
2. KLIWA-Symposium

am 03. und 04.05.2004 in Würzburg

Fachvorträge

Klimaveränderung und
Konsequenzen für
die Wasserwirtschaft

KLIWA-Berichte

Heft 4



KLIWA
Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

2. KLIWA-Symposium

am 03. und 04.05.2004 in Würzburg

Fachvorträge

Klimaveränderung und
Konsequenzen für
die Wasserwirtschaft

KLIWA-Berichte

Heft 4



KLIWA

Klimaveränderung
und Wasserwirtschaft

IMPRESSUM

Herausgeber:	Arbeitskreis KLIWA - Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg - Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft - Deutscher Wetterdienst Internetadresse: http://www.kliwa.de
Herausgabedatum:	Dezember 2004
ISBN:	3-937911-16-2
Redaktionelle Bearbeitung:	Hans Weber, Dr. Lothar Zimmermann Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München
Umschlaglayout:	Stephan Riedlberger – Graphik Design, München
Druck:	Druckhaus Fritz König GmbH Stahlgruberring 24 81829 München
Umwelthinweis:	gedruckt auf Recyclingpapier
Bezug über:	Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft Referat 11 Lazarettstr. 67, 80636 München Fax: 089-9214-1131 Mail: lothar.zimmermann@lfw.bayern.de

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



2. Symposium "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft"

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Vorbemerkung.....	1
1 Begrüßung Präsident Prof. Dr.-Ing. Albert Göttle, München.....	3
2 Grußwort Bürgermeister Dr. Adolf Bauer, Würzburg.....	7
Klimawandel und Klimaschutz	
3 Statements: "Klimaschutz, eine Herausforderung des 21. Jahrhunderts"	
• Staatsminister Dr. Werner Schnappauf, MdL, München.....	11
• Staatssekretär Stefan Mappus, MdL, Stuttgart.....	15
4 Perspektiven der Klimamodellierung mit aktuellen Beispielen Prof. Dr. Ulrich Cubasch, Berlin.....	19
5 Das Kooperationsvorhaben KLIWA -Zielsetzung, Konzeption, Sachstand BD Hans Weber, München.....	27
Bisherige Klimaveränderungen – Ergebnisse aus KLIWA	
6 Langzeitverhalten der hydrometeorologischen Größen RD Dr. Thilo Günther, Berlin.....	37
7 Langzeitverhalten von hydrologischen Größen OBR Helmut Straub, Karlsruhe.....	57
Abschätzung künftiger Klimaveränderungen – Ergebnisse aus KLIWA	
8 Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland LRDin Hella Bartels, Offenbach.....	73
9 Simulation des Wasserhaushalts für das Neckargebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien Dr.-Ing. Kai Gerlinger, Karlsruhe.....	87
10 Simulation des Wasserhaushalts für das Obere Maingebiet Dipl.-Ing. E. Barth, Dr.-Ing. Tibor Molnar, Dr.-Ing. Halvor Øverland, Eching a. A., München.....	103
11 Simulation des Wasserhaushalts für das Rheingebiet Dipl.-Met. Peter Krahe, Dipl.-Geoök. Mailin Eberle, Dr. Karl-Gerd Richter, RD Dr. Klaus Wilke, Koblenz, Karlsruhe.....	121



Hochwasser im Zeichen der Klimaveränderung

12	Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland Prof. Dr.-Ing. Hans J. Caspary, Stuttgart.....	135
13	Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik Dr.-Ing. Jürgen Ihringer, Karlsruhe.....	153
14	Auswirkungen der Klimaveränderung auf Planungen – Praxisbeispiele Dipl.-Ing. Joachim Wald, Hügelsheim.....	169
15	Hochwasserverschärfung und Vulnerabilität LBD Prof. Dr.-Ing. Reinhard Schmidtke, München.....	187
16	Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA-Handlungsempfehlungen BD Bernd Katzenberger, Karlsruhe.....	197
17	Hochwasserschutz in der Schweiz unter Berücksichtigung des Klimawandels Dr. Bruno Schädler, Bern (CH).....	205
18	Berücksichtigung des Klimawandels bei der Hochwasserschutzplanung der Maas in den Niederlanden Dr.-Ing. Jens Reuber und Dr. Aldo Janssen, Maastricht (NL).....	211

