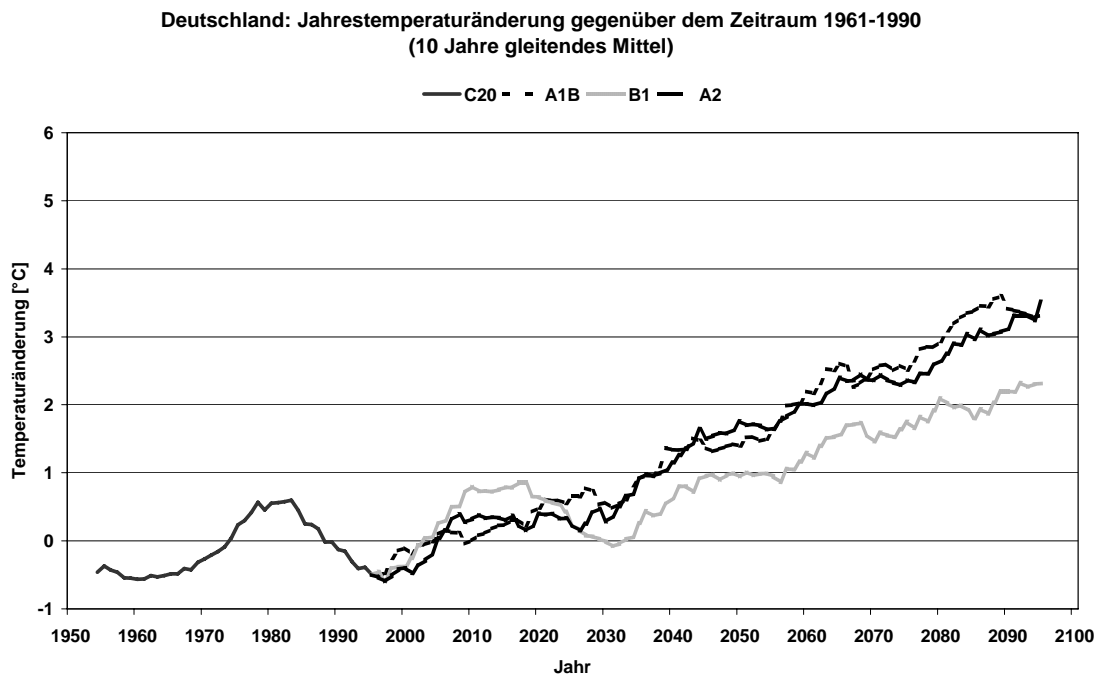


Abb. 4: REMO: Änderung der Jahrestemperatur ggü. 1961-1990 für die Szenarien B1, A1B und (Jacob et al., 2007b)

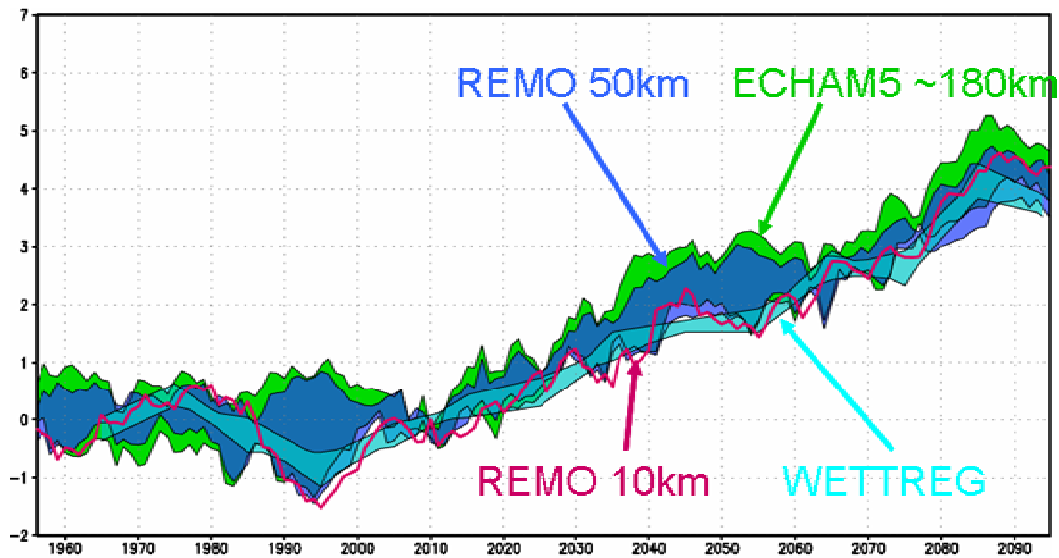


Abb. 5: Änderung der Wintertemperatur ggü. 1961-1990 für das Szenario A1B, simuliert durch die Regionalmodelle WETTREG (10 Simulationen), REMO mit 50 km Auflösung (3 Simulationen) und mit 10 km Auflösung (1 Simulation) sowie durch das Globalmodell (3 Simulationen) für die Deutschlandboxen (Jacob, Kreienkamp et al., 2006)

Beide Modelle zeigen leicht unterschiedliche regionale Erwärmungsmuster für den Zeitraum 2071-2100 im Vergleich zu 1961-1990. REMO simuliert – abhängig vom Emissionsszenario – einen Anstieg der mittleren Jahrestemperatur bis zum Ende des Jahrhunderts regional um bis zu 4 °C (für A1B), wobei sich der Süden am stärksten erwärmt. WETTREG zeigt regionale Maxima der Erwärmung bis zu 2,5 °C (ebenfalls für A1B) im gesamten Norden Deutschlands mit

Ausnahme der Küstenregionen (Jacob et al., 2007b; Spekat et al., 2007; Jacob, Kreienkamp et al., 2006). Um diese Musterunterschiede interpretieren zu können, sind detailliertere vergleichende Untersuchungen geplant.

Auch für die Auswertung des Niederschlags erfolgte ein Vergleich zum Kontrollzeitraum 1961-1990. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass der Niederschlag eine meteorologische Größe ist, die sich im Vergleich zur Temperatur deutlich weniger genau modellieren lässt. Die Simulationen des Niederschlags mit beiden Modellen zeigen klare, jedoch gegenläufige Tendenzen für die Jahreszeiten Sommer und Winter und somit wenig Änderung im Hinblick auf den Jahresniederschlag. Deshalb und wegen der Bedeutung sommerlicher Niederschläge für die Vegetation ist es sinnvoll, die Auswertung für Sommer und Winter getrennt vorzunehmen.

Die sommerlichen Niederschläge könnten in Zukunft großflächig abnehmen. Abhängig vom genutzten Modell und verwendeten Emissionsszenario werden bis zum Ende des Jahrhunderts Niederschlagsrückgänge in der Größenordnung von 20 - 40 % projiziert. Besonders stark könnte der Niederschlagsrückgang in Süd- und Südwestdeutschland sowie in Nordostdeutschland sein (Abbildung 6). Hier könnten gegen Ende dieses Jahrhunderts etwa nur noch zwei Drittel oder sogar noch weniger Niederschläge fallen, als bisher gewohnt. Hohe sommerliche Temperaturen sorgten neben diesen ungewohnt niedrigen Regenmengen dafür, dass sich – falls Wasser zur Verdunstung verfügbar ist – diese Verdunstung deutlich erhöhte. Diese Entwicklung könnte in Regionen, die schon heute Trockenheiten erleben – wie der Nordosten Deutschlands – ohne geeignete Anpassung zu Problemen führen.

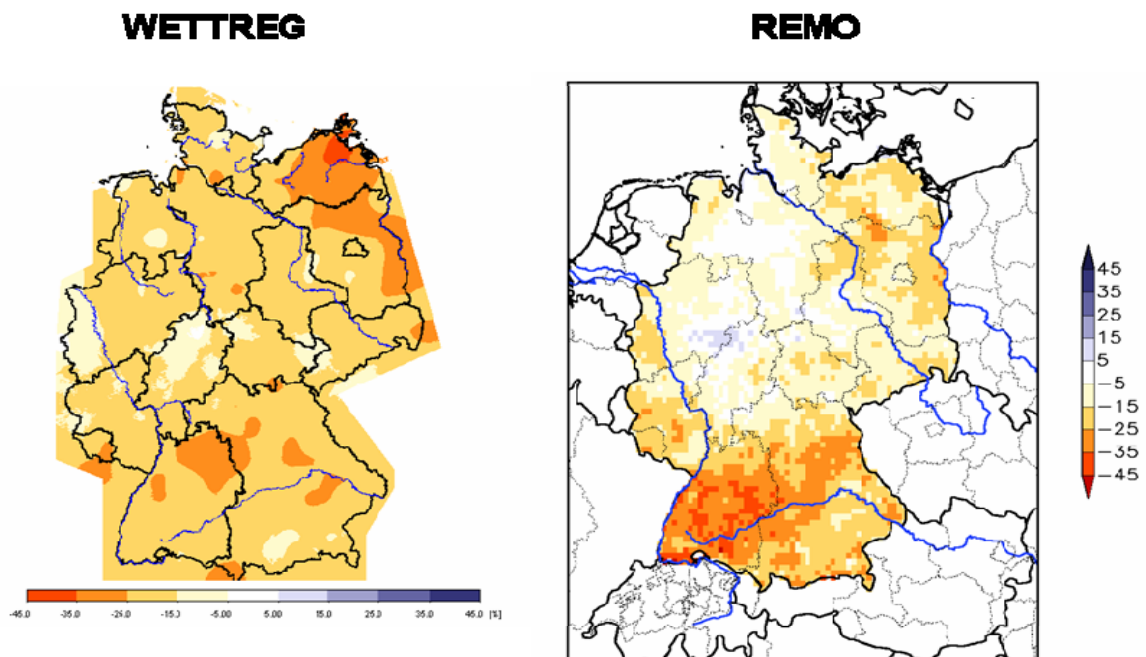


Abb. 6: Relative Niederschlagsänderung im Sommer für das Szenario A1B 2051-2080 im Vergleich zum Zeitraum 1961-1990 modelliert mit WETTREG (links) und REMO (rechts), (Jacob, Kreienkamp et al., 2006)

Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden. Insbesondere in Südwest-Deutschland ist - abhängig vom genutzten Modell und verwendeten Emissionsszenario - ein bis zwei Drittel mehr Niederschlag als heute zu erwarten (Jacob et al., 2007b; Spekat et al., 2007). Wegen gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Mittel- und Hochgebirgen wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen. Fiel in der zweiten Hälfte des



20. Jahrhunderts dort im Jahr etwa ein Drittel des Gesamtniederschlags als Schnee, könnte es bis Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel sein. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Zahl der Tage mit mehr als 3 cm Schneehöhe pro Jahr reduzieren, und zwar stärker in niedrig als in höher gelegenen Regionen (Jacob et al., 2007b).

Die Untersuchung des Andauerungsverhaltens von Hitzeperioden für die Region Oberrheingraben (Stationen Karlsruhe, Heidelberg und Freiburg) zeigte, dass Hitzewellen in Zukunft nicht nur häufiger sondern in länger andauernden Serien auftreten könnten. Insbesondere Hitzeperioden, die 2 bis 5 Tage andauern, könnten 2 bis 3 mal so häufig auftreten als während des Zeitraumes 1961-1990. Mit anderen Worten: wenn Tage mit Tagesmaximumtemperaturen über 30 °C auftreten, steigt in Zukunft die Wahrscheinlichkeit, dass sie in einer längeren Serie auftreten (Abbildung 7).

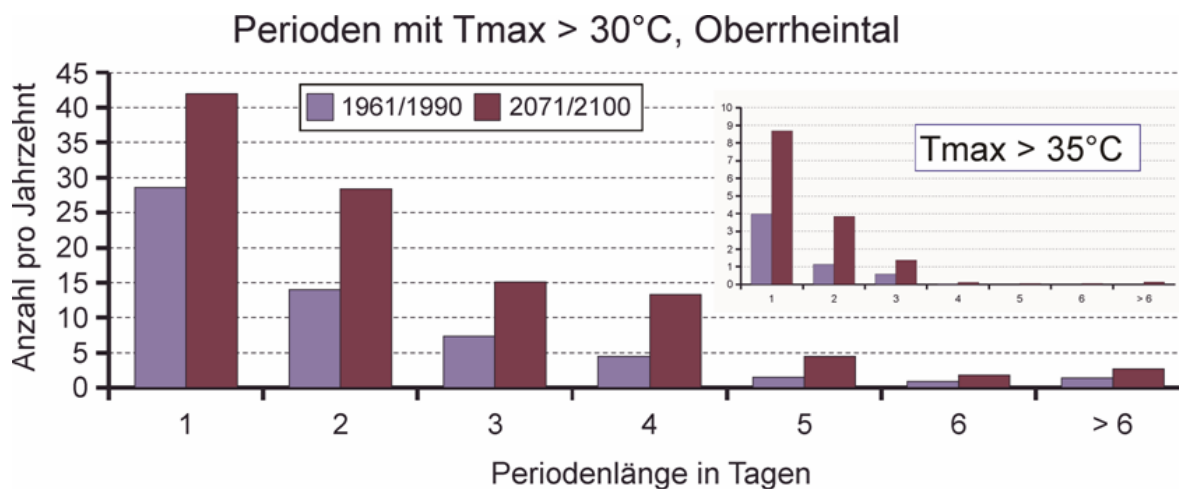


Abb. 7: Absolute Häufigkeiten der Anzahl von Überschreitungen eines Schwellwerts der Tagesmaximumtemperatur (30 °C bzw. 35 °C) pro Dekade für die Zeiträume 1961-1990 bzw. 2071-2100, Szenario A1B (Spekat et al., 2007)

3. Mögliche Klimafolgen und Anpassungserfordernisse in Deutschland

Mit sehr großer Sicherheit wurde unsere Umwelt weltweit bereits durch die Klimaänderung beeinflusst (IPCC, 2007b). Zahlen der Versicherungswirtschaft quantifizieren die bereits beobachtbaren Folgen dieser Entwicklung: Etwa 64 Prozent der größeren Schadensereignisse in Europa und 79 Prozent der von diesen verursachten volkswirtschaftlichen Schäden seit 1980 haben unmittelbaren Bezug zu Klima und Wetter beispielsweise durch Stürme und Hochwasser. Weitere 25 Prozent der Ereignisse – wie Erdbeben, Lawinen, Trockenperioden und Hitzewellen – haben indirekten Bezug. Im Mittel verdoppelte sich nahezu die Zahl größerer Schadensereignisse in den 1990er Jahren gegenüber den 1980er Jahren (Münchener Rück, 2004).

Werden Gegenmaßnahmen nicht oder zu spät ergriffen, kann es zu hohen volkswirtschaftlichen Schäden kommen. Zur Schadensbilanz der letzten Dekade durch klima- oder wetterinduzierte Ereignisse trugen in Deutschland allein die großen Hochwasser mit ca. 13 Mrd. Euro, Hitze und Dürre mit ca. 1 Mrd. Euro sowie Stürme mit zusätzlichen 2,5 Mrd. Euro bei (Sächsische Staatskanzlei, 2003; StMUGV, 2005; Münchener Rück, 2003). Zusätzlich zu diesen volkswirtschaftlichen Schäden von mindestens 16,5 Mrd. Euro waren mehr als 7000 zusätzliche, durch die Extremereignisse ausgelösten Todesfälle in Deutschland zu beklagen (Koppe und Jendritzky, 2004; Schär und Jendritzky, 2004). Die Schadenssummen durch wetter- und klimabedingte Ereignisse steigen exponentiell (Kemfert und Schumacher, 2005) und könnten bis zum Jahre 2050 jährlich mehr als 100 Mrd. Euro betragen (DIW, 2004). Durch die gegenwärtige Unange-

passtheit vieler Systeme trotz gleichzeitig vorhandener, hoher Empfindlichkeit gegenüber dem Klimawandel sowie kontinuierlich wachsende Risiken im Falle des Nichthandelns können Schäden drohen, die Anlass zur Sorge und - darüber hinaus – vor allem zum Handeln geben sollten.

Die bereits beobachtbaren Änderungen vieler natürlicher Systeme – wie Prozesse in der Hydro- und Kryosphäre sowie in terrestrischen und marinen Ökosystemen - können jetzt mit hoher Sicherheit der anthropogenen Komponente der Erwärmung zugeschrieben werden. Die Folgen des Klimawandels werden deshalb vom Ausmaß der anthropogen verursachten Klimaänderung und ihrer Geschwindigkeit abhängen. In Anbetracht der bereits in der Atmosphäre befindlichen Treibhausgase, ihrer strahlungswirksamen Lebenszeiten, der Trägheit des gesamten Klimasystems und der möglichen Spanne künftiger Klimaentwicklungen ist ein gewisses Maß an nachteiligen Klimafolgen mit hoher Sicherheit nicht mehr vermeidbar. Anspruchsvolle Emissionsminderungsmaßnahmen können Klimafolgen und mit ihnen verbundene Risiken, die für die 3. Dekade dieses Jahrhundert und später projiziert worden sind, verlangsamen, reduzieren, verschieben oder gänzlich vermeiden. Darüber hinaus kann Anpassung viele mögliche nachteilige Klimafolgen signifikant reduzieren (IPCC, 2007b).

Daher braucht eine zeitgemäße Klimaschutzpolitik neben so anspruchsvollen Klimaschutzziele wie der Begrenzung der globalen Erwärmung auf höchstens 2° C über dem Niveau des 19. Jahrhunderts ein zweites, festes Standbein: Die Anpassung an die heute nicht mehr abwendbaren Folgen des Klimawandels als Folge des Treibhausgasausstoßes von gestern. In Deutschland müssen insbesondere die Land-, Forst- und Wasserwirtschaft, der Naturschutz, das Gesundheitswesen, die Energiewirtschaft, der Verkehr und der Tourismus mit Risiken und gegebenenfalls auch Chancen durch den Klimawandel rechnen. Zu den besonders stark verwundbaren Regionen Deutschlands gehören neben dem ostdeutschen Tiefland auch der Oberrheingraben und die Alpen. Für das ostdeutsche Tiefland resultieren die Risiken vor allem aus den stark zurückgehenden Sommerniederschlägen, die zu einer geringeren Wasserverfügbarkeit im Sommer führen könnten. Hier könnte die Gefahr von häufigeren und länger anhaltenden Dürren insbesondere für Land- und Forstwirtschaft sowie die Binnenschifffahrt Risiken bergen (Zebisch et al., 2005).

Für die im Vergleich mit anderen deutschen Regionen hohe Verwundbarkeit der Alpen und des Oberrheingrabens sind vor allem verstärkte Hochwasserrisiken verantwortlich, die sich aus zunehmenden und häufiger als Regen fallenden Winterniederschlägen sowie einer Verschiebung von Schmelzvorgängen vom Frühjahr in den Winter ergeben (Zebisch et al., 2005; Jacob et al., 2007b; Spekat et al., 2007; KLIWA, 2006). Eine Anpassung an diese Risiken ist dringend erforderlich, um die menschliche Gesundheit zu schützen und wirtschaftliche Schäden gering zu halten.

Wie eine Studie des UBA zeigte, stehen für alle Regionen und Bereiche mehr oder weniger aufwändige Anpassungsmaßnahmen zur Verfügung, die – werden sie umgesetzt – die Verwundbarkeit in fast allen Bereichen und Regionen auf ein geringes Ausmaß reduzieren könnten. Jedoch sind Notwendigkeit und Möglichkeiten für Anpassungsmaßnahmen bisher im Bewusstsein der Öffentlichkeit und der Entscheidungsträger noch unterentwickelt. Um zukünftige Chancen nutzen und Risiken verringern zu können, müssen Wissenschaft und Politikberatung hier die Bewusstseinsbildung anstoßen (Zebisch et al., 2005).

Als fachliche Grundlage für die Planung von Anpassungsmaßnahmen und Risikobewertungen sollten – unter anderem - auch regionale Klimaänderungsszenarien herangezogen werden. Trotz ihnen inhärenter Unsicherheiten liefern regionale Klimaprojektionen eindeutige und robuste Trends. Die Unsicherheiten in Klimaprojektionen lassen sich reduzieren, jedoch nicht gänzlich vermeiden, sind sie doch Ausdruck ungewisser Entwicklungspfade der menschlichen Gesellschaft, vorhandener Modellunsicherheiten und auch der natürlichen Klimavariabilität. Deshalb sollten die vorhandenen Unsicherheiten in Entscheidungsprozessen nicht ausgeblendet



sondern bewusst in Planungsentscheidungen im Rahmen von Anpassungsmaßnahmen einbezogen werden. Ensembles von regionalen Klimaszenarien, gebildet aus einer Vielzahl von Experimenten mit verschiedenen Modellen, mehreren Modellläufen sowie verschiedenen Emissionsszenarien spannen einen Bereich künftiger möglicher, gleich wahrscheinlicher Klimaentwicklungen auf. Erst das vorhandene Ensemble eines Multi-Modell-Ansatzes ermöglicht Wahrscheinlichkeitsaussagen und damit auch eine Quantifizierung von Unsicherheiten künftiger Klimaentwicklungen. Da in den meisten Entscheidungsprozessen im Rahmen von Anpassungsmaßnahmen eine Fokussierung auf einen oder mehrere bestimmte Bereiche der Ergebnisspanne von Klimaszenarien erfolgt, sollten die Gründe, die zu dieser Fokussierung führten – etwa Vorsorgegründe oder die Vermeidung seltener aber sehr schadintensiver Ereignisse – transparent und explizit kommuniziert werden.

4. Politischer Rahmen für Anpassung an den Klimawandel

Der Handlungsdruck, Anpassungsstrategien an Klimaänderungen zu entwickeln, entsteht nicht nur unmittelbar aus den sich voraussichtlich einstellenden, nachteiligen Folgen der Klimaänderungen und den sich daraus ergebenden Schäden und volkswirtschaftlichen Kosten. Deutschland hat sich mit der Ratifizierung der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen (UNFCCC) auch verpflichtet, Maßnahmenprogramme umzusetzen, die eine systematische Anpassung an zu erwartende Klimaänderungen und deren Folgen ermöglichen (Box 1).

*(1) **Alle Vertragsparteien werden** unter Berücksichtigung ihrer gemeinsamen, aber unterschiedlichen Verantwortlichkeiten und ihrer speziellen nationalen und regionalen Entwicklungsprioritäten, Ziele und Gegebenheiten*

a) [...]

*b) **nationale [...]** Programme erarbeiten, umsetzen, veröffentlichen und regelmäßig aktualisieren, in denen Maßnahmen zur Abschwächung der Klimaänderungen durch die Bekämpfung anthropogener Emissionen [...] sowie **Maßnahmen zur Erleichterung einer angemessenen Anpassung an die Klimaänderungen vorgesehen sind**;*

Box 1: UNFCCC, Artikel 4 – Verpflichtungen

Um diese Forderung umzusetzen, beschlossen die Vertragsparteien ein Fünf-Jahresprogramm zu Anpassung. Das Programm soll helfen, die regionalen Auswirkungen der Klimaänderung abzuschätzen, Wissensdefizite zu erkennen und technische Lösungen für Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln. Es soll das Verständnis und die Bewertung von regionalen Klimafolgen, Verwundbarkeiten sowie Anpassungsoptionen in den einzelnen Vertragsstaaten verbessern und Entscheider in die Lage versetzen, auf gegenwärtige und künftige Klimaänderungen besser reagieren sowie wohlinformierte Entscheidungen zu Anpassungsmaßnahmen treffen zu können.

Die Europäische Kommission arbeitet gegenwärtig an einem „Green paper“, das aufzeigen wird, wie Anpassungsmaßnahmen in die europäische Klimapolitik integriert werden sollten. Wasser-relevante Themen spielen in diesem Zusammenhang eine sehr große Rolle. Insbesondere wird die Wasserrahmenrichtlinie als kraftvolles und geeignetes Werkzeug betrachtet, Aspekte des Klimawandels und seiner Folgen in das Management von Wasserressourcen sowie von Flusseinzugsgebieten einzubeziehen. Da eine erfolgreiche Anpassungsstrategie einen gemeinschaftlichen und integrierten Ansatz benötigt, wurde vorgeschlagen, alle Wasser nutzenden sowie wasserabhängigen Sektoren – wie Landwirtschaft, Stromproduktion, Binnenschifffahrt und Tourismus – unter einem gemeinschaftlichen Anpassungsprozess zu integrieren (Wasser und Klima, 2007).

Auf nationaler Ebene benennt die Koalitionsvereinbarung der Bundesregierung deutlich die Gefahren des Klimawandels als große Herausforderung für die nationale Klimapolitik. Im Klimaschutzprogramm 2005 greift die Bundesregierung diese Herausforderung auf und beschließt, die erforderlichen Schritte einzuleiten, um ein umfassendes nationales Konzept zur Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland zu entwickeln und umzusetzen (KSP, 2005). Zur Unterstützung dieser Aufgabe - einschließlich einer fachlichen und umweltpolitischen Begleitung der Implementierung dieser Maßnahmen - hat das Bundesministerium für Naturschutz und Reaktorsicherheit im Umweltbundesamt ein Kompetenzzentrum „Klimafolgen und Anpassung“ eingerichtet (KomPass, 2007).

5. Zusammenfassung

Beobachtungen und Messungen lassen keinen Zweifel, dass das Klima sich ändert, nicht nur global sondern auch in Deutschland: Die Jahresmitteltemperatur stieg in Deutschland im Zeitraum 1901 - 2000 um 1,0 °C. Winterliche Niederschläge nahmen vor allem im Westen deutlich zu, sommerliche Niederschläge insbesondere im Osten deutlich ab. Extreme Wetterereignisse, wie Hitzeperioden und Starkniederschläge treten jetzt länger, häufiger oder intensiver auf.

Diese Trends könnten sich bei fortschreitenden Emissionen von Treibhausgasen fortsetzen und verstärken. Beide vom UBA genutzte Klimamodelle – REMO sowie WETTREG - zeigen für die zukünftige Temperaturentwicklung ein konsistentes Bild: In Deutschland ist eine rasche Erwärmung um 2 bis 3 °C sehr wahrscheinlich. Der größte Temperaturanstieg wäre im Winter zu erwarten. Hitzewellen könnten in Zukunft nicht nur häufiger sondern auch in länger anhaltenden Serien auftreten. Die sommerlichen Niederschläge könnten in Zukunft großflächig um 15-25 % abnehmen. Besonders stark könnte der Niederschlagsrückgang in Süd- und Südwestdeutschland sowie in Nordostdeutschland sein. Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden. Insbesondere in Südwest-Deutschland ist - abhängig vom genutzten Modell und verwendeten Emissionsszenario - ein bis zwei Drittel mehr Niederschlag als heute zu erwarten. Wegen gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Mittel- und Hochgebirgen wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen.

Bereits beobachtbaren Änderungen vieler natürlicher Systeme können mit hoher Sicherheit der anthropogenen Komponente der Erwärmung zugeschrieben werden. Die Folgen des Klimawandels werden deshalb vom Ausmaß der anthropogen verursachten Klimaänderung und ihrer Geschwindigkeit abhängen, ein gewisses Maß an nachteiligen Klimafolgen ist jedoch mit hoher Sicherheit nicht mehr vermeidbar. Anspruchsvolle Emissionsminderungsmaßnahmen können Klimafolgen und mit ihnen verbundene Risiken verlangsamen, reduzieren, verschieben oder gänzlich vermeiden. Darüber hinaus kann Anpassung viele mögliche nachteilige Klimafolgen signifikant reduzieren.

Für die im Vergleich mit anderen deutschen Regionen hohe Verwundbarkeit der Alpen und des Oberrheingrabens gegenüber dem Klimawandel sind vor allem verstärkte Hochwasserrisiken verantwortlich. Eine Anpassung an diese Risiken ist dringend erforderlich. Geeignete Anpassungsmaßnahmen stehen zur Verfügung. In ihre Planung sollten Ergebnisse von Klimaänderungsszenarien einbezogen werden. Die vorhandenen Unsicherheiten in den Szenarien sollten in Entscheidungsprozessen nicht ausgeblendet sondern bewusst einbezogen werden. Mit der Hilfe eines Multi-Modell-/Ensemble-Ansatzes lassen sich diese Unsicherheiten quantifizieren.

Der Handlungsdruck, Anpassungsstrategien an Klimaänderungen zu entwickeln, entsteht nicht nur unmittelbar aus den sich voraussichtlich einstellenden, nachteiligen Folgen der Klimaänderungen sondern auch aus völkerrechtlich verbindlichen Verpflichtungen Deutschlands sowie der Europäischen Union. Die Arbeit verschiedener Gremien im internationalen und nationalen Kontext ist auf die Erstellung und Implementierung sektorübergreifender Anpassungsstrategien gerichtet. In Deutschland hat die ressortübergreifende Arbeit an einer nationalen Anpassungsstra-



terie begonnen. Das Umweltbundesamt unterstützt diese Aktivität fachlich-konzeptionell durch sein Kompetenzzentrum „Klimafolgen und Anpassung“.

6. Literatur

- DIW (2004): Die ökonomischen Kosten des Klimawandels. DIW Wochenbericht 42/2004, 615-122.
- IPCC (2000): "Emissions Scenarios. 2000", Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.) Cambridge University Press, UK. pp 570.
- IPCC (2007a): Summary for Policymakers of "Climate Change 2007: The physical Science Basis". A Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Based on a draft prepared by Richard Alley et al., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, pp 21.
- IPCC (2007b): Summary for Policymakers of "Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability". A Report of Working Group II of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Based on a draft prepared by Neil Adger et al., Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA.
- Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, Meteorol Atmos Phys 77, 61-73.
- Jacob, D., Bärring, L., Christensen, O.B., Christensen, J.H., Hagemann, S., Hirschi, M., Kjellström, E., Lenderink, G., Rockel, B., Schär, C., Seneviratne, S.I., Somot, S., van Ulden, A., and van den Hurk, B. (2007a): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance, PRUDENCE Special Issue, Climatic Change, Volume 81, Supplement 1, May 2007
- Jacob D., Göttel H., Lorenz P. (2007b): Hocho aufgelöste regionale Klimaszenarien für Deutschland, Österreich und die Schweiz, DMG-Mitteilungen, 03/07, Berlin.
- Jacob D., Kreienkamp F., Enke W., Göttel H., Lorenz P., Spekat A. (2006): Regionale Klimaszenarien für Deutschland. Präsentation auf UBA-Workshop „Anpassung an Klimaänderungen in Deutschland — Regionale Szenarien und nationale Aufgaben“, 17.10.06, Berlin
http://osiris.uba.de/gisudienste/Kompass/_pdf/2006-10/folien/01_Regionale_Klimaszenarien_fuer_Deutschland_Jacob_MPI.pdf
- Kemfert C., Schumacher K. (2005): Costs of Inaction and Costs of Action in Climate Protection – Assessment of Costs of Inaction or Delayed Action of Climate Protection and Climate Change, DIW Berlin: Politikberatung kompakt 13, Project FKZ 904 41 362 for the Federal Ministry for the Environment, pp 48.
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte Heft 9 [Hrsg. Arbeitskreis Klimaveränderung und Wasserwirtschaft], Karlsruhe, 100 S.
- KomPass (2007): Kompetenzzentrum „Klimafolgen und Anpassung im Umweltbundesamt, www.anpassung.net
- Koppe C., Jendritzky G. (2004): in Gesundheitliche Auswirkungen der Hitzewelle im August 2003, Sozialministerium Baden-Württemberg, Stuttgart.



- KSP (2005): Nationales Klimaschutzprogramm Sechster Bericht der Interministeriellen Arbeitsgruppe „CO₂-Reduktion“, Deutscher Bundestag Drucksache 15/5931, S. 41.
- Müller-Westermeier G. (2006): pers. Mitteilung vom 09.03.2006.
- Müller-Westermeier G., Riecke W. (2006): Die Witterung in Deutschland. In: Klimastatusbericht 2005 [Hrsg. Deutscher Wetterdienst], Offenbach, 75-86.
- Münchener Rück (2003): Jahresrückblick Naturkatastrophen 2002, München.
- Münchener Rück (2004): Jahresrückblick Naturkatastrophen 2003, München.
- Sächsische Staatskanzlei (2003): Regierungserklärung Georg Milbradt im Sächsischen Landtag 11.09.2003.
- Schär C., Jendritzky G. (2004): Hot news from summer 2003, Nature 432, 559-560.
- Schönwiese C.-D., Jonas M., Staeger T. (2005): Berechnung der Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Extremereignissen durch Klimaänderungen – Schwerpunkt Deutschland. UBA-FKZ 201 41 254. In: UBA-Reihe Climate Change 07/05, Berlin.
- Schönwiese C.-D., Janoschitz R. (2005): Klima-Trendatlas Deutschland 1901-2000. Bericht Nr.4, Inst. Atmosphäre u. Umwelt, Univ. Frankfurt/M.
- Spekat A., Enke W., Kreienkamp F. (2007): Neuentwicklung von regional hochaufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und B2. UBA-FKZ 204 41 138. UBA-Publikationsreihe, Dessau.
- StMUGV (2005): August-Hochwasser 2005 in Südbayern, Staatsministerium für Umwelt Gesundheit und Verbraucherschutz, Bericht von Werner Schnappauf im Ausschuss für Umwelt und Verbraucherschutz des Bayerischen Landtags am 24. November 2005, www.stmugv.bayern.de
- Wasser und Klima (2007): Time to Adapt - Climate Change and the European Water Dimension, Vulnerability - Impacts – Adaptation, European Conference, 12 - 14 February 2007, Berlin. <http://www.climate-water-adaptation-berlin2007.org/documents/key-messages.pdf>
- Zebisch M., Grothmann T., Schröter D., Haße C., Fritsch U., Cramer W. (2005): Klimawandel in Deutschland – Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme in Deutschland. UBA-FKZ 201 41 253. In: UBA-Reihe Climate Change 08/05, Berlin.



KLIWA - Regionale Untersuchungen für die Wasserwirtschaft

Bernd Katzenberger
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Veranlassung

Das Sachverständigen-Gremium „Intergovernmental Panel on Climate Change“ (IPCC) der Vereinten Nationen geht davon aus, dass sich die mittlere globale Lufttemperatur in den nächsten Jahrzehnten deutlich erhöhen wird. Damit einhergehen wird eine signifikante Änderung des globalen Klimas. Diese Klimaänderung wird Auswirkungen auf den Wasserhaushalt haben.

Die aus globalen Klimamodellen abgeleiteten Aussagen zur künftigen Klimaveränderung beziehen sich im Wesentlichen auf großräumige Gebiete wie z.B. Nordeuropa. Nähere Angaben über die Auswirkungen auf das Klima und den Wasserhaushalt im regionalen Maßstab, insbesondere in den einzelnen unterschiedlich strukturierten Flusseinzugsgebieten und Grundwasserlandschaften Süddeutschlands, lagen bisher nicht vor. Beispielsweise wird die Kenntnis über Auswirkungen eines sich verändernden Klimas auf eine möglicherweise zunehmende Hochwassergefährdung dringend benötigt; sie liegt im originären Interesse der Bundesländer, da diese für den Hochwasserschutz zuständig sind.

Die Länder Baden-Württemberg und Bayern haben deshalb gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst bereits 1999 das Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) begonnen. Das Projekt ist längerfristig angelegt. Ab 2007 ist auch das Land Rheinland-Pfalz Kooperationspartner.

Zielrichtung von KLIWA ist es, die möglichen Folgen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten der Länder abzuschätzen, die Konsequenzen aufzuzeigen und Handlungsempfehlungen für die betroffenen Bereiche (Hochwasserschutz, Grundwassernutzung, Siedlungsentwässerung, Gewässernutzungen, Gewässerökologie, etc.) im Sinne einer vorsorgenden Wasserwirtschaftspolitik zu entwickeln.

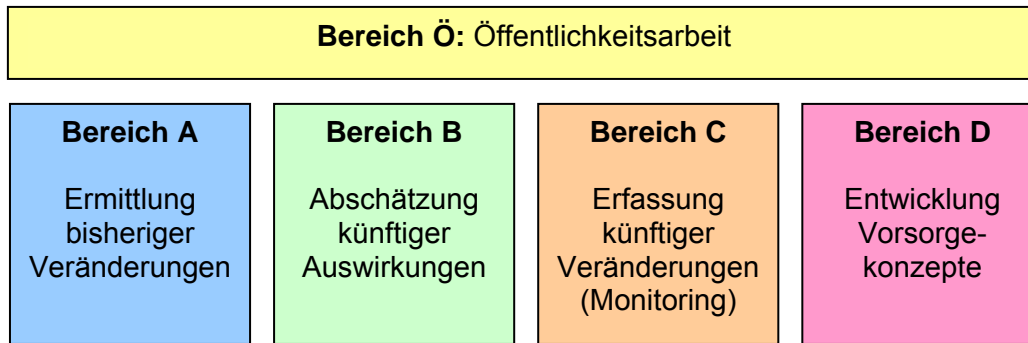
2. Rahmenbedingungen und Vorgehenskonzept

Die im Vorgehenskonzept formulierte Aufgabe von KLIWA,

künftige Veränderungen des Wasserhaushalts als Folge von möglichen Klimaveränderungen aufzuzeigen und der Wasserwirtschaftsverwaltung Hinweise über damit verbundene Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen gewässerkundlichen Grundlagen zu geben sowie nachhaltige Handlungsstrategien für die Umsetzung im Sinne des Vorsorgeprinzips zu entwickeln,

kann nur in einem längerfristigen Programm geplant und umgesetzt werden. Die einzelnen Untersuchungsprojekte müssen dabei fachlich aufeinander abgestimmt und in ihrem Gesamtzusammenhang dargestellt sein.

Durch das gemeinsame gebiets- und fachübergreifende Vorgehen sollen Fachexpertisen gebündelt und Synergieeffekte genutzt werden. In einem Vorgehenskonzept sind der Projektrahmen (Anlage 1) und ein Aktionsprogramm (Anlagen 2 - 4) festgelegt. Das Vorgehenskonzept wird anlassbezogen entsprechend den aktuellen Kenntnissen, Erfordernissen und Bearbeitungsmöglichkeiten überprüft und alle 2-3 Jahre fortgeschrieben.



Grobstruktur des Gesamtprojekts KLIWA

Der Projektrahmen umfasst die folgenden Bereiche:

- Ermittlung der bisherigen Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt
- Erfassung künftiger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Entwicklung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorsorgekonzepte
- Öffentlichkeitsarbeit

In der Anlage 1 ist der Projektrahmen näher dargestellt.

3. Darstellung des Aktionsprogramms

Das längerfristige Aktionsprogramm kann nur stufenweise umgesetzt werden. Es umfasst mittlerweile über 70 Einzelprojekte. Alle geplanten Untersuchungsbereiche sind darin noch nicht enthalten. Das Aktionsprogramm wird sukzessive fortgeschrieben.

3.1 Bereich A – Ermittlung bisheriger Veränderungen von Klima und Wasserhaushalt

Die Ermittlung der Variabilität bzw. der Veränderungen von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen ist als Basis aller Untersuchungen und für Vergleichsbetrachtungen erforderlich. Sie erfolgt durch Analyse langer Messzeitreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen. Der Bereich A umfasst zahlreiche Einzelprojekte (Anlage 2). Neben den Fließgewässern werden auch stehende Gewässer und das Grundwasser mit den jeweils spezifischen Kenngrößen betrachtet.

Die Bandbreite der zeitlichen natürlichen Schwankungen und systematische Veränderungen lassen sich aus den Analysen der langen Messzeitreihen erkennen.

Die Analyse ist aus folgenden Gründen besonders wichtig:

- Sie gibt Aufschluss über die zeitliche Variabilität, d.h. über vorhandene natürliche Schwankungen und eventuelle systematische Veränderungen (Trends), ebenso über die räumliche Variabilität, d.h. über die spezifischen Verhältnisse in den einzelnen Teilräumen.
- Aus dem bisherigen Verhalten lassen sich Eckwerte und Randbedingungen für Szenarienrechnungen abschätzen. Künftige Entwicklungen können damit fundierter beurteilt werden.

Das Langzeitverhalten von Gebietsniederschlägen, Starkniederschlägen, Niederschlag, Lufttemperatur, Globalstrahlung, Verdunstung, Schneedeckenparameter, Hochwasserabflüssen und mittleren Abflüssen wurde flächendeckend in BW und BY untersucht und dokumentiert.

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland haben sich demnach in den letzten Jahrzehnten signifikant verändert. Dies zeigt sich z.B. bei der festgestellten Erhöhung der Lufttem-

peratur, der Zunahme von Starkniederschlägen im Winter, bei der Häufigkeit von Hochwasserereignissen sowie in einer Zunahme von Dauer und Häufigkeit von Westwetterlagen.

Die KLIWA-Ergebnisse zu den Veränderungen der Starkniederschläge waren Anlass für den DWD, die für die wasserwirtschaftliche Bemessungspraxis bedeutsamen KOSTRA-Werte fortzuschreiben.

3.2 Bereich B – Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt

Die Untersuchungen erfolgen auf der Basis von Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen (WHM) für die einzelnen Flussgebiete. Als Input für die WHM werden die Ergebnisse aus regionalen Klimaszenarien verwendet. Die verschiedenen Einzelprojekte sind in Anlage 3 aufgeführt.

Da es bei den in Betracht kommenden regionalen Klimamodellierungen bislang keine optimale Methode gibt, wurden drei Institutionen beauftragt. Zum Einsatz kamen 2 statistische Verfahren (u.a. WETTREG) sowie das dynamische Modell REMO. Alle drei Verfahren hatten die gleichen Randbedingungen: Globalmodell ECHAM4, Emissionsszenario B2, Verifikationszeitraum 1971-2000, Szenario 2021-2050. Ergebnis waren Datensätze (Tages- bzw. Stundenwerte) von Niederschlag, Temperatur usw. für die simulierten Zeiträume. Bei den Ergebnissen zeigte sich erwartungsgemäß eine Bandbreite. Insgesamt aber ist für das Zieljahr 2050 zu erwarten, dass die Erwärmung weiter geht, die Winter feuchter und die Sommer trockener werden.

Wasserhaushaltsmodelle beschreiben und quantifizieren die räumliche und zeitliche Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten. Sie ermöglichen Aussagen zu den Abflüsse (z.B. Hochwasser, Niedrigwasser), zur Grundwasserneubildung und zur Verdunstung.

Schema für Einsatz der WHM bei KLIWA

1. **Verifikation** des WHM mit gemessenen Daten (z.B. 1961-2000)
2. **WHM-Referenzlauf** (WHM-Simulation auf Grundlage der Klimaszenarien für den Ist-Zustand, 1971-2000)
3. **WHM-Zukunftsszenario** (WHM-Simulation auf Grundlage der Klimaszenarien für die Zukunft, 2021-2050)
4. **Statistische Auswertung** (Änderung hydrologischer Parameter im Zukunftsszenario gegenüber Referenzlauf)

Baden-Württemberg und Rheinland-Pfalz verwenden als WHM das Modell LARSIM, Bayern das Modell ASGi. Für alle Flussgebiete in Baden-Württemberg (36.000 km²) wurden flächendeckend WHM im 1 km²-Raster erstellt. Sie werden in BW zudem mittlerweile auch außerhalb von KLIWA täglich operationell eingesetzt zur Niedrigwasservorhersage und Hochwasserfrühwarnung. In Bayern sind WHM für einen Teil der Landesfläche bereits erstellt.

Die bisherigen Auswertungen bis 2050 lassen für die Hochwasserabflüsse eine Zunahme erwarten, z.B. für das HQ₁₀₀ in BW je nach Region um 15 bzw. 25 %. Bei den Niedrigwasserabflüssen wird ein regional unterschiedlich ausgeprägter Rückgang im Sommer erwartet.

Die Untersuchungen zu Hoch- und Niedrigwasserabflüssen werden fortgeführt. Untersuchungen zur Grundwasserneubildung, zum Grundwasserschutz sowie zur Wärmebelastung und zu den ökologischen Auswirkungen auf die Gewässer sowie auf den Bodensee wurden konzipiert und weitgehend auch schon begonnen, ebenso auch Untersuchungen zu den Auswirkungen von Änderungen der Landnutzung und der Vegetationsperiode (Phänologie).



Im Bereich der Siedlungswasserwirtschaft ist von Interesse, wie sich die für die Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen relevanten Kurzzeitniederschläge infolge des Klimawandels ändern werden. In BW erfolgt hierzu die Weiterentwicklung des Programmsystems NiedSim.

Auswirkungen auf den Bodenschutz vor dem Hintergrund einer erwarteten zunehmenden Bodenerosion infolge erhöhter Niederschläge sind vorgesehen.

Weiterentwicklungen im Bereich der Klimamodellierung werden verfolgt und bei Bedarf aktiv begleitet. So sind z.B. zwischenzeitlich im Auftrag des Umweltbundesamtes auf Basis des weiterentwickelten globalen Klimamodells ECHAM5 neue regionale Klimaszenarien für Deutschland nach WETTREG und REMO erstellt worden (drei Emissionsszenarien, bis 2100). Auch diese neuen Szenarien werden betrachtet und in die Bewertung mit einbezogen.

3.3 Bereich C – Erfassung künftiger Veränderungen von Klima und Wasserhaushalt

Um Veränderungen des regionalen Klimas und Wasserhaushalts erkennen zu können, ist ein längerfristiges Monitoring von relevanten hydrometeorologischen und hydrologischen Größen erforderlich (Anlage 4). Dies erfolgt auf der Basis eines integrierend und länderübergreifend angelegten Messnetzes von ausgewählten, bereits vorhandenen Messstellen, die über möglichst lange Zeitreihen verfügen. Das integrierte Messnetz umfasst insbesondere Niederschlags- und Klimastationen, Abflusspegel und Grundwassermessstellen.

Damit sollen die künftigen, regional unterschiedlichen meteorologischen und gewässerkundlichen Verhältnisse erfasst und nach einem abgestimmten Konzept zeitnah ausgewertet werden

3.4 Bereich D – Entwicklung nachhaltiger wasserwirtschaftlicher Vorsorgekonzepte

Klimabedingte Veränderungen des Wasserhaushalts haben unterschiedliche Auswirkungen auf die Vulnerabilität wasserwirtschaftlicher Anlagen, infrastruktureller und ökologischer Systeme und jeweils sozioökonomische Konsequenzen.

Für ein gesellschaftspolitisch angepasstes Handeln im Sinne des Vorsorgeprinzips sind fundierte Informationen über die Klimafolgen zwingende Voraussetzung. Erst die Kenntnis von Art und möglichem Umfang dieser Folgen machen die Entwicklung nachhaltiger Anpassungsstrategien und praxistauglicher Handlungsempfehlungen sowie deren Umsetzung für Politik und Gesellschaft vermittelbar. Dass hier weit in die Zukunft gerichtete kostenträchtige Maßnahmen im Raum stehen können, vor dem Hintergrund von Unsicherheiten, die jedes Zukunftsszenario in sich birgt, stellt eine zusätzliche Herausforderung im Zusammenhang mit den Klimafolgeuntersuchungen und der Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen dar.

In der gesellschaftlichen Diskussion mit dem Klimawandel stand in den letzten Jahren die Gefährdungszunahme durch Hochwasserverschärfungen im Vordergrund. In diesem Bereich wurde in KLIWA mit der Ermittlung von so genannten Klimaänderungsfaktoren für Bemessungsabflüsse und dem Lastfall Klimaänderung bei der Planung von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen eine Anpassungsstrategie entwickelt und in Baden-Württemberg und Bayern eingeführt.

Für die Bereiche Niedrigwassermanagement, Grundwasserbewirtschaftung, Siedlungsentwässerung und Bodenschutz wurden entsprechenden Untersuchungen konzipiert und z.T. bereits begonnen (Anlage 4).

3.5 Bereich Ö – Öffentlichkeitsarbeit

Zum Thema Klimawandel und Klimafolgen besteht ein großes Informationsbedürfnis. Über Ziele und Ergebnisse von KLIWA werden die interessierte Öffentlichkeit, die Fachwelt und die politisch Verantwortlichen regelmäßig informiert. Damit sollen auch Akzeptanz und Unterstützung für notwendige Anpassungsmaßnahmen gefunden werden.

Die verschiedenen Möglichkeiten wie Internet, öffentliche Medien, Fachzeitschriften, Veranstaltungen, eigene Veröffentlichungen usw. werden genutzt (Anlage 4). Hervorzuheben sind dabei die alle 2-3 Jahre stattfindenden KLIWA-Symposien sowie die Veröffentlichungen der wesentlichen Teilergebnisse in einer eigenen Schriftenreihe (KLIWA-Hefte, Anlage 5).

Im Internet unter www.kliwa.de wird das Kooperationsvorhaben KLIWA mit den bereits vorliegenden Ergebnissen präsentiert. Dieses Informationsangebot wird laufend fortgeschrieben.

4. Ausblick

Die Untersuchungen in KLIWA konzentrierten sich zunächst auf die bisherigen Veränderungen des Klimas und Wasserhaushalts sowie auf die künftig zu erwartenden klimatischen Veränderungen. Daran knüpften die wasserwirtschaftlichen Fragestellungen an. Dabei stand die Untersuchung einer möglichen Hochwasserverschärfung im Vordergrund. Die Untersuchungen zu den Auswirkungen des Klimawandels wurden mittlerweile auf die Bereiche Niedrigwasser, Grundwasser, Seen (Bodensee) sowie Siedlungswasserwirtschaft ausgedehnt.

Die entwickelten Instrumente und die Ergebnisse zum Wasserhaushalt bieten zudem eine fundierte Grundlage für die Klimafolgen-Untersuchungen in vom Wasserdargebot abhängigen Bereichen wie z.B. Land- und Forstwirtschaft, Naturschutz und Tourismus.

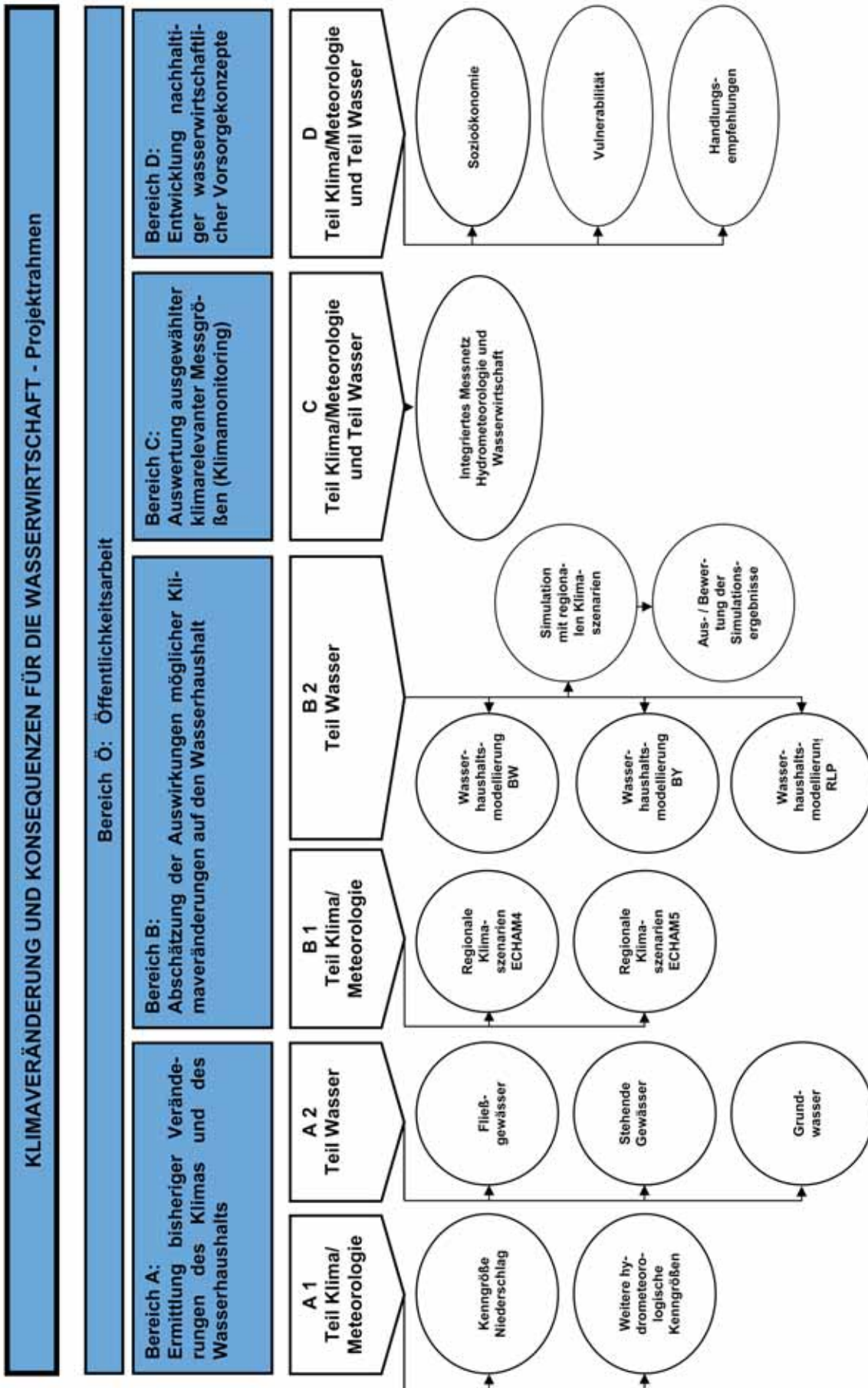
Den KLIWA-Partnern ist bewusst, dass die bislang gewonnenen Erkenntnisse auf Grund der zu treffenden Annahmen z.B. zur künftigen globalen Emissionsentwicklung der Treibhausgase Unsicherheiten beinhalten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die Erkenntnisse zum Klimawandel weiter fortentwickeln.

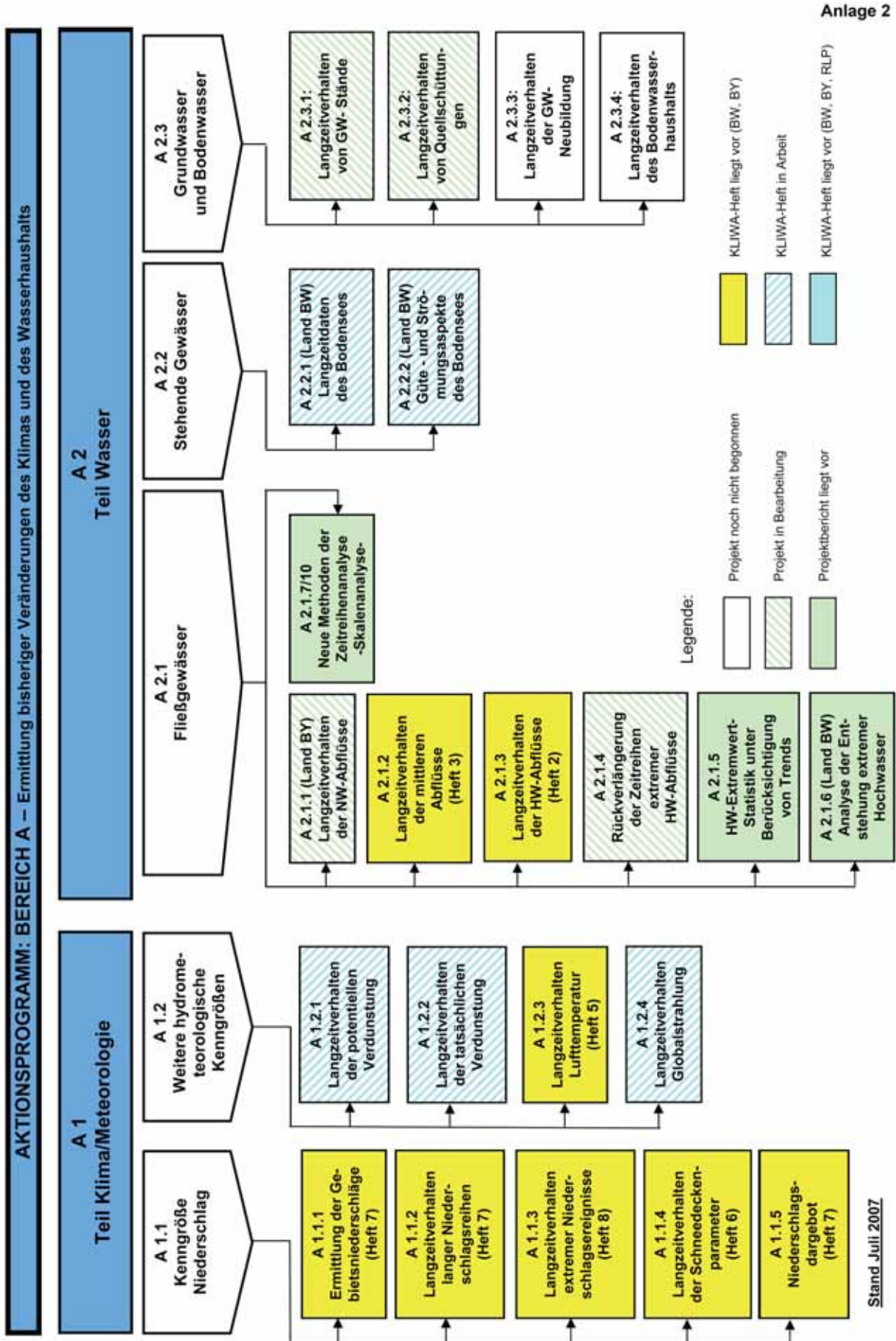
Die Einbeziehung von Forschungsergebnissen nationaler und internationaler Institutionen in die Arbeit von KLIWA, die Begleitung von anstehenden Arbeiten zu Adaptionsmaßnahmen auf EU- und Bundesebene sowie die Zusammenarbeit und der Erfahrungsaustausch mit anderen Bundesländern bleiben eine notwendige Aufgabe auch in den nächsten Jahren.

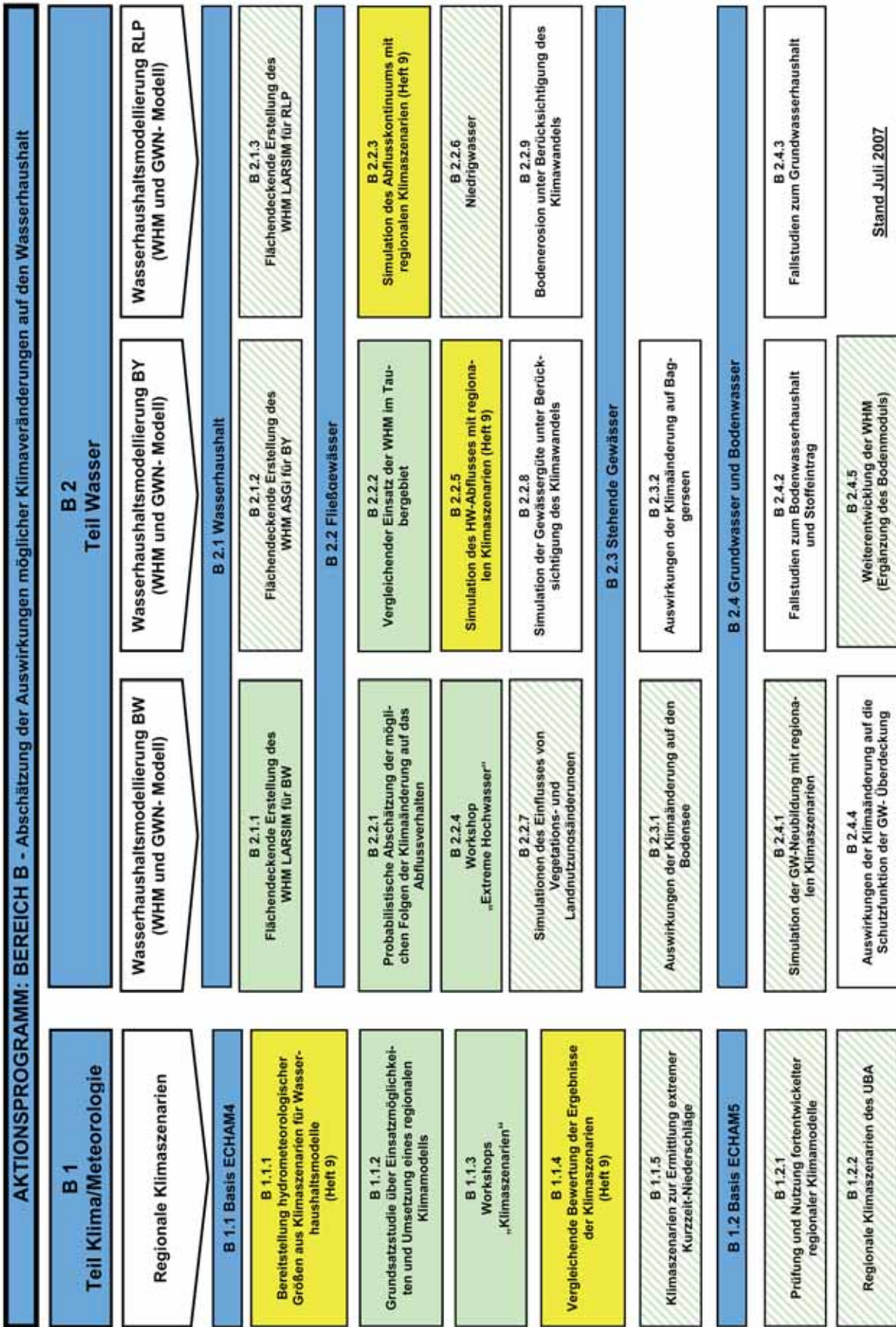
Letztlich bleibt es aber eine große Herausforderung für die wasserwirtschaftliche Praxis, aus Vorsorgegründen praxistaugliche Anpassungsstrategien für die vom Klimawandel betroffenen wasserwirtschaftlichen Handlungsfelder zu entwickeln und mit Augenmaß anzuwenden. KLIWA soll hierzu die Grundlagen bereitstellen.



Anlage 1

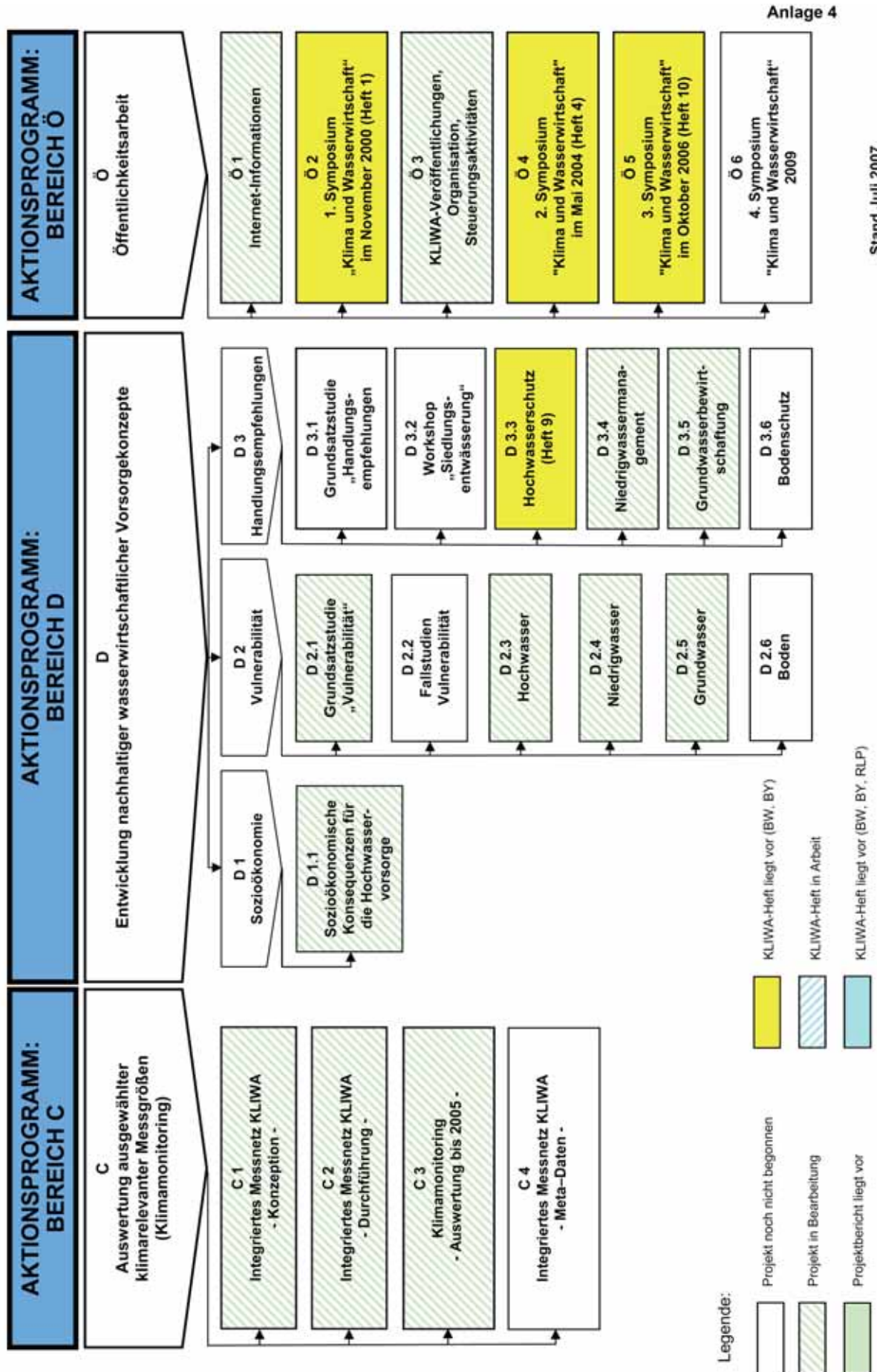






Anlage 3

Stand Juli 2007



Stand Juli 2007

**Anlage 5****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; Deutscher Wetterdienst)

- Heft 1: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
Fachvorträge beim 1. KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe. 278 S.
ISBN 3-88251-279-2, 2001.
- Heft 2: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 2.1.3: Analyse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse. 98 S.
ISBN 3-88251-284-9, 2002.
- Heft 3: Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 2.1.2: „Analyse zum Langzeitverhalten der mittleren jährlichen und monatlichen Abflüsse“. 93 S.
ISBN 3-88251-286-5, 2003.
- Heft 4: Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft.
Fachvorträge beim 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg. 250 S.
ISBN 3-937911-16-2, 2004.
- Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.2.3: „Analyse des Langzeitverhaltens von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur“. 76 S.
ISBN 3-937911-17-0, 2005.
- Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.4: „Analyse des Langzeitverhaltens verschiedener Schneedeckenparameter in Baden-Württemberg und Bayern“. 88 S.
ISBN 3-937911-18-9, 2005.
- Heft 7: Langzeitverhalten des Gebietsniederschlags in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.2: „Analyse des Langzeitverhaltens von Gebietswertreihen des Niederschlags“. 156 S.
ISBN 3-937911-19-7, 2005.
- Heft 8: Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern.
KLIWA-Projekt A 1.1.3 „Trenduntersuchungen extremer Niederschlagsereignisse“. 93 S.
ISBN 3-88148-412-4, 2006.
- Heft 9: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt.
*KLIWA-Projekt B 1.1.1/1.1.4. „Entwicklung und Vergleich regionaler Klimaszenarien“;
KLIWA-Projekt B 2.4/2.5 „Simulation des Abflusskontinuums und des Hochwasserabflusses mit regionalen Klimaszenarien“. 100 S.*
ISBN 3-88251-305-5, 2006.

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter der Internetseite:

<http://www.kliwa.de>

Starkniederschläge und Schneeschmelze in Süddeutschland

Gabriele Malitz
Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie

1. Einleitung

Mit den großen Hochwassern der jüngsten Vergangenheit wurde wieder verstärkt die Frage gestellt, inwieweit Starkniederschlagsereignisse zugenommen haben. Eine Reihe von Untersuchungen seitens der Hydrometeorologen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dient dazu, diese Frage - unter Berücksichtigung verschiedener Aspekte - zu beantworten. Von Bedeutung sind dabei bspw. jahreszeitliche Unterschiede, regionale Besonderheiten, zusätzliche Einflüsse durch Schneeschmelze sowie die Definition von Starkniederschlag.

Das Langzeitverhalten der Starkniederschläge wurde von der Abteilung Hydrometeorologie (HM) des DWD bspw. im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) in Zusammenarbeit mit der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg und dem Bayerischen Landesamt für Umwelt untersucht. Es lagen dabei für den Zeitraum 1931–2000 Messwerte von 415 Niederschlagsstationen und von 92 dieser Stationen Messungen für den längeren Zeitraum 1901–2000 vor. Als Starkniederschläge wurden die jeweiligen Höchstwerte der drei Zeitspannen hydrologisches Jahr (November bis Oktober), hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) und hydrologisches Winterhalbjahr (November bis April) betrachtet.

Seitens des DWD/HM werden seit Jahren extremwertstatistische Analysen vorgenommen. Insbesondere wurden koordinierte Starkniederschlags-Regionalisierungs-Auswertungen - die KOSTRA-Untersuchungen - mit praxisrelevanten Zielsetzungen der Anwendungsgebiete Hydrometeorologie und Wasserwirtschaft für variierende Basiszeiträume durchgeführt. Die jüngsten, daraus resultierenden Ergebnisse sind seit 2005 unter der Bezeichnung KOSTRA-DWD-2000 für den Basiszeitraum 1951–2000 verfügbar. Dabei ist unter einem Starkniederschlag ein Niederschlagsabschnitt bestimmter Dauer zu verstehen, der im Verhältnis zu seiner Dauerstufe eine hohe Niederschlagsintensität hat und daher selten auftritt, i. d. R. höchstens einmal pro Jahr oder seltener.

Nachfolgend werden einige Ergebnisse beider Untersuchungen vorgestellt.

2. Langzeitverhalten von Starkniederschlag in Süddeutschland

Im Heft 8 der KLIWA-Berichte (KLIWA, 2006) sind die Ergebnisse zum Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern zusammengefasst. Unter anderem wurden Trenduntersuchungen durchgeführt, den Wetterlageneinfluss berücksichtigende Zeitreihenvergleiche vorgenommen und Schwellenwertüberschreitungen analysiert.

Im Rahmen der Trenduntersuchungen wurden die Trendgeraden an die Zeitreihen der jährlichen Niederschlagshöchstwerte (für Dauerstufen von $D = 24$ h bis $D = 240$ h) angepasst. Um eine Vergleichbarkeit der Trendhinweise aller Stationen - unabhängig von ihrer Höhenlage - zu gewährleisten, sind die absoluten Änderungen mit den Mittelwerten je Station skaliert worden. So ergaben sich die relativen Trends (in Prozent), bezogen auf die Mittelwerte. In der Abbildung 1 (1931–2000) und der Abbildung 2 (1901–2000) sind die mittleren relative Niederschlagstrends (Signifikanz ≥ 90 %) und die relativen Häufigkeiten der Stationen mit entsprechenden Trends in Baden-Württemberg und Bayern für vier Dauerstufen dargestellt.

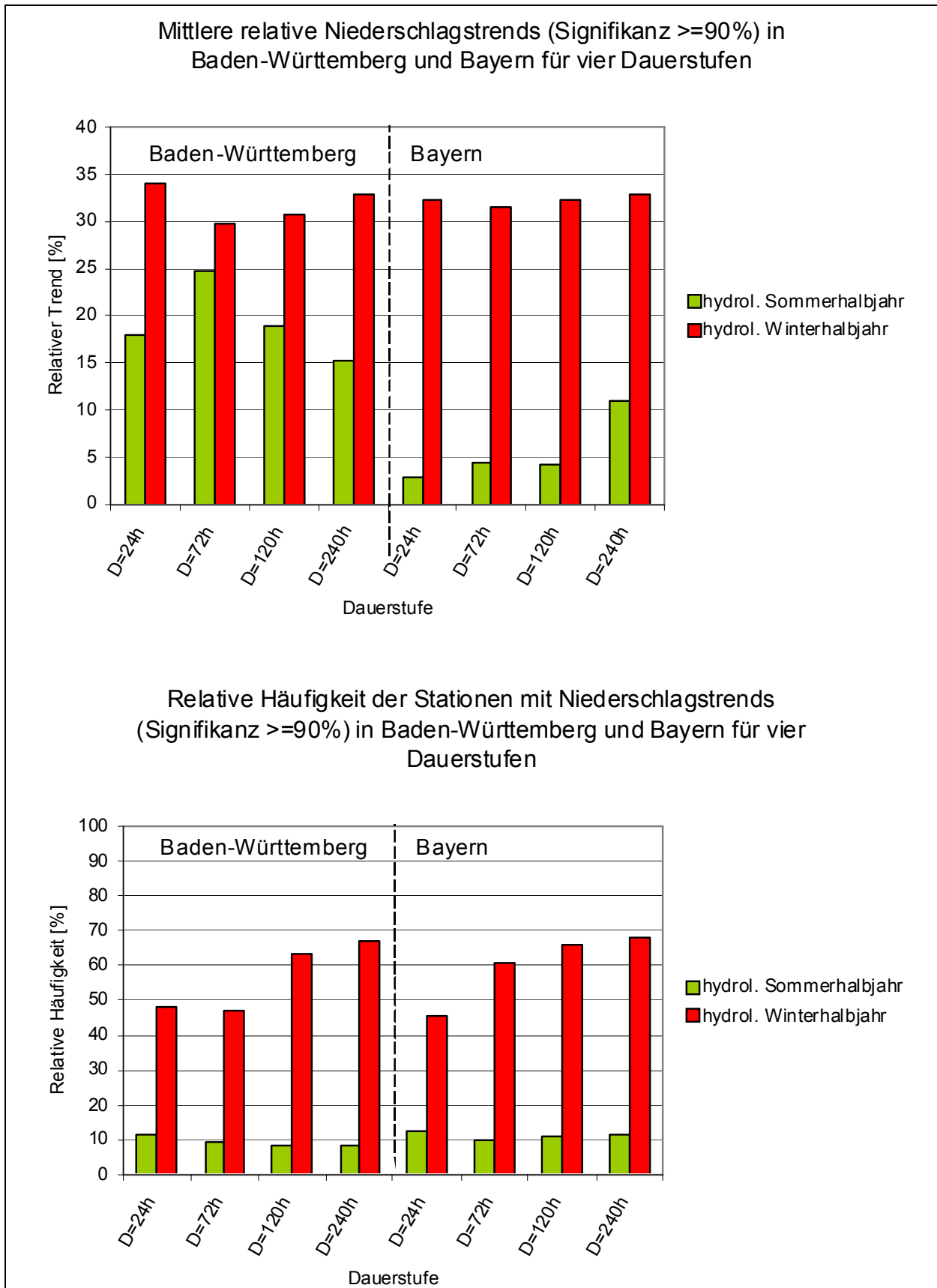


Abb. 1: Ergebnisse von Trenduntersuchungen für den Zeitraum 1931 bis 2000 (415 Stationen), oben: mittlere relative Niederschlagstrends (Signifikanz $\geq 90\%$), unten: relative Häufigkeit der Stationen mit Niederschlagstrends (Signifikanz $\geq 90\%$)

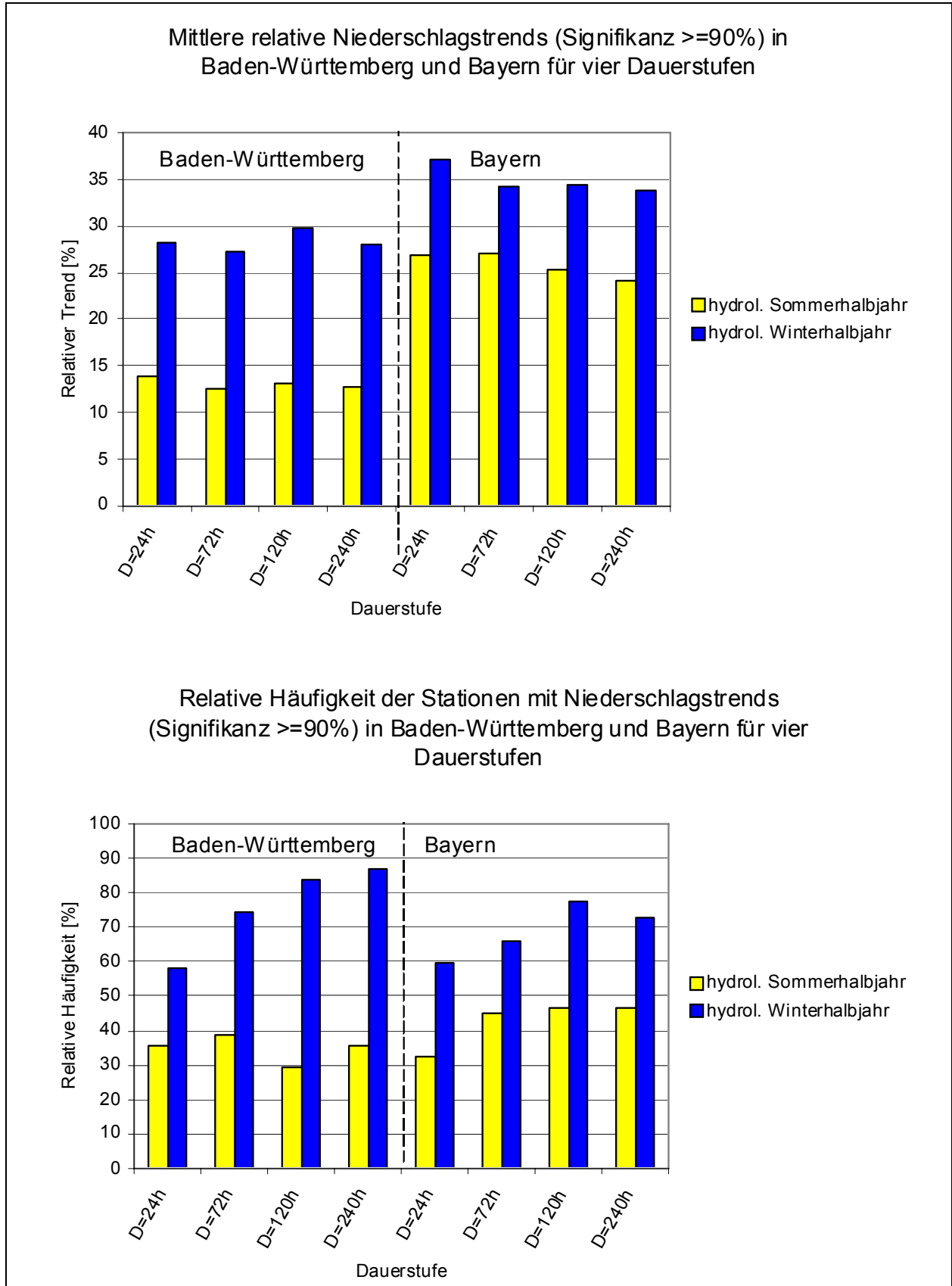


Abb. 2: Ergebnisse von Trenduntersuchungen für den Zeitraum 1901 bis 2000 (92 Stationen), oben: mittlere relative Niederschlagstrends (Signifikanz $\geq 90\%$), unten: relative Häufigkeit der Stationen mit Niederschlagstrends (Signifikanz $\geq 90\%$)



Für den Zeitraum 1931–2000 ist im hydrologischen Winterhalbjahr der mittlere relative Trend in beiden Bundesländern für die vier Dauerstufen sehr ähnlich (Abbildung 1 oben). Im hydrologischen Sommerhalbjahr erreichen die relativen Trends in Baden-Württemberg 15 – 25 % und damit ca. 50 bis 80 % der Werte im Winter. Im Freistaat Bayern bleiben diese Zunahmen im Sommer meist deutlich unter einem relativen Trendwert von < 5 % und erreichen erst für die Dauerstufe D = 240 h mehr als 10 %. Ein Blick auf die relative Häufigkeit der betroffenen Stationen (Abbildung 1 unten) zeigt im hydrologischen Winterhalbjahr in beiden Ländern eine etwa gleiche Anzahl mit einem Zuwachs mit zunehmender Niederschlagsdauer von ca. 45 % auf knapp 70 %. Im Sommerhalbjahr ist die Anzahl der betroffenen Stationen in beiden Bundesländern über alle Dauerstufen nahezu gleich, liegt aber nur bei etwa 10 %.

Die gleichen Auswertungen wurden auch für die 92 Stationen der Zeitreihe 1901–2000 durchgeführt und die Ergebnisse in Abbildung 2 dargestellt. Im hydrologischen Winterhalbjahr sind die mittleren relativen Niederschlagstrends und die Zahl der Stationen mit signifikantem Trend in beiden Bundesländern sehr ähnlich den Ergebnissen der Auswertungen für den Zeitraum 1931–2000. Eine Zunahme der Werte mit ansteigender Niederschlagsdauer ist allerdings nur noch bei der Stationsanzahl in Baden-Württemberg festzustellen. In Bayern ist nur ein Anstieg bis zur Dauerstufe D = 120 h festzustellen. Die mittleren relativen Starkniederschlagstrends liegen für den Zeitraum 1901–2000 in Bayern sogar etwas über den Werten der Zeitreihe 1931–2000. Deutliche Unterschiede zur Auswertung 1931–2000 findet man dagegen im hydrologischen Sommerhalbjahr. Der mittlere relative Trend im Zeitraum 1901–2000 ist in Bayern in der Dauerstufe D = 24 h fast 6-mal so groß wie bei den Berechnungen des Zeitraumes 1931–2000. Die Anzahl der betroffenen Stationen ist etwa 3-mal so groß. Im hydrologischen Sommerhalbjahr ist der mittlere relative Starkniederschlagstrend in Baden-Württemberg im Zeitraum 1901–2000 deutlich niedriger als im Zeitraum 1931–2000. Die Zahl der betroffenen Stationen hat sich dagegen verdreifacht.

In den Karten der räumlichen Verteilung relativer Trends erfolgt die Darstellung der Trendstärken und Trendrichtungen durch die Verwendung von symbolischen Uhren. Dabei wird das Zifferblatt zu einer mehr oder weniger ausgefüllten Kreisfläche. Die zunehmende Auffüllung der linken Seite bezieht sich auf die Klassen für den fallenden Trend, die zunehmende Auffüllung der rechten Seite bezieht sich auf die Klassen für den steigenden Trend. Für eine bessere Übersicht werden beide Trendrichtungen zusätzlich farblich unterschieden. Die rote Farbe steht für einen fallenden Trend, die blaue Farbe für einen ansteigenden Trend. Die benachbarten Klassen des schwächsten fallenden Trends (gefüllt von 11 bis 12 Uhr) und des schwächsten ansteigenden Trends (gefüllt von 00 bis 01 Uhr) weisen jeweils den geringsten Füllungsgrad auf. Das Vorliegen eines stark fallenden Trends wird durch eine vollständig (rot) ausgefüllte linke Hälfte (d. h. von 06 bis 12 Uhr) des symbolischen Zifferblatts dargestellt. Die Information zur Signifikanz der Ergebnisse wird über den Durchmesser der Kreise vermittelt. Je größer der Kreis, desto signifikanter ist der Trend.

Die räumliche Verteilung der relativen Trends der Starkniederschläge im Sommerhalbjahr ist im Zeitraum 1931–2000 (Abbildung 3 unten) sehr uneinheitlich, sowohl bezüglich der Trendrichtung als auch der Signifikanz. Stationen mit signifikant zunehmenden Trends liegen oft nahe an Stationen mit signifikant abnehmenden Trends. Größere zusammenhängende Gebiete mit zunehmenden Trends sind am Südrand des Schwarzwaldes, an der mittleren Donau sowie in Oberbayern zu finden. Fallende relative Trends treten verstärkt in Unter- und Mittelfranken, in Niederbayern und im östlichen Bayerischen Wald auf. Im Zeitraum 1901–2000 (Abbildung 3 oben) findet man an den räumlich ungleichmäßig verteilten Stationen fast ausschließlich geringe zunehmende Trends, wobei aber nur wenige signifikant sind. Geringe abnehmende Trends scheinen noch am ehesten im Südschwarzwald aufzutreten. Dieses Bild ändert sich mit wachsender Andauer der Starkniederschläge nur unwesentlich.

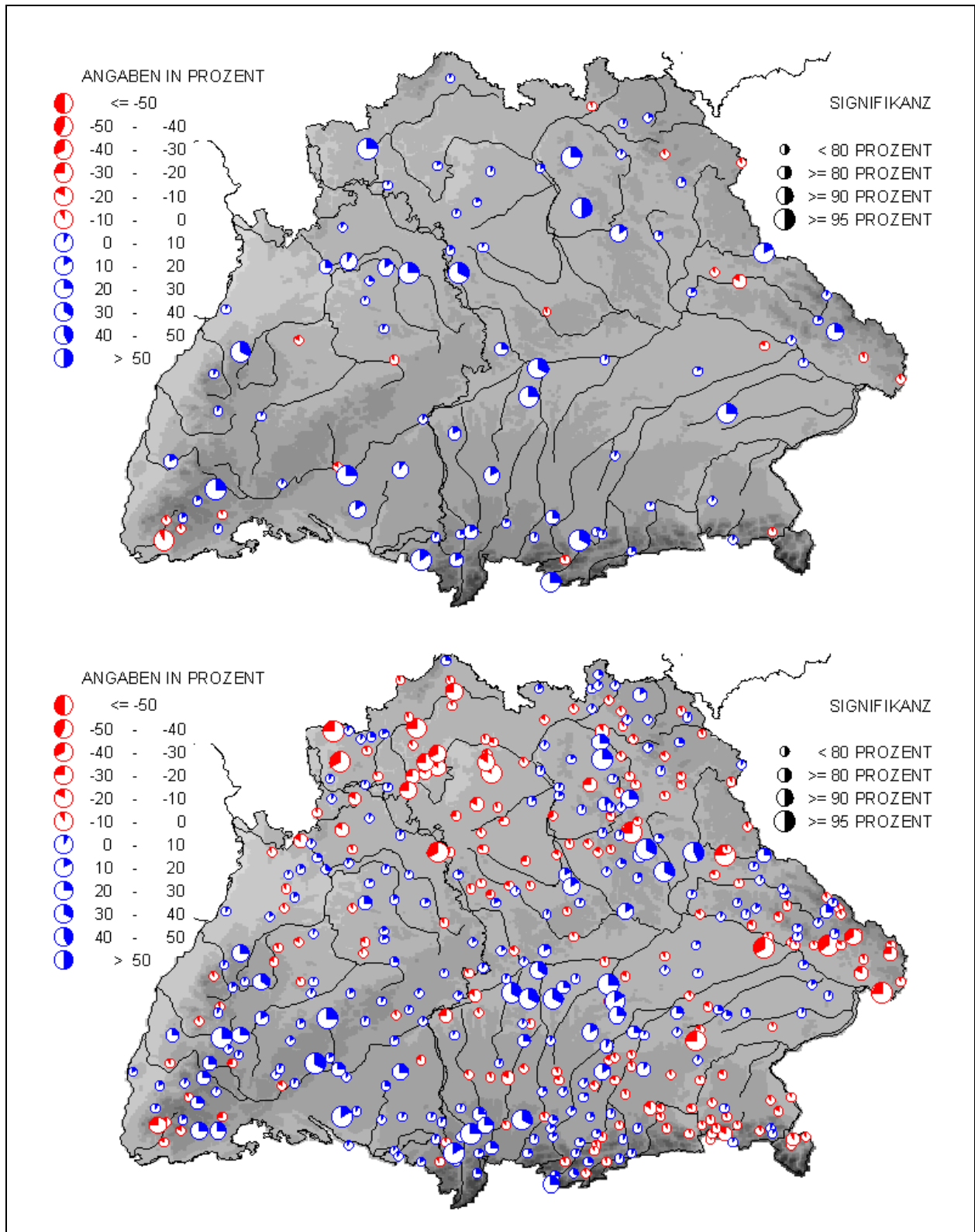


Abb. 3: Zu- und Abnahme der Starkniederschläge (in Prozent des Mittelwerts) im hydrologischen Sommerhalbjahr (oben: 1901 bis 2000 (92 Stationen), unten: 1931 bis 2000 (415 Stationen))

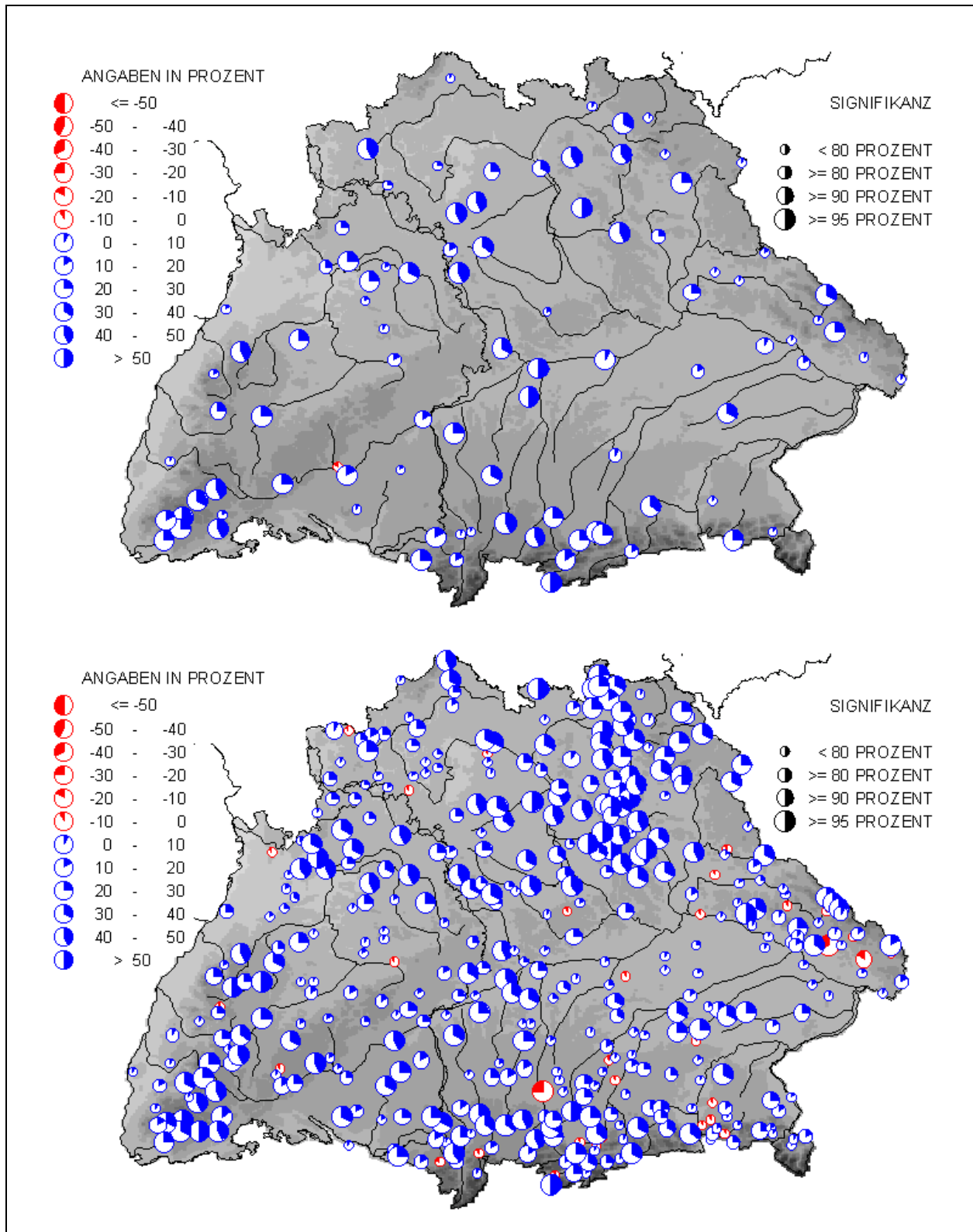


Abb. 4: Zu- und Abnahme der Starkniederschläge (in Prozent des Mittelwerts) im hydrologischen Winterhalbjahr (oben: 1901 bis 2000 (92 Stationen), unten: 1931 bis 2000 (415 Stationen))



Räumlich wesentlich einheitlicher sind die Trends dagegen im Winterhalbjahr. Die Gesamtzahl der signifikanten Fälle liegt in den Wintermonaten 1931–2000 (Abbildung 4 unten) deutlich über denen der Sommermonate (Abbildung 3 unten). Gleichzeitig ist eine markante Zunahme der Trendhinweise und ihrer Signifikanz mit der Niederschlagsdauer zu verzeichnen. Betroffen sind jetzt die ganze Westhälfte und der Norden Baden-Württembergs, ebenso Bayern (mit Ausnahme des westlichen Unterfrankens) in einem breiten Gürtel von Nürnberg bis Regensburg, Schwaben, Oberbayern und Niederbayern. Im Voralpen- und Alpenraum variieren die Signifikanzbewertungen regional, die Vorzeichen der Veränderungen bleiben jedoch überwiegend positiv. Diese Trendhinweise sind zum Teil mit sehr hohen Zunahmen der Starkniederschläge verbunden (oft $> 50\%$ vom Mittelwert), die über alle Dauerstufen auf hohem Niveau nahezu unverändert bleiben. Ein sehr ähnliches Bild liefert auch die Auswertung des Zeitraumes 1901–2000 (Abbildung 4 oben). Jeweils nur eine Station zeigt eine nichtsignifikante geringe Abnahme. Signifikanz und relative Zunahmen sind eher noch etwas höher als im Zeitraum 1931–2000.

Für beide Datenkollektive wurden die zeitlichen Änderungen der Auftrittshäufigkeiten für Tage mit Niederschlagshöhen ≥ 20 mm/d auf mögliche Trendanzeichen hin untersucht und klassifiziert. Auch bei den Auswertungen zur räumlichen Verteilung der Veränderungen finden sich wieder deutliche Unterschiede zwischen dem Sommerhalbjahr und dem Winterhalbjahr.

Für die Tage mit Niederschlagshöhen ≥ 20 mm im Sommerhalbjahr in Süddeutschland (Abbildung 5, unten) überwiegen zwar die Abnahmen leicht, am Ostrand des Schwarzwaldes und in den mittleren bis nordöstlichen Teilen Bayerns nehmen diese Starkniederschlagstage jedoch zu. Sowohl bei den Zunahmen als auch bei den Abnahmen treten signifikante Werte auf, die teilweise $> 25\%$ vom Mittelwert betragen.

Im hydrologischen Winterhalbjahr (Abbildung 6) dominiert fast im gesamten Untersuchungsgebiet die Zunahme der Tage mit Niederschlag ≥ 20 mm/d. Bei den Starkniederschlagstagen ≥ 20 mm betragen die Zunahmen fast immer 25% und mehr. Es gibt auch kaum Unterschiede in den Auswertungen der beiden Zeitspannen 1901–2000 und 1931–2000.

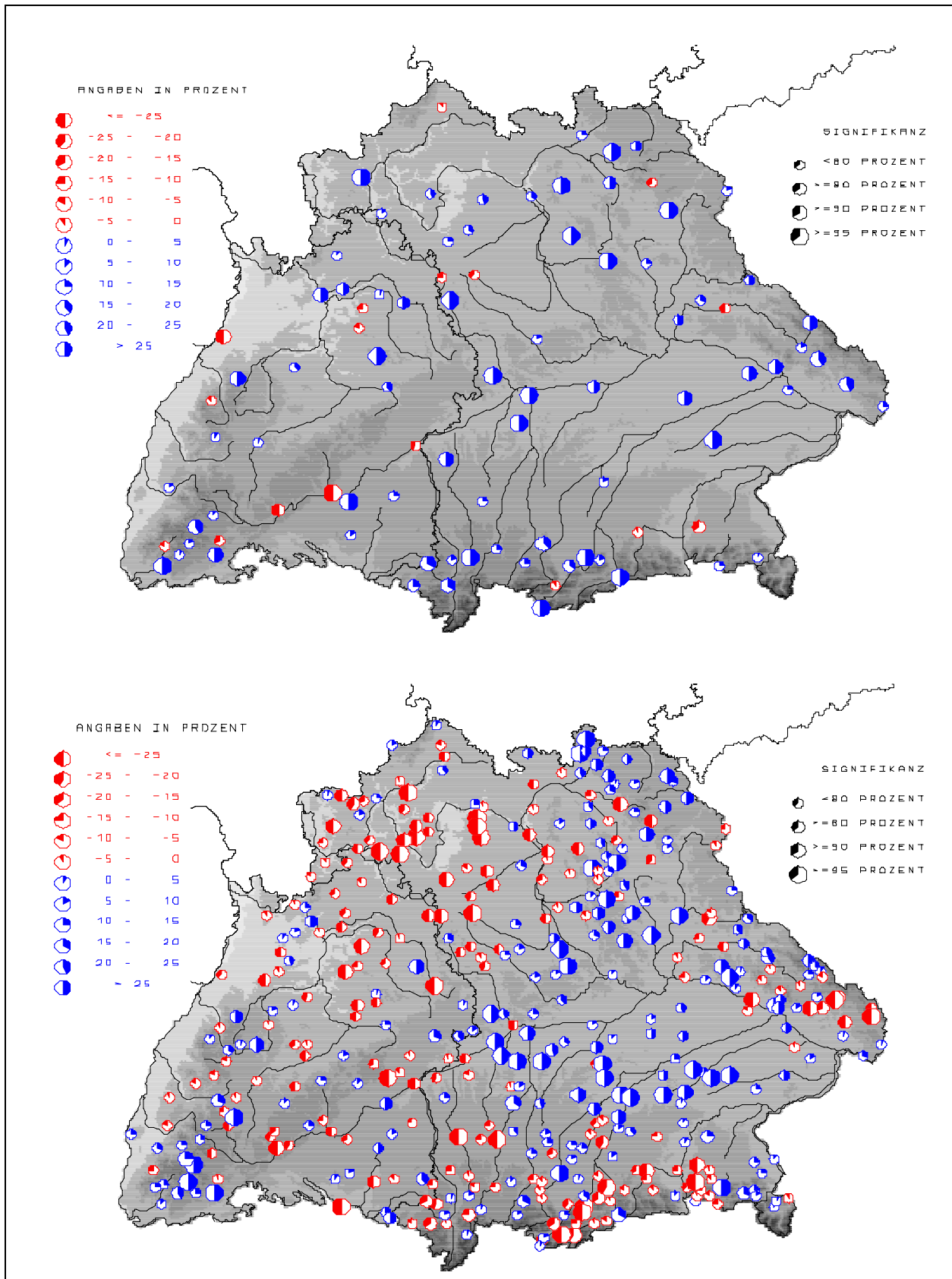


Abb. 5: Veränderung der Anzahl von Tagen mit Niederschlagshöhen ≥ 20 mm im hydrologischen Sommerhalbjahr

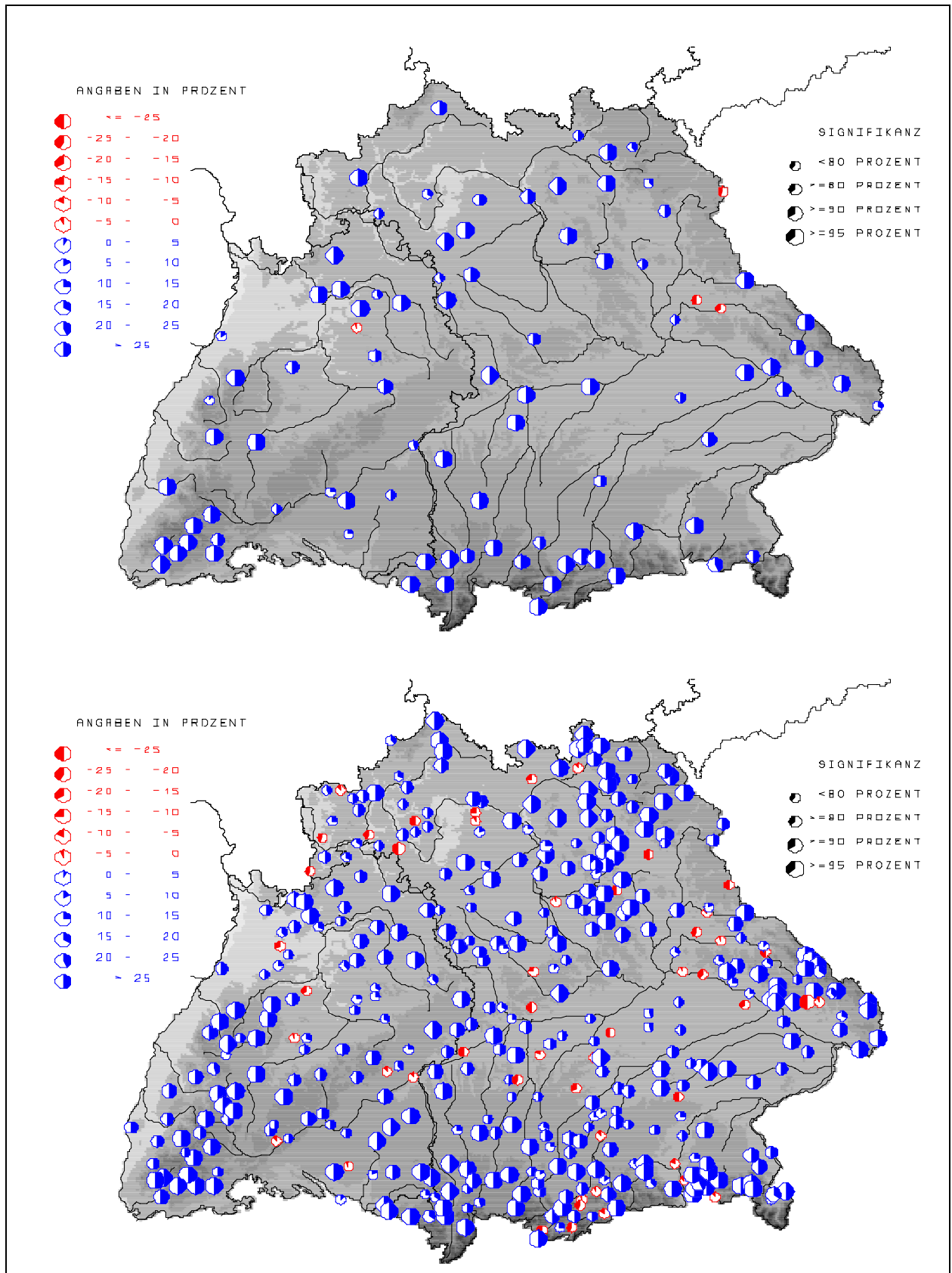


Abb. 6: Veränderung der Anzahl von Tagen mit Niederschlagshöhen ≥ 20 mm im hydrologischen Winterhalbjahr



3. Starkniederschlag bei Wiederkehrzeiten bis 100 Jahre

Mit KOSTRA-DWD-2000 (Basiszeitraum 1951 2000) werden die extremwertstatistisch ermittelten Starkniederschlagshöhen aus dem KOSTRA-Atlas (DWD/HM, 1997) ersetzt. Die Ergebnisse schreiben in Abhängigkeit von Niederschlagsdauer D (5 min bis 72 h) und Wiederkehrzeit bzw. Jährlichkeit T (0,5 a bis 100 a) konsequent die Aussagen zu KOSTRA-DWD (Basiszeitraum 1951 1980) fort. Die bisherige Methodik wurde in ihren Grundzügen beibehalten. Notwendige Änderungen in der Datenbasis sowie neue Erkenntnisse und methodische Verbesserungen sind einbezogen. Als Beispiel für KOSTRA-DWD-2000-Werte an einem Standort im Norden Baden-Württembergs sind in der Tabelle 1 punktuelle Starkniederschlagshöhen für ausgewählte D und T aufgelistet. Unter anderem geht daraus hervor, dass die KOSTRA-Starkniederschlagshöhen für $D = 24$ h im Vergleich zu KLIWA-Starkniederschlagshöhen (z. B. Werte ab 20 mm/d) höher sind. Bei Statements zu Befunden im Starkniederschlagsgeschehen darf die zugrunde liegende Definition von Starkniederschlag nicht außer Acht gelassen werden.

Tab. 1: Starkniederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD-2000 in Abhängigkeit von der Dauerstufe D und der Wiederkehrzeit T für einen Beispielstandort im Norden Baden-Württembergs (1951 bis 2000, Januar bis Dezember)

	$T = 1$ a	$T = 5$ a	$T = 20$ a	$T = 100$ a
$D = 15$ min	11,5 mm	19,6 mm	26,5 mm	34,6 mm
$D = 60$ min	17,8 mm	32,4 mm	44,9 mm	59,5 mm
$D = 12$ h	34,3 mm	52,8 mm	68,8 mm	87,3 mm
$D = 24$ h	41,5 mm	64,6 mm	84,5 mm	107,6 mm
$D = 72$ h	65,1 mm	99,7 mm	129,4 mm	164,0 mm

Entsprechend KOSTRA-DWD liefert auch KOSTRA-DWD-2000 Karten, die deutschlandweit flächendeckend die räumliche Verteilung von Starkniederschlagshöhen für Rasterfelder von 8,45 x 8,45 km in Abhängigkeit von der Dauerstufe D (18 Dauerstufen zwischen 5 min und 72 h) und der Jährlichkeit T (8 Jährlichkeiten zwischen zweimal pro Jahr und einmal in 100 Jahren) enthalten. Die bisher verfolgte Aufteilung in die Auswertung langer ($D \geq 24$ h) und kurzer ($D < 24$ h) Niederschlagsdauer - auf der Basis täglicher Niederschlagshöhen einerseits und hoch aufgelöster 5-min-Werte des Niederschlags andererseits - wird beibehalten. Die Ergebnisse sind in 52 Karten der regionalisierten Starkniederschlagshöhen für Deutschland sowohl bezüglich des Gesamtjahres als auch getrennt für Sommer- und Winterhalbjahr aufbereitet und dargestellt. Als Stützstellen haben nach wie vor die Dauerstufen $D = 15$ min, 60 min, 12 h, 24 h, 48 h, 72 h und die Jährlichkeiten $T = 1$ a, 10 a und 100 a eine besondere Bedeutung.

Im Unterschied zu KOSTRA-DWD werden bei KOSTRA-DWD-2000 nicht die stationsbezogenen Tageswerte der Niederschlagshöhe zunächst punktuell ausgewertet und anschließend regionalisiert. Datengrundlage sind vielmehr tägliche Niederschlagshöhen auf Rasterbasis (1 km x 1 km), die im DWD/HM rückwirkend seit 1951 und mittlerweile routinemäßig berechnet werden. Das hierfür verwendete REGNIE-Verfahren (Regionalisierung von Niederschlagshöhen) hat den Vorteil, lückenlose homogene Zeitreihen zu liefern. Die Informationsdichte wird von rund 3.000 Stationen auf mehr als 300.000 Rasterfelder erhöht. Eine anschließende Regionalisierung kann somit entfallen. Wie bisher enthalten aber die vorgelegten extremwertstatistischen Auswertungen für den Bezugszeitraum 1951 2000 flächendeckende Punktaussagen für Deutschland.

Als Fazit zahlreicher Detailuntersuchungen können daher die Ergebnisse der Kurzeitenauswertungen für $D = 15$ min und $D = 60$ min unverändert aus KOSTRA-DWD übernommen werden. Für die in kleineren, meist kommunalen Entwässerungssystemen relevanten kurzzeitigen Starkniederschläge ist eine Extrapolation bis zu $D = 5$ min möglich. Ein methodisch veränderter

Ansatz liefert etwas geringere Starkniederschlagshöhen für $D < 15$ min. Verändert sind die Niederschlagsverteilungen einzelner Karten – insbesondere bei Dauerstufen von $D \geq 24$ h: Winterliche Starkniederschläge nehmen insbesondere bei höheren Jährlichkeiten in einigen Regionen Deutschlands zu. Die Abbildung 7 zeigt, welche Regionen von Starkniederschlagszunahmen im Winter betroffen sind – z. B. die nördlichen Teile Baden-Württembergs und Bayerns. Sommerliche Starkniederschläge bleiben tendenziell gleich. Wo sich eine Tendenz zu mehr Trockenheit im Sommer abzeichnet, können dennoch episodisch intensive Starkniederschläge auftreten.

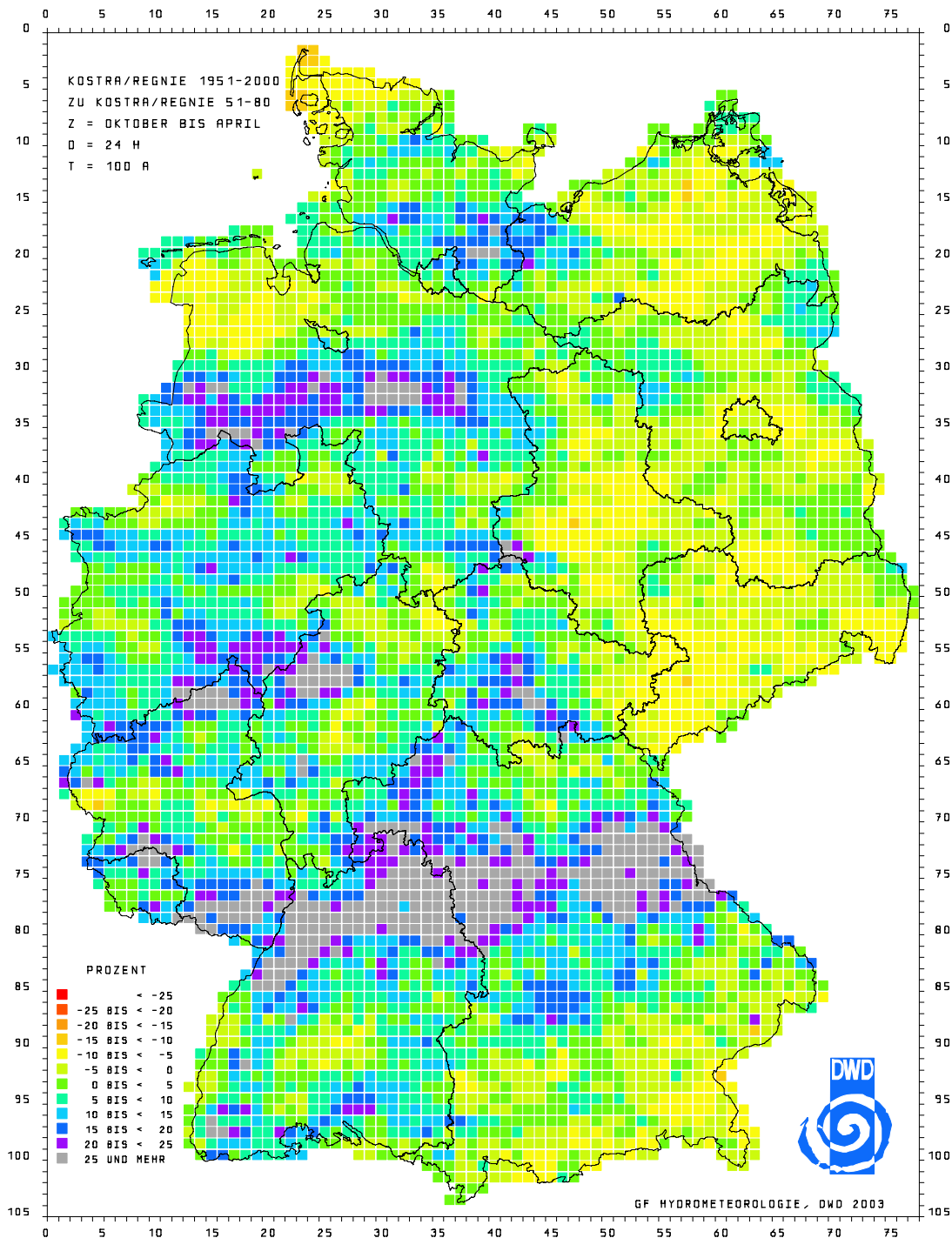


Abb. 7: Prozentuale Abweichungen der Starkniederschläge nach KOSTRA-DWD-2000 (1951 bis 2000) von den Starkniederschlagshöhen nach KOSTRA-DWD (1951 bis 1980) im Winter (Oktober bis April)



Zusätzliche Vergleichsauswertungen ergaben, dass sich gerade die Ergebnisse für den Zeitraum 1971-2000 deutlich von denen des KOSTRA-Zeitraums 1951-1980 unterscheiden. Allerdings wurden nicht für alle Dauerstufen und Wiederkehrzeiten bundesweit die - wie manchmal vermutet - größeren Starkniederschlagshöhen gefunden. Da sich die Aussagekraft der extremwertstatistischen Auswertungen mit der Länge des Bezugszeitraums erhöht, fiel die Entscheidung zu Gunsten des Zeitraums 1951-2000 als Basiszeitraum für KOSTRA-DWD-2000.

Ein Fortschreibungsbericht mit kurz gefassten Begründungen für die im Verlauf der Untersuchungen getroffenen Entscheidungen und ein Grundlagenbericht mit Aussagen zu beibehaltenen und veränderten methodischen Schritten sind - ergänzt durch beispielhaft dargestellte Ergebnisse - auf den Internet-Seiten des Deutschen Wetterdienstes (DWD/HM, 2005) abzurufen.

4. Hohe Werte des Niederschlagsdargebots bei Wiederkehrzeiten bis 100 Jahre

Die im Winter fallenden Niederschläge können in einer Schneedecke gespeichert sein und somit ggf. nicht unmittelbar abflusswirksam werden. Die Speicherung des Niederschlags in der Schneedecke über mehrere Wochen verursacht eine aus hydrologischer Sicht länger anhaltende „Trockenperiode“ mit allen Konsequenzen für das Abflussgeschehen. Die in dieser Periode gespeicherten Wasseräquivalente können dann in einer intensiven Schmelzperiode mit Schneeschmelzbeträgen (verstärkt durch Regen) von bspw. 150 mm in 15 Tagen abgebaut werden, wobei der gemessene Niederschlag in diesen 15 Tagen bspw. nur ca. 30 mm zu betragen braucht. Zum Langzeitverhalten der Schneedecke wird im Übrigen auch im Heft 6 der KLIWA-Berichte (KLIWA, 2005) Stellung genommen.

Der Schneedeckeneinfluss blieb bei den KOSTRA-Ergebnissen unberücksichtigt, da bei den Niederschlagsmesswerten als Input für die extremwertstatistischen Analysen nicht zwischen flüssigem und festen Niederschlag unterschieden wurde. Um - insbesondere in mittleren und höheren Lagen - die Extremwerte des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze quantifizieren zu können, wurde vor einigen Jahren der REWANUS-Atlas (Basiszeitraum 1961-1990) in Anlehnung an den KOSTRA-Atlas erarbeitet. Die regionalisierten REWANUS-Werte liegen in Abhängigkeit von der Dauerstufe für drei Wiederkehrzeiten (1, 10, 100 Jahre) im hydrologischen Winterhalbjahr vor. Es wurden Dauerstufen bis zu 10 Tagen untersucht, da sich der Schmelzprozess der Schneedecke bei Einzelereignissen über einen längeren Zeitraum erstreckt und dadurch der Extremwertzuwachs auch für größere Dauerstufen noch erheblich sein kann. Die für die Extremwertstatistik von Starkniederschlägen angewendeten Methoden, wie z.B. die Erstellung von partiellen Extremwertserien und die Anpassung an eine Verteilungsfunktion, sind in modifizierter Form auch für die extremwertstatistische Analyse des Niederschlagsdargebots gültig. In Anbetracht der Problematik wurden die Extremwerte nicht den Wintermonaten des Kalenderjahres, sondern dem hydrologischen Winterhalbjahr (November – April des Folgejahres) zugeordnet, um die Schneedeckenentwicklung als kontinuierlichen Prozess in die Berechnungen einbeziehen zu können. Die Abbildung 8 zeigt eine REWANUS-Karte mit Extremwerten des Niederschlagsdargebots für die Dauerstufe $D = 72$ h und die Jährlichkeit $T = 100$ a. In mittleren und höheren Lagen sind die REWANUS-Werte oftmals höher als die winterlichen KOSTRA-Werte - bei gleichen D und T . An einigen Standorten können jedoch die dazugehörigen sommerlichen KOSTRA-Werte sowohl die winterlichen KOSTRA-Werte als auch die REWANUS-Werte übertreffen.

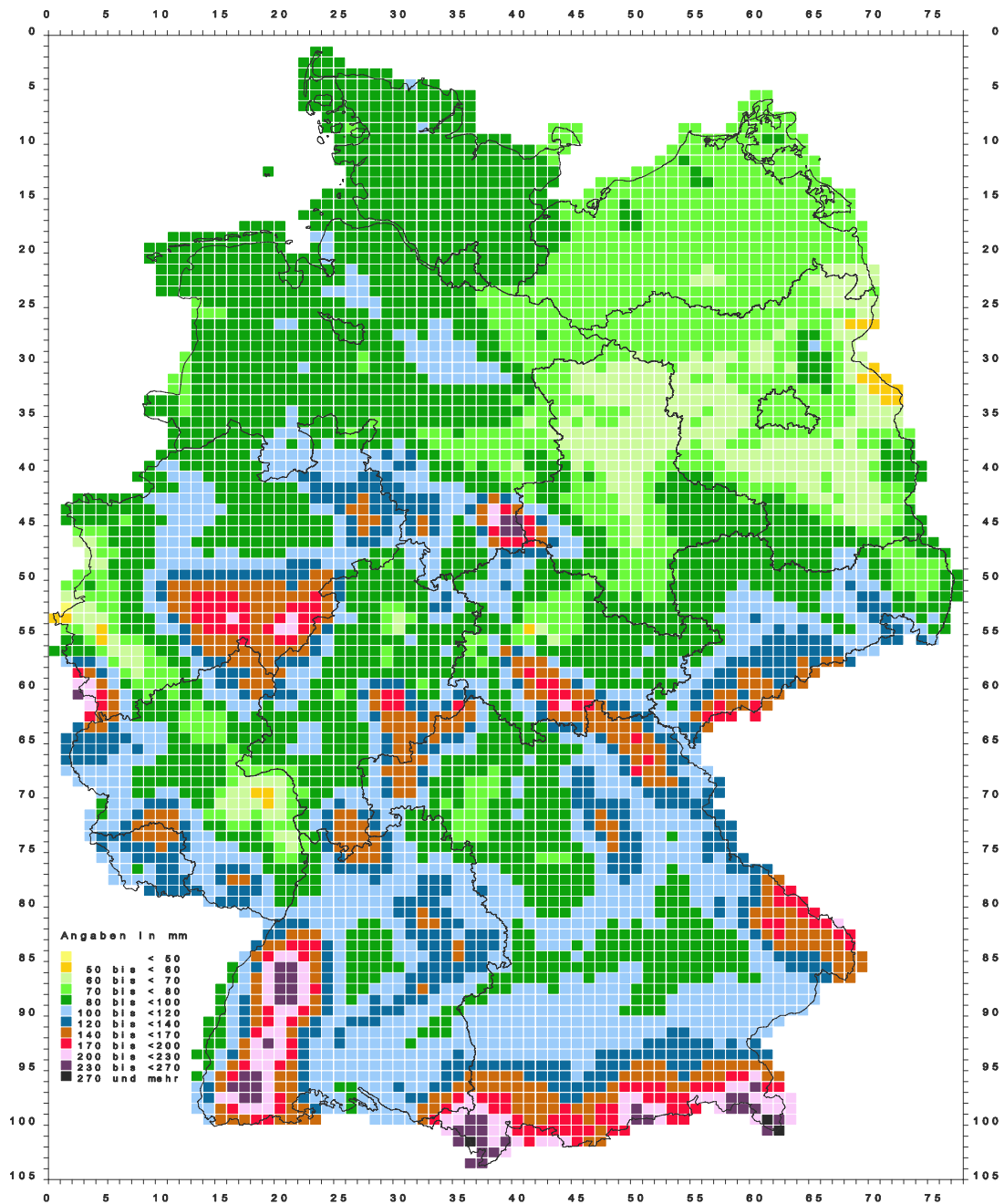


Abb. 8: Extremwerte des Niederschlagsdargebots (in mm) für die Dauer $D = 72$ h und die Wiederkehrzeit $T = 100$ a (REWANUS-Werte, 1961 bis 1990)

Welche Bedeutung das in der Schneedecke gespeicherte Wasser hat, wurde im Winter 2005/2006 deutlich. Die Abbildung 9 bietet den Vergleich der Vorhersage nur des Niederschlags (mittels Modell LMK des DWD) mit der Vorhersage des Niederschlagsdargebots aus Regen und Schneeschmelze (mittels Modell SNOW3 des DWD) am Beispiel des 28.03.2006. Besonders auffällig sind die hohen Werte des Niederschlagsdargebots im Osten Bayerns und im Süden Sachsens.

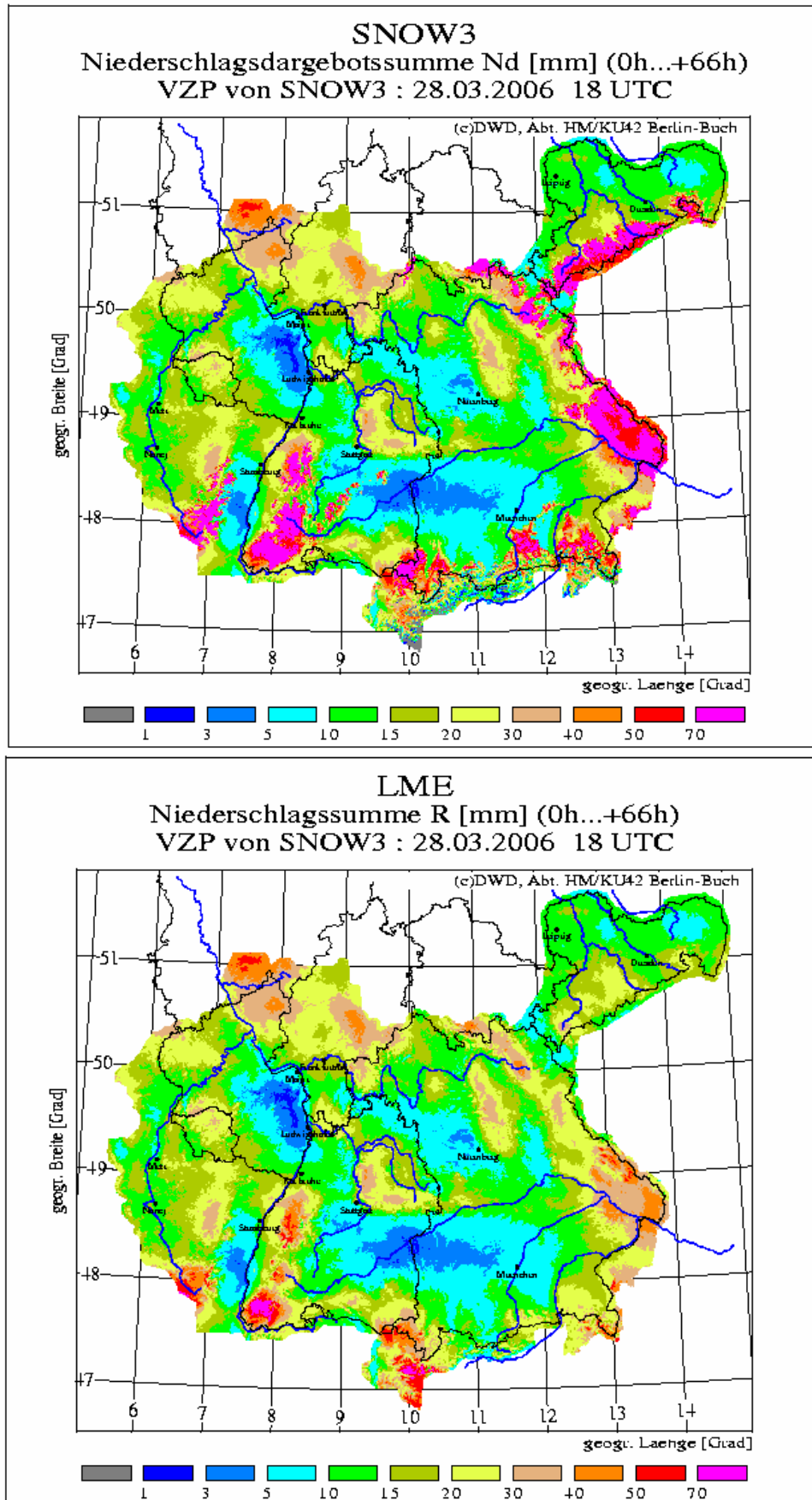


Abb. 9: Vergleich von Vorhersagen des Niederschlagsdargebots mittels SNOW3 und Vorhersagen des Niederschlags mittels LMK (28.03.2006, gleicher Vorhersagezeitpunkt)



5. Zusammenfassung

Im hydrologischen Winterhalbjahr zeigen die Starkniederschlagshöhen fast überall eine Zunahme. Regionale Schwerpunkte sind in Bayern die fränkischen Landesteile sowie Teile des Bayerischen Waldes, in Baden-Württemberg der Schwarzwald sowie der Nordosten des Landes. Im hydrologischen Sommerhalbjahr stehen Regionen mit einer Zunahme (z. B. Ostrand des Schwarzwaldes, Donautal, Teile Mittelfrankens) großen Gebieten mit einer Abnahme (z. B. Unterfranken, Südost-Bayern und Teile des Alpenvorlandes) bei insgesamt geringer Signifikanz gegenüber. Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlagshöhen oberhalb festgelegter Schwellenwerte (z. B. ≥ 20 mm/d) nimmt in Süddeutschland im hydrologischen Winterhalbjahr deutlich zu.

6. Literatur

- DWD/HM (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland (KOSTRA-DWD), Offenbach am Main, 1997, 80 S.
- DWD/HM (2005): Grundlagenbericht und Fortschreibungsbericht zu KOSTRA-DWD-2000 unter www.dwd.de/KOSTRA-DWD-2000
- KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Projekt A 1.1.4: "Flächendeckende Analyse des Langzeitverhaltens verschiedener Schneedeckenparameter in Baden-Württemberg und Bayern", KLIWA-Heft 6, 88 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.



Simulation von Hochwasserereignissen in Baden-Württemberg

Manfred Bremicker
Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Einleitung

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und das Hochwasserge-schehen zu berechnen, sind detaillierte hydrologische Modelle erforderlich. Im Rahmen der KLIWA-Untersuchungen für Baden-Württemberg wird hierfür das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) verwendet, das eine prozess- und flächendetail-lierte Simulation des terrestrischen Wasserkreislaufs in hoher zeitlicher Auflösung ermöglicht.



Abb. 1: Vernetzung der Rasterflächen im Wasserhaushaltsmodell Neckar

Für alle baden-württembergischen Flussgebiete wurden LARSIM-Modelle erstellt, die eine rasterbasierte Flächenauflösung von 1 x 1 km² aufweisen und somit das natürliche Flussnetz sowie die topographischen Gebietseigenschaften detailliert nachbilden (Abbildung 1). Innerhalb jeder einzelnen Rasterfläche berücksichtigt das Modell bis zu 16 unterschiedliche Landnutzungsklassen mit ihren spezifischen Verdunstungs- und Abflusseigenschaften.

In den Wasserhaushaltsmodellen (WHM) werden folgende hydrologische Prozesse berechnet:

- Akkumulation, Metamorphose und Schmelze von Schnee
- Pflanzenverdunstung sowie Verdunstung von Boden- und Wasserflächen
- Bodenwasserhaushalt
- Grundwasserneubildung
- Wassertransport in der Fläche (Oberflächenabfluss, Interflow und Grundwasserabfluss)
- Translation und Retention im Gerinne

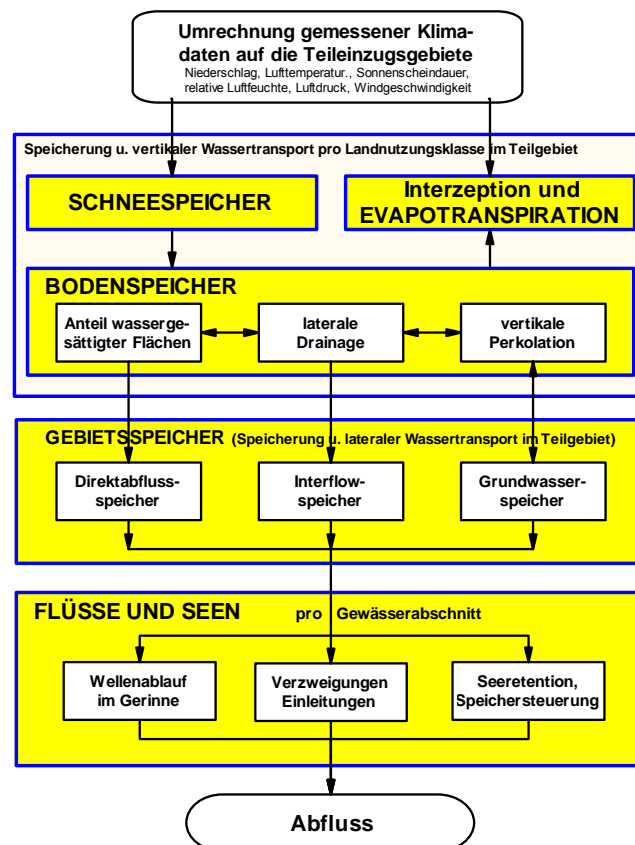


Abb. 2: Modellschema LARSIM

Eine schematische Darstellung der Modellkomponenten zeigt Abbildung 2, eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Berechnungsverfahren ist zusammengestellt bei Bremicker (2000) sowie Ludwig & Bremicker (2006).

Meteorologische Eingangsdaten für die Modelle sind Zeitreihen für Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit und Luftdruck. Berechnungsergebnisse der WHM sind Abflussganglinien für die rund 36.000 im Modell erfassten Gewässerteilstrecken bzw. Berechnungsknoten in Baden-Württemberg sowie Zeitreihen für die flächen- und landnutzungsbezogenen hydrologischen Prozesse.

Die baden-württembergischen Wasserhaushaltsmodelle wurden anhand von hydrometeorologischen Messwerten kalibriert und im Hinblick auf ihre Modellqualität verifiziert.

Abbildung 3 zeigt exemplarisch für den Pegel Wendlingen-Kla/Neckar einen Vergleich zwischen den gemessenen Abflüssen und den mit LARSIM berechneten Abflüssen im Verifizierungszeitraum des Modells.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass das Wasserhaushaltsmodell die gemessenen Abflüsse gut nachbildet (Bestimmtheitsmaß $r^2 = 0,88$). Auch in sehr unterschiedlichen hydrologischen Situationen, wie etwa bei der Niedrigwasserphase im Herbst 1992 oder beim Winterhochwasser im Dezember 1993, zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen.

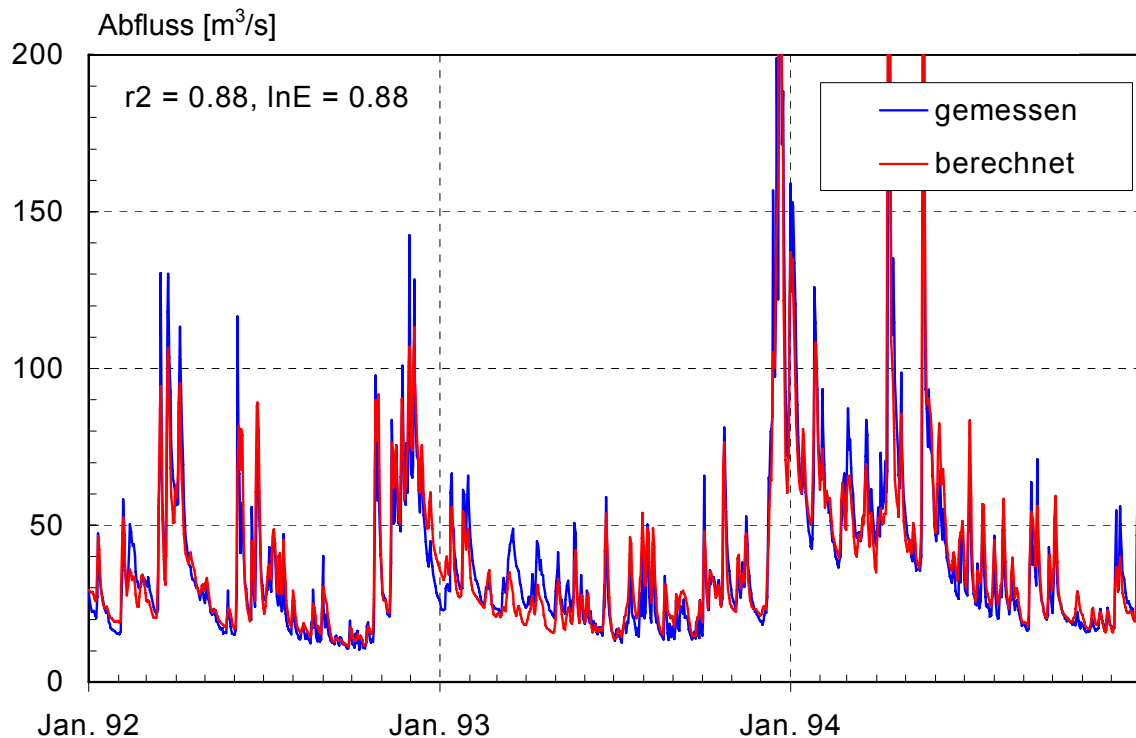


Abb. 3: Darstellung von gemessener und berechneter Abflussganglinie für den Pegel Wendlingen-Kläranlage/Neckar im Zeitraum vom 01.01.1992 bis 31.12.1994.

Die wichtigsten Einsatzgebiete der Wasserhaushaltsmodelle in Baden-Württemberg werden nachfolgend kurz aufgeführt. Der Schwerpunkt der Betrachtungen wird liegt dabei beim Einsatz der Modelle zur Simulation von Hochwasser.

2. Einsatz der Wasserhaushaltsmodelle im Rahmen des KLIWA-Vorhabens

Um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt und auf Hochwasser zu untersuchen, wurden jeweils 30 Jahre umfassende WHM-Berechnungsläufe für den Ist-Zustand des Klimas (Jahre 1971 bis 2000) sowie für Klimaszenarien (Jahre 2021 bis 2050) auf Tageswertbasis durchgeführt (Gerlinger, 2004). Als maßgebliches Klimaszenario für die Wasserhaushaltsuntersuchungen wurde nach umfangreichen Voruntersuchungen die Klimaszenarien von MeteoResearch verwendet (KLIWA, 2006).

Die Berechnungsergebnisse der WHM zeigen für das Zukunftsszenario insbesondere in den Regionen obere Donau, Neckar und Südschwarzwald markante Erhöhungen der mittleren monatlichen Hochwasser, die in einzelnen Monaten des Winterhalbjahres teilweise über 60 % gegenüber dem Ist-Zustand betragen (Abbildung 4). Bei zunehmend größeren (und damit seltener auftretenden) Hochwasserereignissen sind die Erhöhungen gegenüber dem Ist-Zustand dagegen relativ geringer (KLIWA, 2006).

Entsprechende Untersuchungen wurden auch für monatliche Niedrig- und Mittelwasserabflüsse durchgeführt (KLIWA, 2006). Dabei zeigte sich für die meisten der untersuchten Pegel in Baden-Württemberg eine Verschärfung der Niedrigwasserverhältnisse in den Sommermonaten des Klimaszenarios.

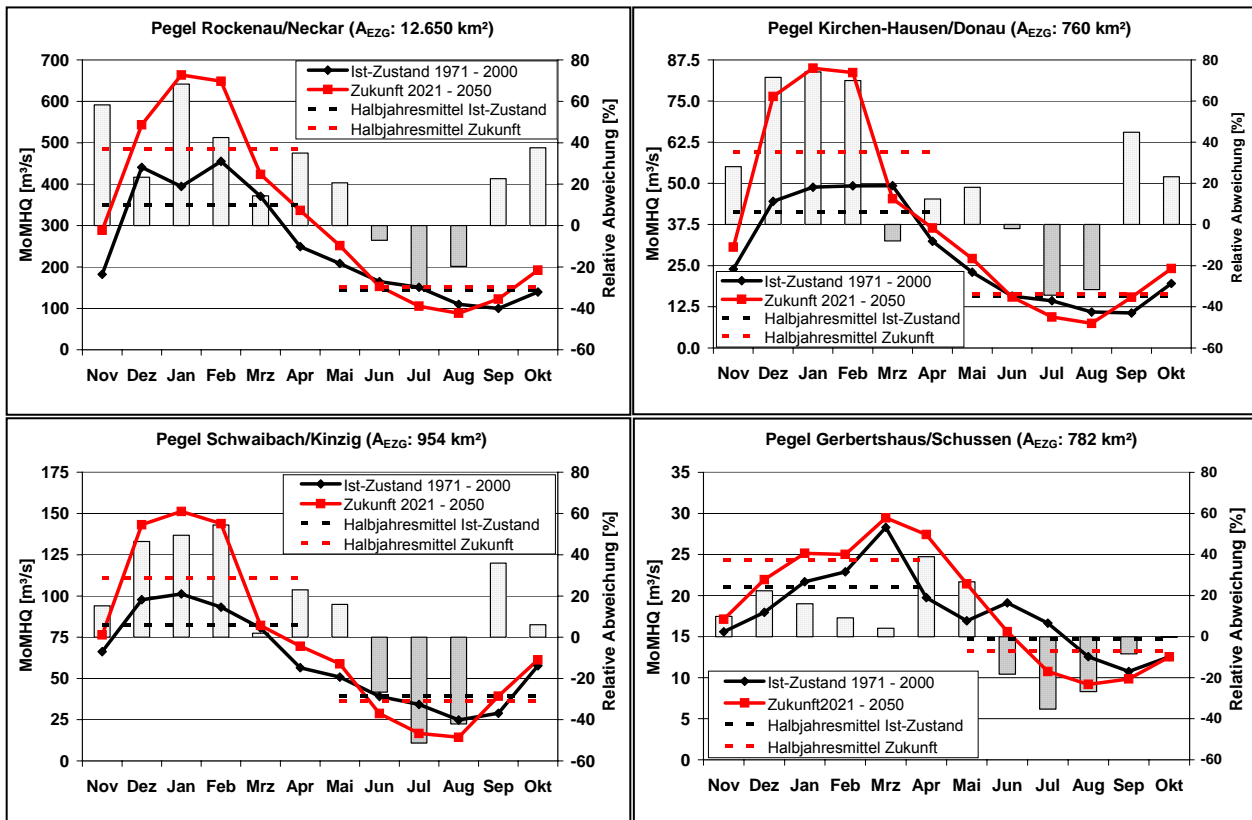


Abb. 4: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) für den Ist-Zustand und das Zukunftsszenario sowie relative Abweichungen für vier Pegel in Baden-Württemberg (Wasserhaushaltsmodell LARSIM)

3. Einsatz der Wasserhaushaltsmodelle für die operationelle Vorhersage

Die Hochwasser-Vorhersage-Zentrale der LUBW setzt die Wasserhaushaltsmodelle ein zur täglichen Wasserstands- und Abflussvorhersage für rund 90 Pegel in Baden-Württemberg. Eingangsdaten für die Berechnungen sind hydrometeorologische Messdaten (Stundenwerte) aus den online-abrufbaren Messnetzen von LUBW, DWD und Meteomedia. Als meteorologische Daten nach dem Vorhersagezeitpunkt werden die numerischen Wettervorhersagen von DWD und Meteomedia verwendet.

Die Abbildung 5 zeigt im Januar 2005 operationell erstellte Vorhersagen für den Pegel Stein/Kocher. Der Vorhersagezeitraum beträgt für diesen Pegel bei Hochwasser 9 Stunden, hinzu kommt eine Abschätzung der weiteren Entwicklung bis zur 14. Vorhersagestunde. Im Niedrig- und Mittelwasserbereich beträgt der berechnete Abschätzungszeitraum an den HVZ-Vorhersagepegeln 7 Tage. Hierdurch werden bereits mehrere Tage im Voraus Hinweise auf die weitere Niedrigwasserentwicklung gegeben bzw. Frühwarnungen im Vorfeld möglicher Hochwasser bereitgestellt (Bremicker et al., 2006).

In Abbildung 6 ist als weiteres Beispiel für den operationellen WHM-Einsatz das am 14. Februar 2006 operationell vorhergesagte Wasserdargebot für den 16. Februar dargestellt. Auf Grundlage der verfügbaren meteorologischen Vorhersagen berechnet das WHM, dass die Niederschläge in den höheren Lagen von Schwarzwald und Schwäbischer Alb noch in der vorhandenen Schneedecke gespeichert werden und daher nicht abflusswirksam sind (graue Fläche in Abbildung 6).

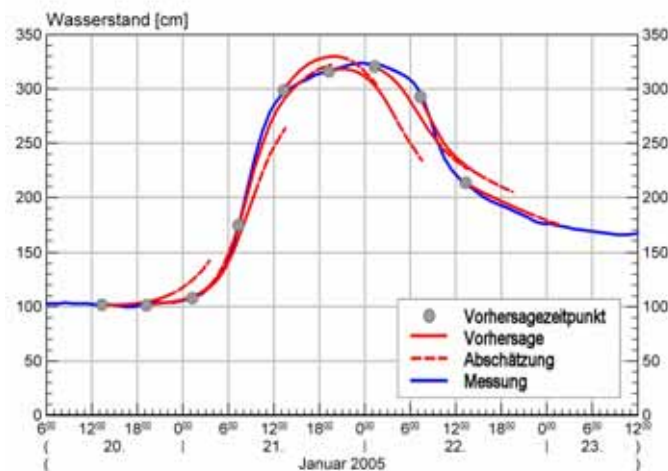


Abb. 5: Wasserstandsvorhersagen für den Pegel Stein/Kocher, Hochwasser Jan. 2005

Vor allem für die westlichen Hänge des Schwarzwalds zeigt die Vorhersage dagegen eine Überlagerung der Regenniederschläge mit einer gleichzeitigen Schneeschmelze (grüne und blaue Flächen in Abbildung 6). Diese Kombination aus Regen und Schneeschmelze führte am 16.02.2006 zu einem kleineren Hochwasser in einigen Schwarzwaldflüssen.

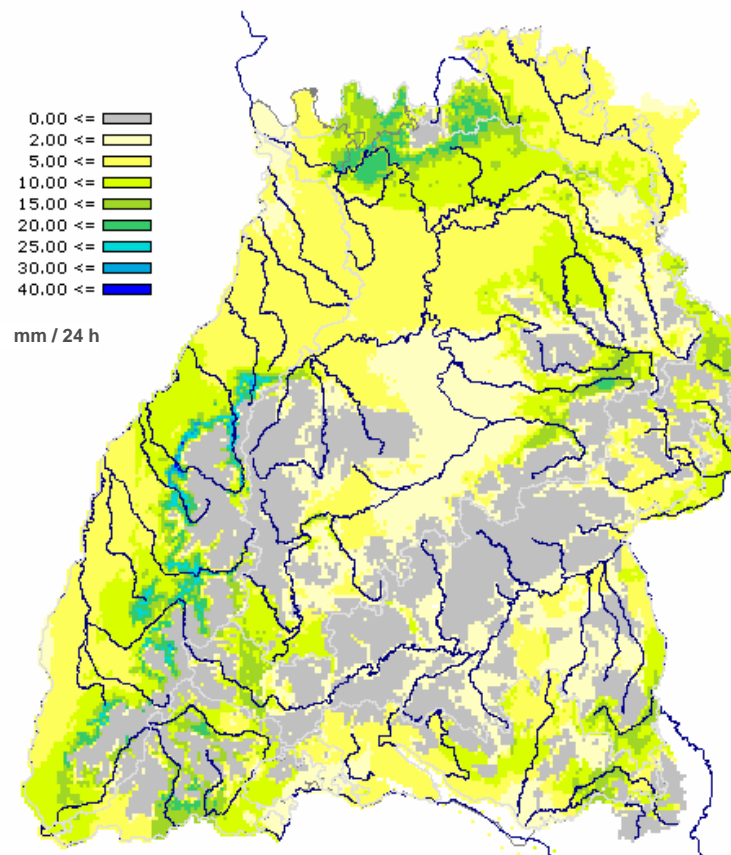


Abb. 6: LARSIM-Vorhersage für das Wasserdargebot (24h-Summe aus Schneeschmelze und Regenniederschlag) vom 14.02. für den 16.02.2006



Bei Hochwasser werden die Vorhersagen mit dem Wasserhaushaltsmodell stündlich aktualisiert, damit die jeweils aktuellen Messdaten und Wettervorhersagen in die Berechnungen eingehen. Die dabei erstellten Hochwasservorhersagen geben den wasserwirtschaftlichen Behörden, dem Katastrophenschutz sowie den betroffenen Anliegern eine Entscheidungsgrundlage für das Einleiten geeigneter Schutzmaßnahmen und leisten damit einen wesentlichen Beitrag zur Gefahrenvorbeugung und Schadensminderung (Homagk, 1999). Bei Niedrigwasser geben die Vorhersagen Entscheidungshilfen für das Niedrigwassermanagement von Behörden, Industrie, Energieversorgung sowie Landwirtschaft (Bremicker et al., 2004).

Das Wasserhaushaltsmodell für den Neckar wird darüber hinaus zur operationellen Vorhersage der Wassertemperatur eingesetzt. Hierfür werden im WHM zusätzlich die aktuellen Wassertemperaturen im Neckar und seinen Zuflüssen sowie Angaben über die Abwärmeeinleitungen aus thermischen Kraftwerken am Neckar berücksichtigt (Haag et al., 2005).

Weiterhin sind die operationellen WHM ein wesentlicher Baustein für das in Entwicklung befindliche Hochwasser-Frühwarnsystem für kleine Einzugsgebiete in Baden-Württemberg (Sieber et al., 2006).

4. Zusammenfassung und Ausblick

Wasserhaushaltsmodelle sind universell einsetzbare Instrumente für die Simulation und Vorhersage von relevanten Wasserhausgrößen wie Evapotranspiration, Bodenwasserhaushalt und Abflüssen im Gewässer. Für alle Flussgebiete in Baden-Württemberg liegen flächendeckende, räumlich hochaufgelöste WHM vor (Abbildung 7).



Abb. 7: Modellgebiete der Wasserhaushaltsmodelle in Baden-Württemberg

Diese Wasserhaushaltsmodelle werden eingesetzt, um die Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Abfluss in Baden-Württemberg zu untersuchen sowie für die operationelle Wasserstands-, Abfluss- und Wassertemperaturvorhersage.

Ein weiterer Anwendungsbereich der WHM ist die Bereitstellung von hydrologischen Berechnungsergebnissen für benachbarte Fachbereiche. Dies betrifft beispielsweise die Bereitstellung von

- Abflussdaten (untergliedert nach den Herkunftsräumen „Oberflächenabfluss“, „Interflow“ und „grundwasserbürtiger Abfluss“) für Stoffemissionsbetrachtungen und Gewässergütesimulationen
- flächen- und zeitdetaillierte Angaben zur Evapotranspiration und zur Grundwasserneubildung als Randbedingung für Grundwassermodelle
- Scheitelabflusslängsschnitte für nachgerechnete Hochwasser, als Eingangsdaten für Wasserspiegellagenberechnungen

Darüber hinaus werden die Wasserhaushaltsmodelle genutzt, um die Auswirkungen von geänderten Gebietszuständen (z.B. Landnutzungsänderungen; Reaktivierung von Überschwemmungsgebieten u.a.) auf den Wasserhaushalt und den Hochwasserabfluss zu ermitteln.

Ein weiterer möglicher Einsatzbereich der WHM ist die Planung und Optimierung wasserwirtschaftlicher Maßnahmen. So ermöglichen die in LARSIM vorhandenen Module zur Simulation von Hochwasserrückhaltebecken und zur Simulation von Talsperrensteuerungen die Bemessung dieser Systeme sowie die Erarbeitung geeigneter Steuerungsvorschriften.

5. Literatur

- Bremicker M., 2000: Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, ISSN 0945 - 1609. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg (www.hydrology.uni-freiburg.de).
- Bremicker M., Homagk P., Ludwig K., 2004: Operationelle Niedrigwasservorhersage für das Neckareinzugsgebiet, *Wasserwirtschaft* 7-8/2004, S. 40 - 46.
- Bremicker M., Homagk P., Ludwig K., 2006: Hochwasserfrühwarnung und Hochwasservorhersage in Baden-Württemberg. *Wasserwirtschaft* Heft 7-8/ 2006, S. 46 - 50.
- Gerlinger K., 2004: Simulation des Wasserhaushalts im Neckar unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. In: KLIWA-Heft 4, Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 3. und 4.5.2004 in München, S. 87 - 102 (ISBN 3-937911-16-2).
- Haag I., Luce A., Badde U., 2005: Ein operationelles Vorhersagemodell für die Wassertemperatur im Neckar. *Wasserwirtschaft* 7-8/2005, S. 45 - 51.
- Homagk P., 1999: Nichtbaulicher Personen- und Güterschutz - Hochwasservorhersage, Hochwassernachrichtendienst. Internationales Symposium Extreme Naturereignisse und Wasserwirtschaft. Informationsberichte des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, Heft 5/99, S. 225 - 239.
- KLIWA, 2006: Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. KLIWA-Heft 9 (ISBN 3-88251-305-5).
- Ludwig K., Bremicker M., 2006: The Water Balance Model LARSIM – Design, Content and Applications. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 22. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg (www.hydrology.uni-freiburg.de).
- Sieber A., Badde U., Bremicker M., 2006: Entwicklung eines Hochwasserfrühwarnsystems für kleine Einzugsgebiete. In: Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 16.06: Niederschlag-Abfluss-Modellierung - Beiträge zum RIMAX-Workshop am 10./11.04.2006, S. 95 - 100.



Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen im bayerischen Mainingebiet

Alexander Kleinhans¹ & Winfried Willems²

¹Bayerisches Landesamt für Umwelt

²Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik

1. Einleitung

Unter den Klimaforschern ist es weltweit mittlerweile unstrittig, dass die beobachtete globale Temperaturerhöhung der vergangenen Dekaden nicht nur den natürlichen Klimaeinflüssen und Klimaschwankungen zuzuschreiben, sondern auch als Folge eines anthropogen verstärkten Treibhauseffekts einzustufen ist. Um die Entwicklung des weltweiten und des regionalen Klimas einzuschätzen, rechnen die Klimaforscher Klimaszenarien mit immer leistungsfähigeren Klimamodellen. Alle wichtigen globalen Klimamodelle können mittlerweile die beobachtete Temperaturentwicklung der letzten 100 Jahre recht gut nachbilden.

Für die Zukunft berechnen sie für die entsprechenden Emissionsszenarien einen weiteren Anstieg der globalen Temperatur. Die prognostizierte globale Temperaturzunahme der kommenden 100 Jahre schwankt je nach Klimamodell und Emissionsszenario zwischen 1,4 °C und 5,8 °C (IPCC 2001). Es ist zu erwarten, dass in Folge der zur Verfügung stehenden höheren Wärmeenergie auch der globale Wasserkreislauf intensiviert wird.

Die Auswirkungen auf den regionalen Wasserhaushalt sind jedoch je nach Klimaregion unterschiedlich und durch die Auflösung der globalen Klimamodelle mit horizontalen Gitterabständen von ca. 250 km nur unscharf beschrieben. Zudem sind die Ergebnisse der Globalen Klimamodelle bezüglich der Änderungen des Niederschlags mit deutlich größeren Unsicherheiten behaftet und Aussagen zu möglichen Auswirkungen der Klimaänderung auf regionale Hochwasserbedingungen sind mit Globalen Klimamodellen nicht möglich.

Die Wasserwirtschaftsverwaltungen von Baden-Württemberg und Bayern haben deshalb zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst in den letzten Jahren umfangreiche Untersuchungen im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA (2006) mit dem Ziel durchgeführt, die regionalen Klimaänderungen und deren Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Süddeutschland abzuschätzen und Handlungsempfehlungen für die wasserwirtschaftliche Praxis zum Umgang mit den Herausforderungen des Klimawandels geben zu können. Dabei stand zunächst die Frage nach einer möglichen Hochwasserverschärfung im Vordergrund.

2. Regionale Klimamodellierung

Im Jahr 2002 wurde durch die KLIWA Partner für die Gebiete von Bayern und Baden-Württemberg die Erstellung von regionalen Klimaszenarien beauftragt. Zur Anwendung kamen ein statistisches Verfahren (Modell STAR des Potsdam-Instituts für Klimafolgenforschung), ein statistisch-dynamisches Verfahren (Modell WETTREG der Fa. MeteoResearch) und ein dynamisches Verfahren (Modell REMO des Max-Planck-Instituts für Meteorologie), nachdem in einer Vorstudie durch SCHÄR et. al. (2000 und 2001) aufgezeigt worden war, dass es derzeit kein optimales Verfahren zum regionalen Downscaling gibt.

Nach einer auf methodischen, klimatologischen und hydrologischen Kriterien beruhenden Bewertung der verschiedenen regionalen Klimamodelle wurde das statistisch-dynamische Verfahren für die weiteren hier vorgestellten Untersuchungen ausgewählt. Dieses Downscaling-Verfahren nutzt die statistischen Beziehungen zwischen großräumigen Druckfeldern ("Wetterlagen") und lokalen Wetterstationsdaten. Für die hydrologischen Fragestellungen erscheint dieser Modellierungsansatz derzeit am besten geeignet (KLIWA 2006).



3. Ergebnisse der Regionalen Klimamodellierung für das Mainneinzugsgebiet

Das WETTREG-Modell berechnet stationsbasiert für das Emissionsszenario B2 des IPCC für 537 Niederschlags- und 67 Klimastationen in Süddeutschland verschiedene Klimagrößen für einen Ist-Zeitraum von 1971-2000 und für 10 Simulationsläufe des Zukunftshorizonts von 2021-2050 (ENKE 2003). Nachfolgend werden die Änderungen der für den Wasserhaushalt bedeutsamen Klimaparameter Niederschlag und Temperatur, bezogen auf das Mainneinzugsgebiet, dargestellt.

3.1 Temperatur

Das Trendverhalten der Lufttemperatur in der Messperiode 1931/2000 ist im Mainneinzugsgebiet durch eine signifikante regionenspezifische Zunahme der Jahresmittel von 0,6 °C bis 1,0 °C gekennzeichnet (KLIWA 2005). Das WETTREG Szenario zeigt, dass zukünftig (bis 2050) in Bayern die Temperaturen noch weiter deutlich um ca. 1,7 °C zunehmen. Die Zunahmen fallen im hydrologischen Winterhalbjahr mit ca. 2,1 °C stärker aus als im hydrologischen Sommerhalbjahr mit ca. 1,4 °C.

Diese erwartete Temperaturzunahme im Winter ist von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für das zukünftig zu erwartende Abflussregime sein kann. So endet die Schneeschmelze im KLIWA-Untersuchungsgebiet im Zukunftsszenario zwischen 10 Tagen in Hochlagen und 20 Tagen in Tieflagen früher. Die durchschnittliche frostfreie Zeit verlängert sich um ca. 20 Tage. In Verbindung mit der flächendeckend starken Zunahme der Lufttemperatur im Winterhalbjahr ist daher mit einer Erhöhung des Anteils flüssiger Niederschläge zu rechnen (KLIWA 2006).

3.2 Niederschlag

Das WETTREG-B2 Szenario berechnet für die Periode 2021-2050 überwiegend Zunahmen der mittleren Jahresniederschläge. Bemerkenswert ist, dass die Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr (Abbildung 1) fast flächendeckend etwas abnehmen und sich daher die simulierte Zunahme des Jahresniederschlags beinahe ausschließlich auf die Erhöhung im hydrologischen Winterhalbjahr (Abbildung 2) zurückführen lässt. Betrachtet man die regionalen Unterschiede der Niederschlagsveränderungen, sind im Maingebiet die höchsten relativen und absoluten Zunahmen im Gebiet der Rhön vorzufinden. Insgesamt ergibt sich ein deutlicher West-Ost-Gradient mit höheren Niederschlagszunahmen in den westlichen Hochlagen des Mainneinzugsgebietes.

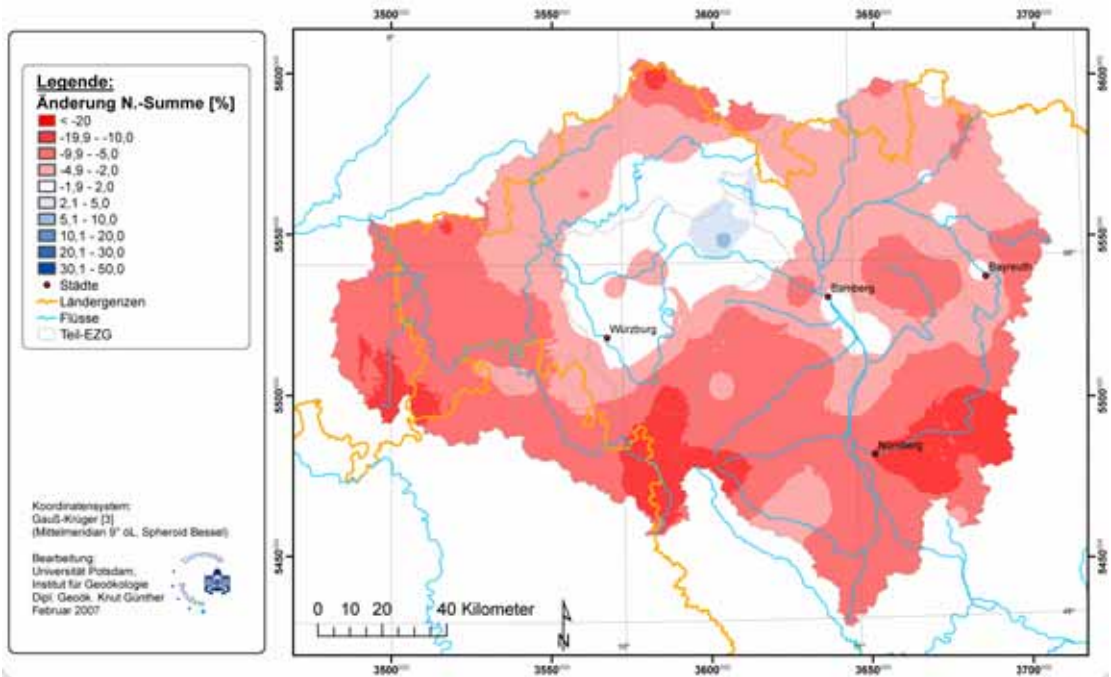


Abb. 1: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr zwischen Zukunftsszenario (mittlere Realisation) und Ist-Zustand (BRONSTERT 2006)

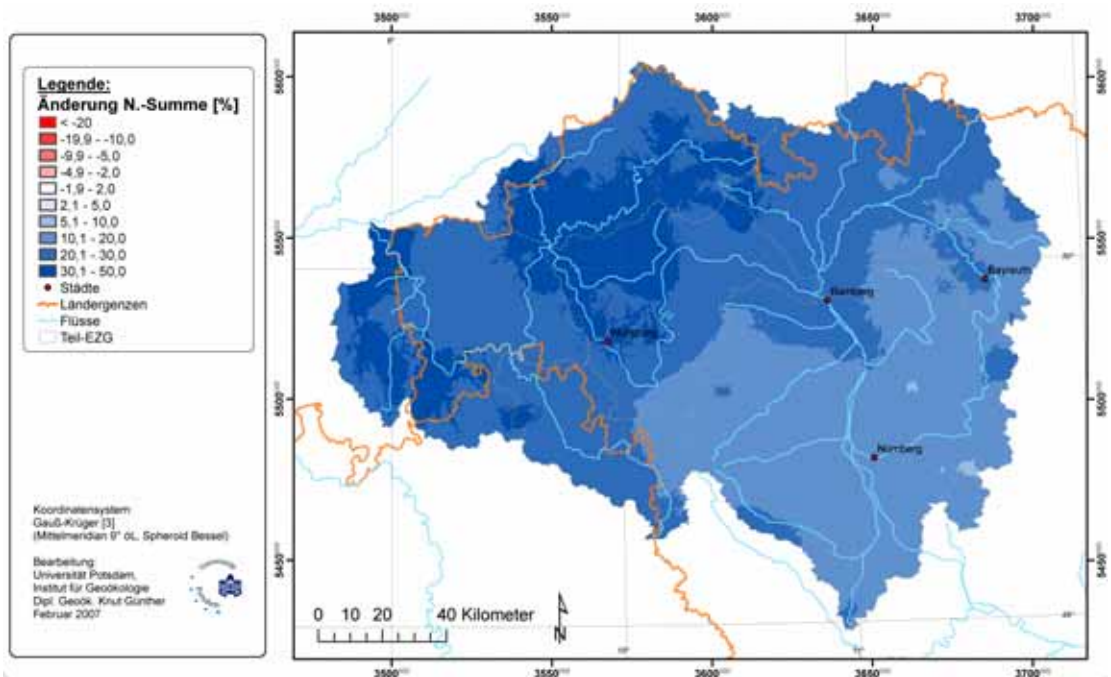


Abb. 2: Relative Änderung der Mittelwerte der Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr zwischen Zukunftsszenario (mittlere Realisation) und Ist-Zustand (BRONSTERT 2006)



4. Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltsmodellen

Um Aussagen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt (z.B. Abflüsse in den Gewässern) ableiten zu können, werden die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien als Eingangsgrößen für die anhand von Beobachtungsdaten kalibrierten und validierten Wasserhaushaltsmodelle (WHM) verwendet (GERLINGER 2004). Abbildung 3 erläutert das schematische Vorgehen zur Auswertung der Abflüsse und der verwendeten Vergleichsgrößen. In Bayern liegen bisher Wasserhaushaltsmodelle auf Basis des Modellsystems ASGi (Modellkern WaSiM-ETH) flächendeckend im 1-km-Raster für die Flussgebiete nördlich der Donau vor.

Die Auswertung der Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen konzentrieren sich zunächst auf die mögliche Veränderung des Abflussgeschehens in der Zukunft, wobei die Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse im Blickfeld sind. Aus den verschiedenen Zeitreihen der gemessenen und modellierten Abflüsse (Ist, Kontrolle und Zukunft) wurden einige hochwasserrelevante Kennzahlen (MHQ, MoMHQ) extrahiert und statistisch ausgewertet. Die Jahresserien der Hochwasserabflüsse (Jahreswerte, Halbjahreswerte) aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden darüber hinaus mit Methoden der Extremwertstatistik analysiert.

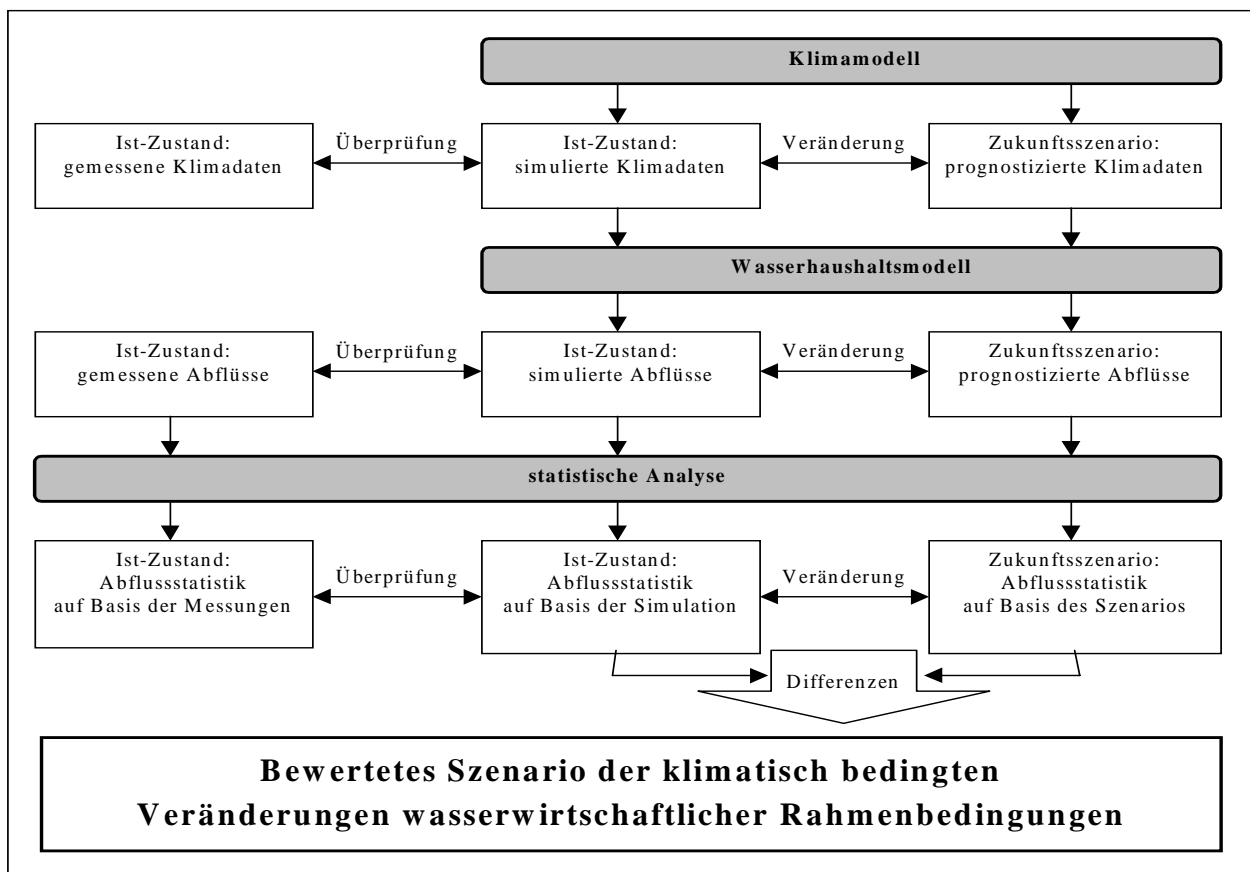


Abb. 3: Vorgehensweise bei der Verwendung von Klimaszenarien für Wasserhaushalts-simulationen mit abflussbezogener Auswertung (GERLINGER 2004)

5. Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulation mit Klimaszenario

Die Wasserhaushaltsmodellierung unter Verwendung der Szenariodaten wurde für die Teilgebiete des bayerischen Mains durchgeführt. Insgesamt liegen für den Main derzeit Simulationsergebnisse für über 50 Pegel mit einer Einzugsgebietsgröße zwischen 76 km² und 21.491 km² vor. Die statistische Auswertung der Abflusszeitreihen erfolgte für den Szenario- Ist-Zustand (1971-2000) und die zehn Simulationen des Zukunfts-Zustands (2021-2050).

Anhand von sechs beispielhaft ausgewählten Pegeleinzugsgebieten unterschiedlicher Lage und Größe wird exemplarisch die mögliche zukünftige Entwicklung der Mittleren Hochwasserabflüsse und der Extremwerte im Vergleich zu einem Referenzzustand vorgestellt.

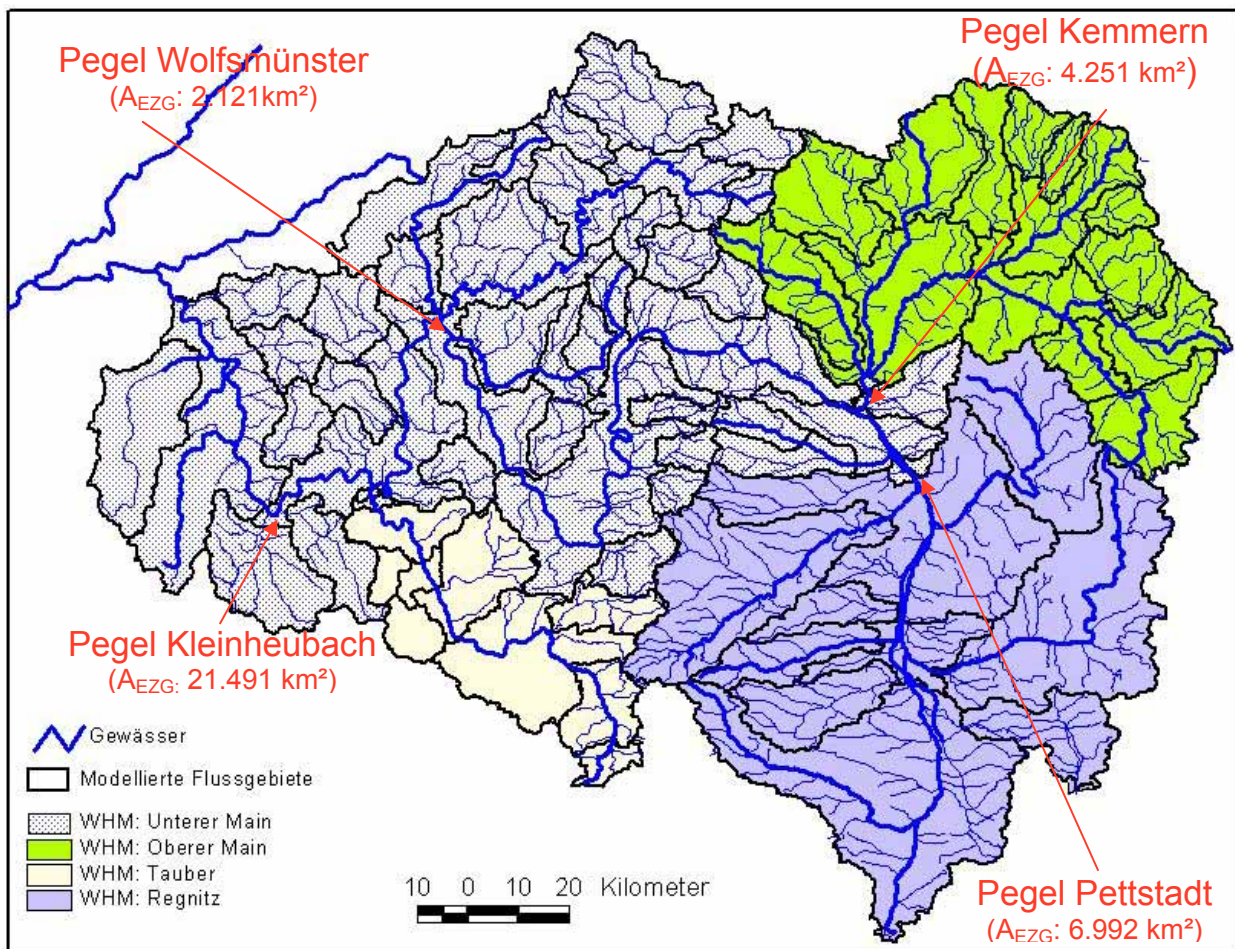


Abb. 4: Wasserhaushaltsmodelle mit dem Modellsystem ASGi für das Main Einzugsgebiet



5.1 Mittlere Hochwasserabflüsse

Die Jahresmittelwerte der monatlichen Hochwasserabflüsse des WETTREG-B2 Szenarios nehmen bezogen auf das hydrologische Jahr zwischen 5 und 39 Prozent zu. Die Erhöhungen sind insbesondere auf die angestiegenen Werte im Winterhalbjahr zurückzuführen. Im Sommerhalbjahr sind die Veränderungen geringer und vereinzelt werden sogar Abnahmen ermittelt. Die Halbjahresmittel der MoMHQ erhöhen sich im Winter des Zukunftsszenarios gegenüber dem Ist-Zustand zwischen rund 11 und 43 % (Tabelle 1).

Tab. 1: Relative Änderung der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse (MoMHQ) zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand für 6 exemplarische Pegel des Main-Einzugsgebiets

Pegel	AE [km ²]	Kalender-jahr	Hydrol. Sommer (Mai – Okt.)	Hydrol. Winter (Nov. – April)
Kleinheubach/Main	21.491	+20,4 %	+7,5%	+25,9 %
Stockstadt/Gersprenz	496	+25,5 %	+5,7 %	+39,2 %
Wolfsmünster/Fränk.Saale	2121	+38,6 %	+25,9 %	+43,2 %
Gemünden/Sinn	620	+35,5 %	+26,9 %	+38,4 %
Kemmern/Oberer Main	4251	+11,6 %	+5,1 %	+18,1 %
Pettstadt/Regnitz	6992	+4,8 %	-4,8 %	+11,4 %

Die prozentualen Veränderungen der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse zeigen insbesondere in den Wintermonaten (beispielsweise Februar und März) markante Erhöhungen (Abbildung 5). In einzelnen Monaten des Winterhalbjahrs werden an verschiedenen Pegeln Zunahmen um bis zu 80 % ermittelt, wohingegen sich in den Sommermonaten in vielen Einzugsgebieten Abnahmen berechnen.

Insgesamt lassen jedoch die Simulationsrechnungen eine Verschärfung der zukünftigen mittleren Hochwassersituation im Maingebiet erwarten, wobei sich - wie bereits aus der Niederschlagsanalyse ermittelt - auch hier ein West-Ost Gradient mit geringeren Veränderungen im Osten des Main Einzugsgebiets (Oberer Main, Regnitz) ergibt.

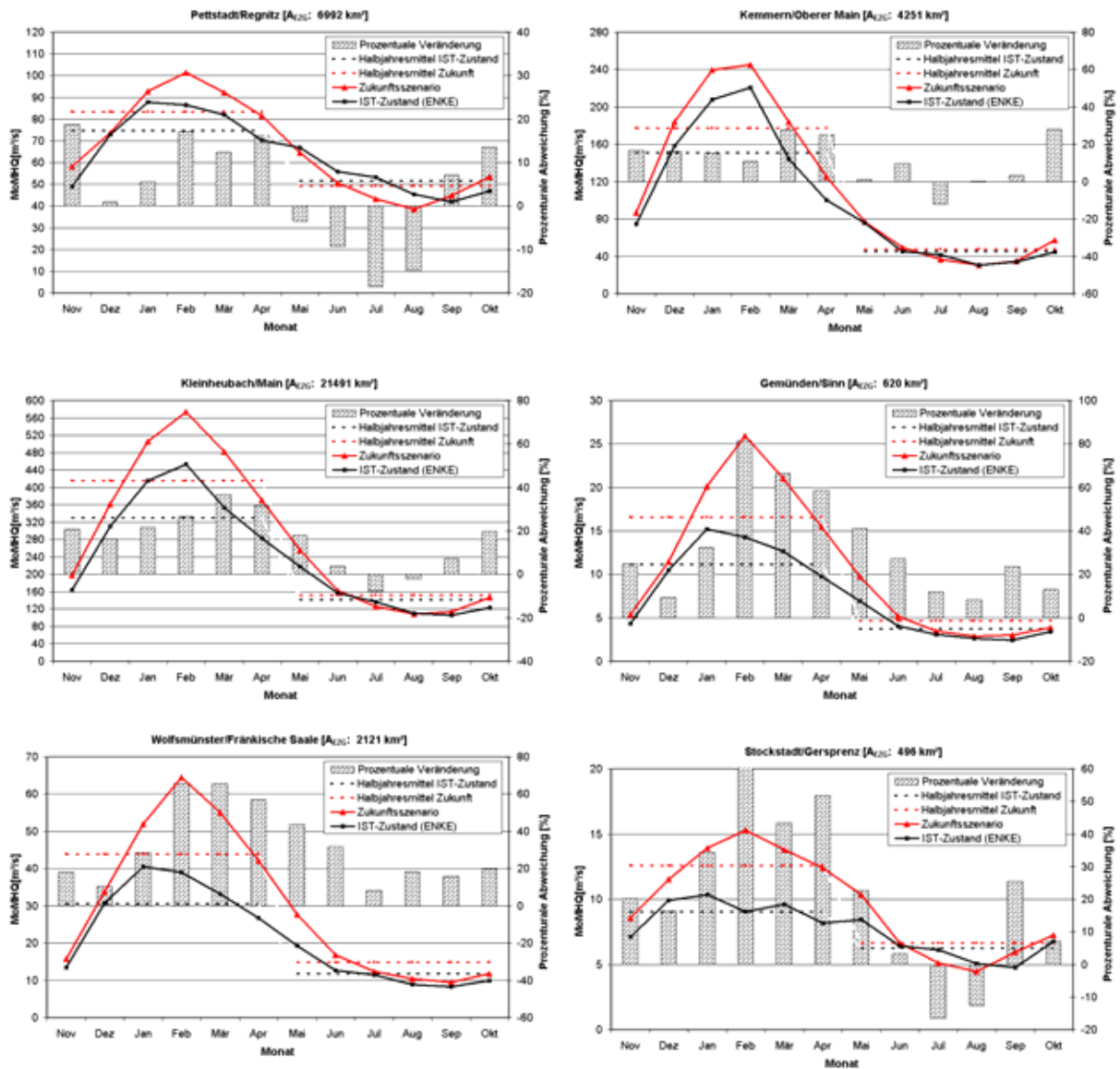


Abb. 5: Monatliche mittlere Hochwasserabflüsse (MoMHQ) und Halbjahresmittelwerte des Szenario-Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios mit prozentualer monatlicher Abweichung.

5.2 Extremwerte

Neben dem Änderungsverhalten der mittleren Hochwasserabflüsse stehen jedoch Aussagen zur Entwicklung von Extremwerten im Vordergrund, da diese seltenen Ereignisse für die Wasserwirtschaft von großer Bedeutung sind. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten hydrologischer Extremwerte können prinzipiell über die Extremwertanalyse der modellierten Szenarioabflüsse abgeleitet werden. Die Aussagekraft der Ergebnisse ist jedoch aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in der Modellkette (Globales Klimamodell - Regionale Klimamodelle - Wasserhausmodellierung - statistische Auswertung) eingeschränkt.

Abbildung 6 zeigt den Vergleich der Boxplots von Hochwasserjahresserien für 6 Pegel im Main-Einzugsgebiet für den heutigen-Zustand (Abflusssimulation mit gemessenen Klimaparametern - IstR), sowie die Szenariozustände für 1971-2000 (IstE) und 2021-2050 (Sz) unter Berücksichtigung aller 10 Simulationsläufe. Die rechten und linken Whiskers (äußere senkrechte Linien)



markieren dabei Minimum und Maximum der jeweiligen Jahresserie. Zusätzlich ist der Median, das 25 %-Quantil und das 75 %-Quantil dargestellt. Die Höhe der Boxplots ist proportional zum jeweils zugrundeliegenden Stichprobenumfang (also 29 Werte bei IstE und IstR und 570 Werte bei Sz). Die Boxplotdarstellungen zeigen für die Mehrzahl der im Main-Einzugsgebiet untersuchten Pegel eine Erhöhung der Hochwasserquantile des Szenariozustandes (0,25, 0,5 und 0,75) im Vergleich zum Szenario Ist-Zustand. Es wird aber auch deutlich, dass die höchsten Werte nicht zwingend im Zukunftsklima auftreten und die Mediane des Ist-Zustands für einige Pegel vom Real-Zustand abweichen. Für die Mehrzahl der Pegel berechnet sich jedoch eine Erhöhung der Hochwasserabflüsse des Zukunftsszenarios im Vergleich zum Ist-Szenario für kleinere Jährlichkeiten.

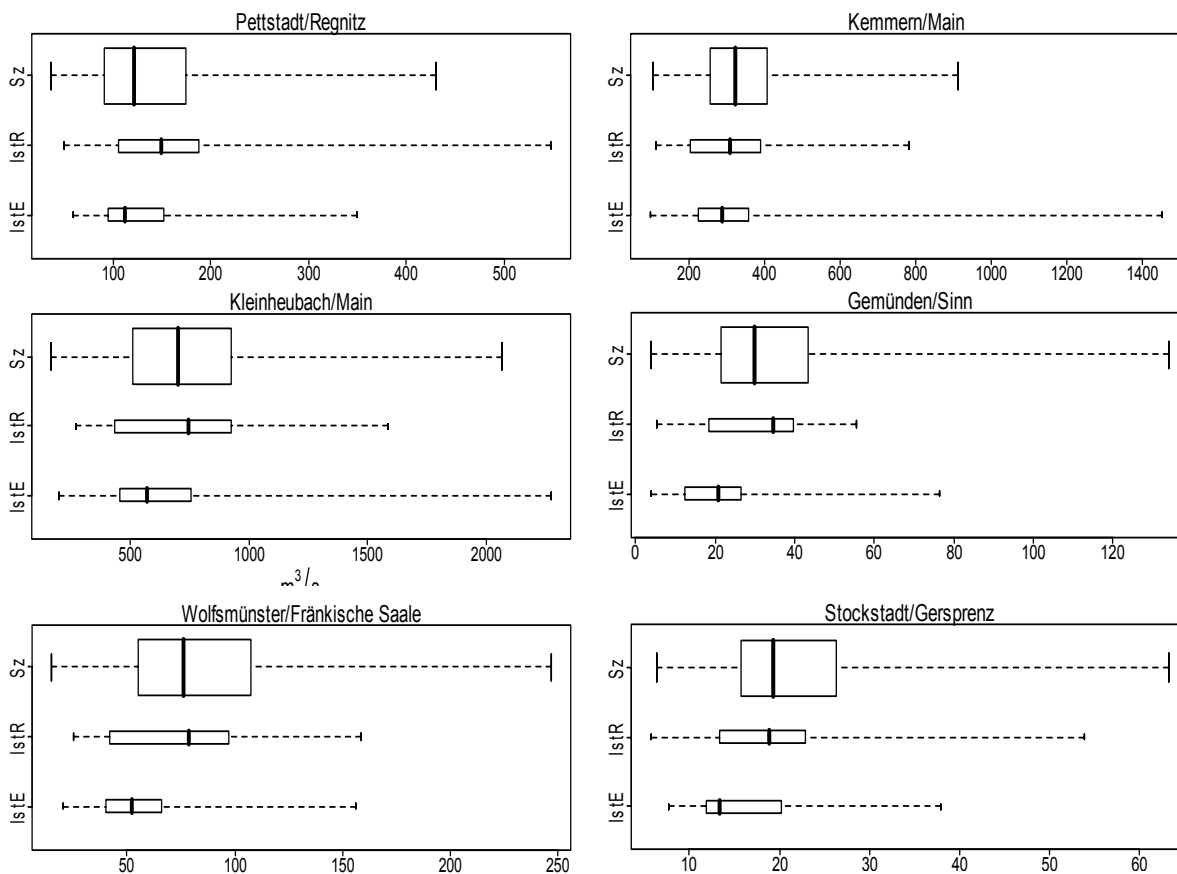


Abb. 6: Boxplots der Hochwasserjahresserien verschiedener Pegel des Main-Einzugsgebiets für IST-REAL (1971-2000), Szenario-Ist (1971-2000) und Szenario-Zukunft (2021-2050 – 10 Realisationen); (aus WILLEMS 2006)

5.3 Berechnung von Klimaänderungsfaktoren aus den Ergebnissen der Szenariomodellierung

Zur Analyse der möglichen Veränderungen infolge des Klimawandels im Bereich der großen Hochwasserereignisse wurden für jeden der ca. 50 im Main-Einzugsgebiet untersuchten Pegel für die verschiedenen Jahresserien (IST-REAL, Szenario-Ist und Szenario-Zukunft) die Abflüsse bei unterschiedlichen Jährlichkeiten T_n ($n = 2, 10, 20, 50, 100$) bestimmt.

Für diese Untersuchung wurde stets mit der Verallgemeinerten Extremwertverteilung (GEV) gearbeitet. Die GEV ist über folgende Verteilungsfunktion definiert:

$$F(x; \mu, \sigma, \gamma) = \begin{cases} \exp\{-[1 + \gamma(x + \mu) / \sigma]^{-1/\gamma}\}, & 1 + \gamma(x - \mu) / \sigma > 0, \gamma \neq 0 \\ \exp\{-\exp[-(x - \mu) / \sigma]\}, & \gamma = 0 \end{cases}$$

mit μ Lokationsparameter („location“)

σ Skalenparameter („scale“)

γ Formparameter („shape“)

Bei sehr großer Werteanzahl geht jede, innerhalb zeitlich konstanter Blöcke (hier Jahre) gebildete Extremwerteserie in die GEV über (COLES 2001). Zudem enthält die Verteilung die drei Verteilungen Gumbel, Frechet und Weibull als Spezialfälle. Aus diesem Grund wurde beschlossen, ausschließlich die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) zu verwenden.

Zur Beurteilung der ermittelten Veränderung am Pegel wurde der Quotient zwischen den statistisch berechneten T_n -jährlichen Hochwasserabflüssen des Szenario-Zustandes und des Ist-Zustandes wie folgt ermittelt:

$$\text{Quantil-Quotient (Tn)} = \text{HQ[Szenario]}_{(Tn)} / \text{HQ[Ist]}_{(Tn)}$$

Die Ergebnisse der Berechnung der lokalen Quantil-Quotienten der Hochwasserabflüsse für die einzelnen Pegel lassen ebenfalls die bereits beschriebene Ost-West Differenzierung erkennen. Die höchsten Zunahmen der Hochwasserabflüsse des HQ100 werden im Westen des Main-Einzugsgebiets ermittelt, wobei für größere Flussgebiete (Einzugsgebietsgröße $> 400 \text{ km}^2$) Quantil-Quotienten von 1,18 für Hochwasser der Jährlichkeit HQ₁₀₀ nicht überschritten wurden (Abbildung 7). In einem weiteren Arbeitsschritt erfolgte die regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse für einzelne Regionen des Maingebiets. Für das Flussgebiet der Fränkischen Saale errechnete sich beispielsweise mittels regionaler Wahrscheinlichkeitsanalyse für das HQ₁₀₀ eine prozentuale Erhöhung von 15 %. Für die weiter östlich gelegenen Flussgebiete des Oberen Mains und der Regnitz konnten keine so deutlichen Hochwassererhöhungen für den HQ₁₀₀-Wert ermittelt werden.

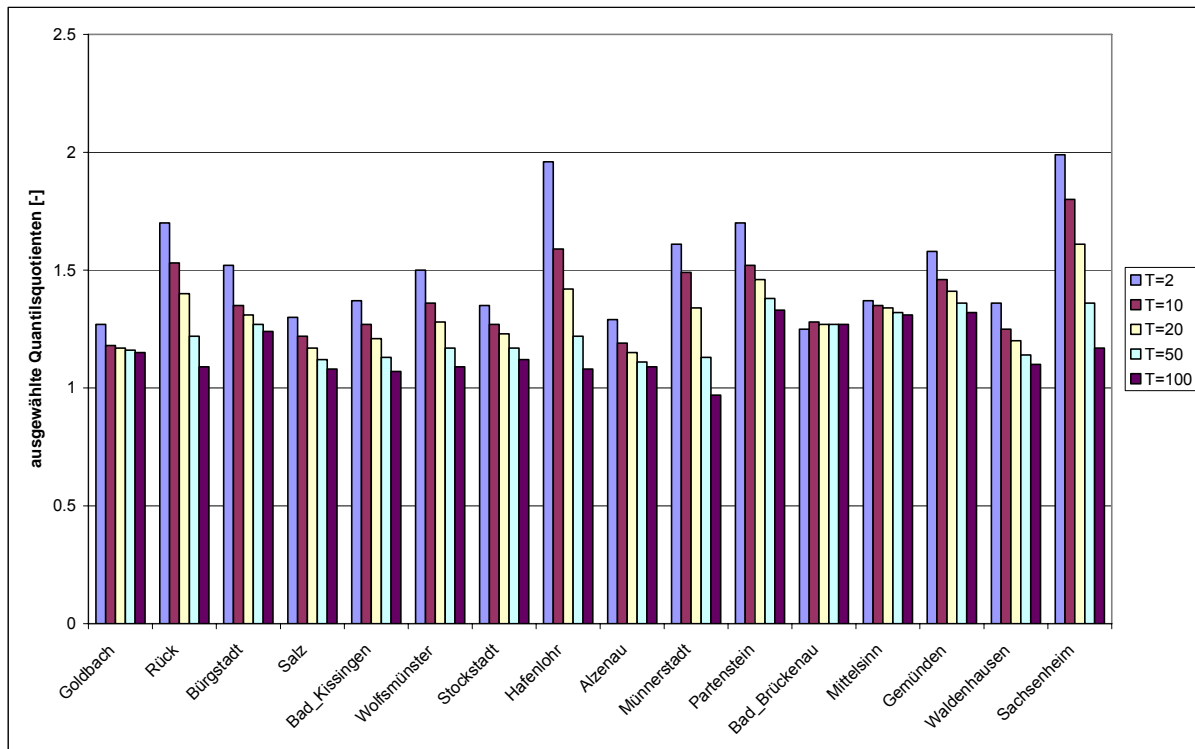


Abb. 7: Ausgewählte Quantilquotienten der Jährlichkeiten T=2 bis T=100 im Flussgebiet des Unteren Mains

6. Hochwasserschutzplanung und Klimawandel

Unter Berücksichtigung der im Rahmen von KLIWA durchgeführten Auswertungen galt es aus Vorsorgegründen, für den Bereich des technischen Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt. Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig das Sicherheitsbedürfnis berücksichtigen und gleichzeitig bei Bedarf (z.B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind („flexible and no regret“-Strategie) (KATZENBERGER 2004).

6.1 Einführung eines Lastfalls „Klimaänderung“

Die KLIWA Auswertungen wurden in Bayern zum Anlass genommen, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen für technische Hochwasserschutzinfrastruktur zu modifizieren und wegen des voraussichtlichen zukünftigen Klimawandels aus Vorsorgegesichtspunkten einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Bei der Ermittlung des Bemessungsabflusses (z.B. HQ_{100}) werden deshalb zusätzlich zu den Grundlagen aus der hydrologischen Extremwertstatistik der gemessenen Scheitelabflüsse ein klimawandelsbedingter Zuschlag ("Klimaänderungsfaktor") im Planungsverfahren berücksichtigt.

6.2 Erhöhung der bisherigen Bemessungsabflüsse

Für die Ermittlung der Bemessungsabflüsse unter Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung ($BHQ_{Tn,K}$) werden die aus der hydrologischen Extremwertstatistik vorliegenden Abflüsse HQ_{Tn} direkt um den Klimaänderungsfaktor $f_{T,K}$ multiplikativ erhöht:

$$BHQ_{Tn,K} = f_{T,K} \cdot HQ_{Tn}$$

In Bayern ist ein pauschaler Zuschlagsfaktor von $f_{T,K} = 1,15$ für Hochwasserabflüsse der Jährlichkeiten (T) bis zum HQ_{100} eingeführt worden, der jedoch in begründeten Fällen zukünftig auch regional modifiziert werden kann. Der pauschale Klimaänderungsfaktor $f_{T,K}$ ist derzeit bei geringeren Jährlichkeiten als HQ_{100} in gleicher Größe anzuwenden. Für das HQ_{200} wird der Klimaänderungsfaktor halbiert (1,075 bzw. 7,5 %). Bei höheren Jährlichkeiten (HQ_{500} und darüber) – wie z.B. bei der Bemessung von Talsperren und Rückhaltebecken – kann hingegen auf einen Zuschlag verzichtet werden. Damit wird derzeit bereits dem Vorsorgegedanken Rechnung getragen.

6.3 Anwendung in der Praxis

Der Lastfall Klimaänderung soll bei Planungen von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen in der Regel mitberücksichtigt werden. In begründeten Einzelfällen kann aber auch der Verzicht auf die Anwendung des Klimaänderungsfaktors angebracht sein. Beispielsweise sollte der Bemessungsabfluss an Grenzgewässern nicht einseitig verändert werden. Diese Vorgehensweise ist für staatliche Hochwasserschutzplanungen mit Ministerialschreiben seit 2004 eingeführt. Eine vergleichbare Vorgehensweise wurde den Trägern nichtstaatlicher Vorhaben empfohlen. In Baden-Württemberg wurde eine ähnliche Vorgehensweise mit regional weiter differenzierten Zuschlagsfaktoren eingeführt (LFU BW 2005). Die Anwendung des Lastfalls Klimaänderung ist für Hochwasserschutzkonzepte, mit deren Umsetzung bereits begonnen wurde, bzw. deren Umsetzung bereits abgeschlossen ist, derzeit nicht vorgesehen.

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, wie unter dem Aspekt erhöhter Bemessungswerte, also der Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung, bei der Umsetzung von Planungen vorgegangen werden kann:

- Planung eines Hochwasserdammes: Der Damm wird nach derzeitigen Vorgaben gebaut, es werden jedoch zusätzliche Maßnahmen vorgenommen, die nach bisherigen Planungsgesichtspunkten nicht erforderlich wären. Zum Beispiel wird zusätzlich ein Geländestreifen auf der Luvseite beansprucht und freigehalten, der eine zukünftig ggf. notwendige Dammerhöhung ohne zusätzliche Probleme ermöglicht.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Änderung und Anpassung nicht oder nur sehr aufwändig möglich ist (z.B. Brücken), sollten sofort auf zukünftig ggf. erhöhte Bemessungsgrößen beim Wasserstand ausgelegt werden.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Anpassung weniger problematisch ist (z.B. Ufermauern), sollten hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale (z.B. der Statik) über den derzeitigen Bedarf hinaus so ausgelegt werden, dass eine ggf. später notwendig werdende Anpassung (z.B. Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) kostengünstig möglich ist.

7. Ausblick

Ausgehend von den Erkenntnissen der globalen Klimaforschung über den Klimawandel haben die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg und Bayern in Kooperation mit dem Deutschen Wetterdienst und unter Mitwirkung der Bundesanstalt für Gewässerkunde das breit angelegte Untersuchungsprogramm KLIWA begonnen. Die bisherigen Erkenntnisse haben nicht zuletzt auch unter Vorsorgegesichtspunkten bereits zu konkreten Konsequenzen geführt. Bei der Bemessung von Hochwasserschutzplanungen werden die erwarteten Folgen des Klimawandels bereits jetzt berücksichtigt. Die Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels in weiteren wasserwirtschaftlichen Bereichen, zunächst hinsichtlich der künftigen Entwicklung der Niedrigwasserabflüsse und der Grundwasserneubildung, wird derzeit angegangen.

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse sind noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, dies ist dem Bayerischen Landesamt für Umwelt und den KLIWA-Partnern bewusst. Mit den Fort-



schritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig auch fortentwickeln müssen. Da sowohl die globalen Klimamodelle als auch die Verfahren zur Erstellung der regionalen Klimaszenarien kontinuierlich weiterentwickelt werden, spiegeln die derzeit für Bayern festgelegten Klimaänderungsfaktoren den Stand des Wissens zum Zeitpunkt der Festsetzung wider. Die Bereitstellung einer neuen Generation von regionalen Klimaszenarien durch das Umweltbundesamts macht unter Umständen in Bayern die Evaluierung der im Jahr 2004 getroffenen Festlegungen auf Grundlage neuer Wasserhaushaltssimulationen notwendig. Die Vorbereitungen für diese Arbeiten sind am Bayerischen Landesamt für Umwelt derzeit im Gange. Auf Basis der vorhandenen Wasserhaushaltsmodellen für die einzelnen Flussgebiete Nordbayerns können weiterführende Untersuchungen z.B. auf der Grundlage von neuen Klimaszenarien mit einigen Synergieeffekten weitergeführt werden.

Die Wasserwirtschaft passt sich so im Sinne der Vorsorge an verändernde Verhältnisse an. Letztlich wird aber der Klimawandel nicht nur eine wasserwirtschaftliche, sondern auch große gesellschaftliche Herausforderung der Zukunft werden.

8. Literatur

- BRONSTERT (2006): Darstellung und Vergleich regionaler Klimaszenarien (Enke - Szenarien) des Maingebiets in Bayern, unveröffentlichter Endbericht. 110 S.
- COLES, S (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics, London
- ENKE, W (2003): Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufs (B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. Meteo-Research, Berlin, unveröffentlicht.
- GERLINGER, K (2004): Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 87-102
- IPCC (2001): Climate change 2001, Summary for Policymakers, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge
- KATZENBERGER, B. (2004): Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA – Handlungsempfehlungen. KLIWA-Berichte, Heft 4, S. 197-204
- KLIWA (2005a): Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte, Heft 5, München
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland. Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. KLIWA-Berichte Heft 8, München
- LANDESANSTALT FÜR UMWELTSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG (2005): Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“, Karlsruhe.
- 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.
- SCHÄR, CH et. al. (2001): Regionale Klimamodelle – Möglichkeiten und Grenzen. KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 92-103
- WILLEMS, W & A. YÖRÜK (2006): Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für Einzugsgebiete des bayerischen Mains mittels Klimaszenarien. Unveröffentlichter Ergebnisbericht, 147 S.
- WILLEMS, W (2006): Einfluss des Klimawandels auf Extremwerte für Einzugsgebiete des bayerischen Mains mittels Klimaszenarien. Unveröffentlichter Ergebnisbericht 64 S.

Handlungsempfehlungen bei der Festlegung des Bemessungshochwassers in Baden-Württemberg

Wolfgang Hennegriff

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Anlass

Als das Kooperationsvorhaben KLIWA (Klimaänderung und Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft) 1999 ins Leben gerufen wurde, stand damals die Frage einer Hochwasserverschärfung im Vordergrund. Die drängenden Fragestellungen waren damals: Wie ist diese Häufung der Hochwasserereignisse hydrologisch zu bewerten? Findet ein grundlegender Wandel des Klimas vor allem im Bezug auf die hydrometeorologischen und hydrologischen Gegebenheiten statt? Wie können eine zukünftige Klimaentwicklung und die Folgen für den hydrologischen Wasserkreislauf abgeschätzt werden? Wie werden sich voraussichtlich die meteorologischen, hydrometeorologischen und hydrologischen Parameter infolge der Erderwärmung regionalspezifisch verändern? Wie kann die Klimaänderung in hydrologischer Hinsicht quantifiziert werden, damit Anlagen des technischen Hochwasserschutzes gegen mögliche Hochwasserverschärfungen dimensioniert werden können?

Im folgenden Bericht wird vorgestellt, wie in Baden-Württemberg Klimaänderungsfaktoren hergeleitet wurden und wie diese bei der Bemessung von neuen Anlagen des technischen Hochwasserschutzes berücksichtigt werden können.