Gesellschaftliche Herausforderungen durch den Klimawandel

19	Nachhaltigkeit im Spannungsfeld von Globalisierung und Klimawandel Prof. Dr. Dr. Franz Josef Radermacher, Ulm.....	219
20	Klimawandel und öffentliche Wahrnehmung Prof. Dr. Hartmut Graßl, Hamburg.....	237
21	Kurzstatements zur Podiumsdiskussion • Klimaveränderung und Folgen für Gesellschaft und Umwelt Dr.-Ing. Wolfgang Kron, München..... 241 • Klimaveränderung und ihre Folgen für die Gesundheit LRD Prof. Dr. Gerd Jendritzky, Freiburg..... 245	
22	Zusammenfassung der Ergebnisse des 2. KLIWA-Symposiums mit Schlussfolgerungen für das Vorhaben KLIWA MR Hansjörg Strähle, Stuttgart.....	247

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 mit dem Deutschen Wetterdienst Anfang 1999 ein gemeinsames längerfristig angelegtes Vorgehen zum Fragenkomplex „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA) vereinbart. Damit sollen die möglichen Veränderungen des Wasserhaushalts in den Flussgebieten und Grundwasserlandschaften abgeschätzt und gebotene wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

Eine erste Bestandsaufnahme zum Vorhaben fand im Rahmen des 1. KLIWA-Symposiums im November 2000 in Karlsruhe statt. Die zwischenzeitlich vorliegenden Ergebnisse, Erkenntnisse und Schlussfolgerungen wurden beim 2. KLIWA-Symposium am 3. und 4. Mai 2004 in Würzburg der interessierten Fachwelt vorgestellt.

Fachlicher Inhalt des 2.KLIWA-Symposiums

Themenblock 1 Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts

Langzeitverhalten hydrometeorologischer und hydrologischer Kenngrößen wie Niederschlag, Schneedecke, Lufttemperatur und Hochwasserabfluss mit Betrachtung ihrer regionalen und saisonalen Struktur

Themenblock 2 Abschätzung künftiger Veränderungen mit Klimaszenarien und Wasserhaushaltsmodellen

Vergleich der mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten regionalen Klimaszenarien für Süddeutschland und Ermitteln der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt einzelner Flussgebiete mit dem Instrument Wasserhaushaltsmodell

Themenblock 3 Hochwasser im Zeichen der Klimaveränderung

Behandlung der Auswirkungen möglicher Veränderungen des Wasserhaushalts auf den Hochwasserschutz sowie Vorstellen von Handlungsempfehlungen

Themenblock 4 Gesellschaftliche Herausforderungen durch den Klimawandel

Beiträge zu gesellschaftlichen Analysen zum Klimawandel und seiner öffentlichen Wahrnehmung

Alle Beiträge, die beim KLIWA-Symposium vorgetragen wurden, sind in diesem Tagungsband abgedruckt.



Begrüßung

Albert Göttle

Präsident des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft

Sehr geehrter Herr Staatsminister Dr. Schnappauf,
sehr geehrter Herr Staatssekretär Mappus,
sehr geehrter Herr Bürgermeister Dr. Bauer,
sehr geehrte Damen und Herren,

ich freue mich, Sie heute hier in Würzburg zum 2. Symposium „Klimaveränderungen und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, kurz KLIWA genannt, begrüßen zu dürfen und danke Ihnen für Ihr Interesse.