2. Hochwasserentwicklung im 20. Jahrhundert

Untersuchungen der vorhandenen langen Messreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen können Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und evtl. erkennbaren Veränderungen geben. Solche Untersuchungen sind auf der Grundlage einer großen Datenbasis im Rahmen von KLIWA systematisch für Baden-Württemberg durchgeführt worden. Dabei ist das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse, der mittleren Abflüsse, der Gebiets- und Starkniederschläge, der Lufttemperatur, der Verdunstung und der Schneedeckendauer für die Zeitreihen im 20. Jahrhundert analysiert worden.

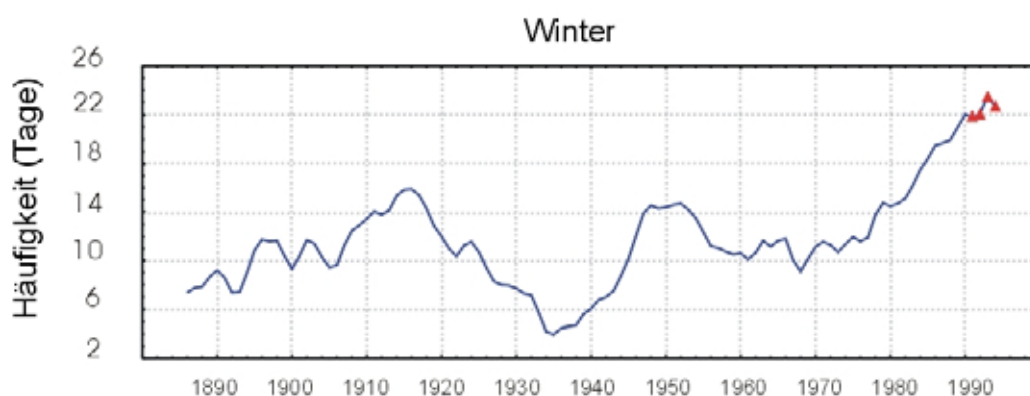


Abb.1: Entwicklung der Wetterlagen „Westlage zyklonal“: Im hydrologischen Winterhalbjahr haben gerade die für die Hochwasserbildung bedeutsamen niederschlagsbringenden Wetterlagen „Westlage zyklonal“ seit den 70er Jahren in Süddeutschland zugenommen.

Die Untersuchung des Langzeitverhaltens erstreckte sich auf die Ermittlung eventueller vorhandener linearer Trends in den Zeitreihen der jährlichen und monatlichen Höchstabflüsse. Den



Trenduntersuchungen lagen die Jahres- bzw. Monatshöchstwerte der Abflüsse an 107 Pegeln zugrunde, die über lange Beobachtungszeitreihen seit mindestens 1931 verfügen. Das Langzeitverhalten der Höchstabflüsse kann folgendermaßen charakterisiert werden: Betrachtet man die letzten 30 Jahre, zeigen sich bei den Höchstabflüssen bei vielen Pegeln zunehmende Trends. Dabei wurde festgestellt, dass bei einer Vielzahl von Einzugsgebieten die Häufigkeit von Winterhochwasser seit den 70er Jahren zugenommen hat und dass die monatlichen Hochwasserabflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr ab den 70er Jahren höher als in der Zeit davor waren.

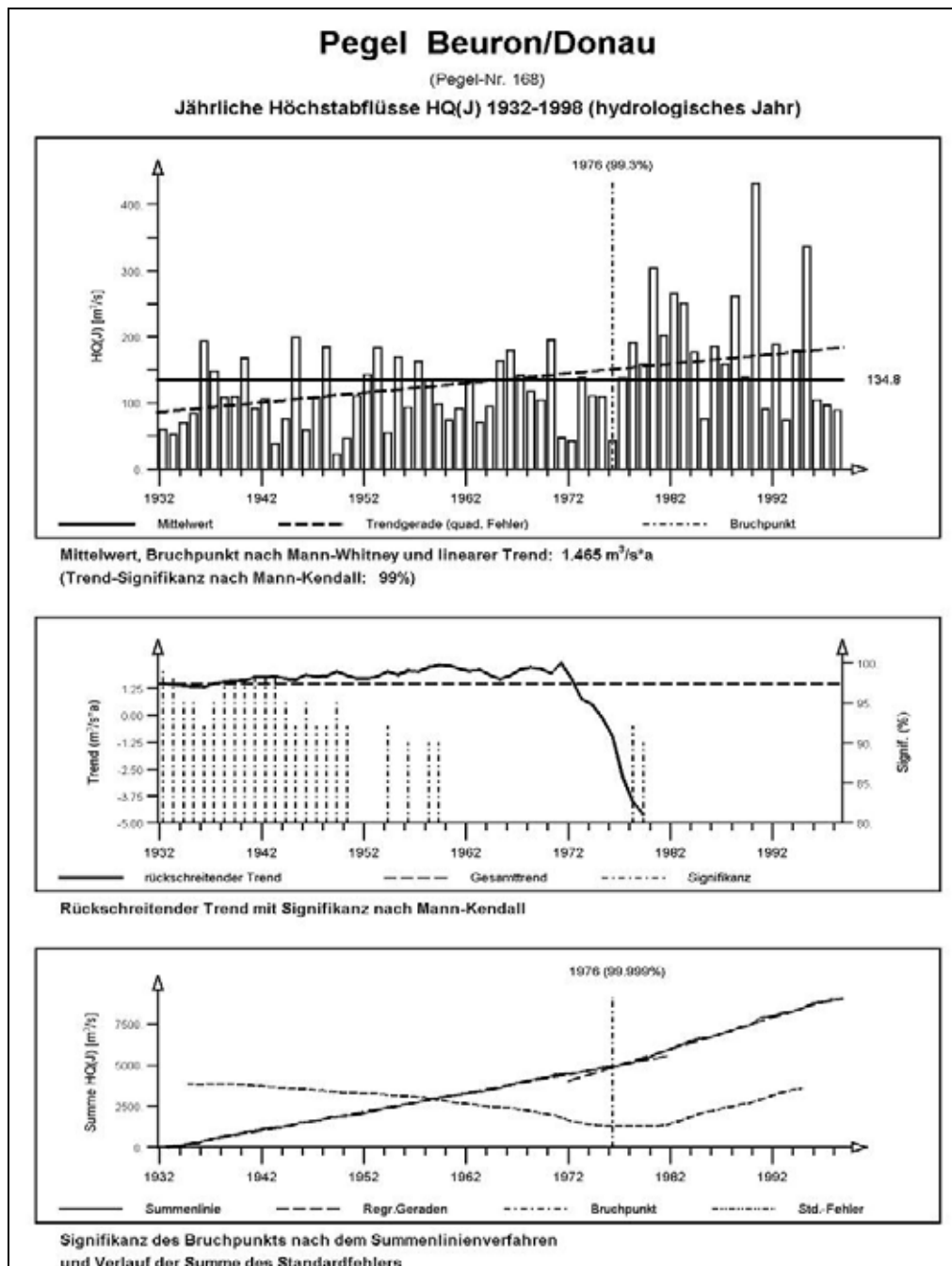


Abb. 2: Analyse der jährlichen Hochwasserabflüsse am Pegel Beuron/Donau

Diese Verschärfung der Hochwasserlagen wird einerseits mit der Erhöhung der durchschnittlichen Lufttemperatur andererseits mit der Zunahme der zyklonalen Westwetterlagen in Verbindung gebracht.

3. Prognosen für die künftige Klimaentwicklung

Da im 21. Jahrhundert mit einem weiteren deutlichen Anstieg der mittleren Lufttemperatur zu rechnen ist, liegt die Frage nahe, wie in diesem Jahrhundert sich die meteorologischen, hydro-meteorologischen und hydrologischen Parameter als Folge veränderter atmosphärischer Umweltbedingungen insbesondere durch die Zunahme der Konzentrationen an Treibhausgasen verändern können und wie die Hochwasserabflüsse im 21. Jahrhundert sich entwickeln können.

Die bisher in den Messzeitreihen festgestellten Trends der klimatologischen und hydrologischen Parameter sind nicht in die Zukunft extrapolierbar, da es sich bei den Klimaprozessen und ihren komplexen Wechselwirkungen um nichtlineare und zeitlich veränderliche Prozesse handelt. Vielmehr galt es zunächst, Erkenntnisse zu gewinnen, wie stark die Sonne die Atmosphäre bei zunehmenden Konzentrationen an Treibhausgasen erwärmen wird und wie der Wasserkreislauf bei sich verändernden atmosphärischen Bedingungen vor allem angetrieben wird?

Untersuchungen belegen, dass gegenüber der vorindustriellen Zeit zu heute der CO₂-Gehalt der Atmosphäre von 280 ppm (parts per million = 0,028 %) auf 380 ppm (= 0,038 %) angestiegen ist. Die atmosphärischen Konzentrationen der Treibhausgase Kohlendioxid, Methan und Lachgas sind die höchsten seit mindestens 650000 Jahren. Das Ausmaß, in dem diese Gase heute den Treibhauseffekt verstärken, ist beispiellos in den letzten mindestens 20000 Jahren. Die jährliche Zunahme der CO₂-Konzentration beträgt gegenwärtig 1,5 ppm.

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

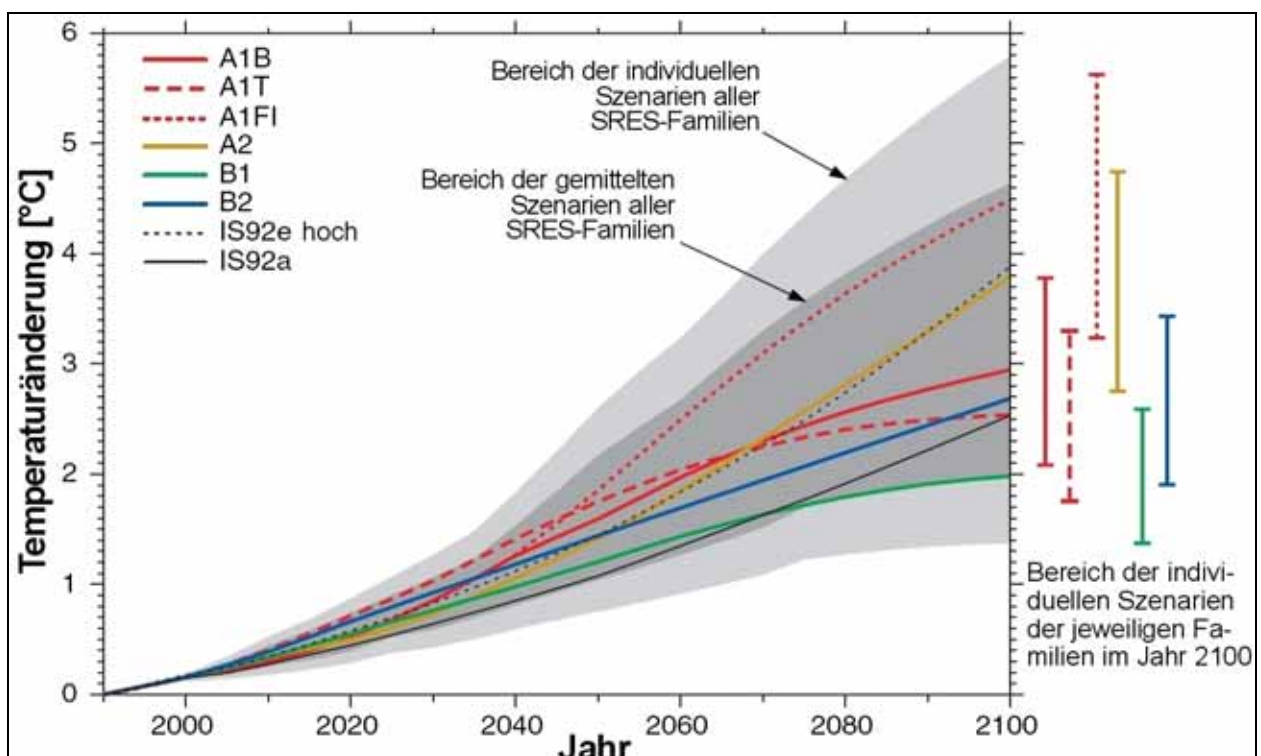


Abb. 3: IPCC-Emissionsszenarien und globaler Temperaturanstieg



Dieser Ausschuss hat mögliche Klimaszenarien bis 2100 zusammengestellt. Es mag hilfreich sein, den möglichen Verlauf der klimatischen Entwicklung bis zum Jahr 2100 abzuschätzen. Die Entwicklung der Zunahme der mittleren Globaltemperatur kann sich nach dem Bericht der IPCC in einem Bereich zwischen 1,4 °C und 5,8 °C bewegen. Prognosen für die Entwicklung des Wasserkreislaufes sind dagegen sehr stark temperatur- und wetterlagenabhängig. Daher wurde in KLIWA entschieden, die Prognosen nicht für 2100 zu berechnen, da die mittlere Temperaturerhöhung für diesen Zeithorizont noch viel zu unsicher ist. Auf Grund dieser Unsicherheit wären Antworten auf wasserwirtschaftliche Fragestellungen ebenfalls in einem sehr großen Spektrum zu erwarten gewesen. Aufgrund dieser Tatsache hätten wiederum keine konkrete Handlungsempfehlungen für die wasserwirtschaftliche Praxis, die auch den wirtschaftlichen Kriterien entsprechen, abgeleitet werden können. Deshalb wurde in KLIWA der Prognosezeitraum von 2021 bis 2050 gewählt, da in diesem Zeitraum die möglichen Temperaturentwicklungen noch dichter als in 2100 beieinander liegen. Für diesen Prognosezeitraum wurde in KLIWA das Emissionsszenario B2 angenommen, da das B2 – Szenario eine mittlere Betrachtungsweise darstellt. Dem B2-Szenario liegt eine gesamtgesellschaftliche Entwicklung zu Grunde, die bereits auf ökonomische und ökologische Nachhaltigkeit ausgerichtet ist.

Antworten auf die Klimaentwicklung auf regionaler Ebene mit Hilfe von globalen Klimamodellen können nicht gegeben werden, da diese sehr grobmaschig angelegt sind. Mit Gitterweiten von 250 km würde die Landesfläche von Baden-Württemberg gerade mit einer Gittermasche abgebildet werden. In globalen Klimamodellen kann demnach die Topographie einer Landesfläche wie diejenige von Baden-Württemberg nicht abgebildet werden. Damit können zum Beispiel Luv-Lee-Effekte von Luftströmungen, die insbesondere das Niederschlagsverhalten beeinflussen, nicht simuliert werden. Deshalb mussten zunächst regionale Klimamodelle entwickelt werden. Da es für die Abschätzung der künftigen Klimaentwicklung auf regionalem Maßstab noch kein optimales Verfahren gab, wurden im Rahmen von KLIWA drei verschiedene Institutionen beauftragt, regionale Klimaszenarien mit drei unterschiedlichen Verfahren zu erstellen, nämlich

- mit einem statistischen Downscaling-Verfahren mittels Clusteranalyse (Potsdam Institut für Klimafolgenforschung/PIK),
- mit einer statistisch-dynamischen Downscaling mittels Wetterlagenklassifikation (Fa. Meteo-Research /MR) und
- mit einem regionalen dynamischen Klimamodell (REMO) (Max-Planck-Institut für Meteorologie /MPI).

Um vergleichbare Ergebnisse zu bekommen, gaben die Partner von KLIWA weitgehend identische Randbedingungen vor: Messdaten 1951-2000, Verifikationszeitraum 1971-2000, Globalmodell ECHAM 4, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021-2050.

Für das Klimaszenario 2021 – 2050 wurden zehn Varianten realisiert, wobei jede Dekade nochmals mit zwei Läufen simuliert wurde. Insgesamt stehen somit für dieses Klimaszenario insgesamt $10 \times 2 \times 30 = 600$ Modelljahre zur Verfügung.

Nach dem Vergleich und der Bewertung der Ergebnisse aus den drei Verfahren, die erwartungsgemäß eine gewisse Bandbreite bei den Ergebnissen lieferten, wurden den weiteren Auswertungen primär die Ergebnisse der Methode von Meteo-Research zugrunde gelegt.

Generell ist zur Auswertungsmethodik zu erwähnen, dass nicht nur die Veränderungen der Jahresmittel sondern insbesondere die Änderungen im hydrologischen Sommer- und Winterhalbjahr zu untersuchen waren, da die Änderungen (Abnahmen im Sommer, Zunahmen im Winter) sich zum Teil kompensieren würden. Aber auch die Veränderungen der Monatsmittelwerte sind als wesentliche Ergebnisse zu beachten. Insgesamt können für das Zukunftsszenario 2021 – 2050 folgende Prognosen festgehalten werden.

3.1 Lufttemperatur

Die bodennahe Lufttemperatur spielt im Wasserkreislauf eine zentrale Rolle, da sie die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf in einer Luftmasse sowie die Verdunstung beeinflusst. Ein Anstieg der mittleren globalen Temperatur treibt die Intensität des Wasserkreislaufes stärker an. Mit der Erwärmung der Atmosphäre ist ebenso eine Erwärmung der Ozeane und Meere verbunden. Durch den Anstieg der mittleren Wassertemperatur und insbesondere der Wasseroberflächentemperatur steigt auch die Höhe der mittleren Verdunstung. Demnach können atlantische Luftströmungen mehr Feuchtigkeit nach Mitteleuropa transportieren. Bei der Lufttemperatur handelt es sich um eine hydrometeorologische Größe, die im Zusammenhang mit der Klimaänderung in den Klimamodellen am besten simuliert werden kann. Die erwartete Temperaturzunahme im Winter ist außerdem von besonderer Bedeutung, da die Temperatur großen Einfluss auf die Zwischenspeicherung von Niederschlag als Schnee hat und somit entscheidend für die zukünftig zu erwartenden Abflussverhältnisse sein kann.

Nach den Ergebnissen, die mit Hilfe der regionalen Klimamodellen berechnet wurden, wird die Lufttemperatur in Baden-Württemberg auch in der Zukunft weiter deutlich zunehmen. Die Temperaturzunahme beträgt im Jahresdurchschnitt ca. 1,7 °C, im Winter ist die Zunahme mit ca. 2 °C am stärksten und die Zunahme im Sommer beträgt ca. 1,4 °C.

3.2 Niederschlag

Die Berechnungsergebnisse der Klimaszenarien prognostizieren ebenfalls eine Änderung im Niederschlagsverhalten. Für das gewählte Zukunftsszenario betragen die Zunahmen der Jahresmittelwerte der Niederschläge ca. 8 % mit einer Spannweite von ca. 4 % bis ca. 17 %. Die großräumigen Niederschläge werden sich im Sommer in Süddeutschland um 4 % abnehmen. Andererseits ist zu erwarten, dass die Winterniederschläge deutlich zunehmen werden (siehe Abbildung 4). Je nach Region kann die unterschiedlich stark ausgeprägte Zunahme bis zu 35 % betragen. Markant ist für die jährlichen Niederschlagssummen ein Bereich mit relativ hohen Änderungen auf dem südwestlich-nordöstlichem Halbbogen (Schwarzwald-Odenwald-Spessart-Rhön).

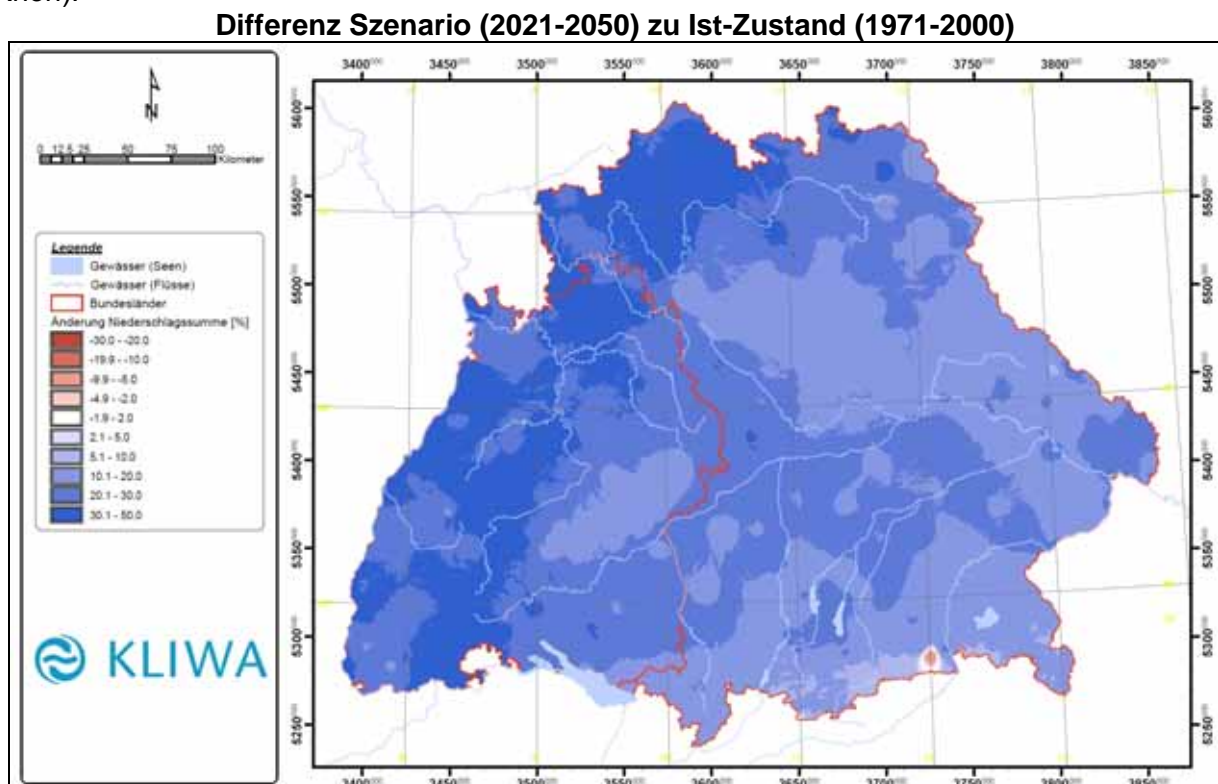


Abb. 4: Änderung der Niederschlagssumme (%) im hydrologischen Winterhalbjahr



Die Ergebnisse der Klimasimulationen können nach unterschiedlichen Kriterien ausgewertet werden. Zum Beispiel wurde das Niederschlagsverhalten mit einer Darstellung der Anzahl der Tage mit hohen Niederschlägen (größer als 25 mm) ausgewertet. Im Sommer ergeben sich kaum Veränderungen der Anzahl der Nasstage (Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag), im Schwarzwald und Allgäu sogar Abnahmen bei der Anzahl dieser Tage mit hohen Niederschlägen. Im Winter gibt es an fast allen Stationen in Baden-Württemberg Zunahmen. Die deutlichsten Zunahmen gibt es im Schwarzwald an höher gelegenen Stationen (z. B. in den Stationen Freudenstadt, Höchenschwand, Bad Rippoldsau), hier steigt die Anzahl von 8 auf 14 Tage.

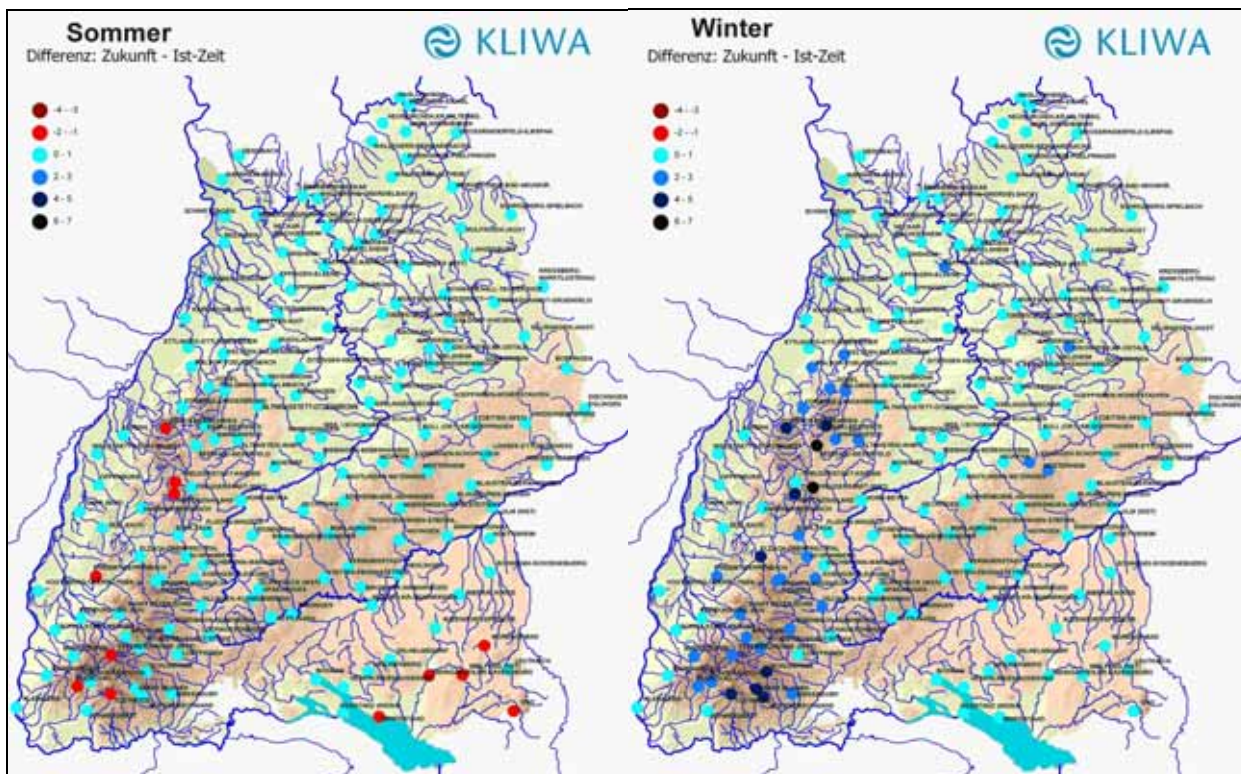


Abb. 5: Änderung der mittleren Anzahl der Tage mit $N > 25$ mm

Quantitative Aussagen zur künftigen Entwicklung von konvektiven Kurzzeit-Niederschlägen (Gewitter), die für die Siedlungsentwässerung und für Sommerhochwasser in kleinen Einzugsgebieten von Bedeutung sind, können gegenwärtig von den verfügbaren regionalen Klimamodellen derzeit jedoch noch nicht erbracht werden. Mit Hilfe der regionalen Klimamodelle wurde die zukünftige Entwicklung der Parameter Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und Luftdruck für den Zeitraum 2021 bis 2050 simuliert. Mit den regionalen Klimamodellen lassen sich jedoch noch keine Prognosen für die zukünftige Entwicklung der hydrologischen Parameter ableiten. Ohne diese Prognose zur Entwicklung des hydrologischen Systemverhaltens wären auch keine Erkenntnisse für die mögliche wasserwirtschaftliche Vorsorgeempfehlungen zu gewinnen. Deshalb musste die Modellkette globale und regionale Klimamodelle durch die Wasserhaushaltsmodelle fortgeführt werden. Die Ergebnisse aus den regionalen Klimamodellen werden demnach als Input für die Wasserhaushaltsmodelle verwendet.

4. Prognosen für die künftige Entwicklung des Wasserhaushalts

Wasserhaushaltsmodelle liegen für Baden-Württemberg mit einer Auflösung von 1 km² flächendeckend vor. In Baden-Württemberg wird das Wasserhausmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) eingesetzt. In diesem Modell ist die Eingabe von bis zu 16 verschiedenen Landnutzungen und Bodendaten pro Rasterelement sowie die Angaben zu Flusslängen und

Gerinnegeometrien möglich. Für die Höhenangaben wurden die Daten des digitalen Geländemodells Baden-Württemberg verwendet.



Abb. 6: Wasserhaushaltsmodelle in Baden-Württemberg

Mit Hilfe der Wasserhaushaltsmodelle können alle wesentlichen hydrologischen Komponenten wie Aggregatzustand des Niederschlags, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss, Infiltration, Interflow, Grundwasserneubildung und Grundwasserabfluss einschließlich kapillarer Aufstieg vom Grundwasser und der Bodenverhältnisse mit Hilfe der Ergebnisse aus den regionalen Klimamodellen über die Dauer des Simulationszeitraum berechnet werden. Diese Berechnungsmöglichkeit erweist sich für die Beantwortung von Fragestellungen zu den hydrologischen Auswirkungen infolge des Klimawandels sehr vorteilhaft. Gerade die für die Oberflächenflächenabflussbildung maßgebenden Parameter wie Bodenwassergehalt und Bodenzustand können mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM im Gegensatz zu anderen hydrologischen Verfahren über den langen Betrachtungszeitraum 2021 bis 2050 sehr genau simuliert werden.

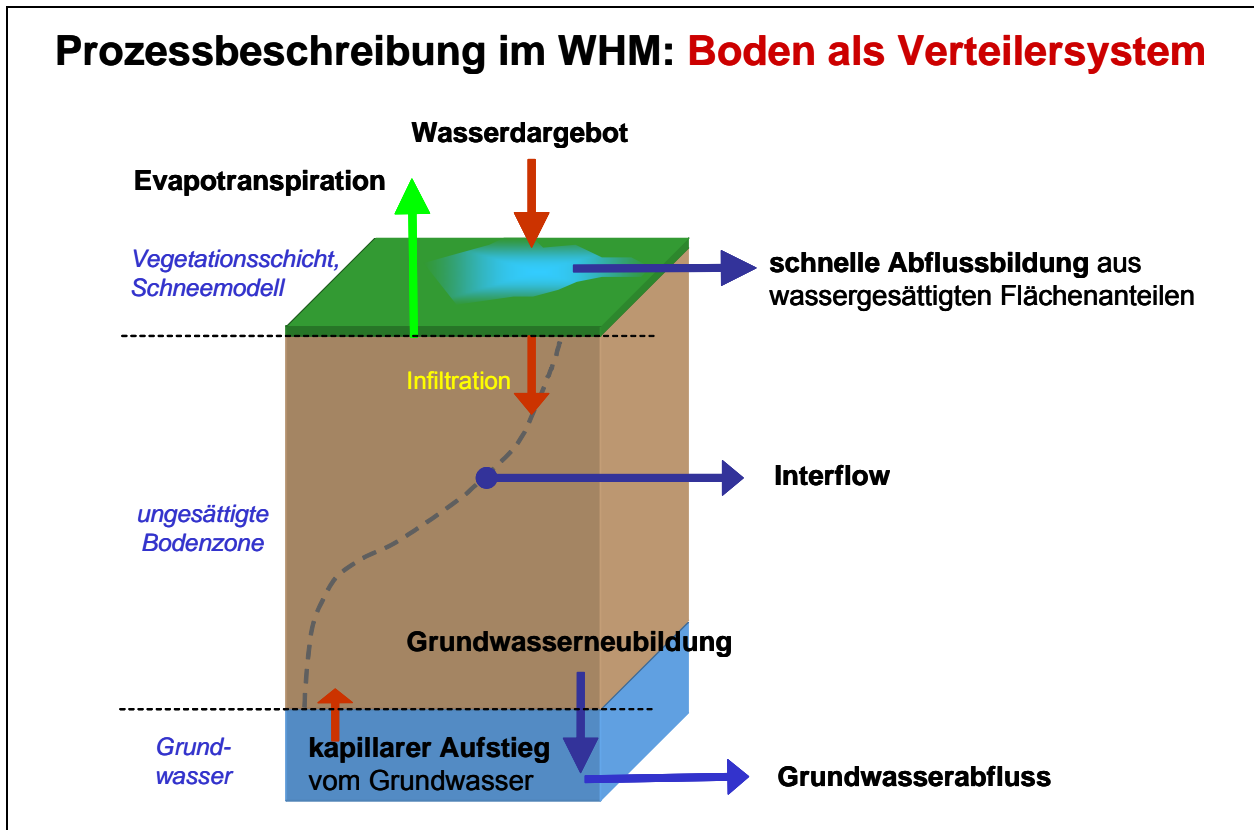


Abb. 7: Prozessbeschreibung im Wasserhaushaltsmodell

4.1 Klimawandel und Hochwasserabflüsse

Die Wasserhaushaltsmodellierungen konzentrierten sich zunächst auf mögliche Veränderungen des Abflussgeschehens in der Zukunft, wobei zuerst die Auswirkungen bei den Hochwasserabflüssen im Blickfeld waren. Die ermittelten Abflüsse aus der Wasserhaushaltsmodellierung wurden dafür mit Methoden der Extremwertstatistik vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe analysiert.

Als Daten standen die Messdaten an den Pegeln, die mit den gemessenen Niederschlagshöhen simulierten Abflüsse, die Abflusswerte, die mit den Ergebnissen aus den Klimamodellen für den Ist-Zustand (Referenzlauf) (1971-2000) und für das Klimaszenario 2021-2050 simuliert wurden, als Tageswerte zur Verfügung.

Die Tageswerte wurden als mittlere Monatshöchstwerte für das Jahresmittel (mittleres Hochwasser MHQ) sowie für die Halbjahresmittel für das 1. und 2. Halbjahr sowie die Extremwerte für die Hochwasserkennwerte Jahreswerte HQ(J), Halbjahreswerte (HQ(1. Halbjahr) und HQ(2. Halbjahr) ausgewertet.

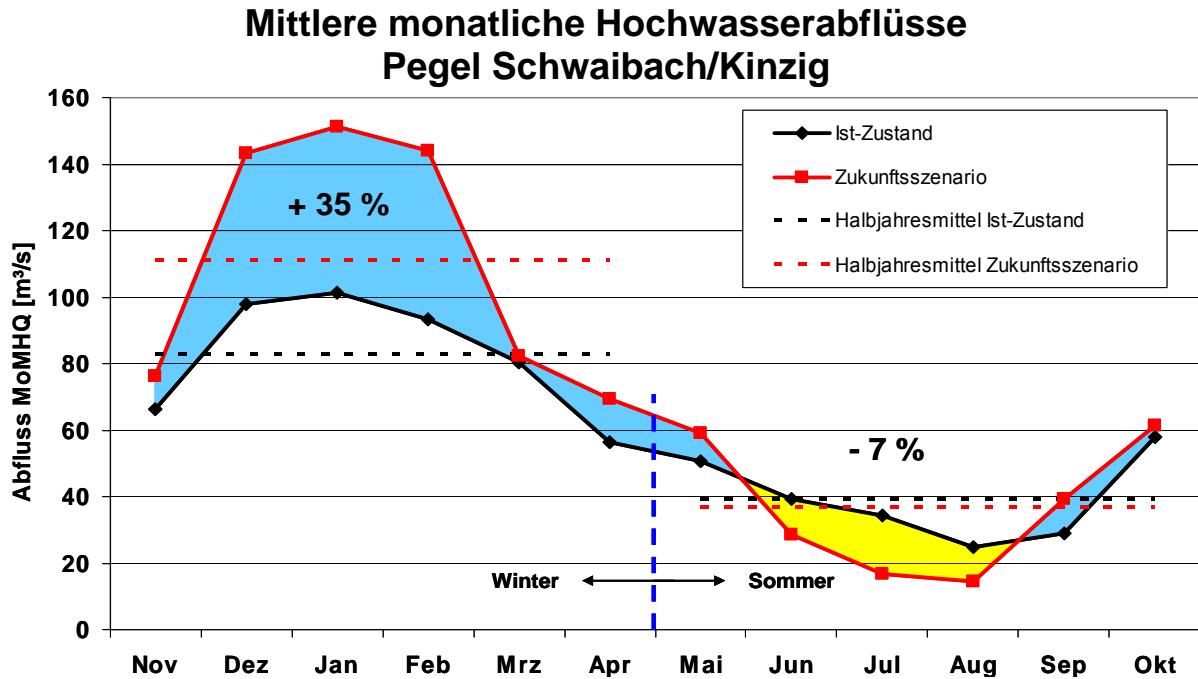


Abb. 8: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse der Kinzig/Schwarzwald am Pegel Schwaibach: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 35 %, im Januar sogar 50 %, dagegen Abnahme im Sommer um 7 %, im Juli sogar im 50 %. Damit verändert sich der Jahrgang der Kinzig deutlich.

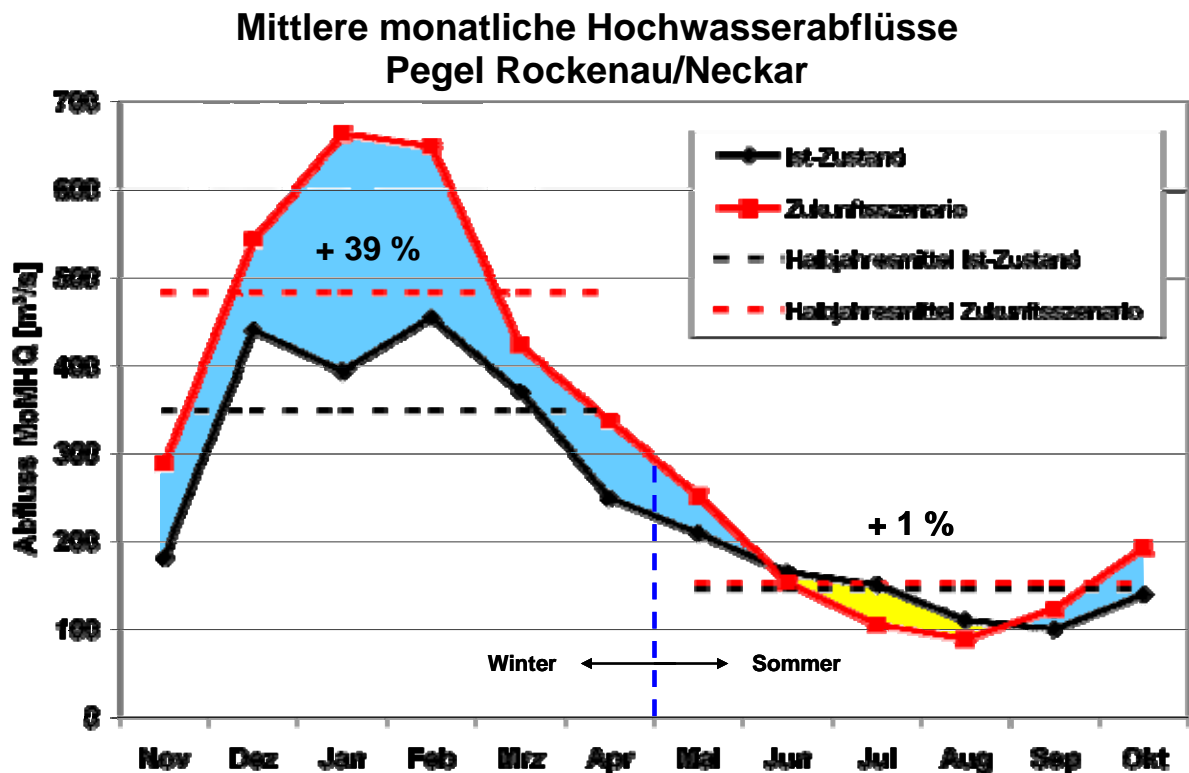


Abb. 9: Jahrgang der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse des Neckar am Pegel Rockenau: Zunahme der Halbjahresmittel im Winter um 39 %, im Januar sogar 50 %. Dagegen ist das Halbjahresmittel im Sommer nahezu unverändert, im Juli jedoch Abnahme um 33 %. Damit verändert sich der Jahrgang des Neckars am Pegel Rockenau deutlich.



Um die Änderungen der Extremwerte der Hochwasserabflüsse im Zukunftsszenario und gegenwärtigem Zustand zu quantifizieren, wurden durch die Auswertung der Extremwerte über das Verhältnis von HQ (Zukunft) / HQ (Ist) sogenannte Klimaänderungsfaktoren für das mittlere Hochwasser MHQ und für die Hochwasserkenwerte der Jährlichkeiten 2, 5, 10, 20, 50, 100 und 200 Jahre gebildet. Faktoren größer 1 bedeuten demnach eine Zunahme des Hochwasserkenwertes, Faktoren kleiner 1 eine Abnahme. Die Ergebnisse in Abbildung 10 lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser (MHQ), aber auch der extremen Abflüsse, erwarten. Auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette (Globalmodell – regionales Klimamodell – Wasserhaushaltsmodelle) und den Modellannahmen noch mit Unsicherheiten behaftet sind, zeigen die Faktoren alle in dieselbe Richtung, so dass von einer Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung für den betrachteten Zeitraum bis zum Jahr 2050 in Baden-Württemberg auszugehen ist.

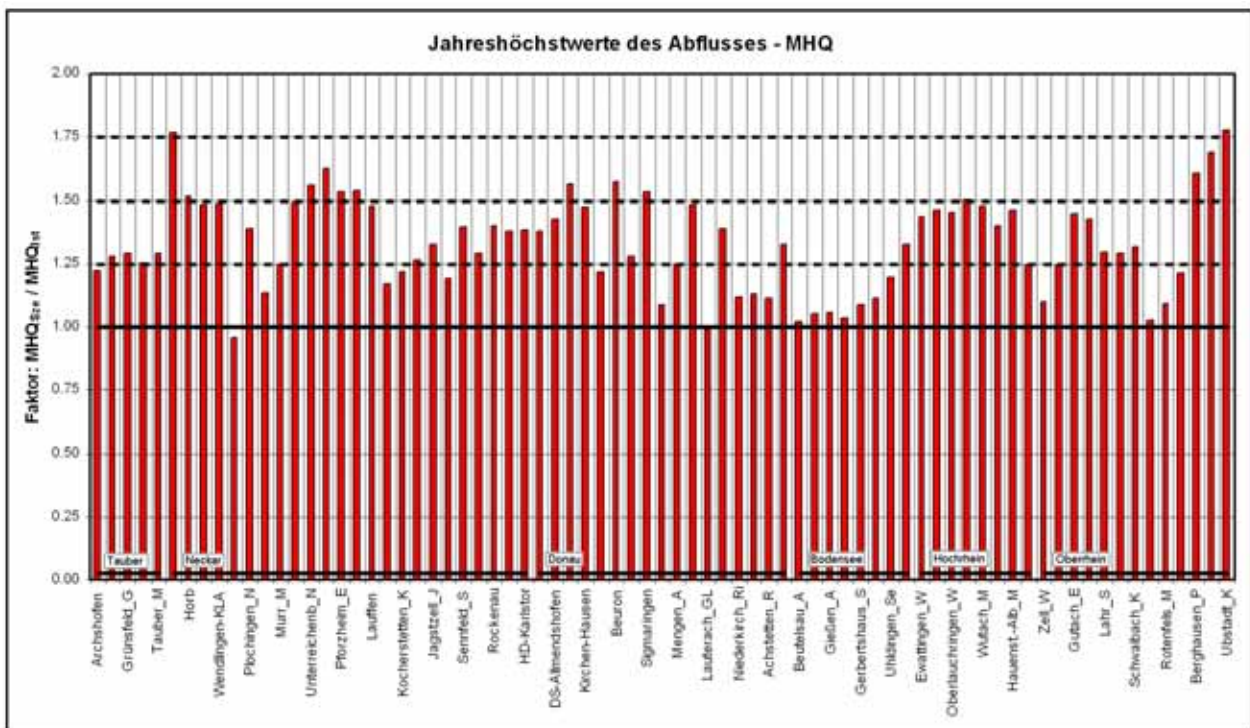


Abb. 10: Zukünftige Veränderung der mittleren Hochwasserabflüssen infolge des Klimawandels

Die Ergebnisse wurden für die genannten Jährlichkeiten in Karten übertragen. Die Ergebnisse der einzelnen Karten wurden anschließend zu einer Gesamtkarte und einer Tabelle zusammengefasst. Damit ergeben sich für Baden-Württemberg die in Abbildung x dargestellten fünf Bereiche mit jeweils unterschiedlichen Klimaänderungsfaktoren. Durch räumliche Zuordnung zu einem der 5 Bereiche stehen Klimaänderungsfaktoren für Einzugsgebiete im Land und für die jeweiligen Jährlichkeiten zur Verfügung. Die entsprechenden Werte sind in der Abbildung 11 zusammengestellt. Gemäß der dort abgebildeten Tabelle können folgende Ergebnisse für die zukünftige Entwicklung der Hochwasserabflüsse festgehalten werden:

- Insbesondere die kleineren und mittleren Hochwasserereignisse werden voraussichtlich landesweit zunehmen.
- Der Hochwasserkenwert für die Jährlichkeit 100 Jahre erhält einen Zuschlag von 15 % bzw. 25 %.
- Das Extremereignis HQ₁₀₀₀ ist für das Zukunftsszenario im Vergleich zu den gegenwärtigen Verhältnissen unverändert, da die Extremwertstatistik auf der vorhandenen Datenbasis eine Änderung dieses Kennwertes gegenwärtig nicht rechtfertigen würde.

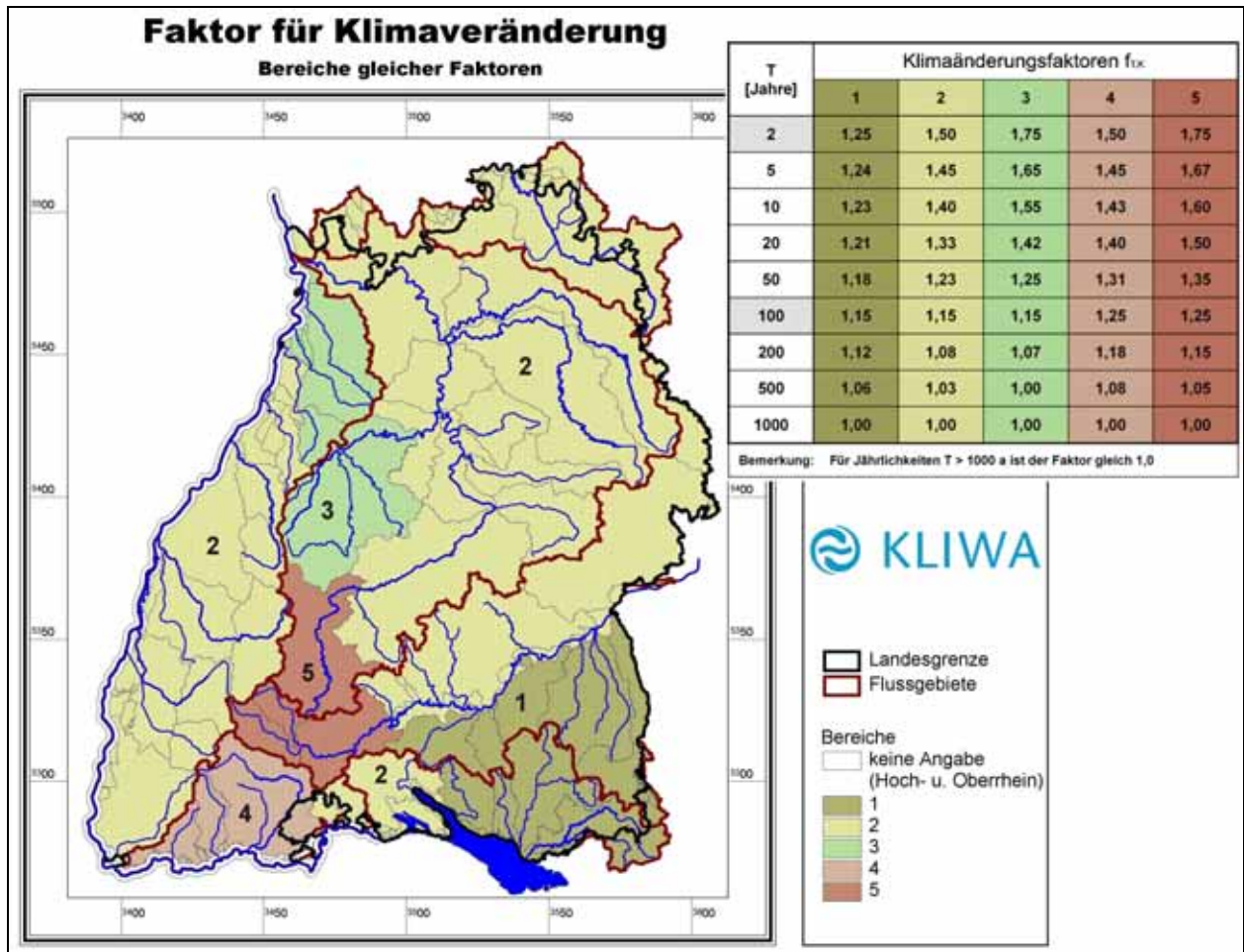


Abb. 11: Regionale Klimaänderungsfaktoren in Baden-Württemberg

5. Anpassung der Hochwasserschutzplanungen

Vor diesem Hintergrund galt es aus Vorsorgegründen, für den Bereich des Hochwasserschutzes eine Anpassungsstrategie zu entwickeln, die zwar die mögliche Entwicklung der nächsten Jahrzehnte berücksichtigt, aber auch den bestehenden Unsicherheiten Rechnung trägt. Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf (z.B. bei neuen Erkenntnissen der Klimaforschung) anpassbar sind („flexible and no regret“-Strategie).

Die Auswertungen gaben Anlass, den bisherigen Weg bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu modifizieren und auf Grund des Klimawandels einen „Lastfall Klimaänderung“ zu berücksichtigen. Anhand von Fallbeispielen aus der Praxis wurde dazu nachgewiesen, dass eine Berücksichtigung der Auswirkungen der Klimaänderung bei technischen Hochwasserschutzmaßnahmen in den meisten Fällen zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau zumindest entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Nachträgliche Anpassungen sind hingegen meist mit sehr hohen Kosten verbunden.

Der Lastfall Klimaänderung soll deshalb künftig bei Planungen von neuen Hochwasserschutzmaßnahmen mit untersucht werden. Dabei ist aufzuzeigen, welche Konsequenzen sich durch den Lastfall auf die Auslegung der Maßnahmen ergeben und welche Mehrkosten dadurch zu erwarten sind. Auf Grund der dann vorliegenden Erkenntnisse soll dann entschieden werden,



inwieweit die notwendige Anpassung an den künftigen Klimawandel bereits jetzt bei der Ausführung berücksichtigt werden soll. Dabei sind auch Möglichkeiten für eine spätere Nachrüstung in Betracht zu ziehen.

Die Anwendung des Lastfalls Klimaänderung ist für Hochwasserschutzkonzeptionen, mit deren Umsetzung bereits begonnen wurde bzw. deren Umsetzung bereits abgeschlossen ist, derzeit nicht vorgesehen.

5.1 Erhöhung der Bemessungsabflüsse

Dem Lastfall Klimaänderung müssen erhöhte Bemessungsabflüsse zugrunde gelegt werden. Dies erfolgt durch einen Zuschlag („Klimaänderungsfaktor“) zum derzeit gültigen Bemessungswert (z.B. HQ_{100}). In Baden-Württemberg ergeben sich gemäß Abbildung 11 je nach Wiederkehrzeit (Jährlichkeit T_n) regional unterschiedliche Klimaänderungsfaktoren.

Für die Abflüsse beim Lastfall Klimaänderung ($HQ_{T_n, K}$) können die aus der Hochwasserregionalisierung oder hydrologischen Modellberechnung vorliegenden Hochwasserkennwerte HQ_{T_n} direkt mit dem Klimaänderungsfaktor $f_{T, K}$ erhöht werden:

$$HQ_{T_n, K} = f_{T, K} \cdot HQ_{T_n}$$

HQ _T (Regionalisierung)		Klimaänderung HQ _{T,K} = f _{T,K} x HQ _T	
T (Jahre)	HQ _T (m ³ /s)	Klimaänderungsfaktor	HQ _{T,K} (m ³ /s)
2	140	1,5	210
5	205	1,45	298
10	250	1,40	350
20	292	1,33	388
50	346	1,23	425
100	388	1,15	446
200	434	1,08	468
500	504	1,03	519
1000	543	1,00	543

Abb. 13: Lastfall Klimaänderung Beispiel Forbach/Murg

Die Vorgehensweise beim Lastfall Klimaänderung bei neuen Hochwasserschutzplanungen ist in Baden-Württemberg in den Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“ mit einer Sammlung von Beispielen aufgenommen worden. Zusammen mit der Regionalisierung der Hochwasserkennwerte „Abflusskennwerte in Baden-Württemberg“, die flächendeckend für Baden-Württemberg vorliegt, ist damit die Berücksichtigung

sichtigung des Klimawandels bei den Auswirkungen auf die Hochwasserabflüsse auf eine landeseinheitliche Basis, die in der Praxis leicht zu handhaben ist, gestellt worden.

5.2 Beispiele

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen verdeutlichen, wie unter dem Aspekt erhöhter Bemessungswerte, also der Berücksichtigung des Lastfalls Klimaänderung, bei der Umsetzung von Planungen vorgegangen werden kann:

- Planung von Hochwasserrückhaltebecken: Eine spätere Anpassung eines Hochwasserrückhaltebeckens (HRB), das nicht auf die hydrologischen Änderungen infolge des Klimawandels ausgelegt ist, ist in der Regel sehr kostenträchtig, sofern eine Anpassung überhaupt technisch möglich ist. Es sind nicht nur die technischen Einzelbauwerke eines HRB anzupassen, sondern auch das notwendige Beckenspeichervolumen, das bei Zunahmen der Niederschlagshöhen und Niederschlagsdauern sich deutlich vergrößern kann.
- Planung eines Hochwasserdammes: Der Damm wird nach derzeitigen Vorgaben gebaut, es werden jedoch zusätzliche Maßnahmen vorgenommen, die nach bisherigen Planungsgesichtspunkten nicht erforderlich wären. Zum Beispiel wird zusätzlich ein Geländestreifen auf der Luftseite beansprucht und freigehalten, der eine zukünftige notwendige Dammerhöhung ohne zusätzliche Probleme ermöglicht.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Änderung und Anpassung nicht oder nur sehr aufwändig möglich ist (z.B. Brücken, Durchlässe), sollten sofort auf zukünftige erhöhte Bemessungsgrößen beim Wasserstand ausgelegt werden.
- Neue Bauobjekte, bei denen eine zukünftige Anpassung weniger problematisch ist (z.B. Ufermauern), sollten hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale (z.B. der Statik) über den derzeitigen Bedarf hinaus so ausgelegt werden, dass eine ggf. später notwendig werdende Anpassung (z. B. Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) kostengünstig möglich ist.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Kleinere und mittlere Hochwasserereignisse werden voraussichtlich infolge des Klimawandels landesweit zunehmen. Für den Hochwasserabfluss der Wiederkehrzeit 100 Jahre wird zu einem Zuschlag von 15 % bzw. 25 % zu den bisherigen Hochwasserkennwerten bei der Bemessung von neuen Hochwasserschutzanlagen geraten. Es ist aber zu beachten, dass die Zukunftsszenarien insbesondere die Ergebnisse der Klimamodelle noch mit Unsicherheiten behaftet sind.

Die Simulationen der Klimaentwicklungen bis zum Jahr 2100 mögen für die Beantwortung von Klimafragen hilfreich sein. Für die Beantwortung von wasserwirtschaftlichen Fragestellungen insbesondere solche zum Hochwasserschutz ist dieser Betrachtungszeitraum zu weit gefasst und mit zu großen Unsicherheiten behaftet. Da das zukünftige Niederschlagsverhalten insbesondere von der Entwicklung der mittleren Lufttemperatur und der Wetterlagen abhängig ist, können Anlagen des technischen Hochwasserschutzes bei einem zu breiten Spektrum möglicher Entwicklungen nicht wirtschaftlich dimensioniert werden.

Auf der anderen Seite kann man nicht die Augen verschließen und so tun, als würde sich nichts verändern. Vielmehr ist in Zeiten des Klimawandels dem Vorsorgeprinzip der Wasserwirtschaft verstärkt Beachtung zu schenken. Mit KLIWA wird versucht, Grundlagen für eine vorausschauende Daseinsorge zu entwickeln. Da auch neue Hochwasserschutzplanungen wirtschaftlich sein müssen, sind insbesondere flexible Lösungsansätze, die genauso Möglichkeiten zum Nachjustieren offen lassen, gefragt. Insgesamt ist in der Wasserwirtschaft zur Lösung der



kommenden Aufgaben, die durch den Klimawandel ausgelöst werden, ein pragmatisches Vorgehen erforderlich.

Die bisherigen Erkenntnisse haben nicht zuletzt auch unter Vorsorgegesichtspunkten bereits zu konkreten Konsequenzen geführt. Bei der Bemessung von neuen Hochwasserschutzplanungen werden die erwarteten Folgen des Klimawandels bereits jetzt berücksichtigt.

Die bislang gewonnenen Erkenntnisse beinhalten noch Unsicherheiten. Mit den Fortschritten der weltweiten Klimaforschung und der Verbesserung der Modellierungsinstrumente werden sich die bisherigen Erkenntnisse zwangsläufig auch fortentwickeln müssen. Mit der Aufstellung von Wasserhaushaltsmodellen für die einzelnen Flussgebiete können weitere Untersuchungen verhältnismäßig einfach weitergeführt werden.

Die durch den Klimawandel verschärfte Hochwasserproblematik zeigt aber auch, dass eine Hochwasserschutz-Strategie nicht nur auf der Säule des technischen Hochwasserschutzes gegründet sein sollte, sondern dass die beiden anderen Elemente Hochwasser-Flächenmanagement und Hochwasservorsorge verstärkt verfolgt werden müssen, damit Land, Gemeinden und jeder betroffene Bürger vor den zunehmenden Hochwassergefahren gut gerüstet sind.

7. Literatur

1. Bremicker M. (2000): *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*, Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11, Institut für Hydrologie der Universität Freiburg
2. IPCC (2001): *Climate change 2001, Summary for Policymakers*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge
3. Ihringer J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik, KLIWA-Berichte Heft 4, München
4. Katzenberger B.: Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA-Handlungsempfehlungen, KLIWA-Berichte Heft 4, München
5. KLIWA (2002): *Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern*, KLIWA-Berichte, Heft 2, Karlsruhe
6. KLIWA (2005): *Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern*, KLIWA-Berichte, Heft 5, München
7. KLIWA (2005): *Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern* KLIWA-Berichte, Heft 6, München
8. Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (2005): *Klimawandel in Baden-Württemberg*, Pressemitteilung des UVM vom 04.03.2005
9. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Leitfaden „*Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes*“, Karlsruhe
10. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005): Abflusskennwerte in Baden-Württemberg Teil 1 Hochwasserabflüsse
11. Straub H.: Langzeitverhalten von hydrologischen Größen, KLIWA-Berichte Heft 4, München

Das EU-Projekt ESPACE: Hochwasserschutzplanung für die Fränkische Saale unter Berücksichtigung des Klimawandels

Leonard Rosentritt
Wasserwirtschaftsamt Bad Kissingen

1. Allgemeines

Die Fränkische Saale ist ein rechter Nebenfluss des Maines. Sie liegt mit Ausnahme einer knapp 20 km langen Strecke oberhalb der Mündung in der Region Main-Rhön. Sie ist daher neben dem Main das dominierende Gewässer in dieser Region. Sie entspringt östlich von Bad Königshofen nahe der Landesgrenze zu Thüringen und mündet nach ca. 140 km bei Gemünden in den Main. Bei einem Höhenunterschied zwischen Quelle und Mündung von rd. 160 m hat sie ein mittleres Fließgefälle von 1,26 ‰. Das Einzugsgebiet mit einer Gesamtgröße von 2765 km² hat eine gedrungene Form. Die mittlere Breite in Nordwest-Südost-Richtung beträgt rd. 40 km, die mittlere Länge in Südwest-Nordost-Richtung rd. 75 km. Einziges größeres Nebengewässer von links ist die Lauer, während von rechts viele, vor allem aus der Rhön kommende Seitenbäche zufließen, die zum Teil sogar größer sind als die namensgebende Saale selbst (Milz, Streu). Daher wird sie auch als "Dachrinne der Rhön" bezeichnet. Grund für diesen Aufbau des Einzugsgebietes ist natürlich die Geologie, so liegt die Saale unterhalb der Einmündung der Streu im Wesentlichen auf der Grenze zwischen Buntsandstein und Muschelkalk. Bis zur Streu ist die Fränkische Saale geprägt durch die Keuperlandschaft des Grabfeldes mit seiner Niederschlagsarmut, intensiver landwirtschaftlicher Nutzung und Waldarmut. Unterhalb Bad Neustadt nimmt die Bedeutung des landschaftlich sehr reizvollen Saaletales als Erholungsraum immer mehr zu, wozu natürlich auch die Badeorte Bad Neustadt, Bad Bocklet und Bad Kissingen beitragen.

Der Wasserhaushalt der Fränkischen Saale ist unausgeglichen, wie die folgende Tabelle der charakteristischen Abflüsse am Pegel Bad Kissingen-Golfplatz ($A_{E0} = 1587 \text{ km}^2$, Fluß-km 58,0 Jahresreihe 1930/87) zeigt:

	Winter	Sommer	Jahr
NQ m ³ /s	0,94	0,22	0,22
MNQ m ³ /s	4,58	3,06	2,84
MQ m ³ /s	16,50	7,40	11,90
MHQ m ³ /s	109,00	35,50	120,00
HQ m ³ /s	290,00	206,00	330,00

Sehr kleinen Niedrigwasserspenden im Sommer stehen somit große Hochwasserabflussspenden gegenüber. Neben der Niederschlagsarmut des südöstlichen und östlichen Einzugsgebietes macht sich hier bemerkbar, dass kaum speicherfähige Gesteine anstehen, die die Grundwasserneubildung fördern und abflussausgleichend wirken könnten.

2. Bestehende Hochwasserschutzanlagen

In den 60er, 70er und 80er Jahren des letzten Jahrhunderts wurde der Schutz von zahlreichen Siedlungen durch den Bau von Hochwasserschutzanlagen verbessert. Dies waren Hochwasserschutzmauern, Hochwasserschutzdeichen oder Gewässerausbauten durch Profilvergrößerungen und Begradigungen. Die so geschützten Ortschaften liegen vor allem an den Zuflüssen zur Fränkischen Saale und an deren Oberlauf.



Zwei Beispiele hierfür sind:

Hochwasserschutz Bad Neustadt 1. Bauabschnitt:

Durch den Bau von Hochwasserschutzmauern und –deichen entlang der Brend ist ein Teil der hochwassergefährdeten Ortslage von Bad Neustadt vor einem 100-jährlichen Hochwasser geschützt. Ein Teil der Ortslage ist immer noch gefährdet, da der 2. Bauabschnitt bis heute noch nicht verwirklicht wurde.

Hochwasserschutz Ostheim vor der Rhön:

Durch Profilvergrößerungen und Hochwasserschutzmauern integriert in der alten Stadtmauer wurde die Ortslage vor dem Hochwasser der Streu, eines Wildbaches, geschützt.

Insgesamt wurden so 16 Ortschaften vor Hochwasser geschützt. Die Bemessungsabflüsse für die Hochwasserschutzanlagen basieren auf statistischen Auswertungen der Jahre 1939/1969. Im Hinblick auf eventuell eintretende Auswirkungen der Klimaveränderung müssen diese natürlich überprüft werden. Sollte sich bei dieser Überprüfung herausstellen, dass der Schutzgrad der Anlagen nicht mehr ausreichend ist, werden Anpassungsmaßnahmen entweder durch Erhöhung der Schutzeinrichtungen oder durch Hochwasserrückhaltung erforderlich.

Für zahlreiche auch noch von Hochwasser bedrohte Ortschaften lagen Studien und Planungen zum Hochwasserschutz vor, die jedoch nicht umgesetzt werden konnten. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass

- In den 70er, 80er und 90er Jahren des letzten Jahrhunderts im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale nur Hochwasser kleinerer Jährlichkeiten aufgetreten sind. Durch Fehlen der von größeren Hochwasser wurde in der Bevölkerung die Hochwassergefahr nicht mehr als groß angesehen und somit die Notwendigkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen als gering erachtet.
- Das „grüne“ Bewusstsein in der Bevölkerung stieg in den 80er und 90er Jahren stark an. Somit waren Gewässerausbauten und bauliche Eingriffe in den Ortschaften, die von der Bevölkerung als sehr negativ bewertet wurden, nicht bzw. nur schwer umsetzbar.

3. Gewässerentwicklungsplan

Vor allem die Hochwasser an Donau, Elbe und Rhein in den letzten Jahren wurden in Bayern zum Anlass genommen, für alle Gewässer 1. und 2. Ordnung und für bedeutende Gewässer 3. Ordnung, Gewässerentwicklungspläne aufzustellen bzw. aufstellen zu lassen.

Die vorrangigen Ziele der Gewässerentwicklungspläne sind:

- Der Erhalt und die Wiederherstellung naturnaher Zustände am Gewässer und in der Aue
- Die Verbesserung der Strukturgefüge ausgebauter Gewässerabschnitte in Ortsbereichen, ohne Einbußen für den Hochwasserschutz und die Sicherheit der Anlieger.
- Vorbeugender Hochwasserschutz für An- und Unterlieger durch den Schutz und Erhalt der natürlichen Überschwemmungsgebiete sowie gezielte Maßnahmen am Gewässer und in der Aue
- Das Aufzeigen, wo technischer Hochwasserschutz erforderlich ist
- Die Förderung der Eigenentwicklung des Gewässers in der freien Landschaft, soweit Flächen zur Verfügung stehen.

Der Gewässerentwicklungsplan der Fränkischen Saale wurde Ende des Jahres 1999 der Öffentlichkeit vorgestellt und war der erste in Bayern der den vorbeugenden Hochwasserschutz als Ziel mit Maßnahmen hinterlegte.

Folgende Maßnahmen aus dem Plan dienen dem vorbeugenden Hochwasserschutz:

- Ausweisung der Überschwemmungsgebiete
- Auf der Grundlage des HW1909 ist an der Fränkischen Saale ein Überschwemmungsgebiet festgesetzt. Um dieses mit neuen Erkenntnissen zu überprüfen wurde für die gesamte Fränkische Saale inzwischen eine hydraulische Berechnung (teilweise mit 1-D-Modell; teilweise mit 2-D-Modell) durchgeführt. Erforderliche Änderungen der Überschwemmungsgebietfestsetzung wurden durchgeführt bzw. sind beantragt.
- Für die Nebenflüsse der Fränkischen Saale, soweit sie Gewässer 2. Ordnung sind, wurden die Überschwemmungsgebietsgrenzen mit 2-D-Modellen neu berechnet. Die Festsetzungsverfahren werden eingeleitet.
- Laufverlängerungen
- In den Jahren 2002 und 2003 wurden vier Gewässerausbaumaßnahmen durchgeführt. Alleine durch die Öffnung des Mäanders Aschach, der um 1850 verfüllt wurde und 2002 wieder geöffnet wurde, ist die Fränkische Saale um rd. 500 m länger geworden.
- Aktivieren von zusätzlichen Rückhalteräumen durch:
 - Abtrag von Uferrehnen
 - Anlage von Auwäldern und Auengehölzen
 - Anlage von ungesteuerten Rückhalteräumen
- Erhöhung der Rauigkeit des Gewässers durch Zulassen der Eigenentwicklung
- Anpassung der Bodennutzung

4. Niederschlags – Abfluss - Modell (N/A-Modell)

Zum Abschluss der gesamten Grundlagenplanungen ist dann ein Niederschlags-Abfluss-Modell (N/A-Modell) als Wasserhaushaltsmodell für die Fränkische Saale und ihr gesamtes Einzugsgebiet aufgestellt worden. Mit diesem N/A-Modell sollen zuverlässige Planungs- und hydrologische Grundlagen geschaffen werden, die für alle ingenieurmäßigen Planungen an der Fränkischen Saale bzw. in deren Einzugsgebiet erforderlich sind.

Mit Hilfe des N/A-Modells sollen dann auf der Basis des Ist-Zustandes vor allem die Auswirkungen von im Einzugsgebiet geplanten bzw. durchgeführten Maßnahmen im Hinblick auf den vorbeugenden Hochwasserschutz abgeschätzt bzw. belegt werden. Unter anderem sollen mit dem Modell folgende Fragestellungen besser beantwortet und insbesondere quantifiziert werden:

- Wie und in welcher Größenordnung wirkt sich die Anlage von Auwäldern auf die Hochwasserwellen bei Unterliegern aus?
- Wie und in welcher Größenordnung wirken sich Laufverlängerungen der Gewässer auf die Hochwasserwellen bei Unterliegern aus?
- Wie und in welcher Größenordnung wirkt sich die Erhöhung von Rauigkeiten in den Gewässern und in den Vorländern auf die Hochwasserwellen bei Unterliegern aus?
- Wie verändert sich die Grundwasserneubildung bei o.g. Maßnahmen?
- Welche Auswirkungen haben Abfluss reduzierende Maßnahmen in Siedlungsgebieten auf die Hochwasser- bzw. Abflusssituation?

Auch können mit dem N/A-Modell vollständige Wasserbilanzen erstellt werden, auf deren Grundlage mögliche Szenarien der Flächennutzung und Bewirtschaftung simuliert werden.

Darüber hinaus wurde als Aufsatz auf das N/A - Modell ein Online-Hochwasser-vorhersagemodul (NASIM-HWV) entwickelt. Somit wird das Modell zukünftig auch im Rahmen der Hochwasserprognose seinen Einsatz finden. Die Ergebnisse der Echtzeit-Hochwasservorhersagen werden die Vorwarnzeiten wesentlich erhöhen und somit die Durchführung von Hochwasserabwehrmaßnahmen vor allem im Unterlauf der Fränkischen Saale wesentlich erleichtern. Darüber kann durch die Ergebnisse auch die Hochwasservorhersage am Main wesentlich verbessert werden.



5. Derzeitige Planungen zum Hochwasserschutz von Siedlungen

Im Januar 2003 lief an der Fränkischen Saale nach 1909 wieder ein 100-jährliches Hochwasser ab. Alleine in Bad Kissingen waren Schäden in Höhe von 6 Mio € zu verzeichnen.

Dies erst alarmierte die Menschen im Einzugsgebiet und führte nun wieder zum Ruf nach Hochwasserschutz. Wobei nicht nur baulichen Maßnahmen in Siedlungsbereichen gefordert wurden, sondern vor allem auch die Errichtung von Hochwasserrückhaltebecken.

Als erstes wurde die Planung zum Hochwasserschutz von Bad Kissingen aufgestellt. Die Planungen, die Stadt Bad Kissingen vor Hochwasser zu schützen, haben eine lange Tradition. Der den bisherigen Planungen zugrunde liegende Bemessungsabfluss von $330 \text{ m}^3/\text{s}$ (= HQ_{100}) wurde jedoch im Hinblick auf den Klimawandel in Frage gestellt bzw. diskutiert. Die jetzige Planung sieht den Hochwasserschutz in zwei Schritten vor:

1. Hochwasserschutz im Stadtgebiet durch Deiche, Mauern und Kombination von Mauern mit mobilen Elementen. Der Bedeichungshöhe wird als Bemessungsabfluss der Abfluss des $HW_{\text{Januar 2003}}$ (= $330 \text{ m}^3/\text{s}$ = HQ_{100}) plus Freibord zugrunde gelegt. Die Höhen der dadurch notwendigen Mauern bzw. Deiche sind aus städtebaulicher Sicht gerade noch verträglich. Die Maßnahmen lassen sich relativ schnell umsetzen.
2. Die Auswirkungen der Klimaveränderung werden bei Bedarf durch den Bau von Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet ausgeglichen.

Der gleiche Grundsatz galt auch für die Planungen zum Hochwasserschutz von Aura, Westheim, Diebach und anderen gefährdeten Ortschaften.

Nachdem die Planung zum Hochwasserschutz Bad Kissingen, mit der im Februar 2003 begonnen wurde, im Jahr 2004 genehmigt und die Finanzierung der Maßnahme sichergestellt wurde, konnte im Oktober 2004 mit dem Bau begonnen werden. Mitte des Jahres 2006 wurde das Projekt in den wesentlichen Teilen abgeschlossen

6. Untersuchung von Hochwasserrückhalteräumen

Das im Januar 2003 abgelaufene Hochwasser hat auch gezeigt, dass noch erhebliche Gefährdungspotentiale an der Fränkischen Saale und ihren Zuflüssen vorhanden sind. Die beobachteten Abflüsse lagen zum Teil über den bis dahin registrierten Hochwasserscheiteln und wiesen Jährlichkeiten bis zum HQ_{100} auf.

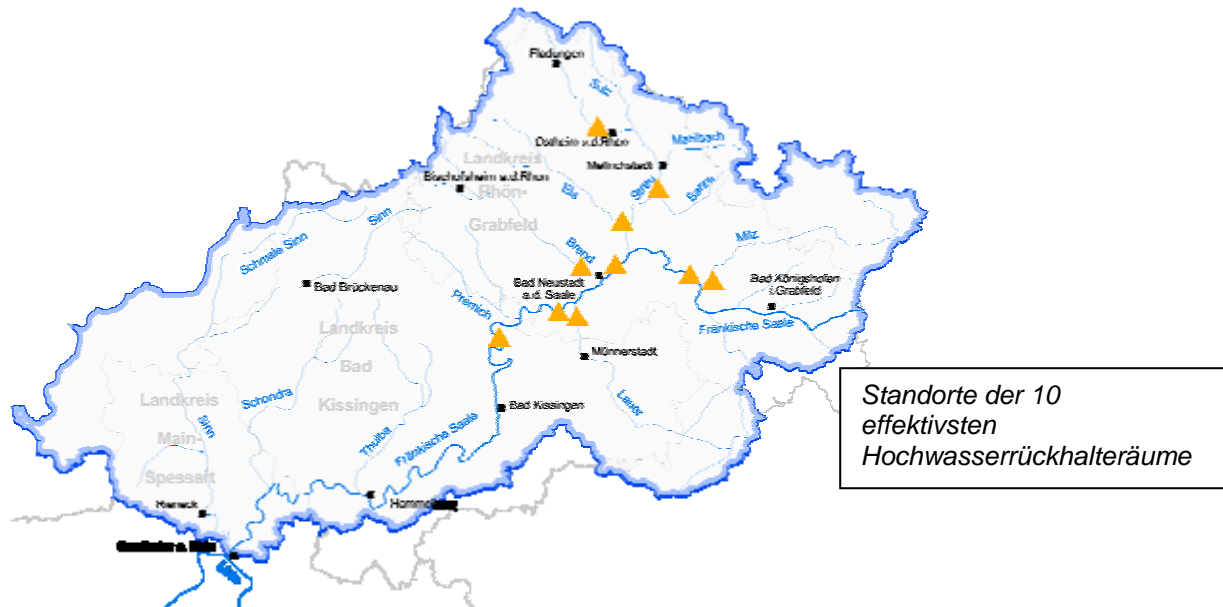
Um fachlich fundierte Aussagen und Argumente für oder gegen Hochwasserrückhaltebecken zu gewinnen, wurde aufbauend auf dem N/A-Modell der Fränkischen Saale die Studie „Nachweis von Rückhalteräumen an der Fränkischen Saale“ aufgestellt.

Aufgabenstellung der Untersuchung war:

- Die Ermittlung des vorhandenen Rückhaltepotenzials für große Abflüsse im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale.
- Die Abbildung und Parametrisierung der potenziellen Rückhalteräume im bestehenden N/A-Modell
- Die Ermittlung der Effektivität der Rückhalteräume
- Durchführung von Variantenberechnung verschiedener Kombinationen von Speichern.

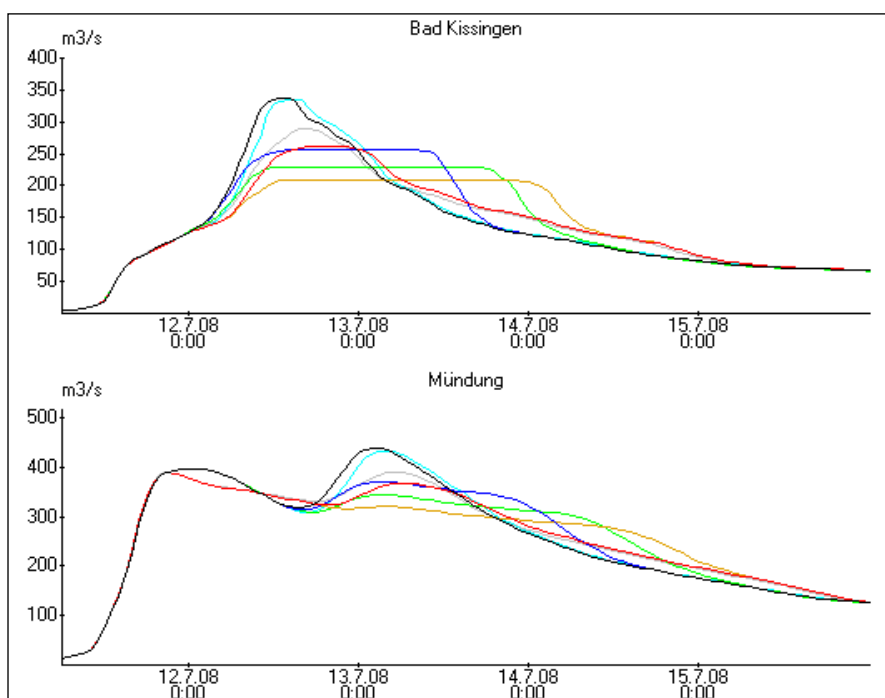
Es wurden insgesamt 62 vorgeschlagene Standorte untersucht. Bei der Restriktions- und Effektivitätsprüfung schieden 43 Speicherstandorte aus.

Mit den verbliebenen 19 effektiven Standorten wurden verschiedene Variantenberechnungen durchgeführt.



Folgende Aussagen lassen sich aufgrund der Untersuchung treffen:

- Auf Grund seines großen Volumens besitzt nur der Speicher Bad Bocklet als einzeln betriebener Speicher einen nennenswerten Einfluss auf den Hochwasserrückhalt.
- Durch die Aktivierung von 10 Speicherstandorten kommt es zu einer deutlichen Dämpfung der Hochwasserwelle in der Fränkischen Saale.
- Pro Speichergruppe (Speicher an einem Nebengewässer) ist bereits ein nennenswerter Einfluss auf die Abflussminderung am Gebietsausgang festzustellen.
- Durch die unterschiedlichen Wellenlaufzeiten kann es zu ungünstigen Überlagerungen kommen.
- Die Retentionsmaßnahmen im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale können unter Umständen zu einer Verschlechterung des Abflussgeschehens im Main führen, da dort die Welle der Fränkischen Saale vorweg läuft.



Abflussganglinien der verschiedenen Varianten am Pegel Bad Kissingen und an der Mündung



7. Kosten-Nutzen-Analyse für die Rückhalteräume

Für eine Entscheidungsfindung zur Realisierung von Hochwasserschutzprojekten sind diese jedoch noch einer Nutzen-Kosten-Analyse zu unterziehen. Grundlage für die Untersuchung der Hochwasserrückhaltebecken sind die Ergebnisse der Studie „Nachweis von Rückhalteräumen an der Fränkischen Saale“ unter besonderer Berücksichtigung ökonomischer Bewertungskriterien. Aus der Vorgängerstudie wurde die Empfehlung der Realisierung eines Hochwasserrückhaltebeckens bei Bad Bocklet ohne Grundsee mit einem Speichervolumen von 3,3 Mio. m³ als Variante 1 und die Realisierung von 10 effektiven Speichern an den Nebengewässern und an der Fränkischen Saale als Variante 2 detaillierter geprüft.

Auf der Basis vorhandener Wassertiefengrids wurde eine Schadenspotenzialberechnung für den Istzustand und beide Planvarianten für Abflüsse verschiedener Jährlichkeiten durchgeführt. Dem Nutzen durch die Minderung der Schadenserwartungen stehen die Investitions- und laufenden Kosten der Rückhaltemaßnahmen gegenüber. Diese wurden detailliert für die geplanten Becken ermittelt.

Im Rahmen der Analyse wurde der ökonomische Effizienznutzen der Varianten berechnet und ein analytischer Nutzen-Kosten-Vergleich durchgeführt. Nicht monetär bewertbare Kriterien wurden nur verbal beschrieben und gingen nicht in die Bewertung mit ein.

Das Schadensbild im Untersuchungsgebiet ist für den Istzustand gekennzeichnet durch bereits relativ hohe Schäden für kleine HQ und einen überproportionalen Schadensanstieg (Faktor 3,4) zwischen einem HQ₁₀₀ und einem HQ_{Extrem}. Die Schadensminderung wirkt nur bei einem HQ₁₀₀ und dem HQ₅₀. Beim HQ₁₀ und HQ₂₀ findet nur eine marginale Schadensreduktion statt, beim HQ_{Extrem} keine.

Die Untersuchungen zeigen, dass keine der untersuchten Rückhaltevarianten als optimal bezeichnet werden kann. Die berechneten Wirtschaftlichkeitskriterien lassen zwar eine relative Vorteilhaftigkeit der Variante 1 gegenüber der Variante 2 erkennen, die absolut erreichbaren ökonomischen Schutzgrade rechtfertigen jedoch die Realisierung der einen oder anderen Variante für sich alleine gesehen nicht.

8. Das EU-Projekt ESPACE

Im Rahmen des EU-Projektes ESPACE wird die Fragestellung behandelt, wie der Klimawandel in der raumbezogenen Planung berücksichtigt werden kann. Da die Datengrundlage im Planungsraum Fränkische Saale sehr umfangreich war, wurde die Fränkische Saale als Fallstudie in das Projekt aufgenommen, um hier modellhaft die Auswirkungen des Klimawandels und die daraus zu ziehenden Konsequenzen zu beschreiben. Es wurden verschiedene Szenarien der Klimaänderung in das N/A-Modell eingearbeitet. Hieraus wurden die damit verbundene Veränderung des Abflussregimes, der Bemessungsabflüsse, der Überschwemmungsgebiete und der Schadenspotenziale ermittelt. Ein wichtiges Ergebnis aus der Modelluntersuchung ist die Bestätigung der 15-prozentigen Erhöhung des Abflusses beim HQ₁₀₀.

Mit den veränderten Parametern ist jetzt eine erneute Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen. Hierbei sind jedoch auch planerische Alternativen mit einzubeziehen, da die Vergrößerung der Schadenspotenziale durch die Auswirkungen des Klimawandels zwar eine Verbesserung der ökonomischen Effizienz bewirkt, aber für sich alleine noch nicht zu einem Kosten-Nutzen-Faktor von 1 führen wird.

Vor allem sind hier noch folgende Untersuchungen:

- Örtliche Schutzmaßnahmen in Form von Hochwasserschutzmauern, Verwallungen, Deiche etc.
- Einzelobjektschutz besonders schadensintensiver Einzelobjekte
- Modifizierte Steuerstrategie für potenzielle Hochwasserrückhaltebecken mit dem Ziel, eine optimale Schutzwirkung bei kleineren Hochwasser-Jährlichkeiten (HQ_{10} , HQ_{20}) auszuüben.
- Kombination aus örtlichen Schutzmaßnahmen mit Hochwasserrückhaltebecken, wobei die Steuerstrategie der Becken die Bemessungsabflüsse für die örtlichen Schutzmaßnahmen optimal aufeinander abzustimmen sind.

Ein kombinierter Maßnahmenkatalog ist hydrologisch, hydraulisch zu konzipieren und einer erneuten Kosten-Nutzen-Analyse zu unterziehen.

9. Schluss

Im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale sind umfangreich Untersuchungen und Planungen zur Verbesserung des Hochwasserschutzes durchgeführt worden. Im Rahmen des EU-Projektes ESPACE wurden hierbei auch die Auswirkungen des Klimawandels im Einzugsgebiet ermittelt. Mit den durch den Klimawandel einhergehenden Veränderungen hinsichtlich des Bemessungsabflüsse, der Überschwemmungsgebiete und v.a. der Schadenspotenziale sind noch alternative Schutzkonzepte und Kosten-Nutzen-Analysen hierfür durchzuführen.

Mit diesen Untersuchungen und deren Ergebnissen kann dann die öffentliche Diskussion hinsichtlich der Notwendigkeit und der Wirtschaftlichkeit von Hochwasserschutzmaßnahmen, speziell Hochwasserrückhaltebecken im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale geführt werden. Hiermit wird ein Beitrag für eine bestmögliche Lösungsstrategie zum nachhaltigen Hochwasserschutz im Gebiet der Fränkischen Saale geleistet.



Historische Hochwasserinformationen und deren Nutzung

Helmut Straub

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Einleitung

Bestandteil des Vorgehenskonzeptes des Kooperationsvorhabens KLIWA ist im Teil A „Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushaltes“ das Projekt A 2.1.4 „Rückverlängerung von Zeitreihen extremer Hochwasserabflüsse“. Die Rückverlängerung von Zeitreihen hat zum Ziel, bestehende Zeitreihen um Abflüsse bedeutender Hochwasserereignisse der älteren Zeit (vor Beginn der regelmäßigen Auswertung der Pegelraten) zu ergänzen. Wenn diese Daten in die Auswertungen der Pegelstatistik, die einen wichtigen Beitrag zur Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen leisten, einbezogen werden, verbessern sich deren Ergebnisse.

In einem ersten Schritt dazu wurden in Baden-Württemberg 2006 die historischen Hochwassermarken (und damit die extremen Wasserstände an den Gewässerstellen) erfasst und der wasserwirtschaftlichen Praxis zur EDV-gerechten Nutzung auf CD-ROM [1] bereitgestellt.

Diese historischen Informationen können heute von Bedeutung sein, um

- das Extremhochwasser festzulegen und die daraus sich ergebenden Überschwemmungsgebiete in Hochwassergefahrenkarten darzustellen,
- das Bemessungshochwasser für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes festzulegen (siehe Leitfaden des Landes Baden-Württemberg vom Juli 2005: „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“),
„Die Wasserstandsdaten der Hochwassermarken sind grundsätzlich bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu berücksichtigen, da die Hochwassermarken sich zum Teil auf extreme Hochwasserereignisse beziehen (z.B. Hochwasser vom Oktober 1824, Dezember 1882), deren höchste Wasserstände wesentlich höher waren als die Höchstwasserstände an den Pegeln seit Beginn der regelmäßigen Beobachtung.“
- hydrologische und hydraulische Modelle zu eichen.

Hier sollen die auf der CD vorliegenden Informationen zu den Hochwassermarken und deren Nutzung erläutert werden.

2. Historische Hochwassermarken

2.1 Hochwassermarken außerhalb Baden-Württemberg

In vielen Gemeinden Deutschlands gibt es Informationen zu den Wasserständen extremer Hochwasser, aber nur an wenigen Stellen sind sie als Hochwassermarken vor Ort sichtbar wie in Frankfurt am Main (Bild 1). Dort gibt es Marken seit dem Jahr 1342. Diese Marke gibt die Höhe des Wasserstandes bei dem sogenannten „Magdalenen-Hochwasser“ vom 21. Juli 1342 an; damals ereignete sich laut Glaser [2] („Klimageschichte Europas“) der „hydrologische Gau“. Dieses Hochwasser zerstörte damals die Brücken in Regensburg, Dresden, Würzburg und Frankfurt.



Abb. 1: Hochwassermarken am „Eisernen Steg“ in Frankfurt am Main

2.2 Hochwassermarken in Baden-Württemberg

Lange Zeit waren Hochwassermarken die einzige Möglichkeit, abgelaufene Hochwasserereignisse und deren Auswirkungen auf besiedelte Flussauen zu dokumentieren und diese Kenntnisse an die folgenden Generationen weiterzugeben. In den Archiven liegen vor:

- „Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden“, 13. Heft „Die Hochwassermarken im Großherzogtum Baden“, herausgegeben im Jahre 1911 (für den ehemals selbständigen Landesteil Baden)
- „Königreich Württemberg, Hochwassermarken“ (aufgenommen im Jahre 1886) und „Hochwassermarken an württembergischen Gewässern“ (für den ehemals selbständigen Landesteil Württemberg).

Beide Unterlagen sind nicht veröffentlicht.

Die historischen (nach den damaligen Höhensystemen) Wasserstände (m+NN) beider Landesteile sind auf Datenträger erfasst und danach nach Vorgaben des Landesvermessungsamtes auf das aktuelle Höhensystem umgerechnet worden. Außerdem sind die Stellen, an denen sich die jeweiligen historischen Hochwassermarken befanden, georeferenziert worden, d.h. die Stellen (mit Hoch- und Rechtswerten) sind jetzt auf das heutige Gewässernetz bezogen (mit Angabe der derzeitigen Kilometrierung).

Die erfassten Hochwassermarken enthalten Marken der Zeitspanne zwischen 1511 bis ca. 1920; Marken nach ca. 1920 bis 1951 sind nur im württembergischen Teil vorhanden. Es bleibt

daher einer weiteren Bearbeitung vorbehalten, für die neuere Zeit (ungefähr ab 1920) eine repräsentative Anzahl von Hochwassermarken für das ganze Land in das System aufzunehmen.

3. Vorliegende Informationen zu den Hochwassermarken

3.1 Daten der „historischen“ Hochwassermarken

Unter „historischen“ Hochwassermarken werden Marken von Hochwasser-Ereignissen vor ca. 1920 verstanden, deren Scheitelabflüsse teilweise extreme Werte erreicht und zu Überschwemmungen geführt haben. Für Ereignisse der letzten Jahrzehnte liegen in der Regel Angaben zum Abfluss an den Pegeln vor. Für Ereignisse davor jedoch, vor allem für Ereignisse vor dem Beginn der regelmäßigen Beobachtung der Pegel, liegen oft nur Angaben zu Höchstwasserständen an bestimmten Gewässerstellen (meist nicht an Pegeln) in Form von Hochwassermarken vor; Angaben zu den Scheitelabflüssen fehlen. Die Ermittlung der Scheitelabflüsse für Ereignisse der älteren Zeit gestaltet sich jedoch oft als schwierig bis unmöglich, weil die dafür erforderlichen Grundlagen (z.B. Abfluss-Querschnitt, Gefälle) fehlen oder nur teilweise vorliegen.

Die Hochwassermarken geben die Wasserspiegelhöhe und die Lage am Gewässer an. Hochwassermarken gibt es heute nur an wenigen Gewässern vor Ort (siehe Abbildung 1); die meisten Hochwassermarken liegen nur noch in Verzeichnissen vor.

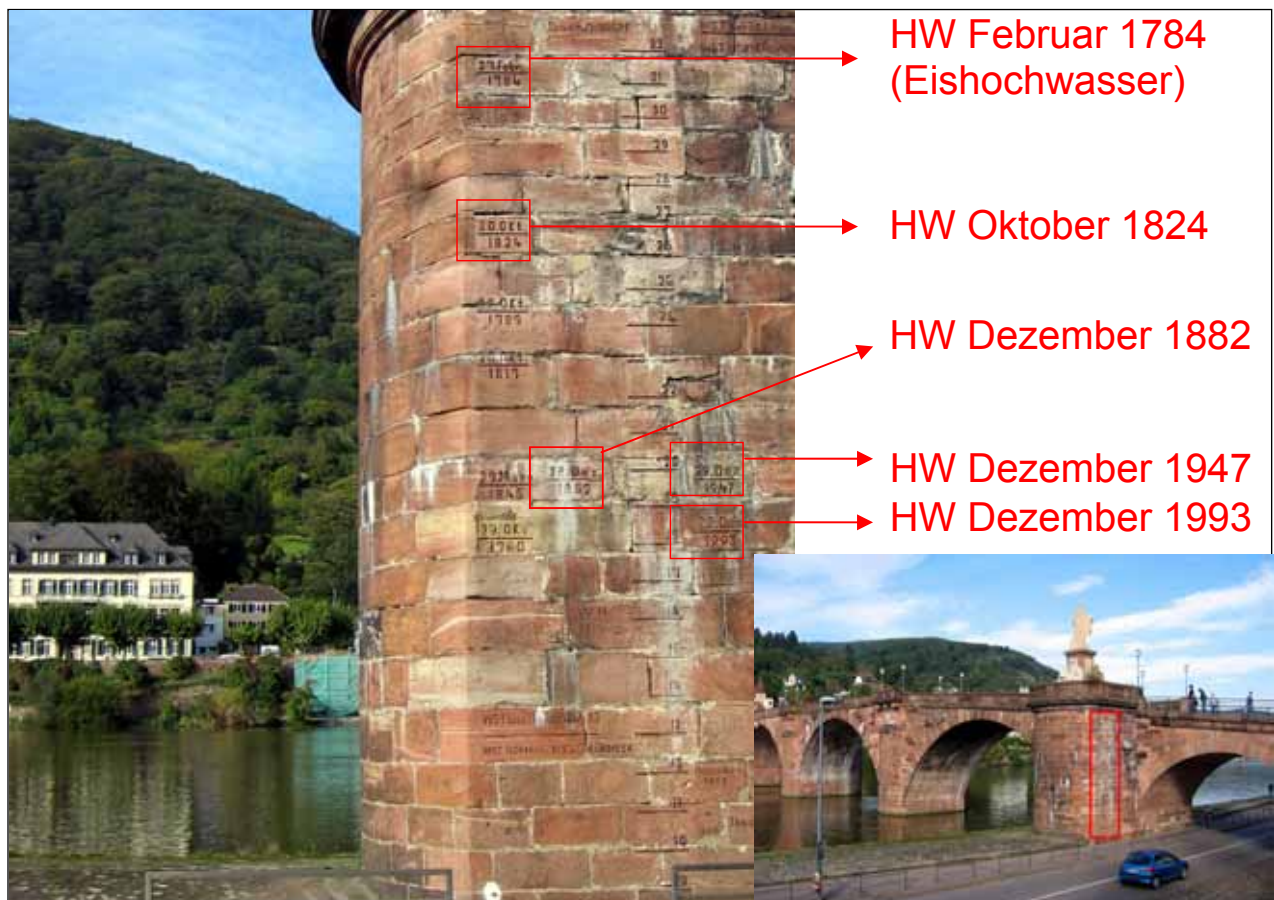


Abb. 2: Hochwassermarken in Heidelberg am Neckar.



Abbildung 2 zeigt Hochwassermarken über eine Zeitspanne von über 200 Jahren an der Karl-Theodor-Brücke in Heidelberg. Die älteste zeigt den Wasserstand beim Hochwasser vom Februar 1784; der Wasserstand war jedoch von Eisstau beeinflusst und ist daher nur bedingt für hydrologische Untersuchungen brauchbar. Die höchste hydrologisch bedeutsame Marke bezieht sich auf das Hochwasser vom Oktober 1824. Es ist ersichtlich, dass die Hochwasser der letzten Jahrzehnte (HW Dez. 1947, Mai 1978, Dez. 1993) kleinere Höchststände aufwiesen.

Die insgesamt ca. 6200 auf CD erfassten Marken verteilen sich auf alle größeren Gewässer des Landes (Abbildung 3, blau: Baden; rot: Württemberg).

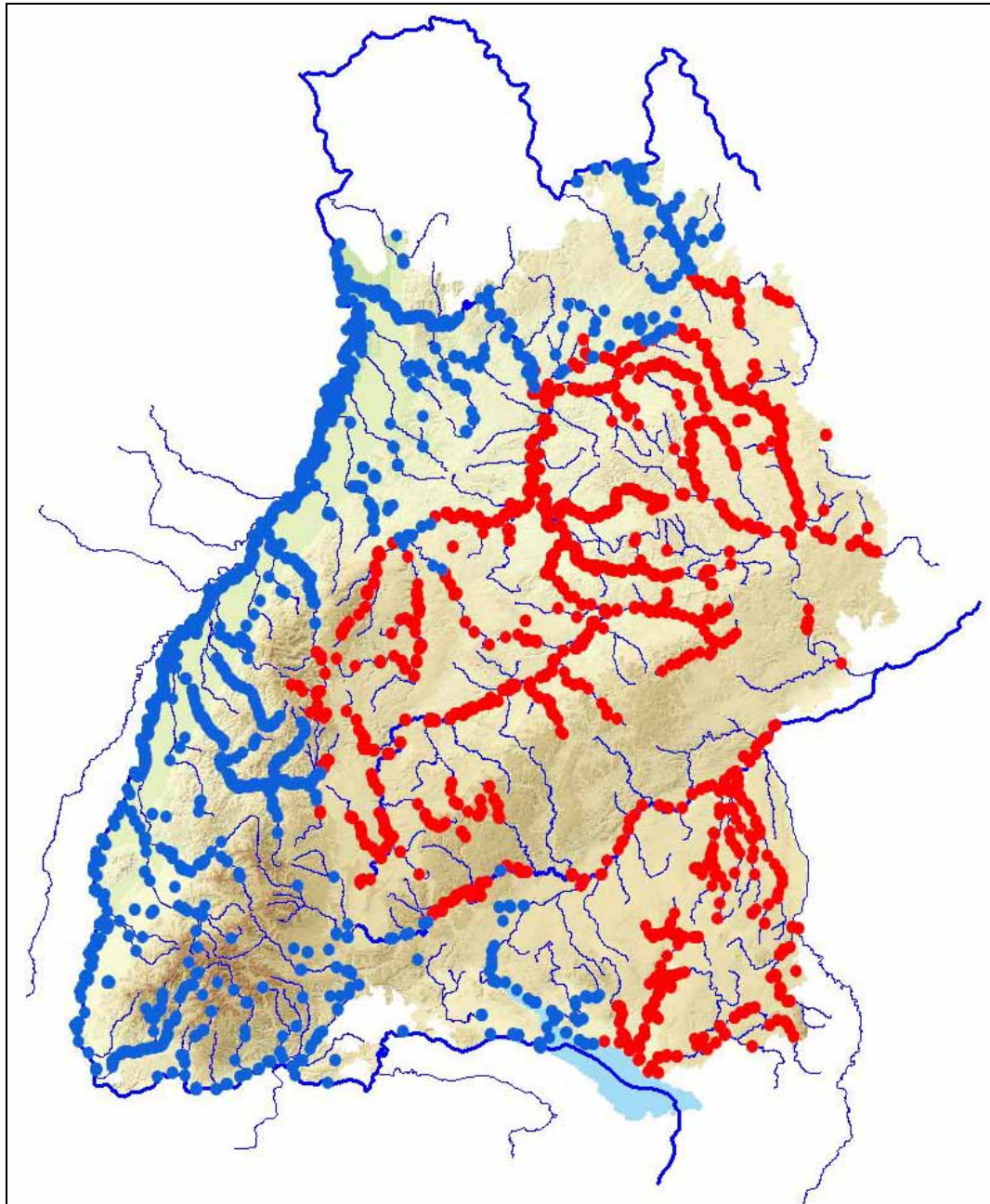


Abb. 3: Verteilung der auf der CD gespeicherten Hochwassermarken in Baden-Württemberg.

Die Anzahl der Marken zu bestimmten Hochwasser-Ereignissen schwankt an den Gewässern erheblich. Bedeutende Hochwasser wie z.B. das Hochwasser vom Oktober 1824 oder vom Dezember 1882 weisen besonders viele Marken auf.

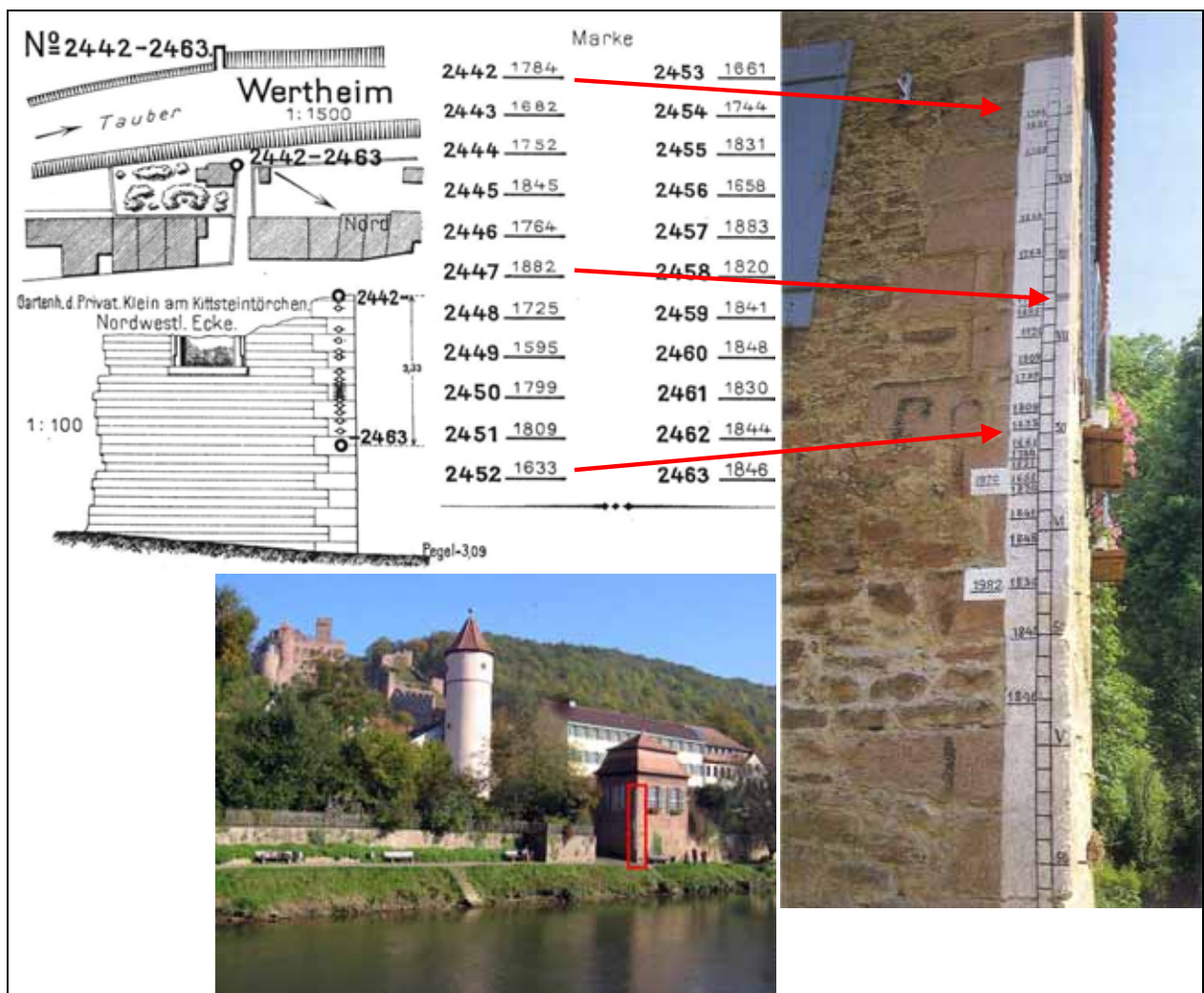


Abb. 4: Hochwassermarken in Wertheim am Mündungsbereich der Tauber in den Main (Großes Bild: R. Glaser – Klimageschichte Mitteleuropas).

Abbildung 4 enthält neben Hochwassermarken der neueren Zeit (1970 und 1982) vor allem Marken der Zeitspanne 1595-1920.

Die meisten Marken dieser über 320 Jahre langen Zeitspanne sind auch in dem badischen Verzeichnis enthalten. Es ist daher möglich, die Wasserpiegellhöhen für diese Hochwasserereignisse zu ermitteln. Die Wasserstände zwischen der untersten Marke (Jahr 1846: 138,25 m+NN) und der obersten Marke (Jahr 1784: 141,58 m+NN) schwanken um ca. 3,3 m.

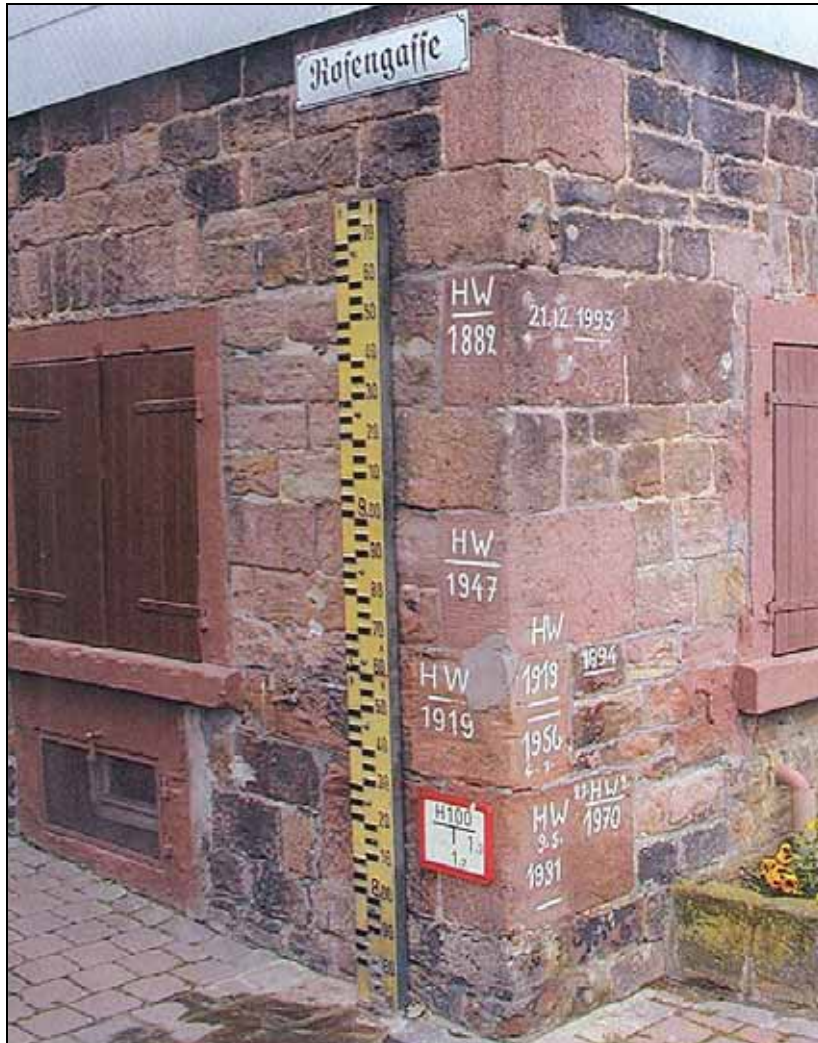


Abb. 5: Hochwassermarken in der Rosengasse in Eberbach/Neckar (IKoNE Heft 3 – Dokumentation von Hochwasserständen).

Abbildung 5 weist als höchste Marke die des Hochwassers vom Jahr 1882 aus. Diese Höhe wird von den Ereignissen der neueren Zeit nur vom Hochwasser vom Dezember 1993 erreicht. Das badische Verzeichnis weist jedoch für dieselbe Stelle noch deutlich höhere Marken aus; unter den Marken Nr. 2002-2006 ist ausgewiesen:

- 1784: 130,42 m+NN,
- 1789: 130,62 m+NN,
- 1817: 129,53 m+NN,
- 1824: 131,46 m+NN,
- 1882: 128,54 m+NN.

Dies bedeutet, dass der Wasserspiegel an dieser Stelle beim Hochwasser vom Oktober 1824 ca. 3 m über dem (auf der Abbildung höchsten) Wasserspiegel vom Dezember 1882 lag!

Das Hochwasser vom Oktober 1824 ist in beiden Landesteilen wie folgt dokumentiert:

Baden: 189 Marken, davon für den Neckar 40
 Württemberg: 102 Marken, davon für den Neckar 51.

Die Reihenfolge der höchsten Wasserstände ist in den einzelnen Flussgebieten unterschiedlich. Für den Neckar gilt laut dem „Verwaltungsbericht der Königlichen Ministerialabteilung für den Strassen- und Wasserbau, für Neckar/Donau“ (herausgegeben 1896) folgende Reihenfolge (Zitat):

- „am oberen Neckar bei Rottenburg: 1778, 1744, 1739, 1849, 1824, 1872, 1844, 1882
- am mittleren Neckar bei Cannstatt: 1824, 1792, 1778, 1834, 1851, 1817, 1851, 1853, 1839, 1849, 1845, 1882, 1850, 1872
- am unteren Neckar bei Heilbronn: 1824, 1789, 1817, 1851, 1845, 1834, 1882, 1862, 1843, 1850, 1827, 1849, 1880

Von den höchsten bekannten Hochwassern erreichte somit am obern Neckar dasjenige vom Jahr 1778, am mittleren und untern Neckar dasjenige vom Jahr 1824 den höchsten Stand.“

Die Reihenfolge für den unteren Neckar deckt sich teilweise mit der in Abbildung 6 (in Lauffen) enthaltenen Wasserständen am Neckar.

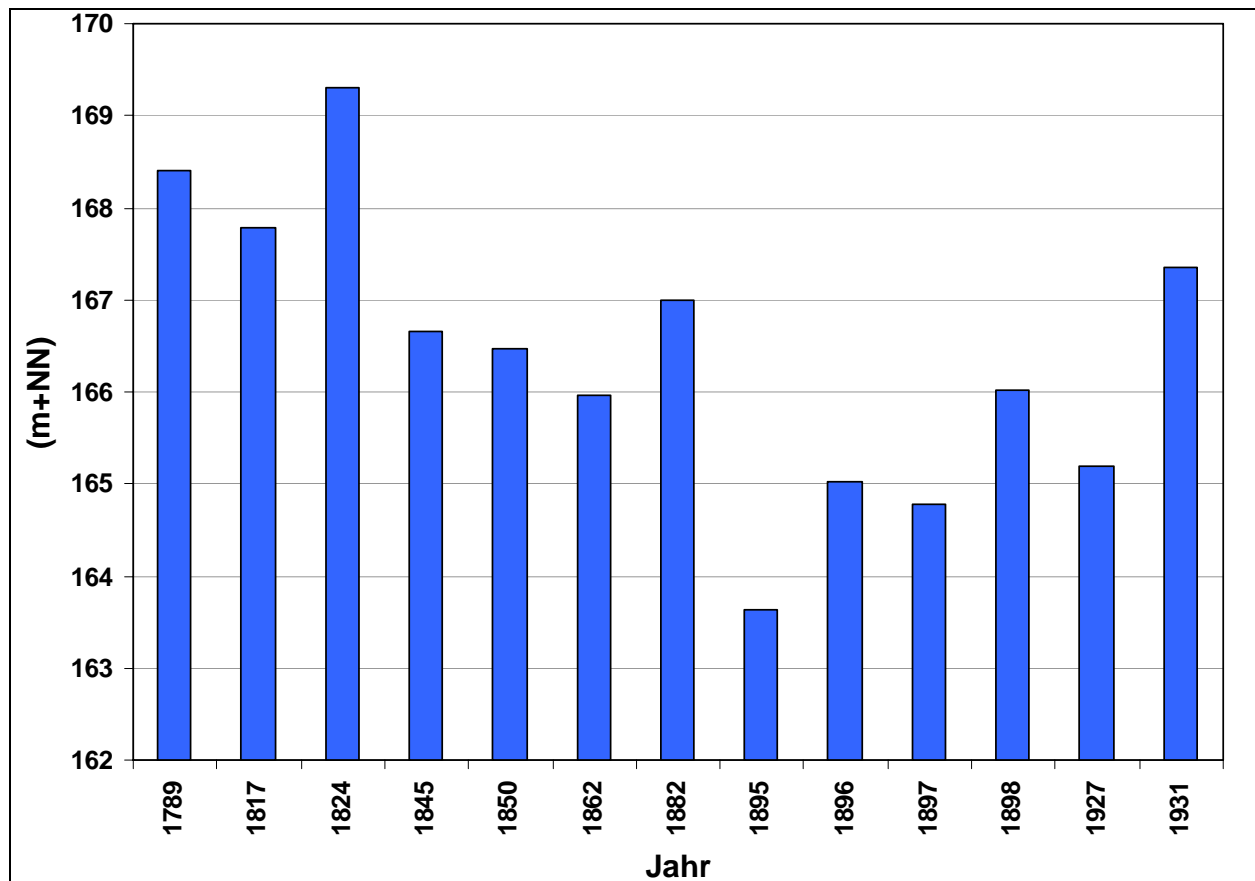


Abb. 6: Hochwasserstände des Neckars in Lauffen, Hochwasser der Zeitspanne 1789-1931 (Quelle: „Hochwassermarken an württembergischen Gewässern“).



Die in den o.g. Unterlagen verfügbaren Daten und Darstellungen wurden größtenteils gescannt; soweit dies nicht möglich war, sind sie manuell auf Datenträger erfasst worden. Folgende Daten sind für jede Hochwassermarke in der Datenbank hinterlegt:

- Nummer der Hochwassermarke in den jeweiligen Verzeichnissen. Die badischen Marken sind mit den Bilddokumenten verknüpft
- Bezeichnung des Flusses oder Flussgebietes
- Ortslage
- Lage (Flusskilometer und Uferseite)
- Beschreibung der Lage der Hochwassermarke am Gewässer
- Datum des Hochwassers
- Höhenlage der Hochwassermarke im damaligen geodätischen System (altes badisches oder württembergisches System)
- neue Höhenlage (im aktuellen Höhensystem)
- Dateiname der verknüpften Bilddatei, in der die jeweilige badische Hochwassermarke dargestellt ist
- Gewässerkennziffer
- heutiger Flusskilometer
- Vorfluter (Name des Gewässers nach der Einmündung).

Es lagen Hochwassermarken aus den „Beiträgen zur Hydrographie des Großherzogtums Baden“ und aus „Königreich Württemberg, Hochwassermarken“ vor.

3.1.1 Landesteil Baden

Die in „Beiträge zur Hydrographie des Großherzogtums Baden“ veröffentlichten Daten und sonstigen Informationen liegen in gedruckter Form vor. Sie konnten gescannt und die Zahlen danach per Programm in numerische Daten umgewandelt werden.

Die Unterlagen enthalten u.a. folgende Informationen:

- laufende Nr. der Marke (Nr. durchlaufend von 1 bis 2560)
- Bezeichnung des Gewässers und Ort der Hochwassermarke
- Beschreibung der Marke
- Datum des Hochwassers
- Höhe der Marke über NN
- Bemerkungen

Es liegen im Landesteil Baden insgesamt 2560 Marken für die Zeitspanne 1511-1910 vor. Ein großer Teil der Marken bezieht sich auf die extremen Hochwasser vom Oktober 1824, Juni 1876, Dezember 1882 und März 1896.

Das 13. Heft der „Beiträge zur Hydrographie im Großherzogtum Baden“ enthält in einem weiteren Band „Tafeln“ mit „zeichnerischen Darstellungen der einzelnen Örtlichkeiten sowie Skizzen für die Art und Anbringung der Hochwassermarken“. Diese Darstellungen sind ebenfalls gescannt und mit den jeweiligen Hochwassermarken verknüpft worden. Bild 6 enthält als Beispiel die Skizzen über die Lage der in Ettligen/Alb ursprünglich vorhandenen Hochwassermarken; ein großer Teil dieser Marken ist heute noch vorhanden. Die überwiegende Anzahl der Marken (Nr. 1432, 1433, 1436, 1437 und 1438) bezieht sich auf das extreme Hochwasser vom Oktober 1824.

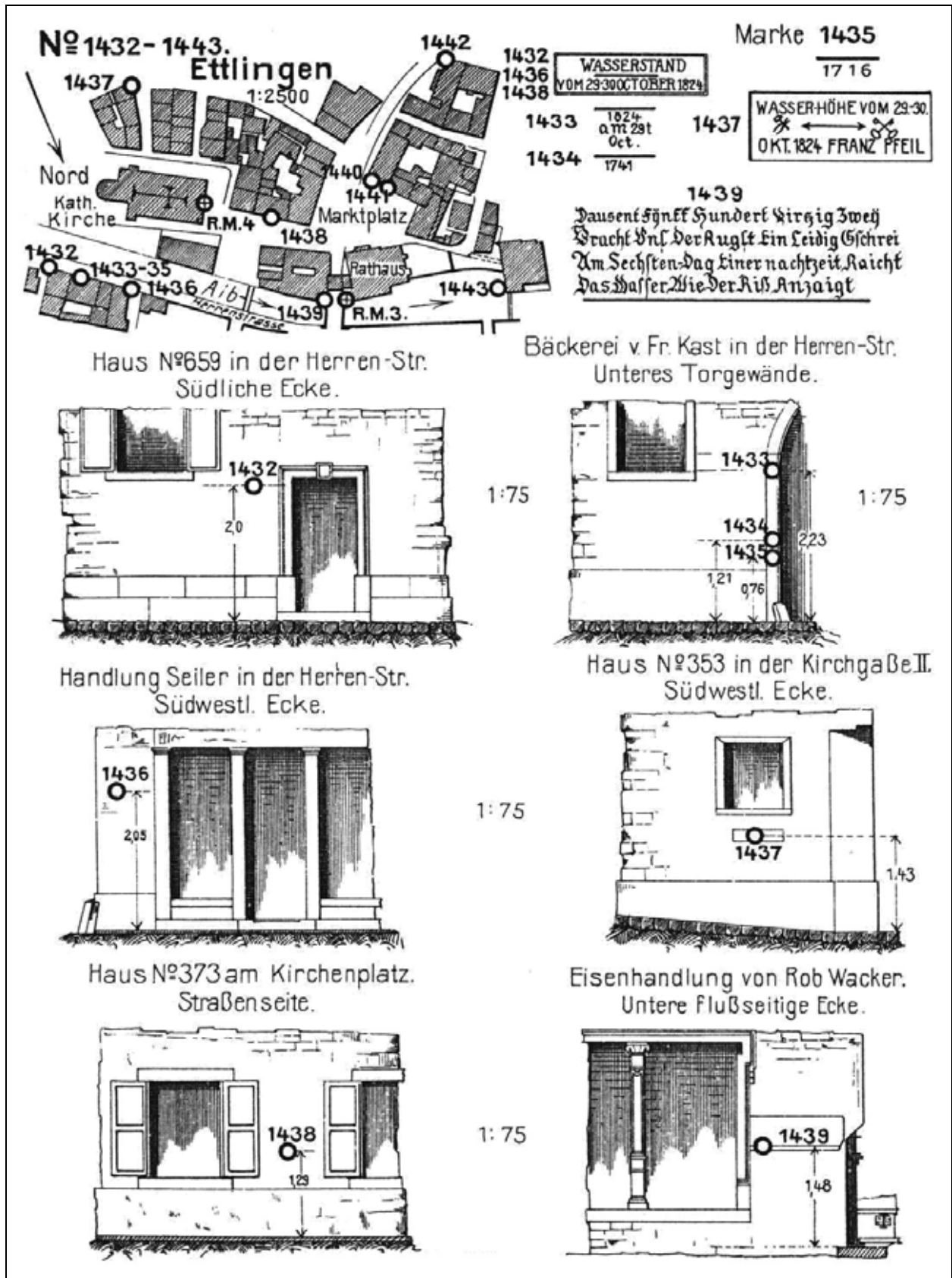


Abb. 7: Seite 191 der „Tafeln“ in „Die Hochwassermarken im Großherzogtum Baden“.



3.1.2 Landesteil Württemberg

Die in „Hochwassermarken an württembergischen Gewässern“ enthaltenen Daten liegen im Original nur handschriftlich in deutscher Schrift vor (Beispiel siehe Abbildung 8); sie mussten also digital in Excel-Tabellen erfasst werden.

Die Unterlagen enthalten u.a. folgende Informationen:

- laufende Nr. der Marke pro Gewässer und Flusskilometer
- Dienststellen und Gemarkung („Oberamt“, „Markung“)
- Lage der Marke
- Datum des Hochwassers
- Höhe der Marke über NN
- Bemerkungen

Es liegen für den Landesteil Württemberg insgesamt ca. 3200 Marken für die Zeitspanne 1633-1951 vor. Ein großer Teil der Marken bezieht sich auf die extremen Hochwasser vom Oktober 1824 und Dezember 1882.

Neckar.

Fortlaufende N ^o .	Oberamt. Markung.	Beschreibung der vorhandenen Hochwassermarken nach Lage und Beschaffenheit.	Datum und Jahrgang der angemessenen Hochwasser	Stand des Hochwassers über			Bemerkungen.	
				Nieder- wasser m.	Mittel- wasser m.	dem Meere m.		
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	
98 km 146,75 müßl.	Besigheim Gyffingen.	3) Andrei Fische bei Baller, 0,30 m Lichte Pfeiler aus Kupfer.	1824	7,2	6,7	154,6	Lichte Pfeiler wie bei N ^o 97.	
		4) Angewandte aus Kupfer Lichte Pfeiler N ^o 83, 1,05 m über dem Boden.	1882	5,3	4,8	132,67		
99 km 140,90 links.	Besigheim Gyffingen.	Angewandte aus Kupfer Lichte Pfeiler N ^o 321, (Lichte Pfeiler des Obermüllers).	20. Febr. 1784	7,2	7,2	174,18	Lichte Pfeiler Lichte Pfeiler N ^o 321 auf dem Lichte Pfeiler des Lichte Pfeiler des Lichte Pfeiler des Lichte Pfeiler des Lichte Pfeiler des	
			1778	7,3	6,8	175,68		
			1789	8,4	7,9	179,70		
			28. Mai					
			1817	8,1	7,6	179,92	= 184, 690 m (Lichte Pfeiler)	
			30. Okt. 1824		9,5	9,0	180,88	
		Angewandte aus Kupfer Lichte Pfeiler N ^o 322, auf der rechten Seite des Lichte Pfeiler, 1 m über dem Boden.	1882	6,6	6,1	177,95		
100 km 140,20 müßl.	Gyffingen Lichte Pfeiler.	Angewandte aus Lichte Pfeiler.	1778 20. Febr. 1784	6,91		177,73	Lichte Pfeiler Lichte Pfeiler = 170, ist m	
			1789	8,00		178,92	ist m.	
			28. Mai					
			1817	7,68		178,60		
			30. Okt. 1824		9,38		180,31	
			24. Okt. 1880		5,49		176,41	
			27. Dez. 1882		5,99		176,97	

Abb. 8: Originalseite aus "Hochwassermarken an Württembergischen Gewässern".



3.2 Gescannte Unterlagen

Alle in den o.g. Unterlagen enthaltenen Daten und sonstigen Informationen zu den Hochwassermarken liegen gescannt vor. Die gescannten Darstellungen zu den Hochwassermarken (Abbildung 9) können direkt am Bildschirm abgerufen werden.

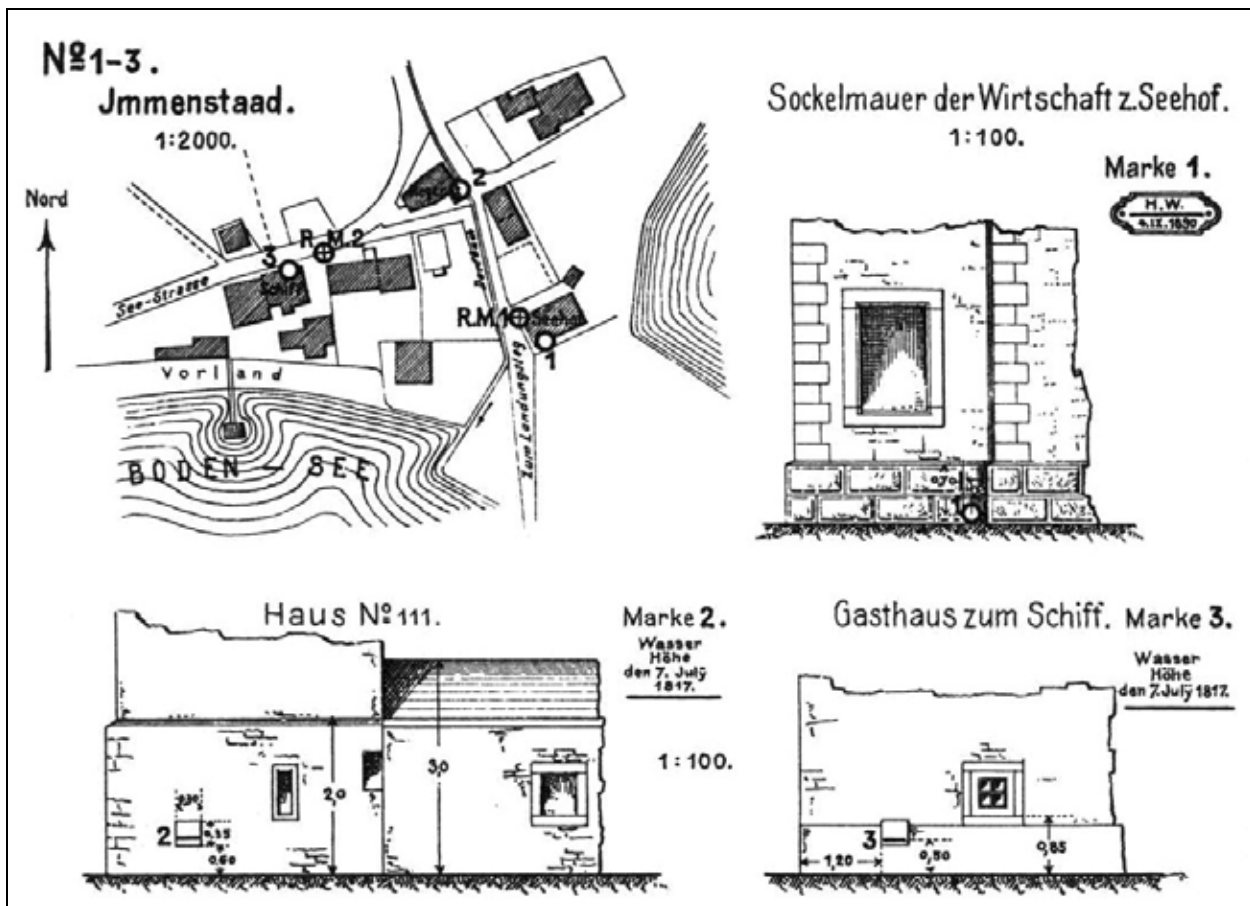


Abb. 9: Gescannte Darstellungen zu den Hochwassermarken.

4. Abruf der Informationen

Neben den Daten enthält die CD Programm-Module zur Visualisierung der erfassten Daten. Damit können z.B. die Lage der vorhandenen Marken in topografischen Karten und die Höhe der Wasserspiegel längs eines Gewässers dargestellt werden. Ferner sind die Marken nach unterschiedlichen Kriterien (z.B. nach Flüssen, nach verschiedenen Zeitspannen) auswählbar.

Der Abruf der auf der CD vorliegenden Daten und sonstigen Informationen ist in der Benutzeranleitung zu dem menügeführten Informationssystem beschrieben. Es bestehen grundsätzlich folgende Nutzungsmöglichkeiten:

- Darstellung der ausgewählten Hochwassermarken in einer Karte
- Darstellung der ausgewählten Hochwassermarken in einem Längsschnitt für einen bestimmten Gewässerabschnitt bzw. Gewässer
- Ausgabe der Daten der ausgewählten Hochwassermarken auf Datei.

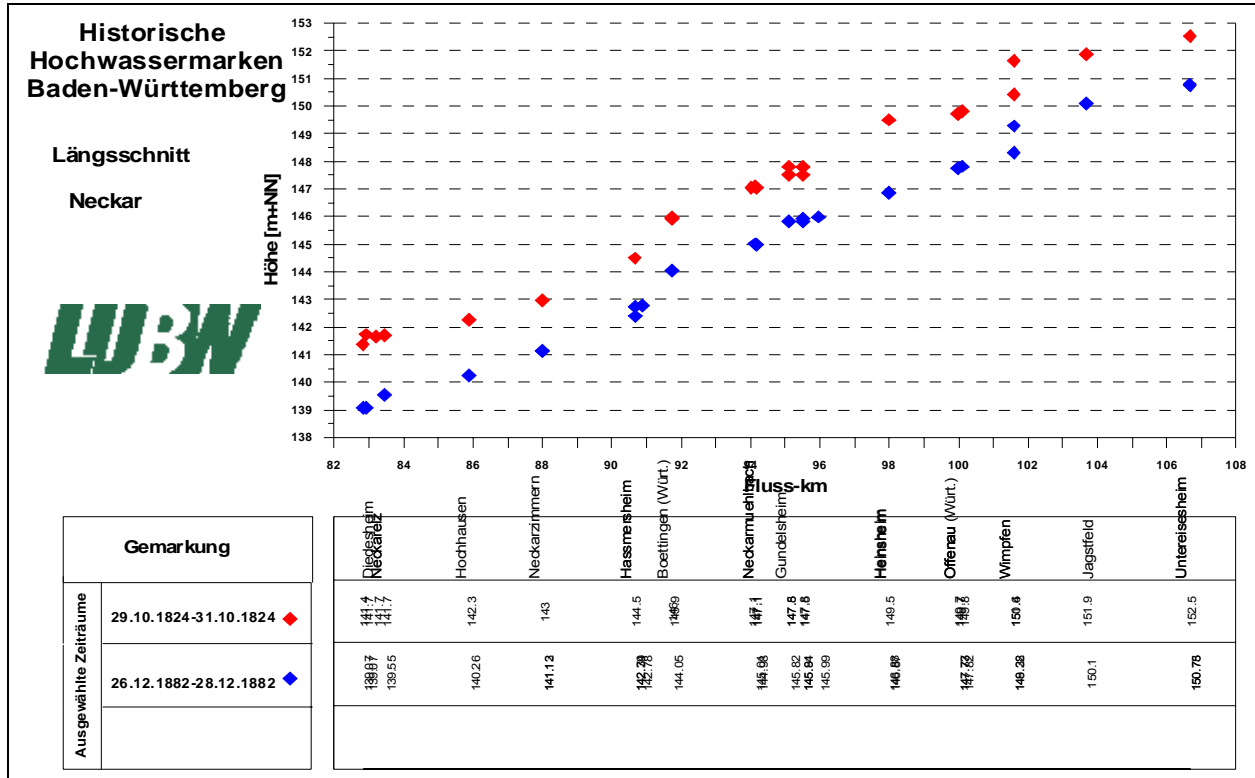


Abb. 10: Längsschnitt des Neckars mit den Wasserspiegelnhöhen der Hochwasser 1824 und 1882

In Abbildung 10 enthält beispielhaft den Längsschnitt der Wasserspiegel-Höhen bei den extremen Hochwassern der Jahre 1824 und 1882 für eine ausgewählte Gewässer-Strecke des Neckars. Er zeigt, dass die Wasserstände des Hochwassers vom Jahre 1824 ca. 2 m höher sind als die des Hochwassers vom Jahr 1882. (Bemerkung: In den Auswertungen der gültigen Pegel-Statistik sind bisher nur an wenigen Pegeln Abflüsse des Hochwassers 1882 berücksichtigt, da an vielen Pegeln die Zeitreihen mit Abflüssen erst ab ca. 1930 beginnen und die Abflüsse für die Hochwasser 1824 und 1882 wegen fehlender Unterlagen nicht ermittelt werden können.)

5. Auswertungen für das Hochwasser vom Oktober 1824

Das Hochwasser vom Oktober 1824 ist das extremste Ereignis im Bereich des Landes Baden-Württemberg, über das Informationen zu den Höchst-Wasserständen in Form von Hochwassermarken vorliegen. Es war verursacht durch ein bis zu 36h anhaltendes Niederschlags-Ereignis mit extremen Niederschlägen (in Freudenstadt: 194 mm in 36 h, [3]) und durch einen auf Grund eines feuchten Sommers gesättigten Bodenspeicher. Daher ist beabsichtigt, dieses Hochwasser bei den Hochwasserschutzplanungen zu berücksichtigen. Um über die in Archiven vorhandenen Unterlagen über dieses Hochwasser zu verfügen, wurde das Meteorologische Institut der Universität Freiburg beauftragt, diese für das Einzugsgebiet des Neckars zu sichten und zu bewerten. Weiterhin ergab sich die Möglichkeit, an Hand der von dem Institut rekonstruierten Niederschläge [3] die Abflüsse des Neckars mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM zu ermitteln.

Die mit dem Wasserhaushaltsmodell ermittelten Höchstabflüsse längs des Neckars sind in Abbildung 10 dargestellt. Ebenso sind im Bild die Hochwasser-Abflüsse HQ_{100} und HQ_{1000} der Jährlichkeiten 100 und 1000 Jahre (Ergebnisse der Hochwasser-Regionalisierung des Landes) sowie die Hochwasser-Abflüsse entsprechend dem im Jahre 1896 erstellten „Verwaltungsberichtes der Königlichen Ministerialverwaltung für den Wasser- und Straßenbau“ enthalten. Es



zeigt sich, dass die Abflüsse des Hochwassers vom Oktober 1824 ab der Filmmündung höher als das HQ_{100} und ab der Mündung von Kocher und Jagst höher als das HQ_{1000} sind.

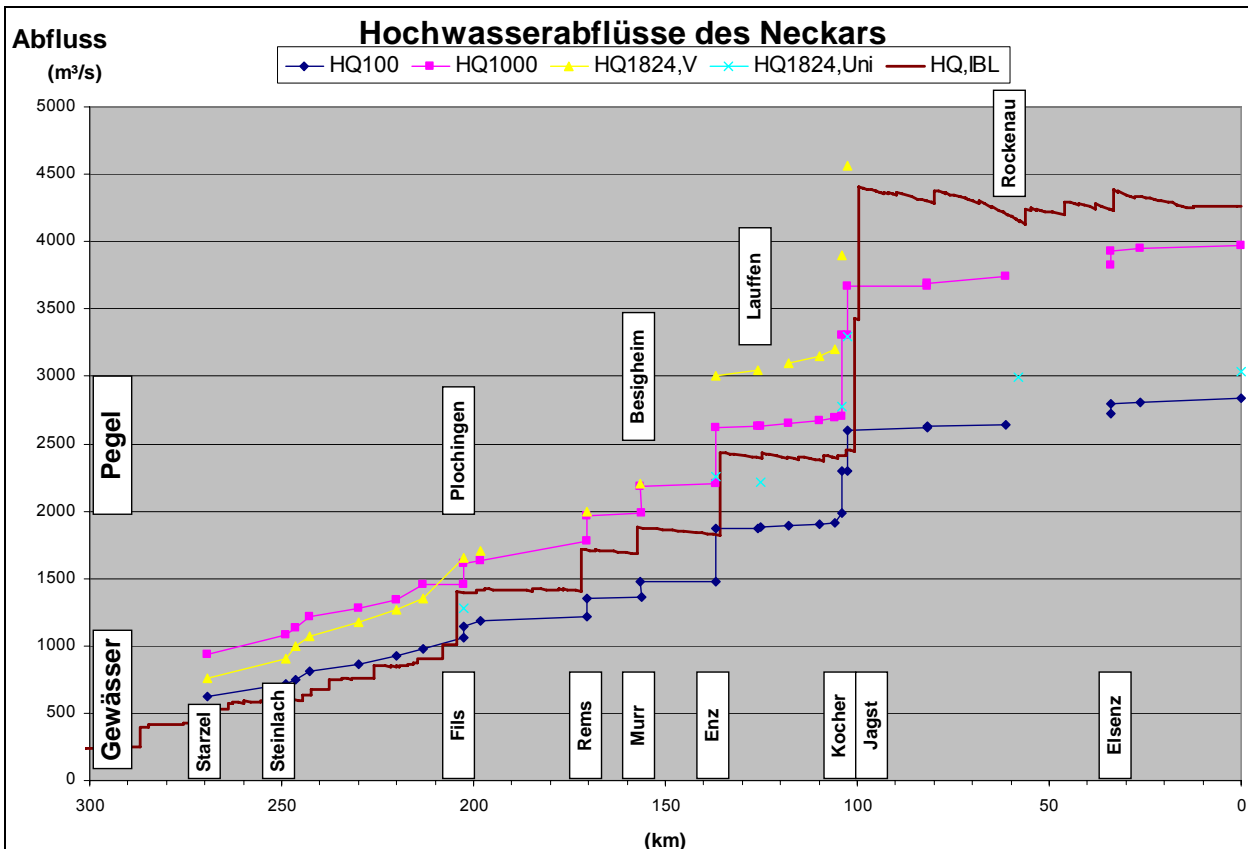


Abb. 11: Längsschnitt der Hochwasserabflüsse des Neckars

Die an Hand des Wasserhaushaltsmodells ermittelten Höchstabflüsse wurden für die Enz, deren Höchstabfluss ca. $600 \text{ m}^3/\text{s}$ betrug (siehe Abbildung 11), an Hand der an der Enz für ca. 30 km vorhandenen Hochwassermarken, für deren Wasserstände die Abflüsse mit hydraulischen Berechnungen rekonstruiert wurden, verifiziert. Dabei wurden die heutigen Gewässer-Querschnitte verwendet; dies schien gerechtfertigt, da in diesem Bereich die Änderungen gegenüber dem ursprünglichen, natürlichen Zustand gering sind. In Abbildung 12 sind die Abflüsse aus dem Wasserhaushaltsmodell den an Hand der Hochwassermarken rekonstruierten Abflüssen gegenübergestellt. Diese ersten Ergebnisse zeigen, dass die meisten rekonstruierten Abflüsse mit den Abflüssen des Wasserhaushaltsmodells befriedigend übereinstimmen. Weitere Untersuchungen, auch an anderen Zuflüssen des Neckars, sind zur weiteren Absicherung dieser Abschätzung der Höchstabflüsse des Neckars bei dem extremen Hochwasser vom Oktober 1824 erforderlich.

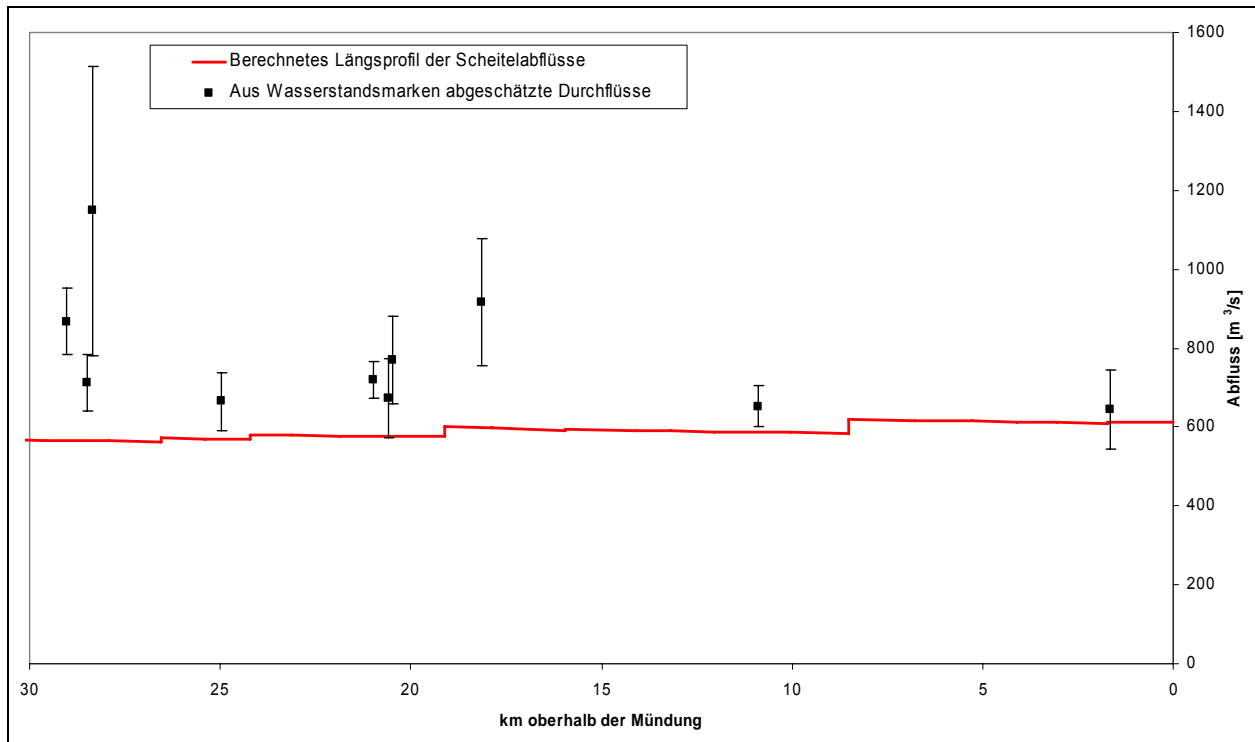


Abb. 12: Rekonstruierte Höchstabflüsse der Enz beim Hochwasser 1924

6. Ausblick

Die Bedeutung der Hochwassermarken für den Hochwasserschutz ist im Leitfaden des Landes Baden-Württemberg [5] festgehalten.

Um alle Hochwassermarken im Land EDV-verfügbar zu haben, sollten auch die Marken der neueren Zeit auf CD erfasst werden. Es wird daher vorgeschlagen, Daten vorhandener, bisher nicht erfasster Marken der LUBW zur Verfügung zu stellen. Diese könnten dann in der Fortschreibung der CD berücksichtigt werden.

Auch sollten für Hochwasser der neueren Zeit an wenigen, auffälligen und repräsentativen Stellen Hochwassermarken angebracht werden. Es empfiehlt sich, Stellen zu verwenden, an denen bereits von früher Hochwassermarken vorliegen. Praktische Arbeitshilfen bezüglich der Dokumentation von Hochwasserereignissen anhand von Hochwassermarken liegen vor [4].

Die Rekonstruktion der Abflüsse an Hand von Hochwassermarken ist erfolgversprechend und sollte im Interesse des Hochwasserschutzes für wichtige Gewässer erstellt werden, sofern die verfügbaren Unterlagen ausreichend sind und sofern die Änderungen am Gewässer gegenüber dem damaligen Zustand dies sinnvoll erscheinen lassen.

Hochwassermarken dienen auch dazu, das Bewusstsein, dass ein totaler Hochwasserschutz nicht möglich ist, in der Bevölkerung wach zu halten. Weiterhin tragen sie dazu bei, das Wissen über historische Hochwasser zu pflegen wie dies z.B. in Ettlingen für das Hochwasser vom August 1542 erfolgt ist (Abbildung 13).



Tausent fünf hundert vierzig zwei
bracht uns der August ein leidig Gschrei,
am sechsten Tag einer Nachtzeit reicht
das Wasser wie der Riss anzeigt

Abb. 13: Hochwassermarken des Hochwassers vom August 1542 in Ettlingen/Alb

7. Zusammenfassung

Lange Zeit waren Hochwassermarken die einzige Möglichkeit, abgelaufene Hochwasserereignisse und deren Auswirkungen auf besiedelte Flussauen zu dokumentieren und diese Kenntnisse an die folgenden Generationen weiterzugeben. Diese historischen Informationen können heute von Bedeutung sein, um

- das Extremhochwasser festzulegen und die daraus sich ergebenden Überschwemmungsgebiete in Hochwassergefahrenkarten darzustellen,
- das Bemessungshochwasser für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes festzulegen (siehe Leitfaden des Landes Baden-Württemberg vom Juli 2005: „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“)
 - „Die Wasserstandsdaten der Hochwassermarken sind grundsätzlich bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen zu berücksichtigen, da die Hochwassermarken sich zum Teil auf extreme Hochwasserereignisse beziehen (z.B. Hochwasser vom Oktober 1824, Dezember 1882), deren höchste Wasserstände wesentlich höher waren als die Höchstwasserstände an den Pegeln seit Beginn der regelmäßigen Beobachtung.“
- hydrologische und hydraulische Modelle zu eichen.

Seit Februar 2006 sind die bisher nur in Archiven der Landesverwaltung vorliegenden Unterlagen über Hochwassermarken in Baden-Württemberg auf CD für die wasserwirtschaftliche Praxis in EDV-gerechter Art verfügbar. In den Archiven liegen „Die Hochwassermarken im Grossherzogtum Baden“ (für den ehemals selbständigen Landesteil Baden) und „Hochwassermarken an württembergischen Gewässern“ (für den ehemals selbständigen Landesteil Württemberg) vor.

Die in diesen Veröffentlichungen enthaltenen historischen (nach den damaligen Höhensystemen) Wasserstände (m+NN) der Marken beider Landesteile wurden auf Datenträger erfasst und danach nach Vorgaben des Landesvermessungsamtes auf das aktuelle Höhensystem umgerechnet. Außerdem sind die Stellen, an denen sich die jeweiligen historischen Hochwassermarken befanden, georeferenziert worden, d.h. die Stellen (mit Hoch- und Rechtswerten) sind jetzt auf das heutige Gewässernetz bezogen (mit Angabe der derzeitigen Kilometrierung).

Die ca. 6200 erfassten Hochwassermarken verteilen sich auf alle größeren Gewässer des Landes. Sie enthalten Höchst-Wasserstände der Zeitspanne zwischen 1511 bis ca. 1920; Marken nach ca. 1920 bis 1951 sind nur im württembergischen Teil vorhanden. Es bleibt daher einer weiteren Bearbeitung vorbehalten, für die neuere Zeit (ungefähr ab 1920) eine repräsentative Anzahl von Hochwassermarken für das ganze Land in das System aufzunehmen.

Neben den Daten enthält die CD Programm-Module zur Visualisierung der erfassten Daten. Damit können z.B. die Lage der vorhandenen Marken in topografischen Karten und die Höhe der Wasserspiegel längs eines Gewässers dargestellt werden. Ferner sind die Marken nach unterschiedlichen Kriterien (z.B. nach Flüssen, nach verschiedenen Zeitspannen) auswählbar. Der Abruf der auf der CD vorliegenden Daten ist in einer Benutzeranleitung beschrieben.

Für das extreme Hochwasser vom Oktober 1824, für das die Niederschläge rekonstruiert worden sind, konnten die Hochwasserabflüsse des Neckars mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM ermittelt werden. Am Beispiel der Enz wurden diese Abflüsse den an Hand der Hochwassermarken hydraulisch ermittelten Abflüssen gegenübergestellt.

8. Literatur

- [1]: CD „Historische Hochwassermarken in Baden-Württemberg“, LUBW, 2006
ISBN 3-88251-302-0
- [2]: Glaser, Klimageschichte
- [3]: „Rekonstruktion des Neckarhochwassers von 1824“, Meteorologisches Institut der Albrecht-Ludwigs-Universität Freiburg, 2005
- [4]: IKoNE – Heft 3, „Dokumentationen von Hochwasserständen“ [Gewässerdirektion Neckar, 2001].
- [5]: Leitfaden „Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes“, LUBW, 2005



Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Süddeutschland

Hans Weber
Bayerisches Landesamt für Umwelt, Hof

1. Einleitung

Die sich derzeit abzeichnende Veränderung des Klimas, die durch den Menschen mit seiner hoch entwickelten Lebens- und Wirtschaftsweise und dem damit verbundenen hohen Verbrauch fossiler Energieträger ausgelöst wurde, geht bereits jetzt deutlich über die natürliche Variabilität der bekannten klimatischen Verhältnisse hinaus; sie wird mittlerweile nicht mehr nur von der Klimaforschung als Realität angesehen. Eine unmittelbare Folge wird die weitere globale Erwärmung auf unserem Planeten sein, in dessen Folge auch die Veränderung des Wasserkreislaufs und damit des Hochwassergeschehens in Flussgebieten erwartet wird. Das gehäufte Auftreten außergewöhnlicher Hochwasserereignisse, die in den letzten zwei Jahrzehnten auch im mitteleuropäischen Raum zu verzeichnen waren, scheint diese Erwartung bereits zu bestätigen.

Die Fragestellung, ob und in welchem Umfang die Zeitreihen der beobachteten Abflüsse der Vergangenheit Hinweise auf einen Klimawandel durch eine bereits erkennbare Veränderung der statistischen Eigenschaften des gemessenen Abflussverhaltens einzelner Flussgebiete enthalten, war seit Beginn des Kooperationsvorhabens KLIWA Gegenstand von Untersuchungen. Schwerpunkt war bisher das Langzeitverhalten der gemessenen Hochwasserabflüsse. Dazu sind auch schon bei den vorausgegangenen KLIWA-Symposien Untersuchungsergebnisse präsentiert worden: Die früheren Auswertungsergebnisse führten zu der Feststellung, dass eine signifikante flächendeckende Veränderung im Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern bisher nicht eingetreten ist; es ergaben sich aber Hinweise auf Änderungen im Jahresgang und regional auf eine Häufigkeitszunahme von Hochwasserabflüssen.

Die außergewöhnlichen Hochwasserereignisse im Zeitraum von 1999 bis 2005 in Teilen des KLIWA-Untersuchungsgebietes waren Anlass, erneute Auswertungen mit den aktualisierten Abflusszeitreihen durchzuführen. Die umfangreichen und vertieften statistischen Analysen zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse wurden in schon bewährter Weise wiederum am Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse der umfangreichen Analysen sind nachstehend in aller Kürze dargestellt.

2. Langzeitverhalten von Zeitreihen – methodisches Vorgehen

Ausgehend von der Fragestellung, ob die beobachteten Abflusszeitreihen bei den Hochwasserabflüssen trendhafte Veränderungen aufzeigen, erstreckte sich die Analyse ihres Langzeitverhaltens primär auf die Ermittlung eventuell vorhandener Trends. Dabei ist das Langzeitverhalten der Jahresserien der jährlichen und halbjährlichen Abflusshöchstwerte untersucht und bewertet worden. Ergänzend war der mittlere Jahresgang der Monatshöchstwerte für die jeweiligen Gesamt- und Teilzeitreihen zu ermitteln, dessen monatliche Veränderungen ebenfalls Hinweise auf mögliche Trends liefern können. Von der Aufgabenstellung her waren schließlich möglichst viele lange und repräsentative Abflusszeitreihen mit in diese Untersuchung einzubeziehen.

2.1 Datengrundlage

Ausgehend von unterschiedlich langen Abflusszeitreihen wurde festgelegt, dass nur die Daten von Pegeln berücksichtigt werden, deren Beobachtung mit dem hydrologischen Jahr 1932 bzw. früher begonnen wurde und deren Messreihen möglichst ohne Unterbrechung und qualitätsge-



sichert vorliegen. Diesen Anforderungen entsprachen 60 Messstellen aus Bayern und 30 aus Baden-Württemberg (siehe Abbildung 1).

Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse

Karte 1: Einbezogene Pegel

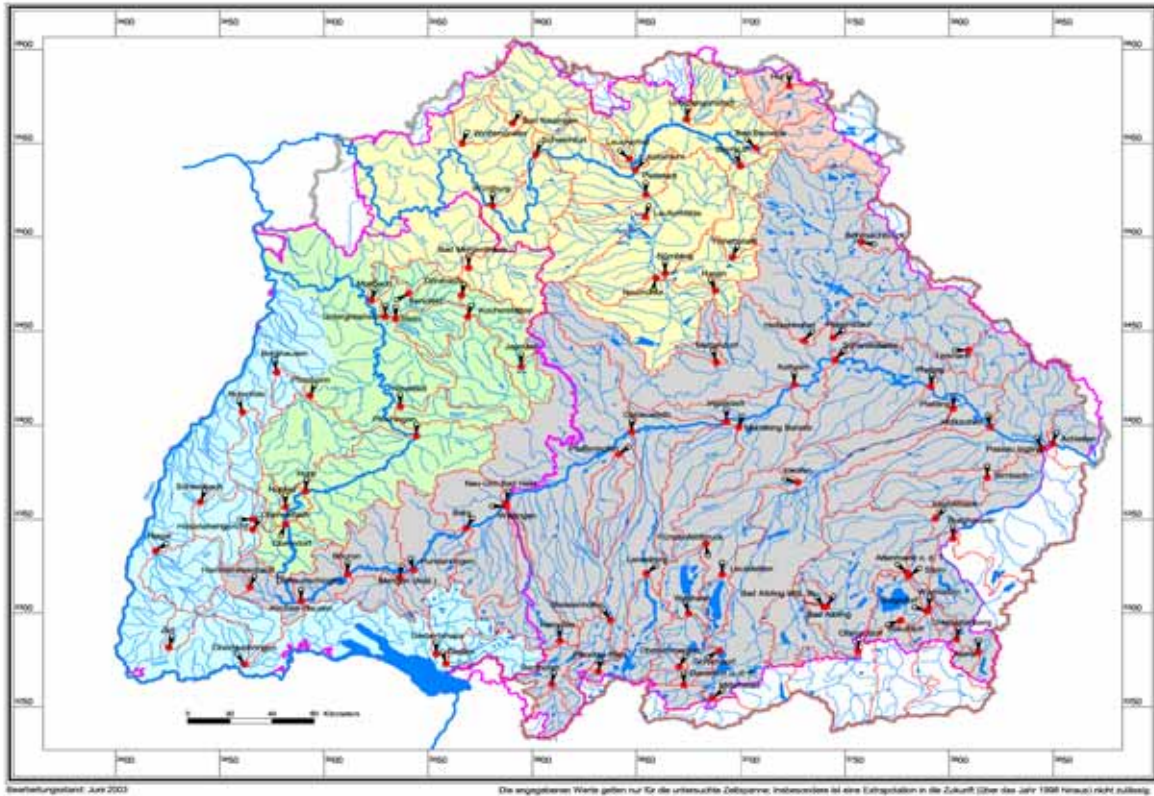


Abb. 1: Verteilung der einbezogenen Pegel über das Gebiet der Länder Baden-Württemberg und Bayern.

Sie sind über das Gebiet dieser Länder annähernd gleichmäßig verteilt und erfassen Einzugsgebiete unterschiedlicher Größe, sind mithin also repräsentativ für das Untersuchungsgebiet. Die Einzugsgebiete der Donau, des Mains, des Neckars, des Rheins und der Elbe sind mit 50, 16, 13, 10 und 1 Abflussmessstellen vertreten. Die Größenverteilung der Einzugsgebiete, die über die ausgewählten Pegel erfasst wird, ist aus Abbildung 2 ersichtlich.

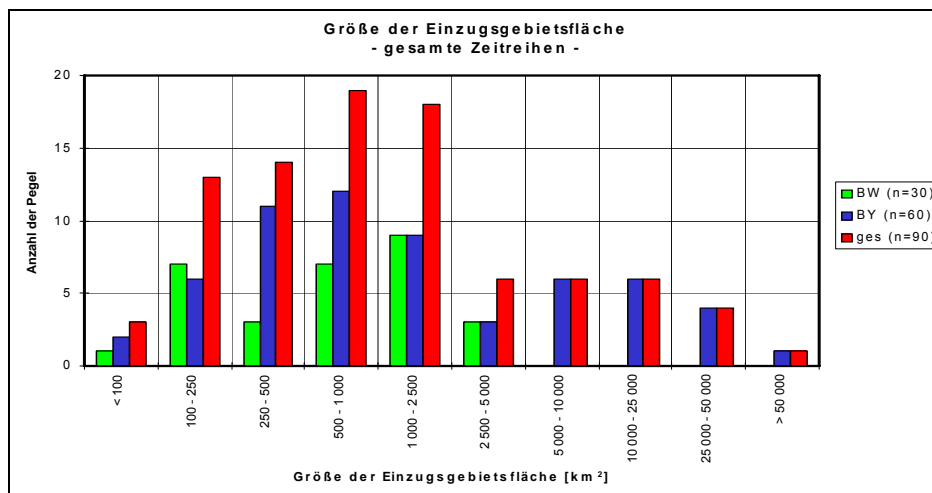


Abb. 2: Klasseneinteilung der Pegel Einzugsgebiete und zugehörige Pegelanzahl

Für die Analyse des Verhaltens der Hochwasserabflüsse wurden die monatlichen Abflusshöchstwerte der 90 Pegel herangezogen; diese Zeitreihen weisen überwiegend eine Zeitdauer ab dem (hydrologischen) Jahr 1932 und teilweise sogar früher bis 2004 bzw. 2005 auf, haben also eine Mindestbeobachtungsdauer von 72 Jahren.

Aus dieser Datengrundlage wurden dann für die verschiedenen Auswertungen die Jahresserien gebildet mit unterschiedlichem Zeitbezug, nämlich für das hydrologische Jahr, das Sommer- und das Winterhalbjahr sowie die Kalendermonate. Weiterhin wurden aus den jeweiligen Jahresserien durch eine Teilung in den aufgrund von Bruchpunktanalysen festgelegten Trennungsjahren entsprechende Teilzeitreihen gebildet; diese wurden für die Perioden vor und nach den Trennungsjahren 1951, 1964 und 1974 jeweils vergleichend analysiert.

2.2 Statistische Methoden / Untersuchungen

Ausgehend von der Kernfrage, ob die Jahresserien der monatlichen Höchstabflüsse trendhafte Veränderungen erkennen lassen, waren die Analysen auf die Bestimmung des Trendverhaltens der einzelnen Datenkollektive ausgerichtet. Analog zu den früheren Untersuchungen im Vorhaben KLIWA kamen die folgenden statistischen Verfahren bzw. Berechnungen zur Anwendung:

- Trendermittlung durch Anpassung einer Trendgeraden mittels der Methoden der kleinsten Fehlerquadrate (Annahme eines linearen Trends)
- Trendtest nach dem Verfahren von Mann-Kendall (Bewertung eines Trends als signifikant, wenn die Testsignifikanz $\alpha > 80\%$)
- Trendverhaltensänderung in Abhängigkeit von der Zeitreihenlänge (rückschreitender Trend mit punktueller Analyse und Darstellung für die Jahre 1951, 1964 und 1974)
- Bruchpunktanalyse nach Mann-Whitney sowie Summenlinienanalyse als Methoden zur Homogenitätsprüfung der Zeitreihen und schließlich
- Analyse des Jahrgangs der mittleren Monatshöchstwerte durch Vergleich der Mittelwerte von Teilzeitreihen und zugehöriger Gesamtreihe.

Im Weiteren werden nur die Ergebnisse aus der Analyse des Jahrgangs, der Trendbestimmung und der Trendsignifikanz näher beleuchtet. Die Ergebnisse der Bruchpunktanalysen und der Trendverhaltensänderung sind indirekt über die für die Bildung der Teilzeitreihen gewählten Trennungsjahre berücksichtigt.

2.3 Ergebnisdarstellung

Die vorstehend genannten Untersuchungen sind für die ausgewählten 90 Pegel durchgeführt und auch einzeln grafisch dargestellt im Ergebnisbericht der Universität Karlsruhe enthalten. Die Ergebnisdarstellung wird zum besseren Verständnis beispielhaft für den Pegel Donauwörth jeweils mit einem Halbjahresbezug gezeigt.

Das Ergebnis der Analysen des Jahrgangs ist in Abbildung 3 aufgetragen. Für die beiden Halbjahre sind jeweils die mittleren Hochwasserabflüsse MHQ (HJ) für die Gesamtreihe und die Teilzeitreihen 11/1923 – 10/1973 sowie 11/1973 – 10/2005 eingetragen; die Mittelwerte der Teilzeitreihen liegen über bzw. unter dem jeweiligen Gesamtmittel. Die drei dargestellten Ganglinien mit den Monatsmittelwerten lassen noch deutlicher erkennen, dass die monatlichen Abflusshöchstwerte nach dem Trennungsjahr 1974 über alle Monate, insbesondere aber in den eigentlichen Hochwassermonaten, ein deutlich höheres Niveau aufweisen. Dies kann in diesem Fall als eine deutliche Veränderung bei den Hochwasserabflüssen interpretiert werden.



Abb. 3: Pegel Donauwörth/Donau - Ergebnisdarstellung der Analyse des Jahresgangs der monatlichen Höchstwerte HQ(m) und der mittleren halbjährlichen Hochwasserabflüsse MHQ(HJ) für drei unterschiedliche Zeitspannen

Das Ergebnis der Trenduntersuchung, hier bezogen auf die Gesamtreihe der Jahreshöchstwerte HQ (J), ist in Abbildung 4 (obere Grafik) dargestellt. Die Gesamtreihe weist einen deutlich steigenden Trend auf, erkennbar an der berechneten roten Trendgeraden. Die Änderung des Trendverhaltens sowie die jeweilige Trendsignifikanz sind als rückschreitender Trend in Abbildung 4 (untere Grafik) erkennbar. Daraus ist beispielsweise ablesbar, dass der ansteigende Trend im Jahr 1959 seinen höchsten Betrag erreicht hat und die Teilzeitreihen ab 1964 bis zum Zeitreihenende 2005 einen insgesamt nicht mehr signifikanten und zeitweilig auch fallenden Trend aufweisen.

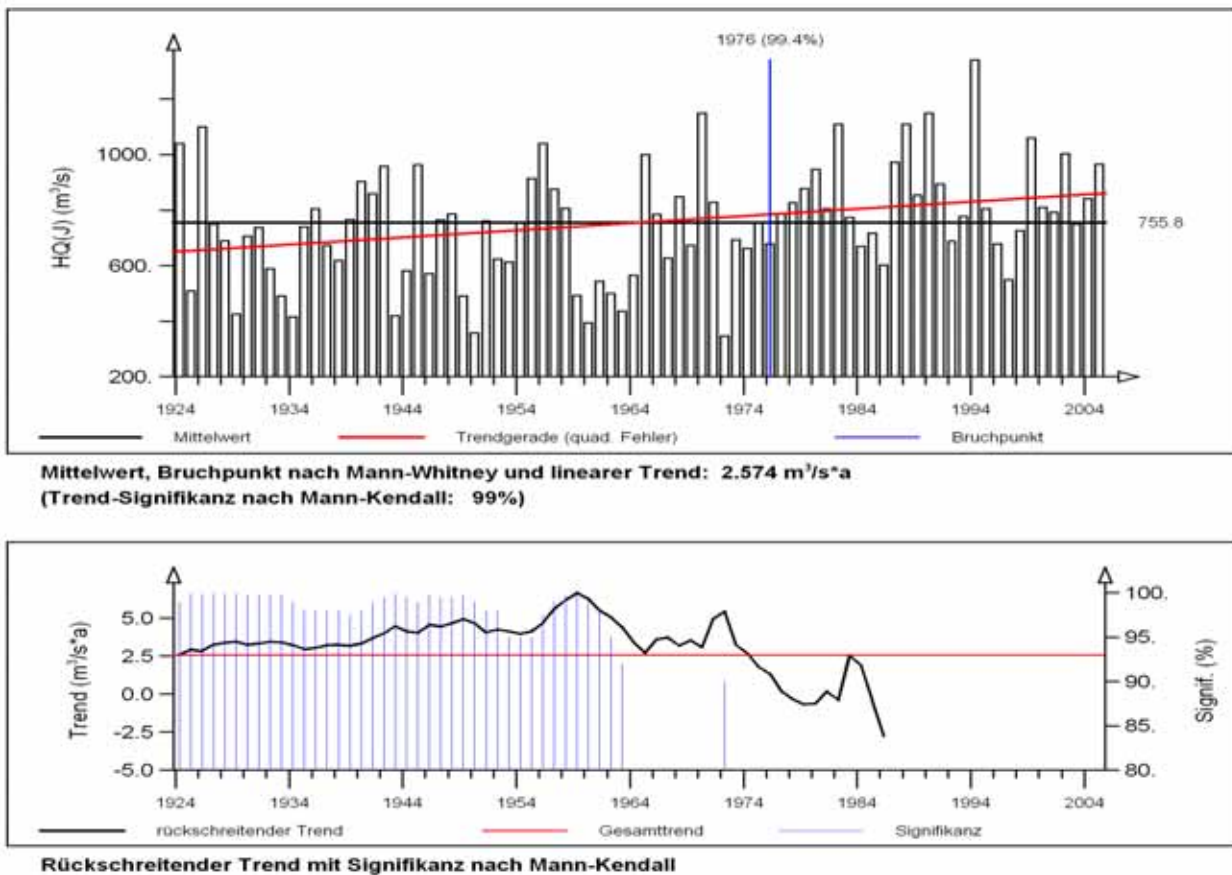


Abb. 4: Pegel Donauwörth/Donau – Jährliche Höchstabflüsse HQ (J) 1924-2005 (hydrologische Jahre) mit den Ergebnissen der Trenduntersuchung.

Die umfangreichen Auswertergebnisse, die in gleicher Darstellungsform für alle Pegel vorliegen, sind nachfolgend nur summarisch und auszugsweise veranschaulicht und beschrieben. Die Auswahl erfolgte dabei so, dass die Befunde verallgemeinernd zu beurteilen sind und daraus Schlussfolgerungen für das Langzeitverhalten ableitbar sind.

3. Analyse des mittleren monatlichen Jahresgangs

Der Jahresgang der mittleren monatlichen Abflusshöchstwerte HQ (m) wurde von jedem Pegel für die Gesamtreihe sowie die verschiedenen Teilzeitreihen, die durch die gewählte Trennung der Gesamtreihe in den Jahren 1951, 1964 und 1974 entstanden, berechnet und dann die Mittelwerte für das Gesamtjahr sowie Sommer- und Winterhalbjahr bestimmt. Daraus sind die Abweichungen der Mittelwerte der Teilzeitreihen (MHQ_{TR}) vom Mittelwert der Gesamtreihe (MHQ_{GR}) eines jeden Pegels hergeleitet und den prozentualen Abweichungsklassen (z. B. 0 – 5 %) zugeordnet worden; das Verhältnis der Mittelwerte wird mit der Formel $\Delta Q [\%] = 100 (MHQ_{TR} - MHQ_{GR}) / MHQ_{GR}$ als prozentuale Abweichung mit einem positiven oder negativen Wert errechnet. Die Verteilung der prozentualen Abweichungen für das Pegelkollektiv „Gesamte Zeitreihe, Winterhalbjahr, Trennungsjahr 1964“ ist exemplarisch in Abbildung 5 als Histogramm für alle Pegel dargestellt.

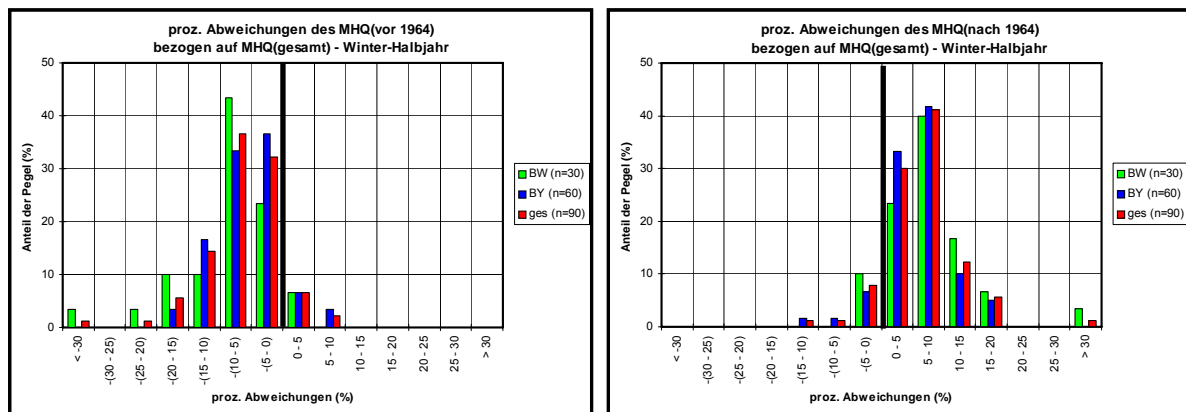


Abb. 5: Verteilung des Anteils der Pegel mit prozentualen Abweichungen der mittleren Hochwasserabflüsse MHQ des Winter-Halbjahres der Teilzeitreihe vor 1964 (linkes Diagramm) und nach 1964 (rechtes Diagramm) bezogen auf den zugehörigen MHQ-Wert der Gesamtreihe

Eine zusammenfassende Übersicht der Analyseergebnisse aller Pegel für die drei gewählten Trennungsjahre, jeweils betrachtet für das Gesamtjahr und die beiden Halbjahre, ist in Abbildung 6 wiedergegeben: Die prozentualen Abweichungen der Teilzeitreihen aller Pegel sind hier als Summenlinie über die Werte der Abweichungsklassen aufgetragen. Der Schnittpunkt von Summenlinie und Null-Ordinate lässt größenordnungsmäßig erkennen, welcher Anteil des Pegelkollektivs unter bzw. über dem MHQ der Gesamtreihe liegt.

Die Abbildung 5 zeigt für das Trennungsjahr 1964, dass die MHQ-Werte der Teilzeitreihen vor 1964 überwiegend unter dem MHQ der Gesamtreihe liegen; die Teilzeitreihen nach 1964 haben dagegen deutlich höhere Werte. Dies wird in Abbildung 6 für alle untersuchten Datenkollektive noch verdeutlicht; die Summenlinien der Teilzeitreihen nach dem Trennungsjahr sind jeweils nach rechts in Richtung höhere Werte verschoben, wie die jeweils rechte Graphik für das Gesamtjahr und die Halbjahre deutlich erkennen lässt.

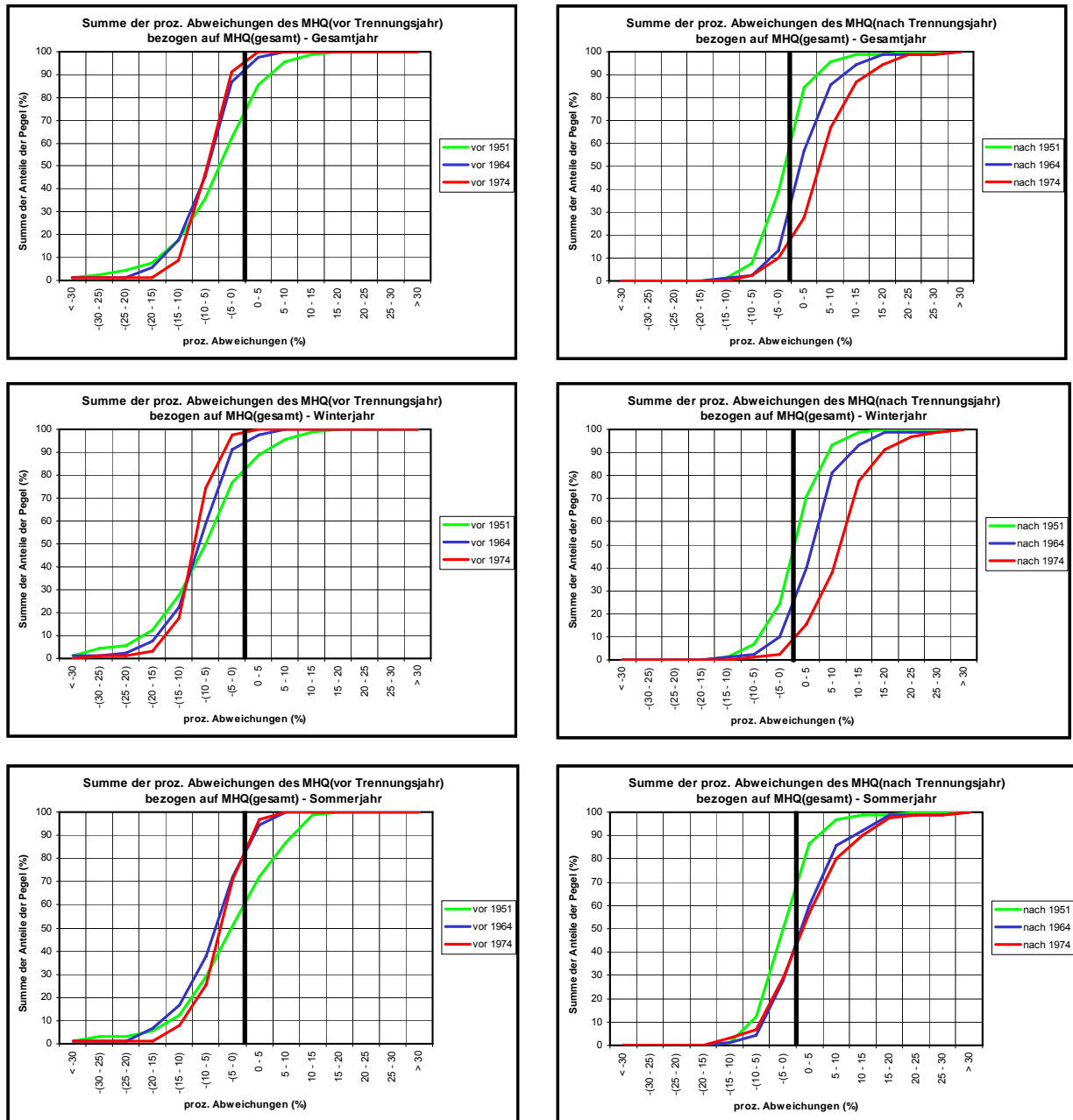


Abb. 6: Verteilung der Summenlinien der prozentualen Abweichungen der Hochwasserabflüsse MHQ der Teilzeitreihen vor den Trennungsjahren 1951, 1964 und 1974 (linkes Diagramm) und nach den Trennungsjahren (rechtes Diagramm) vom zugehörigen MHQ-Wert der Gesamtzeitreihe; die Grafiken stellen die Ereignisse für das Gesamtjahr und die beiden Halbjahre dar.

Für das Abflussverhalten kann daraus gefolgert werden, dass sich die Jahres- und Halbjahresmittelwerte jeweils nach dem Trennungsjahr sowie mit zunehmendem Trennungsjahr in der Summe erhöht haben. Diese Tendenz des Mittelwertanstiegs ist für das Gesamtjahr und das Winterhalbjahr stärker ausgeprägt als für das Sommerhalbjahr. Ausgehend vom Hochwasserabflussregime an den betrachteten Pegel ergibt sich daraus, dass die (kleineren) Hochwasser in den letzten Jahrzehnten insbesondere im Winterhalbjahr häufiger mit höheren Abflussspitzen aufgetreten sind.

4. Trendverhalten der Hochwasserabflüsse

Die Untersuchung des Trendverhaltens bezog sich auf die Abflusshöchstwerte des Gesamtjahres sowie von Winter- und Sommerhalbjahr. Es ergaben sich somit drei verschiedene Jahresserien für jeden der 90 Pegel. Die Analysen ihres Langzeitverhaltens umfassten zunächst jeweils das Datenkollektiv „Gesamte Zeitreihen“. Um auch die zeitliche Veränderung der Abflusshöchstwerte beurteilen zu können, wurden dann in analoger Weise die Datenkollektive „Zeitreihen ab 1932“, „Zeitreihen ab 1951“ und „Zeitreihen ab 1974“ untersucht und ausgewertet.

Die Analyse des Langzeitverhaltens umfasste für jeden Pegel die Ermittlung der Trendgeraden und die Signifikanzprüfung des Trends (siehe Kap. 2). Für die Darstellung und Zusammenfassung von Ergebnissen wurden die berechneten Trendsteigungen jeweils auf den zugehörigen MHQ-Wert bezogen; die Angabe als relativer Trend drückt dazu die prozentuale Abflussänderung pro Jahr aus. Für eine summarische Darstellung des Trendverhaltens des jeweiligen Datenkollektivs wurden die errechneten Einzeltrends noch einzelnen Klassen des relativen Trends (z. B. 0,25 bis 0,50 % pro Jahr) zugeordnet.

Die Ergebnisse aller Trendberechnungen sind grafisch in Abbildung 7 mit den verschiedenen Trendklassen und Zeitreihenkollektiven für das Gesamtjahr und die beiden Halbjahre dargestellt. Alle drei Grafiken lassen erkennen, dass die Trendwerte sich über eine größere Bandbreite erstrecken und dass insbesondere die Mehrzahl der Trendwerte den positiven Trendklassen zugeordnet ist, also überwiegend eine steigende Tendenz aufweist, die sich mit der Verkürzung der Zeitreihen noch verstärkt. So liegt für das Gesamtjahr der Anteil der Pegel mit negativem Trend für das Kollektiv „Gesamte Reihen“ unter 30 % und geht für die anderen Kollektive weiter zurück. Für das Winterhalbjahr liegt der Pegelanteil mit fallendem Trend bei 10 bis 20 %. Lediglich im Sommerhalbjahr zeigt ein höherer Pegelanteil, nämlich 30 bis 40 %, einen abnehmenden Trend.

Eine deutliche Mehrzahl der Pegel weist also hinsichtlich des Langzeitverhaltens eine zunehmende Tendenz, also allgemein einen positiven Trend auf. Ein Test der errechneten Trends nach dem Verfahren von Mann-Kendall auf das Maß an Signifikanz zeigte dann ergänzend, dass die festgestellten Trends nur zum kleineren Teil auf unterschiedlichem Niveau statistisch signifikant sind. Der zahlenmäßige Befund zur Trendsignifikanz ist aus Tabelle 1 ersichtlich.

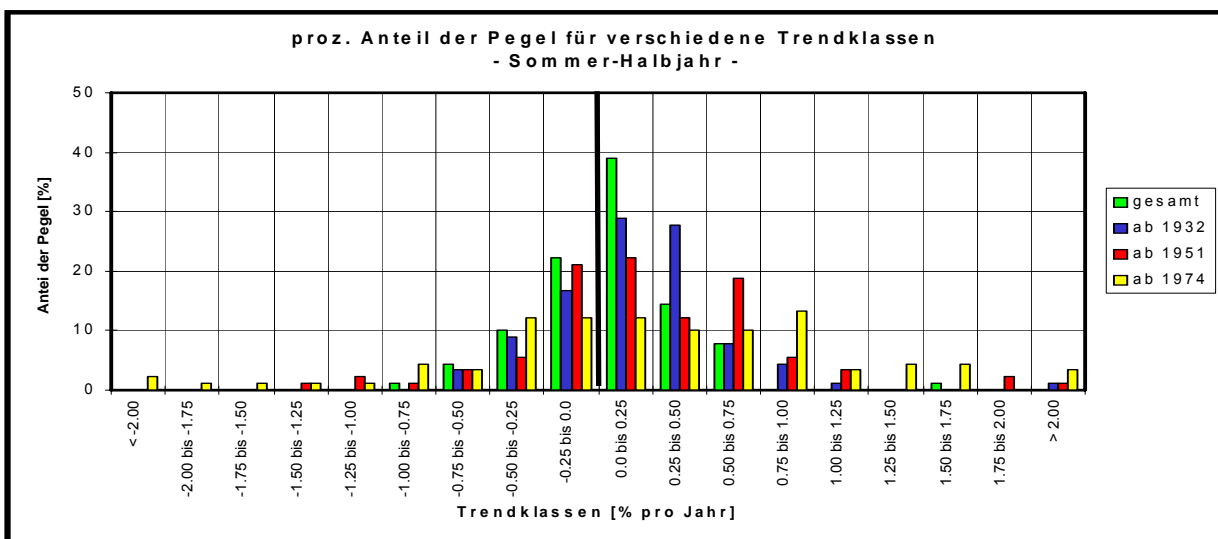
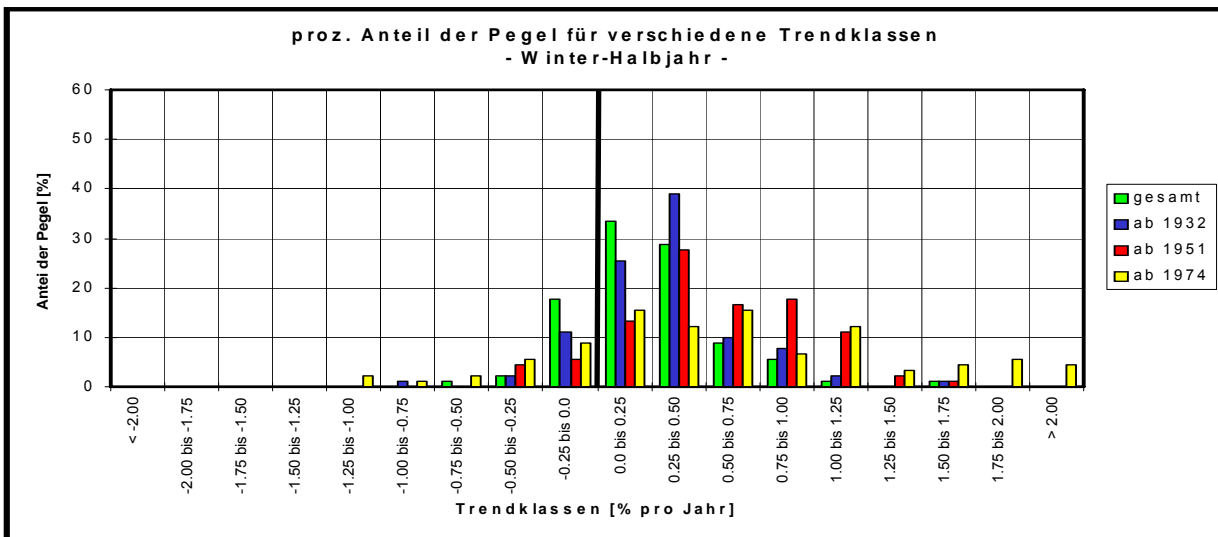
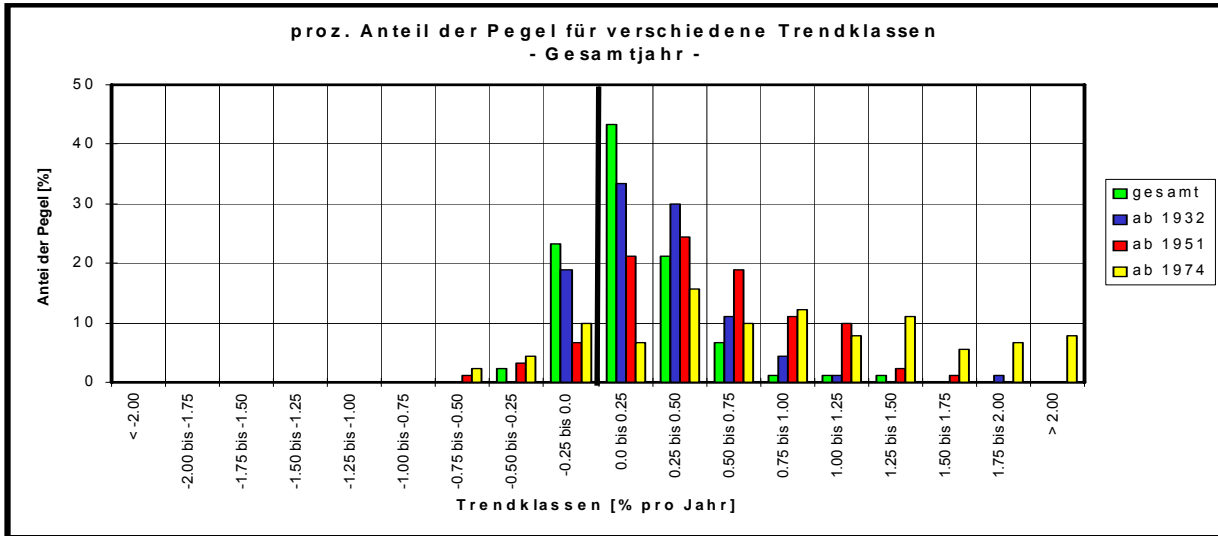


Abb. 7: Darstellung der relativen Trends der Zeitreihenkollektive der Abflusshöchstwerte nach Trendklassen für die Zeitperioden Gesamtjahr, Winterhalbjahr und Sommerhalbjahr.



Abb. 8: Pegelanlage - Ort für die Abflussmessung; außergewöhnlicher Hochwasserabfluss – mögliche Auswirkung einer bereits begonnenen Hochwasserverschärfung

5. Zusammenfassende Bewertung

Zur Untersuchung des Langzeitverhaltens der monatlichen Höchstabflüsse und damit auch der Hochwasserabflüsse konnten 90 Pegel aus Baden-Württemberg und Bayern mit langen Zeitreihen statistisch analysiert werden. Da die Zeitreihen mit dem hydrologischen Jahr 1932 beginnen sollten, weisen alle Zeitreihen mindestens eine Beobachtungsdauer von 72 Jahren auf. Aufgrund der Fragestellung lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf der „klassischen“ Trendanalyse der jährlichen und halbjährlichen Abflusshöchstwerte.

Die Analyse des Langzeitverhaltens hatte zum Ziel, die vorausgegangenen Untersuchungen durch Einbeziehung der letzten Beobachtungsjahre zu aktualisieren und durch die Betrachtung von Teilzeitreihen auch die zeitliche Entwicklung, insbesondere seit Mitte des letzten Jahrhunderts, zu beleuchten. Durch die Einbeziehung von Teilzeitreihen ergab sich eine größere Anzahl von Datenkollektiven, die jeweils in vergleichbarer Weise untersucht wurden.

Die Auswertung des Verhaltens der monatlichen Höchstabflüsse zeigt auffällige Veränderungen: die Jahres- und Halbjahres-Mittelwerte für die Teilzeitreihen der letzten drei bis vier Dekaden liegen bei der Mehrzahl der untersuchten Zeitreihen deutlich über den Mittelwerten von Gesamtreihe bzw. korrespondierenden früheren Teilzeitreihen. Diese ausgeprägte Tendenz der Zunahme der Mittelwerte, insbesondere von MHQ (J) und MHQ (WJ), zeigt, dass die mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse zugenommen haben; dies ist auf eine allgemeine Erhöhung dieser Hochwasserabflüsse und/oder das Auftreten einzelner großer Hochwässer zurückzuführen. Insgesamt zeigt das Ergebnis Abflussveränderungen, die Hochwasserverschärfungen ausdrücken.

Dieser Befund wird durch die Trenduntersuchung der Zeitreihen der Jahres- und Halbjahres-Abflusshöchstwerte untermauert: Die Mehrzahl der Zeitreihen, rund 80 %, zeigen einen positiven Trend, also eine steigende Tendenz bei den Hochwasserabflüssen; diese Tendenz verstärkt sich bei Betrachtung von Teilzeitreihen, die erst nach der Mitte des letzten Jahrhunderts beginnen. Auch wenn die detektierten Trends nur zu einem kleinen Teil statistisch signifikant sind, ist doch für die letzten Jahrzehnte überwiegend ein Anstieg der Hochwasserabflüsse für die untersuchten Pegel festzustellen.

Zusammenfassend ist daraus zu folgern, dass die Hochwasserabflüsse in Süddeutschland an den meisten Pegeln in den letzten Jahrzehnten hinsichtlich Häufigkeit und insbesondere Höhe deutlich zugenommen haben. Diese allgemeine Feststellung ist jedoch dahingehend etwas einzuschränken, dass die Befunde regionale Unterschiede zeigen und statistisch nur teilweise als signifikant untermauert sind. Die festgestellten Veränderungen bei den Abflusshöchstwerten müssen aber, auch in Zusammenschau mit der Veränderung der hydrometeorologischen Größen Temperatur und Starkniederschlag, als erste Auswirkungen des seit einigen Jahrzehnten erkennbaren Klimawandels gedeutet werden. Die bisherigen Simulationsrechnungen mit den Ergebnissen regionaler Klimaszenarien lassen für die Zukunft eine weitere Hochwasserverstärkung erwarten.

Abschließend sei noch angemerkt, dass die durchgeführten umfangreichen Auswertungen auch Hinweise für weitere Untersuchungen nahe legen, um die komplexe Fragestellung noch umfassender beantworten zu können. Beispielhaft sei dazu lediglich erwähnt, dass die angenommene Stationarität in den Zeitreihen, die vor dem Hintergrund des Klimawandels nicht mehr uneingeschränkt gültig ist, auch neuere Ansätze und Untersuchungsmethoden ergänzend erfordern könnte, um die bisherigen Befunde zu verfeinern.

Danksagung:

Der Autor dankt Herrn Dr. Ihringer vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe für die Durchführung der Auswertungen und die kritische Diskussion der umfangreichen Ergebnisse, die hier nur sehr summarisch dargestellt und bewertet sind.

6. Literatur

Ihringer, J.: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse an ausgewählten Pegeln in Baden-Württemberg und Bayern – Ergänzungsuntersuchung vom November 2006; unveröffentlichter Arbeitsbericht der Universität Karlsruhe

Straub, H.: Langzeitverhalten von hydrologischen Größen. KLIWA-Heft 4 (2004), S. 57 – 72

Straub, H.: Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse – Ergebnisse aus KLIWA. KLIWA-Heft 1 (2001), S. 122 – 139.



Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland

Winfried Willems
Institut für Angewandte Wasserwirtschaft und Geoinformatik

1. Einleitung

Das Jahr 2003 war weit überdurchschnittlich warm und niederschlagsarm. So waren die Monate Juni und August die wärmsten seit hundert Jahren in Deutschland. In weiten Teilen Bayerns erreichten die täglichen Maxima der Temperaturen Werte über 30 °C, die Monatsmittel lagen um bis zu 5 °C über den langjährigen Durchschnittswerten. Die Auswirkungen auf das Grund- und Oberflächenwasser mit Folgewirkungen zum Beispiel für Ökologie, Wasserwirtschaft und Schifffahrt sind in mehreren Arbeiten eingehend untersucht worden (z.B. BLfW 2004, Belz et al. 2004). Betrachtet man allein die mit Niedrigwasserphasen einhergehenden Kosten (z.B. Demuth 2004), so wird leicht verständlich, dass die Frage der Stationarität der Niedrigwasserverhältnisse von ähnlicher Bedeutung ist wie die Stationarität der Hochwasserverhältnisse.

In der vorliegenden Arbeit wird die zurückliegende und die zu erwartende Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland untersucht. Dazu werden zunächst Langzeituntersuchungen auf der Grundlage gemessener Abflüsse durchgeführt. Diese beschränken sich auf insgesamt 36 Einzugsgebiete in Bayern. Um die Niedrigwasserverhältnisse für zukünftige Klimaverhältnisse abzuschätzen, werden Ergebnisse präsentiert, die auf Wasserhaushaltsmodellierungen mit Klimamodellierungsergebnissen für die Dekaden 2020 bis 2050 basieren. Diese Betrachtungen zu den zukünftigen Verhältnissen erfolgen für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg sowie für das bayerische Main-Einzugsgebiet. Hinsichtlich der hier dargestellten Betrachtungen zu Baden-Württemberg wird zurück gegriffen auf Wasserhaushaltsmodellierungen des Ing.-Büros Dr. Ludwig und statistische Niedrigwasserauswertungen des Instituts für Wasser und Gewässerentwicklung, Abteilung Hydrologie der Universität Karlsruhe.

2. Zielgrößen der Untersuchungen

Die Niedrigwasserkennwerte, die Zielgrößen dieser Untersuchung sind, werden aus Zeitreihen mittlerer täglicher Abflüsse gewonnen. Als mittlere tägliche Abflüsse dienen im Fall der Langzeituntersuchungen (Kap. 4) die Messungen an den Pegeln und im Fall der Szenario-Untersuchungen (Kap. 5) die anhand von Wasserhaushaltsmodellierungen erzeugten Abflusszeitreihen.

Bei den Niedrigwasserkennwerten sind die abflussbezogenen (DWVK 1983) von den zum Beispiel für Fragen der Schifffahrt und Ökologie relevanten, dauer- und defizitbezogenen Kennwerten (DVWK 1992) zu unterscheiden. Hier werden allein abflussbezogene Niedrigwasserkennwerte betrachtet.

Dabei ist die sogenannte NMxQ-Serie die Wertereihe des niedrigsten arithmetischen Mittels der an x aufeinanderfolgenden Tagen innerhalb eines Bezugszeitraumes auftretenden Abflüsse. Als Bezugszeitraum dient dabei das Wasserhaushaltsjahr (in Kap. 4 und 5.3 definiert als Zeitraum zwischen April und März des Folgejahres, in Kap. 5.2 als Zeitraum zwischen Mai und April) oder geeignete Teilzeiträume (z.B. Sommerhalbjahr, Winterhalbjahr, Monate). Für x=1 ergibt sich als arithmetischer Mittelwert der NMxQ-Serie des Gesamtjahres das MNQ, bei monatlichem Bezugszeitraum das monatliche mittlere Niedrigwasser MoMNQ. Die Wahrscheinlichkeitsanalyse des NMxQ führt zum NMxQ mit Jährlichkeitsbezug, also zum Beispiel zum 10-jährlichen NMxQ(10). Die Anzahl x von Tagen, über die die Mittelung erfolgt, wird in Kap. 4 auf x=1 sowie x=7 festgelegt, in Kap. 5 wird ausschließlich mit x=1 gearbeitet. Im Falle unbeeinflusster Abflusszeitreihen sollte sich das NM7Q nicht wesentlich vom NM1Q unterscheiden.



In Kap. 5.2 wird die NM1Q-Serie mit NQ(J), die monatlichen Niedrigwasser mit MNQ(m) und das 10-jährliche NM1Q mit NQ₁₀ bezeichnet.

3. Statistische Untersuchungsmethoden

Für die statistische Untersuchung der Niedrigwasserkennwerte werden die im Folgenden beschriebenen Methoden angewandt. Dabei sind t-Test des Steigungskoeffizienten, Mann-Kendall-Test und Devianztest im Rahmen der instationären Wahrscheinlichkeitsanalyse die zugrundeliegenden Ansätze für Kap. 4 und der t-Test zum Mittelwertsvergleich sowie die lokale und regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse die Ansätze für Kap. 5.

t-Test des Steigungskoeffizienten

Beim Test des Steigungskoeffizienten wird die Geradengleichung $NMxQ(t) = \alpha + \beta \cdot t$ durch Minimierung der Fehlerquadratsumme angepasst und anschließend mittels t-Test geprüft, ob sich der Steigungskoeffizient β signifikant von Null unterscheidet (s. z. B. Willems / Dick 2003). Da der t-Test die Normalverteilung der Daten voraussetzt, ist das Testergebnis nur näherungsweise gültig. Wie bei allen weiteren, nachfolgend erläuterten Signifikanztests wird eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % zugrunde gelegt. Zur Überprüfung, inwieweit die Linearitätsannahme des Trends gerechtfertigt ist, wird zusätzlich zur Trendgeraden eine Trendlinie auf der Grundlage einer sogenannten lokalen Regression ermittelt und der Korrelationskoeffizient zwischen beiden berechnet. Je höher die Korrelation, umso gerechtfertigter ist die Linearitätsannahme. Die lokale Regression ist dabei mit einer Tiefpassfilterung vergleichbar, weist jedoch nicht deren Nachteil auf, dass Werte am rechten und linken Rand der Daten verloren gehen (s. Cleveland 1981).

t-Test zum Mittelwertsvergleich

Mittels des t-Tests kann die Gleichheit der arithmetischen Mittelwerte von zwei Stichproben der Variablen X und Y der Umfänge n_x und n_y geprüft werden. Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Testes ist, dass beide Stichproben normalverteilt und die Varianzen beider Stichproben näherungsweise identisch sind (zur empirischen und kritischen Prüfgröße s. z.B. DVWK 1983).

Konfidenzgrenzen von Mittelwerten

Die untere und obere Konfidenzgrenze (c_u , c_o) des Mittelwertes \bar{x} einer aus n Werten bestehenden, normalverteilten Stichprobe mit der Standardabweichung s lassen sich berechnen in der Form $c_u = \bar{x} - t_{n-1, \alpha/2} \cdot s / \sqrt{n}$, $c_o = \bar{x} + t_{n-1, \alpha/2} \cdot s / \sqrt{n}$, wobei $t_{n-1, \alpha/2}$ das Quantil der t-Verteilung mit $n-1$ Freiheitsgraden und der Irrtumswahrscheinlichkeit α darstellt.

Mann-Kendall-Test

Der Mann-Kendall-Test ist der wohl am weitesten verbreitete Trendtest für geophysikalische Datenreihen (McCuen 2003). Es ist ein nichtparametrischer Test, der keine Voraussetzungen an die Verteilung der Daten stellt. Es wird auch keine Annahme über die Art des Trends gemacht (z.B. linear oder nichtlinear), da lediglich nach einem relativen Ansteigen oder Abfallen der Reihenwerte gesucht wird. Auf diese Art sind zwar Aussagen über die Signifikanz der Änderung möglich, es können aber keine Informationen über den zeitlichen Verlauf oder die Größenordnung der Änderung abgeleitet werden. Auf eine Beschreibung des Verfahrens wird hier verzichtet (s. Willems / Dick 2003, McCuen 2003).

Lokale Wahrscheinlichkeitsanalyse

Zur Extremwertanalyse von hydrologischen Extremwerte-Serien mit dem Ziel der Ermittlung von Bemessungsgrößen sind in den zurückliegenden Jahren zahlreiche Wahrscheinlichkeitsverteilungen und mehrere Parameterschätzmethoden (Momente, L-Momente, Maximum Likelihood) entwickelt worden (s. z.B. DVWK 1983, DVWK 1999, Willems / Dick 2003). Eine Sonderstellung

nimmt dabei die Verallgemeinerte Extremwertverteilung ein (im Weiteren mit GEV abgekürzt, entspricht der in DWVK 1999 mit AEV bezeichneten Verteilung). So geht theoretisch bei sehr großer Werteanzahl jede innerhalb zeitlich konstanter Blöcke (hier Jahre) gebildete Extremwertserie in die GEV über (Coles 2001) und zudem enthält die Verteilung die drei Extremwertverteilungen Gumbel, Frechet und Weibull als Spezialfälle. Bei der Anpassung der GEV sind der Lokationsparameter μ , der Skalenparameter σ und der Formparameter γ zu schätzen. Die Extremwertserie $NMxQ(t)$ wird also (im stationären Fall) abgebildet durch das Wahrscheinlichkeitsmodell $NMxQ(t) \sim GEV(\mu, \sigma, \gamma)$.

Instationäre Wahrscheinlichkeitsanalyse

Voraussetzung für die Anwendung der Wahrscheinlichkeitsanalyse in der dargestellten Form ist die Stationarität der Serien, also die Abwesenheit von Trends, Sprüngen oder sonstiger Inhomogenitäten. Liegen jedoch Instationaritäten vor, so wird in den DVWK (1999) vorgeschlagen, die Serien zunächst von der Instationarität zu bereinigen (z.B. durch Trendelimination) und die Wahrscheinlichkeitsanalyse auf die bereinigten Serien anzuwenden. Wesentlich vorteilhafter ist die Erweiterung des wahrscheinlichkeitsanalytischen Modells um eine Trendkomponente. Dies erfolgt, indem einer oder mehrere der drei Parameter nicht als konstant sondern als Funktion der Zeit betrachtet werden. Die theoretischen Hintergründe dieser Vorgehensweise erläutert Coles (2001), hydrologische Anwendungen liefern z.B. Katz et al. (2002) und Willems (2004).