Es ist schön, dass es gelungen ist, so viele Vertreter aus Wissenschaft, Ingenieurbüros und Behörden aus dem ganzen Bundesgebiet und unseren Nachbarländern Österreich, Schweiz und den Niederlanden nach Würzburg zu holen, um Ihnen unsere Arbeiten vorstellen zu können. Vielleicht ist die große Resonanz auf unsere Einladung ja auch ein wenig durch den Tagungsort Würzburg begründet, eine Stadt, die es Wert ist, auch ohne fachliche Veranlassung besucht zu werden. Vielleicht ist es aber auch die Neugierde, mit Würzburg einen Ort zu erleben, der heute bereits eine rund 2 °C höhere Durchschnittstemperatur hat als beispielsweise die Landeshauptstadt München, also Verhältnisse, wie wir Sie aufgrund der Klimaprognosen im Süden Bayerns Mitte diesen Jahrhunderts (vielleicht) erwarten dürfen. Vielleicht hat Sie aber auch die hydrologische Besonderheit von Würzburg hierher geführt, denn immerhin steht in diesem Raum nur rund ein Drittel des Wassers im Vergleich zum südlichen Donauraum zur Verfügung. In Würzburg, könnte man voreilig folgern, herrschen bereits heute Verhältnisse, wie man sie im schlimmsten Fall auch aus den Klimaszenarien ablesen kann. Dies jedoch wäre im Falle Würzburg total verfehlt. Ich glaube vielmehr, dass es letztendlich die Weisheit der Bürger von Würzburg und von Franken gemeinhin ist, mit diesen „besonderen“ Verhältnissen richtig umgehen zu können, indem sie zur „Schonung des von Natur aus knappen Wassers“, wo immer es geht, auf „Wein aus zuweichen“!

Wo immer nun Ihre Motive liegen, im Mittelpunkt unseres gemeinsamen Interesses steht zweifellos die Frage der Klimaveränderung und deren Konsequenzen für die Wasserwirtschaft. Dabei geht es heute darum, über ein Projekt zu berichten, das exakt vor fünf Jahren im April 1999 begonnen wurde. Das Forschungsvorhaben KLIWA wie auch die heutige Veranstaltung werden gemeinschaftlich getragen von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern, vertreten durch deren Ministerien für Umwelt und Verkehr bzw. für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz sowie durch die nachgeordnete Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg und das Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft zusammen mit dem Deutschen Wetterdienst.

Seit langem und auch zu Beginn des KLIWA-Projektes wurde in der Fachwelt und in der Öffentlichkeit intensiv die Frage diskutiert, ob Naturereignisse wie Hochwässer, Sturm, Hitzeperioden usw. bereits das Ergebnis einer eingetretenen Klimaveränderung sind. Heute diskutieren wir immer noch, doch die Einschätzungen sind ernster geworden. Nahezu alle führenden europäischen Forschungsinstitute gehen mittlerweile von einem globalen Wandel des Klimas aus, der auch nach Einschätzung des zwischenstaatlichen Sachverständigen-Gremiums „Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“ selbst durch kurzfristige Klimaschutzmaßnahmen nicht mehr zu verhindern ist. Doch es sind nicht nur die drastischen Temperaturzunahmen, sondern vor allem die Zunahme hydrologischer Extreme, die wir abzuschätzen haben und auf die wir uns frühzeitig einstellen müssen.



Im Gegensatz zu den z. T. drastischen Änderungen der regionalen Lufttemperaturen, auf die man sich in der Fachwelt „geeinigt“ hat, sind die damit verbundenen Auswirkungen auf das Wettergeschehen und insbesondere den Wasserhaushalt auch heute noch sehr unsicher.

Dies liegt auch und vor allem darin, dass belastbare Aussagen über Klimaveränderungen überwiegend nur für großräumige Bereiche möglich sind, während Angaben über Änderungen der Klimagrößen und des Wasserhaushaltes im regionalen Bereich, so auch für Flussgebiete wie die der Länder Baden-Württemberg und Bayern, belastbar nicht wirklich vorliegen. Gerade solche Erkenntnisse wären aber notwendig, um eine zukunftsorientierte, nachhaltige Wasserwirtschaftspolitik auf eine solide Grundlage zu stellen und damit insbesondere in den Bereichen

- Hochwasserschutz
- Wasserversorgung
- Grundwasserschutz
- Gewässerentwicklung

im Sinne einer „Klima-Folgen-Bewältigung“ hoffentlich noch rechtzeitig die Weichen zu stellen.

Das Verbundprojekt KLIWA trifft hier ins Schwarze, sowohl was seine generelle Zielsetzung als auch die abgeleiteten konkreten Fragestellungen im Bereich Wasserhaushaltsänderungen, d. h.

- Zunahme der Abflussextrême
- Zunahme von Hochwassergefahr
- Schäden

angeht.