Im einfachsten Fall, wenn nur der Lokationsparameter μ als linear trendbehaftet betrachtet wird, ergibt sich das Modell $NMxQ(t) \sim GEV(\mu(t), \sigma, \gamma)$, $\mu(t) = b_0 + b_1 t$. Das Wahrscheinlichkeitsmodell hat also in diesem Fall die vier Parameter b_0 , b_1 , σ und γ . Die Trendkomponente kann auch nichtlineare Funktionen oder Sprungfunktionen annehmen. Anstelle oder zusätzlich zum Lokationsparameter kann auch der Skalen- und / oder der Formparameter als zeitabhängige Größe modelliert werden. Die Parameterschätzung kann bei Erweiterung nur mittels der Maximum-Likelihood-Methode erfolgen.

Prinzipiell strebt man an, bei der Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilung der Extremwertserie $NMxQ(t)$ möglichst wenige Parameter zu schätzen. Zur Festlegung der signifikanten Terme hat sich der aus der Theorie der Verallgemeinerten Linearen Modelle entlehnte Devianz-Test bewährt (s. z.B. ANDREß 1986). Zentrale Prüfgröße ist dabei die so genannte Devianz D , die als globale oder partielle Devianz definiert werden kann. Die hier nur betrachtete partielle Devianz berechnet sich wie folgt:

$$D(M1, M2) = 2(L1(M1) - L2(M2))$$

Dabei sind $M1$ und $M2$ zwei mögliche Modellformen zur Beschreibung von $NMxQ(t)$, wobei $M2$ das gegenüber $M1$ höher parametrisierte Modell ist und $L1()$ und $L2()$ die logarithmierten, aus der Maximum-Likelihood-Schätzung resultierenden, maximierten Likelihood-Werte der Modelle $M1$ bzw. $M2$. Sind nun die p für das Modell $M2$ zusätzlich zu ermittelnden Parameter in Wahrheit Null, dann ist die partielle Devianz mit $Df=p$ Freiheitsgraden X^2 -verteilt. Mit anderen Worten: ist D größer als $X^2_{(Df, 1-\alpha)}$, dann spricht dies für die Verwendung des komplexeren Modells $M2$, ist D kleiner oder gleich X^2 , dann sollte das einfachere Modell $M1$ verwendet werden. Dabei ist α die angenommene Irrtumswahrscheinlichkeit.

Regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse

Die regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse, die ursprünglich auf Arbeiten von Dalrymple (1960) zurückgeht, wurde von Hosking / Wallis (1997) in der Hydrologie etabliert. Das Ziel besteht darin, die Unsicherheiten der Quantilschätzungen zu verringern, indem der Stichprobenumfang durch Zusammenfassen von Serien mit statistisch ähnlichen Eigenschaften vergrößert wird. Grundannahme ist dabei, dass sich die Wahrscheinlichkeitsverteilungen verschiedener Pegel in einer homogenen Region nur hinsichtlich eines Skalierungsfaktors (sogenannte "Index-Flood",



meist der Mittelwert der Extremwert-Serie) voneinander unterscheiden. Die Parameteranpassung erfolgt daher gemeinsam für die Extremwert-Serien aller Pegel der homogenen Region. Beim Ansatz von Hosking / Wallis (1997) ist die Vorgehensweise dabei wie folgt: Für alle Pegel einer homogenen Region erfolgt zunächst die Division der Einzelwerte der Extremwerte-Serie durch den Skalierungsfaktor, dann die Berechnung der pegelbezogenen L-Momente für die normierten Werte und die Ermittlung regionaler L-Momente durch gewichtete Mittelung der pegelbezogenen L-Momente, wobei sich das Gewicht aus der jeweiligen Reihenlänge ergibt. Schließlich erfolgt die Berechnung der Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung mittels der L-Momentenmethode unter Nutzung der regionalen L-Momente.

In Kap. 5.3 wird die regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse in modifizierter Form zur Abschätzung der Klimafaktoren eingesetzt, indem die durch den Skalierungsfaktor der normierten Werte aller Pegel einer Region unmittelbar der Parameterschätzung mittels Maximum-Likelihood unterzogen werden. Als Wahrscheinlichkeitsverteilung wird wiederum die Verallgemeinerte Extremwertverteilung (GEV) zugrunde gelegt. Ziel der Anwendung der regionalen anstelle der lokalen Wahrscheinlichkeitsanalyse ist es dabei, den Grad der Unsicherheit durch gemeinsame Betrachtung mehrerer Pegel im Einzugsgebiet zu verringern. Die Entscheidung darüber, welche Pegelseries dabei zusammengefasst werden können, werden dabei hier nicht aufgrund formalstatistischer Kriterien wie Diskordanz und Heterogenität (Hosking / Wallis 1997) abgeleitet, sondern allein aufgrund hydrologischer Überlegungen.

4. Langzeituntersuchungen in Bayern

4.1 Untersuchungsgebiete und Ergebnisse

Die Langzeituntersuchungen werden in insgesamt 36 Einzugsgebieten in Bayern mit Gebietsgrößen zwischen 50 und 2020 km² durchgeführt (Abbildung 1). Folgende Kriterien sind für die Auswahl der Pegel maßgeblich:

- geringe anthropogene Beeinflussung durch Einleitungen, Entnahmen oder Speicher im Einzugsgebiet (s. dazu Belke et al. 2003),
- stabile Abflusskurve im Bereich kleiner Abflüsse,
- hinreichende Länge der Zeitreihe,
- Repräsentanz hinsichtlich der Naturräume und hydrogeologischen Einheiten Bayerns und
- Relevanz auch im Rahmen von KLIWA - Untersuchungen zum Hochwasser.

Der früheste Beginn der Messungen liegt im Jahr 1901 (Pegel Sonthofen / Iller), der späteste Beginn bei 1951 und das früheste Ende bei 2001. Die nachfolgend erläuterten Untersuchungen werden sowohl für die jeweiligen Maximalzeiträume als auch für den gemeinsamen Zeitraum 1951 bis 2001 durchgeführt.

Zunächst werden die NM1Q- und NM7Q-Serien für das Wasserhaushaltsjahr sowie das Sommer- und das Winterhalbjahr aus den Messwerten aller Pegel extrahiert. Bezogen auf die Gesamtjahr-Serien wird der Korrelationskoeffizient zwischen NM1Q und NM7Q für alle Pegel ermittelt. Die 36 Korrelationskoeffizienten liegen zwischen 0,92 und 0,99 mit einem Mittelwert von 0,97.

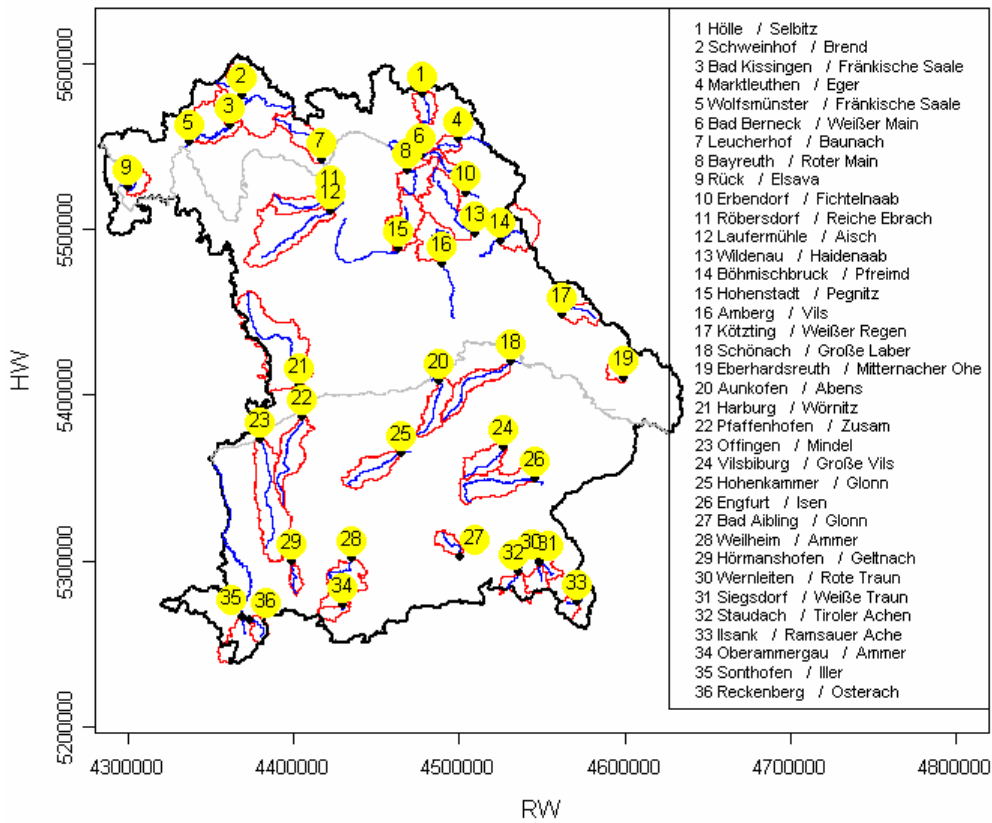


Abb. 1: Untersuchungsgebiete

In den folgenden Kartendarstellungen werden die Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für das NM1Q des Winter- (Abbildung 2, links) und des Sommerhalbjahres (Abbildung 2, rechts) sowie die Ergebnisse der Devianztests auf Trends im GEV-Lokationsparameter von NM7Q für das Winterhalbjahr (Abbildung 3, links) sowie im Skalenparameter von NM7Q für das Wasserhaushaltsjahr (Abbildung 3, rechts) dargestellt, ermittelt über den gemeinsamen Messzeitraum 1951 - 2001.

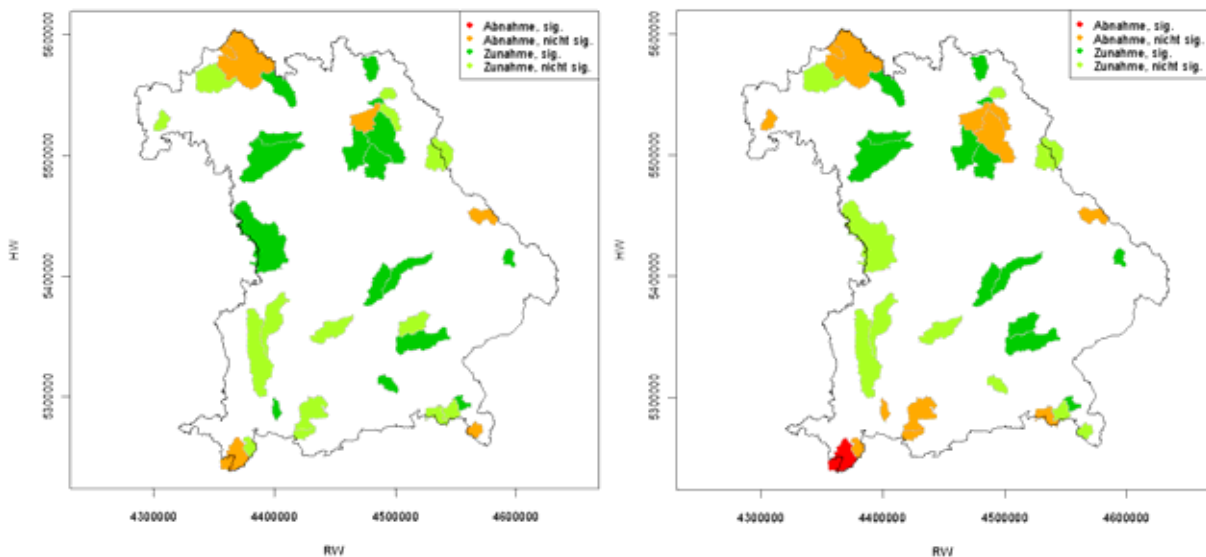


Abb. 2: Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests für das NM1Q des Winter- (links) und des Sommerhalbjahres (rechts)

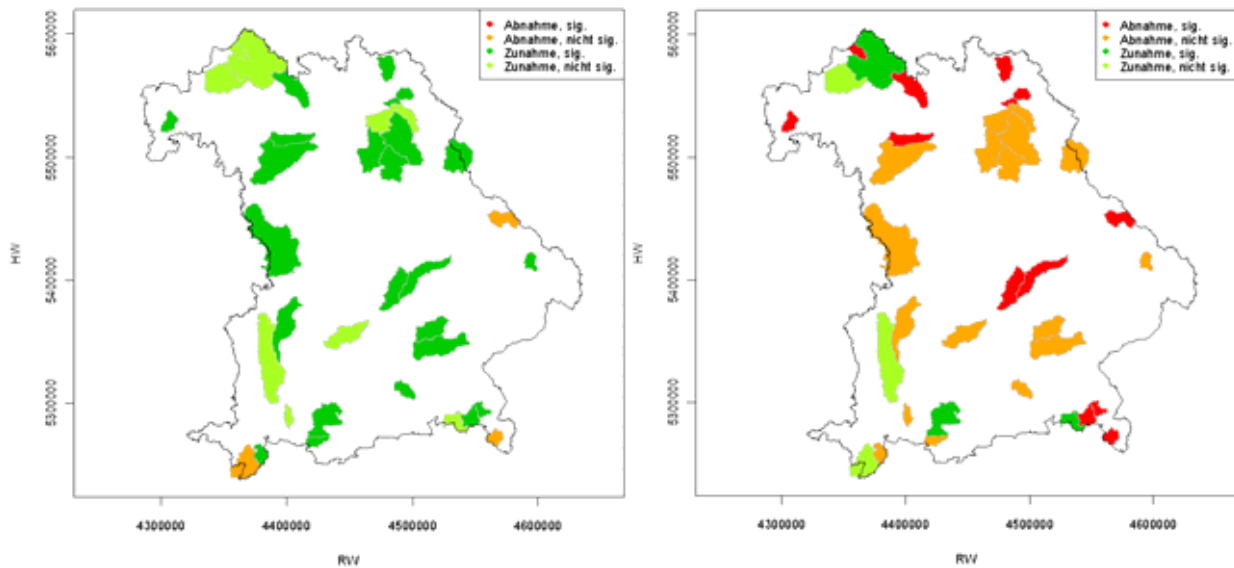


Abb. 3: Ergebnisse der Devianztests auf Trend des Lokationsparameters für das NM7Q für das Winterhalbjahr (links) und des Skalenparameters für das Wasserhaushaltsjahr (rechts)

Um neben der räumlichen Verteilung auch die Größenordnungen der Veränderungen zu quantifizieren, werden in Abbildung 4 Häufigkeitsverteilungen der Änderungsraten aus den linearen Trend-Untersuchungen für das NM1Q und das NM7Q des Sommer- und Winterhalbjahres dargestellt. Dazu wird die jährliche Änderungsrate durch den jeweiligen Mittelwert dividiert und in 7 Klassen eingeteilt (Tabelle 1). Nicht signifikante Trends (Mann-Kendall-Test) werden dabei der Klasse 0 (keine Änderung) zugeteilt. Abbildung 4 lässt erkennen, dass zum Teil erhebliche Zunahmen hinsichtlich der Winterniedrigwasserabflüsse sowohl bei NM1Q als auch bei NM7Q stattgefunden haben. Bei den Sommerniedrigwasserkennwerten ist der Anteil nichtsignifikanter Trends höher und neben positiven Trends treten in geringerer Häufigkeit auch signifikante Abnahmen auf.

Tab. 1: Einteilung von relativen Änderungsraten

Jährliche Änderungsrate in Prozent des Mittelwerts	Klasse	Bedeutung
- 1,5 bis - 1,0	- 3	erhebliche Abnahme
- 1,0 bis - 0,5	- 2	deutliche Abnahme
- 0,5 bis - 0,05	- 1	Abnahme
- 0,05 bis 0,05	0	keine Änderung
0,05 bis 0,5	1	Zunahme
0,5 bis 1,0	2	deutliche Zunahme
1,0 bis 1,5	3	erhebliche Zunahme

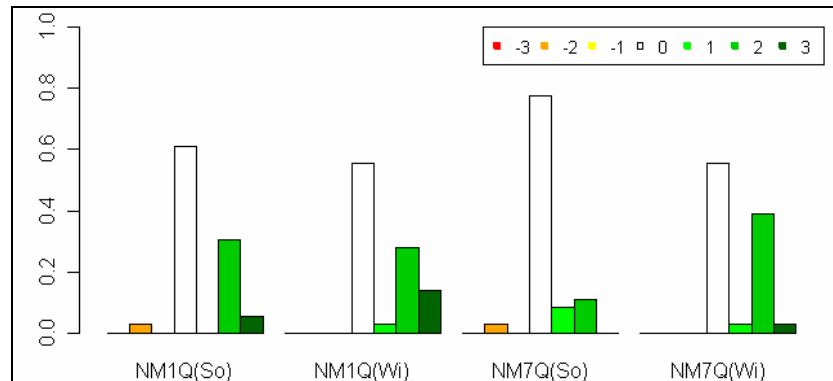


Abb. 4: Häufigkeit des Auftretens von Trends im NM1Q und NM7Q des Sommer- und des Winterhalbjahres, nichtsignifikante Trends sind der 0-Klasse zugeordnet

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse der Langzeituntersuchungen wie folgt zusammenfassen:

- Die Niedrigwasserabflüsse an zahlreichen bayerischen Pegeln zeigen eine ansteigende Tendenz. Diese resultieren im wesentlichen aus einer Zunahme im Winter; im Sommer sind die Tendenzen weniger einheitlich.
- Die Ergebnisse des Mann-Kendall-Tests, des t-Tests des Steigungskoeffizienten und des Devianztests des Lokationparameters der GEV sind sehr ähnlich. Anstiege der Niedrigwasserabflüsse gehen also einher mit Anstiegen der Niedrigwasserquantile. So lässt sich zum Beispiel der instationären Wahrscheinlichkeitsanalyse des NM7Q am Pegel Hölle / Selbitz entnehmen, dass das 10-jährliche NM7Q im Jahr 1951 $0,41 \text{ m}^3/\text{s}$, im Jahr 2001 dagegen $0,52 \text{ m}^3/\text{s}$ beträgt.
- Der Skalenparameter der GEV zeigt häufig fallende Tendenzen. Die Streuungen der Niedrigwasserabflüsse nehmen also häufig ab.
- Die Ergebnisse zum Trendverhalten von NM1Q und zum NM7Q sind hinsichtlich der Kernaussagen identisch.
- Auch bei Ausdehnung des Betrachtungszeitraumes auf den jeweiligen Maximal-Zeitraum ergeben sich keine grundlegenden Unterschiede zum Gesagten.

5. Szenariountersuchungen

5.1 Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellierungen

Um zukünftige Niedrigwasserverhältnisse abzuschätzen, werden die Ergebnisse von Wasserhaushaltsmodellierungen auf der Grundlage von Klimamodell-Rechnungen statistisch untersucht.

Die den Wasserhaushaltsmodellierungen zugrunde liegenden Klimadatensätze resultieren aus dem statistischen Downscaling eines transienten Laufes des ECHAM4-Klimamodells. Ausgewertet werden dabei das IPCC-Emissionsszenario B2 für die Dekaden von 2021/2030 bis 2041/2050. Bei dem B2-Szenario wird ein fast linearer Anstieg der CO_2 -Emissionen angenommen, der bis zum Jahr 2100 etwa zur Verdopplung der jetzigen CO_2 -Konzentration führt. Zentraler Bestandteil des statistischen Downscaling-Modells von Enke (2003) ist eine Wetterlagenklassifikation, bei der zunächst objektivierte, durch charakteristische Temperatur- und Feuchtregime definierte Wetterklassen erzeugt werden.

Insgesamt handelt es sich bei den ENKE-Klimaszenarien um jeweils 10 Realisationen von Anwendungen des Downscaling-Modells auf die ECHAM4-Ergebnisse für die drei Dekaden 2021-2030, 2031-2040 sowie 2041-2050. Jede Dekade wird dabei durch 20 Jahre repräsentiert. Zusätzlich liegt eine Enke-Realisation für die Periode 1971-2000 vor (Kontrolllauf).



Im Folgenden werden die durchgeführten Wasserhaushaltsmodellierungen in den Einzugsgebieten des bayerischen Main kurz beleuchtet (Willems et al. 2005). Auf die vom Ingenieurbüro Dr. Ludwig, Karlsruhe, mit dem Modell LARSIM durchgeführten Wasserhaushaltsmodellierungen in Baden-Württemberg, deren niedrigwasserbezogenen Ergebnisse in Kap. 5.2 erläutert werden, wird hier nicht weiter eingegangen.

Eine Übersicht über das für die Wasserhaushaltsmodellierungen betrachtete Untersuchungsgebiet zeigt Abbildung 5. Es handelt sich um die Teilgebiete des Unteren / Mittleren Main, der Tauber und der Regnitz. Als Wasserhaushaltsmodell wird das Modell ASGi / WaSiM eingesetzt (Schula 1997).

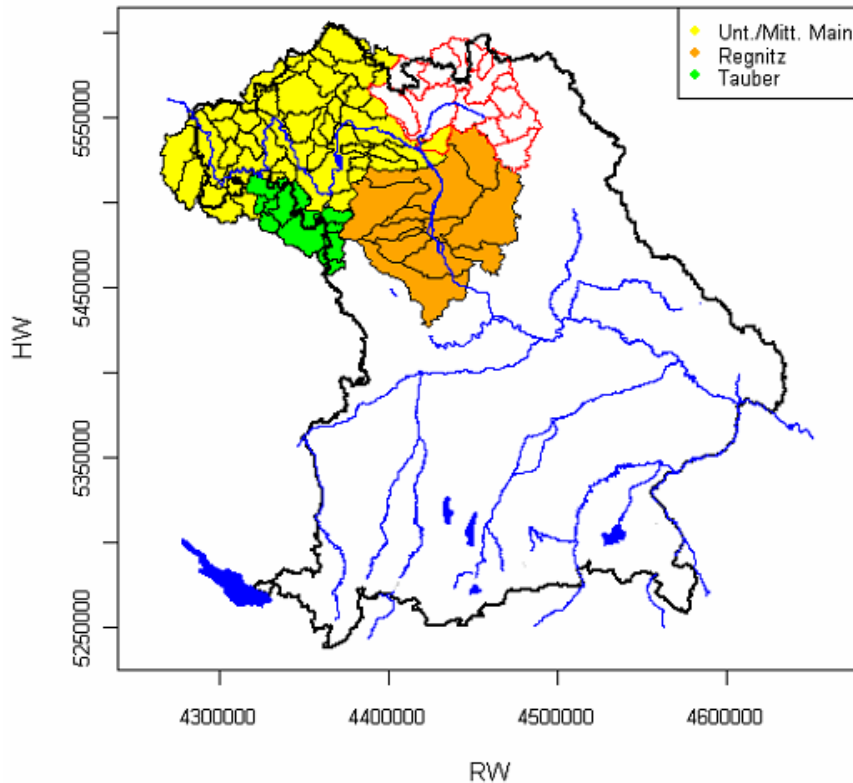


Abb. 5: Betrachtete Teilgebiete des bayerischen Main

Um die aufwändige Kalibrierung vor allem des Gebiets Unterer / Mittlerer Main mit insgesamt 40 Teilgebieten möglichst effizient zu gestalten, wird eine Gesamtstrategie zur Kalibrierung des Bodenmodells eingesetzt, die aus folgenden Schritten besteht (Willems et al. 2005):

1. Vorermittlung des Topmodel-Parameter m sowie der Rückgangskonstanten KD und KH mit Hilfe von speziellen Rückgangsanalysen.
2. Überwachte, systematische Parametervariation zunächst von T_{korr} und m , dann von weiteren Bodenparametern. Der Zwischenabfluss ist dabei zunächst abgeschaltet ($SH_{max}=0$) und wird später zugeschaltet. Die Überwachung besteht in der laufenden Überprüfung von Gütemaßen und der Visualisierung von Ganglinien.
3. Parameteroptimierung zunächst von T_{korr} und m , dann von weiteren Bodenparametern. Die Startwerte und Parametergrenzen werden aus Schritt 2 übernommen, als Parameteroptimierungsverfahren wird das auf der Evolutionsstrategie basierende SCE-Verfahren eingesetzt (Duan / Qingyun 1992, Duan et al. 1992).

Im Ergebnis der Kalibrierung (Kalibrierungszeitraum 1983 - 1996) werden bezogen auf das Gebiet Unterer / Mittlere Main 80 % der Pegelgebiete mit Nash-Sutcliffe-Effizienzen über 0,7 und 54 % der Gebiete mit Effizienzen über 0,8 abgebildet. Bei der nachfolgenden Validierung über

den Zeitraum 1975 bis 1985 werden 68 % der Teilgebiete mit Nash-Sutcliffe-Effizienzen über 0,7 und 46 % der Gebiete mit Effizienzen über 0,8 abgebildet. Der Durchschnittswert liegt bei 0,78 (Abbildung 6). Überlagert man die Validierungsergebnisse mit geologischen Informationen, dann ist zu erkennen, dass die Gebiete mit Gütewerten unter 0,7 eng korrelieren mit der Verbreitung der mainfränkischen Muschelkalkplatten, wo schwer parametrisierbare Karsteinflüsse zu erwarten sind (Abbildung 6).

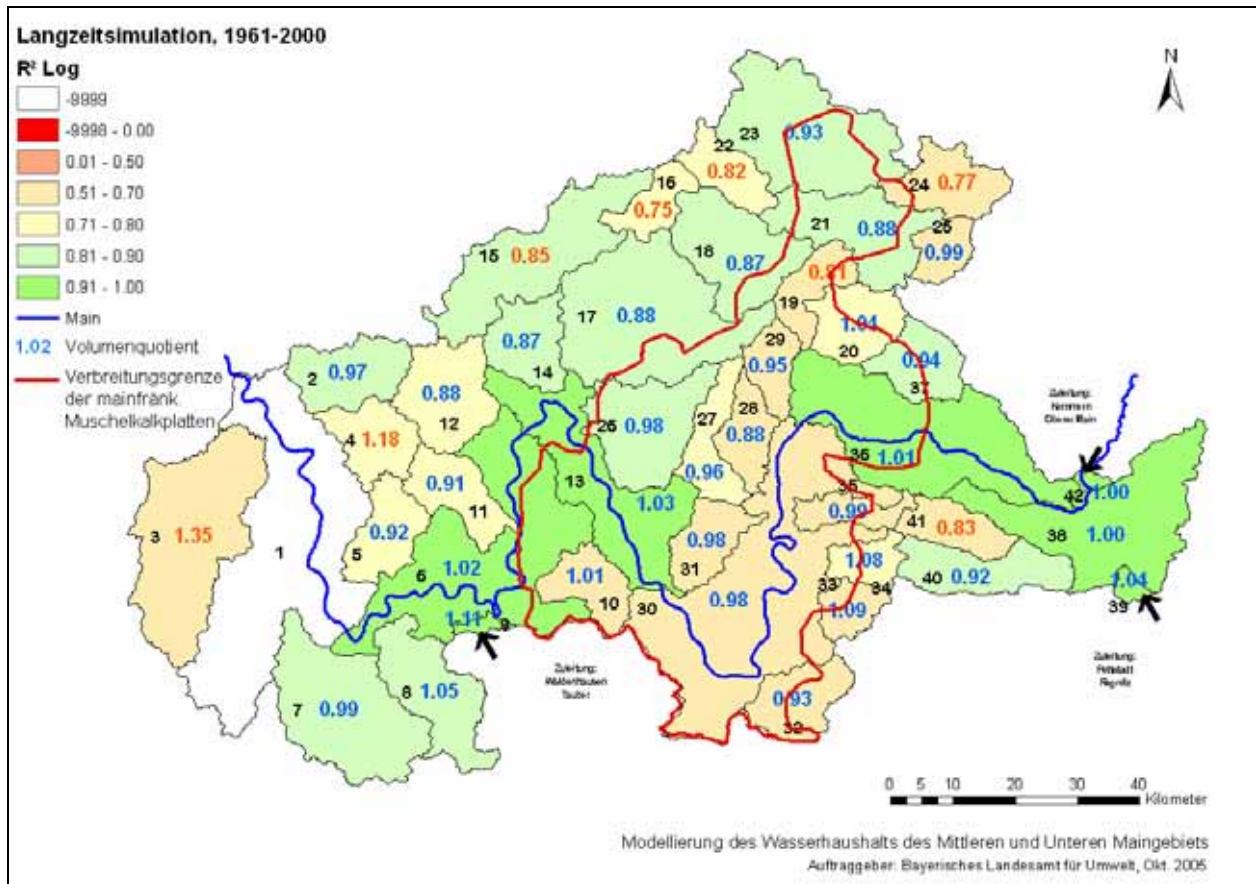


Abb. 6: Gütewerte und Volumenquotienten der Langzeitsimulation, Gebiet Mittlerer / Unterer Main, Validierung

Problematisch im Falle der Regnitz ist die Modellierung der Wirkung der Donau-Main-Überleitung im Rahmen der Klimaszenarien. Da die Überleitung sowohl von den Abflüssen im Regnitz-Gebiet als auch von einem ausreichenden Abfluss in der Donau abhängt und erforderliche Informationen für den Prognosehorizont nicht bekannt sind, wurde entschieden, diese bei den hier vorgenommenen Betrachtungen nicht zu berücksichtigen.

5.2 Niedrigwasserbezogene Ergebnisse für Baden-Württemberg

Es werden zunächst die Ergebnisse der vom Institut für Wasser und Gewässerentwicklung der Universität Karlsruhe durchgeführten statistischen Niedrigwasseranalysen in Baden-Württemberg dargestellt. Einbezogen werden dabei insgesamt 75 Pegel und Gewässerstellen mit Einzugsgebietsgrößen zwischen 49 km² und 13760 km² (Pegel Heidelberg / Karlstor). Aus den gemessenen und modellierten Zeitreihen mittlerer täglicher Abflüsse werden folgende Kennwerte-Serien abgeleitet:

- monatliche Niedrigwasserabflüsse NQ(m)
- jährliche Niedrigwasserabflüsse NQ(J) für das hydrologische Jahr von Mai bis April



- jährliche Niedrigwasserabflüsse $NQ(So)$ für das Sommer-Halbjahr von Mai bis Oktober

Statistisch analysiert und bewertet werden:

- der Jahresgang der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse $MNQ(m)$,
- der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss $MNQ(J)$, abgeleitet aus dem Jahresgang,
- der mittlere jährliche Niedrigwasserabfluss des Winter-Halbjahres $MNQ(Wi)$ und des Sommer-Halbjahres $MNQ(So)$, jeweils abgeleitet aus dem Jahresgang,
- der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ des Jahres und Sommer-Halbjahres, abgeleitet aus den entsprechend Niedrigwasserabflüssen $NQ(J)$ und
- T-jährliche Niedrigwasserabflüsse NQT für die Jährlichkeiten $T = 2, 5, 10, 20, 50, 100$ und 200 Jahre über die Methoden der Extremwertstatistik, getrennt für die Niedrigwasserabflüsse des Jahres und des Sommer-Halbjahres.

Um die Vielzahl der verschiedenen statistischen Auswertungen für die unterschiedlichen Abfluss-Szenarien an den einbezogenen Pegel und Gewässerstellen miteinander vergleichen und bewerten zu können, werden jeweils Veränderungsfaktoren für die verschiedenen Abfluss-Kennwerte, abgeleitet aus jeweils zwei Abflusszeitreihen, ermittelt. Dabei werden zur Bewertung der Güte des Klimamodells für den Ist-Zustand und zur Quantifizierung einer Abflussveränderung infolge des Klimawandels folgende Zeitreihen miteinander verglichen:

- Ist-Zustand mit Abflusssimulation (Abflussberechnung mit den gemessenen Niederschlägen): Der Vergleich zwischen der Abflusssimulation und dem Klimaszenario für den heutigen Klimazustand (Ist-Zustand) zeigt, ob das Klimamodell den heutigen Klimazustand mit ausreichender Genauigkeit beschreibt. Dieser Vergleich basiert auf der gemeinsamen Zeitspanne 1971-2000.
- Zukunfts-Zustand mit Ist-Zustand: Aus dem Vergleich der Szenariorechnung für den zukünftigen Klimazustand (Zukunfts-Zustand) mit dem zugehörigen Ist-Zustand kann die erwartete Abflussveränderung infolge eines Klimawandels abgeleitet und beurteilt werden.

In der folgenden Abbildung 7 werden die Ergebnisse für das $MNQ(Wi)$, das $MNQ(So)$ und das monatliche $MNQ(m)$ exemplarisch für den Pegel Schwaibach / Kinzig dargestellt. Im Einzelnen werden die Niedrigwasserkennwerte dabei aus folgenden Zeitreihen gewonnen:

- aus gemessenen Abfluss-Zeitreihen über den gesamten Beobachtungszeitraum (schwarz),
- aus berechneten Abfluss-Zeitreihen für den Zeitraum 1961-2000 auf der Grundlage der beobachteten Niederschläge der Niederschlagsmessstationen in Baden-Württemberg (rot),
- aus berechnete Abflussganglinien für den Zeitraum 1971-2000 auf der Basis des Enke-Daten für den heute vorhandenen Klimazustand (Ist-Zustand 1971-2000) (blau) und
- aus berechneten Abflussganglinien auf der Basis der Enke-Daten mit den mittleren Zukunfts-Zustand 2021-2050 unter Einbeziehung aller 600 Realisierungsjahre (grün).

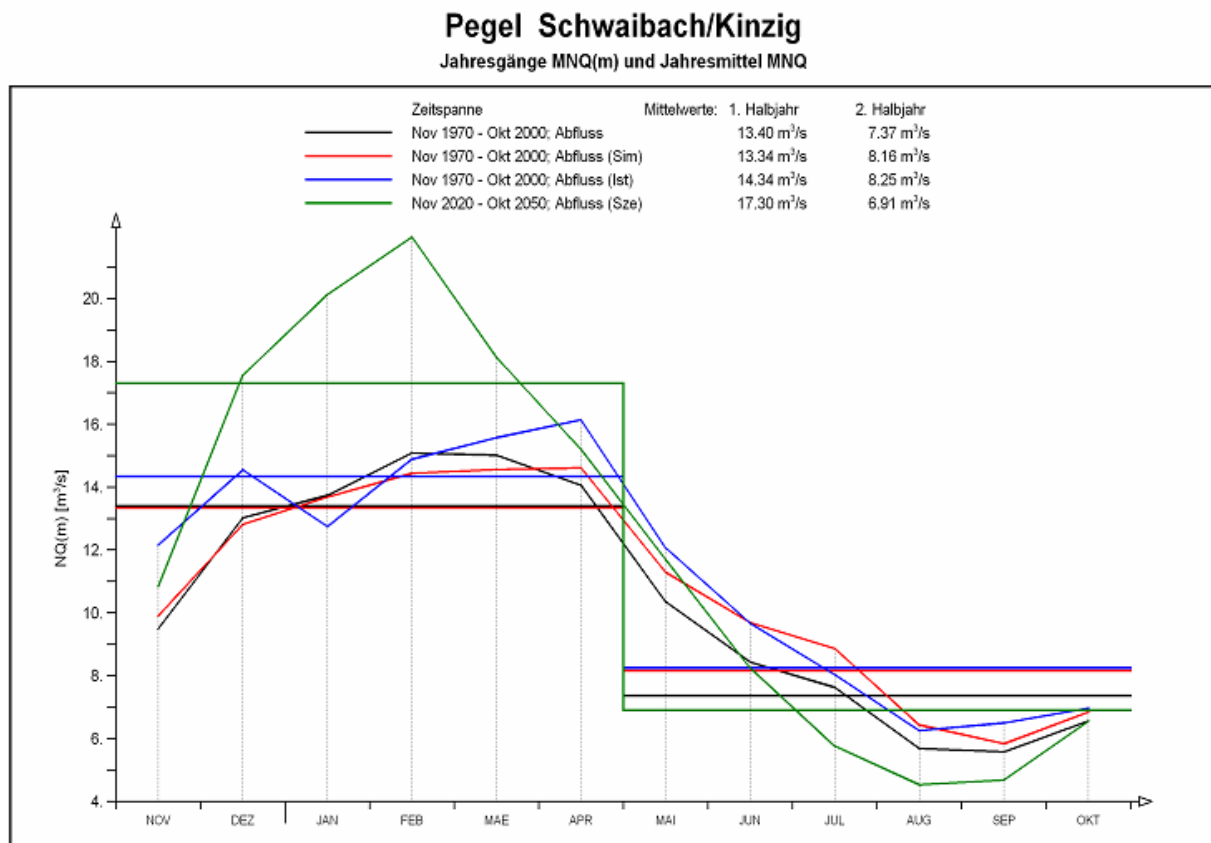


Abb. 7: MNQ(Wi), MNQ(So) und MNQ(m) aus Messungen und Klimaszenarien am Pegel Schwaibach / Kinzig

Zur weiteren Beurteilung der Unterschiede zwischen zwei Abflusszeitreihen werden jeweils Verhältnisfaktoren $NQ(\text{Zukunfts-Zustand}) / NQ(\text{Ist-Zustand})$ berechnet und in Abweichungsklassen eingeteilt. Bei den verschiedenen Abfluss-Kennwerten wird folgende Klasseneinteilung und zugehörige Bewertung vorgenommen (Tabelle 2):

Tab. 2: Klasseneinteilung und Bewertung der Verhältnisfaktoren

NQ(Zukunft) / NQ(Ist)	Bewertung	Prozentual
< 0,80	starke Abnahme	> 20 %
0,8 - 0,9	deutliche Abnahme	10 % - 20 %
0,9 - 1,1	schwache Veränderung	< +/- 10 %
1,1 - 1,2	deutliche Zunahme	10 % - 20 %
> 1,2	starke Zunahme	> 20 %

Die Verhältnisfaktoren für die verschiedenen Regionen in Baden-Württemberg zeigt Tabelle 3 bezogen auf MNQ und das 10-jährliche NQ. Zusätzlich werden die Ergebnisse zu MNQ in Abbildung 8 als Karte dargestellt.



Tab. 3: Verhältniswerte für MNQ und NQ₁₀

Gebiet	MNQ _z / MNQ _i	NQ _{10,z} / NQ _{10,i}
Tauber	1,0 – 1,1	0,9 -1,0
Oberer Neckar oh. Enz	0,9 – 1,0	0,9 -1,0
Unterer Neckar uh. Enz	1,0	1,0
Enz	1,0 – 1,1	1,0
Kocher, Jagst	0,8 - 0,9	0,9 - 1,0
Obere Donau bis Sigmaringen	0,8 - 0,9	0,8 - 0,9
Untere Donau ab Sigmaringen	0,9 -1.0	1,0
Nördliche Donau	0,9 -1.0	0,9 - 1,0
Südliche Donau	0,9 -1.0	0,8 - 0,9
Bodensee	0,9 -1.0	0,8 - 0,9
Hochrhein bis Wutach	0,8 - 0,9	0,8 - 0,9
Hochrhein ab Wutach	0,7 - 0,8	0,8 - 0,9
Südlicher Oberrhein bis Murg	0,7 - 0,8	0,8 - 0,9
Nördlicher Oberrhein ab Murg	1,0 -1,1	1,1 - 1,2

Einfluss einer Klimaveränderung
Mittlerer Niedrigwasserabfluss MNQ

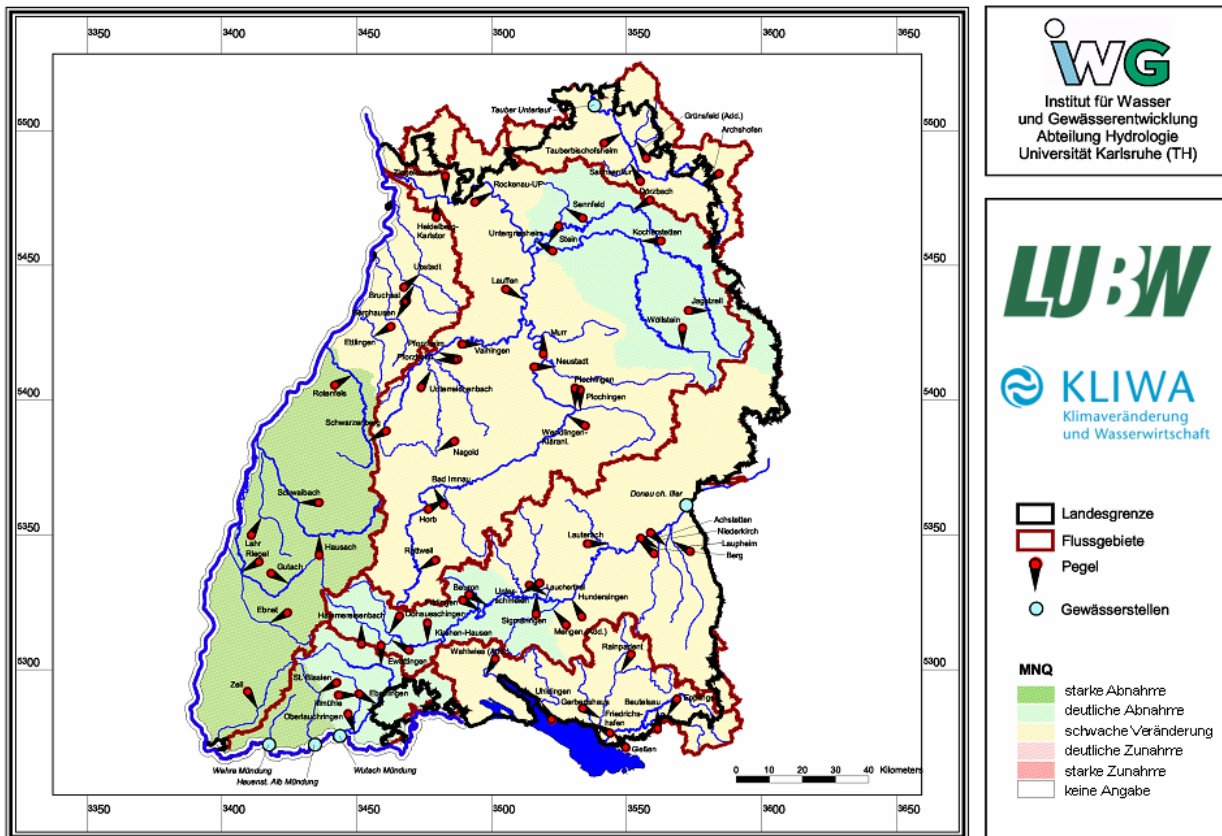


Abb. 8: Veränderung des 10-jährlichen Niedrigwasserabflusses MNQ

Regionsspezifisch zeigen die Auswertungen der Niedrigwasserabflüsse sehr eindeutige Tendenzen (Tabelle 3, Abbildung 8):

- Das Einzugsgebiet der Donau zeigt vorwiegend eine Tendenz zu kleineren Niedrigwasserabflüssen. Hiervon betroffen ist der Oberlauf der Donau bis zum Pegel Sigmaringen sowie die nördlichen Zuflüsse zur Donau mit vorwiegend deutlichen Abnahmen (10 % - 20 %). Die Gewässerstellen entlang der Donau unterhalb des Pegels Sigmaringen zeigen schwache Veränderungen (< 10 %).
- Die südlichen Zuflüsse zur Donau, der Bereich des Bodensees sowie die Gebiete entlang des Hochrheins und des südlichen Oberrheins oberhalb der Murg weisen zum Teil deutliche Abnahmen auf. Dabei nehmen die Abnahmen bei den südlichen Zuflüssen zur Donau mit steigender Jährlichkeit zu. Während beim MNQ noch schwache Veränderungen (< 10 %) vorliegen, ergeben sich beim NQ_{10} deutliche Abnahmen (10 % - 20 %) für das Sommerhalbjahr. Diese Tendenz verstärkt sich etwas im Bereich des Bodensees. Hier weist bereits der mittlere Niedrigwasserabfluss MNQ im Sommerhalbjahr deutliche Abnahmen (10 % - 20 %) auf und NQ_{10} zeigt starke Abnahmen (> 20 %). Im Bereich des östlichen Hochrhein-Gebiets ergeben sich über alle Kennwerte vorwiegend deutliche Abnahmen (10 % - 20 %). Unterhalb der Wutachmündung zeigt sowohl der Hochrhein als auch der südliche Oberrhein bis zur Murgmündung starke Abnahmen (> 20 %) beim MNQ und deutliche Abnahmen beim NQ_{10} .
- In den Einzugsgebieten von Tauber und Neckar sind vorwiegend nur schwache Veränderungen zu erwarten. Deutliche Abnahmen (10 % - 20 %) zeigen sich im Bereich von Kocher und Jagst beim mittleren Niedrigwasserabfluss MNQ.
- Zunehmende Tendenzen in den Niedrigwasserabflüssen liegen ausschließlich im Bereich des nördlichen Oberrheins unterhalbnördlich der Murg vor. Die einbezogenen Gewässerstellen in diesem Bereich zeigen über alle Kennwerte zunehmende Tendenzen. Diese ergeben zunächst beim MNQ schwache Veränderungen (< 10 %), und erreichen beim NQ_{10} -Wert deutliche Zunahmen (10 % - 20 %).

5.3 Niedrigwasserbezogene Ergebnisse für Bayern

Die Abbildung 9 zeigt die monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse am Pegel Bad Mergentheim / Tauber. Die Kennwerte basieren dabei auf Abflussberechnungen mittels WaSiM unter Verwendung von Klimadaten

- des Enke-Ist-Szenario über den Zeitraum 1971 - 2000 (IstE, gelb),
- der realen Klimadaten über den Zeitraum 1961 - 1990 (IstR, dunkelgrau)
- der Enke-Klimaprojektionen über die Zeiträume 2020-30 (Sz2_), 31-40 (Sz3_) und 41 -50 (Sz4_) Jahre (Grautöne abnehmender Intensität)

Die Linien oberhalb der Balken geben die Konfidenzbereiche der Mittelwerte an und die Einfärbungen der Linien zeigen an, ob die Mittelwerte diejenigen zu IstE signifikant überschreiten (grün), unterschreiten (rot) oder ob die Unterschiede nicht signifikant sind.

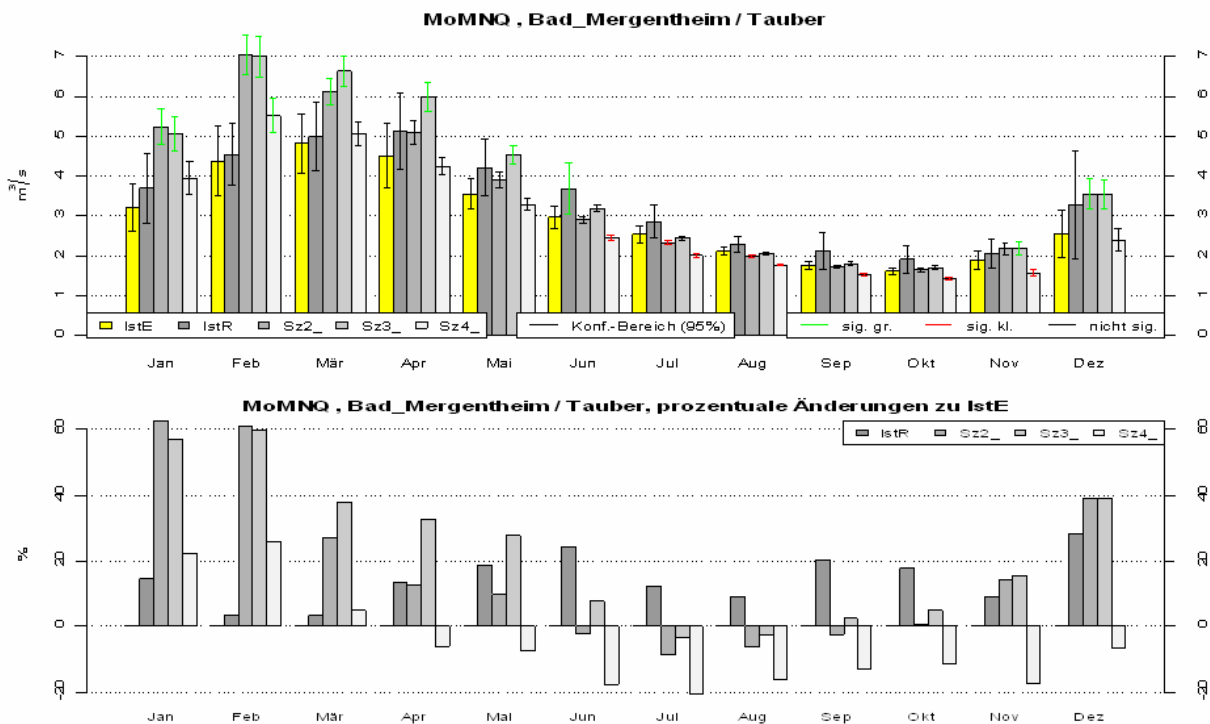


Abb. 9: MoMNQ am Pegel Bad Mergentheim / Tauber, ermittelt aus berechneten Abflüssen für verschiedene Klimaszenarien (oben) sowie prozentuale Abweichungen zum Szenario IstE (unten)

Folgendes lässt sich in Abbildung 8 erkennen:

- Die MoMNQ- Hauptwerte des Referenzszenario werden durch die Zukunftsszenarien im Winter überschritten und im Sommer unterschritten.
- Die prozentualen Überschreitungen im Winter erreichen maximal bis zu 40 % und die prozentualen Unterschreitungen im Sommer bis zu - 20 %.
- Die Überschreitungen im Winter sind bei Sz2_ und Sz3_ signifikant und besonders ausgeprägt, die Unterschreitungen im Sommer bei Sz4_
- Die Breite der Konfidenzlinien nimmt mit größeren Hauptwerten zu, die breitesten Konfidenzbänder zeigen in der Regel die Hauptwerte zu IstR. Dies deutet darauf hin, dass die natürliche Variabilität der MoMNQ durch die Szenarien nicht hinreichend abgebildet wird.

In der Abbildung 10 werden die Ergebnisse der Signifikanztests auf Unterschiede in den Mittelwerten in komprimierter Form für eine größere Zahl von Pegeln im Gebiet des bayerischen Main dargestellt. Dabei sind signifikante Überschreitungen der IstE-Hauptwerte durch grüne Kästchen, signifikante Unterschreitungen durch rote Kästchen und nicht signifikante Unterschiede durch schwarze Kästchen symbolisiert. Rechts und unterhalb von den Kästchen wird die Anzahl der für den jeweiligen Pegel und das jeweilige Szenario resultierenden, signifikanten Unterschiede nochmals aufgeführt.

Die Abbildung bestätigt im Wesentlichen die für Bad Mergentheim herausgearbeiteten Feststellungen. Man erkennt, dass signifikante Zunahmen im Winter bei allen Zukunftsszenarien auftreten, signifikante Abnahmen im Sommer sich jedoch auf das Sz4_-Szenario beschränken.

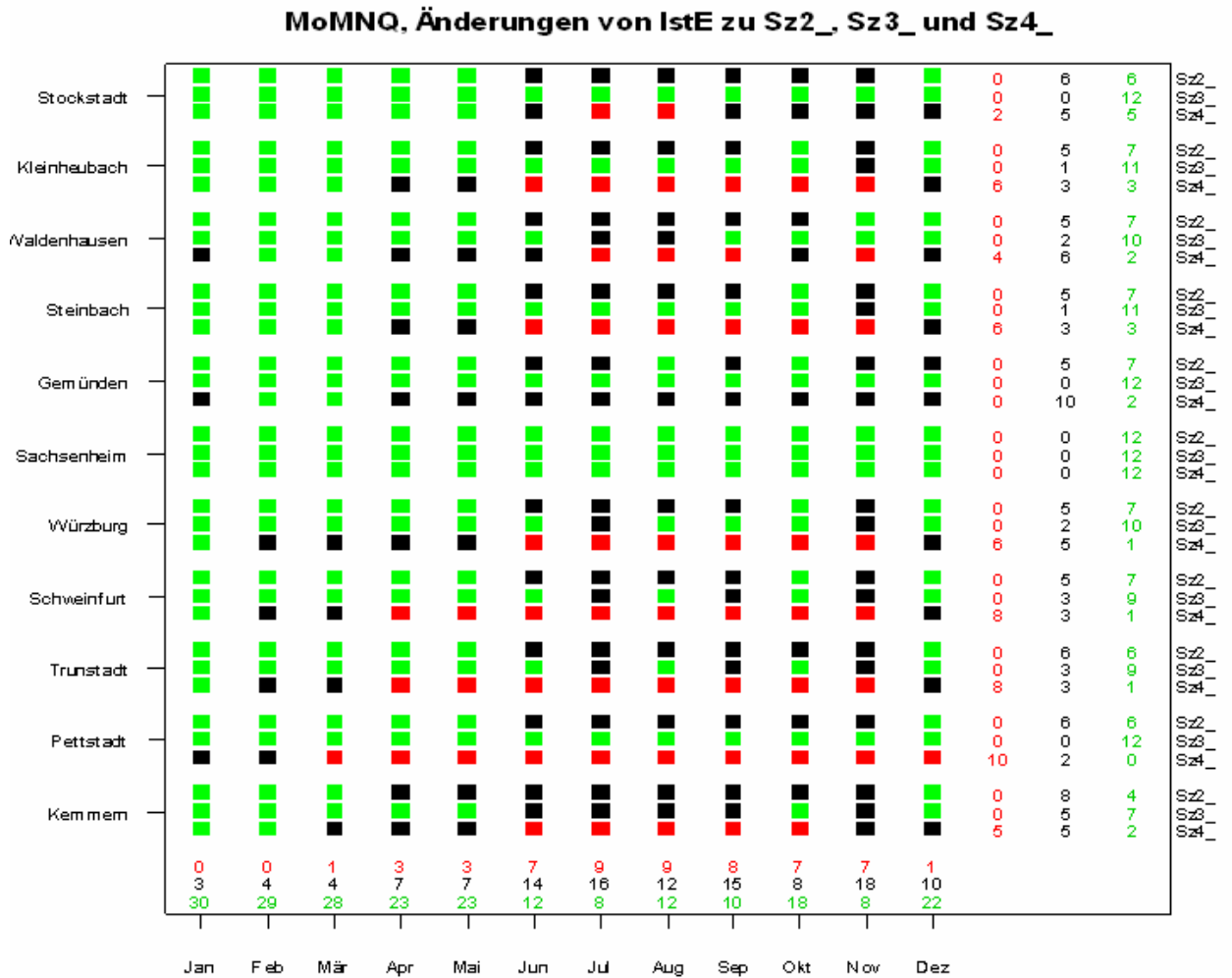


Abb. 10: Signifikanz der Änderungen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflusses für elf Pegel in verschiedenen Teileinzugsgebieten des bayerischen Main

Insgesamt sind damit die Überschreitungen in der Regel dann besonders deutlich und oft signifikant, wenn bereits jetzt die höchsten MoMNQ im Jahr auftreten und die Unterschreitungen treten dann auf, wenn bereits jetzt die niedrigsten MoMNQ stattfinden. Um die Gründe für diese innerjährlichen Veränderungen besser zu verstehen, werden harmonische Analysen der mittleren Tagessummen von Gebietsniederschlag, Verdunstung und Abfluss für die verschiedenen Klimaszenarien durchgeführt. Die Ergebnisse zu Niederschlag und Abfluss für den Pegel Waldenhausen / Tauber zeigt Abbildung 11. Dabei wird deutlich, dass beim Niederschlag eine vollständige Phasenumkehr, verbunden mit einer leichten Phasenverschiebung zu einem etwas früher in der Jahresmitte auftretenden Maximum auftritt. Beim Abfluss führt dies zu einer Verstärkung heutiger Saisonalitätsmuster, also zu einer Verstärkung der Amplitude.

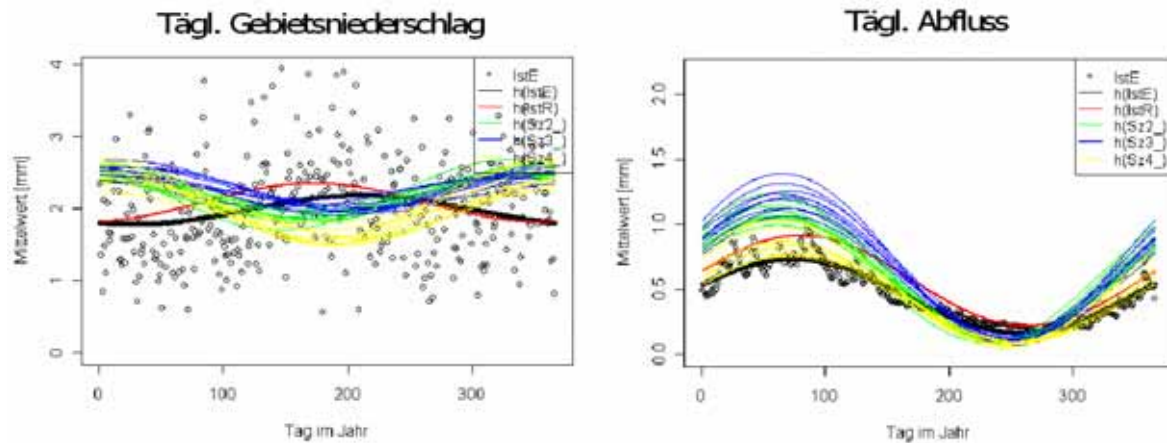


Abb. 11: Harmonische Analyse der mittleren täglichen Gebietsniederschlagssumme (links) und des mittleren täglichen Abflusses (rechts) am Pegel Waldenhausen / Tauber

Die Ergebnisse der extremwertstatistischen Untersuchung der Niedrigwasserabflüsse mittels regionaler Wahrscheinlichkeitsanalyse zeigt Tabelle 4. Dargestellt sind dabei die rechnerisch sich ergebenden Klimafaktoren in der Form $KF = NM1Q_{Sz}(T) / NM1Q_{IstE}(T) - 1 * 100$, wobei für die Szenarien $NM1Q_{Sz}$ alle Enke-Zukunftsszenarien zusammengefasst werden. Grundlage der Berechnungen ist dabei die auf die GEV aufsetzende, regionale Wahrscheinlichkeitsanalyse. In Spalte 2 der Tabelle 4 ist angegeben, welche Pegel zu einer Region zusammengefasst werden.

Tab. 4: Klimafaktoren für $NM1Q$ für die Jährlichkeiten $T=2, 10, 20, 50$ und 100

Gebiet	Zu „Region“ zusammengeführte Pegel	Klimafaktor KF [%]				
		T=2	10	20	50	100
Regnitz	Laufermühle / Aisch, Roth / Rednitz, Neumühle, Hüttendorf, Pettstadt	- 4	- 24	- 30	- 36	- 40
Tauber	Lauda, Tauberbischofsheim, Waldenhausen	- 1	- 7	-10	- 15	- 18
Mittlerer / Unterer Main, Main	Kleinheubach, Steinbach, Würzburg, Schweinfurt, Trunstadt, Kemmern	- 1	- 12	-15	- 18	- 20
Fränkische Saale	Wolfsmünster, Bad Kissingen und Salz	8	9	8	6	5

Auffallend sind die im Vergleich zu den anderen Gebieten deutlich andersartigen Verhältnisse im Einzugsgebiet der Fränkischen Saale, einhergehend mit deutlich größeren, hochwasserbezogenen Klimafaktoren (Kleinhans, 2006). Anders als bei den Klimafaktoren zum Hochwasser (Kleinhans, 2006) steigen in den Gebieten Regnitz, Tauber und entlang der hier betrachteten Main-Strecke die Absolutwerte der Faktoren mit zunehmender Jährlichkeiten an.

5.4 Unsicherheiten der Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse zu möglichen, zukünftigen Niedrigwasserverhältnissen in Süddeutschland weisen eine Reihe von Unsicherheiten auf, die in jedem Teilschritt der Modellkette „IPCC- Emissionsszenario > Klimamodell > Downscaling-Modell > Wasserhaushaltsmodell > statistische Auswertemodelle“ entstehen und sich fortpflanzen. Diese Unsicherheiten können hier nicht umfassend diskutiert werden, sondern sollen lediglich am Beispiel der Ergebnisse des

Downscaling-Modells exemplarisch verdeutlicht werden. Dazu werden in Abbildung 12 zwei weitere harmonische Analysen präsentiert. Dabei handelt es sich zum einen um die harmonische Analyse der sogenannten Interquartile Range IQR der täglichen Niederschlagssummen, also des Abstandes zwischen dem 25 %- und dem 75 %-Quantil (Abbildung 12, links) und der Wahrscheinlichkeit für Niederschlag (ohne Betrachtung etwaiger Übergangswahrscheinlichkeiten, Abbildung 12, rechts). In beiden Darstellungen fallen deutliche Abweichungen zwischen den aus der Niederschlagsmessung ermittelten zu den aus dem Downscaling-Modell resultierenden Gebietsniederschlägen für den Ist-Zustand auf. Die Abweichungen bezüglich der IQR deuten dabei auf eine unvollständige Wiedergabe extremerer Niederschläge hin. In Kombination mit den Unterschiede in der Wahrscheinlichkeit für Niederschläge kann man also sagen, dass bezogen auf den Ist-Zustand und größere Teilgebiete zu häufig, im Extrembereich aber gleichzeitig zu wenig Niederschlag fällt. Dies hat natürlich Konsequenzen für die nachgeschaltete Wasserhaushaltsmodellierung.

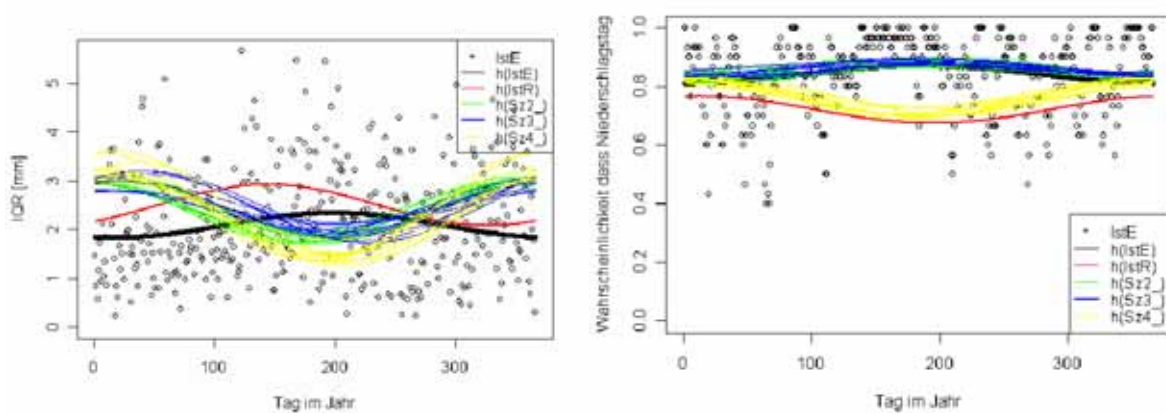


Abb. 12: Harmonische Analyse der Interquartile Range (IQR) der täglichen Gebietsniederschlagssumme (links) und der Wahrscheinlichkeit für Gebietsniederschlag (rechts) am Pegel Waldenhausen / Tauber

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Untersuchung wird die Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland auf der Grundlage von Langzeituntersuchungen gemessener Abflüsse und den Ergebnissen von Wasserhaushaltsuntersuchungen mittels Klimaszenarien betrachtet. Zusammenfassend lässt sich Folgendes festhalten:

Bei den Langzeituntersuchungen lässt sich ein signifikanter Anstieg der Niedrigwasserkennwerte vor allem im Winterhalbjahr konstatieren. Demgegenüber zeigen die Kennwerte im Sommerhalbjahr eine uneinheitliche Tendenz. Für etwa ein Drittel der 36 Pegel weist die Devianzanalyse im Rahmen der instationären Wahrscheinlichkeitsanalyse auf eine signifikante Abnahme der Streuung der Niedrigwasserabfluss-Serien hin.

Die Zunahme der Niedrigwasserabflüsse im Winter steht im Einklang mit den Ergebnissen der Wasserhaushaltsmodellierungen des bayerischen Main mittels Klimaszenarien. Wesentlich ausgelöst durch eine vollständige Phasenumkehr in der innerjährlichen Verteilung der mittleren Tagessummen des Niederschlags sind darüber hinaus Abnahmen der Niedrigwasserkennwerte im Sommer zu erwarten. Hinsichtlich der T-jährlichen Niedrigwasserabflüsse fällt auf, dass die zu erwartende Abnahme der Niedrigabflüsse mit zunehmender Jährlichkeit rechnerisch zunimmt.



Die Ergebnisse in Bayern stehen im Einklang mit den Ergebnissen in Baden-Württemberg, die sich regionalspezifisch wie folgt zusammenfassen lassen: Abnehmende Tendenzen sind vor allem in den südlichen Einzugsgebieten zwischen Donau und Bodensee, dem Hochrhein-Gebiet und dem südlichen Oberrhein-Gebiet bis zur Murg zu erwarten. Im nördlichen Oberrhein-Gebiet ab der Murg ergeben sich dagegen Zunahmen bei den T-jährlichen Niedrigwasserabflüssen.

7. Literatur

- Andreß, H.-J. (1986): GLIM: Verallgemeinerte Lineare Modelle. Braunschweig
- Belke, D., Demuth, S., Draschoff, R., Finke, W., Koehler, G., Prellberg, D., Walther, J. und Willems, W. (2003): Anthropogene Einflüsse auf Niedrigwasserabflüsse. Arbeitsbericht der ATV-DVWK Arbeitsgruppe "Niedrigwasser"
- Belz, J., Engel, H. und Krahe, P. (2004): Das Niedrigwasser 2003 in Deutschlands Stromgebieten. In: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Band 48, Heft Nr. 4, Seite 162-169
- BLfW (2004): Wasserwirtschaftlicher Bericht Trockenperiode 2003. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München.
- Coles, S. (2001): An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer Series in Statistics. London.
- Cleveland, W. S. (1981): LOWESS: A program for smoothing scatterplots by robust locally weighted regression. *The American Statistician* 35, 54.
- Dalrymple, T. (1960): Flood Frequency Analysis. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 1543-A
- Demuth, S. (2004): Niedrigwasser und Dürre - eine europäische Perspektive. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 48, H. 4, S. 160-161.
- Duan, Q. Sooroshian, S. and Gupta, V. (1992): Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff-Models. *Water Resources Research*, Vol. 28, p. 1015-1031
- Duan, Q. and Qingyun, V. (1992): The Shuffled Complex Evolution (SCE-UA) Method, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona Tucson.
- DVWK (1983): Niedrigwasseranalyse Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasserabflusses. Verlag Paul Parey. Hamburg und Berlin
- DVWK (1992): Niedrigwasseranalyse, Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflußdefizits. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Regel 121 / 1992
- DVWK (1999): Statistische Analyse von Hochwasserabflüssen, Merkblatt 251, Kommissionsvertrieb Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn, 42 S.
- Enke, W. (2003): Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland". Unveröffentlicht.
- Hosking, J.R.M. and Wallis, J.R. (1997): Regional Frequency Analysis – An Approach Based on L-Moments, Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne.
- Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) der Universität Karlsruhe (2005): Auswirkung einer Klimaänderung auf mittlere Abflüsse und Niedrigwasserabflüsse
- Katz, R.W., Parlange M. B. and Naveau, P. (2002): Statistics of extremes in hydrology. *Advances in Water Resources* 25, p. 1287-1304
- Kleinhans, A. (2006): Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen im bayerischen Maingebiet. 3. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, 25.-26.10.2006 in Stuttgart.
- McCuen, R.H. (2003): Modeling Hydrologic Change. Statistical Methods. Lewis Publishers. Boca Raton, London
- Schulla, J. (1997): Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen, ETH-Dissertation 12018, Zürcher Geographische Schriften, Heft 69, Geographisches Institut der ETH Zürich
- Willems, W. und Dick, Th. (2003) : HyStat Benutzerhandbuch. IAWG, Ottobrunn

-
- Willems, W. (2004): Statistische Analyse von Niedrigwasser-Kenngrößen auf der Grundlage stationärer und instationärer Wahrscheinlichkeitsmodellierung. In: Kleeberg, H.-B. und Koehler, G. (Hrsg.): Niedrigwassermanagement. Beiträge zum Seminar am 11./12. November 2004 in Koblenz, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung. Heft 07.04 S.15-34.
- Willems, W., Klotz, P. und Kasper, G. (2005): Modellierung des Wasserhaushalts des Mittleren und Unteren Maingebietes. Auftraggeber: Landesamt für Umwelt, Bayern, unveröffentlicht.
- Willems, W. (2006): Einfluss des Klimawandels auf Extremwerte für Einzugsgebiete des bayerischen Mains mittels Klimaszenarien. Auftraggeber: Landesamt für Umwelt, Bayern, unveröffentlicht.
- Willems, W. und Yörük, A. (2006): Einfluss des Klimawandels auf Wasserbilanzen und Abflüsse für Einzugsgebiete des bayerischen Mains mittels Klimaszenarien. Auftraggeber: Landesamt für Umwelt, Bayern, unveröffentlicht.



Auswirkung der Klimaveränderung auf die Grundwasserneubildung in Süddeutschland

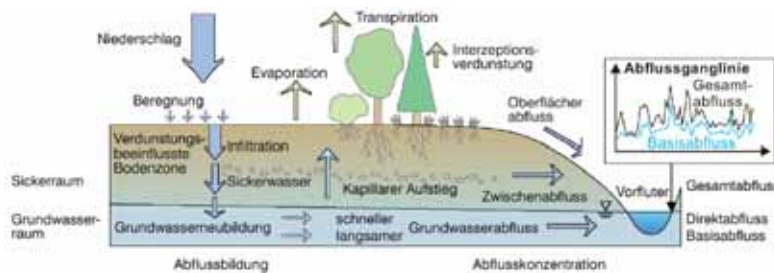
Jörg Neumann¹ & Thomas Gudera²

¹ Bayerisches Landesamt für Umwelt

² Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Einleitung

Die Grundwasserneubildung wird gemäß DIN 4049-3 (1994) als „Zugang von infiltriertem Wasser zum Grundwasser“ definiert und stellt den um Verdunstung und schnelle Abflusskomponenten reduzierten Restterm der Niederschlagshöhe dar. Darüber hinaus kann sie der durchschnittlichen Basisabflusshöhe eines Einzugsgebietes gleichgesetzt werden (Abbildung 1). Sie ist als residuale Komponente der Wasserbilanz ein wichtiges Maß für die „Regenerationsfähigkeit“ der Grundwasserressourcen und definiert damit das für die Trinkwassergewinnung durchschnittlich zur Verfügung stehende Grundwasserdargebot. Dieser Aspekt ist von besonderer Bedeutung, da in Süddeutschland immerhin mehr als 80 % des Trinkwassers aus dem Grundwasser entnommen werden (BW: 73 %, BY: 95 %). In diesem Zusammenhang sind Fragen nach der zukünftigen Sicherstellung der regionalen Wasserversorgung besonders nach Extremjahren wie 2003 von großem öffentlichen Interesse. Im Rahmen von KLIWA erfolgen deshalb quantitative Abschätzungen, wie sich der Klimawandel in Süddeutschland (Zeitraum 2021-2050) auf die Grundwasserneubildung auswirkt.



Bilanzgleichungen

$$GWN = R - R_D \quad (\text{mit } R = P - ET_a)$$

$$GWN \approx R_B$$

$$GWN = BFI \cdot R \quad (\text{mit } BFI = R_B/R)$$

mit

GWN	Grundwasserneubildung
P	Niederschlag
ET_a	Tatsächliche Verdunstung
R	Gesamtabfluss
R_D	Direktabfluss
R_B	Basisabfluss
BFI	Baseflow-Index

Abb. 1: Schematische Darstellung neubildungsrelevanter Bilanzzusammenhänge des Gebietswasserhaushalts - Einflussfaktoren auf Abflussbildung und -konzentration (Janikiewicz et al., 2005).

2. Methodische Vorgehensweise

2.1 Ermittlung der Grundwasserneubildung

Der Ermittlung der Grundwasserneubildung liegt hier die Annahme zugrunde, dass die Höhe der Grundwasserneubildung ("Input") auf der Zeitskala von Jahreswerten der Höhe des Basisabflusses ("Output") entsprechen muss (vgl. Abbildung 1). Ausgehend von der Niederschlagshöhe erfolgt eine flächendifferenzierte Wasserhaushaltsmodellierung zur Ermittlung der tatsächlichen Verdunstung und daraus resultierenden Gesamtabflusshöhe. In einem nächsten Schritt wird die erforderliche Abtrennung der schnellen Abflusskomponenten (R_D) unter Berücksichtigung hydrogeologischer Einflussgrößen auf der Grundlage regressionsbasiert ermittelter Reduktionsfaktoren (Baseflow-Index $BFI = R_B/R$) vorgenommen.

Der so ermittelte Restterm wird dann als Äquivalentgröße der mittleren Grundwasserneubildung betrachtet. Eine ähnliche Vorgehensweise wurde überregional u.a. auch zu Ermittlung der bun-



desweiten Grundwasserneubildung für den Hydrologischen Atlas Deutschland HAD (BMU, 2003) realisiert.

Bayern

Die großräumige Abschätzung der Grundwasserneubildung erfolgte in Bayern bislang im Einzugsgebietsmaßstab auf der Grundlage der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse im Sommerhalbjahr (LfW, 1996). Eine rasterbezogene Modellierung der Grundwasserneubildung im 200m-Raster wird gegenwärtig im Rahmen des Projektes „Grundwasserneubildungskarte Bayern“ (GWNbK200) in Verbindung mit einer flächendeckenden Wasserhaushaltsmodellierung in Tageszeitschritten durchgeführt. Dabei werden für den Zeitraum 1971-2000 die Rasterwerte der Gesamtabflusshöhe des prozessorientierten Wasserhaushaltsmodells ASGi (WASIM-ETH) mit regressionsbasiert ermittelten Baseflow-Indizes verknüpft. Der rasterbezogene Baseflow-Index wurde flächendeckend für Bayern berechnet, während die Gesamtabflusshöhe gegenwärtig für das Maineeinzugsgebiet sowie die nördlichen Teile des Donaeinzugsgebiets vorliegt. Die Bearbeitung der südlichen Teile des Donaeinzugsgebiets im Rahmen von KLIWA ist in Vorbereitung. Erste plausible Ergebnisse der mittleren Grundwasserneubildung wurden bereits für den bayerischen Teil des Maineeinzugsgebietes ermittelt.

Baden-Württemberg

In Baden-Württemberg erfolgte die Modellierung der Grundwasserneubildung für den Zeitraum 1961/90 mit dem Berechnungsverfahren TRAIN-GWN (Armbruster, 2002). Dabei wurden die mit Hilfe eines Bodenwasserhaushaltsmodells rasterbezogen ermittelte Gesamtabflusshöhen mit regressionsbasierten Baseflow-Indizes im Einzugsgebietsmaßstab verknüpft. Die entsprechenden Ergebnisse wurden im Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg veröffentlicht (UVM Baden-Württemberg, 2004). GWN-BW als weiterentwickelte Desktop-Anwendung von TRAIN-GWN ist ein deterministisches, flächendifferenzierendes Modell zur Berechnung der aktuellen Evapotranspiration, zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und zur Bestimmung der unterhalb der durchwurzelten Bodenzone gebildeten Sickerwassermenge auf Tagesbasis. In den einzelnen Teilmodulen kommen überwiegend physikalisch basierte Ansätze zur detaillierten Beschreibung der an den Vorgängen der Verdunstung und der Sickerwasserbildung beteiligten Prozesse zur Anwendung. Die Berechnung der jährlichen bzw. langjährig mittleren Grundwasserneubildung erfolgt durch nachgelagerte Multiplikation der Sickerung mit dem Baseflow-Index (BFI) bzw. dem Quotienten R_B/R

Vergleich der Methoden

Die Vorgehensweisen in den beiden Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg ähneln sich konzeptionell stark, da sie beide auf der beschriebenen Kopplung von flächendifferenzierter Gesamtabflussmodellierung und der Verwendung regressionsbasierter BFI-Werte beruhen. Die wesentliche methodische Parallele ist jedoch, dass in beiden Fällen derselbe Basisabfluss (MoMNQ, reduziert nach Kille) als Kalibrierungs- und Validierungsgröße verwendet wird. Dies hat zur Folge, dass die Ansätze, trotz deutlicher Unterschiede im Detail, einheitliche länderübergreifende Ergebnisaussagen für Süddeutschland ermöglichen. So zeigt Abbildung 2 die für Baden-Württemberg und Bayern ermittelten BFI-Werte in einer gemeinsamen Kartendarstellung, die z.B. den dominanten Einfluss der hydrogeologischen Eigenschaften über Ländergrenzen hinweg sehr anschaulich zum Ausdruck bringt. Anzumerken ist außerdem, dass vergleichbare Konzepte auch zur deutschlandweiten Modellierung der Grundwasserneubildung im Rahmen des Hydrologischen Atlas (Neumann, 2005) sowie in anderen Bundesländern wie z.B. in Hessen (Hergesell & Berthold, 2004) eingesetzt worden sind. Im Zuge der Validierung zeigen sowohl die Modellergebnisse aus Baden-Württemberg als auch die Rasterwerte aus Bayern eine gute Übereinstimmung mit den entsprechenden pegelbezogenen Baseflowindizes.

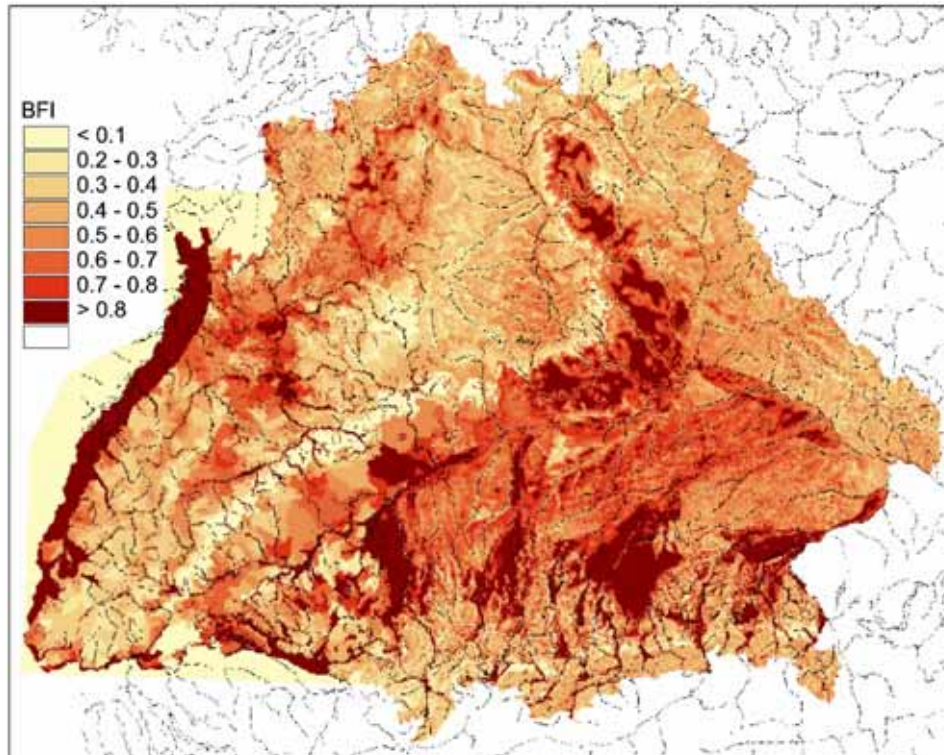


Abb. 2: Gemeinsame Darstellung des länderbezogenen ermittelten Baseflow-Index von Baden-Württemberg und Bayern.

2.2 Berücksichtigung des Klimawandels

Die Auswirkungen des Klimawandels auf einzelne Wasserhaushaltsgrößen werden in der Regel über einen Vergleich des Referenzzeitraums ("Ist-Zustand") mit den Ergebnissen der Szenariosimulation abgeschätzt. Unter der Annahme, dass sich auf simulierten Ist-Zustand und Szenario dieselben Unsicherheitsfaktoren auswirken und die Ergebnisse damit weitgehend konsistent sind, können sie zueinander in Beziehung gesetzt werden. Auf diese Weise sind Aussagen im Sinne von "... die Größe A verändert sich gegenüber dem Referenzzeitraum um $\pm X\%$ " möglich. Eine entsprechende Vorgehensweise wird auch für die Grundwasserneubildung gewählt. Dabei werden die in Kap. 2.1 beschriebenen Modellansätze mit den nachfolgend erläuterten Szenariodaten angetrieben.

Klimaszenarien

Für die Szenariosimulation der Grundwasserneubildung wurde im Rahmen von KLIWA auf die regionalen Klimaszenarien von Meteo Research (MR) zurückgegriffen (Arbeitskreis KLIWA, 2006). Diese beruhen auf einem statistisch-dynamischen Downscaling der Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 des MPI Hamburg auf der Grundlage des „realistischen“ Emissionsszenarios B2 (IPCC, 2001). Das MR-Verfahren stellt einen Validierungslauf ("Istzustand" 1971-2000) sowie für jede Dekade des Zeitraums 2021-2050 zehn unabhängige Modellrealisationen in Tageszeitschritten bereit. Die stationsbezogen ermittelten Klimaparameter Niederschlag und Temperatur dienen anschließend als Input für die hoch auflösende Wasserhaushaltsmodellierung. Die hier verwendeten ECHAM4 (B2) – MR-Szenarien sind auch zur Betrachtung hydrologischer Fragestellungen einschließlich der Grundwasserneubildung geeignet (Bronstert et al, 2006) und stellen die aktuelle methodische Grundlage der durchgeführten KLIWA-Untersuchungen dar.



Auswertungen

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zur Grundwasserneubildung in Süddeutschland beziehen sich auf den Vergleich des dreißigjährigen Mittels (1971-2000) mit den entsprechenden Daten für den Szenariozeitraum (2021-2050). Darüber hinaus werden die drei Einzeldekaden des Zukunftsszenarios gesondert ausgewertet. Kürzere Betrachtungszeiträume, z.B. einzelne Extremjahre oder innerjährliche Änderungen der Grundwasserneubildung werden zukünftig Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Hierzu sind im Vorfeld noch methodische Anpassungen der beschriebenen Modellkonzepte erforderlich.

3. Ergebnisse der Szenariosimulationen

3.1 Ergebnisse für Bayern

Die im weiteren Verlauf erläuterten Ergebnisse der Szenariosimulationen in Bayern beziehen sich auf das bislang exemplarisch untersuchte Maingebiet. Betrachtet man hier in einem ersten Schritt die Veränderungen der mittleren Wasserhaushaltsgrößen, dann zeigt sich das in Tabelle 1 dargestellte Bild. Die mittlere (dreißigjährige) korrigierte Niederschlagshöhe nimmt um ca. 10 % von 789 mm/a auf 867 mm/a zu. Dieses zusätzlich im Einzugsgebiet verfügbare Wasser von annähernd 80 mm/a bewirkt eine Erhöhung der Verdunstung um ca. 30 mm/a. Der verbleibende Überschuss von knapp 50 mm/a ist schließlich abflussrelevant und führt daher zu einer Erhöhung der mittleren Gesamtabflusshöhe um ca. 23 % auf 245 mm/a. Legt man der Ermittlung der Grundwasserneubildung die vereinfachte Annahme zugrunde, dass die relativen Anteile der einzelnen Abflusskomponenten und damit der BFI weitgehend stationär sind, ergibt sich auch für die Grundwasserneubildung eine Erhöhung um mehr als 20 mm/a. Da sich der Untergrund (Sickerraum + Aquifer) normalerweise durch eine ausgleichende Wirkung auf die Abflusskomponenten auszeichnet, d.h. höhere Grundwasseranteile in Trockenzeiten und höhere Direktabflussanteile unter nassen Bedingungen, muss man real von einer etwas geringeren Variabilität der Grundwasserneubildung ausgehen. Diese Effekte wurden im Rahmen der hier vorgestellten ersten Auswertungen zur Grundwasserneubildung allerdings noch nicht quantitativ berücksichtigt. Insgesamt kann man jedoch festhalten, dass eine knapp 10-prozentige Zunahme des Niederschlags im Maingebiet eine etwa 20-prozentige Erhöhung der Grundwasserneubildung bewirkt.

Tab. 1: Gegenüberstellung der mittleren Wasserbilanzgrößen im Maingebiet für Istzustand und Szenariozeitraum (Angaben in mm/a).

Maingebiet	Korrigierter Niederschlag	Tatsächliche Verdunstung	Gesamtabfluß	Grundwasserneubildung
Istzustand 1971-2000	789	590	198	94
Szenario 2021-2050	867	621	245	116
Abweichung absolut	78	31	47	22
Abweichung In Prozent	9,9	5,3	24	23

Neben der Entwicklung der Gebietsmittelwerte spielt für wasserwirtschaftliche Belange die zeitliche und räumliche Differenzierung der Wasserhaushaltsgrößen eine mindestens ebenso wichtige Rolle. Betrachtet man z.B. die Dekadenwerte einzelner Größen, so fallen bei Niederschlag, Abfluss und Grundwasserneubildung deutliche Unterschiede auf, während die Verdunstung sich nur unwesentlich ändert. Dabei zeigen die beiden ersten Dekaden gegenüber dem Istzustand

eine signifikante Zunahme des Niederschlags und damit einhergehend auch der Abflusshöhe und der Grundwasserneubildung. Die letzte Dekade zeichnet sich demgegenüber jedoch wieder durch deutlich niedrigere Werte aus, die fast bis auf das aktuelle Niveau (1971-2000) zurückgehen. Während diese zeitliche Variabilität bei der Niederschlagshöhe etwa 10 % ausmacht, resultieren daraus aufgrund der geringeren Absolutwerte dekadenzugehörige Schwankungsbreiten der Grundwasserneubildung von ca. 40 %. Die Variabilitäten kürzerer Zeiträume wie beispielsweise Einzeljahre liegen nochmals deutlich höher und werden künftig wahrscheinlich sogar noch weiter zunehmen (Schär, 2004).

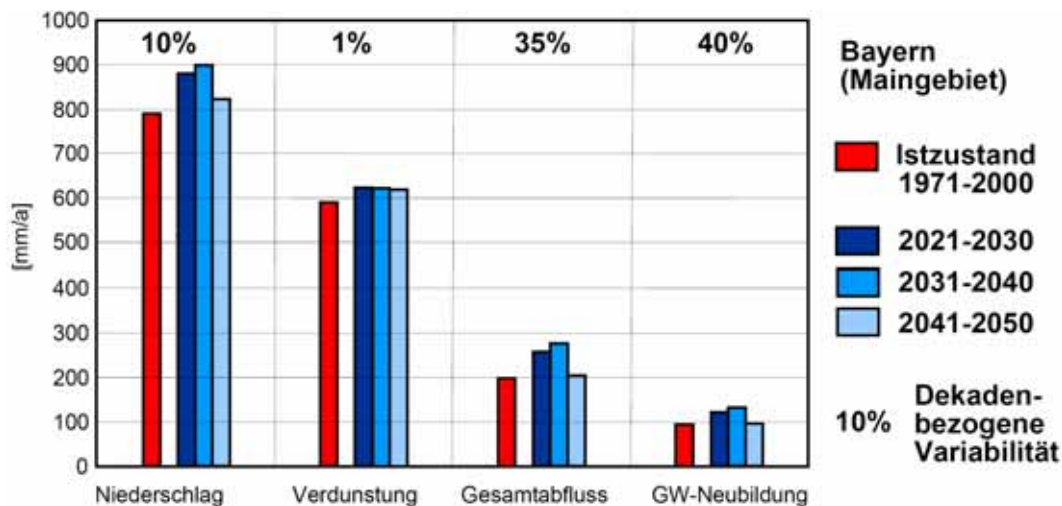


Abb. 3: Entwicklung der Wasserbilanzgrößen im Maingebiet (Angaben in mm/a) – Gegenüberstellung des Istzustandes (1971-2000) und einzelner Dekaden des Szenariozeitraums

Die bisher vorgestellten Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf langjährige Durchschnittswerte und dokumentieren mittlere Unterschiede zwischen Istzustand und Szenario. Von mindestens ebenso großer Bedeutung sind allerdings Änderungen der innerjährlichen Niederschlagsverteilung. So wurden für das Maingebiet signifikante Verschiebungen des Niederschlagsgeschehens vom Sommer- (- 5,4 %) in das Winterhalbjahr (+ 22,5 %) festgestellt (Kleinhans, 2007). Es ist davon auszugehen, dass diese bislang noch nicht berücksichtigten Änderungen des Niederschlagsregimes auch deutliche Auswirkungen auf den Jahresgang der Grundwasserneubildung haben.

Neben der zeitlichen Entwicklung der Grundwasserneubildung im Untersuchungsgebiet ist auch die räumliche Verteilung und deren zukünftige Änderung für die Wasserwirtschaft von besonderem Interesse. Das Maingebiet zeichnet sich hier durch eine starke Differenzierung aus. So sind weite Teile des Untersuchungsraums (z.B. Fränkische Alb) durch mittlere Grundwasserneubildungsraten von 150-200 mm/a geprägt. Demgegenüber weisen Teile Unterfrankens sogar negative Wasserbilanzen auf, da hier bereits die Verdunstung in einer ähnlichen Größenordnung liegt wie die Niederschlagshöhe bzw. das gesamte Wasserdargebot. Die durchgeführten Szenariosimulationen deuten darauf hin, dass es neben der mittleren Zunahme um 20 % auch eine deutliche räumliche Verschiebung der Wertebereiche geben wird. Betrachtet man die Darstellung der Unterschiede zwischen Istzustand und ECHAM4-Szenario (Abbildung 4), zeigt sich, dass Unterfranken tendenziell höhere Grundwasserneubildungsraten aufweisen wird und die östlichen Gebietsbereiche stagnieren bzw. teilweise sogar durch abnehmende Werte gekennzeichnet sind. Diese räumliche Verteilung spiegelt deutlich einen von West nach Ost abnehmenden Einfluss des Klimawandels wider, der bereits in anderen Untersuchungen z.B. zur Schneedeckendauer (Arbeitskreis KLIWA, 2005) oder zum Abflussgeschehen (Willems, 2007) beobachtet wurde.

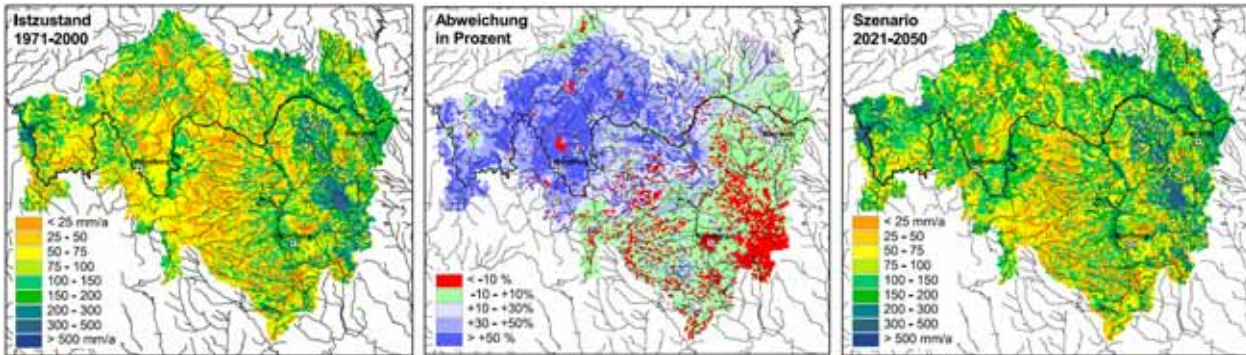


Abb. 4: Rasterdarstellung der mittleren Grundwasserneubildung im Mainingebiet und der räumlichen Unterschiede zwischen Istzustand und Szenario

3.2 Ergebnisse für Baden-Württemberg

Die Ergebnisse der vorgestellten Szenariosimulationen in Baden-Württemberg beziehen sich auf die gesamte Landesfläche bzw. auf 5 naturräumliche Haupteinheiten mit signifikanten geologischen und morphologischen Unterschieden.



- 1 Oberrheingraben und Hochrheintal
- 2 Schwarzwald
- 3 Gäuplatten, Keuperbergland und fränkischer Muschelkalk
- 4 Schwäbische Alb
- 5 Oberschwaben

Abb. 5: Naturräumliche Haupteinheiten in Baden-Württemberg

Für die mittleren Wasserbilanzgrößen in Baden-Württemberg ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte. Die langjährige Niederschlagshöhe (korrigiert) steigt demnach von 1.096 mm/a auf 1.177 mm/a, was eine prozentuale Zunahme von etwa 7 % bedeutet. Durch dieses um rd. 80 mm/a erhöhte Wasserdargebot und die gleichzeitige Temperaturerhöhung steigt die Verdunstung um 17 mm/a, wodurch die Gesamtabflusshöhe um knapp 60 mm/a bzw. ca. 13 % auf 496 mm/a zunimmt. Unter der Annahme, dass die prozentualen Anteile der einzelnen Abflusskomponenten und damit der Quotienten R_B/R zeitlich nahezu invariant sind (Armbruster, 2002), folgt daraus auch für die Grundwasserneubildung eine Erhöhung um etwa 14 mm/a. Somit lässt sich für Baden-Württemberg auf der Basis der bisher durchgeführten Untersuchungen feststellen, dass eine etwa 7-prozentige Zunahme des mittleren Jahresniederschlags in eine etwa 14-prozentige Erhöhung der mittleren Grundwasserneubildung in der Periode 2021 – 2050 transformiert wird.

Tab. 2: Gegenüberstellung der mittleren Wasserbilanzgrößen in Baden-Württemberg für Istzustand und Szenariozeitraum (Angaben in mm/a)

Baden-Württemberg	Korrigierter Niederschlag	Tatsächliche Verdunstung	Gesamtabfluss	Grundwasserneubildung
Istzustand 1971-2000	1096	624	437	225
Szenario 2021-2050	1177	641	496	256
Abweichung absolut	81	17	59	31
Abweichung in Prozent	7,4	2,7	13,5	13,8

Ergänzend zu den langjährigen Gebietsmittelwerten wurde auch die zeitliche Differenzierung der Wasserhaushaltskomponenten näher betrachtet (Abbildung 6). So zeigen z.B. die Dekadenwerte einzelner Komponenten deutliche Unterschiede zueinander auf. Während bei Niederschlag, Gesamtabfluss und Grundwasserneubildung signifikante Änderungen beobachtet werden, ändert sich die Verdunstung nur in sehr viel geringerem Maße. Im Vergleich zum Istzustand sind die beiden ersten Dekaden durch eine deutliche Zunahme des Niederschlags gekennzeichnet, die sich unmittelbar auf Gesamtabflusshöhe und Grundwasserneubildung auswirkt. Im Gegensatz dazu liegt die dritte Dekade jedoch wieder etwa auf aktuellem Niveau (1971-2000). Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Schwankungsbreite der Niederschlagshöhe von etwa 10 % dekadenspezifische Variabilitäten der Gesamtabflusshöhe und der Grundwasserneubildung von ca. 16 % bewirken. Damit zeigen sich prinzipiell vergleichbare Tendenzen wie bereits für das Maingebiet beschrieben, wobei die Variabilität der Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg insgesamt deutlich niedriger liegt. Das ist vor allem darauf zurückzuführen, dass das verfügbare Wasserdargebot im Maingebiet geringer ausfällt, so dass bereits kleine absolute Änderungen einzelner Größen zu spürbar höheren prozentualen Variabilitäten führen können.

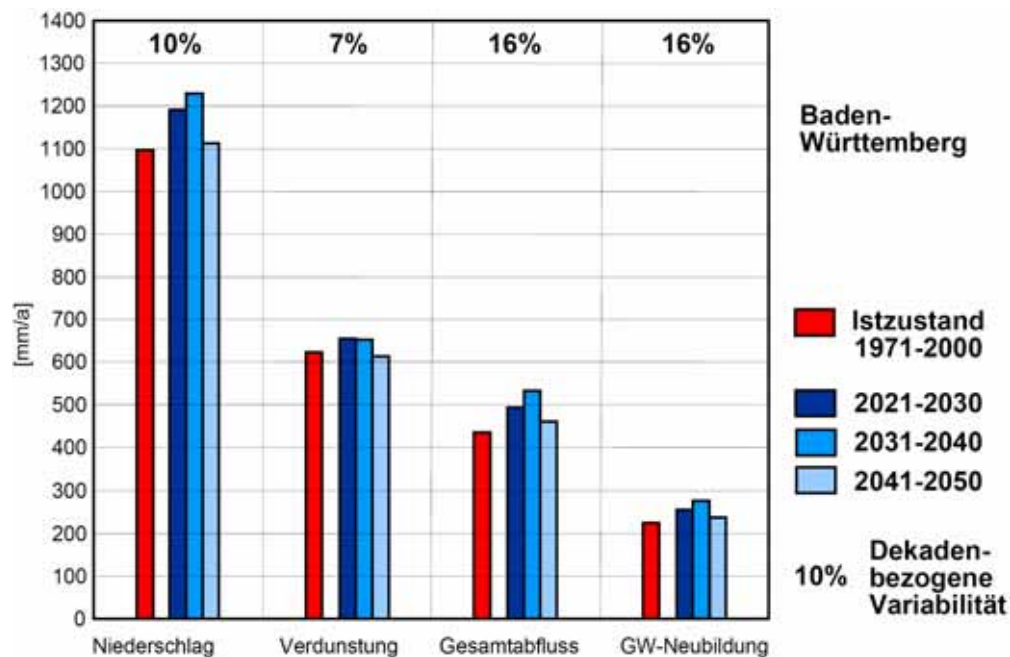


Abb. 6: Entwicklung der Wasserbilanzgrößen in Baden-Württemberg (Angaben in mm/a) – Gegenüberstellung des Istzustandes (1971-2000) und einzelner Dekaden des Szenariozeitraums



Im Hinblick auf die Grundwasserneubildung sind insbesondere die Änderungen der innerjährlichen Niederschlagsverteilung von Bedeutung. Ähnlich wie im Maingebiet deuten die regionalen Klimaszenarien auch für Baden-Württemberg auf eine Verschiebung der Niederschläge vom Sommer- in das Winterhalbjahr hin (Abbildung 7). In allen 3 Dekaden ist von einer Erhöhung der Winterniederschlagssumme von 15 bis 20 % auszugehen, während die Sommerniederschlagssummen fast unverändert bleiben und in der dritten Dekade sogar eine Abnahme unterstellt wird. Ergänzend ist in Abbildung 8 die prozentuale Abweichung der gemessenen und korrigierten Niederschlagshöhen vom synthetischen Ist-Zustand des Szenarios dargestellt. Auch wenn die erforderlichen Detailuntersuchungen noch nicht erfolgt sind, muss davon ausgegangen werden, dass sich diese innerjährliche Änderung des Niederschlagsregimes auch auf den mittleren Jahresgang der Grundwasserneubildung auswirken könnte.