Spätestens die Hochwässer an Pfingsten 1999 oder 2002 und 2003 in Süddeutschland sowie die Trockenperiode des Sommers 2003 haben eindringlich bestätigt, wie richtig es war, dass dieses Projekt nicht erst heute, sondern schon vor 5 Jahren angepackt wurde und damit heute eine fundierte Analyse der bisherigen Niederschläge und Abflüsse vorliegt, die auch die regionalen Auswirkungen von Klimaveränderungen einschließt. Das KLIWA-Projekt stellt heute seine Ergebnisse vor und versucht Antworten zu geben auf so wichtige Fragen wie z. B.

- Kann man tatsächlich schon eine Zunahme der Hochwasserabflüsse beobachten?
- Welche Konsequenzen ergeben sich für die wasserwirtschaftlichen und wasserbaulichen Planungen?
- Sind die ehemals hochwassersicheren Bereiche noch genügend geschützt?
- Reichen die Grundwasserneubildung und die Bodenfeuchte noch aus zur Versorgung von Bevölkerung und Landwirtschaft?

So klar die Fragen zur Klimaänderung und zur Klimafolgenabschätzung, so umfangreich und schwierig sind die zu ihrer Beantwortung notwendigen wissenschaftlichen Arbeiten.

Es ist das Verdienst von KLIWA, dass wir heute mehr wissen:

- über das Langzeitverhalten der hydrologischen und hydrometeorologischen Größen,
- über vergleichende Klimaszenarienrechnungen auf regionaler Basis (Main, Rhein, Neckar),
- über Veränderungen im Wasserhaushalt wie z. B. Hochwasserverstärkungen und

-
- über die notwendigen Reaktionen um auch künftig ausreichende Hochwassersicherheit zu gewährleisten und die Schadenspotentiale gering halten zu können.

Dabei weicht das 2. KLIWA-Symposium auch so kritischen Themen wie etwa

- den sozioökonomischen Konsequenzen,
- den geeigneten Handlungsempfehlungen für die Zukunft im Bereich Planung und
- der erforderlichen gesellschaftlichen Anpassung

nicht aus.

Zusammenfassend möchte ich mit Blick auf das Programm durchaus behaupten, dass mit dem zweiten KLIWA-Symposium für die Fachwelt neue Impulse gesetzt und neue Erfahrungen und Kenntnisse zur Verfügung gestellt werden können. Hierfür danke ich allen Mitwirkenden, u. a. den Referenten und Diskussionsteilnehmern ganz herzlich.

Wenn beim ersten Symposium im Jahr 2000 in Karlsruhe Frau Präsidentin Barth den Satz prägte:

„Alle reden vom Klima, wir auch, aber differenzierter.“

so möchte ich heute in Anbetracht der anspruchsvollen Thematik unseres zweiten Symposiums diese Behauptung uneingeschränkt wiederholen. In diesem Sinne wünsche ich Ihnen eine interessante und erfolgreiche Veranstaltung, von der Sie zahlreiche Anregungen für Ihre künftige Arbeit mit nach Hause nehmen können.

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit.



Grußwort

Adolf Bauer
Bürgermeister der Stadt Würzburg

Sehr geehrter Präsident Prof. Dr. Göttle,
sehr geehrter Staatsminister Dr. Schnappauf,
sehr geehrter Staatssekretär Mappus,
sehr geehrter Regierungspräsident Dr. Beinhofer,

meine sehr verehrten Damen und Herren aus den „Süd-Staaten“ Bayern und Baden-Württemberg und natürlich aus der ganzen Welt, es sind ja auch ausländische Teilnehmer da, ich freue mich, dass ich Sie recht herzlich zu diesem 2. KLIWA-Symposium in Würzburg in Vertretung der Frau Oberbürgermeisterin Pia Beckmann, die einen anderen wichtigen Termin wahrnimmt, hier in Würzburg im Kongresszentrum auf der Festung begrüßen kann.