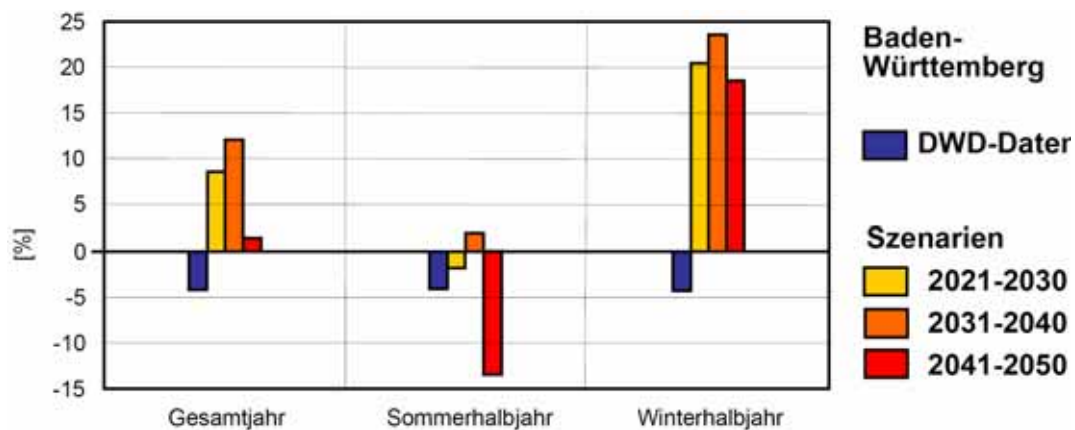


Abb. 7: Änderungen der innerjährlichen Niederschlagsverteilung in Baden-Württemberg – Gegenüberstellung des gemessenen Ist-Zustandes (1971-2000) und einzelner Dekaden des Szenariozeitraums

Für die Wasserversorgung spielt auch die räumliche Verteilung der Grundwasserneubildung und deren zukünftige Änderung eine wichtige Rolle. Die Flächendifferenzierung der langjährigen mittleren Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg ist entsprechend der unterschiedlichen Ausstattung der Naturräume (vgl. Abbildung 5) sehr heterogen. Der Mittelwert für Baden-Württemberg beträgt für den Ist-Zustand 1971-2000 ca. 225 mm, etwa 85 % der Landesfläche weisen Werte zwischen 50 und 400 mm auf. Die mittlere Abweichung der Szenariosimulation für die Periode 2021 bis 2050 vom Ist-Zustand liegt bei rd. 14 %, es ist jedoch aufgrund der derzeit vorliegenden Eingangsdaten von einer deutlichen regionalen Differenzierung auszugehen (Abbildung 8).

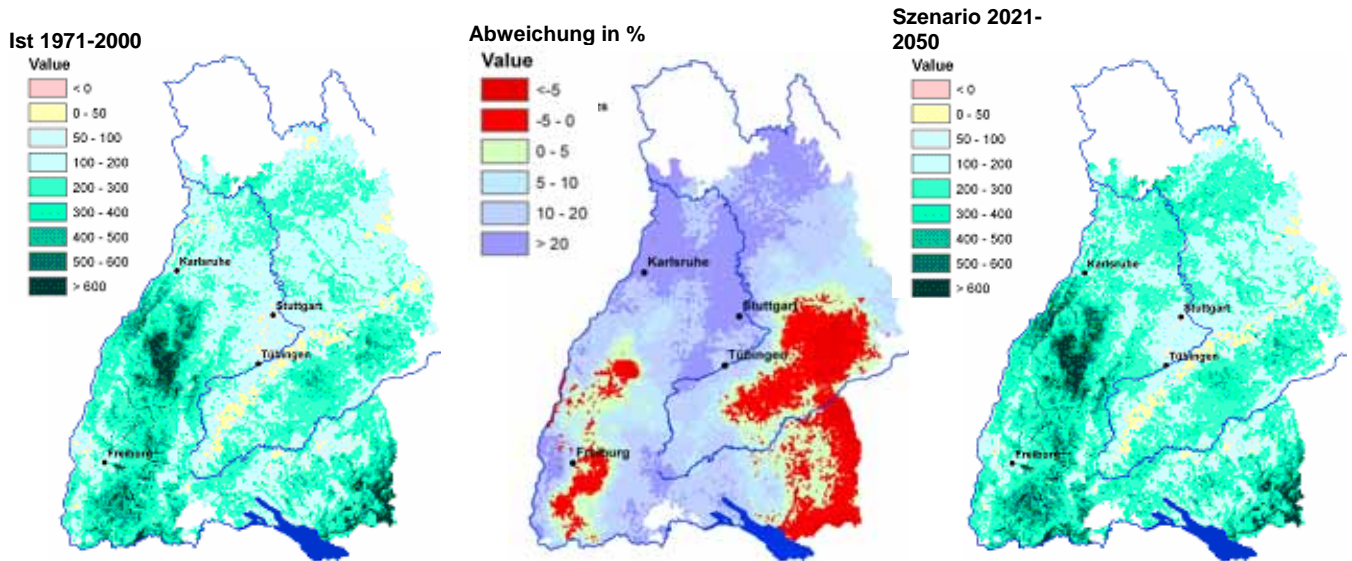


Abb. 8: Räumliche Verteilung der mittleren Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg für den Ist-Zustand 1971-2000 und Szenario 2021 – 2050, Werte in mm/a

Regional ist, vermutlich in Folge einer zunehmenden Häufigkeit zonaler Wetterlagen, eine Differenzierung zwischen den westlichen und den östlichen Landesteilen zu beobachten. Während in den westlichen Landesteilen (Oberrheingraben (1) und Schwarzwald (2)) für die letzte der drei untersuchten Dekaden (2041-2050) eine deutliche Erhöhung der mittleren jährlichen Grundwasserneubildung verzeichnet wird (+ 15 %), bleibt diese für den Bereich der Gäuplatten, des Keuperberglandes und der Muschelkalkregionen im Nordosten (3) moderat. Im Bereich der Schwäbischen Alb (4) wird eine leichte Abnahme unterstellt, für Oberschwaben (5) mit –10 Prozent sogar eine recht deutliche.

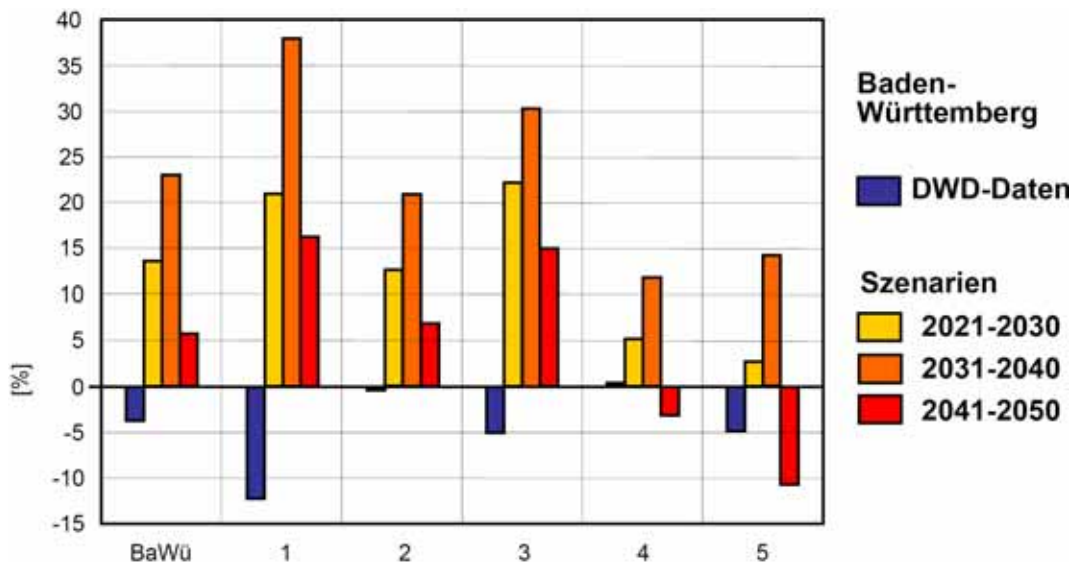


Abb. 9: Änderungen der regionenspezifischen Grundwasserneubildung gegenüber dem Istzustand (1971-2000)



4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wurden auf der Grundlage der ECHAM4/MR-Szenarien erste Untersuchungen zur Entwicklung langjähriger Mittelwerte der Grundwasserneubildung durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass im Mittel eine Erhöhung der Grundwasserneubildung in der Größenordnung von ca. 10 – 20 % in Süddeutschland zu erwarten ist. Diese im ersten Moment vielleicht etwas überraschende Aussage steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen benachbarter Bundesländer (z.B. Hessen: Berthold & Hergesell, 2005) und wird auch durch globale Simulationen der Grundwasserneubildung bestätigt (Döll & Flörke, 2005).

Mindestens genauso entscheidend wie die zukünftige Entwicklung langjähriger Durchschnittswerte ist für die Wasserwirtschaft jedoch, dass zugleich auch die zeitliche und räumliche Variabilität der Grundwasserneubildung zunehmen wird. Das hat zur Folge, dass extreme Jahre wahrscheinlicher werden, sich wichtige Teilbereiche gleichzeitig aber auch entgegen der großräumigen Entwicklung durch abnehmende Grundwasserneubildungsraten auszeichnen können. Vor diesem Hintergrund lassen Trockenjahre, insbesondere auch in mehrfacher Folge, bei bestimmten Aquiferen Schwierigkeiten im Hinblick auf die Sicherheit der Trinkwasserversorgung erwarten. Trotz vermeintlich günstiger Vorzeichen muss man somit festhalten, dass die Wasserversorgung in Abhängigkeit von der regionalen Klimaentwicklung und der Ergiebigkeit der Grundwasservorkommen auch in Zukunft eine anspruchsvolle wasserwirtschaftliche Aufgabe sein wird. Demgegenüber können häufigere oder extremere Nassjahre lokal ein Ansteigen der Grundwasserstände mit allen positiven und negativen Folgen bewirken. Die genannten Aspekte werden in Verbindung mit den Auswirkungen eines geänderten Jahresgangs der Grundwasserneubildung ein Schwerpunkt der weitergehenden Untersuchungen zum Grundwasser im Rahmen von KLIWA sein.

5. Literatur

- Arbeitskreis KLIWA (2005): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern. – KLIWA-Berichte, Heft 6: 88.
- Arbeitskreis KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutschland – Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. – KLIWA-Berichte, Heft 9: 100.
- Armbruster, V. (2002): Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg. – Freiburger Schriften zur Hydrologie, 17: 141 S.
- Berthold, G & Hergesell, M. (2005): Prognosen für die Grundwasserneubildung in Hessen. – Vortrag im Rahmen der Veranstaltung "Neue Verfahren zur Modellierung / Regionalisierung der Grundwasserneubildung" am 12.07.05 in Idstein.
- BMU (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit) (ed.) (1998, 2001, 2003): Hydro-logischer Atlas von Deutschland (HAD). – 1. Lieferung (1998), 2. Lfg. (2001) und 3. Lfg. (2003).
- Bronstert, A., Kolokotronis, V., Schwandt, D., Straub, H. (2006): Vergleich und hydrologische Wertung regionaler Klimaszenarien für Süddeutschland. – HW, 50 (6): 270-287.
- Döll, P. & Flörke, M. (2005): Global-Scale Estimation of Diffuse Groundwater Recharge. – Frankfurt Hydrology Paper, 3: 21.
- Hergesell, M. & Berthold, G. (2004): 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.
- IPCC (2001): Climate Change – The Scientific Basis. – Intergovernmental Panel on Climate Change: 944.
- Jankiewicz, P., Neumann, J., Duijnisveld, W.H.M., Wessolek, G., Wycisk, G. & Hennings, V. (2005): Abflusshöhe, Sickerwasserrate, Grundwasserneubildung - Drei Themen im Hydrologischen Atlas von Deutschland. – HW, 49 (1): 2-13.

- 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.
- Kleinhans, A. (2007): Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen im bayerischen Maingebiet. – KLIWA-Berichte Heft 10: 79-89.
- LfW (Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft) (1996): Die Grundwasserneubildung in Bayern. Berechnet aus den Niedrigwasserabflüssen der oberirdischen Gewässer. – Informationsberichte Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 5/96: 65 S.
- Neumann, J. (2005): Flächendifferenzierte Grundwasserneubildung von Deutschland - Entwicklung und Anwendung des makroskaligen Verfahrens HAD-GWNeu. – Diss., Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg: 137 S.
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A., Appenzeller, C. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. – Nature, 427: 332-336.
- UVM (Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg) (ed.) (2004): WaBoA – Wasser- und Bodenatlas Baden-Württemberg. – 2. Lfg.
- Willems, W. (2007): Entwicklung der Niedrigwasserverhältnisse in Süddeutschland – KLIWA-Berichte Heft 10: 143-161.



Entwicklung einer Methodik zur Berücksichtigung des Klimawandels bei der Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Entwässerungssystemen

Joachim Ruf

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Allgemeines zur Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Entwässerungssystemen

Die Bemessung von siedlungswasserwirtschaftlichen Entwässerungssystemen erfolgt hauptsächlich für Regenereignisse mit Dauern von unter einer Stunde und mit Wiederkehrintervallen von unter 10 Jahren. Es ist zu beachten, dass siedlungswasserwirtschaftliche Entwässerungssysteme inzwischen hochkomplexe und vernetzte Strukturen darstellen. Kennzeichnend ist, dass fast immer Rückhaltekapazitäten das Abflussverhalten beeinflussen, häufig sogar dominieren. Generell haben Entwässerungssysteme alleine schon durch die Volumina der Ableitungskanäle Rückhaltekapazitäten. Zudem werden häufig Anlagen zur Rückhaltung gezielt errichtet.

Das Versagen von Systemen mit relevanten Rückhaltekapazitäten hängt nur zum Teil von einem einzelnen Starkregenereignis ab. Entscheidend ist häufig, inwieweit die Rückhaltekapazitäten bereits durch Vor-Regen belegt sind. Folge dieser komplexen Strukturen ist, dass alle Bemessungsverfahren mehr oder weniger deutlich erkennbar auf der Methode der Langzeitsimulation beruhen. Langzeitsimulation bedeutet, dass alle Abflüsse in einem Entwässerungssystem über einen längeren Zeitraum mit einem Computermodell nachgebildet werden. Aus der Häufigkeit des (Nicht-) Versagens innerhalb des simulierten Zeitraums kann dann auf die Sicherheit, meist ausgedrückt als Versagens-Wiederkehrintervall von n-Jahren, geschlossen werden.

Die Methode Langzeitsimulation kann direkt zur Bemessung angewandt werden. Um der Planungspraxis die gelegentlich als zu aufwendig empfundene Langzeitsimulation zu ersparen, ist auch eine indirekte Anwendung verbreitet. Die bedeutet, dass zur Entwicklung von Bemessungsregeln zunächst Langzeitsimulationen für typische Fallgestaltungen durchgeführt werden. Die Ergebnisse dieser Simulationsläufe werden dann dazu verwendet, um Bemessungsdiagramme oder vereinfachte Faustformeln abzuleiten.

2. Generierung von Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation

Zur Generierung von Niederschlagsreihen für die Langzeitsimulation wird in Baden-Württemberg das Programmsystem NiedSim (Niederschlags-Simulation) eingesetzt. Dieses System ist im Auftrag der Wasserwirtschaftsverwaltung am Institut für Wasserbau, Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie der Universität Stuttgart entwickelt worden. Die programmtechnische Umsetzung, die Erstellung der Datenbanken aus Beobachtungsdaten und die Programmierung der Endanwender-Schnittstelle sind im Jahr 2000 am Institut abgeschlossen worden. Das System wird seitdem vom Lehrstuhl gepflegt und aktualisiert. Die LUBW wendet dieses System an und generiert bei Bedarf Niederschlagsreihen für beliebige Standorte in Baden-Württemberg. Diese werden den planenden Ingenieurbüros zur Verfügung gestellt.

Seit Sommer 2004 wird NiedSim weiterentwickelt, so dass es simultane Niederschlagsreihen für mehrere Orte generieren kann. Diese Erweiterung ist zur Bemessung größerer Entwässerungssysteme notwendig, bei denen die Repräsentativität einer einzelnen Niederschlagsreihe nicht gegeben ist.



3. Konzept zur Berücksichtigung des Klimawandels

Da nicht genau bekannt ist, wie sich das Klima verändert, man aber davon ausgeht, dass die Entwicklung der Erdbevölkerung, beispielsweise über den globalen CO₂-Ausstoß, Einfluss auf die Veränderung hat, werden für die Simulation des Klimawandels Klimamodelle unter der Annahme verschiedener Szenarien betrieben. Diese Modelle berechnen das historische und aktuelle Klima und Prognosen für das 21. Jahrhundert. Die Berechnungen mit den verschiedenen Klimamodellen haben für den Niederschlag in den meisten Gebieten Süddeutschlands eine Zunahme im Volumen und eine Verschiebung von Sommer- und Winterniederschlägen ergeben, die jedoch von Modell zu Modell variieren.

Von besonderer Bedeutung ist die Erkenntnis, dass sich die Abflussspitzen der häufigen Ereignisse kleiner Jährlichkeit sehr viel stärker erhöhen als die der seltenen Ereignisse großer Jährlichkeit.

Für die Auslegung und Bemessung städtischer Entwässerungssysteme sind gerade die Spitzenabflüsse kleiner Wiederkehrzeit, typischerweise 2 – 10 Jahre, maßgeblich. Die Auswirkungen dieser Abflüsse auf Kanalnetze hängen zusätzlich entscheidend von den Abflussfüllen und der Vorfüllung der Speicherräume ab, so dass kontinuierliche Langzeitsimulationen mit langen, hochaufgelösten Niederschlagszeitreihen durchgeführt werden müssen. Nur so ist eine sichere und dennoch wirtschaftliche Auslegung möglich.

NiedSim generiert Niederschlagszeitreihen, wobei die Systemparameter anhand von Messdaten und unter der Annahme der Stationarität des Niederschlagsverhaltens ermittelt wurden. Ein Klimawandel wird derzeit nicht berücksichtigt. Die KLIWA-Ergebnisse zeigen jedoch eindeutig, dass sich der Niederschlag als Abfluss verursachende Größe ändern wird. Dies geschieht vor allem bei den Extrema kleiner Jährlichkeit.

Um Niederschlagszeitreihen für die Auslegung von Kanalnetzen, die den Anforderungen der nächsten 50 – 100 Jahre genügen, zu generieren, ist es notwendig, den Klimawandel bei der Generierung der Zeitreihen zu berücksichtigen. Hierzu soll das vorhandene System erweitert werden. Es soll in die Lage versetzt werden, Niederschlagszeitreihen unter Berücksichtigung der künftigen klimatischen Randbedingungen zu erzeugen. Es soll also beispielsweise möglich sein, eine Zeitreihe für die klimatischen Bedingungen des Jahres 2030 zu generieren.

Um diese den Klimawandel berücksichtigenden Zeitreihen zu generieren ist zunächst eine Untersuchung historischer Zeitreihen durchzuführen. Hierbei bilden die Änderung der Niederschlagsintensität und der Dauer von Niederschlagsereignissen den Schwerpunkt. Außerdem sind bisherige Veränderungen der extremen Niederschläge zu ermitteln. Mit instationären Verfahren ist eine Beziehung für die Entwicklung der Extrema in der Zukunft herzustellen.

Der Zusammenhang zwischen den mit globalen Klimamodellen errechneten Zirkulationsmustern und dem großräumigen Niederschlagsverhalten ist in mehreren EU-Projekten nachgewiesen worden. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, wurden die Zirkulationsmuster zunächst zu bestimmten Großwetterlagen (Circulation Pattern, CP) klassifiziert. Mit der dem ausgewählten Szenarium entsprechenden CP-Sequenz konnten die sich instationär verändernden klimatischen Randbedingungen bis Mitte des 21. Jahrhunderts simuliert werden. Diese Klassifizierung ist allerdings im Hinblick auf die Wetterereignisse, die speziell für die Siedlungswasserwirtschaft relevant sind, zu modifizieren. Für den kleinräumigen, regionalen Niederschlag ist dann die Verknüpfung zu den (modifizierten) CP's zu untersuchen. Das Klimaszenarium B2, das den Hochwasseruntersuchungen im Rahmen von KLIWA zugrunde liegt, wird auch für die Untersuchungen zur Siedlungswasserwirtschaft verwendet. Es wird lediglich die Klassifizierung angepasst, mit der die Zirkulationsmuster aus dem generellen Zirkulationsmodell (GCM) zu Großwetterlagen klassifiziert werden.

Für bestimmte auswählbare Zeitpunkte, zum Beispiel das Jahr 2035, werden dann die Niederschlagszeitreihen unter Beachtung dieser Randbedingungen stochastisch generiert. Die Reihen selbst unterstellen für ihre Simulationsdauer von beispielsweise 30 Jahren stationäre klimatische Randbedingungen, wie sie dem ausgewählten Zeitpunkt entsprechen. Dies ist wichtig für den geplanten Einsatz mit den bereits heute üblichen Langzeitsimulationsmodellen.

Mit den generierten Zeitreihen können die üblichen siedlungswasserwirtschaftlichen Langzeitsimulationsmodelle, wie Schmutzfrachtmodelle oder Modelle zur Kanalnetzberechnung, betrieben werden. Weil die klimatischen Randbedingungen bei der stochastischen Generierung der Niederschlagsreihen entsprechend dem ausgewählten Jahr konstant gehalten werden, kann die Häufigkeit bestimmter Simulationsergebnisse, beispielsweise das Überlaufen eines Kanalschachtes, mit der Wahrscheinlichkeit dieses Ereignisses gleichgesetzt werden. Somit kann zum Beispiel ein Kanalnetz so bemessen werden, dass auch bei Eintreffen eines bestimmten Klimaszenarios bis zu einem bestimmten Jahr, beispielsweise dem Planungshorizont, eine vorgegebene Jährlichkeit eingehalten wird.

Eine Vergleichsberechnung mit Niederschlagsreihen, die für die klimatischen Randbedingungen der Jahre 1974 bis 2003 generiert wurden, das heißt mit aktuellen NiedSim-Reihen, kann aufzeigen, welche zusätzlichen Aufwendungen durch die Berücksichtigung des Klimawandels entstehen.

4. Zusammenfassung

Das Projektergebnis sind belastbare Aussagen über das zukünftige Verhalten des Niederschlags hoher zeitlicher Auflösung. Das erweiterte System ist in der Lage für beliebige Punkte in Baden-Württemberg Niederschlagszeitreihen unter den künftig zu erwartenden Randbedingungen zu generieren. Der Klimawandel kann also bei der Auslegung von siedlungswasserwirtschaftlichen Anlagen berücksichtigt werden. Dabei können die derzeit eingeführten siedlungswasserwirtschaftlichen Modelle zur Schmutzfracht- und Kanalnetzberechnung unverändert eingesetzt werden.



Folgen des Klimawandels für die Gewässerbeschaffenheit in Süddeutschland

Uwe Matthias

Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Einleitung

Für die aquatische Tierwelt fungieren Wassertemperatur, Strömung, Sauerstoffhaushalt und Nahrungsangebot als die wichtigsten Regulatoren der Lebensvorgänge. Für Pflanzen sind als weitere Steuergrößen noch Licht (Photosynthese) und Nährstoffkonzentrationen zu nennen. Durch den Klimawandel werden vor allem die Temperaturen im Gewässer, die Strömung (über den Abfluss) und das Lichtdargebot direkt beeinflusst. Alle anderen Parameter sind indirekt betroffen.

2. Einflüsse auf die chemisch-physikalischen Verhältnisse

Höhere Temperaturen beschleunigen in der Regel die chemischen Reaktionsprozesse im Gewässer, insbesondere dann wenn diese auf mikrobiellen Stoffumsetzungen beruhen. Gerade im Bereich der Selbstreinigungsprozesse sind ein verstärkter Abbau gelöster organischer Substanzen und ein schnellerer Ablauf der Nitrifikation (Umwandlung von Ammonium über Nitrit zu Nitrat) zu verzeichnen. Deshalb ist bei Hitzeperioden meist ein niedrigerer Ammonium- bzw. Nitritgehalt festzustellen. Die Salzbelastung ist dagegen in der Regel erhöht (vor allem auch auf Grund des geringeren Verdünnungseffektes). Die beschleunigten Abbauprozesse haben aber auch einen erhöhten Sauerstoffbedarf zur Folge, so dass es bei Hitzeperioden öfters auch zu Sauerstoffmangelscheinungen - besonders in gestauten Gewässern - kommt.

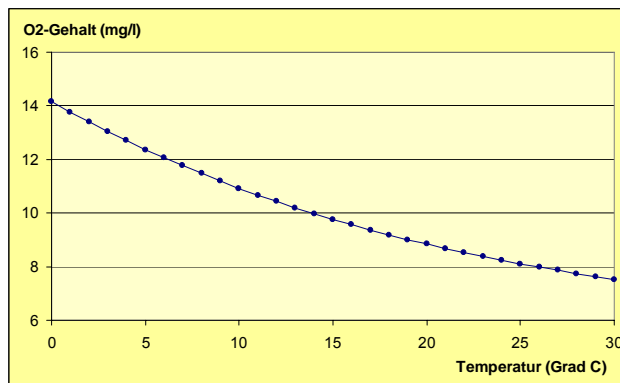


Abb. 1: Löslichkeitsvermögen von Sauerstoff in Abhängigkeit von der Temperatur

Verschärft wird der Sauerstoffmangel durch eine physikalisch bedingte Reduzierung des Löslichkeitsvermögens von Sauerstoff im Wasser bei höheren Temperaturen. So beträgt das Löslichkeitsgleichgewicht in Wasser von 0 °C 14,2 mg/l. Bei 30 °C liegt das Löslichkeitsvermögen dagegen nur noch bei 7,5 mg/l. Für Arten mit hohen Ansprüchen an die Sauerstoffversorgung reicht dieser Sauerstoffgehalt nicht aus. Besonders empfindlich reagieren in der Regel Insektenlarven mit unbeweglichen Kiemen (z.B. Eintagsfliegen der Gattungen Epeorus, Rhithrogena) oder kiemenlose Tiere (viele Steinfliegenlarven), die Sauerstoff nur über die Haut aufnehmen können. Diese Arten

sind auf stark strömendes, gut sauerstoffversorgtes Wasser angewiesen. Einen Sauerstoffmangel können zur Anoxybiose befähigte Tiere (Schlammröhrenwürmer, Zuckmückenlarven) oder Arten, die sich mittels Atemröhren mit Luftsauerstoff versorgen, verkraften. Gleiches gilt für Wasserspinnen, die Luftvorräte in Unterwasser-Gespinstglocken anlegen, und Lungenschnecken, die zum Gasaustausch an die Oberfläche kommen. Bei durch Klimawandel begünstigten höheren Wassertemperaturen und daraus resultierendem geringerem Sauerstofflöslichkeitsvermögen sind sauerstoffliebende Arten generell benachteiligt und werden durch „Allerweltsarten“ (so genannte Ubiquisten) mit geringeren Ansprüchen verdrängt.



Um Sauerstoffmangelerscheinungen entgegenzuwirken, wurde am Neckar eine öffentlich-rechtliche Vereinbarung über einen Sauerstoffmanagementplan getroffen. Dieser sieht vor, bei entsprechenden wasserwirtschaftlichen Extremsituationen durch Sauerstoffanreicherungen bei Wehrhaltungen oder durch Belüftungsmaßnahmen bei Kühl- bzw. Abwassereinleitungen ökologische Beeinträchtigungen zu minimieren. In den Sommermonaten der vergangenen Jahre ist dieses Sauerstoffmanagement regelmäßig zum Einsatz gekommen. Die Intensität der zu veranlassenden Maßnahmen ist dabei jeweils von der entsprechenden Witterung abhängig.

3. Einfluss auf die aquatische Lebensgemeinschaft

Das Temperaturoptimum der einzelnen Organismen ist eng mit ihrer Evolution, Verbreitung und Ökologie verknüpft. Aquatische Insekten wie auch Fische sind wechselwarme Tiere, deren Entwicklung in enger Weise mit thermischen Schwankungen (tägliche, saisonale und jährliche) korreliert ist.

Da sich u.a. das Temperaturregime im Längsverlauf einer Fließstrecke charakteristisch ändert, ergeben sich für die aquatische Lebensgemeinschaft typische Ausprägungen, die z.B. als Fischregionen einen hohen Bekanntheitsgrad erreicht haben.

Zone	Bezeichnung	Fischregion	Temperatur
Quellzone	Krenal		ca. 8 °C
obere Bachregion	Epirhitral	obere Forellenregion	max. 10 °C
mittlere Bachregion	Metarhitral	untere Forellenregion	max. 15 °C
untere Bachregion	Hyporhitral	Äschenregion	max. 20 °C
obere Flussregion	Epipotamal	Barbenregion	max. 25 °C
mittlere Flussregion	Metapotamal	Brachsenregion	max. 30 °C
untere Flussregion	Hypopotamal	Brackwasserregion	von Gezeiten beeinflusst

Bei Fischen werden alle physiologischen Prozesse (Metabolismus, Nahrungsaufnahme, Wachstum, Schwimmvermögen) stark von der Wassertemperatur beeinflusst. Je nach Art ist der bevorzugte Temperaturbereich relativ eng. Hohe Ansprüche an niedrige Wassertemperatur haben Salmoniden, wie z.B. Forellen und Äschen. Cypriniden (Karpfenartige) können dagegen Temperaturschwankungen besser verkraften.

Ähnlich wie bei den Fischen ist die Entwicklung bei vielen Makrozoobenthosarten ebenfalls eng an die Temperatur gekoppelt. Die Entwicklungsdauer von Eiern der Eintagsfliege *Baetis rhodani* beträgt z.B. bei 5 °C 64 bis 68 Tage und bei 10 °C nur 25 bis 27 Tage (BOHLE 1969). Somit hat die Temperatur einen entscheidenden Einfluss auf den Lebenszyklus der Organismen.

Prinzipiell unterscheidet man:

- semivoltin: eine Generation in zwei oder mehr Jahren
- univoltin: einjähriger Zyklus
- multi/polyvoltin: mehrere Generationen pro Jahr

Die meisten der Fließgewässerarten in Mitteleuropa entsprechen dem univoltinen Typus. Semivoltine Lebenszyklen sind vor allem bei kaltstenothermen Gebirgsarten bekannt. Zu den Arten mit kurzen Generationswechseln (multi- bis polyvoltin) gehören z.B. Zuckmückenarten. Manche Arten, wie die oben erwähnte Eintagsfliege *Baetis rhodani*, weisen in Abhängigkeit von den Umweltvariablen eine hohe Varianz auf. So ist diese Eintagsfliege (*Baetis rhodani*) beispielsweise in Nordeuropa und in höheren Gebirgslagen univoltin, in Mitteleuropa dagegen bivoltin mit einer Winter- und Sommergeneration und in Südeuropa polyvoltin mit einer Winter- und zwei Sommergenerationen (BAUERNFEIND und HUMPESCH 2001).

4. Mögliche Veränderungen in der aquatischen Lebensgemeinschaft

Klimaveränderungen können für die eine Art von Nachteil und für die andere Art von Vorteil sein. Eine breit angelegte Studie in den USA (764 Messstellen) sagt unter der Annahme einer CO₂-Verdoppelung in der Atmosphäre vorher, dass an 36 % der untersuchten Standorte keine geeigneten Temperaturbedingungen für Kaltwasserfische mehr vorliegen. Diese Veränderungen sind mit einer Verschiebung des Verbreitungsgebietes nach Norden verbunden. Im Gegensatz dazu nimmt die Zahl geeigneter Standorte für Warmwasserfische um 31 % zu (MOHSENI et al. 2003).

In Österreich wird ein Zurückdrängen der kaltwasserliebenden Salmoniden befürchtet. Einzelne Arten, wie z.B. die Äsche, seien derzeit infolge anderer anthropogener Eingriffe in ihrem Bestand schon so stark gefährdet, dass sie zusätzliche klimabedingte Beeinträchtigung an den Rand des Aussterbens bringen könnten. Da Salmonidengewässer zu den attraktivsten Angelsportgewässern in Österreich zählen, werden neben ökologischen auch deutliche sozioökonomische Folgewirkungen erwartet (BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT 2003).

In den Flüssen und Seen Baden-Württembergs hat sich in den vergangenen Jahrzehnten ein bedeutender Wechsel in der biologischen Besiedlung ergeben. Allerdings ist es in vielen Fällen schwer nachzuvollziehen, ob das Vordringen neuer Arten und das Verschwinden alteingesessener Arten allein auf einen Klimawandel oder vielmehr auch auf neue Verbreitungsmöglichkeiten (Schifffahrtskanäle etc.) zurückzuführen ist. Bei einigen Arten (z.B. mediterrane Libellen) scheint das Vordringen nördlich der Alpen hauptsächlich durch klimatische Veränderungen bedingt (OTT 2000).

Bei der überwiegenden Zahl von Neubesiedlern aus anderen Regionen (Neozoen) ist unklar, ob ihr Auftreten im Wesentlichen auch durch klimatische Veränderungen hervorgerufen wird. Voraussetzung ist zumindest, dass sie durch neue Ausbreitungswege Zugang zu unseren heimischen Gewässern gefunden haben. Die Transportwege sind dabei sehr unterschiedlich. Einige neue Arten sind beliebte Aquarien- oder Gartenteichpflanzen bzw. -fische. So wird vermutet, dass z.B. Kanadische Wasserpest (*Elodea canadensis*), Brasilianisches Tausendblatt (*Myriophyllum aquaticum*) oder Sonnenbarsch (*Lepomis gibbosus*) auf diesem Wege in unsere Gewässer gelangten. Andere Arten haben den stark zunehmenden Schiffsverkehr genutzt und sind beispielsweise im Ballastwasser aus fernen Regionen zugewandert.



Abb. 2: Körbchenmuschel (Foto: P. Rey)

Ein Beispiel hierfür ist die Körbchenmuschel (*Corbicula fluminea*), die in Asien (China, Korea) beheimatet ist. Der Erstnachweis für diese Art erfolgte Ende der 80er Jahre im Rheindelta. Mittlerweile ist die Muschel auch in Nebengewässern, wie dem Neckar, und dem Bodensee in hoher Dichte (bis zu mehr als 1.000 Tiere pro m²) zu finden. Einen weiteren Zuwandererschub brachte die Öffnung des Rhein-Main-Donau-Kanals. Dadurch breiten sich derzeit viele Arten aus dem pontokaspischen Raum (Schwarzmeerküste) aus.



Abb. 3: Sonnenbarsch (Foto: P. Rey)

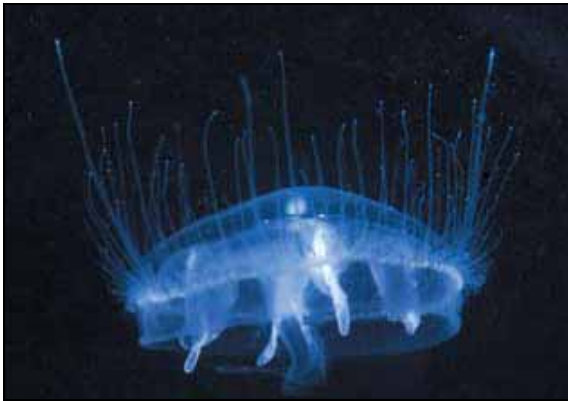


Abb. 4: Süßwasserqualle (Foto: P. Rey)

Hierzu gehören beispielsweise Höckerflohkrebse (*Dikerogammarus villosus*), Schlickkrebse (*Chelicorophium curvispinum*) und Donauassel (*Jaera istri*). Mittlerweile sind sowohl am Rhein wie auch am Neckar mehr als 30 Neozoenarten bekannt. Diese haben die heimische Fauna sehr stark verdrängt und machen z.B. im Rhein bei Basel mehr als 90% der Biomasse aus. Auch der Bodensee und zahlreiche kleinere Stehgewässer werden derzeit von Neozoen bedrängt. So sind z.B. in den oberrheinischen Baggerseen vermehrt Schwebgarnelen (*Limnomyia benedeni*) aus dem Donauraum und Süßwasserquallen (*Craspedacusta sowerbyi*) aus dem tropischen Südamerika anzutreffen. Gerade bei letzteren ist zu vermuten, dass zunehmende Wassertemperaturen ihre Verbreitung begünstigen.



Abb. 5: Muschelsterben: angetriebene tote Muschelkörper an einer Stauhaltung im Neckar und rechts Aufsammeln der Muschelkörper zur Anlieferung in eine Tierkörperbeseitigungsanstalt (Fotos LUBW).

In Baden-Württemberg wurden in den „Hitze- und Niedrigwasserjahren“ 2003 und 2006 auch einige biologische Sonderuntersuchungen im Zusammenhang mit wasserrechtlichen Ausnahmegenehmigungen bzw. Duldungen für Kühlwassereinleiter durchgeführt (ökologisches Begleitmonitoring). Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich beim Makrozoobenthos im Nahbereich der Einleitungsstellen ökologische Beeinträchtigungen zeigten. So wurden beispielsweise bei einigen Krebsarten eine erhöhte Mortalität und eine Faunenverschiebung zu weniger empfindlichen Zuckmückenlarven nachgewiesen. Weiterhin wurden in Hitzejahren öfter größere Muschelsterben in Rhein und Neckar beobachtet, die sich allerdings auf größeren Streckenabschnitten ereigneten und nicht in direkten Zusammenhang mit einzelnen Wärmeeinleitern gesetzt werden können. Hier wird ein Zusammenwirken von hohen Temperaturen, niedrigem Sauerstoffgehalt, ungünstigen Abflussverhältnissen in Verbindung mit einer schlechten Ernährungslage vermutet. Bei zunehmender Häufung von Hitze- und Niedrigwasserperioden ist mit einer Verschärfung dieser Situation zu rechnen.

5. Zusammenfassung

Der Klimawandel hat Einfluss auf die chemisch-physikalischen Verhältnisse im Gewässer und auf die Zusammensetzung der aquatischen Lebensgemeinschaft. Höhere Temperaturen beschleunigen in der Regel die chemischen Reaktionsprozesse, insbesondere dann wenn diese auf mikrobiellen Stoffumsetzungen beruhen. Gerade im Bereich der Selbstreinigungsprozesse sind ein verstärkter Abbau gelöster organischer Substanzen und ein schnellerer Ablauf der Nitrifikation zu verzeichnen. Problematisch ist dabei ein erhöhter Sauerstoffbedarf, so dass bei Hitzeperioden vermehrt mit Beeinträchtigungen des Sauerstoffhaushalts zu rechnen ist.

Die Tier- und Pflanzenwelt in den Gewässern Baden-Württembergs hat in den vergangenen Jahrzehnten einen gravierenden Wandel erfahren. Teilweise kann dieser Artenwechsel, der eine Verdrängung der heimischen Arten bedeutet, direkt veränderten klimatischen Bedingungen zugeordnet werden. Bei der überwiegenden Zahl von Neubesiedlern (Neozoen) ist jedoch noch unklar, ob ihr Auftreten auf Grund von Klimaveränderungen in unseren Breiten erst möglich geworden ist oder ob allein das „Einschleppen“ dieser Arten (über neue Schifffahrtswege etc.) genügte, um sich hier massiv auszubreiten. Bei den Arten, die schon sehr lange hier sind (z.B. der nordamerikanische Kamberkreb) ist sicherlich nicht von einer klimatischen Begünstigung auszugehen. Die „jüngeren“ Neuzuwanderer kommen aber verstärkt aus wärmeren Regionen (Schwarzmeerküste, Südamerika, Asien). Hier ist wohl davon auszugehen, dass die zunehmende Erwärmung der Gewässer die Ausbreitungsmöglichkeiten begünstigt.

Die Auswirkungen sind gravierend. Am Rhein gehen inzwischen stellenweise mehr als 90 % der Biomasse auf Neozoen zurück. Die ursprüngliche Fauna ist nur noch in Resten vorhanden. Im Zusammenhang mit häufiger auftretenden Hitze- und Niedrigwasserperioden wurden schon öfter größere Muschelsterben in Rhein und Neckar beobachtet.

6. Literatur

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (2003): Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Tierwelt – derzeitiger Wissensstand, fokussiert auf den Alpenraum und Österreich, Wien, 141 Seiten.
- Bauernfeind, E. und U.H. Humpesch (2001): Die Eintagsfliegen Zentraleuropas (Insecta: Ephemeroptera) Bestimmung und Ökologie.- Verlag des Naturhistorischen Museums Wien, Wien
- Bohle, H.W. (1969): Untersuchungen über die Embryonalentwicklung und die embryonale Diapause bei *Baetis vernalis* Curtis und *Baetis rhodani* (Baetidae, Ephemeroptera). Zoologische Jahrbücher, Anatomie und Ontogenie der Tiere 86: 493-575.
- Mohseni, O., H.G. Stefan und J.G. Eaton, 2003: Global warming and potential changes in fish habitat in U.S. streams. *Climatic Change*, 59(3), 389-409.



Ott, J. (2000): Die Ausbreitung mediterraner Libellenarten in Deutschland und Europa – die Folge einer Klimaveränderung? NNA-Berichte 13/2:13-35.

Auswirkungen der Klimaveränderung auf Binnenseen am Beispiel des Bodensees

Bernd Wahl

GKSS, für das Institut für Seenforschung
der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg

1. Einleitung

Eine Vielzahl von Nutzungen des Bodensees wie auch wissenschaftliches Interesse und Bemühungen um einen Gewässer- und Naturschutz führten zur Erfassung umfangreicher Beobachtungsdaten zu diesem großen und tiefen Binnensee.

Sehr lange Zeitreihen liegen zu den hydrologischen Verhältnissen zahlreicher Zuflüsse, wie auch zum Pegelverlauf vor und spiegeln die Bedeutung der Zufluss- und Wasserspiegelschwankungen für die Seeanrainer wieder. Besonders die Extrema werden mit besonderem Interesse wahrgenommen: Niedrigwasser schränkt beispielsweise die Schifffahrt ein und wirkt sich auf die ufernahen Feuchtgebiete aus. Hochwasserereignisse können bedeutende Schäden verursachen.

Der Gewässerschutz wie auch die Ökosystemforschung führten zur langjährigen Untersuchung einer Vielzahl an biologischen, chemischen wie auch hydrophysikalischen Messparametern. Auch die Entwicklung der Fischerträge und -bestände wird seit vielen Jahrzehnten aufgezeichnet.

Diese Datenbestände stellen heute eine wertvolle Grundlage dar, welche zur Untersuchung von Auswirkungen klimatischer Veränderungen herangezogen werden kann. Da viele der Prozesse im Bodensee erheblich von den Witterungsverhältnissen abhängen, sind Auswirkungen der sich abzeichnenden klimatischen Veränderungen auf den See zu erwarten. Einfache direkte Einflüsse, wie etwa die tendenzielle Erwärmung des Sees, können sich in komplexer Weise im Wirkungs- und Prozessgefüge des Sees fortpflanzen.

Durch Hollan (2000) wurden im ersten KLIWA-Symposium bereits einige Aspekte, welche für die Beobachtung von Klimasignalen im Bodensee von Bedeutung sind, erörtert. Er zeigt auf, dass für die winterliche Tiefenwassererneuerung und die damit verbundene Regeneration des Sauerstoffgehaltes die Stärke der winterlichen Auskühlung von hoher Bedeutung ist, während der Beitrag durch Flusswassereinmischung eher gering ist. Die Dynamik der Auskühlung und der vertikalen Durchmischung hängt sehr vom Witterungsverlauf wie auch von der Form des Seebeckens ab. Hierauf weist auch Livingston (1997) beim Vergleich von 4 Schweizer Seen hin.

Im sägezahnartigen Verlauf der Tiefentemperaturen spiegeln sich die Jahre unzureichender und guter vertikaler Durchmischung wieder, wie Hollan in Eurolakes (2003) für den Zeitbereich 1985 bis 2002 aufzeigt. Ein Vergleich von 12 europäischen Seen hat Dokulil et. al. (2006) durchgeführt. Hierbei zeigen sich zwar einerseits deutliche seenspezifische und regionale Unterschiede im Temperaturverlauf, andererseits ist ein signifikant ansteigender Trend bei allen 12 Seen erkennbar. Die gefundene Kohärenz kann auf großskalige Wetterphänomene, wie etwa der Nordatlantischen Zirkulation, zurückgeführt werden. In mehreren wissenschaftlichen Arbeiten (z.B. Livingston und Dokulil 2001, Dokulil 2006, Straile et al. 2003a und 2003b) wurde eine solche Kopplung mit der Wassertemperatur, den Mischungsverhältnissen und teilweise auch bezüglich biologischer und chemischer Prozesse in Seen untersucht.

Eine Analyse des langjährigen Verlaufs der Durchmischungsintensität im Bodensee unter Verwendung chemischer Messparameter als Indikatoren wurde erstmals durch Roßknecht (2003)



durchgeführt. Er zeigt hierbei auf, dass ab den 1990er Jahren vermehrt Winter mit unzureichender vertikaler Durchmischung auftreten.

Um eine möglichst breite Basis für die Untersuchung möglicher klimabedingter Einflüsse auf den Bodensee verfügbar zu haben, wurde im KLIWA-Teilprojekt A2.2.1 ein umfangreicher Bestand langjähriger Messreihen biologischer, chemischer und hydrophysikalischer Parameter des Bodensees und seiner Zuflüsse, sowie zur Meteorologie zusammengestellt. Die Zeitreihen wurden auf Fehlerhaftigkeit und hinsichtlich ihrer Homogenität überprüft und soweit nötig und möglich korrigiert. Die Verfügbarkeit und Qualität der Daten konnte hierdurch wesentlich verbessert werden und dient damit auch künftigen weiterführenden Untersuchungen.

Auf der Grundlage dieses Datenbestands wurde eine Vielzahl an statistischen Analysen in einem breiten Spektrum an Themen durchgeführt. Hierbei wurde ein besonderes Augenmerk auf markante langjährige Veränderungen gerichtet. Zu deren Verständnis ist die Kenntnis über wesentliche Entwicklungen am oder im Bodensee während der vergangenen Jahrzehnte nötig. Oftmals sind diese Veränderungen anthropogen verursacht, wie beispielsweise die Überdüngung des Bodensees (Eutrophierung) ab etwa den 1950/60er Jahren, welcher durch den Ausbau der Siedlungsabwasserreinigung erfolgreich entgegengewirkt wurde (Güde et al. 1998). Viele der hydrochemischen und hydrobiologischen Zeitreihen sind durch diese Nährstoffentwicklung gekennzeichnet. Andere Beispiele markanter Einflüsse sind die hydroelektrische Nutzung des Wassers im alpinen Einzugsgebiet (IGKB 2004) oder die intensive Befischung. Die Signale solcher Entwicklungen überlagern sich oftmals mit Auswirkungen anderer Faktoren, wie etwa veränderter hydrometeorologischer Einflüsse und sind mitunter schwer voneinander zu trennen.

Als Schwerpunktthemen in diesem Bericht wurden die Entwicklungen des Temperatur-, Schichtungs- und Mischungsregimes des Sees sowie der sich im Wasserstandsverlauf des Bodensees widerspiegelnden Hydrologie gewählt. In beiden Bereichen findet man Veränderungen, welche sich durch die beobachteten klimatischen Veränderungen erklären lassen und Folgewirkungen auf das Ökosystem haben.

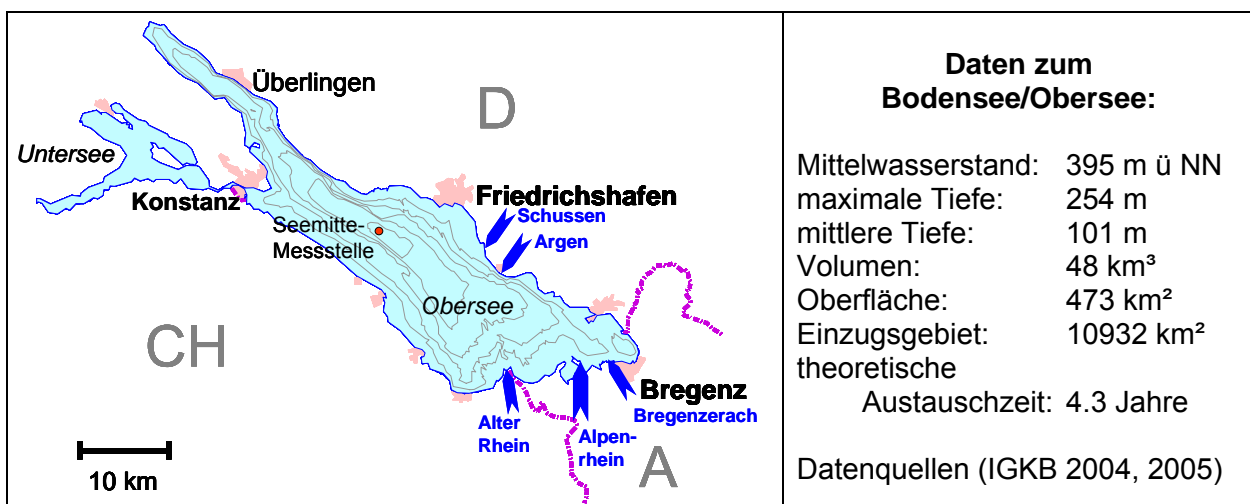


Abb. 1: Der Bodensee und die 5 Hauptzuflüsse in den Obersee. Eingezeichnet ist auch eine der IGKB-Messstellen, welche regelmäßig beprobt werden. Die Zeitreihen dieser „Seemittelmessstelle“, welche etwa an der tiefsten Stelle des Sees liegt, reichen vielfach bis in die 1960er Jahre zurück.

2. Beispiele längerfristiger Veränderungen des Bodensees

Der Namen „Bodensee“ fasst zwei getrennte Seebecken zusammen: den tieferen und größeren Obersee, dessen Ausstrom „Seerhein“ bei Konstanz in den etwa 20 cm tiefer liegenden, flacheren Untersee mündet. Von diesen beiden Seeteilen, welche grundlegend verschieden sind, wurde bei den Untersuchungen primär der Obersee betrachtet, welcher als großer und tiefer, perialpiner See bezeichnet werden kann.

In Folge der zunehmenden Besiedlung und Nutzung der Bodenseeregion durch den Menschen kamen zu den natürlichen Einflüssen viele weitere Faktoren hinzu, welche mehr oder weniger deutliche Auswirkungen auf den Bodensee hatten bzw. haben. Insbesondere seit dem 20. Jahrhundert führten die erweiterten technischen Möglichkeiten und die Bevölkerungszunahme zu erheblichen Eingriffen.

Einige solcher Veränderungen sollen hier beispielhaft kurz dargestellt werden und verdeutlichen, dass eine Vielzahl an Entwicklungen bei der Interpretation der Messzeitreihen zu berücksichtigen ist.

Nährstoffentwicklung

Der Bodensee ist ein im natürlichen Zustand nährstoffarmer See. Mit dem zunehmenden Eintrag an Pflanzennährstoffen in den Bodensee ab etwa Mitte des 20. Jahrhunderts wurden Veränderungen des Sees beobachtet, welche 1959 Anlass gaben die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) zur internationalen Koordinierung des Gewässerschutzes zu gründen. Seit den 1960er Jahren werden durch die IGKB fortwährend Messwerte zur Qualität des Wassers und des Ökosystems erfasst.

Folgen der Überdüngung des Sees (Abbildung 2) waren u.a. Algenblüten und Sauerstoffdefizite im Tiefenwasser. Niedrige Redox-Verhältnisse am Seegrund führten zur Rücklösung von Phosphor aus dem Sediment. Veränderungen gab es auch bei der anteilmäßigen Zusammensetzung der Phytoplankton- und Zooplanktonarten. Für Fischeier, welche in die Tiefe des Sees abgelegt wurden, wie etwa jene der Blaufelchen, waren die Sauerstoffdefizite schädlich. Bei anderen Fischarten, wie etwa dem Barsch, führte die Überdüngung durch das erhöhte Nahrungsangebot zu einer Bestandszunahme.

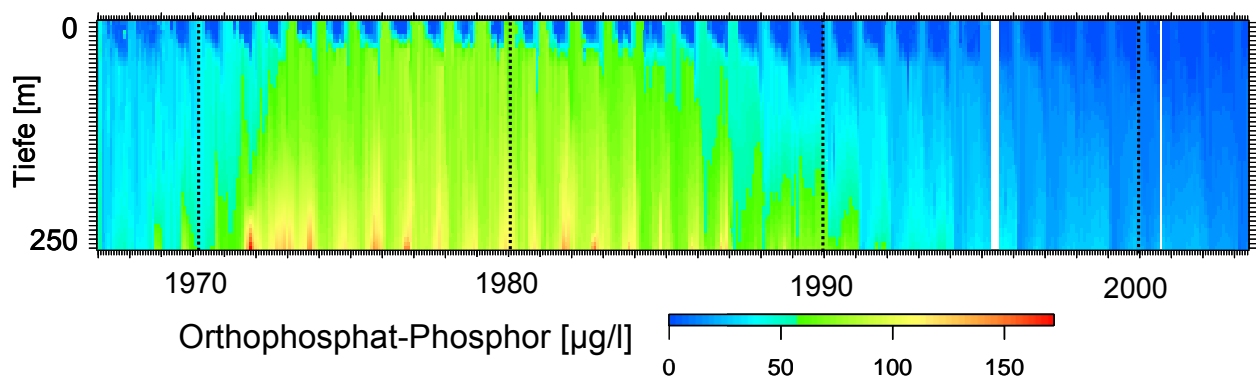


Abb. 2: Die Überdüngung des Bodensees, dargestellt anhand der Entwicklung der Konzentrationen an gelöstem, biologisch verfügbarem Orthophosphat-Phosphor. Durch die absinkende Biomasse konzentriert sich das Phosphat in der Tiefe des Sees auf. Oberflächennah wird das Orthophosphat in der Wachstumsperiode durch das Plankton aufgebraucht.



Zuflüsse

Die 5 Zuflüsse Alpenrhein, Bregenzerach, Argen, Alter Rhein und Schussen decken im Jahresmittel bereits etwa 90 % der Zuflussmenge ab, der Alpenrhein allein etwa 2/3 (Abbildung 1 und 3). Das alpine Einzugsgebiet hat starken Einfluss auf den saisonalen Verlauf der Zuflussmengen und somit auch auf den Wasserstand des Bodensees. Während im Winterhalbjahr der Abfluss nicht nur durch geringere Niederschläge sondern auch durch deren Retention in Form von Schnee verringert wird, erhöht sich die Abflussmenge entsprechend im Frühjahr und Sommer durch Schmelzwasser.

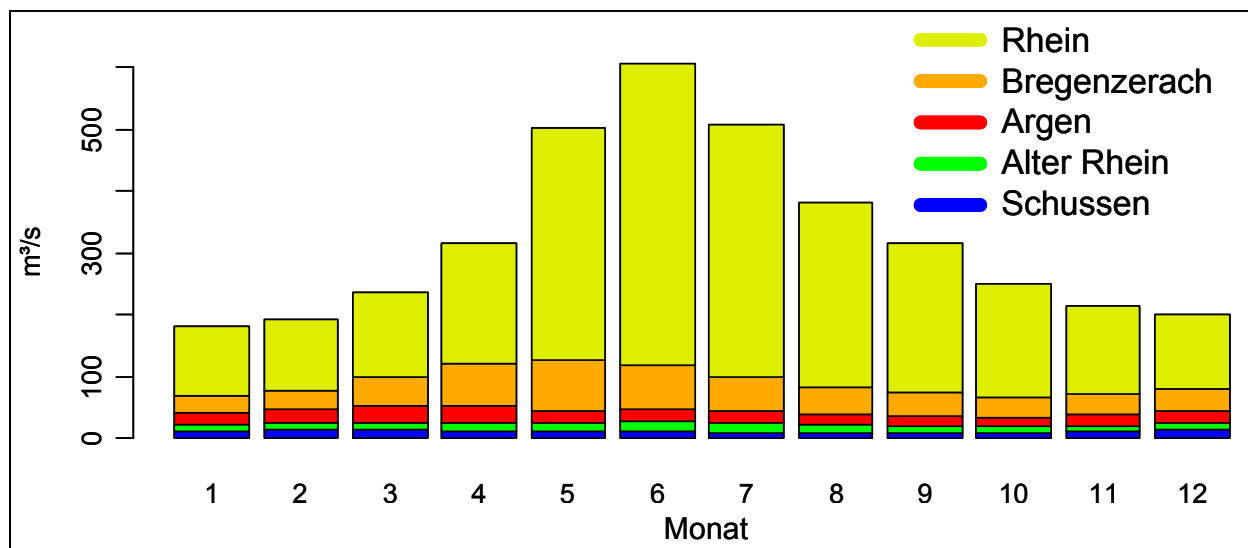


Abb. 3: Mittlerer Jahresverlauf der Zuflussmengen der 5 Hauptzuflüsse des Bodensee-Obersees, welche zusammen etwa 90% der jährlichen Gesamtzuflussmenge beitragen (Zeitbereich: 1951 bis 2001).

Merkliche Veränderungen in der saisonalen Ausprägung der Abflussmengen und damit auch des Bodenseewasserstands wurden durch den Ausbau der Speicherhaltung in den Alpen verursacht. Die etwa 790 Mio. m³ Speichervolumen wurden vorwiegend in den 1950/60er Jahren geschaffen, verringerten die Abflussmengen im Sommer und erhöhten sie im Winter. Nach IGKB (2004) wird der Abfluss von etwa 600 Mio. m³ Wasser vom Sommer- ins Winterhalbjahr verlagert. Verändert wird durch die Speicherbewirtschaftung auch der tägliche Verlauf der Abflussmengen im Alpenrhein, da der Wechsel an Strombedarf zu einem merklichen Tagesgang der Abflussmengen führt. Die Intensität dieses Sunk-/Schwallbetriebs hat sich in jüngerer Zeit verstärkt (IGKB 2004). Die Ökologie des Alpenrheins wird hierdurch nachteilig beeinflusst.

Befischung und Fischbestände

Fische reagieren in vieler Hinsicht auf die Witterungsbedingungen. Für die Blaufelchen konnte beispielsweise aufgezeigt werden, dass zwischen der Laichzeit dieser Fischart und der Wassertemperatur im November ein enger Zusammenhang besteht. Eine Analyse auf Einflüsse klimatischer Veränderungen auf die Entwicklung und die Bestände der Fische ist daher nahe liegend. Auf der anderen Seite ist der menschliche Einfluss auf die Fische über die Befischung aber auch durch Besatzmaßnahmen besonders hoch. Neben Veränderungen in der Befischungstechnik wirken sich auch Maßnahmen und Vorschriften der Fischereibewirtschaftung aus.

Am Beispiel des Blaufelchenbestands wird in Abbildung 4 die stark veränderliche Entwicklung seit den 1950er Jahren dargestellt. Die Bestandszahlen sind aus den Fängen und deren Altersstruktur errechnet und reichen daher nicht bis in die Gegenwart, da die jüngeren Felchenjahrgänge noch nicht ausgefischt waren.

Markant ist der Einbruch im Bestand gegen Ende der 1950er Jahre. Dieser lässt sich auf verbesserte technische Methoden der Befischung zurückführen, wie insbesondere dem Einsatz von Nylonnetzen, welche wesentlich fängiger sind als die vormals benutzten Baumwollnetze. Mit einem kurzzeitigen Fangverbot wie auch mit einer Erhöhung der Netzmaschenweite wurde dieser Entwicklung von fischereiwirtschaftlicher Seite begegnet. Zudem wurde der Besatz des Sees mit Felchenlarven aus Brutanstalten verbessert und intensiviert. Der Felchenbestand erholte sich jedoch nur langsam in den nachfolgenden zwei Jahrzehnten. Möglicherweise wirkten sich hierbei auch Folgen der Überdüngung des Sees auf die Bestandsentwicklung aus, wie etwa die Schädigung von Felcheneier durch Sauerstoffdefizite oder ein zu junges Fangalter der Fische aufgrund erhöhter Wachstumsraten.

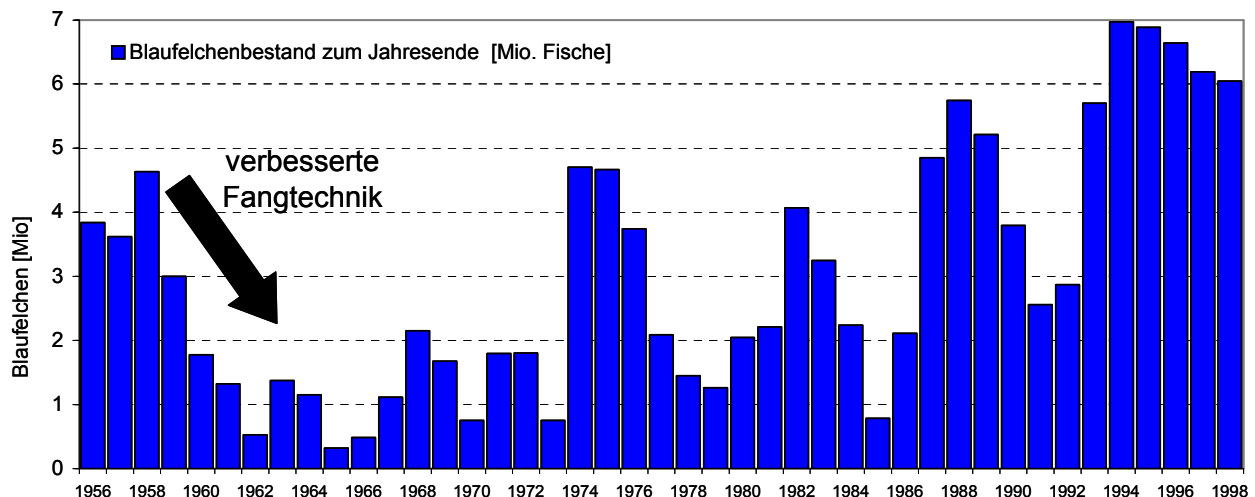


Abb. 4: Bestandsentwicklung der Blaufelchen im Zeitraum 1956 bis 1998 errechnet aus der Menge und der Alterszusammensetzung der Fänge. Die jüngeren Jahrgänge waren noch nicht ausgefischt, weshalb die Bestandszahlen hierzu nicht angegeben sind.

3. Das Temperatur und Mischungsregime des Bodensees

Ebenso wie bei den Lufttemperaturen findet man auch für die Wassertemperaturen des Bodensees signifikant ansteigende Trends. Die Angabe linearer Trendwerte in Abbildung 5 und 6 für die Jahresmittelwerte veranschaulicht grob die Entwicklung in den vergangenen vier Jahrzehnten. Die Werte wie auch die Signifikanz der Trends hängen jedoch sehr vom betrachteten Zeitraum ab. Klar erkennbar ist jedoch in Abbildung 5 für die Luft wie auch die Wassertemperatur der Oberflächenschicht, dass ab etwa 1988 die Temperaturen insgesamt auffällig höher liegen als zuvor. Der verwendete Trendtest nach Mann-Kendall ist in KLIWA Heft 5 beschrieben.

Ein Vergleich der saisonalen und tiefen-abhängigen Trendentwicklungen ist in Abbildung 6 durchgeführt. Zur Tiefe hin erhält man schwächere, aber über das Jahr hinweg konstantere Trendwerte. Insbesondere in den oberen Wassertiefen sind die Trends auf Grund der Variabilität und der Kürze der Zeitreihe mitunter nicht signifikant. Einen klaren signifikanten Anstieg findet man jedoch in den Wintermonaten für alle Tiefenbereiche. Die winterliche Temperaturentwicklung ist für die vertikale Durchmischung des Sees und damit für die Erneuerung des Tiefenwassers von hoher Bedeutung.

Die deutlich ansteigenden Trends der Wassertemperaturen in den Wintermonaten in den oberen Schichten lassen vermuten, dass sich die Dauer und Intensität der winterlichen vertikalen Durchmischung verändert haben könnte.



In Abbildung 7 ist ein mittlerer Jahresverlauf der Temperaturschichtung im Bodensee dargestellt. Man erkennt, dass der See ab etwa April geschichtet ist und sich diese Schichtung im Herbst und Winter allmählich auflöst. In den Monaten Februar und März ist der See annähernd ungeschichtet, wodurch eine tiefer greifende Durchmischung und somit die Regeneration des Tiefenwassers ermöglicht wird. Die alljährliche Veränderlichkeit verschiedener Größen, welche den vertikalen Durchmischungsprozess mitbestimmen, wie insbesondere die winterlichen Temperaturverhältnisse, lässt die Tiefenwassererneuerung mal besser und mal schlechter ausfallen.

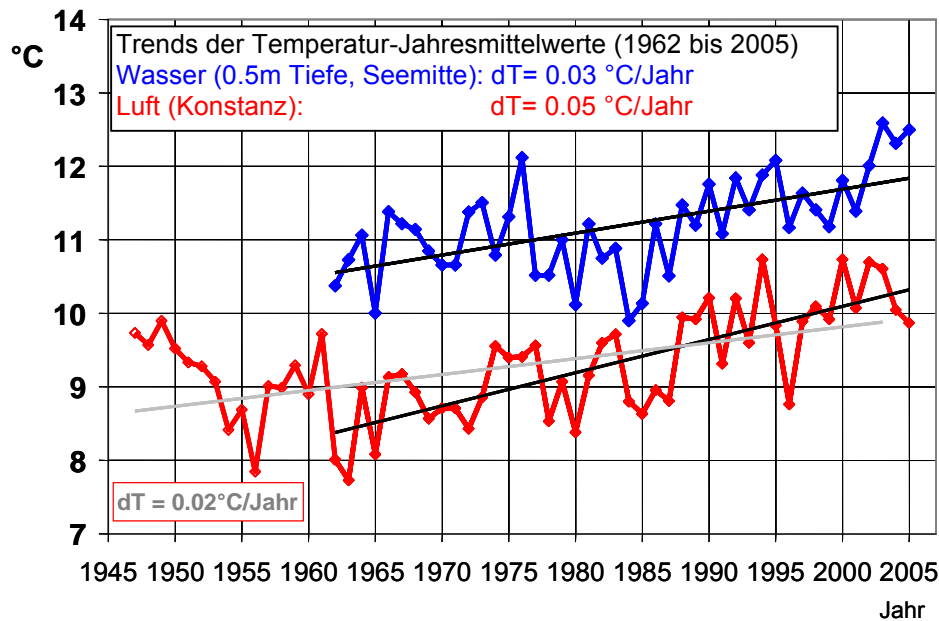


Abb. 5: Verlauf der Temperaturentwicklung des oberflächennahen Wassers in Seemitte und der Luft bei der Messstation Konstanz. Die angegebenen linearen Trends sind signifikant ($p < 0,1$, Test nach Mann-Kendall). Diese Graphik wurde im Gegensatz zu Abbildung 6 mit Daten der Jahre 2004 und 2005 aktualisiert.

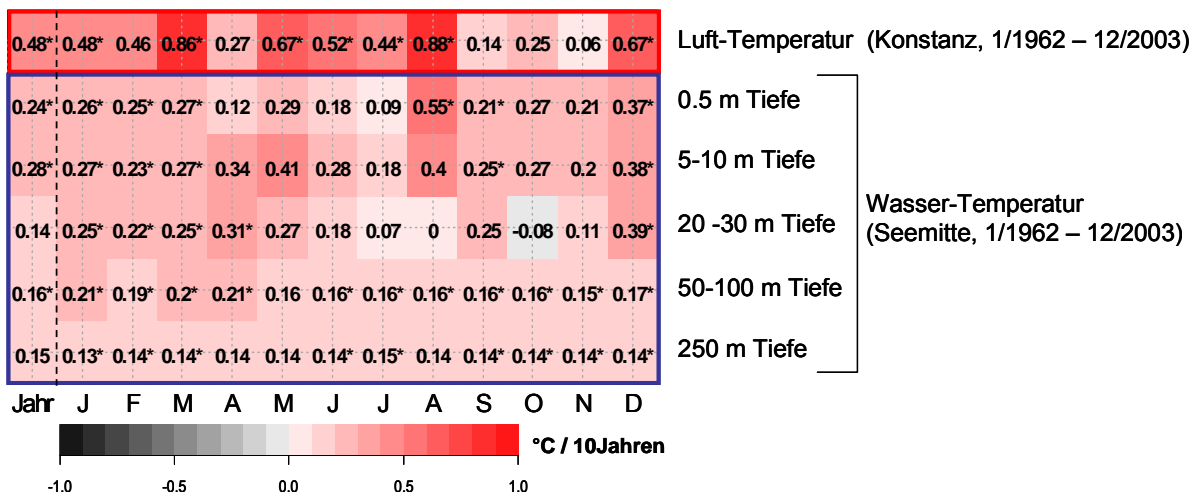


Abb. 6: Jahresmitteltrendwerte (erste Spalte), sowie nach Monaten und Tiefenschichten getrennte lineare Trendwerte für die Wasser- bzw. Lufttemperatur. Die mit * markierten linearen Trends sind mit $p < 0.1$ signifikant (Test nach Mann-Kendall).

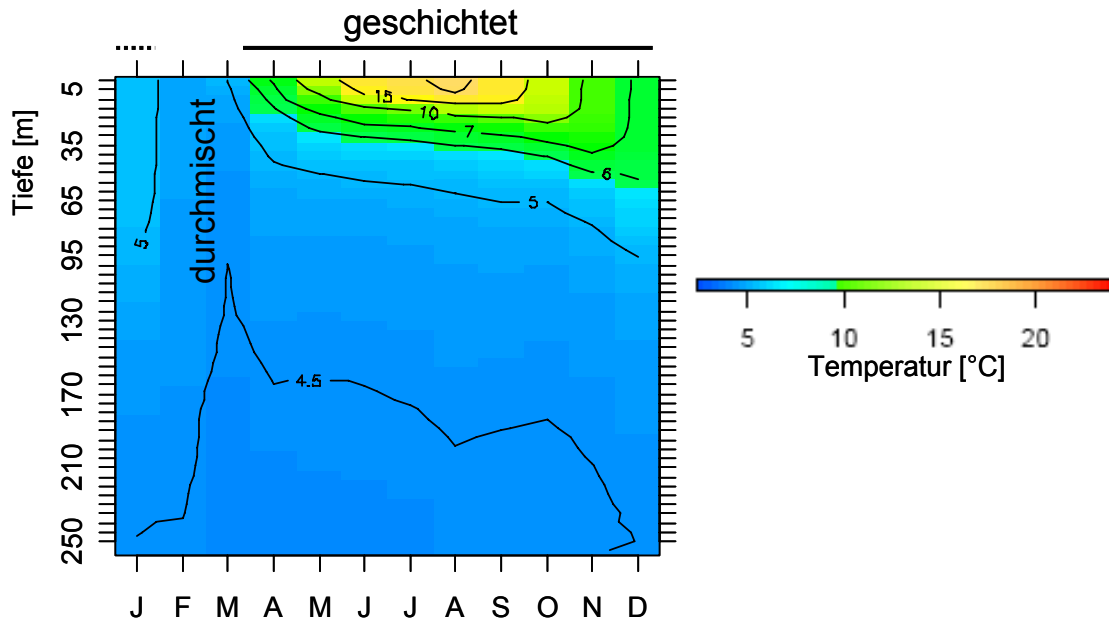


Abb. 7: Mittlerer Verlauf der Temperaturschichtung des Bodensees (Zeitraum 4/1961 bis 11/2004)

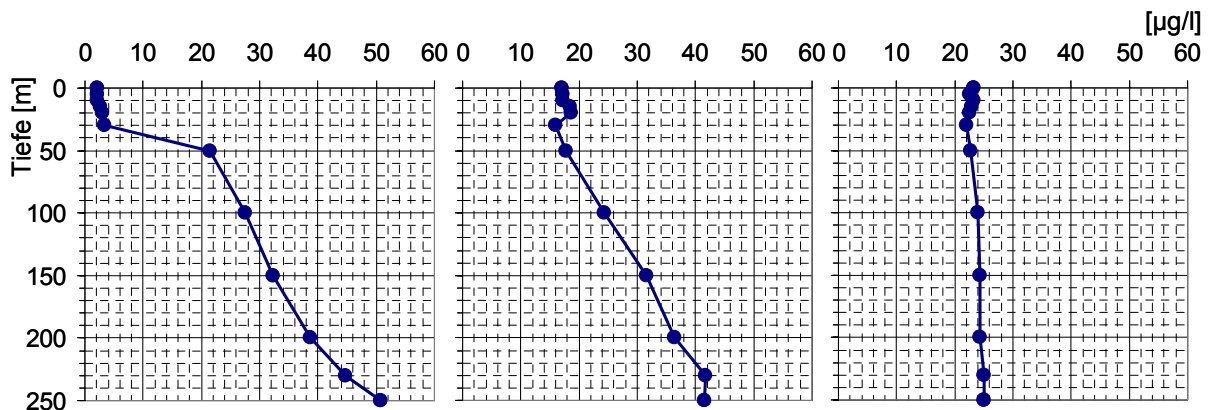


Abb. 8: Messprofile für Orthophosphat-Phosphor vom 5.10.1993 (links), 12.1.1994 (Mitte) und 8.3.1994 (rechts). Die gute vertikale Durchmischung im Jahr 1994 gleicht den Konzentrationsgradient, der sich im Herbst gebildet hat im Frühjahr nahezu aus.

Um der Frage nachzugehen, ob sich das jährliche Durchmischungsverhalten des Sees verändert hat, wurde eine Maßzahl für die winterliche Durchmischungsstärke definiert. Hierfür wurde der Sachverhalt zu Nutze gemacht, dass sich für manche chemischen Messparameter, wie etwa Orthophosphat oder Silikat über das Jahr zum Herbst hin ein vertikaler Gradient aufbaut, welcher durch die winterliche Durchmischung mehr oder weniger ausgeglichen wird. Abbildung 8 zeigt dies für den Parameter Orthophosphat im Winter 1993/1994. Roßknecht (2003) verwendet den minimalen Variationskoeffizient der winterlichen vertikalen Messprofile als Indikatorgröße für die Durchmischung. Um gegenüber diesem Ansatz den Einfluss von sich ändernden mittleren Konzentrationen, wie sie insbesondere beim Orthophosphat im Verlauf der Nährstoffabnahme im See auftraten, zu kompensieren, wurde dieses Konzept im Wesentlichen dadurch abgeändert, dass die im Frühjahr erreichte kleinste Streubreite der Messprofilwerte auf die Ausgangssituation im Herbst normiert wird. Man erreicht somit eine homogenere Skalierung, so dass die resultierenden Kennwerte besser untereinander verglichen werden können und sich dadurch auch für statistische Analysen eignen. Um eine gute vertikale Durchmischung hohen



Maßzahlwerten und eine schlechte niedrigen Werten zuzuordnen, wurde der Quotient der Standardabweichungen von 1 subtrahiert:

$$Z = 1 - \frac{\text{minimale Standardabweichung der Messprofile im Frühjahr}}{\text{maximale Standardabweichung der Messprofile im Herbst bzw. Frühwinter}}$$

Der auf Grundlage der Messparameter Orthophosphat bzw. Silikat errechnete langjährige Verlauf dieses Durchmischungsindikators ist in Abbildung 9 dargestellt. Zudem ist die Zeitreihe der jährlichen Sauerstoffminima über Seegrund bei der Seemittelmessstelle beigefügt. Gute Durchmischungswerte liegen deutlich über $Z = 0.8$. Nahe 0.8 war die Durchmischung zwar insgesamt nicht schlecht, hat aber in der Regel die tieferen Wasserschichten nur unzureichend erreicht. Werte, die deutlich darunter liegen, stellen Jahre ausgesprochen schlechter vertikaler Durchmischung dar.

Die qualitative Deutung dieser Zeitreihen deckt sich mit den Interpretationen von Roßknecht (2003): In der Hochphase der Überdüngung des Sees waren die Durchmischungswerte fast immer gut. Dieser günstige Sachverhalt führte dazu, dass trotz hoher Biomasseakkumulation in der Tiefe und der dadurch erhöhten Sauerstoffzehrung, die Sauerstoffwerte meist unkritisch blieben. Zwei mehrjährige Phasen (1971 bis 1973 und 1988 bis 1990) ausgeprägt schlechter vertikaler Durchmischung traten jedoch auf und zeigen die dramatischen Konsequenzen für den Sauerstoffhaushalt des Tiefenwassers auf.

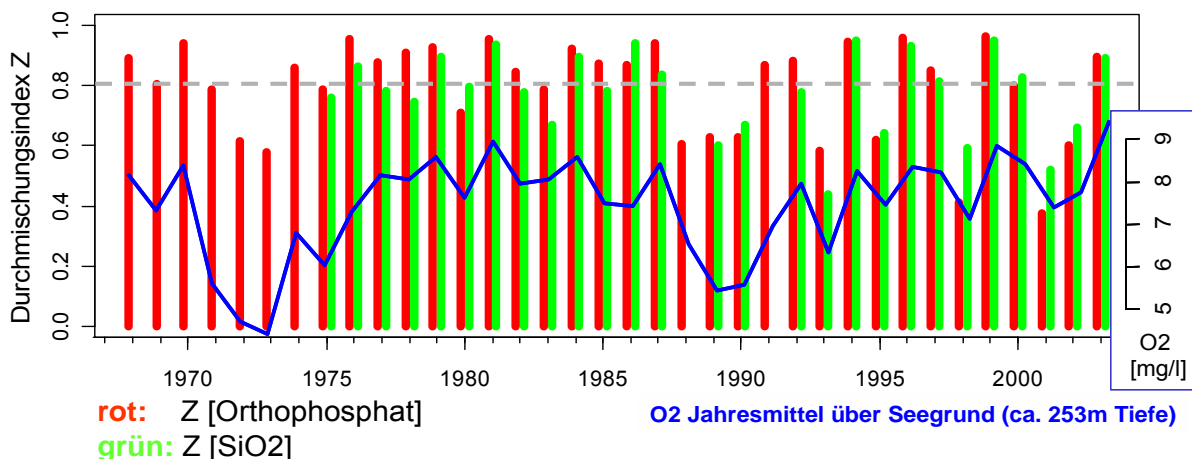


Abb. 9: Zeitreihe der Durchmischungsindex-Werte (rot: aus Orthophosphat-Werten berechnet, grün: aus Silikatwerten berechnet). Hohe Werte ($> \sim 0.8$) deuten auf eine gute Durchmischung, niedrige Werte ($< \sim 0.8$) auf eine schlechte hin. Die Sauerstoff-Jahresmittelwerte, welche etwa 1 m über Seegrund in der Seemitte gemessen wurden, sind als blaue Kurve gegenübergestellt. Die Verifizierung der Sauerstoffdaten lieferte Hinweise darauf, dass die wirklichen Werte im Zeitbereich von 1974 bis 1987 im Mittel etwa 0,8 mg/l niedriger waren, als hier dargestellt, was für die hier durchgeführte Betrachtung jedoch ohne Relevanz ist.

Ab den 1990er Jahren fällt der häufige Wechsel zwischen guter und ausgesprochen schlechter winterlicher Durchmischung auf. Die Sauerstoffwerte im Tiefenwasser reagieren entsprechend, wobei jedoch wegen der verringerten Ablagerung sauerstoffzehrender Biomasse kein kritischer Sauerstoffmangel mehr erreicht wurde.

Dieses vermehrte Auftreten von Jahren mit schlechter winterlicher Durchmischung hängt mit den tendenziell wärmeren Wintern seit etwa Ende der 1980er Jahre zusammen. Damit Wasser aus den oberen Schichten bis in die Tiefe vordringen kann, muss es soweit ausgekühlt werden,

dass dessen Dichte das Absinken ermöglicht. Diese Auskühlung des Seewassers blieb in jüngerer Zeit (vgl. 1988 bis 2003 in Abbildung 9) jedoch öfter unzureichend, so dass der vertikale Durchmischungsprozess schwach war oder die Zeitspanne, in welcher die vertikale Durchmischung ablief, zu kurz ausfiel.

Die Tiefenwassertemperatur erwärmt sich somit öfters über mehrere Jahre hinweg und erreicht dann Temperaturen, welche eine Durchmischung auch bei wärmerem Wasser ermöglichen. Mit einem vollständigen Aussetzen der tief greifenden winterlichen Durchmischung ist daher auch künftig nicht zu rechnen. Ob längere Phasen unzureichender Tiefenwassererneuerung bei den jetzigen Nährstoffverhältnissen noch zu kritischen Sauerstoffwerten führen können, kann mit den durchgeführten Analysen noch nicht beurteilt werden.

Einen Hinweis, der die Vermutung stützt, dass in jüngerer Zeit der winterliche vertikale Wasseraustausch tendenziell früher endet, liefert die Zeitreihe der jährlichen Messtermine, der besten vertikalen Durchmischung, welche für die Bestimmung des Indikators Z ermittelt wurden. Abbildung 10 zeigt diese Zeitreihen, errechnet aus den Messprofilen der bereits zuvor genannten beiden Wasserinhaltsstoffe. Wenngleich die in der Regel 14-tägigen Messintervalle die Bestimmungsgenauigkeit einschränken, so lässt sich doch ein signifikanter Trend zu früheren Zeiten ermitteln. Dieser kann so interpretiert werden, dass die winterliche Durchmischung früher endet, da die Frühjahrsschichtung eher einsetzt. In den untersuchten 36 Jahren kam es zu einer mittleren Verschiebung des Messtermins bester vertikaler Durchmischung von etwa 1 Monat: von ehemals Anfang April auf Anfang März in den jüngeren Jahren.

Ein weiteres Indiz dafür, dass eine eher einsetzende thermische Schichtung die Durchmischung früher beendet, liefern die Parameter Chlorophyll-a und Sauerstoff, welche in den oberen Wasserschichten in engem Zusammenhang mit dem Phytoplanktonwachstum stehen. Beide Parameter weisen in den Monaten März und April trotz abnehmender Nährstoffgehalte des Sees einen signifikant ansteigenden Trend auf (Abbildung 11). Da sich das Phytoplankton erst bei einsetzender Schichtung gut entwickeln kann, unterstützt diese Feststellung die Vermutung einer früher einsetzenden thermischen Schichtung.

Deutlich wird hierbei auch, dass die in den physikalischen Prozessen erkennbaren Auswirkungen klimatischer Veränderungen sich auch auf das Ökosystem auswirken. Es ist anzunehmen dass ein früher einsetzendes Phytoplanktonwachstum in komplexer Weise auf andere Bereiche der Limnologie wirkt, wie etwa auf das Zooplankton oder auch die Fische. Vereinzelt wurden solche Aspekte bereits schon untersucht, wie etwa bei Straille et al. (2003b).

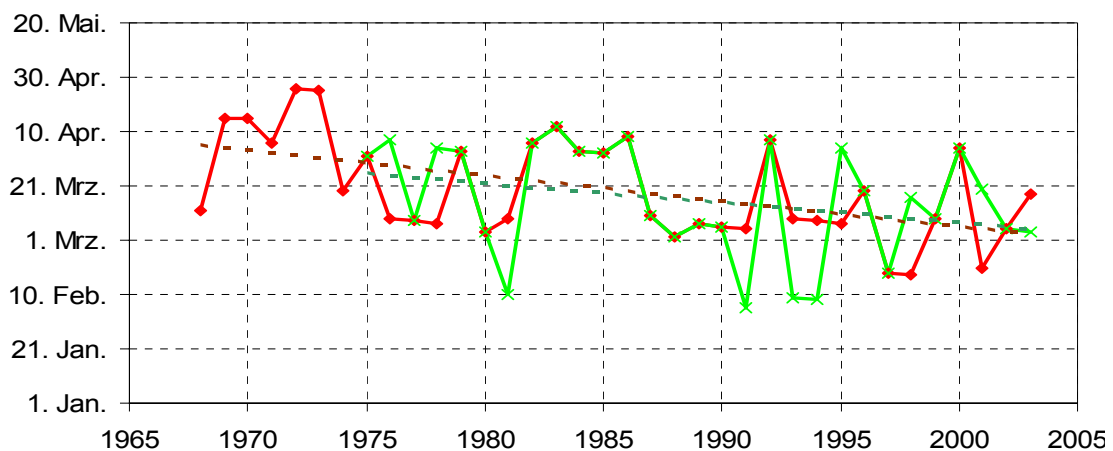


Abb. 10: Zeitreihe der jährlichen Termine mit der besten vertikalen Durchmischung, ermittelt aus den Messprofilen von Orthophosphat (rot) bzw. Silikat (grün). Für beide Kurven sind lineare Trendgeraden eingezeichnet, welche die Tendenz zu früheren Zeiten aufzeigen.

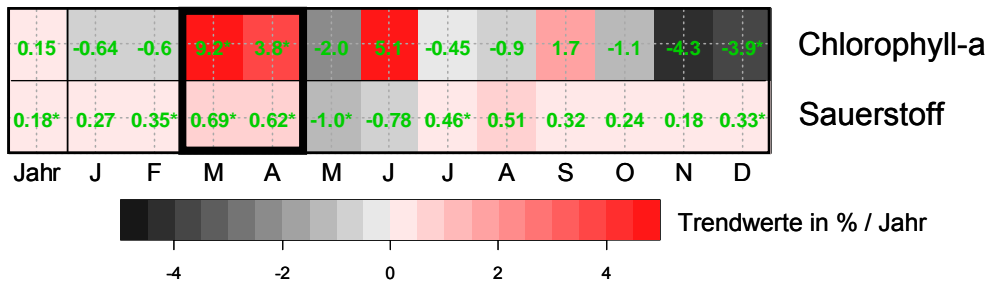


Abb. 11: Relative Trendwerte für die Monats- und Jahresmittel von Chlorophyll-a (0 - 20 m Tiefe) und Sauerstoff (0,5 m Tiefe) bei der Seemitte-Station im Zeitraum: 1985-2002. Werte, die mit * markiert sind, sind mit $p < 0.1$ signifikant (Test nach Mann-Kendall). Die Sauerstoffwerte bis Februar 1987 mussten um -0.8 mg/l korrigiert werden, wie die Verifikation dieser Daten zeigte.

4. Der Wasserhaushalt des Bodensees

Der Wasserhaushalt des Bodensees und somit auch der Wasserstand wird im Wesentlichen durch die Zu- und Abflussmengen bestimmt. Einen demgegenüber geringen Beitrag liefern die Niederschläge auf die Seefläche, die Verdunstung aus dem See wie auch die Wasserentnahme zur Trinkwassernutzung. Durch die Saisonalität der Zuflussmengen (vgl. Abbildung 3), insbesondere die des Alpenrheins, erfährt der Wasserstand des Bodensees einen ausgeprägten Jahresgang, welcher im Mittel seit 1960 einen Bereich von $1,4 \text{ m}$ und in den Extremen sogar $3,3 \text{ m}$ überstreicht (Abbildung 12).

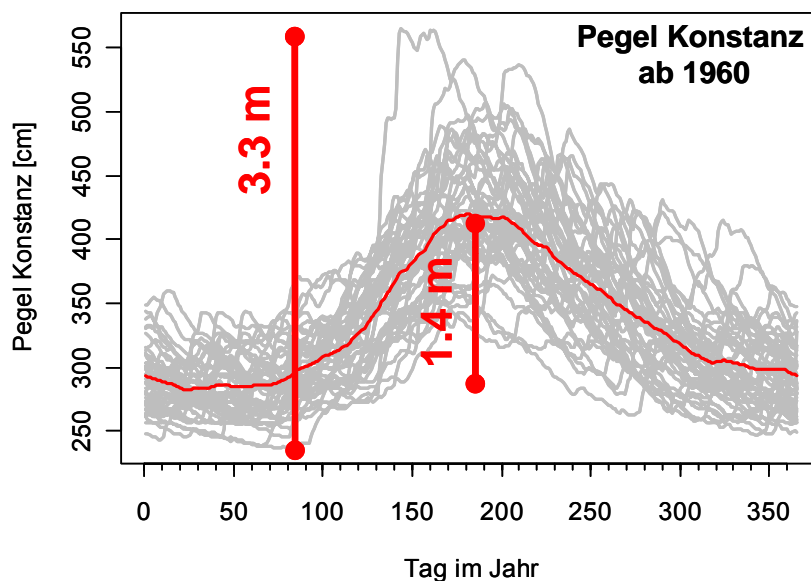


Abb. 12: Jahresverläufe der Bodensee-Pegelwerte bei Konstanz ab 1960 bis 2003

Auch aus der Darstellung der Jahresmittelwert-Zeitreihe der Pegel von Konstanz (Abbildung 13), welche im extremen Hochwasserjahr von 1817 beginnt, wird ersichtlich, dass die Werte von Jahr zu Jahr erheblichen Schwankungen unterliegen, welche sich in der Standardabweichung von etwa 20 cm ausdrückt. Um langjährige Veränderungen erkennbar zu machen wurde in Abbildung 13 das gleitende Mittel mit einem Zeitfenster von ± 11 Jahren, also insgesamt 23 Jahren, eingezeichnet. Die Schwankungen der Kurve zeigen verschiedene Phasen tendenziell erhöhter oder erniedrigter Wasserstände auf. Am deutlichsten ist die Veränderung, welche um 1940 eintrat und zu einem seither stets unterdurchschnittlichen mittleren Jahrespegel führte.

Dies wurde bereits bei Luft (1997) identifiziert und auf Veränderungen im Abflussregime zurückgeführt. Die Ursachen hierfür sind jedoch nicht hinreichend bekannt. Ausbaggerungen oder Erosion sind mögliche Erklärungen.

Relevante Eingriffe durch den Menschen gab es auch schon in früheren Zeiten. Eine Holzbrücke, welche seit dem Mittelalter den Seerhein auf Pfählen überspannte und auf welcher zudem Mühlen betrieben wurden, stellte sicherlich einen nicht zu vernachlässigenden Strömungswiderstand dar. Diese Brücke brannte 1856 ab. Möglicherweise hängt der kurzzeitige leichte Rückgang im Pegelverlauf in den Jahren danach hiermit zusammen.

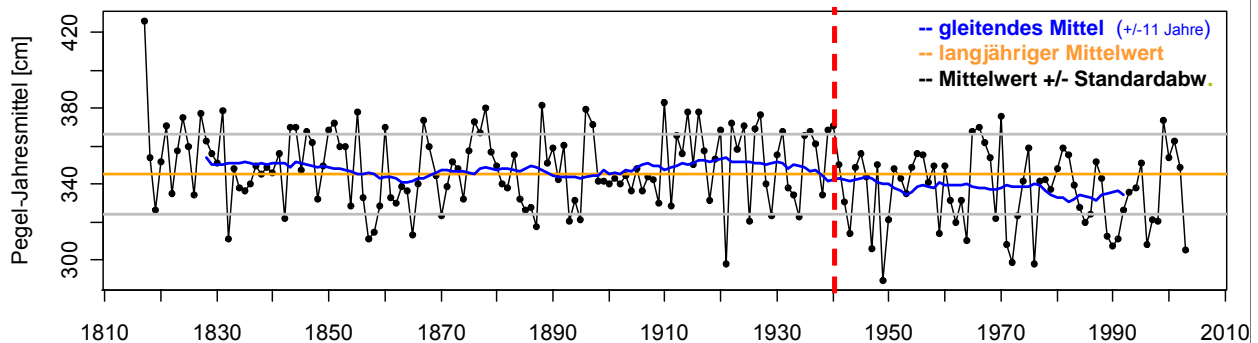


Abb. 13: Langjähriger Verlauf der mittleren jährlichen Pegelwerte bei Konstanz. Ab etwa 1940 (vertikale rote Linie) bleibt das gleitende Mittel stets unter dem langjährigen Mittelwert.

Für den Zeitraum nach 1940 findet man einen leicht abfallenden, jedoch auf Grund der hohen Variabilität nicht signifikanten Trend von 0.05 cm/Jahr. Möglicherweise deutet diese Tendenz auf erosive Prozesse im Ausstrombereich des Bodensees hin. Einen ähnlichen Hinweis liefert der Vergleich von Messdaten der Pegelstationen Konstanz und Konstanz/Seerhein im Zeitbereich ab 1985.

Indizien für klimabedingte Veränderungen wurden bei der Untersuchung des mittleren jährlichen Pegelverlauf nicht gefunden, jedoch bei der Analyse der Jahresverläufe (Abbildung 14): Im Zeitbereich ab 1990, also etwa jenem Zeitbereich welcher sich durch signifikant höhere Luft- und Wassertemperaturwerte auszeichnet, bemerkt man im Mittel eine deutliche Verringerung der Pegelwerte von etwa Juli bis Mitte September. Dahingegen sind die Werte von November bis Mitte Januar erhöht.

Ein Zusammenhang mit den Abflussmengen der Zuflüsse (Abbildung 14) lässt sich aufzeigen, auch wenn dieser nur für die Monate August, November und Dezember deutlich erscheint. Bei diesem Vergleich ist jedoch zu beachten, dass da die Retentionskapazität des Bodensees das Abflusssignal verformt.

In Abbildung 15 sind die mittleren Jahresgänge der Niederschläge dreier bodenseenaher Messstationen zusammengefasst dargestellt, um eine erste Gegenüberstellung mit dem saisonalen Wasserstands- bzw. Zuflussmengenverlauf zu ermöglichen. Dieser Vergleich ist jedoch dahingehend eingeschränkt, dass die gewählten Messstationen für das Bodenseeeinzugsgebiet möglicherweise nicht hinreichend repräsentativ sind. Eine flächendeckende Analyse konnte im Rahmen des Projektes nicht durchgeführt werden, u.a. da die Daten hierfür nicht vorlagen. Die angestiegenen Spätherbst- und Winter-Wasserstände könnten durch erhöhte November-Niederschläge mit verursacht sein. Für den Pegelabfall im Sommer scheinen die Niederschlagsmengen dahingegen nicht verantwortlich zu sein.

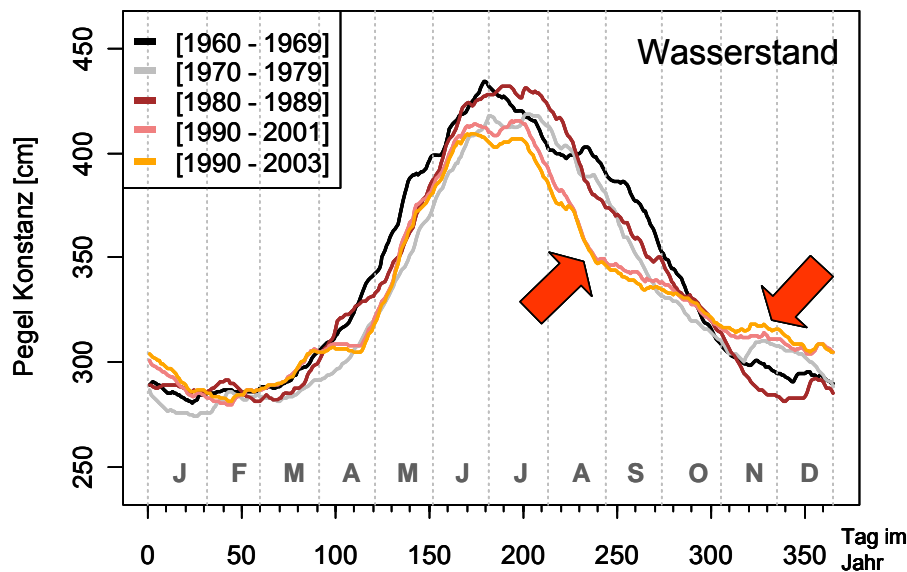


Abb. 14: Mittlere Jahrgänge des Bodenseepiegels für verschiedene Zeiträume. Die roten Pfeile markieren auffällige Veränderungen im jüngsten Zeitintervall gegenüber den vorigen. Die Kurve für den Zeitraum 1990 bis 2001 wurde zur besseren Vergleichbarkeit mit den nachfolgenden Graphiken (Abbildung 15) eingezeichnet, für welche die Daten z.T. nur bis 2001 vorlagen.

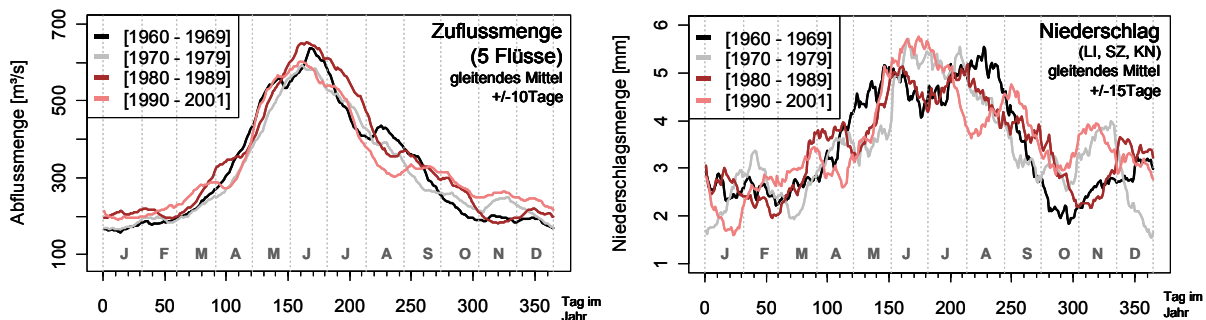


Abb. 15: Mittlere Jahrgänge der Zuflussmenge der 5 Hauptzuflüsse (links) und des über 3 Messtationen (Lindau, Sigmarszell-Zeisertsweiler, Konstanz) gemittelten Niederschlags (rechts) für verschiedene Zeiträume. Die Zuflussmengen konnten bis 2001, die Niederschlagsmengen bis 2002 ausgewertet werden.

In der Tat lässt sich der sommerliche Pegelabfall auch anders erklären: Eine Folge der insgesamt wärmeren Wintern kann eine verringerte winterliche Schneeretention in den Alpen sein (vgl. KLIWA Heft 6), woraus auch höhere Abflusswerte im Spätherbst und Winter hervorgehen können. Als Folge geringerer Wasserspeicherung in Form von Schnee lässt der Schmelzwasserbeitrag zu den sommerlichen Abflussmengen früher nach, woraus erniedrigte Pegelwerte resultieren. Ebenfalls in diese Richtung wirken ein früheres Abschmelzen des Schnees im Frühjahr, sowie eine erhöhte Verdunstung im Frühjahr und Sommer.

In wie fern und mit welchem quantitativen Beitrag die verschiedenen hier diskutierten Faktoren zu den beobachteten Änderungen im mittleren Jahrgang der Wasserstände geführt haben, konnte im Rahmen des durchgeführten Projekts nicht analysiert werden. Für die Beantwortung dieser Fragen wie auch für die Analyse, welche weiteren Änderungen künftig mit dem sich abzeichnenden Klimawandel wahrscheinlich erscheinen, empfiehlt es sich ein Wasserhaushalts-

modell anzuwenden. Da ein solches Modell für das Einzugsgebiet des Bodensees bereits existiert, ist dies mit vergleichsweise geringem Aufwand möglich.