Sie haben mit dem Monat Mai einen guten Zeitpunkt gewählt, wissen wir doch, dass er der Wonnemonat und das Magnifikat der Natur ist. Ihre Tätigkeit, sich um ein verbessertes Klima zu bemühen oder einen besseren Wasserschutz, das ist eine wesentliche Voraussetzung, dass wir ein ordentliches Wetter wie heute zu Ihrem Ereignis haben. Ich wünsche, dass diese Tagung natürlich viel dazu beiträgt, dass nicht nur in Deutschland und Europa, sondern auch weltweit Erkenntnisse und Erfahrungen, die Sie aus diesem Symposium wieder gewinnen, einfach ihren Niederschlag finden.

Zum Zweiten ist es deshalb gut gewählt, weil Sie zu uns kommen nach Würzburg, in dem Jahr, in dem die Stadt Würzburg 1300 Jahre Geschichte zu feiern hat - es war der 1. Mai 704, wo nachweislich durch eine Urkunde festgestellt wurde, dass die Stadt besteht und ein Gemeinwesen gebildet wurde. Und so freuen wir uns, dass Sie teilhaben an den Festlichkeiten dieser schönen Stadt, der Mainmetropole Unterfrankens. Der Regierungspräsident Dr. Beinhofer ist auch sehr stolz, dass wir dieses Fest bei so gutem Wetter mit Ihnen feiern können. Und 1300 Jahre sagen eigentlich, dass diese Stadt eine Reihe Geschichte hat. Sie hat hervorragende Menschen hervorgebracht, nicht nur durch die Universität, die 1402 erstmals gegründet wurde und -Geldmangel hat es auch schon früher in der Geschichte gegeben - zunächst wieder eingegangen ist, aber dann später durch Julius Echter wieder 1582 neugegründet wurde und viele Wissenschaftler, die auch Nobelpreise errungen haben, hervorgebracht hat. Die Stadt lebt von der Universität. Die Stadt lebt von den Kirchen, über 50 Türme werden Sie sehen. Wir beten nicht nur, wir feiern natürlich auch. Und viele Einrichtungen übernehmen die Kirchen subsidiär in dieser Stadt. Wir leben vom Fremdenverkehr, denn wir haben keine anderen Ressourcen als Geist, schöne Gebäude und weitere Sehenswürdigkeiten. Wir sind hier auf der Festung. Sie werden heute Abend in der Residenz sein, wo die Fürstbischöfe von Schönborn gewirkt haben, Balthasar Neumann aus Tschechien eingesetzt haben und den bekannten Maler Tiepolo, der aus Italien kommt und in seiner Jugend in Udine gearbeitet hat, gewinnen konnten, dieses schöne Schloss der Residenz zu erbauen. Und Sie werden natürlich merken, dass Würzburg deswegen das geworden ist, was es ist, weil diese Stadt bauen kann auf gute Leute in der Region, aber immer angereichert wurde von neuen Persönlichkeiten aus dem Ausland. Und neue Persönlichkeiten von außen, und so ist es überall bei jedem Kongress: wir müssen viele Meinungen hören, viele Gebiete abklopfen, nur so kommen wir weiter. Das macht den Fortschritt aus. Der Mix von einheimischen und von neuen Kräften. Von diesem und vom Fremdenverkehr lebt diese Stadt einfach.

Nun, einige Dinge möchte ich schon sagen, was Würzburg in Ihrem Bereich angeht. In der Öffentlichkeit und in der Fachwelt wird viel darüber diskutiert, ob Naturereignisse wie Stürme, extreme und besonders häufige Hochwasser oder Trocken- und Hitzeperioden bereits Aus-



fluss einer eingetretenen Klimaveränderung oder erst die Vorboten einer Klimaveränderung sind. Führende europäische Forschungsinstitute gehen bereits jetzt von einem globalen Klimawechsel aus. Bei dieser Situation ist es also nicht nur gerechtfertigt, sondern auch geboten, dass sich die Gesellschaft insgesamt mit den Risiken eventueller Klimaveränderungen befasst.

In jüngerer Vergangenheit haben extreme Niederschlagsereignisse mit daraus resultierendem Hochwasser, wie das Hochwasser an der Elbe und einigen ihrer Zuflüsse im Jahre 2002, und auch der für unsere Region extrem heiße und trockene Sommer im letzten Jahr gezeigt, dass bei einer Klimaveränderung nicht nur in fernen Regionen, sondern auch in unseren Regionen, mit erheblichen Auswirkungen zu rechnen ist. So sind die Themen „Klimaveränderungen“ und „Konsequenzen für die Wasserwirtschaft natürlich auch für die Stadt Würzburg aufgrund seiner Lage in einer relativ niederschlagsarmen Region einerseits und andererseits mit seiner Lage an einem Fluss von außerordentlicher Bedeutung.