Nachteilige Folgen verringerter sommerlicher Pegelwerte könnten sich für Flora und Fauna in den seeangrenzenden Feuchtgebieten ergeben, wenn diese hierdurch vermehrt trocken fallen. Hierbei handelt es sich häufig um Naturschutzgebiete, so dass diese hydrologische Entwicklung möglicherweise Schutzziele für bedrohte Tier- und Pflanzenarten gefährdet. Auch für Pflanzen und Tiere im Uferbereich ändern sich die Lebensbedingungen, wobei hier jedoch eine Anpassung der Organismen leichter möglich erscheint. Auch die durch Wellen und Strömungskräfte angetriebenen Erosions- und Sedimentationsprozesse werden bei veränderten Wasserständen zu Umlagerungen führen, was beispielsweise für die archäologischen Relikte frühzeitlicher Pfahlbauten von Bedeutung sein kann.

5. Zusammenfassung

Ein umfangreicher Bestand an langjährigen Messreihen bildete die Grundlage für ein breites Spektrum an Untersuchungen zu Veränderungen des Bodensees und deren möglichen Ursachen. Bei der Analyse der Zeitreihen auf Signale klimatischer Veränderungen ist eine Vielzahl anderer Entwicklungen am Bodensee zu berücksichtigen, welche Einfluss auf die gemessenen Parameter hatten.

Folgen klimatischer Veränderungen sind im Bodensee erkennbar. Der beobachtete ansteigende Trend bei den Lufttemperaturen wirkt mit abnehmender Stärke bis in die tiefsten Wasserschichten des Sees. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die daraus resultierenden Folgen für die hydrodynamischen Prozesse im See, welche eng mit vielen hydrochemischen und biologischen Mechanismen gekoppelt sind. Die für die Tiefenwassererneuerung wichtige winterliche vertikale Durchmischung ist seit etwa den 1990iger Jahren vermehrt unzureichend. Eine Gefährdung, etwa durch einen Sauerstoffmangel im Tiefenwasser, ergab sich jedoch auf Grund der geringeren Nährstoffbelastung bislang noch nicht. Die im März oder April einsetzende thermische Schichtung setzt zunehmend früher ein. Hierdurch beginnt auch das Phytoplanktonwachstum eher. Im komplexen Netz des Ökosystems ist mit Wirkungen auf andere Bereiche zu rechnen, wie etwa das Zooplankton oder die Fische.

Veränderungen im Wasserhaushalt des Bodensees spiegeln sich im mittleren jährlichen Wasserstandsverlauf wieder. Die beobachteten niedrigeren sommerliche Pegelwerte und erhöhte Wasserstände von November bis Januar lassen sich aus Überlegungen zu den bislang beobachteten Klimaentwicklungen ableiten. Eine verbesserte und quantitative Analyse mit Hilfe eines Wasserhaushaltsmodells sollte jedoch hierzu noch durchgeführt werden. Auf der Basis von Szenariobetrachtungen könnten damit auch mögliche künftige Entwicklungen abgeschätzt werden.

Zur Verbesserung des Verständnisses der hydrophysikalischen Vorgänge, welche für viele Fragestellungen der Limnologie, der Gewässerbewirtschaftung und des Gewässerschutzes von Bedeutung sind, wurde im September 2006 ein KLIWA-Teilprojekt begonnen, in welchem die hydrodynamischen Prozesse mittels numerischer Modelle untersucht werden. Kombiniert mit Klimaszenarien, wie sie u.a. bereits in KLIWA entwickelt wurden oder momentan werden, können mit solchen Modellen Aussagen über mögliche künftige Folgen der klimatischen Entwicklung auf den Bodensee, dessen Ökosystem und der Wasserqualität abgeleitet werden.

6. Dank

Das KLIWA-Teilprojekt A 2.2.1 wurde finanziert vom Land Baden-Württemberg. Neben den am Institut für Seenforschung und anderen Abteilungen der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz des Land Baden-Württemberg (LUBW) vorliegenden Datenbeständen wurden dem Projekt durch zahlreiche weitere Institutionen Daten zum Bodensee, den Zuflüssen und zur



Meteorologie zur Verfügung gestellt: Der Deutsche Wetterdienst, das Land Vorarlberg, das Schweizer Bundesamt für Wasser und Geologie, die Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), das Limnologische Institut der Universität Konstanz, die Internationale Bevollmächtigtenkonferenz für die Bodenseefischerei (IBKF) und die Fischereiforschungsstelle in Langenargen.

7. Literatur

- Eurolakes (2003): Renewal of constituents study. Autoren: U. Lemmin, H. Baumert, K. Duwe, E. Hollan, B. Wahl; Beitrag zum EU-Projekt Eurolakes, workpackage 6, report D27; Bericht verfügbar unter www.eurolakes.org
- Güde, H., H. Roßknecht und G. Wagner (1998) Anthropogenic impacts on the trophic state of Lake Constance during the 20th century. *Archiv für Hydrobiologie Special Issues Advances in Limnology*, 53: 85-108.
- Hollan, E. (2000): Mögliche Auswirkungen einer Klimaveränderung auf größere Binnenseen. *KLIWA-Berichte*, Heft Nr. 1: 213-235, Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt f. Wasserwirtschaft, Deutscher Wetterdienst (Editor)
- IGKB (2004): Der Bodensee, Zustand – Fakten – Perspektiven, Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB), 1. Auflage
- IGKB (2005): Seedaten zum Bodensee veröffentlicht unter www.igkb.de
- KLIWA Heft 5: Langzeitverhalten der Lufttemperatur in Baden-Württemberg und Bayern, *KLIWA-Berichte Heft 5*, verfügbar unter www.kliwa.de
- KLIWA Heft 6: Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, *KLIWA-Berichte Heft 6*, verfügbar unter www.kliwa.de
- Livingston, D.M. (1997): An example of the simultaneous occurrence of climate-driven "sawtooth" deep-water warming/cooling episodes in several Swiss lakes, *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 26: 822-828
- Luft, G., G. van den Eertwegh, H. Vieser (1990): Veränderung der Bodensee-Wasserstände von 1887 bis 1987. In: *Handbuch Hydrologie Baden-Württemberg Teil 6.2 der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg*
- Roßknecht, H (2003): Der Alpenrhein im Bodensee, Institut für Seenforschung der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU, seit 2006: LUBW), 1. Auflage
- Straile, D., K. Jöhnk, H. Roßknecht (2003a): Complex effects of winter warming on the physico-chemical characteristics of a deep lake. *Limnol. Oceanogr.*, 48(4): 1432–1438
- Straile, D., D.M. Livingstone, A.G. Weyhenmeyer, D.G. George (2003b): The Response of Freshwater Ecosystems to Climate Variability Associated with the North Atlantic Oscillation. *The North Atlantic Oscillation: Climatic Significance and Environmental Impact*, Geophysical Monograph 134

Das EU-Projekt RIVERTWIN - Neckar: Ein Beitrag zum integrierten Flussgebietsmanagement

Thomas Gaiser¹, Andreas Printz², Hans-Georg Schwarz-von-Raumer², Matthias Schneider⁴,
Frank-Michael Lange⁵, Jens Götzinger³, Roland Barthel³, Martin Henseler⁶,
Andras Bárdossy³, Giselher Kaule² und Karl Stahr⁴

¹ Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Stuttgart, ² Universität Stuttgart, Institut für Landschaftsplanung und Ökologie, Stuttgart, ³ Universität Stuttgart, Institut für Wasserbau, Stuttgart, ⁴ Schneider und Jorde Ecological Engineering GmbH, Stuttgart, ⁵ terra fusca – Ingenieurbüro und Consulting, Stuttgart, ⁶ Universität Hohenheim, Institut für Landwirtschaftliche Betriebslehre, Stuttgart

1. Einleitung

Unsere lebensnotwendigen Wasserressourcen werden sowohl hier in Deutschland als auch in anderen Teilen der Erde durch eine ständig steigende Nachfrage nach qualitativ hochwertigem Wasser sowie durch die Folgen des globalen Klimawandels gefährdet. Im extremen Trockenjahr 2003 erreichten die Pegelstände einiger Flüsse - selbst im humiden Zentraleuropa - Tiefststände, die den Betrieb thermischer Kraftwerke, den Schiffsverkehr und die Flussökosysteme beeinträchtigten. Andererseits häufen sich in den letzten Jahren Überflutungen nach Starkregenfällen nicht nur in Europa sondern auch in anderen Erdteilen. Weltweit gesehen ist in den nächsten Jahrzehnten mit einer Verknappung des nutzbaren Wassers durch folgende Trends zu rechnen:

- Zunehmende Bevölkerung mit steigendem Lebensstandard
- Anstieg des Anteils an Bewässerungslandwirtschaft
- Zunehmende Verschmutzung der Gewässer
- Globaler Klimawandel

Um dieser Entwicklung zu begegnen, erließ die Europäische Kommission bereits im Jahre 2000 die Europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL), die momentan in allen EU Mitgliedsstaaten umgesetzt wird. Weiterhin initiierte die EU im Jahre 2002 auf dem Weltgipfel für nachhaltige Entwicklung die "EU Global Water Initiative" mit dem Vorschlag, die Prinzipien der WRRL auch auf anderen Kontinenten anzuwenden (Europäische Gemeinschaft, 2004). Die Ziele der Globalen Wasserinitiative orientieren sich an den Millennium-Zielen der UN: (1) die Zahl der Menschen mit keinem Zugang zu sauberem Trinkwasser bis zum Jahr 2015 halbieren und die Abwasserentsorgung verbessern (2) ein Gleichgewicht zwischen den menschlichen Bedürfnissen und der Umwelt sicherstellen (3) integriertes Wasserressourcen-Management und Bewirtschaftungspläne für Flusseinzugsgebiete entwickeln. Ein zentrales Merkmal der globalen Wasserinitiative wie auch der WRRL ist die Betrachtung von Flusseinzugsgebieten als Basiseinheit für die Planung und Bewirtschaftung der Wasserressourcen.

Das Forschungsprojekt "RIVERTWIN" soll durch die Entwicklung eines integrierten Modells für die strategische Planung der Gewässerbewirtschaftung auf Einzugsgebietsebene sowohl die Ziele der globalen Wasserinitiative der EU unterstützen als auch zur wissenschaftlich untermauerten Umsetzung der WRRL in Baden-Württemberg beitragen. Das Modell für nachhaltiges Wasserressourcen-Management MOSDEW (MOdel for Sustainable DEvelopment of Water resources, Müller et al. 2005) soll den Entscheidungsträgern helfen, den Einfluss von ökonomischen und technologischen Entwicklungen sowie die Auswirkungen von Landnutzungsänderungen und des globalen Klimawandels auf die langfristige Verfügbarkeit und die Qualität der Gewässer abzuschätzen. Das Modell basiert auf einem geografischen Informationssystem, das sowohl ökologische (Wasserverfügbarkeit, Wasserqualität) als auch ökonomische Aspekte (Wasserbedarf, Wasserentnahmen) des Wassermanagements integriert.



Als Untersuchungsregionen wurden drei Einzugsgebiete in der Größe von 10.000 bis 50.000 km² mit stark unterschiedlichen Rahmenbedingungen ausgewählt. Gemeinsam mit den potenziellen Nutzern in Baden-Württemberg wurde das Regionalmodell MOSDEW zunächst im Neckareinzugsgebiet entwickelt und angewandt. Momentan erfolgt die Übertragung der Modelle auf die Flusseinzugsgebiete des Ouémé (Benin) und des Chirchik (Usbekistan) (Abbildung 1). Im Neckareinzugsgebiet sollen die Projektergebnisse die Formulierung von Handlungsempfehlungen für den von der WRRL geforderten Bewirtschaftungsplan unterstützen.

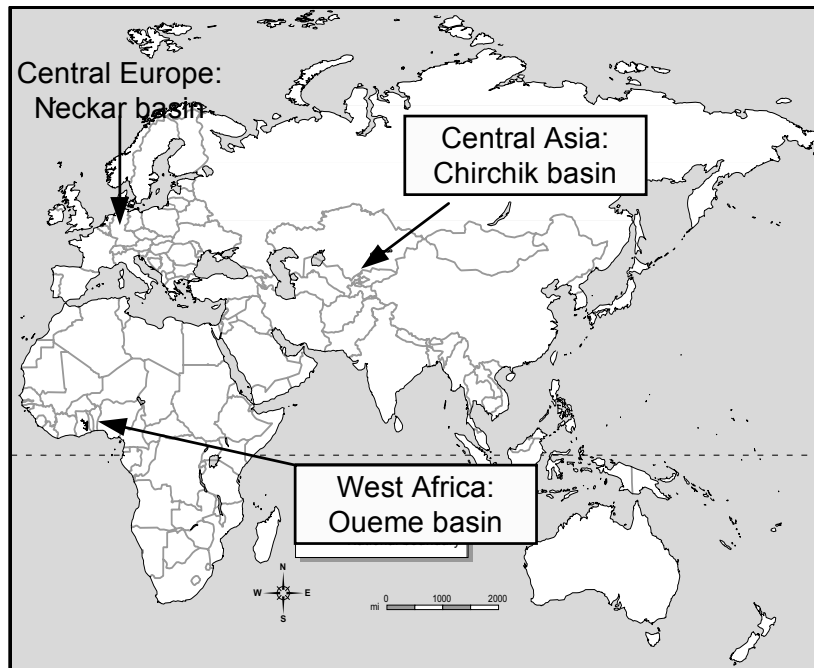


Abb. 1: RIVERTWIN Projektgebiete

2. Ziele des Forschungsprojekts RIVERTWIN im Neckareinzugsgebiet

Mit In-Kraft-Treten der EU-Wasserrahmenrichtlinie (RL 2000/60/ EG) am 22.12.2000 und deren Umsetzung in nationales Recht sind die Anforderungen an die Gewässerbewirtschaftung deutlich anspruchsvoller geworden. Die große Herausforderung für die wasserwirtschaftlichen Akteure ergibt sich neben den zeitlichen Vorgaben in der Betrachtung von Flusseinzugsgebieten in ihren natürlichen Grenzen als Planungsraum.

Das Neckareinzugsgebiet erstreckt sich über eine Fläche von mehr als 13.000 km² und beinhaltet neben größeren Gebieten mit intensiver landwirtschaftlicher Nutzung einen der am dichtesten besiedelten industriellen Ballungsräume in Deutschland. Daraus ergeben sich unterschiedliche Nutzungskonflikte bzw. Gefährdungspotenziale für die Gewässer. Das Projekt RIVERTWIN liefert einen wesentlichen Beitrag für die Definition von Basisszenarien (Baseline-Szenarios) für das Einzugsgebiet, auf deren Grundlage dann durch die Flussgebietsbehörde Maßnahmen zur Umsetzung der EU Wasserrahmenrichtlinie auf regionaler und lokaler Ebene identifiziert werden können.

2.1 Szenarienentwicklung

Ein wesentliches Werkzeug für die Abschätzung von Maßnahmeneffekten sind Szenarien. Szenarien dürfen nicht verwechselt werden mit Wunschvorstellungen oder Vorhersagen. Mit Hilfe von Szenarien sollen zukünftige Entwicklungen sowie mögliche Interventionen in ihren komplexen Auswirkungen besser abgeschätzt werden. Sie sollen den zuständigen Behörden und Ent-

scheidungsträgern ein Planungsinstrument zur Verfügung stellen, das ökonomische und ökologische Belange des Wassermanagements integriert und gemeinsam mit öffentlichen und privaten Entscheidungsträgern mögliche Entwicklungsszenarien für das Wassermanagement unter Berücksichtigung von ökonomischem Wachstum, Landnutzungsänderungen und Klimawandel entwickelt (Abbildung 2).

Im Neckareinzugsgebiet wurden vier Ebenen für die Szenarienbildung definiert:

1. Annahmen zur Klimaentwicklung
2. Annahmen zu den soziokulturellen und ökonomischen Entwicklungen
3. Interventionen
4. Intensität der Interventionen

Die verwendeten Klimasequenzen wurden von den Klimaszenarien A2 und B2 des Globalen Zirkulationsmodells ECHAM4 (MPI, Hamburg) abgeleitet (Tabelle 1). Den Szenarienzläufen liegen zwei unterschiedliche Regionalisierungsansätze mit höherer räumlicher Auflösung zugrunde: Zum Einen wurde von der LUBW, eine trockene und eine feuchte Realisation der „Enke-Szenarien“ (MeteoResearch, Berlin) zur Verfügung gestellt. Zum Anderen wurde ein Regionalisierungsansatz der am Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart entwickelt wurde, jeweils für A2 und B2 angewendet (Bardossy und Yang 2005).

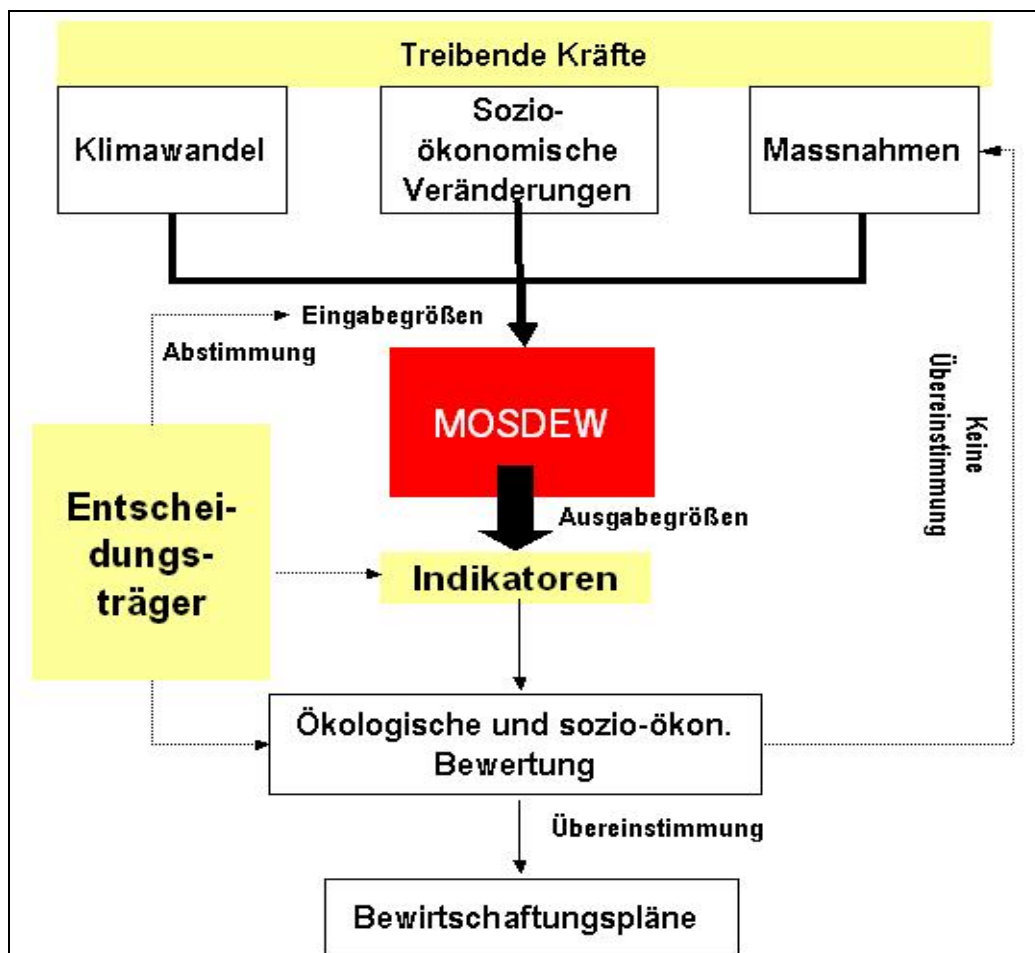


Abb. 2: Vorgehensweise zur Abschätzung der Auswirkungen von sich ändernden Rahmenbedingungen auf die ökologischen und ökonomischen Indikatoren der Gewässerbewirtschaftung



Tab. 1: Veränderungen der Klimabedingungen im Neckareinzugsgebiet in Abhängigkeit vom Klimaszenario im Vergleich zum Mittel des Zeitraums 1987-2003 [A2 und B2: unterschiedliche Läufe des Globalen Zirkulationsmodells ECHAM4, MPI Hamburg und regionalisiert durch Bardossy und Yang (2005). ENKE_Trocken und Enke_Feucht: zwei Varianten der Klimaszenarien der Firma MeteoResearch, Berlin]

	Niederschlag [%]			Temperatur [°C]		
	Jahresmittel	Sommer	Winter	Jahresmittel	Sommer	Winter
A2	+12.57	+2.37	+27.37	+3.50	+3.17	+3.89
B2	+22.19	+7.66	+43.63	+3.30	+3.02	+3.61
Enke_Trocken	+8.24	-3.58	+26.52	+2.40	+2.28	+2.45
Enke_Feucht	+13.59	+0.03	+33.46	+2.30	+2.26	+2.33

In Bezug auf mögliche zukünftige sozioökonomische Rahmenbedingungen wurden zwei unterschiedliche Hauptentwicklungsrichtungen vorgeschlagen (Abbildung 3):

- A. Eine wachstumsorientierte Entwicklung im Zeichen fortschreitender Globalisierung („Referenzszenario A“)
- B. Eine vorwiegend endogen gesteuerte, ökologisch orientierte Entwicklung mit einem moderaten Wirtschaftswachstum („Referenzszenario B“).

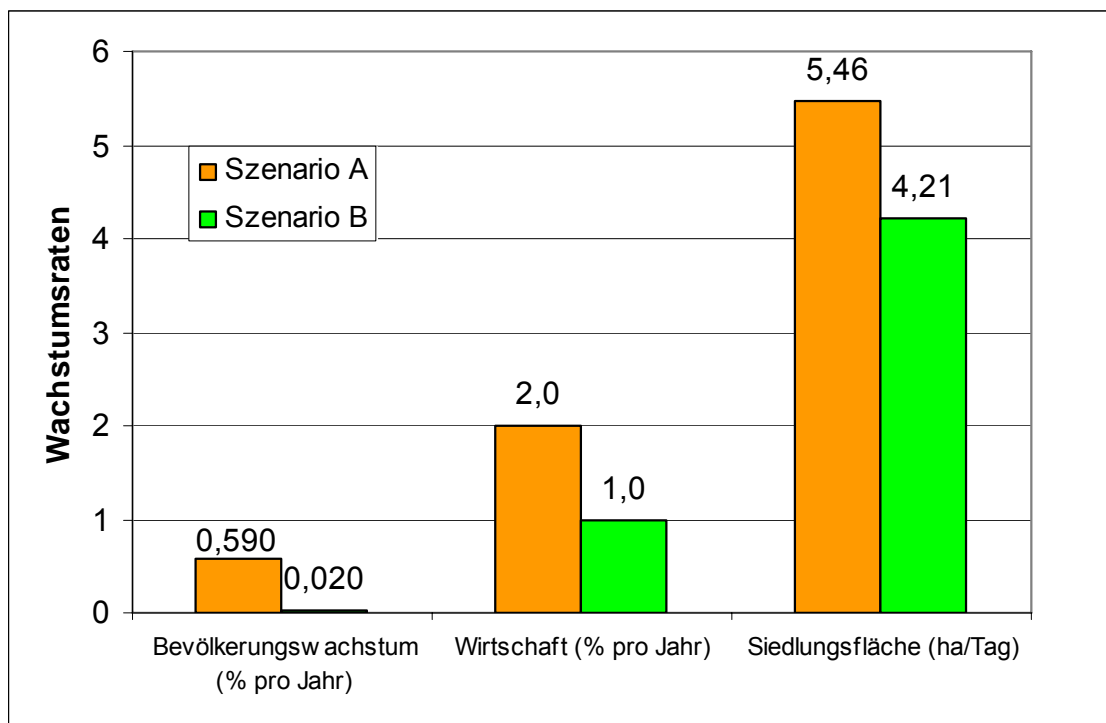


Abb. 3: Wachstumsraten ausgewählter treibender Kräfte in den sozioökonomischen Szenarien A und B

Diese Annahmen zur Klimaentwicklung und zu den sozioökonomischen Randbedingungen gehen als Eingabegrößen in das integrierte Regionalmodell MOSDEW ein, das dann die Auswirkungen auf ausgewählte Indikatoren des Gewässerzustandes und der Landwirtschaft quantifiziert.

2.2 Das Regionalmodell MOSDEW

MOSDEW besteht aus einer Kette von Teilmodellen, die verschiedene Aspekte der Wasser- und Landnutzung abdecken (Abbildung 4). Jedes Modell wird von einem auf die Anwendung dieses Modells spezialisierten Projektpartner kalibriert und betreut. Damit ist eine fachlich optimale Anwendung der Teilmodelle gewährleistet. Das Konsortium setzt sich neben den deutschen Universitäten Hohenheim und Stuttgart sowie deren Ausgründungen Terra Fusca Consulting und Schneider & Jorde Ecological Engineering GmbH aus drei weiteren Partnern aus Schweden (Stockholm Environment Institute), den Niederlanden (Center for World Food Studies) und Griechenland (Aristoteles Universität) zusammen (Tabelle 2).

Die Abfolge der Einzelmodelle ist durch Schnittstellen definiert, welche die Datenübergabe zwischen den Modellen eindeutig regeln.

Tab. 2: Zuständigkeiten für die Anwendung der Teilmodelle

Partner	Teilmodell	Inhaltliche Einordnung
Universität Stuttgart	MOSDEW	Integration der Einzelmodelle
Universität Stuttgart	LARSIM / HBV/ MODFLOW	Hydrologie (Oberflächen- und Grundwässer)
Universität Hohenheim	ACRE	Ökonomie der landwirtschaftlichen Nutzung
Universität Hohenheim	SLISYS	Regionalisierung der der pflanzlichen Agrarproduktion sowie der diffusen Austräge an N und P
Terra Fusca Consulting	EPIC	Simulation der Erträge der Kulturpflanzen und der diffusen Austräge (N/P) auf Feld-ebene
Schneider & Jorde GmbH	CASIMIR	Gewässereignung als Fischhabitats (biologische Gewässerqualität)
Aristoteles Universität	MONERIS / QUAL2K	Chemische und physikalische Wasserqualität
Stockholm Environment Institute	WEAP	Wasserbedarf und -entsorgung

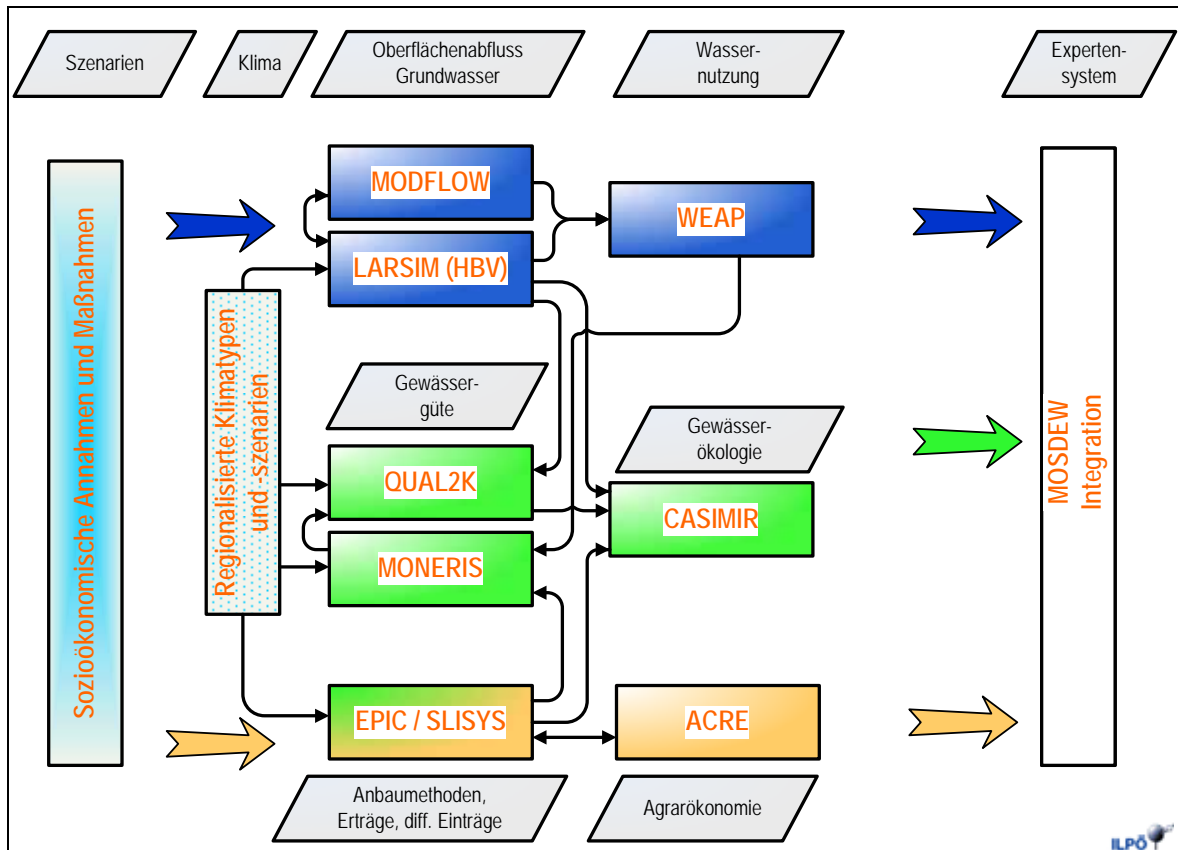


Abb. 4: Abfolge der Teilmodelle im integrierten Modell MOSDEW

3. Ausgewählte Projektergebnisse

3.1 Landnutzungsänderungen

In beiden sozioökonomischen Szenarien A und B wird davon ausgegangen, dass die Reform der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) wie geplant im Neckareinzugsgebiet umgesetzt wird. Das heißt die Veränderungen der landwirtschaftlichen Flächennutzungen sind ähnlich. Lediglich der Flächenverbrauch durch Siedlungswachstum ist im Szenario B etwas geringer als im Szenario A (Abbildung 3). Das Agrarsektormodell ACRE berechnet die voraussichtlichen Verschiebungen der landwirtschaftlichen Flächennutzung durch die geänderten agrarpolitischen Rahmenbedingungen (Abbildung 5). Die in Abbildung 5 gezeigte Reduzierung der Dauerkulturen wird allerdings nur durch die Ausdehnung der Siedlungsflächen verursacht. Die Umsetzung der GAP-Reform lässt neben kleineren regionalen Verschiebungen in der Getreideproduktion eine generelle Veränderung bei der Ausdehnung von Stilllegungsflächen sowie eine Verschiebung im Feldfutterbau vom Silomais zu Klee-grasgemischen erwarten (Henseler et al. 2006). Diese Veränderungen wirken sich in Verbindung mit der zunehmenden Versiegelung in beiden Szenarien positiv auf die Auswaschung an Nitrat aus, d.h. die Gesamtauswaschung wird um ca. 9 % reduziert (Abbildung 6). Die etwas höhere Flächenversiegelung im Szenario A im Vergleich zu Szenario B hat keine weiteren Konsequenzen für die Nitratauswaschung.

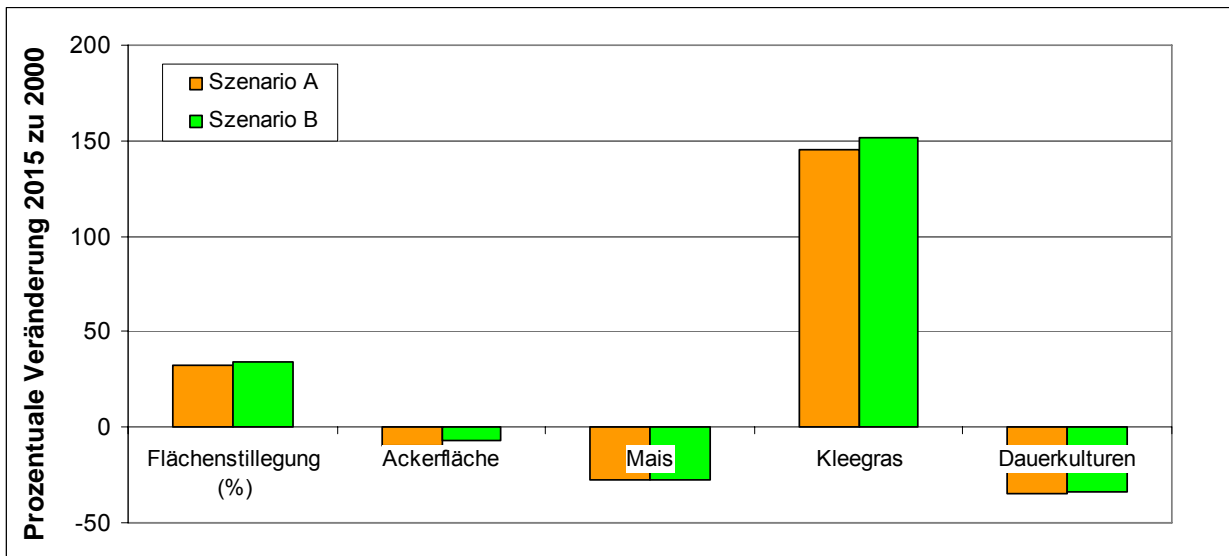


Abb. 5: Veränderung der Flächenausdehnung ausgewählter landwirtschaftlicher Nutzungen in den sozioökonomischen Szenarien A und B im Jahre 2015 nach Umsetzung der GAP-Reform

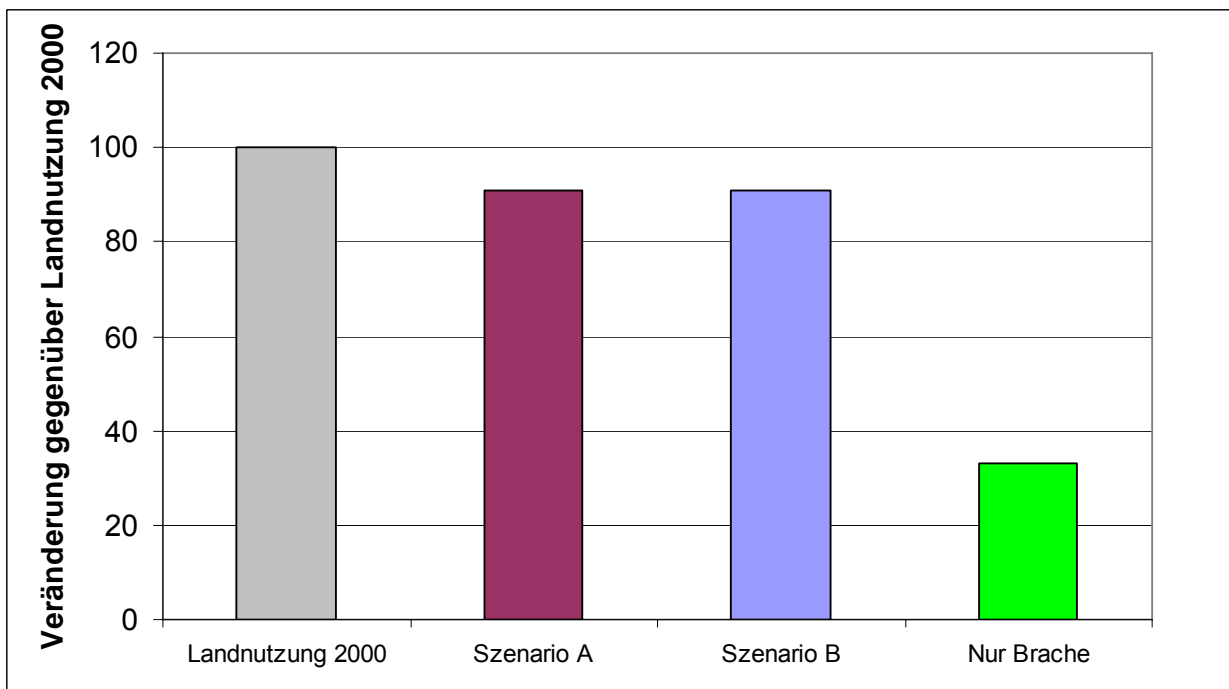


Abb. 6: Durch die Modellkomponente SLISYS berechnete Veränderung der mittleren jährlichen N Auswaschung durch unterschiedliche Landnutzungsszenarien aufgrund der GAP-Reform und bei vollständiger Umwandlung des Ackerlands in Grünbrache

Um das Reduktionspotential von Landnutzungsänderungen abzuschätzen, wurden die Simulationläufe mit der Modellkomponente SLISYS unter der Annahme wiederholt, dass die gesamte Ackerfläche im Neckareinzugsgebiet in eine begrünte Dauerbrache umgewandelt würde. Die Nitratauswaschung würde dann im Vergleich zur Landnutzung im Jahre 2000 im Mittel um 67 % abnehmen (Abbildung 6).



Die GAP-Reform hat also aus ökologischer Sicht positive Effekte, beispielsweise durch eine Reduktion der Nitratfrachten. Betrachtet man jedoch die Veränderung der Gesamtdeckungsbeiträge im landwirtschaftlichen Sektor, stellt man in einzelnen Landkreisen deutliche Verluste von bis zu 40 % fest (Abbildung 7). Andererseits gibt es aber vor allem in den grünlandbetonten Gebieten im südlichen Teil des Neckareinzugsgebiets Landkreise, in denen sich der Gesamtdeckungsbeitrag gegenüber dem Jahr 2000 um mehr als 15 % erhöhen wird.

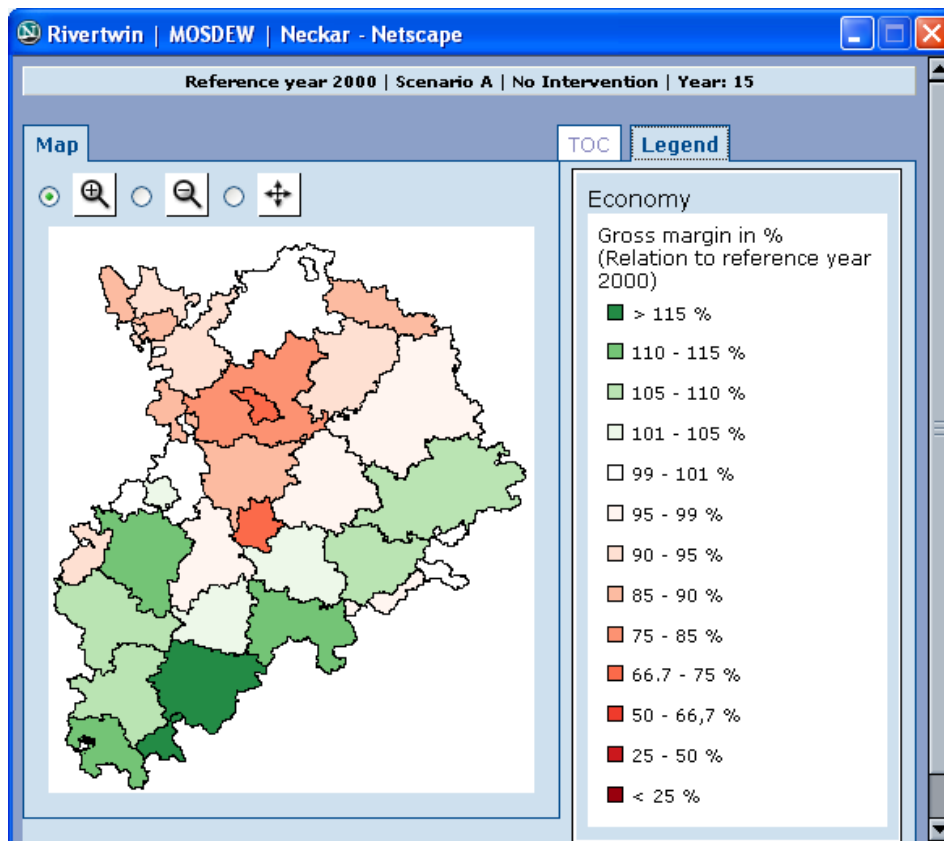


Abb. 7: Prozentuale Veränderung der Gesamtdeckungsbeiträge der landwirtschaftlichen Produktion im GAP-Reform Szenario im Vergleich zur Referenzsituation (Jahr 2000)

3.2 Klimaszenarien

Alle vier Klimaszenarien, die in den Simulationsläufen betrachtet wurden, gehen von einer Erhöhung des Niederschlags und einer Erhöhung der Jahresmitteltemperatur aus (Tabelle 1). Das sind Trends, die auf die Tiefensickerung und die Nitrat auswaschung gegenläufig wirken sollten. Tatsächlich haben die Simulationen der Klimaszenarien mit dem hydrologischen Modell LARSIM gezeigt, dass die Sickerungsraten sich in dem betrachteten Zeitraum bis 2030 aller Voraussicht nach nicht wesentlich verändern werden. Dies wird bestätigt durch die zeitliche Veränderung der Nitrat auswaschung, die zwar einen leicht steigenden Trend hat, der aber durch die Kürze der Zeitreihe und die hohen interannuellen Schwankungen statistisch nicht absicherbar ist (Abbildung 8). Wenn man die mittleren Nitrat auswaschungen in den Klimaszenarien mit den simulierten Nitratfrachten für den Zeitraum 1987 bis 2003 vergleicht, nimmt die Gesamtnitrat auswaschung sogar ab (Abbildung 9). Dies deutet darauf hin, dass in den Klimaszenarien entweder die Tiefensickerung oder die Stickstoffmineralisation, oder auch beide Prozesse gleichzeitig, durch die zunehmenden Temperaturen mehr oder weniger stark gehemmt werden.

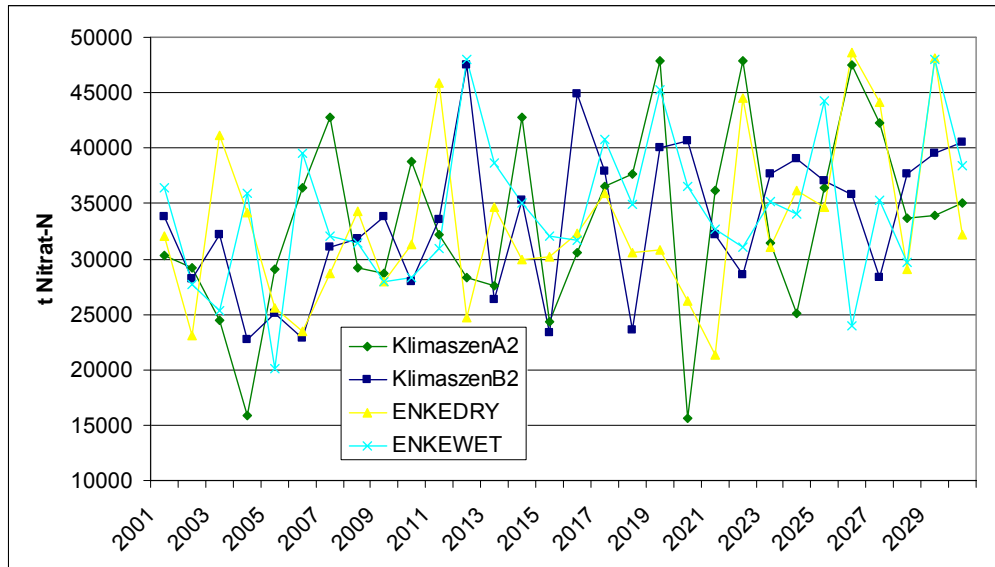


Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der mittleren jährliche N Auswaschung im Neckareinzugsgebiet in verschiedenen Klimaszenarien unter Annahme einer gleich bleibenden Landnutzung

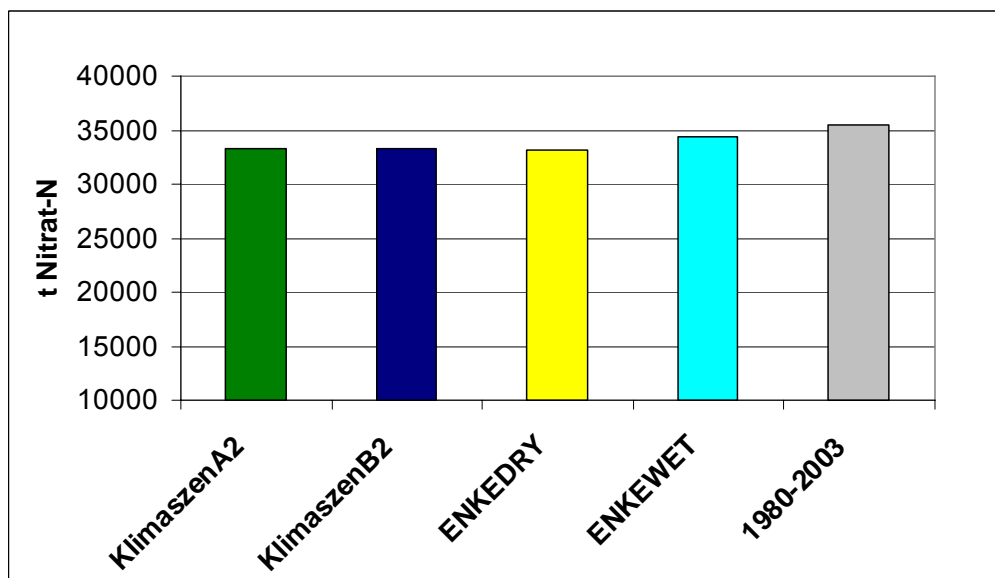


Abb. 9: Mittlere Nitratfrachten im Neckareinzugsgebiet über einen Simulationszeitraum von 30 Jahren bei unterschiedlichen Klimaannahmen

3.3 Gewässerökologie

Ein zentraler Aspekt der WRRL ist die Beurteilung der biologischen Wasserqualität. Hier leistet RIVERTWIN durch die Entwicklung des Habitatmodells MesoCASIMIR als Teilmodell von MOSDEW einen herausragenden Innovationsbeitrag. In jüngerer Zeit treten in den Gewässern Mitteleuropas vor allem morphologische Defizite in den Vordergrund. Durch den fehlenden Strukturreichtum der Gewässer ist gleichzeitig das Strömungsverhalten vereinheitlicht. Das führt zu einer drastischen Abnahme an ehemals vielfältigen Lebensräumen im Gewässer. MesoCASIMIR liefert Informationen zu Veränderungen der Gewässerökologie, die durch verschiedene Klima- und Bewirtschaftungsszenarien hervorgerufen werden. In der aktuell entwickelten Version liegt der Fokus auf Fischlebensräumen. Abbildung 10 zeigt schematisch die Ergebnisse aus



den verschiedenen Schritten der Modellierung. Für die Darstellung in der Flussgebietskala werden die einzelnen Mesohabitate, welche die Eignung des Gewässers für Fische in räumlichen Einheiten zwischen wenigen m² bis zu mehreren 100 m² widerspiegeln, zu „Lebensräumen“ aggregiert, welche in der Regel ganze Gewässerabschnitte zwischen zwei aufeinander folgenden Querbauwerken umfassen. Das Modell zeigt, dass im oberen Neckar zwar noch Teilabschnitte vorhanden sind, die vom Strömungsverhalten und den morphologischen Gegebenheiten her gute Bedingungen für die Barbe bieten. Andererseits sind lange Abschnitte durch Rückstau und stark reduzierte Fließgeschwindigkeiten beeinträchtigt. Falls außerdem die Wassertemperaturen zur Laichzeit der Barbe ansteigen und z.B. Temperaturen, wie sie normalerweise im Juli auftreten in Zukunft bereits im Mai und Juni vorhanden sind, werden sich die Bedingungen auf den wenigen vorhandenen Laicharealen deutlich verschlechtern. Hinzu kommt, dass die Mehrzahl der zahlreichen Querbauwerke bislang nicht durchwanderbar ist und deshalb Reproduktionsareale nur aus relativ kurzen Gewässerabschnitten erreichbar sind. Durch die Herstellung der Durchwanderbarkeit an den Querbauwerken könnte die Situation nicht nur für Langdistanzwanderfische, sondern auch für die Barbe signifikant verbessert werden. Entsprechende Priorisierungen von Maßnahmen können mit MesoCASIMIR durch Szenarienvergleiche vorteilhaft vorgenommen und ihre Auswirkung anschaulich dargestellt werden.

4. Zusammenfassung

Das Projekt RIVERTWIN leistet einen wesentlichen Beitrag für die Definition von Basisszenarien für mögliche zukünftige Entwicklungen im Einzugsgebiet des Neckars, auf deren Grundlage agrar- und umweltpolitische Maßnahmen auf regionaler und lokaler Ebene identifiziert werden können. Das integrierte Modell MOSDEW liefert neben Aussagen zu chemischen und physikalischen Parametern der Oberflächen- und Grundwässer auch Abschätzungen zur ökologischen Qualität der Gewässer und zur Entwicklung der Einkommenssituation im Agrarsektor. Es ist damit besonders für Fragestellungen geeignet, die eine gesamtheitliche Betrachtung der Auswirkungen des globalen Klimawandels erfordern. Der Aufbau des Regionalmodells durch Verkettung von zahlreichen Einzelmodellen mit zum Teil unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung erfordert eine exakte Definition der Schnittstellen, eine einheitliche Vorgabe der Eingabegrößen für alle Modelle und eine Sensibilisierung aller Modellentwickler, um die Konsistenz im Gesamtmodell zu erhalten. Diese Herausforderung hat RIVERTWIN in weiten Teilen gelöst. Dennoch besteht, obwohl für die Einzelmodelle versucht wurde Fehlerabschätzungen für die Modellergebnisse zu machen, weiterer Forschungsbedarf zur Identifikation und Quantifizierung der Unsicherheiten im komplexen Modellverbund.

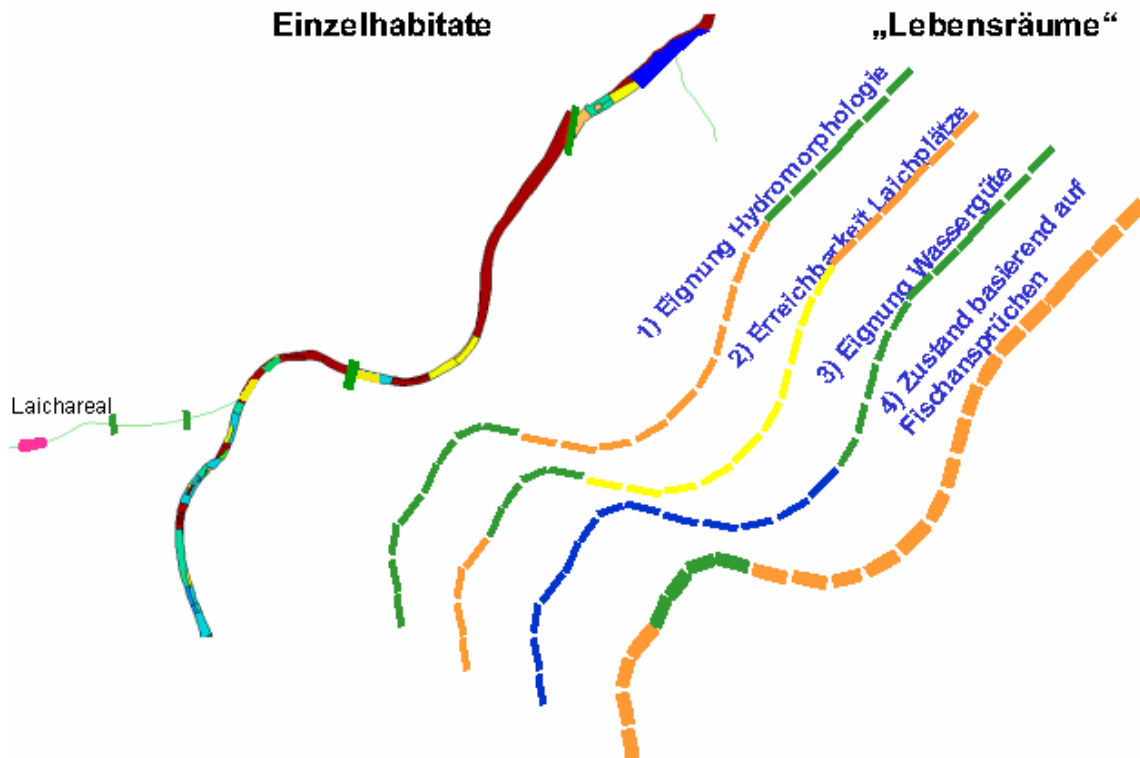


Abb. 10: Ergebnisse des mehrstufigen Mesohabitatmodells: Mesohabitate und Aggregation zu Lebensräumen, Lebensraumeignungen basierend auf unterschiedlichen Kriterien

Weitere Informationen zum Projekt und zu den Ergebnissen der Szenarienrechnungen sind auf der Projekt-Homepage (<http://www.rivertwin.org>) bzw. dem MOSDEW Map-Server (<http://mapserver.ilpoe.uni-stuttgart.de/rivertwin/index.php>) verfügbar.

5. Danksagung

Den folgenden Einrichtungen sei für Ihre Zusammenarbeit und die Zurverfügungstellung von Daten für die Durchführung der Forschungsarbeiten gedankt: Umweltministerium Baden-Württemberg, Landesanstalt für Umwelt, Messungen, und Naturschutz Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Stuttgart, Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau Baden-Württemberg, Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Landeswasserversorgung, Bodenseewasserversorgung und alle Landratsämter im Neckareinzugsgebiet. Das Projekt wurde gefördert durch das 6. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission (GOCE-CT-2003-505401).

6. Literatur

- Bardossy, A. and W. Yang (2005): Highly resolved climate scenarios for the Neckar basin, rivertwin project deliverable 03, http://www.rivertwin.de/assets/publications/D03_downscaled_highly_resolution_Neckar.pdf.
- Börsch-Supan, A. (2003): Herausforderungen an den Standort Baden-Württemberg durch den demographischen Wandel.
- Europäische Gemeinschaft (2001): Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.
- Europäische Gemeinschaft (2004): The EU Water Initiative. <http://www.euwi.net>.
- Henseler, M., Wirsig, A. und T. Krimly (2006): Anwendung des Regionalmodells ACRE in zwei interdisziplinären Projekten. In: Wenkel, K.-O., Wagner, P., Morgenstern, Luzi, K.



- und P. Eisermann (Hrsg.) (2006): Land- und Ernährungswirtschaft im Wandel – Aufgaben und Herausforderungen für die Agrar- und Umweltinformatik, Tagungsband der 26t. GIL-Jahrestagung, Potsdam, 6. – 8. März 2006, S.101 – 104.
- Kröhnert, S.; van Olst, N.; Klingholz, R. (2004): Deutschland 2020. Die demographische Zukunft der Nation. Berlin-Institut für Weltbevölkerung und globale Entwicklung, <http://www.berlin-institut.org>
- Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2004): Umweltdaten 2003 Baden-Württemberg. http://www2.lubw.baden-wuerttemberg.de/public/abt2/umweltdaten2003_pdf/
- Müller, M.G., Printz, A. und Schwarz-v.Raumer, H.-G. (2005): MOSDEW – ein Werkzeug zur strategischen Planung im integrierten Wassereinzugsgebiets-Management. In: STROBL, Josef, BLASCHKE, Thomas und GRIESEBNER, Gerald: Angewandte Geoinformatik 2005. Beiträge zum 17. AGIT-Symposium Salzburg. Wichmann Verlag, Heidelberg, Seite 481-486.
- Prognos (2000): Deutschland-Report 2002-2020. Prognos AG, Basel.
- Regierungspräsidium Stuttgart (2004): Wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung des Bearbeitungsgebiets Neckar für Baden-Württemberg. Regierungspräsidium Stuttgart (unveröffentlicht).
- Statistisches Landesamt (2000): Bodennutzung in den Gemeinden und Bezirken der Ämter für Landwirtschaft, Landschafts- und Bodenkultur Baden-Württemberg 1999. Statistische Berichte Baden-Württemberg, Agrarwirtschaft 16/00. Statistisches Landesamt Baden-Württemberg, Stuttgart, Germany. 63 S.
- Statistisches Landesamt (2001): Landesvorausrechnung Basis 2001. StaLa Baden-Württemberg.
- Statistisches Landesamt (2006a): Flächennutzung 1989 bis 2005. <http://statistik-bw.de/SRDB/home.asp?H=1&U=01>
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (2002): Landesentwicklungsplan 2002. www.wm.baden-wuerttemberg.de/htm/bereich8/content8_2.htm

Klimawandel und seine Konsequenzen für die Wasserwirtschaft in Hessen

Gerhard Brahmer
Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie

1. Klimawandel

Auf Grund der anhaltenden und weiter steigenden Emissionen von Treibhausgasen ist mit einer deutlichen Zunahme der mittleren globalen Lufttemperatur zu rechnen (IPCC, 2001). Durch die enge Verflechtung zwischen Klima und dem Gebietswasserhaushalt können Klimaveränderungen mit einhergehenden Veränderungen in den maßgeblichen Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag und Verdunstung zu erheblichen Auswirkungen auf das Abflussgeschehen und den Wasserhaushalt führen. Wasserwirtschaftliches Planen und Handeln wird insbesondere in den Bereichen Hochwasserschutz, Wasserversorgung und den möglichen Auswirkungen veränderter Abflüsse auf die Gewässerqualität unmittelbar durch mögliche Klimabeeinflussung berührt. Im Integrierten Klimaschutzprogramm Hessen „INKLIM 2012“ erfolgt im Projektbaustein II: „Klimawandel und Klimafolgen in Hessen“ eine Analyse und Prognose zum Klimawandel, die Klimafolgen werden in den Bereichen Forst- Land- und Wasserwirtschaft sowie Bodenschutz, Gesundheit und Naturschutz untersucht (HLUG, 2005).

2. Beobachtete Veränderungen im Klima- und Abflussverhalten in Hessen

Vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels hat sich auch in Hessen das Klima markant geändert. Auswertungen langer Messreihen (Schönwiese et al., 2005) lassen für Hessen in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts eine Temperaturzunahme von 0,9 °C erkennen. Dabei tritt insbesondere eine Zunahme um 1,6 °C im Winter hervor, die geringste Erwärmung tritt im Herbst mit 0,2 °C auf. Die vorgefundenen Niederschlagstrends betragen im Jahr + 8,5 %, im Herbst + 25 %, im Winter + 22 %, im Frühling + 20 %, im Sommer zeigt sich hingegen eine Trendabnahme um – 18 %. Die räumliche Verteilung der Niederschlagsänderung ist dabei durch komplexe Strukturen geprägt und zeigt eine hohe monatliche Variabilität.

Im Rahmen einer Studie zur Veränderung des Abflussregimes im 20. Jahrhundert im Rheingebiet (KHR, i.V.) wurden auch die Verhältnisse im Lahnggebiet untersucht. Der Jahresgang des Gebietsniederschlags für den Pegel Leun/Lahn (Einzugsgebiet 3571 km²) ist 1950–1975 durch eine 2-gipflige jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge mit Maximum im Winter (Dez/Jan) und sekundärem Maximum im Hochsommer (Jul/Aug) gekennzeichnet.

Beim Vergleich der Teilzeiträume 1950-1975 und 1975-2000 geht das sekundäre hochsommerliche Maximum deutlich zurück, während insbesondere eine starke Zunahme der März-Niederschläge zu verzeichnen ist (Abbildung 1). Auch das Maximum im Dez/Jan verstärkt sich in dem zweiten Teilzeitraum.

Die dazu korrespondierenden Auswirkungen auf den Gebietsabfluss lassen deutliche Ergebnisse (Abbildung 2) mit statistisch signifikant abnehmendem Trend für den Monat August und signifikant zunehmendem Trend für den Monat März erkennen, die ursächlich auf eine Veränderung im Niederschlagsgeschehen zurückzuführen sind.

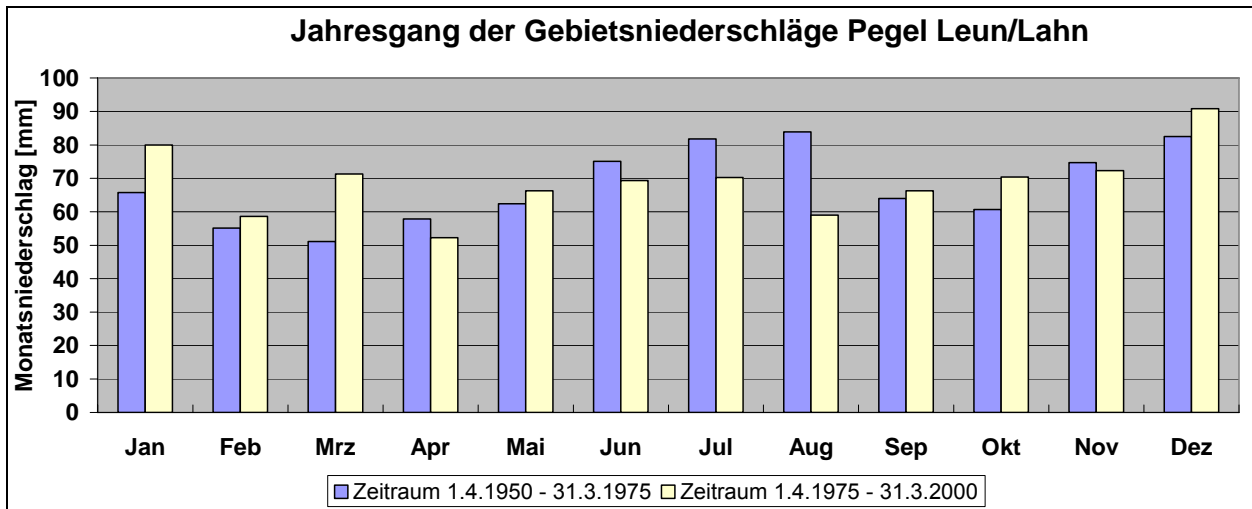


Abb. 1: Veränderung des Jahresganges der Gebietsniederschläge Pegel Leun/Lahn

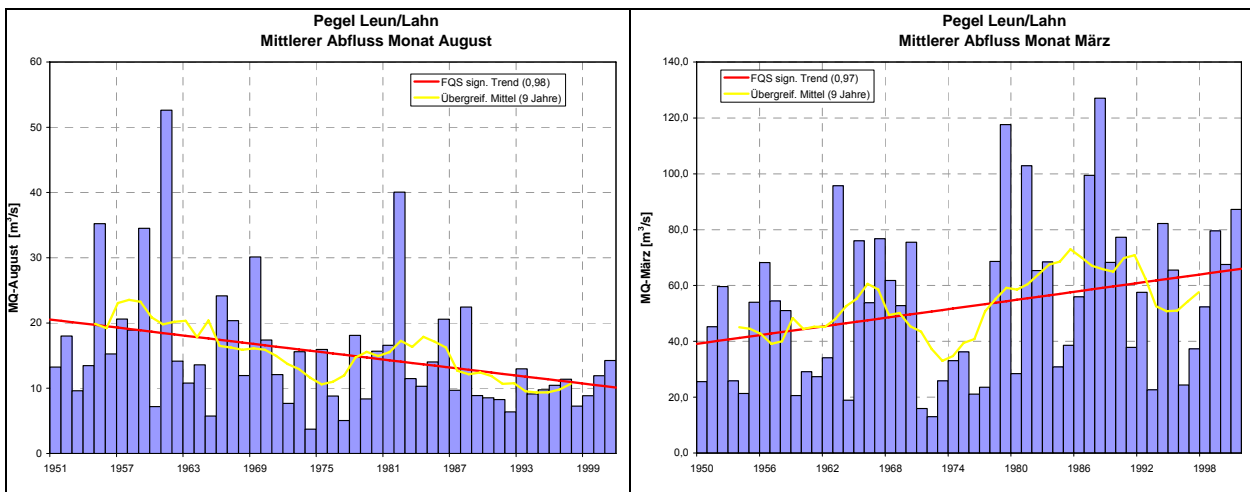


Abb. 2: Entwicklungen der August- und Märzabflüsse 1951-2000 am Pegel Leun/Lahn

3. Zukünftige Klimaprojektionen für Hessen

3.1 Vom globalen Modell zu regionalen Aussagen

Da die globalen Zirkulationsmodelle zur Simulation des Klimas für längere Zeiträume nur mit einer relativ groben räumlichen Auflösung gerechnet werden können, bedarf es zur Ableitung von Aussagen zur regionalen und lokalen Klimaveränderung und der daraus abzuleitenden Auswirkungen für die Wasserwirtschaft einer Methodik, um die Ergebnisse der globalen Modellrechnungen z.B. auf hessische Naturräume oder gar Stationswerte zu übertragen. Im Rahmen des Projekts INKLIM 2012 wurden mit einem statistischen Regionalisierungsverfahren aus den Ergebnissen von globalen Zirkulationsmodellen Klimadaten in hoher räumlicher Auflösung für Hessen abgeleitet. Das Verfahren beruht auf einer objektiven Wetterlagenklassifikation und dem Zusammenhang von Wetterlagen und den Klimadaten an lokalen Stationen des Deutschen Wetterdienstes (Enke, 2003). Basierend auf den Ergebnissen von Rechenläufen des Max-Planck-Instituts für Meteorologie mit dem globalen Klimamodell ECHAM4 unter Zugrundelegung des sogenannten „B2“-Szenarios (mit einem nahezu linearen und damit vergleichsweise moderatem Anstieg der CO₂-Emissionen) erzeugt das statistische Regionalisierungsverfahren

stationsweise Zeitreihen der klimatischen Parameter Lufttemperatur, Luftfeuchte, Sonnenscheindauer, Windgeschwindigkeit und Niederschlagsmenge mit täglicher Auflösung. Als Referenzzeitraum wurden Zeitreihen von 1981-2000 und für die Zukunftsszenarien dekadenweise der Zeitraum 2011-2050 simuliert.

3.2 Ergebnisse zum Klimawandel in Hessen

Als Mittel der in Hessen liegenden Klimastationen ergibt sich im Vergleich zum Bezugszeitraum 1981-2000 eine Zunahme der Jahresmitteltemperatur für den Szenariozeitraum 2011-2050 zwischen + 1,2 und + 1,8 °C je nach Dekade. Bei der Temperaturerhöhung treten insbesondere die Monate Dezember, Januar und Februar mit Zunahmen zwischen + 2 bis + 3 °C gegenüber Zunahmen um etwa + 1 °C bei den übrigen Monaten hervor. Für den Wasserhaushalt bedeutet die Temperaturzunahme insbesondere in den Sommermonaten eine Erhöhung der potenziellen Verdunstung.

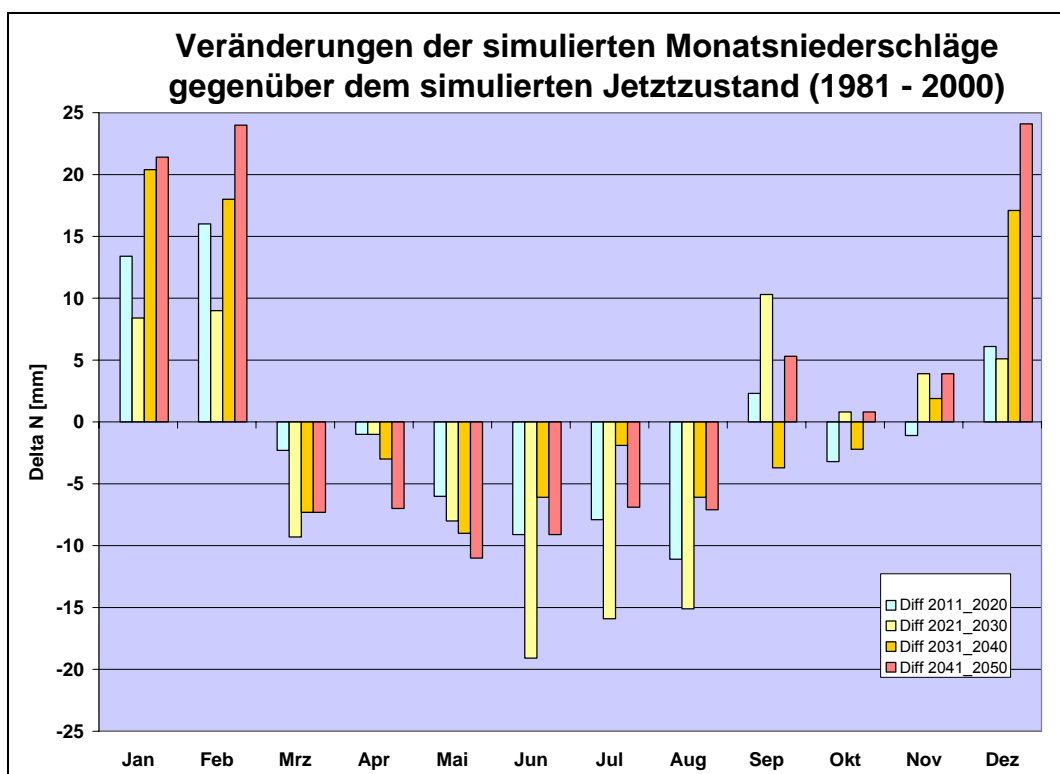


Abb. 3: Veränderungen der monatlichen Niederschlagsmengen in den Zukunftsszenarien

Während sich für die Jahresniederschlagsmenge im Vergleich zum simulierten Bezugszeitraum 1981-2000 erst für die beiden letzten Dekaden gewisse Zunahmen ergeben, ist vor allem eine Veränderung im Niederschlagsjahrgang zu erkennen. Im hydrologischen Winterhalbjahr nimmt die Niederschlagsmenge um 8 % zu, während im hydrologischen Sommerhalbjahr eine um 8 % abnehmende Niederschlagsmenge zu verzeichnen ist. Auch beim Niederschlag sind die markantesten Änderungen in den Monaten Dezember, Januar und Februar mit Zunahmen bis über 20 mm/Monat zu erwarten (Abbildung 3). Von April bis August liegen die Niederschlagssummen der Szenariendekaden unter den Werten des simulierten Vergleichszeitraums 1981-2000. Die Veränderungen im Niederschlagsverhalten treten regional in Hessen mit einem unterschiedlichen Ausmaß auf, insbesondere die Region nord/nordöstlich der Eder weist dabei nicht nur im Sommer- sondern auch im Winterhalbjahr Niederschlagsabnahmen auf (Abbildung 4).



Als Beispiel für die Veränderung von Andauern bestimmter klimatischer Tage sind die Verhältnisse für die Station Gießen-Liebigshöhe dargestellt (Abbildung 5). Aus der deutlich zurückgehenden Anzahl der Eis- und Frosttage lässt sich unmittelbar eine Auswirkung hin zu geringerem Schneeanteil an den Niederschlägen und geringerer Schneedeckenentwicklung ableiten, was sich wiederum auf das Abflussgeschehen auswirkt. Die Winterniederschläge werden also vermehrt direkt abflusswirksam, während die Niederschlagsrücklage in Schnee mit verzögerter Schmelzwasserabgabe zurückgehen dürfte. Die Zunahme der Lufttemperatur drückt sich auch in der Zunahme der Anzahl von Sommertagen und von heißen Tagen aus.

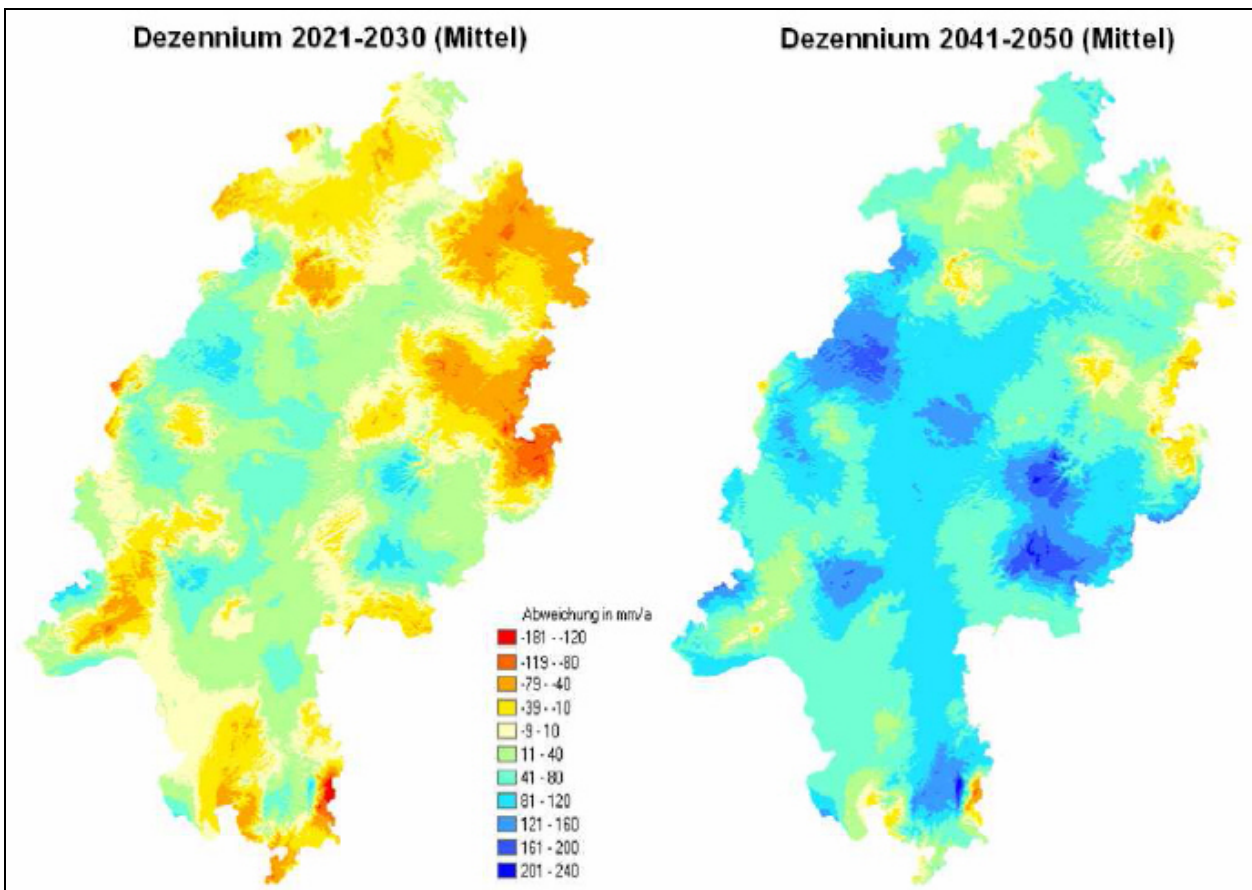


Abb. 4: Differenzkarten der räumlichen Verteilung des mittleren Jahresniederschlags in den Zukunftsszenarien gegenüber dem Beobachtungszeitraum 1971 – 2000 (aus: Berthold u. Hergesell, 2005)

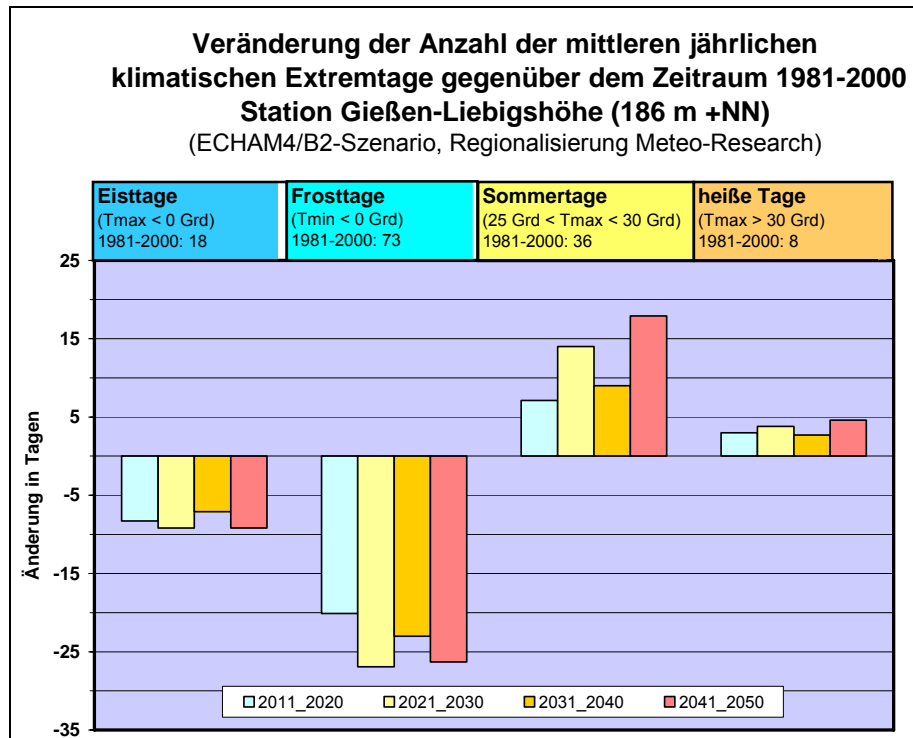


Abb. 5: Veränderungen von klimatischen Extremtagen für die Station Gießen-Liebigshöhe

4. Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussverhältnisse in Hessen

Zur Untersuchung der Auswirkung der simulierten Klimadaten auf die Abflussverhältnisse an hessischen Gewässern konnte auf das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Modell, Bremicker, 2000) zurückgegriffen werden, für das beim Ingenieurbüro Ludwig (Karlsruhe) aus verschiedenen Projekten aufgestellte Modelle vorliegen, die hessische Flussgebiete mit abdecken (Ebel et al., 2000). Mittels der Stationsweise vorliegenden regionalisierten Klimadaten für den Vergleichszeitraum 1981-2000 und für die Szenariendekaden 2011-2050 werden im Modell LARSIM die hydrologischen Teilprozesse auf Rasterbasis simuliert.

Als Ergebnis liegen für größere Einzugsgebiete bezogen auf Pegelmessstellen Zeitreihen des Abflusses mit täglicher Auflösung vor. Insbesondere der Vergleich von aus den Tageswerten abgeleiteten statistischen hydrologischen Kennwerten wie mittlere monatliche Mittelwasser-, Niedrigwasser- und Hochwasserabflüsse zwischen der simulierten Bezugsperiode und den Szenariodekaden erlaubt eine Quantifizierung der Auswirkung des Klimaeinflusses auf das mögliche zukünftige Abflussverhalten. Auswertungen erfolgten für die in Abbildung 6 dargestellten Pegel hessischer Gewässer, wobei für jede Dekade 10 Realisierungen des Klimaregionalisierungsverfahrens durchgerechnet wurden (Richter u. Czesniak, 2004) und als Ergebnis jeweils die Mittelwerte dieser 10 statistisch gleich wahrscheinlichen Realisierungen verglichen werden.

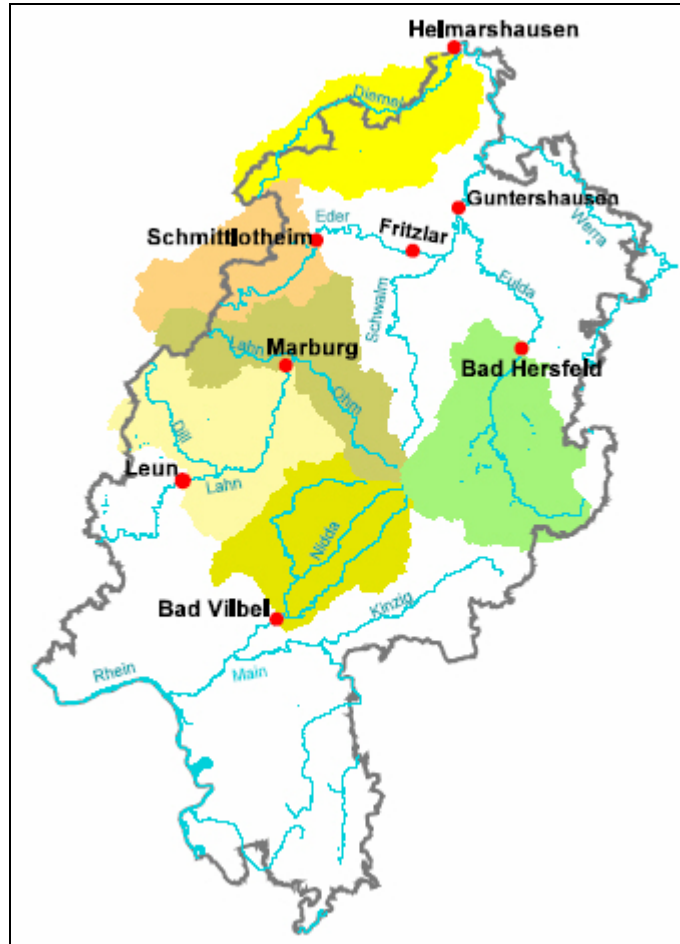


Abb. 6: Untersuchte Pegel an hessischen Gewässern

4.1 Auswirkungen auf die monatlichen mittleren Abflüsse MoMQ

Das Abflussregime der hessischen Gewässer ist gekennzeichnet durch höchste Monatsabflüsse von Dezember bis März und danach deutlich abfallenden Monatswerten bis in den Spätsommer. Gegenüber der Referenzperiode ergeben sich für den Pegel Marburg/Lahn (1666 km²) deutliche Zunahmen der mittleren Abflüsse in den Monaten Dezember bis Februar. Im hydrologischen Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober ergeben sich im simulierten Zukunftsszenario hingegen Abnahmen der mittleren Abflüsse von ca. 10 bis 20 %.

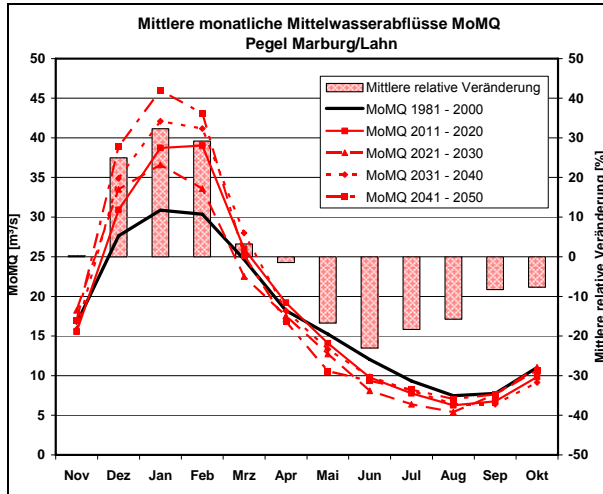


Abb. 7: Veränderung der Mittelwasserabflüsse am Pegel Marburg/Lahn

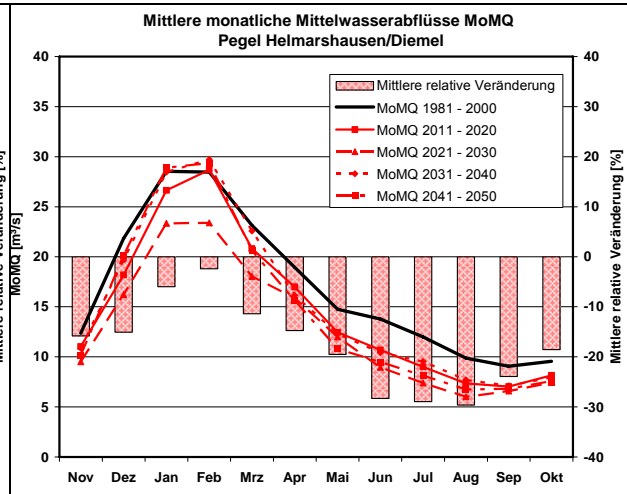


Abb. 8: Veränderung der Mittelwasserabflüsse am Pegel Helmarshausen/Diemel

Am Pegel Helmarshausen/Diemel (1755 km²) zeigt sich im Gegensatz zur Lahn auch in den Wintermonaten keine Abflusszunahme. Hier nehmen die mittleren Abflüsse der Monate November, Dezember, März und April um etwa 15 % ab, während die Januar- und Februarabflüsse bis auf eine Simulationsdekade annähernd gleich bleiben. Von März bis Oktober liegen die mittleren Abflüsse im Zukunftsszenario deutlich unter den Vergleichswerten des Ist-Zustands.

Bei den übrigen untersuchten Flussgebieten ergibt sich für die Pegel Leun/Lahn (3571 km²), Bad Vilbel/Nidda (1755 km²) und Bad Hersfeld/Fulda (2120 km²) ein dem Pegel Marburg entsprechendes Muster der Veränderungen (Tabelle 1). Der Pegel Schmittlotheim (1202 km²) am Ederoberlauf zeigt zusammen mit dem Pegel Helmarshausen/Diemel ebenfalls eine Abnahme der Abflüsse im Jahr und im hydrologischen Winterhalbjahr und im Vergleich zu den übrigen Pegeln deutlich höhere Abflussabnahmen für das hydrologische Sommerhalbjahr. Geringere Niederschlagseinnahmen führen in diesen beiden Einzugsgebieten in Nordhessen zu einem abweichenden Bild gegenüber den anderen untersuchten Einzugsgebieten.

Tab. 1: Prozentuale Veränderungen der monatlichen mittleren Abflüsse (MoMQ) in den Zukunftsszenarien (2011 – 2050) gegenüber dem Ist-Zustand (1981 – 2000)

Pegel	Jahr	Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)	Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – April)
Marburg/Lahn	+ 8 %	- 15 %	+ 18 %
Leun/Lahn	+ 3 %	- 17 %	+ 10 %
Bad Vilbel/Nidda	+ 9 %	- 13 %	+ 18 %
Bad Hersfeld/Fulda	+ 5 %	- 19 %	+ 17 %
Schmittlotheim/Eder	- 20 %	- 57 %	- 8 %
Helmarshausen/Diemel	- 15 %	- 24 %	- 10 %



4.2 Auswirkungen auf die monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse MoMNQ

Der monatliche mittlere Niedrigwasserabfluss (MoMNQ) repräsentiert den Mittelwert der jeweils kleinsten simulierten Tagesabflüsse eines Monats der jeweiligen Periode. Auch für die Änderungen der monatlichen Niedrigwasserabflüsse zeigt sich im jahreszeitlichen Verlauf ein ähnliches Bild wie bei den Mittelwasserabflüssen. Ansteigende Niedrigwasserabflüsse sind am Pegel Marburg/Lahn für die Monate Dezember bis März zu erwarten (Zunahme um 16 bis 18 %), während in den übrigen Monaten und insbesondere in der typischen Niedrigwasserperiode im Hochsommer und Herbst in den Zukunftsszenarien durchgängig um etwa 10 % geringere Niedrigwasserabflüsse zu erwarten sind.

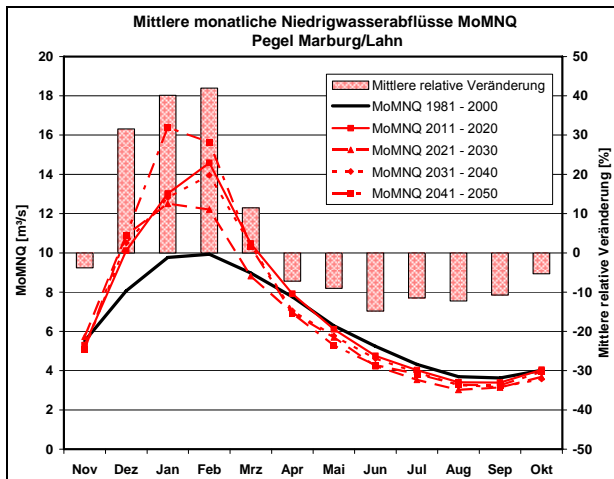


Abb. 9: Veränderung der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse am Pegel Marburg/Leun

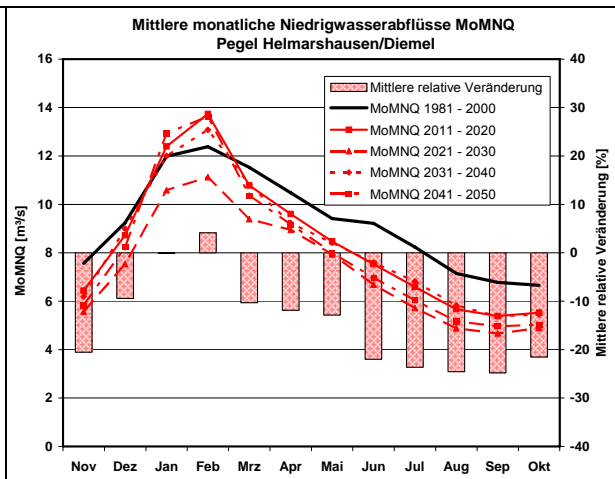


Abb. 10: Veränderung der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse am Pegel Helmarshausen/Diemel

Am Pegel Helmarshausen/Diemel zeigen sich bis auf die Monate Januar und Februar mit etwa gleich bleibenden Werten deutliche Abnahmen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse um 10 bis über 20 %.

Bei den Pegeln Marburg, Leun, Bad Vilbel und Bad Hersfeld nehmen die MoMNQ-Werte in den Zukunftsszenarien im hydrologischen Winterhalbjahr um ca. 10 – 20 % zu und im hydrologischen Sommerhalbjahr um ca. 10 bis 15 % ab (Tabelle 2). Auch die Werte der mittleren jährlichen Niedrigwasserabflüsse (MNQ) verändern sich in dieser Größenordnung. An den beiden nordhessischen Pegeln Schmittlotheim und Helmarshausen zeigen sich deutlich größere Abnahmen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse. Die mittleren jährlichen Niedrigwasserwerte MNQ gehen dort im Zukunftsszenario um etwa 50 % (Schmittlotheim) bzw. 20 % (Helmarshausen) zurück.

Tab. 2: Prozentuale Veränderungen der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse (MoMNQ) und des mittleren jährlichen Niedrigwasserabflusses (MNQ) in den Zukunftsszenarien (2011 – 2050) gegenüber dem Ist-Zustand (1981 – 2000)

Pegel	Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)	Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – April)	MNQ
Marburg/Lahn	- 11 %	+ 22 %	- 10 %
Leun/Lahn	- 14 %	+ 17 %	- 11 %
Bad Vilbel/Nidda	- 16 %	+ 19 %	- 14 %
Bad Hersfeld/Fulda	- 15 %	+ 8 %	- 15 %
Schmittlotheim/Eder	- 50 %	+ 10 %	- 53 %
Helmarshausen/Diemel	- 22 %	- 7 %	- 22 %

4.3 Auswirkungen auf die monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse MoMHQ

Am Verlauf der MoMHQ-Werte der Referenzperiode am Pegel Marburg ist die für innerhessische Gewässer typische Hochwassersaison von Dezember bis März zu erkennen, während in den übrigen Monaten in größeren Flussgebieten Hochwasserabflüsse deutlich zurücktreten. In den Zukunftsszenarien ist eine Zunahme der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für die Monate Dezember bis Februar um etwa 20 % zu verzeichnen. Für die Monate Mai bis Oktober ergeben sich Abnahmen der in diesem Zeitraum schon sehr geringen mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse um etwa 10 bis 15 %.

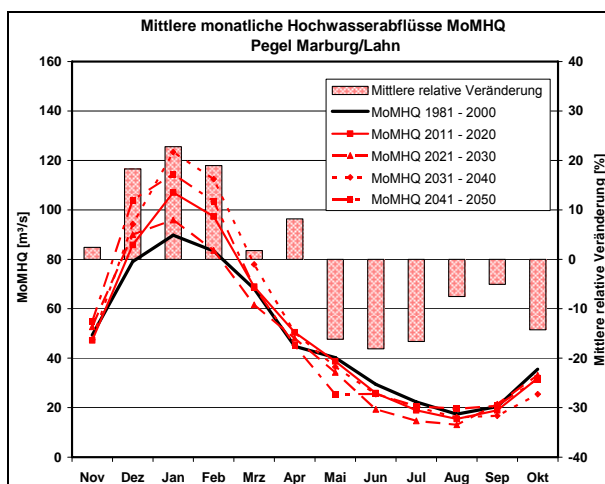


Abb. 11: Veränderung der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse am Pegel Marburg/Lahn

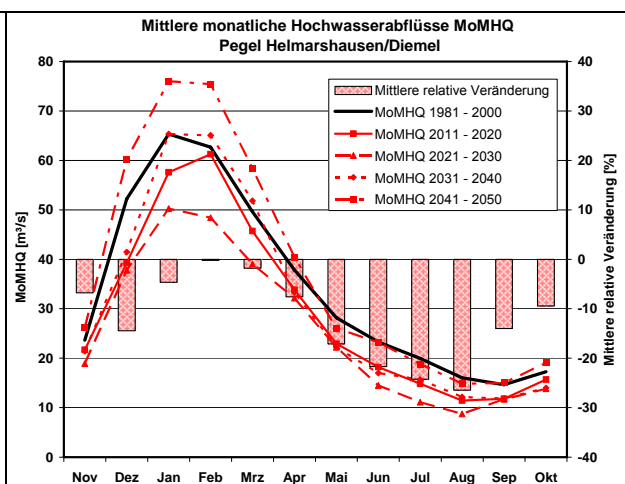


Abb. 12: Veränderung der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse am Pegel Helmarshausen/Diemel

An der Diemel ergibt sich in den Zukunftsszenarien eine große Variabilität der Veränderung der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse für das hydrologische Winterhalbjahr. In zwei simulierten Dekaden entsprechen die MoMHQ-Werte etwa denjenigen des Referenzzeitraumes, in den beiden anderen simulierten Zukunftsdekaden treten sowohl deutlich kleinere als auch deutlich größere Werte auf. Im hydrologischen Sommerhalbjahr nehmen die MoMHQ-Werte der einzelnen Monate um 10 bis zu 25 % ab.



Die MoMHQ-Werte der Pegel Marburg, Leun, Bad Vilbel und Bad Hersfeld nehmen im hydrologischen Winterhalbjahr um 5 bis 20 % zu. Die größten Zunahmen werden für die Monate Dezember bis Februar mit bis zu 30 % ermittelt. Die nord- bzw. - nordwesthessischen Pegel Helmarshausen und Schmittlotheim ergeben im Mittel der Zukunftsszenarien dagegen Abnahmen um – 6 bzw. – 12 % (Tabelle 3). Doch auch hier werden für einzelne Zukunftsdokaden Zunahmen der MoMHQ-Werte für die Monate Dezember bis Februar um 5 bis 10 % für Schmittlotheim und um bis zu 18 % für Helmarshausen simuliert.

Tab. 3: Prozentuale Veränderungen der monatlichen mittleren Hochwasserabflüsse (MoMHQ) und des mittleren jährlichen Hochwasserabflusses (MHQ) in den Zukunftsszenarien (2011 – 2050) gegenüber dem Ist-Zustand (1981 – 2000)

Pegel	Hydrologisches Sommerhalbjahr (Mai – Okt.)	Hydrologisches Winterhalbjahr (Nov. – April)	MHQ
Marburg/Lahn	- 14 %	+ 14 %	+ 9 %
Leun/Lahn	- 17 %	+ 6 %	+ 2 %
Bad Vilbel/Nidda	- 11 %	+ 12 %	+ 6 %
Bad Hersfeld/Fulda	- 19 %	+ 19 %	+ 16 %
Schmittlotheim/Eder	- 58 %	- 12 %	- 7 %
Helmarshausen/Diemel	- 19 %	- 6 %	- 6 %

An den durch die Edertalsperre beeinflussten Pegeln Fritzlar/Eder (1804 km²) und Guntershausen/Fulda (6366 km²) wurden unter Annäherung der derzeitigen Talsperrensteuerung MoMHQ-Werte für die Zukunftsszenarien simuliert, die für das hydrologische Winterhalbjahr nur geringfügig von denjenigen des Referenzzeitraums abweichen.

4.4 Auswirkungen auf seltene Hochwasserabflüsse

Zur Abschätzung von Veränderungen bei großen (seltenen) Hochwassern wurde eine extremwertanalytische Auswertung durchgeführt. Mit den Parametern der Pearson-III-Verteilung und den simulierten (Tagesmittel)-Werten der größten jährlichen Hochwasserabflüsse wurden Hochwasserextremwerte für die einzelnen Untersuchungsdekaden ermittelt. Auf dieser Basis ergeben sich für den Simulationszeitraum 2011-2050 größte Dekadenzunahmen der extremen Hochwasserquantile im Bereich eines 100-jährlichen Ereignisses für Südhessen um 20 %, während sich im Diemel- und Edergebiet lediglich Zunahmen um 5 % ergeben. Da die Ergebnisse aus den einzelnen Dekaden der Zukunftsszenarien aufgrund der nicht vorhersehbaren natürlichen Variabilität im Klimageschehen nicht stringent in zeitlicher Reihenfolge zu sehen sind, könnten die so ermittelte maximale Wert als Anhaltswerte für die Periode der nächsten 4 Jahrzehnte unter den angesetzten Klimaszenarien angesehen werden. Kritisch ist hierbei anzumerken, dass die Extremwerte stark von dem größten simulierten Einzelwert beeinflusst werden. Die statistische Klimaregionalisierung und die Anzahl der durchgeführten Realisationen bei dem Klimadownscaling ist aber lediglich mit dem Ziel der Beschreibung der Klimaverhältnisse optimiert worden. Ob die komplexen Ergebnisse einer Wasserhaushaltssimulation mit verschiedenen klimatischen Parametern auch stabile Ergebnisse hinsichtlich des größten simulierten Einzelwertes liefern muss in Frage gestellt werden. Zudem ist die zeitliche Schrittweite von einem Tag für solche Betrachtungen nicht ausreichend, da Scheitelüberlagerungen mit einmündenden Seitengewässern im Stundenbereich darüber entscheiden, wie hoch der tatsächliche Hochwasserscheitel ausfällt.

5. Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Grundwasserneubildung

Für die Modellierung der Grundwasserneubildung kam ein zweistufiges, GIS-gestütztes Verfahren zum Einsatz, mit dem sich sowohl die zeitliche als auch die räumliche Variabilität der Grundwasserneubildung untersuchen lässt (Hergesell und Berthold, 2005). Bei dem Verfahren handelt es sich um die Kopplung eines empirischen Einschicht-Bodenwasserhaushaltsmodells mit einem speziell für Hessen entwickelten Regressionsmodell zur Ermittlung des Baseflow-Index. Entsprechend der hohen räumlichen Modellauflösung von 100 m x 100 m wurden die zu langjährigen monatlichen Mittelwerten aggregierten Klimadaten einer Regionalisierung mit anschließendem Downscaling unterzogen. Auf Grundlage der gleichen Klimaszenarien wie bei den Oberflächengewässern wurden die Auswirkungen auf die Grundwasserneubildung untersucht, als Referenzperiode wurde hier der Zeitraum 1971 – 2000 gewählt (Berthold u. Hergesell, 2005).

Da für die Grundwasserneubildung der Niederschlag die wichtigste Einflussgröße ist, wurde neben der Simulation für die gesamte Dekade auf Basis der vorliegenden Niederschlagsdaten aus den jeweils 10 Realisierungen jeder Dekade jeweils eine Trocken- und eine Feuchtrealisierung ausgewählt. In Abbildung 13 sind die Modellergebnisse der Grundwasserneubildung auf Grundlage dieser Varianten für jede Szenariodekade zusammen- und den Ergebnissen der Dekaden aus dem Referenzzeitraum gegenübergestellt.

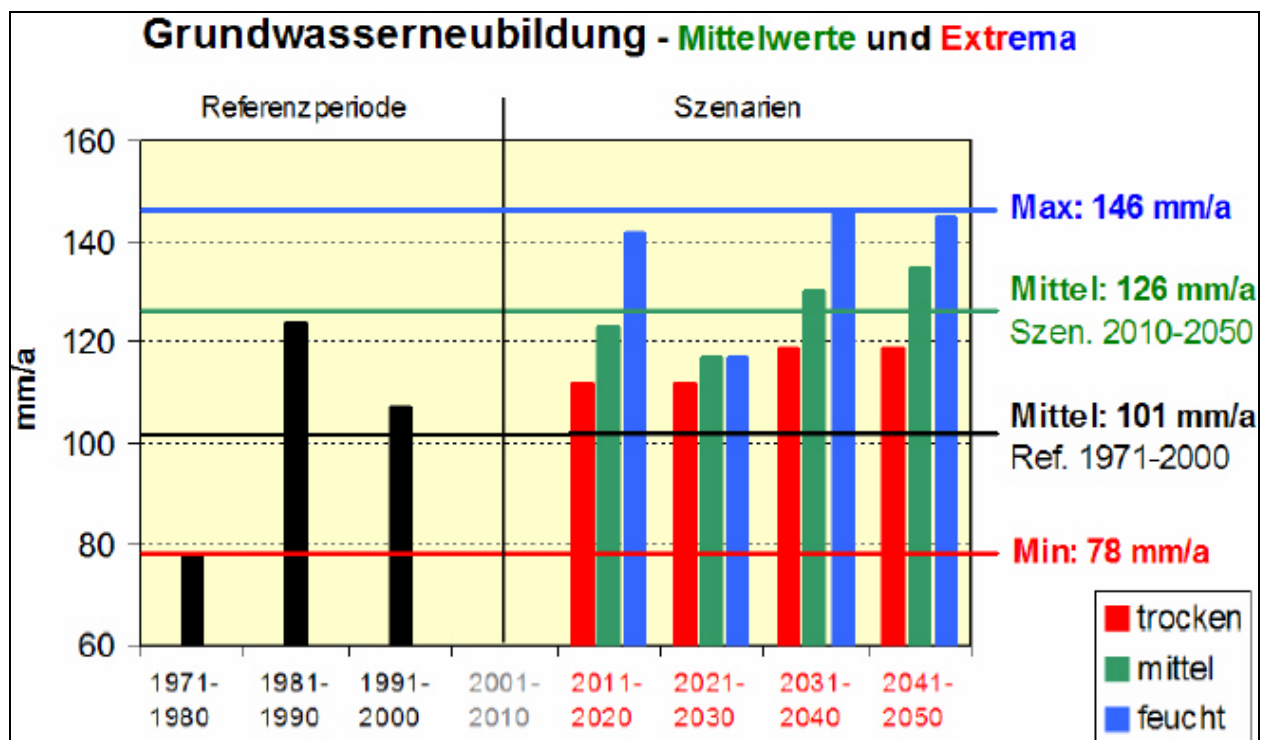


Abb. 13: Zeitliche Variabilität der Grundwasserneubildung in Hessen (aus: Berthold u. Hergesell, 2005)

Über den gesamten Szenarienzeitraum betrachtet nimmt die mittlere landesweite Grundwasserneubildung gegenüber dem Mittelwert der Referenzperiode von 101 mm/a auf 126 mm/a um ca. 25 % zu. Der Mittelwert des gesamten Szenarienzeitraums liegt somit über dem Wert der Nassperiode der historischen Dekade 1981-1990. Die mittleren Verhältnisse der Zukunft werden demnach etwa den Feuchtperioden der Vergangenheit entsprechen. Die Mittelwerte einzelner Zukunftsdekaden (2031-2040 und 2041-2050) liegen deutlich über dem maximalen Wert der historischen Feuchtdekade (1981-1990). Die Feuchtsimulationen in den Zukunftsszenarien übersteigen die Grundwasserneubildungsrate der feuchtesten Dekade des Referenzzeitraumes



um etwa 15 %. Selbst die Grundwasserneubildung der einzelnen extremen Trockenrealisierungen liegt deutlich über dem Mittelwert des Referenzzeitraums.

Große Zunahmen der Grundwasserneubildung treten in den Mittelgebirgen, aber auch im Hessischen Ried, der Wetterau, im Limburger Becken und Kasseler Graben auf. Neben der Zunahme der Grundwasserneubildung für nahezu alle Bereiche Hessens für die feuchten Zukunftsdekaden 2031-2040 und 2041-2050 ergeben sich bei der räumlichen Auswertung z.B. für die Dekade 2021-2030 trotz mittlerer Zunahme um 16% im Süden und Nordosten Hessens auch lokale Bereiche mit einer Abnahme der Grundwasserneubildung gegenüber der Referenzperiode (Berthold u. Hergesell, 2005).

6. Schlussfolgerung

Aus den Untersuchungsergebnissen lässt sich unter Zugrundelegung des verwendeten Klimarechenlaufs und des eingesetzten Regionalisierungsverfahrens eine deutliche Veränderung im Abflussverhalten hessischer Gewässer ableiten. Insbesondere eine Umverteilung hin zu Mehrabflüssen im Winterhalbjahr und verminderten Abflüssen im Sommerhalbjahr mit korrespondierender Abnahme der Niedrigwasserkenngroße MNQ ist anzunehmen. Eine Verschärfung der Hochwassersituation aufgrund einer zukünftigen Klimaveränderung scheint nach den Ergebnissen wahrscheinlich. Eine zukünftige Verschärfung der Niedrigwasserproblematik bei sommerlichem Niedrigwasser muss angenommen werden. Die Ergebnisse der Pegel aus Süd- und Mittelhessen stimmen qualitativ mit Untersuchungen aus anderen Flussgebieten Süddeutschlands (Bartels et al., 2004; Zimmermann et al., 2004; AK KLIWA, 2006) überein, wenngleich das Ausmaß der Veränderung an den hessischen Pegeln hinter diesen zurückbleibt.

Auch für die Grundwasserneubildung ist von einer deutlichen Veränderung unter dem Einfluss des Klimawandels auszugehen. Die Zunahme winterlicher Niederschläge führt überwiegend zu einer Zunahme der Grundwasserneubildung. Das Auftreten von langen Perioden mit Trockenjahren und resultierenden niedrigen Grundwasserständen erscheint demnach unwahrscheinlicher. Zunehmend ist mit erhöhten Grundwasserständen vor allem in Lockergesteinsgebieten mit großem nutzbarem Hohlraumvolumen zu rechnen. Aus dem Vergleich mit historischen Grundwasserständen ist zu erwarten, dass zukünftig häufiger mit Vernässungen auf Grund hoher Grundwasserstände zu rechnen ist. Während die zentrale Wasserversorgung aus größeren und tieferen Lockergesteinsaquiferen gesichert erscheint, könnte der prognostizierte Rückgang der Sommerniederschläge für die dezentrale Wasserversorgung insbesondere aus flachen Quellen regional zu deutlichen Beeinträchtigungen führen.

Die vorgestellten Ergebnisse stellen eine Ausgangsbasis zur Abschätzung der Konsequenzen des Klimawandels für das Abflussverhalten der Gewässer und für die Grundwasserneubildung in Hessen dar. Der Ablauf der gesamten Modellkette vom globalen Klimamodell über die Annahme eines Emissionsszenarios, dem Downscaling mit einem regionalen Klimamodell bis hin zu der anschließenden Simulation mit einem Wasserhaushaltsmodell ist noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Es erscheint daher erforderlich, die aktuellen Entwicklungen der Klimamodellierung aus Sicht der wasserwirtschaftlichen Praxis weiterzuverfolgen. Insbesondere zur Bewertung von Veränderungen der Hochwasserabflüsse sind Modellrechnungen mit zeitlich höher aufgelösten Klimaszenarien erforderlich. Der Anwendung pauschaler „Klimafaktoren“ zur Berücksichtigung von Klimafolgewirkungen auf Bemessungswerte für hessische Gewässer stehen zudem deutliche regionale Unterschiede in den Ergebnissen der untersuchten Einzugsgebiete entgegen. Offen ist, in welchem Ausmaß sich bei weiterentwickelten Klimamodellen oder Regionalisierungsverfahren die Regionen mit zu- bzw. abnehmenden Niederschlägen in Hessen verändern.

Climate Change and the river Thames catchment

Tim Reeder Regional Climate Change Programme Manager
Environment Agency UK

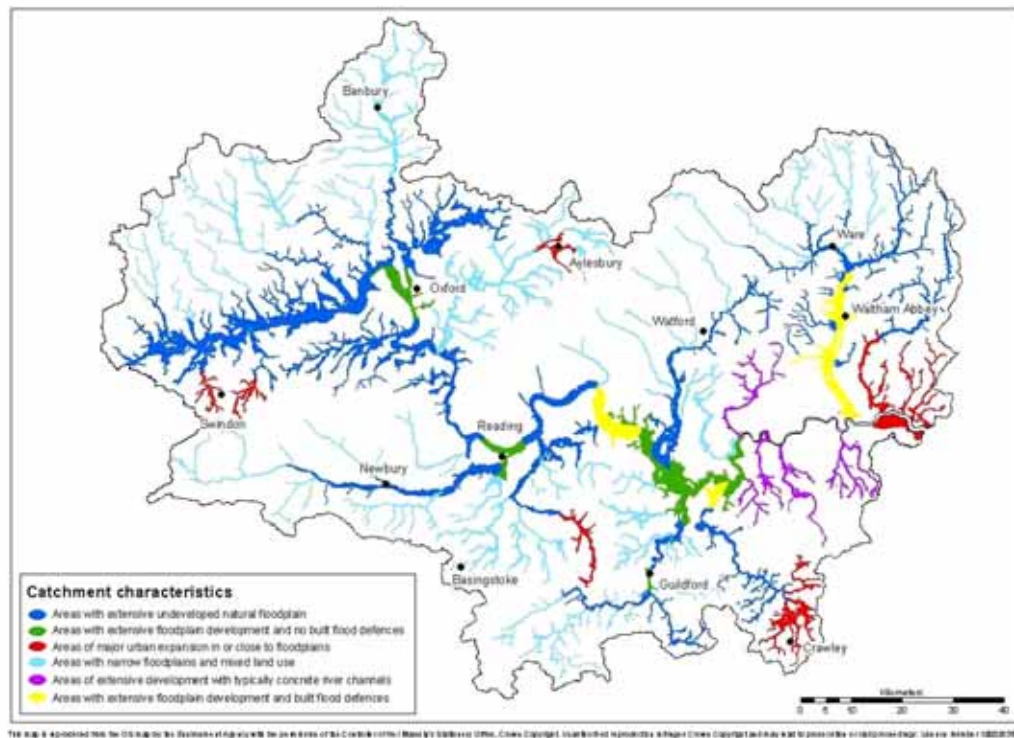
1. Introduction

This paper describes the effects of climate change on the river Thames catchment with respect to flooding and the role that the Environment Agency and others have in adapting to these effects. The challenges of flood risk management in the Thames are described. The main physical sources that climate change will affect are outlined. It then looks at how the issue is being addressed across the fluvial catchment and finishes by describing the Thames Estuary (TE2100) Project which is planning a strategy to manage flood risk across the tidal Thames Estuary for the next 100 years. New techniques to approach decision making are described and important implications for society and the environment drawn together.

2. Flood risk management challenges in the Thames catchment

The Thames catchment comprises about 8 % of the land Area of England and Wales whilst housing about 23 % of the population and generating about 27 % of GDP; 10 % of the land is at risk from flooding with £ 80 billion of property value in London alone. Therefore the catchment is under pressure in terms of the amount of development in or near in the flood plain. There are plans to develop many more homes with 160 thousand in the Thames Gateway east of London in the next 10 years. However there are extensive areas of undeveloped rural landscapes in the west of the catchment.

The map below summarises the main characteristics of the catchment.






3. Climate Change effects

Climate change will have a significant effect on the sources of flood risk in the catchment. The UK Climate Impacts Programme provide a central national resource to assess the impacts of climate change across the UK. They produced scenarios in 2002 which predict varying changes in climate for the Thames catchment. They all point in a similar direction with respect to flood risk with increasing temperatures, winter rainfall and sea level, and decreasing summer rainfall. There are a number of uncertainties particularly with respect to any changes in wind strengths, storm surges and frequency of intense summer rainfall.

The following table demonstrates the main effects of climate change on the sources of flood risk with an indication of the amount of uncertainty.

 Environment Agency

Climate Change & Thames Region

- Main driver of physical flood risk sources in order of uncertainty:-
 - Waves
 - Flash flooding - convective storms
 - Fluvial Flow
 - Sea Level Rise
 - Surge
 - Joint Probability

The following section will show how we are addressing these changes in our strategic planning

4. Thames Catchment Flood Risk Management Plan (CFMP)

The Environment Agency has addressed the future planning of flood risk management by dividing the catchment between the main fluvial flood plain and the tidal estuarial floodplain. The Thames CFMP addresses the fluvial floodplain. It has just been published for consultation and aims to provide a high level strategic plan for flood risk management in the catchment. It has tested broad options at a strategic level and is aimed to have a major influence on investment choices and probably most importantly influencing strategic spatial planning through the process of Regional Spatial Strategy development.

Broad scale modelling of the effects of climate change show have shown that climate change will be the greatest influence in terms of increasing flood risk. The plan has taken note of national guidance to allow for a 20% increase in flood flows for the end of the century and has modelled other scenarios.

The diagram below shows that the effect of climate change dominates any other major strategic influences on the catchment.

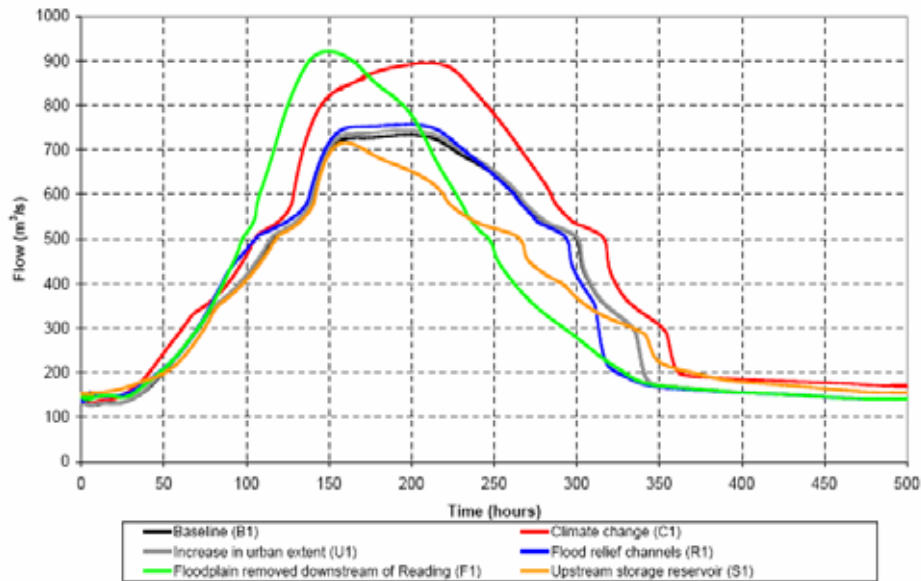


Figure 4.27 Comparison of the 1 in 100 year climate change and infrastructure related scenarios at Kingston

Source Thames CFMP summary document Environment Agency 2007

The peak flows at Kingston, which is at the downstream limit of the fluvial Thames, show that the effects of climate change are similar to artificially removing the floodplain for about half the Thames length. It will be uneconomic to manage the increase in risk from climate change by improving and or building flood defences. Therefore it is recommended that an approach is taken which tailors the strategic response to the differing characteristics of the catchment.

The main messages coming out of the strategy are:

- i Climate change will be the major cause of increased flood risk in the future.
- ii Flood defences cannot protect everything.
- iii The floodplain is our biggest asset in managing flood risk
- iv Planning is critical - cycle of development and urban regeneration is a crucial opportunity to manage flood risk.

The challenge will be to implement the strategy by engaging with the key stakeholders in the Region to ensure we manage the increase in flood risk by making the best use of the planning system and informing and encouraging the population to be aware of flood risk and prepare for it where this is unavoidable. This will entail the further development of the Flood Warning system that the Environment Agency provides, which has been successful in improving the resilience of the community to flood events.

5. Thames Estuary 2100 Project

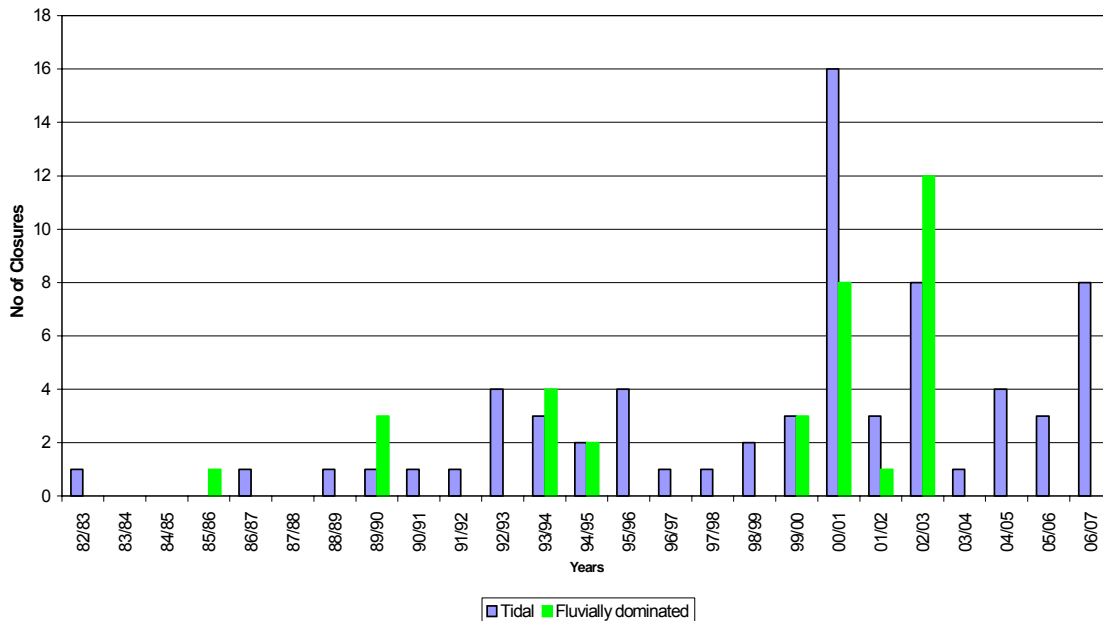
The Thames Estuary 2100 Project (TE2100) has been set up by the Environment Agency to develop a flood risk management plan for the Thames Estuary for the next 100 years. The Thames estuary depends on an extensive flood defence infrastructure that has built up over the centuries in response to rising sea levels and the development of London in the estuarial floodplain. The last major investment took place in the 1970s as a result of the extensive flooding from a storm surge in 1953 and resulted in the construction of the Thames Barrier and associated many kilometres of linear defences. The challenges of climate change with rising sea lev-



els, possibly more intense storms and higher fluvial flows into the estuary, an ageing defence infrastructure and the challenge of new development in or near the floodplain all have to be factored into the TE2100 planning.

The following graph shows the pattern of Thames Barrier closures that is slowly increasing. The Thames estuary project will need to devise a plan to manage this growth in flood risk.

**Thames Barrier Tidal, Fluvially dominated Closures as at
(21 March 2007)**



TE2100 has devised an approach to the development of the strategy centred on dealing with the uncertainties mentioned above. This essentially allows for the developing of early conceptual options. These are initial packages of measures relevant to each reach of the Estuary, which are then progressively iterated and tested against a decision testing framework. This framework tests the suitability of the options against differing futures driven by a range of socio-economic and climate change scenarios. By developing this approach options can be refined and the most resilient, effective and cost beneficial solution arrived at. Using this method it will be possible to detect thresholds which will be critical to differing options. For example modifying the existing Barrier and defences will only cope with a certain level of sea level rise and increase in storm surge.

The approach is based largely on the Risk, Uncertainty and Decision Making Technical Report produced by the Environment Agency for UKCIP and other tools and assessment criteria based on existing and developing guidance. TE2100 is also working with partners in Holland, Germany and Belgium in the ESPACE Project (European Spatial Planning Adapting to Climate Events) to develop and refine transnational methods. The involvement of stakeholders in London and down the estuary will be critical to success. TE2100 has and will continue to work with a wide variety of groups to ensure that the final Flood Risk Management Plan will, as far as possible be compatible with the varying interests that the estuary supports. The estuary has for example a high ecological value and is a major recruiting ground for some fish populations.

To support the development of the plan an extensive study and consultation programme is underway (from 2003 – 2008). This will enable full understanding of the processes and issues critical to testing and developing options. An essential part of this is work to reduce the uncertainty attached to climate change. TE2100 is working with the Hadley Centre and others to pro-

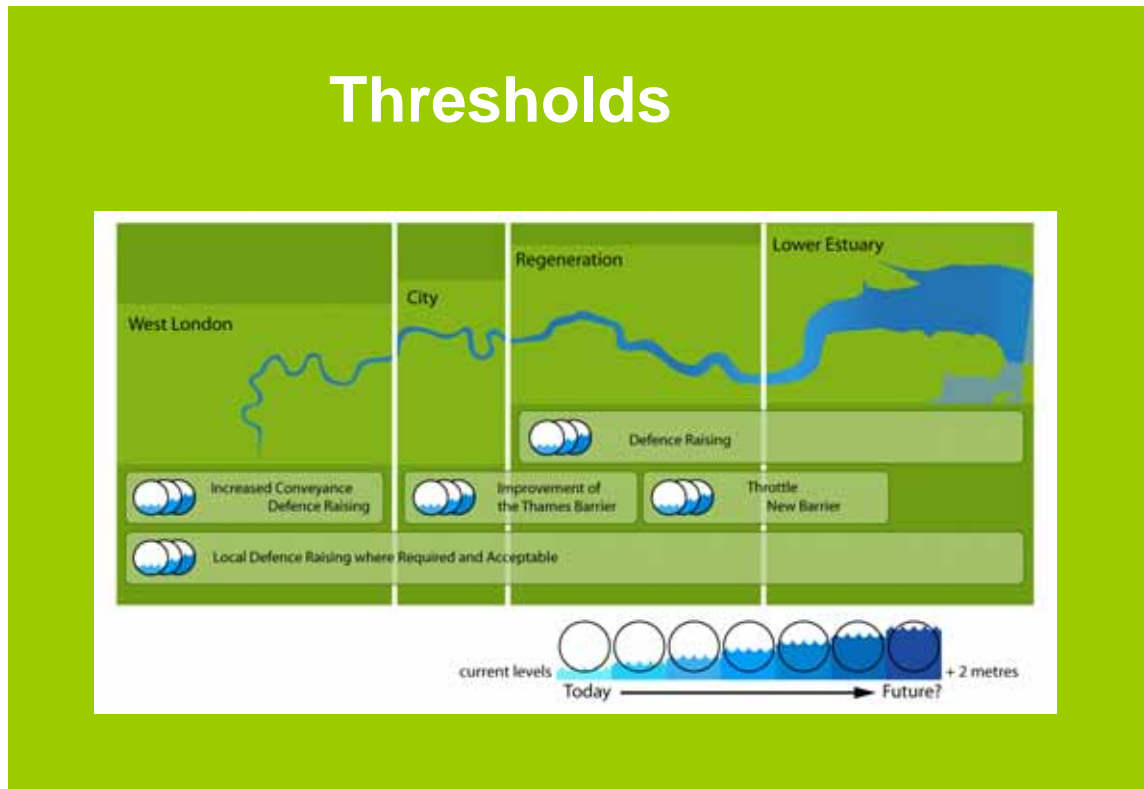
duce probabilistic scenarios for sea level rise, storm surge, fluvial flow, etc in conjunction with the work that the UK government is undertaking to produce the next climate change scenarios for the UK in 2008. The project is also maintaining close links with the British Antarctic Survey to keep abreast of the latest developments on ice cap melt.

The project has already been used as a case study for the recent Stern Report and the forthcoming chapter 2 of the International Panel on Climate Change 4th Assessment report.

Results so far confirm that the existing system is robust and should continue to provide a high standard of flood risk management until 2030 under most climate change scenarios.

Also the project has identified thresholds for example of sea level where existing and new flood risk management measures will be effective. By doing this high level options have been produced which give routes through the century where new measures will be introduced such as wall raising of flood storage schemes at a rate dependent on how fast climate the effects of climate change takes place.

The following figure demonstrates which measures may be effective in different parts if the estuary for differing water levels



As with the Thames CFMP the TE2100 project has demonstrated that the spatial planning system will be critical to enable development to take place in the areas at lowest risk and where relevant to be resilient to the effects of flooding. New government guidance (PPS 25) is critical to enable this to happen.

In summary TE2100 has been set up to look at long-term planning for the future of Flood Risk Management in the Thames Estuary. Climate Change is central to many of the drivers and issues that will be considered, and the approach has accordingly been structured around this. The long-term success of the final Flood Risk Management Plan will be determined to a large extent by how well this strategic approach copes with the challenge that climate change presents.



6. Conclusion

This paper gives a high level presentation of the approach to managing flood risk in the Thames catchment in relation to the increasing influence that climate change will bring to bear. It shows that the Environment Agency is being proactive in developing new techniques to decision making and strategy development given this unprecedented challenge.

7. Literature

References

- i Thames Region Draft Catchment flood management plan, Environment Agency 2007
- ii Flood and Coastal Defence Appraisal Guidance FCDPAG3 Economic Appraisal Supplementary Note to Operating Authorities – Climate Change Impacts October 2006
- iii Reeder Donovan Wicks CIWEM Annual Conference 2005
- iv OECD Working Party on Global and Structural Policies
Metrics for Assessing the Economic Benefits of Climate Change Policies: Sea Level Rise R.J. Nicholls et al July 2006
- v The Future Oceans Warming Up, Rising High Turning Sour
German Advisory Council on Global Change (WBGU)
R Schubert et al January 2006

Die Schweiz im Jahre 2050: Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserwirtschaft und auf andere wichtige Bereiche

Bruno Schädler
Bundesamt für Umwelt

1. Einleitung

Wie wird sich der globale Klimawandel im Jahr 2050 auf die Schweiz auswirken? Welches sind mögliche Folgen und Verletzlichkeiten für Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft in der Schweiz? Sind neue Maßnahmen und Anpassungsstrategien notwendig? Diese Fragen hat das „Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC)“ zusammen mit über 100 Fachleuten aus den verschiedensten Fachbereichen diskutiert und Antworten dazu in einem umfassenden Bericht (OcCC, 2007) dargelegt.

Das OcCC wurde 1996 von der Schweizer Regierung eingesetzt und hat den Auftrag, Empfehlungen zu Fragen des Klimas und der Klimaänderungen zu Händen von Politik und Verwaltung zu formulieren. Rund 30 Persönlichkeiten aus Forschung, Wirtschaft und Bundesverwaltung wirken in diesem Fachgremium mit.

Aus der Vielzahl von möglicherweise beeinflussten Bereichen aus Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft wurden die folgenden, untereinander auch mehrfach vernetzten und sich überlappenden Themen zur näheren Bearbeitung ausgewählt:

- Landökosysteme
- Landwirtschaft
- Wasserwirtschaft
- Gesundheit
- Tourismus
- Energie
- Bauten und Infrastrukturen
- Urbane Schweiz
- Versicherungen

Um sicher zu stellen, dass alle Arbeitsgruppen zu vergleichbaren Aussagen kommen, wurde vorgängig ein Klimaszenario für das Jahr 2050 erarbeitet und vorgegeben.

2. Das Klima bis 2050

2.1 Ein Blick zurück

In der Schweiz hat die Temperatur im 20. Jahrhundert in der Westschweiz um 1.6 Grad, in der Deutschschweiz um 1.3 Grad und auf der Alpensüdseite um 1.0 Grad zugenommen. Auch das Niederschlagsregime hat sich verändert. Die Jahresniederschläge haben im 20. Jahrhundert um rund 120mm (8 %) zugenommen. Zu dieser Zunahme haben insbesondere die Winterniederschläge im nördlichen und westlichen Alpenraum mit einem Anstieg von 20 - 30 % beigetragen (Schmidli et al., 2001). Da mit der Erwärmung auch die Verdunstung um 105 mm zugenommen hat, ist der Gesamtabfluss im Jahresmittel praktisch unverändert geblieben.

Diese Veränderungen im Klima haben sich direkt auf die Massenbilanz der Alpengletscher ausgewirkt. Seit dem Hochstand der Gletscher Mitte des 19. Jahrhunderts haben die Schweizer Gletscher mehr als die Hälfte ihres Volumens verloren. Obwohl diese Verluste mehr als 50 Milliarden Kubikmeter Wasser betragen, stellen sie insgesamt nur einen sehr kleinen Anteil am



Abfluss dar (vgl. Abbildung 3). Für ein kleineres oder mittleres Fließgewässer im Gebirge können sie jedoch in besonders warmen Jahren einen erheblichen Beitrag bedeuten.

2.2 Blick in die Zukunft

Damit alle Arbeitsgruppen von denselben Zukunftsperspektiven ausgingen, wurden Klimaszenarien bereitgestellt, welche dem Stand des heutigen Wissens (IPCC, 2007) entsprechen. Die hier beschriebenen Szenarien stützen sich auf umfangreiche Simulationen mit globalen und regionalen Klimamodellen in Europäischen Klimaforschungsprojekten (PRUDENCE, Christensen et al. 2007; STARDEX, Goodess 2003), und deren spezifischen Auswertung für den Alpenraum (Frei 2004, Frei et al. 2006, Schmidli et al. 2007). Der Einbezug verschiedener Szenarien über die zukünftige Emission von Treibhausgasen erlaubt eine quantitative Beschreibung der involvierten Unsicherheiten. Die Szenarien beschreiben die Änderungen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2050) im Vergleich zum Ende des 20. Jahrhunderts (1990).

Die Temperatur wird demnach um 1 bis 3.5 °C ansteigen. Die Jahreszeiten unterscheiden sich dabei nur wenig und regionale Erwärmungsunterschiede sind kleiner als der abschätzbare Unsicherheitsbereich. (Abbildung 1). Als Folge der Erwärmung verschiebt sich die vertikale Temperaturstruktur in der Atmosphäre. Damit wird erwartet, dass auch die mittlere Schneegrenze und die Permafrostgrenze um 150 bis 600 m ansteigen.

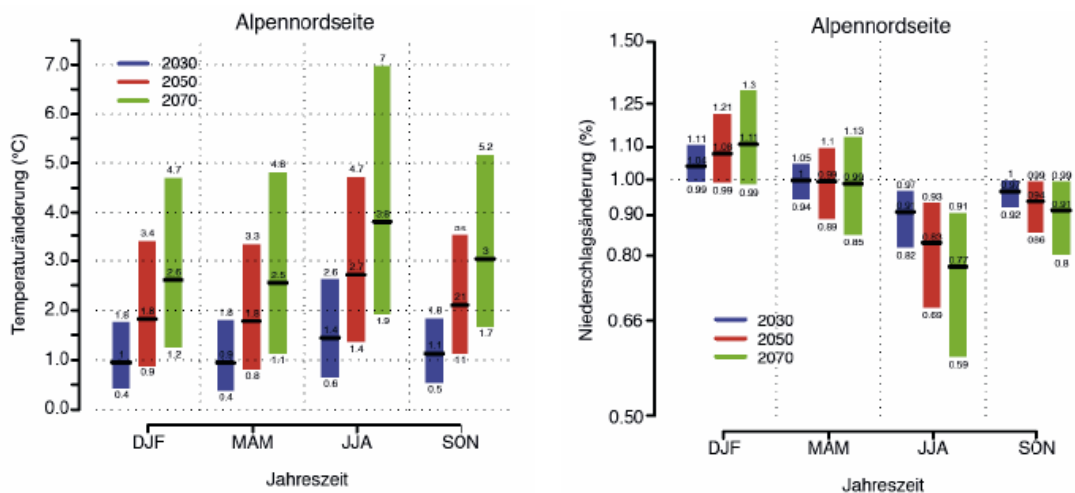


Abb. 1: Änderung der mittleren Temperatur (links, in Grad) und des mittleren Niederschlags (rechts, Verhältnis Zukunft/Gegenwart) in den vier Jahreszeiten für die Nordschweiz. Die Balken zeigen die Unsicherheiten und die Linien die jeweils beste Schätzung der Änderung. Die Änderungen sind dargestellt für die Perioden 2020 - 2040 (blau), 2040 - 2060 (rot), 2060 - 2080 (grün) gegenüber 1980 - 2000. (aus Frei 2004.)

Im Gegensatz zur Temperatur ändert sich der mittlere Jahresgang der Niederschlagsmengen erheblich, mit Zunahmen von 0 – 20 % im Winter (Dezember - Februar) und Abnahmen von 5 – 30 % im Sommer (Juni - August). Im Frühling und Herbst liegen die Änderungen dazwischen. Die Verschiebung zu trockeneren Sommern dominiert die Änderung in den Jahresniederschlagsmengen, für welche eine Abnahme um 5 – 10 % geschätzt wird. (Abbildung 1). Diese Veränderungen resultieren im Mittel in einer Abnahme der mittleren jährlichen Niederschläge um 5 - 7 Prozent (entsprechend im Norden um 75 mm und im Süden um 140 mm).

Die Auswertungen der Klimasimulationen erlauben eine grobe Quantifizierung der Niederschlagsextremwerte für Jährlichkeiten zwischen 5 und 50 Jahren. Es zeigen sich nur geringe Unterschiede für die Extreme mit einer Dauer zwischen 1 und 5 Tagen. Zwischen den Jahres-

zeiten muss unterschieden werden: Im Herbst wird mit einer Zunahme der Extremwerte bis zu 10 % auf der Alpennordseite respektive 20 % auf der Alpensüdseite gerechnet. Im Winter und Frühling liegt die Zunahme beidseits der Alpen zwischen 0 und 20 %. Im ungünstigsten Fall kann ein heute 100 jährliches Ereignis in Zukunft zu einem 20 jährlichen werden (Frei et al. 2006). Im Winter und Frühling wird als Folge der Kombination von höheren Spitzen und längerer Dauer eine Zunahme der Niederschlagsvolumen erwartet.

Für den Sommer erlauben die große Variabilität der Resultate sowie das eingeschränkte Vertrauen in die Modellsimulationen keine Aussagen. Allenfalls sind Tendenzen für eine Zunahme nordalpin und eine Abnahme südalpin erkennbar.

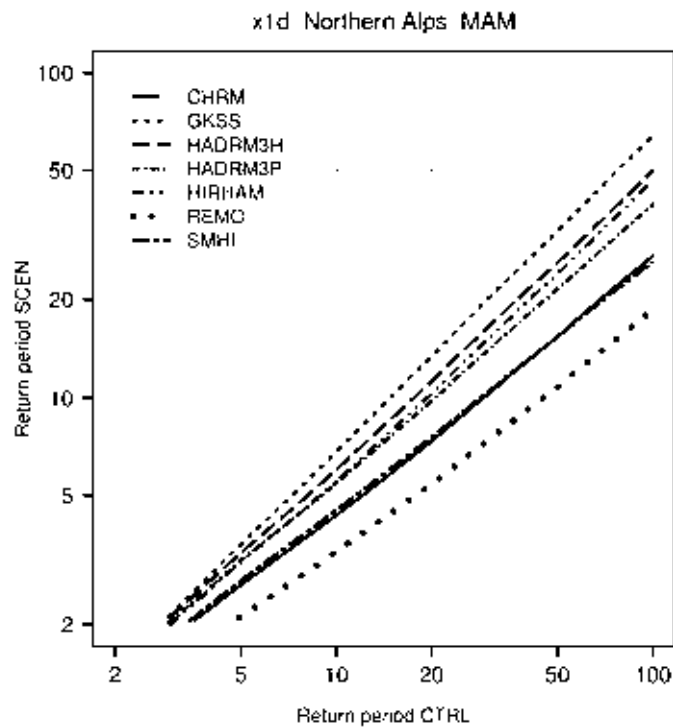


Abb. 2: Änderung der Häufigkeitsverteilung der 1-Tages Starkniederschläge im Frühjahr für den schweizerischen Alpenraum. Vergleich der Gegenwart (CTRL) mit dem Szenario 2050 (SCEN) für verschiedene regionale Modelle. Frei et. al (2006).

3. Auswirkungen auf den Wasserhaushalt

Gewässersysteme – Bäche, Flüsse, kleine und große Seen, Wasser im Untergrund, in Poren und Spalten sowie das Grundwasser und letztlich auch die großen alpinen Wasserspeicher wie Schnee, Firn und Gletschereis – sind Teile des Wasserkreislaufs. Durch Verdunstung und Niederschlag verbindet er die Atmosphäre, den Boden, die Vegetation und die Gewässersysteme. Der Wasserkreislauf wird geprägt durch das Klima und das aktuelle Wettergeschehen; umgekehrt beeinflusst der Wasserkreislauf aber auch das Klima und das Wetter – ein äußerst komplexer Regelkreis. Der Mensch greift zudem in diesen Regelkreis ein.

Die Abflüsse sind indirekt an die Niederschläge gekoppelt. Über mehrere Jahre hinweg folgen sie bei relativ konstanter Verdunstung den Veränderungen der Niederschläge. Aber nur ein geringer Anteil der Niederschläge fließt direkt ab; der größere Teil wird beispielsweise in der Schneedecke und in Gletschern, im Boden, im Grundwasser und in natürlichen und künstlichen



Seen gespeichert. Kurzfristig wird der Abfluss durch die Freigabe des Wassers aus allen diesen Speichern beeinflusst.

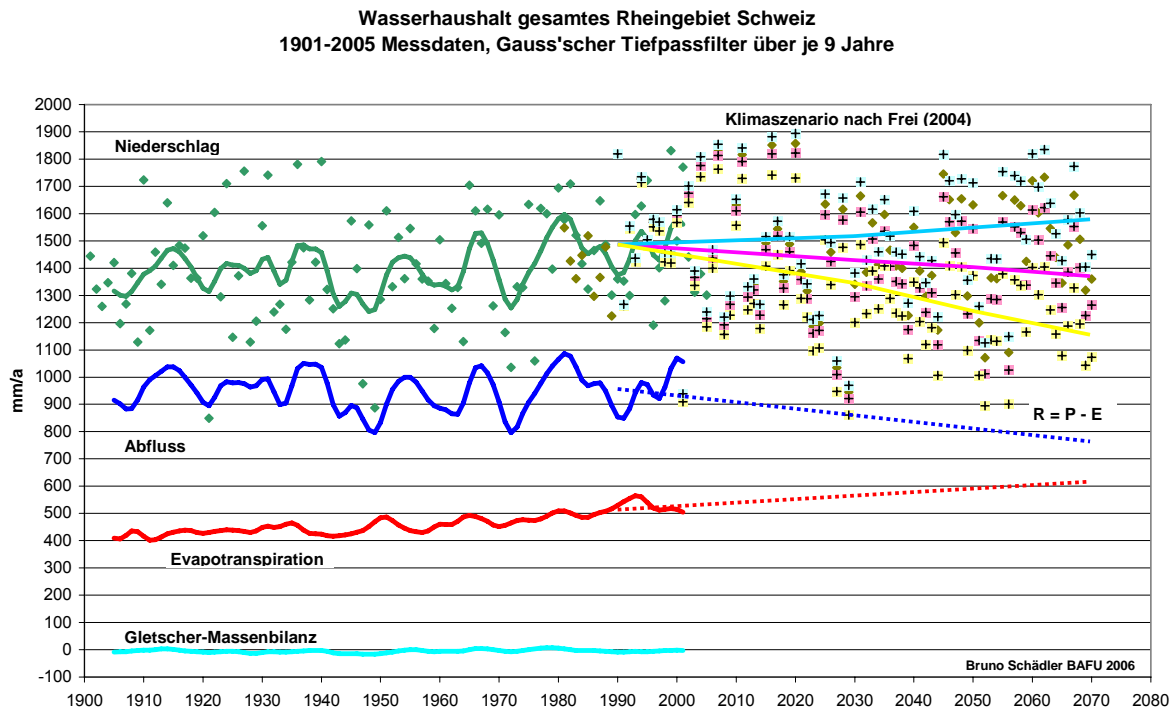


Abb. 3: Der Wasserhaushalt der Schweiz gemessen seit 1900 (Schädler et al., 1992) und als Szenario bis 2070. Dargestellt bis 2005 sind die jährlichen Niederschlagswerte sowie die Tiefpass gefilterten Werte über jeweils 9 Jahre für Niederschlag, Abfluss, Verdunstung. Für die Niederschlags-Szenarien sind die 5 %, 50 % und 95 % Quantile aus Frei (2004) dargestellt (analog Abbildung 1). Entsprechend dieser Szenarien sind die Jahreswerte aus dem 20. Jh. ins 21. Jh. übertragen und verändert worden. Die Verdunstung ist linear extrapoliert und der Abfluss aus der Wasserbilanz mit dem 50 % Quantil des Niederschlages berechnet worden.

Ausgehend vom Grad der Vergletscherung und Schneebedeckung lassen sich verschiedene Abflusstypen unterscheiden, die unterschiedliche jahreszeitliche Abflussmuster aufweisen. Eine Auswahl von Abflusstypen ist in Abbildung 4 dargestellt. Fließgewässer, die hauptsächlich durch das Abschmelzen von Gletschern und Schnee gespeist werden (Typ glazial), weisen die größten Abflussschwankungen auf. Hier kann sich der mittlere Monatsabfluss zwischen Winter und Sommer leicht um einen Faktor 30 verändern. Am geringsten sind die Abflussschwankungen bei Fließgewässern, die überwiegend vom Regen abhängig sind (Typ pluvial).

Aufgrund des vorliegenden Klimaszenarios muss bis ins Jahr 2050 mit den folgenden Veränderungen im Wasserkreislauf gerechnet werden:

- Die Verdunstung wird als Folge der Erwärmung generell weiter zunehmen. Wegen der Austrocknung des Bodens kann die Verdunstung lokal und zeitlich befristet auch eingeschränkt und folglich vermindert sein.
- Mit der Verringerung der Niederschlagsmenge und dem Anstieg der Verdunstung, dürfte sich das mittlere jährliche Abflussvolumen um 7 bis 12 % verringern. Die Beiträge des Schmelzwassers der Gletscher sind mit weniger als 1 % des Abflusses in großen Flüssen vergleichsweise gering und können den Rückgang auch vorübergehend nicht kompensieren.

- Bei einer mittleren Erwärmung wird die Gletscherfläche in den Alpen bis 2050 um rund drei Viertel abnehmen.
- In tieferen und mittleren Höhenlagen fallen wegen der Erwärmung weniger Niederschläge in Form von Schnee. Die Schneegrenze, welche schneebedeckte Gebiete von den tiefer liegenden Gebieten abtrennt, steigt bei einer mittleren Erwärmung um ungefähr 360 m. Als Folge des veränderten Auf- und Abbaus der Schneedecke, des Anstiegs der Schneegrenze und des Abschmelzens der Gletscher werden sich die Abflussregimes (Abbildung 4) um etwa eine bis zwei Regimestufe nach unten verschieben.
- Die Grundwasserneubildung wird im Sommer und im Herbst in allen nicht vergletscherten Gebieten abnehmen.

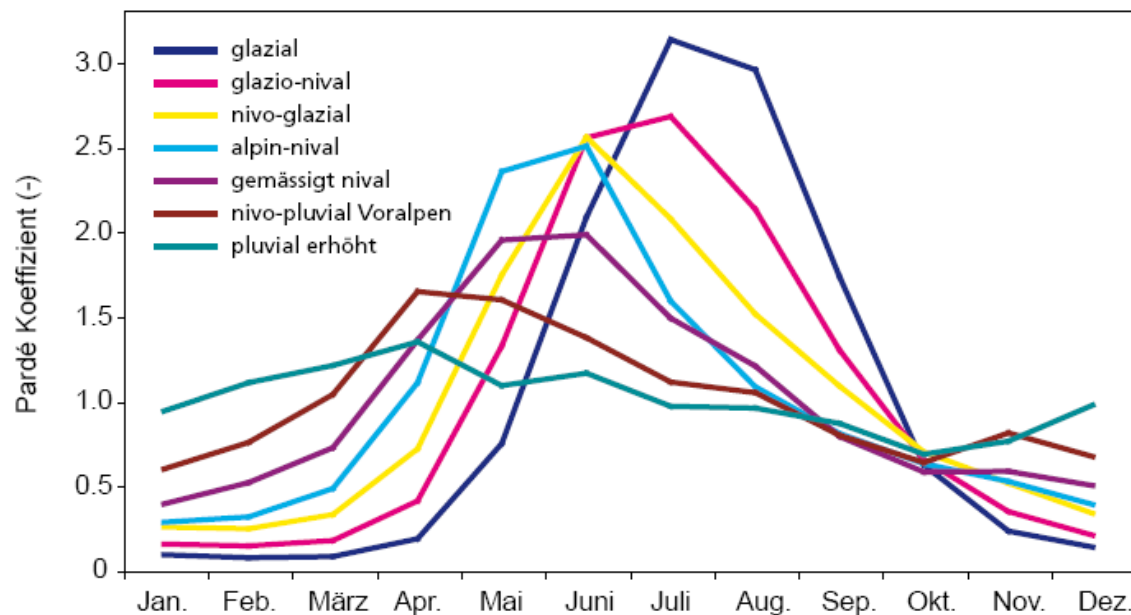


Abb. 4: Mittlere Abflussregimes von schweizerischen Einzugsgebieten mit unterschiedlicher Höhenlage. Das Spektrum reicht vom Regime, das hauptsächlich vom Regen abhängig ist (pluvial erhöht, mittlere Höhe 800 m ü.M.) bis zum Regime, das hauptsächlich von den Gletschern geprägt ist (glazial, 2700 m ü.M.). Der Höhenunterschied zwischen den einzelnen Regimes beträgt ungefähr 300 m. Der Pardé Koeffizient ist das Verhältnis des mittleren monatlichen Abflusses zum mittleren jährlichen Abfluss. (glazial: von Gletschern geprägt; nival: von Schnee geprägt; pluvial: von Niederschlägen geprägt)

4. Extreme

4.1 Hochwasser

Aussagen zur Entwicklung der Hochwasserabflüsse sind saisonal, regional und auch bezogen auf die Einzugsgebietsgröße differenziert zu betrachten (KOHS, 2007).

Nordalpine Gebiete unter 1500 m ü.M.: Im Winter sind durch erhöhte Bodenwassergehalte und durch höhere Niederschlagsleistungen höhere Hochwasserspitzen zu erwarten. Trotz Erwärmung bleiben im Mittelland Schneedecken und damit kombinierte Schmelz-/Regenereignisse weiter möglich. Der Einfluss von Schmelzereignissen nimmt wie bisher mit der Höhenlage der Einzugsgebiete im betrachteten Höhenbereich zu. In diesen Gebieten treten bereits heute im



Winter und Frühjahr die Jahreshochwasser auf. Sie können auch in Zukunft bis ins Frühjahr vorkommen, werden aber dem Klima entsprechend höher.

Im Sommer werden die Hochwasser besonders in tieferen Lagen geringer ausfallen, weil die Abflussdisposition der Böden durch verringerte Niederschläge und höhere Verdunstung deutlich reduziert ist. Allerdings ist zu beachten, dass im Sommer immer auch mit konvektiven Starkniederschlägen zu rechnen ist, welche hauptsächlich in kleinen Einzugsgebieten zu Hochwasser führen können.

Nord- und inneralpine Gebiete über 1500 m ü.M.: Die Regimes in den Alpen wechseln von glazialer zu nivaler Prägung. Im Winter steigen die Abflüsse wegen gelegentlicher Regenfälle etwas an. Daraus ergeben sich jedoch keine wirklichen Hochwasser. Im Frühjahr sind kleine Schmelzhochwasser möglich, die Spitzen werden größer als heute. Die Jahreshochwasser werden jedoch wie heute im Sommer auftreten und voraussichtlich nicht größer werden. Im Herbst sind kaum Veränderungen zu erwarten.

Alpensüdseite: Im Winter und Frühjahr lassen die stärker wachsenden Niederschlagsleistungen auch eine entsprechende Hochwasserzunahme erwarten. Im Sommer deuten abnehmende Niederschläge auf kleinere Abflussspitzen hin. Maßgebend für die Jahreshochwasser bleiben die hydrometeorologischen Bedingungen im Herbst. Dabei lassen die höheren Niederschlagsleistungen eine Zunahme der Hochwasser erwarten.

4.2 Feststofftransport

Durch den Rückzug der Gletscher und das Auftauen von Permafrost nimmt in Gebieten zwischen ca. 2300 und 2800 m ü.M. das Feststoffpotential deutlich zu (Abbildung 5). Der neue lose Schutt sammelt sich in Gräben und Bachbetten und kann bei Hochwasser, ausgelöst durch möglicherweise intensivere und bis in größere Höhen flüssige Niederschläge, mitgerissen und als Murgang zu Tal und bis in bewohnte Gebiete gelangen. Erosion, Geschiebetransport und Feststoffablagerungen sind bei Hochwasser sehr oft für die großen Schäden verantwortlich. Das Potential für solche Ereignisse wird, allerdings nur im Gebirgsraum, deutlich steigen.

In den Voralpen lassen die erwähnten künftigen hydrometeorologischen Bedingungen (Niederschlag, Schneedecke, Verdunstung) im Winter und Frühjahr über längere Phasen auf wassergesättigte Böden schließen. Nasse Böden in steilen Hängen können bei intensiveren Niederschlägen als Rutschungen niedergehen. Insgesamt nimmt damit das Schadenrisiko für Infrastrukturanlagen wie Verkehrsverbindungen und touristische Einrichtungen im Berggebiet zu.

4.3 Trockenheit

Extreme Trockenperioden werden – entsprechend der Abnahme der mittleren Niederschläge und der Anzahl der Niederschlagstage – im Sommer länger und häufiger auftreten. Die Kombination von Niederschlagsabnahme und höherer Verdunstung kann regional zu einer Abnahme des Feuchtigkeitsgehalts im Boden führen. Mit der Abnahme der Schneereserven in den Alpen werden zudem Flüsse, die heute im Sommer von Schmelzwasser gespeist werden, häufiger austrocknen sowie die saisonale Wasserspeicherung in den Alpen abnehmen.



Abb. 5: Blockgletscher im Suvretta da San Murezzan (Engadin, Schweiz). Heute sind diese großen Schuttmassen meist gefroren (Permafrost) und dadurch wenig der Erosion ausgesetzt. Einzelne Erosionsrinnen sind jedoch bereits sichtbar. (Foto: B. Schädler)

5. Auswirkungen Sektoren der Wasserwirtschaft

5.1 Hochwasserschutz

Sowohl die erwartete Zunahme des Schadenpotentials als auch die Möglichkeit häufigerer Hochwasser erfordern einen höheren Schutz vor Hochwasser. Die flexible Hochwasserstrategie der Schweiz beinhaltet raumplanerische Maßnahmen zur Begrenzung des Schadenpotentials, Objektschutz zur Minderung der Schadenempfindlichkeit, bauliche Schutzmassnahmen sowie Notfallmaßnahmen. In jedem Fall muss dem erhöhten Unsicherheitsgrad in der Hochwasserschutzbemessung durch die Berücksichtigung des Überlastfalls minimiert werden. Eine ständige Überprüfung der Risikosituation ist Voraussetzung für eine langfristige Wirksamkeit der Umsetzung der Strategie, da sich sowohl Schadenpotential als auch Gefahrensituation laufend ändern. Auch könnten in Zukunft alpine Speicherbecken vermehrt für den Rückhalt von Hochwasserspitzen eingesetzt werden. Ihr Einsatz als Mehrzweckanlagen wird an Bedeutung gewinnen.

5.2 Wasserversorgung für Trink- und Brauchwasser

Als Folge der Klimaänderung wird die Grundwasserneubildung im Winter eher zunehmen und im Sommer und Herbst zurückgehen. Die Grundwasserstände werden insgesamt leicht sinken. Das geringere Wasserdargebot führt zu einer Konkurrenzsituation zwischen verschiedenen Nutzungen und Nutzern:



- Trinkwassernutzung,
- Nutzung für Kühlung von Industrieanlagen,
- Bedarf für die landwirtschaftliche Bewässerung
- Anspruch der Gewässerökologie auf genügend Wasser
- Ansprüche von unterliegenden Anrainern.

Wasser wird damit – allerdings zeitlich und örtlich beschränkt – im Sommer zunehmend zu einem knappen Gut werden. Die Notwendigkeit einer geeigneten Bewirtschaftung wird zunehmen. Diese wird Auswirkungen auf Nutzungs-Prioritäten, Nutzungs-Rechte und Nutzungs-Preise haben. Neben den Ansätzen der Bewirtschaftung sind auch Maßnahmen auf der Nachfrageseite zu treffen, insbesondere bei der Landwirtschaft (effizienter Einsatz von Bewässerungstechniken bis hin zur Wahl der angepflanzten Kulturen) und beim Brauch- und Trinkwasserbedarf.

5.3 Wassernutzung zur Energieerzeugung

Die Schweiz deckt rund 60% der Elektrizitätsnachfrage respektive 1/8 des gesamten Energiebedarfs durch Wasserkraft. Insgesamt muss wegen der Abnahme des Abflussvolumens mit einer Einbusse bei der hydroelektrischen Energieproduktion von etwa 7 Prozent gerechnet werden.

Auch die Produktion in Kernkraftwerken und anderen thermischen Kraftwerken wird von der Klimaänderung betroffen sein. Wegen der ansteigenden Wassertemperaturen und der abnehmenden Abflüsse werden sie weniger Kühlleistung aus den Gewässern beziehen können, insbesondere während Hitzeperioden wie im Sommer 2003. Dies erfordert eine Anpassung der Kühlsysteme von bestehenden Kraftwerken.

5.4 Rheinschifffahrt

Jährlich werden 9 Mio. Tonnen Güter auf dem Rhein in die Schweiz transportiert, was 15 % des mengenmäßigen Außenhandels entspricht. Während Niedrig- und Hochwassern kann die Rheinschifffahrt eingeschränkt sein. Wegen des Niedrigwassers können die Schiffe nicht gleich viel laden wie bei normalem Pegelstand. Die Klimaänderung wird einen Einfluss auf den Abfluss haben. Die Wahrscheinlichkeit von längeren Perioden mit außergewöhnlich niedrigen Wasserständen wird bis 2050 zunehmen. Obwohl der Fortbestand der Schifffahrt dadurch nicht beeinträchtigt wird, dürfte die zeitliche Zuverlässigkeit der Rheinschifffahrt in Mitleidenschaft gezogen werden. Fortschritte bei den saisonalen Voraussagen der Wetterentwicklung und damit der Wasserstände werden in Zukunft die logistische Planung vereinfachen und die Planungssicherheit erhöhen.

5.5 Gewässerökologie

Die Klimaänderung hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Wassertemperaturen. In der Schweiz werden die Wassertemperaturen in den Flüssen und in der Oberflächenschicht der Mittellandseen bis 2050 um ungefähr 2 °C gegenüber 1990 ansteigen. Als Folge der künftigen Erwärmung kann es in Seen, die heute einen ausreichenden Sauerstoffgehalt aufweisen, zu einer Verschlechterung der Lebensbedingungen kommen.

Die Erwärmung der Gewässer hat Auswirkungen auf Kaltwasserfische; ihre geeigneten Habitate werden verkleinert und die Artenzusammensetzung verändert sich. Kalt- und Warmwasserfische profitieren von den wärmeren Wintern. Abschätzungen zeigen, dass bei einer Erwärmung von 2 °C bis 2050 die Lebensräume der Salmoniden in der Schweiz um 1/5 bis 1/4 gegenüber heute schrumpfen werden. Von den wärmeren Wintertemperaturen profitieren sowohl Kalt- als auch Warmwasserfische; die Wachstumsphasen dauern länger und die Fische wachsen schneller. Als Folge davon werden die Gewässer geeigneter für Karpfen (Cypriniden) und exotische Fischarten. Krankheiten wie die Parasiteninfektion PKD (Proliferative Kidney Disease) werden sich bei wärmeren Wassertemperaturen ausbreiten.

6. Auswirkungen auf andere Sektoren

Praktisch alle in dieser Studie behandelten Sektoren haben mehr oder weniger enge Verbindungen zum Thema Wasser. Im Folgenden werden noch kurz die beiden wichtigen Bereiche Tourismus und Landwirtschaft gestreift.

6.1 Tourismus:

Heißere Sommer können einheimische Destinationen, insbesondere an Seen und in den Alpen, für den Tourismus attraktiver machen. Im Winter hingegen führt die steigende Schneefallgrenze dazu, dass Skigebiete in den Voralpen langfristig kaum mehr rentabel betrieben werden können. Höhere Frequenzen im Sommer werden die Einnahmefälle von Bergbahnen und Hotellerie im Winter nicht kompensieren können. Hoch gelegene Wintersportorte können möglicherweise profitieren. In diesen Gebieten muss mit einem Druck auf den Zweitwohnungsmarkt gerechnet werden. Die zunehmende Gefährdung der Verkehrswege durch Extremereignisse in den Alpen erschwert die Erreichbarkeit der Tourismusorte. Die abnehmende Schneesicherheit oder die erwarteten Veränderungen im Landschaftsbild insbesondere durch den massiven Rückzug der Gletscher werden die Attraktivität der alpinen Tourismusgebiete stark beeinflussen. Der tauende Permafrost stellt für zahlreiche Bergbahnen ein kostspieliges Risiko dar, da Fundamente von Masten und Stationen in höheren Lagen häufig im gefrorenen losen Gestein verankert sind. Die Steinschlag- und Felssturzgefahr im Gebirge erhöht sich ebenfalls.

Um die Attraktivität von Tourismusdestinationen zu erhalten, muss das Angebot den neuen Bedingungen angepasst werden. Mögliche klimatische und landschaftliche Veränderungen müssen bereits in der Planung berücksichtigt werden.

6.2 Landwirtschaft:

Für die Schweizer Landwirtschaft dürfte sich eine moderate Erwärmung von weniger als ca. 2–3 °C im Allgemeinen positiv auswirken. Die Produktion der Wiesen und der potenzielle Ernteertrag vieler landwirtschaftlicher Kulturpflanzen werden als Folge der längeren Vegetationsperiode bei ausreichendem Wasser- und Nährstoffangebot zunehmen. Davon wird auch die Tierproduktion profitieren können. Im Gegenzug werden das Wasserangebot im Sommer abnehmen, das Aufkommen von Unkräutern und Insektenschädlingen verstärkt und Schäden durch Extremereignisse zunehmen. Durch angepasste Auswahl der Kulturpflanzen, der Anbauverfahren und der Betriebsführung wird sich die Landwirtschaft an einen moderaten Anstieg der mittleren Temperatur von 2–3 °C bis 2050 anpassen können. Problematisch ist allerdings die Zunahme von Hitze- und Trockenperioden. Zudem verstärken häufigere Starkniederschläge die Bodenerosion. Der Bewässerungsbedarf wird vielerorts steigen. Eine Diversifizierung der Betriebe und höhere Versicherungsdeckung können diese Risiken vermindern.

Bei einer Klimaerwärmung von mehr als 2–3 °C bis 2050 werden hingegen die Nachteile überwiegen: Während der Vegetationsperiode ist vermehrt mit Wassermangel zu rechnen, und beim Getreide und den Körnerleguminosen hat die beschleunigte Pflanzenentwicklung Ertragseinbußen zur Folge. In der Schweiz werden jedoch bis 2050 die Liberalisierung der Märkte und die Anpassungen der Agrarpolitik wichtigere Einflussfaktoren sein als die Klimaänderung.

7. Zusammenfassung

In der Schweiz hat die Regierung bereits 1996 das „Beratende Organ für Fragen der Klimaänderung (OcCC)“ eingesetzt. Es hat den Auftrag, Empfehlungen zu Fragen des Klimas und der Klimaänderungen zu Händen von Politik und Verwaltung zu formulieren.

Das OcCC hat nun in Zusammenarbeit mit mehreren Expertengruppen eine Studie „Auswirkungen der Klimaänderung bis 2050 in der Schweiz auf ausgewählte Bereiche“ erarbeitet, welche



anfangs 2007 publiziert wird. Ausgehend von einem für alle Expertengruppen gegebenen Klimaszenario für das Jahr 2050 wurden die Auswirkungen und der allfällige Anpassungs- und Handlungsbedarf nicht zuletzt auch aus politischer Sicht identifiziert.

Die ausgewählten Bereiche sind:

Landökosysteme, Landwirtschaft, Wasserwirtschaft, Gesundheit, Energiesektor, Tourismus, Versicherungs- und Finanzsektor, Infrastrukturen und Bauten sowie Urbanes System Schweiz
Das probabilistische Klimaszenario für das Jahre 2050 wurde basierend auf den Ergebnissen des EU-Projektes PRUDENCE erarbeitet. Für die Schweiz bedeutet dies einen – im Vergleich zum ausgehenden 20. Jahrhundert - weiteren Temperaturanstieg von 2 Grad im Winter und 3 Grad im Sommer. Und eine Abnahme der Jahresniederschläge um etwa 5 – 7 Prozent (entsprechend im Norden um 75 mm und im Süden um 140 mm), wobei im Winter mit einer Zunahme von etwa 10 Prozent und im Sommer mit einer Abnahme von etwa 18 Prozent zu rechnen ist. Zusammen mit der Veränderung der zeitlichen und örtlichen Verteilung der Schneefälle und der Schneeschmelze bedeutet dies eine erhebliche Veränderung der Abflussregimes und eine Verminderung des Abflusses insgesamt. Dies hat Auswirkungen auf die Wasserführung während sommerlicher Trockenperioden, insbesondere im Mittelland, aber noch viel mehr auf die unten liegenden Abschnitte der großen Alpenflüsse. Und damit auch auf die Grundwasserstände.

Interessenkonflikte zwischen verschiedenen Nutzergruppen während Niedrigwasserzeiten wurden identifiziert: Bewässerung für die Landwirtschaft, Wasserentnahme für die Kühlung thermischer Kraftwerke, Ansprüche der natürlichen (Gewässer-) Ökosysteme, Entnahme für Trinkwassernutzung. Es gilt Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen zu planen, welche einerseits die Ressource Wasser schonen und welche andererseits nicht der Klima-Mitigations-Politik widersprechen.

In Bezug auf die Naturgefahren können im alpinen Raum insbesondere Rutschungen, Murgänge und Bergstürze zu neuen Problemen führen. Durch das weitere Abschmelzen der Gletscher und den Rückgang der Permafrost Gebiete werden große zusätzliche Feststoffpotentiale geschaffen, welche durch in größere Höhen reichende Starkregenfälle erodiert und im Tal deponiert werden. Zudem können durch die wärmeren und Niederschlagsreicheren Winter auch steilere Hänge im Voralpengebiet mit Wasser gesättigt werden und vermehrt durch Starkregen ins Rutschen gebracht werden.

8. Literatur

- Christensen J.H., T.R. Carter, und M. Rummukainen (2007): Evaluating the performance and utility of regional climate models: The PRUDENCE project. *Clim. Change*, (in press).
- Frei C. (2004): Die Klimazukunft der Schweiz – Eine probabilistische Projektion. Erhältlich unter http://www.occ.ch/Products/CH2050/ch2050_scenario_d.html.
- Frei C., R. Schöll, S. Fukutome, J. Schmidli, und P.L. Vidale (2006): Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 111, D06105, doi:10.1029/2005JD005965.
- Goodess C. M. (2003): Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions: STARDEX, EGGS, 6.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007 - Fourth Assessment Report*.
- KOHS (2007): Auswirkungen der Klimaänderung auf den Hochwasserschutz in der Schweiz – ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). *Wasser-Energie-Luft*, Heft 1/2007.
- OcCC (2007): *Klimaänderung und die Schweiz 2050. Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft*. OcCC/ProClim, Bern, 168 p.

- PRUDENCE: Prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects. Forschungsprojekt der Europäischen Union. <http://prudence.dmi.dk/>.
- Schädler B, Bigler R. (1992). Wasserhaushalt großer Einzugsgebiete. In: Hydrologischer Atlas der Schweiz, Tafel 6.1, Weingartner R, Spreafico M (eds). Bundesamt für Wasser und Geologie: Berne..
- Schmidli J, C. Schmutz, C. Frei, H. Wanner, C. Schär (2001): Mesoscale precipitation in the Alps during the 20th century. In: *Int. J. Climatology*, 22, 2001, 1049-1074.
- Schmidli J., C. M. Goodess, C. Frei, M. R. Haylock, Y. Hundecha, J. Ribalaygua, und T. Schmith, (2007): Statistical and dynamical downscaling of precipitation: An evaluation and comparison of scenarios for the European Alps. *J. Geophys. Res.*, 112, (in press)
- STARDEX: Statistical and Regional dynamical Downscaling of Extremes for European regions. Forschungsprojekt der Europäischen Union. <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex/>.



Folgerungen und Ausblick für das Vorhaben KLIWA

Hansjörg Strähle
Umweltministerium Baden-Württemberg

Meine Damen und Herren,

nach den Ergebnissen aus KLIWA, die uns in den Beiträgen des 3. Symposiums vorgestellt wurden, frage ich: **Auf was warten wir? Auf was warten Sie?** Natürlich zunächst auf einen Dank von meiner Seite an den Veranstalter, die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, an die Referentinnen und Referenten und an das Auditorium, die alle gemeinsam zum Gelingen dieser Veranstaltung beigetragen haben. Ich darf mich auch bei den Teilnehmerinnen und Teilnehmern der Podiumsdiskussion bedanken, die unter der Leitung von Frau Dr. Niedek im Anschluss einige der bei diesem Symposium getroffenen Aussagen sicherlich kritisch hinterfragen und kommentieren werden.

Ich darf mich auch bei den Partnern des Projekts KLIWA, den Vertretern des Bayerischen Umweltministeriums und des Deutschen Wetterdienstes sehr herzlich für die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit bedanken. Seit dem letzten Symposium waren es wieder zwei Jahre voller Engagement in Sachen Klimawandel und Wasserwirtschaft.

Auf was warten wir? Sicherlich auf eine Versachlichung der Diskussion. Mir fällt dabei eine Passage aus dem Buch von Frau Dr. Niedek ein, die rät, besser von Klimaänderung als von Klimakatastrophe zu reden. Uns liegen mittlerweile so viele fundierte Ergebnisse der Klimaforschung vor, dass wir heute einigermaßen gesicherte Aussagen zu möglichen Folgen einerseits und entsprechenden Strategien und Handlungsempfehlungen andererseits diskutieren und treffen können.

Auf was warten wir? Sicherlich nicht mehr auf den Nachweis, dass es den Klimawandel gibt. Nicht zuletzt die Referentinnen und Referenten des 3. Symposiums haben bewiesen: der Klimawandel findet statt und wir beobachten schon heute tiefgreifende Änderungen, die in der Zukunft Auswirkungen bewirken, denen wir uns stellen müssen.

Ein Ziel dieser Veranstaltung war es, auch bei der Verwaltung ein Bewusstsein zu schaffen, dass dieses Thema ernst zu nehmen ist und uns vor viele neue Herausforderungen stellen wird. Ich möchte dabei die Worte von Frau Ministerin Gönner zu Beginn aufgreifen. Auch bei der Wasserkraftnutzung gilt es in Zukunft sehr kreativ mitzuarbeiten, gerade wenn es dabei um die Nutzung des Potenzials alternativer Energien geht. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass dies nicht immer konfliktfrei mit den Zielen der Gewässerökologie in Einklang zu bringen ist.

Was erwarten wir von neuen regionalen Klimamodellen? Sicherlich auf nichts gravierend Neues. Wir sind mit unserem Szenario, dem ECHAM 4-Szenario B2, gut aufgestellt und wir sollten die neuen Entwicklungen der Modellertechnik und Szenarien mit etwas Gelassenheit verfolgen. Angesichts der noch herrschenden Unsicherheit dieser Modelle ist es sicherlich nicht vertretbar, alle zwei Jahre neue Erkenntnisse zu verkünden. Dies wäre in der Öffentlichkeit nur schwer nachvollziehbar und wäre dem Anliegen, die Öffentlichkeit zu sensibilisieren, so dass auch der Einzelne seine Betroffenheit erkennt, nicht sehr dienlich.

Auf was warten wir beim Aspekt Hochwasser? Hier sind die Arbeiten weitgehend abgeschlossen, die Konsequenzen wurden gezogen. Nur für den Rhein stehen die Ergebnisse derzeit noch nicht zur Verfügung. Wir sind mit den Schweizer Kollegen bei der Arbeit, das Rheineinzugsgebiet zu modellieren, um voraussichtlich bis Ende 2007 auch für den Rheinschlauch konkrete Aussagen treffen und entsprechende Klimafaktoren ausweisen zu können.



Warten wir aber möglicherweise auf ein Hochwasserereignis, um für das Thema Bewusstsein zu schaffen? Auf ein Hochwasser, das betroffen macht? In den Beiträgen aus der Schweiz und aus Großbritannien klang es immer wieder an: Die Wirkung technischer Hochwasserschutzrichtungen ist beschränkt. Daher ist es umso wichtiger, Hochwasservorsorgemaßnahmen zu forcieren und die Elemente der Raum- und Regionalplanung noch stärker als bisher mit einzu-beziehen. Dies ist mindestens ebenso wichtig, wie die Einführung des Klimafaktors bei der Planung technischer Hochwasserschutzmaßnahmen.

Natürlich werden uns auch weiterhin Fragestellungen im Zusammenhang mit der Anwendung der richtigen statistischen Methoden beschäftigen. Herr Weber ist in seinem Vortrag darauf eingegangen. Möglicherweise müssen wir uns im Rahmen eines weiteren Workshops zusammen mit der Wissenschaft damit beschäftigen.

Auf was warten wir bei den Wasserhaushaltsmodellen? Es ist immer wieder angesprochen worden. Wir müssen uns künftig auch mit Landnutzungsszenarien auseinandersetzen und diese in den Modellen berücksichtigen, gerade wenn es um das Thema Niedrigwasser geht. Dazu gehören auch phänologische Fragestellungen. Möglicherweise können hier Erfahrungen aus Sachsen oder Ergebnisse von Forschungsvorhaben der Universität Hohenheim genutzt werden.

Was erwarten wir von unserem Klimaprojekt künftig? Wir erwarten zunächst die Auswahl anthropogen unbeeinflusster Messstellen, um mittelfristig unsere Annahmen und Prognosen auch evaluieren zu können. Nur wenn es uns gelingt, ein entsprechendes Messnetz aufzubauen und zu betreiben, können wir die Auswirkungen verifizieren und die Szenarien verfeinern, um zu noch genaueren Aussagen zu kommen.

Wir werden uns in den nächsten Jahren schwerpunktmäßig mit den Auswirkungen auf andere wasserwirtschaftlich relevante Bereiche befassen. So liegen die Fragestellungen bei den Themen „Niedrigwasser“, „Grundwasserneubildung“, „Siedlungsentwässerung“ auf der Hand. Aber auch mit dem Bodensee und den zu erwartenden Auswirkungen auf die Wasserqualität werden sich unsere Fachleute beschäftigen müssen. Es gilt bis zum nächsten Symposium weitere Erkenntnisse zu gewinnen, aber auch erste Anpassungsmaßnahmen und Handlungsstrategien zu entwickeln. Dies ist einer der ganz großen Vorteile des Kooperationsvorhabens KLIWA. Neben der Erarbeitung wissenschaftlicher Methoden und der Durchführung entsprechender Untersuchungen liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung von Handlungsempfehlungen für die Praxis.

Auch gilt es die Zusammenarbeit auf der „Südschiene“ zu verbessern.

„Wir warten nicht auf die Klimaänderung, sondern wir wissen, dass wir uns auch in Süddeutschland mitten darin befinden und haben bereits gehandelt!“

- Mit der Einführung des Klimafaktors bei der Bemessung technischer Hochwasserschutzanlagen sind Konsequenzen für die Praxis gezogen worden.
- Insbesondere unter dem Aspekt der Hochwasserverschärfung ist der Hochwasservorsorge verstärkt Rechnung zu tragen.
- Das Projekt KLIWA wird auch künftig neue Entwicklungen bei der Klimamodellierung und bei der Auswahl von Klimaszenarien aufmerksam verfolgen.
- Die neuen KLIWA-Themen Niedrigwasser, Grundwasser, Siedlungsentwässerung sowie das Bodenseeprojekt sind weiter voranzubringen, mit dem Ziel in drei Jahren Ergebnisse und ggf. Anpassungsstrategien aufzuzeigen.
- Fragen der Landnutzung und Phänologie sind künftig bei KLIWA zu berücksichtigen.
- Das KLIWA-Messnetz (möglichst anthropogen unbeeinflusste Messstellen) wird mittelfristig eine Evaluierung der Szenarien und den daraus abgeleiteten Folgerungen ermöglichen.



Anfang 2007 wird Rheinland-Pfalz dem Kooperationsvorhaben KLIWA offiziell beitreten. Aber auch mit Hessen sollte die Zusammenarbeit vertieft werden. Und mit der Schweiz sitzen wir beim Rhein ohnehin in einem Boot und die Praxis zeigt, dass auch hier gemeinsame Untersuchungen schneller zum Ziel führen. Und gegenüber dem Bund und den übrigen Bundesländern bieten wir unsere praxisbezogenen Erkenntnisse an. Die Grundzüge und konkrete Vorgehensweise können jederzeit Verwendung finden und können auch gegenüber der EU im Rahmen des Climate Change Programms dargestellt werden, als eine Möglichkeit, wie mit den bisherigen Erkenntnissen des Klimawandels umgegangen werden kann.

Das Kooperationsvorhaben KLIWA wurde 1999 von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst gestartet. In der Anfangsphase mussten regionale Klimamodelle aufwändig ermittelt und Wasserhaushaltsmodelle teuer entwickelt werden. Durch die vielen Erfahrungen die wir auf diesem Weg gemacht haben, hat das Projekt eine Reife erlangt, die es uns ermöglicht, nun weitere Themenfelder anzugehen. Darüber hinaus haben wir Grundlagen geschaffen, die von anderen Disziplinen bei der Beurteilung der Auswirkungen des Klimawandels verwendet werden können. Wir sind ein wenig stolz darauf, dass wir mit dem Thema Klimaänderung und Hochwasser so weit vorangekommen sind und die entsprechenden Konsequenzen gezogen haben. Wir laden alle Interessierten ein, an den Erfahrungen des Projekts zu partizipieren. Wir wenden uns neuen Themenbereichen der Wasserwirtschaft zu und sind zuversichtlich, beim nächsten Symposium konkrete Handlungsempfehlungen vorlegen zu können.



Kurzstatements der Podiumsdiskussion von Experten zum Problemkreis

„Gesellschaftliche Auswirkungen des Klimawandels“

Die gesellschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels

Claudia Kemfert

Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Humboldt Universität Berlin

Zusammenfassung

Internationale Experten sind sich einig, dass durch die immer weiter steigenden und durch den Menschen verursachten Treibhausgasemissionen ein Klimawandel erzeugt wird. Die wesentlichen Auswirkungen des Klimawandels sind der Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur und des Meeresspiegels sowie die Zunahme extremer Wetterereignisse und Naturkatastrophen, welche enorme volkswirtschaftliche Schäden verursachen. Bei einer Temperaturänderung um 3,5 °C bis zum Jahr 2100 werden global enorme volkswirtschaftliche Schäden auftreten, wenn die Treibhausgase nicht genügend vermindert werden, um eine solche Temperaturerhöhung zu vermeiden. Die Kosten der Emissionsminderung sind weitaus geringer. Sie vermindern sich zusätzlich, wenn möglichst früh mit Emissionsvermeidung begonnen wird und technologische Innovationen möglichst frühzeitig gefördert werden. Zusätzlich können die Kosten der Emissionsminderung reduziert werden, wenn Länder mit hohen Treibhausgasemissionen wie die USA und China in ein internationales Emissionsrechtehandelssystem eingegliedert werden. Vor allem kann Russland von einem internationalen Emissionsrechtehandel profitieren, da es als Anbieter und Verkauf von Emissionsrechten große Gewinne erwirtschaften kann. Zukünftige Klimaschutzpolitik sollte möglichst viele Länder integrieren und kostenminimierende Verfahren, wie den Emissionsrechtehandel einbeziehen. Zudem sollten Kooperationen in Forschung und Entwicklung emissionsarmer Technologien möglichst frühzeitig geschlossen werden. Der Klimawandel ist nicht zu bremsen ohne einen technologischen Durchbruch hin zu CO₂ freier Technologien.



Die politische Herausforderung des globalen Klimawandels

Nico Stehr
Zeppelin University, Friedrichshafen

Ausgangspunkte

(1) Die katastrophalen Folgen des Hurrikans Katrina für die Stadt New Orleans und die umliegenden Staaten sind ein Paradebeispiel für eine verfehlte Klimapolitik. Allerdings liegt der Fehler nicht deshalb bei der Regierung Bush, weil sie sich weigert, dem Kyoto-Protokoll zuzustimmen. Es ergibt keinen Sinn, nach den katastrophalen Auswirkungen von Katrina zu neuen Superlativen zu greifen und zu behaupten, dieses Wetterextrem sei ein weiterer Beleg dafür, dass Stärke und Dauer tropischer Wirbelstürme künftig zunehmen würden.

Statt dessen sollten Klimawissenschaftler gefragt werden, wann wir Verbesserungen zu sehen bekämen, wenn die Vereinigten Staaten, aber auch China, Russland und Indien, ihren Ausstoß an Treibhausgasen drastisch reduzieren würden. Würden dann die Folgen von Hurrikanen wie Katrina weniger gravierend sein, und wie groß würden diese geringeren Schäden ausfallen? Noch wichtiger für unsere Gesellschaften ist es aber zu fragen, wie wir uns in den kommenden Jahrzehnten vor Wetterphänomenen wie dem Hurrikan Katrina, Hitzewellen, Überschwemmungen, starke Schneefälle und anderen Extremen schützen könnten und wie eine Klimaforschung und Klimapolitik aussehen müsste, die genau das zum Ziel habe? Die Alternative zur vorherrschenden Klimaforschung und Klimapolitik heißt Vorsorge.

(2) Die Industrieländer werden künftig (noch) mehr klimaschädliche Treibhausgase ausstoßen. Die Emission vor allem an Kohlendioxid wird aller Wahrscheinlichkeit im Zeitraum 2000-2012 in Europa, Japan, den Vereinigten Staaten und anderen Industrieländern um 17 Prozent steigen. Nach dem Kyoto-Protokoll müssen die Industrieländer ihre Treibhausgase von 1990 bis 2012 allerdings um 5,2 Prozent vermindern. Für Entwicklungs- und Schwellenländer wie China und Indien besteht derzeit weder eine Pflicht, die Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren, noch über sie zu berichten. Wir haben also keine genauen Daten der Treibhaus-Emissionen dieser Staaten, können aber mit Sicherheit davon ausgehen, dass ihr Anteil am globalen Haushalt der Treibhausgase ständig zunimmt.

(3) Die Natur ist träge. Die bisher diskutierten und politisch durchsetzbaren Formen der moderaten Mäßigung von Treibhausgasen beeinflussen den Klimawandel kaum, auch wenn Gegenteiliges behauptet wird. Die für einen Stopp des Klimawandels notwendige Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen beläuft sich auf etwa 70 bis 80 Prozent. Wie man eine solche Reduktion erreichen will, ohne dass man die Hoffnungen und Erwartungen von mehr als achtzig Prozent der Weltbevölkerung ignoriert, wird kaum diskutiert.

Folgerung

Vorsorge/Anpassung heißt: Wissen verbreiten und Chancenzugänge schaffen. Wo Menschen schutzlos den Veränderungen ausgesetzt sind, wird es immer – auch verursacht durch den Klimawandel – Katastrophen geben.

Eine Umweltpolitik, die das begriffen hat, wäre wirklich nachhaltig. Und durchsetzbar.



Statement für das 3.KLIWA-Symposium in Stuttgart

Armin Grunwald, ITAS-Forschungszentrum Karlsruhe

Thesen:

- Der Klimawandel verschärft die Anforderungen an eine "nachhaltige Entwicklung". Nachhaltige Entwicklung steht für anspruchsvolle ethische Zielsetzungen: die Wahrnehmung von Zukunftsverantwortung und die Realisierung von Verteilungsgerechtigkeit. Ihre Realisierung erfordert weit reichende Gestaltungs- und Umgestaltungsmaßnahmen der heutigen Produktionsverhältnisse, Lebensstile und politisch-institutioneller Rahmenbedingungen, von der lokalen bis zur globalen Ebene. Der Klimawandel drängt zum Handeln.
- Handeln kann dabei längst nicht mehr nur noch in Vermeidungsstrategien bestehen. Auch Anpassungsstrategien sind erforderlich, um die gesellschaftliche Vulnerabilität gegenüber Klimaschwankungen und deren Folgen (z.B. im Wasserbereich) zu verringern.
- Nachhaltige Entwicklung ist nicht teilbar, sondern bedarf immer – auch in den ganz konkreten Ausprägungen – eines „Blicks auf das Ganze“. Der integrative Blick muss sich auf die involvierten thematischen Dimensionen erstrecken (z.B. die ökologische, ökonomische und soziale Dimension), auf die verschiedenen betroffenen Akteure (z.B. Politik, Wirtschaft und Zivilgesellschaft) und auf die relevanten Handlungsebenen (von lokal bis global). Dies gilt selbstverständlich auch für den Umgang mit gesellschaftlichen Folgen des Klimawandels.
- Der Blick darf nicht auf die nationale oder europäische Dimension verengt werden. Der Klimawandel wird sich in den meisten Weltregionen stärker auswirken als in Mitteleuropa. Wir werden aber die Folgen auf indirekten Wegen ebenfalls zu spüren bekommen. Folgen des Klimawandels führen zu globalen Herausforderungen, auch wenn sie regional verschieden ausfallen.
- Der Umgang mit Klimafolgen ist ein gesellschaftliches und nicht nur ein politisches Problem. Angesichts der gegenwärtig offenkundigen Steuerungsdefizite ist eine institutionelle und politische Gestaltung dieser Globalisierungsprozesse mit dem Modell einer „Global Governance“ dringend notwendig. Charakterisierbar als „globales kooperatives Regieren“ steht hier die Integration der globalen bis zur lokalen Handlungsebene, der verschiedenen Akteure Staat, Wirtschaft und Zivilgesellschaft, der einzelnen Entwicklungsdimensionen sowie der Steuerungsinstrumente (formelle und informelle Mechanismen) im Mittelpunkt. Zumindest teilweise realisiert wurde dieses Modell im Rahmen der Umsetzung der Klimarahmenkonvention.
- Innovation wird zu einem Schlüsselbegriff – nicht nur in wissenschaftlich-technischer Hinsicht (Effizienz), sondern auch in institutioneller Hinsicht.



Statement für das 3.KLIWA-Symposium in Stuttgart

Eberhard Faust
Münchener Rück

Die (Rück-)Versicherungsindustrie fokussiert ihr Interesse vor allem auf solche Naturereignisse, bei denen sehr viele Versicherungsnehmer gleichzeitig von Schaden betroffen werden. Solche großen Schadenereignisse aus wetterabhängigen Naturgefahren wie Überschwemmungen, Sturm oder Temperatur- und Trockenheitsextremen nehmen global nach Höhe und Anzahl seit Jahrzehnten progressiv zu. So gab es 2004 und erneut 2005 Rekordhöhen bei versicherten Schäden durch Wettergefahren – in beiden Jahren durch die tropischen Wirbelstürme verursacht (2005: mehr als 80 Mrd. US\$). Auch die jährliche Anzahl solcher Wetterereignisse steigt global viel stärker an als die jährliche Anzahl nicht-wetterabhängiger Ereignisse, was sich in gleicher Weise auch für Deutschland beobachten lässt. Viele fragen sich, ob solche ansteigenden Schadentrends als (gesellschaftliche) Auswirkungen des Klimawandels erster Ordnung begriffen werden können.

Die Hintergründe der Entwicklung liegen vor allem bei der Veränderung der sozioökonomischen Rahmenbedingungen über die Zeit, insbesondere kommen dabei folgende Faktoren in Betracht:

- die Flächenausdehnung der Siedlungen alleine schon erhöht die Wahrscheinlichkeit des Betroffenwerdens durch Wetterextreme;
- immer mehr und größere Werte sind in unseren Siedlungen akkumuliert;
- die Tatsache, dass besonders exponierte Areale wie flussnahe Talbereiche als vergleichsweise billiges, für Infrastrukturmaßnahmen leicht erschließbares Bauland (eventuell mit Brauchwasser- und Hafenananschluss) für Gewerbe- und Industriebauten, zusätzlich aber auch für Wohnbauten, genutzt werden;
- der Traditionsabbruch in mobilen Gesellschaften bezüglich des lokalen Gefährdungswissens;
- die zunehmende Komplexität und Interdependenz der Substrukturen unserer Stadtgesellschaften, wo beispielsweise der überschwemmungsbedingte Ausfall der Strom-, Gas-, oder Telefonversorgung zu Betriebsunterbrechungen führen kann, die als versicherte Gewerbeschäden große Schadenssummen auslösen;
- die zunehmende Schadenempfindlichkeit im Bereich kommerzieller und privater Gebäude (z. B. Gefrierschränke/elektronische Steuerungen in überschwemmungsgefährdeten Kellerbereichen).

All dies vergrößerte die Schadenpotenziale über die Zeit. Auf Versicherungsseite erhöhen sich die Schäden mit der Versicherungsdichte und der Produktvielfalt.

Es gibt gleichwohl ermutigende lokale Fälle, die belegen, dass beispielsweise das Schadenpotenzial bei Überschwemmungsschäden aufgrund kluger Vorsorge und „lessons learned“ im Zuge der Zeit vermindert werden konnte (Rheinhochwasser 1993/1995; Überschwemmungen Süddeutschland Pfingsten 1999 und August 2005).

Neben den sozioökonomischen Faktoren als Treiber des Schadenanstiegs haben wir global starke Indizien dafür, dass die Zunahme der Luft- und Meerestemperaturen im Zuge des Klimawandels zunehmend als zusätzlicher Treiber für veränderte Häufigkeiten/Intensitäten extremer Wetterereignisse und ansteigende Schäden zu sehen ist. Am deutlichsten ist dies gegenwärtig bei den atlantischen Wirbelstürmen zu sehen. Für Deutschland ist auf die großen Überschwemmungsereignisse seit 1993 (bis inklusive August 2005) hinzuweisen (teils aus winterlichen Westlagen, die zunehmen, teils aus sommerlichen mitteleuropäischen Troglagen, die intensiver auszufallen scheinen). Auch für sommerliche Hitze- und Trockenepisoden in Deutschland wie im Sommer 2003 oder 2006 hat die Wahrscheinlichkeit in den letzten drei Jahrzehnten



regional unterschiedlich stark zugenommen mit Schadenfolgen in der Landwirtschaft, im Gesundheitswesen und etwa im Energiesektor. Die regionalen Klimaszenarien aus KLIWA zeigen, dass die Fortsetzung solcher Entwicklungen speziell in Süddeutschland auch für die Zukunft zu erwarten ist.

Eine positive gesellschaftliche Folge der Resultate zum Klimawandel, die KLIWA erarbeitet hat, liegt in der Chance, dass damit ein wissenschaftlich fundierter Wissensstand und Interpretationsrahmen etabliert wird. Dieser kann Behörden, Gemeinden und letztlich auch den potenziell Betroffenen als gemeinsamer Deutungs- und Erwartungshorizont dienen und dadurch die Ableitung von Konsequenzen erleichtern. Das wäre freilich auch aus der Sicht der Versicherungswirtschaft sehr wünschenswert: Gerade angesichts zunehmender sommerlicher Hitze- und Trockenepisoden und extremer Niederschläge mit Überschwemmungsfolgen in Süddeutschland geht es auch uns wie KLIWA darum, die Vorsorge bei Staat, Gemeinden und letztlich auch potenziell Betroffenen zu motivieren.

Klima und Wasserhaushalt Anpassungsstrategien müssen heute entwickelt werden

Christiane Markard

Fachbereichsleiterin „Gesundheitlicher Umweltschutz, Schutz der Ökosysteme“
des Umweltbundesamtes, Dessau

Der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen, vor denen die Menschheit heute steht. Er wird – darin ist sich die überwiegende Zahl der Experten einig – gravierende Folgen für Menschen und Umwelt haben. Erste Auswirkungen sind bereits heute zu beobachten. Diese Auswirkungen betreffen in besonderem Maße den Wasserhaushalt. Sie gilt es darzustellen und zu kommunizieren, um Öffentlichkeit und betroffene Sektoren auf die sich verändernde Situation vorzubereiten.

Es muss der Öffentlichkeit deutlich gemacht werden, dass auch bei optimaler Begrenzung der CO₂-Emissionen ein Anstieg des Meeresspiegels bis zu einem Meter aufgrund des Abschmelzens der Eisschilde zu erwarten ist, dass es zu lokaler Versauerung des Meeres aufgrund der Bindung von einem Drittel der anthropogenen CO₂-Emissionen im Meer und zu einer Erwärmung der Oberflächengewässer kommen wird. Zunehmende Winterniederschläge können insbesondere in Westdeutschland die winterlichen Abflussmengen der Flüsse erhöhen. Bei steigenden Temperaturen wird winterlicher Niederschlag eher als Regen, weniger als Schnee niedergehen. Das Verschwinden der alpinen Gletscher ist schon heute nicht mehr aufzuhalten. Starkniederschläge werden voraussichtlich häufiger und intensiver auftreten. Dadurch kann im Winter und Frühjahr die Hochwassergefahr zunehmen.

Neben den winterlichen Starkniederschlägen können sommerliche Trockenperioden verstärkt auftreten. Daraus resultierende niedrige Wasserstände in den Flüssen führen zu einer Verstärkung von Nutzungskonflikten an den Gewässern, z.B. bei der Entnahme von Kühlwasser oder hinsichtlich der Schifffahrt und der Wasserkraftnutzung. In Abhängigkeit von regionalen Gegebenheiten sind bei länger anhaltender Trockenheit auch Auswirkungen auf die Trinkwassergewinnung aus Oberflächengewässern nicht auszuschließen. Zusätzlich können sich bei der Trinkwassergewinnung aus Grundwasserbrunnen Probleme durch aufsteigendes salzhaltiges Grundwasser verstärken: Fehlt das Süßwasser, das normalerweise durch den Boden von oben einsickert und einen Druck auf tiefer liegende Gesteinsschichten ausübt, steigt Salzwasser in den Grundwasserkörper auf und macht ihn für die Trinkwassergewinnung unbrauchbar. Hohe Oberflächengewässertemperaturen, verringerte Abflüsse und niedrige Grundwasserspiegel beeinträchtigen Nutzungen und die naturraumtypischen Ökosysteme gleichermaßen.

Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels stehen daher zu Recht ganz oben auf der (umwelt)politischen Agenda. Das Umweltbundesamt fühlt sich diesem Ziel in besonderer Weise verpflichtet, hat aber auch die Aufgabe, die gewässerökologischen Leitplanken für Klimaschutzmaßnahmen und Anpassungsstrategien zu definieren und ihre Berücksichtigung einzufordern. Beispielsweise unterstützen wir unter bestimmten Bedingungen die Kohlendioxid-Abscheidung und Speicherung im Untergrund als Übergangstechnologie, sprechen uns aber eindeutig gegen eine Verbringung von CO₂ in die Meerwassersäule aus, da dies eine Versauerung im Meer und einen nur kurzfristig wirksamen Klimaschutz bedeuten würde. Bei unterirdischer Speicherung im terrestrischen Bereich oder unter dem Meeresboden diskutieren wir derzeit als ökologische Leitplanke eine jährliche Entweichungsrate von höchstens 0,01 %. Dies würde bedeuten, dass nach 1000 Jahren noch etwa 90 % des eingelagerten CO₂ in den Kavernen vorhanden wären.

Zusätzlich zu den Klimaschutzmaßnahmen (mitigation measures) sind Anpassungsstrategien (adaptation measures) zu entwickeln, um auf bereits eintretende und nicht mehr rückgängig zu machende Klimaänderungen zu reagieren. Dies betrifft sowohl das aktuell steigende Risiko von



Extremereignissen (Hoch- und Niedrigwasser) als auch langsame Veränderungen, z.B. des Grundwasserstandes oder des Meeresspiegels. Beispielsweise macht der Gewässerausbau für Schifffahrtzwecke dann keinen Sinn, wenn die Wasserstände unter Werte der erforderlichen Fahrwasserhöhe klassischer Binnenschiffe fallen. Flachbodenschiffe wären eine Alternative. Wenn in Zukunft die Beregnung landwirtschaftlich genutzter Flächen wieder in größerem Maßstab erforderlich werden sollte, ist auch in Deutschland die Einführung der Wasser sparenden Tröpfchenbewässerung in der Landwirtschaft erforderlich. Auch Kraftwerke könnten mit weniger Kühlwasser auskommen, wie der Betrieb von Anlagen in arabischen Ländern zeigt. Für alle vom Klimawandel betroffenen Wassernutzungen wie Trinkwasserversorgung, Wasserkraftnutzung, Schifffahrt, Landwirtschaft, um die wichtigsten zu nennen, sind Strategien zur Anpassung an Klimaänderungen in den kommenden Jahren zu entwickeln. An diesen Arbeiten wird sich das Umweltbundesamt aktiv beteiligen und verstärkt seine Vorschläge einbringen.

Was benötigt die Wasserwirtschaft angesichts des Klimawandels in den kommenden Jahrzehnten?

Markus Disse
Lehrstuhl für Wasserwirtschaft und Ressourcenschutz
der Universität der Bundeswehr München

Die Frage, welche Aufgaben sich der Wasserwirtschaft in den kommenden Jahrzehnten stellen, lassen sich meiner Meinung nach in die drei Bereiche Forschung, fachliche Umsetzung und Bürgerbeteiligung aufteilen.

Zur Forschung: Noch immer können uns die Klimamodelle keine zuverlässigen regionalen Aussagen über die zukünftige Niederschlagsentwicklung geben. Wir werden auch in absehbarer Zeit keine räumlich differenzierten Angaben über die Intensitäten oder Persistenzen des Niederschlagsgeschehens für die nächsten Dekaden erhalten. Trotzdem sind generelle Trends feststellbar – mehr Niederschlag im Winter, insgesamt eine leichte Abnahme im Sommer mit längeren Trockenperioden und stärkeren Intensivniederschlägen. Um diese allgemeinen Aussagen in Bemessungsgrößen oder Handlungsoptionen zu übersetzen, benötigen wir (realistische) Klimaszenarien. Das Neue und gleichzeitig Spannende an dieser Situation ist, dass wir nicht mehr nach dem althergebrachten Schema Extremwerte berechnen können, auf die wir dann unsere Hochwasser- oder Bewässerungsspeicher auslegen, sondern wir müssen aufgrund der Unwägbarkeit der zukünftigen Klimaentwicklung vernetzte Lösungen anbieten, die gleichzeitig nachhaltig sind (no-regret Strategie). Die Herausforderung an die Wissenschaft besteht in der Verknüpfung verschiedener Forschungsfelder. Die Anpassung an den Klimawandel besteht aus den Komponenten Erkennen (Naturwissenschaft), Lösungen entwickeln (Ingenieurwissenschaft) und Bewusstsein Schaffen (soziologische Wissenschaften).

Die fachliche Umsetzung der wasserwirtschaftlichen Anpassungsstrategien obliegt naturgemäß den entsprechenden Umweltbehörden. Die Eigenständigkeit der Wasserwirtschaftsverwaltung ist in einigen Bundesländern stark eingeschränkt worden. So sehr das in manchen Fällen zu bedauern ist, so kann man Reformprozesse auch als Chance begreifen, neue Kooperationen zu generieren. Die Integration des Wasserbereiches in eine umfassende Umweltbehörde hat zum Beispiel das Potenzial, die Themenbereiche Wasser, Pflanze, Boden und Luft stärker miteinander zu verknüpfen. Ebenfalls kann eine Zusammenlegung von Fach- und politischer Behörde Synergien schaffen, indem das Fachpersonal die politisch Verantwortlichen durch ihre Kompetenz konkret unterstützen. Da ich hier als Wissenschaftler und Hochschullehrer spreche, mögen meine Vorstellungen vielleicht naiv klingen. Aber Tatsache bleibt: Jede (politische) Reform eröffnet auch neue Möglichkeiten. Zu den bewährten Aufgaben der Wasserwirtschaft wie Planung, Bau und Betrieb von wasserwirtschaftlichen Anlagen, Gewässerpflege und –unterhaltung sowie Flussgebietsmanagement werden sich zukünftig neue Tätigkeitsfelder hinzugesellen. Dies betrifft Fragen des Hochwasserrisikomanagements, der Umgang mit Unsicherheiten in der Planung sowie der stärkeren Einbeziehung des Bürgers in den Planungs- und Entscheidungsprozess.

Damit kommen wir zu der Verantwortung des Bürgers in der Klimadebatte. Der „mündige“ Bürger muss mit ins Boot geholt werden. Neben den politischen Vorgaben (z.B. finanzielle Anreize für energiesparende Bauweisen, erneuerbare Energien-Gesetz, Ökosteuern) ist die Aufklärung über die Klimakonsequenzen unabdingbar. Da die Presse in der Regel die Sachverhalte nur sehr holzschnittartig übermittelt, sind an dieser Stelle Wissenschaft und Behörden gefordert, Aufklärungs- und Überzeugungsarbeit zu leisten. Das fängt mit der Vermittlung der naturwissenschaftlichen Zusammenhänge an und endet mit der Eigenverantwortung des Bürgers. Nur so kann eine Bewusstseinsänderung eintreten, bei der nicht mehr alle Unbequemlichkeiten (z.B. „hohe Spritpreise“, „der Staat kümmert sich nicht um den Hochwasserschutz“) dem Staat in die Schuhe geschoben werden, sondern der Bürger sich aktiv an die neuen Rahmenbedin-



gungen anpasst (z.B. „ich nutze verstärkt die öffentlichen Verkehrsmittel“, „ich passe meine Bauweise / mein Verhalten dem Hochwasser an“). Ich bin davon überzeugt, dass die Sensibilität des Bürgers hoch ist und er bei einer klugen Umweltkommunikation bereit ist, auf manche alten Gewohnheiten zu verzichten und neue Handlungsoptionen anzunehmen.

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, 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: 2. KLIWA-Symposium am 03. und 04.05.2004 in Würzburg - Fachvorträge „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, 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: 3. KLIWA-Symposium am 25. und 26.10.2006 in Stuttgart - Fachvorträge „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, 256 S., ISBN 978-3-88251-325-7, Karlsruhe 2007

Weitere aktuelle Informationen zu Projektergebnissen finden Sie unter unserer Internetseite:

<http://www.kliwa.de>