Als Stadt am Main ist Hochwasser natürlich kein neues Phänomen. Die Maßnahmen zum Hochwasserschutz durch Freistaat und Stadt Würzburg gewinnen allerdings vor dem Hintergrund von Klimaveränderungen zusätzlich an Gewicht. Zu nennen sind hier für die letzten zehn Jahre einmal die Neufestsetzung des Überschwemmungsgebietes des Mains im Stadtgebiet im Jahre 1998; dann der Ausbau des Kanalsystems mit Errichtung zahlreicher Regenrückhalteanlagen im Zusammenhang mit dem Generalentwässerungsplan; Ausbau des Hochwasserschutzes zwischen Alter Mainbrücke und Friedensbrücke für ein hundertjähriges Hochwasser, fertiggestellt im Jahre 2001, dann das laufende Planfeststellungsverfahren zum Ausbau des Hochwasserschutzes zwischen Löwenbrücke und Alter Mainbrücke für ein hundertjähriges Hochwasser mit voraussichtlichem Abschluss des Planfeststellungsverfahrens im Sommer dieses Jahres. Nach Abschluss dieser Hochwasserschutzmaßnahme wird dann der Hochwasserschutz für die Stadt Würzburg insgesamt komplettiert sein. Herr Staatsminister Dr. Werner Schnappauf bzw. der Freistaat Bayern hat uns immer wieder geholfen, dass wir unsere Maßnahmen in Würzburg über die Bühne brachten.

Unterfranken zählt in Bayern zu den regenärmsten Regionen mit relativ geringem Trinkwasservorkommen. Eine Verringerung der Jahresniederschläge oder auch nur eine Änderung der jahreszeitlichen Verteilung der Niederschläge, z. B. trockenere Sommer, feuchtere Winter, die durchaus auch Folge einer Klimaveränderung sein können, wie der letzte heiße Sommer schon andeutete, können schwerwiegende Folgen hinsichtlich der Sicherung der Versorgung der Region mit Trink- und Brauchwasser nach sich ziehen. Eine vorausschauende Planung wird deshalb besonderen Wert auf die Sicherung und die sorgfältige Nutzung vorhandenen Trinkwassers und auch auf die Nutzung von Niederschlagswasser legen müssen. Die Stadt Würzburg hat zusammen mit ihren Gesellschaften, die Würzburger Versorgungs- und Verkehrs GmbH, die Stadtwerke Würzburg AG und die Trinkwasserversorgung Würzburg GmbH schon immer besondere Anstrengungen für eine eigenständige und qualitativ hochwertige Versorgung seiner Bürger mit Trinkwasser geleistet. Allein in den letzten 15 Jahren wurden erhebliche technische und finanzielle Mittel aufgewandt, u. a. um das Wasserschutzgebiet Wasserwerk Mergentheimer Straße zu sanieren und neu auszuweiten. Die Ausweitung wurde jetzt im April 2004 durch amtliche Festsetzung abgeschlossen. Die Überarbeitung und Neuausweisung zweier weiterer Schutzgebiete im Stadtgebiet sind noch im Verfahren. Weiterhin wurden zur Sicherung der Trinkwasserversorgung im Einzugsbereich der Bahnhofsquellen neue Brunnen erschlossen. Diese Brunnen im Einzugsbereich der Würzburger Bahnhofsquellen, die für die Stadt Würzburg noch immer von hoher Bedeutung sind trotz gewisser Risikofaktoren, insbesondere durch die Bahnhofsanlagen, stellen somit auch eine Sicherung des Trinkwasserreservoirs der Bahnhofsquellen und damit auch für die gesamte Würzburger Trinkwasserversorgung und einiger angeschlossener Randgemeinden dar.

Mit Wasser sorgsam umgehen, sichert dauerhaft einen der wichtigsten Pfeiler für unsere Zukunft. Dieser Satz aus dem Vorwort der gemeinsam vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft und der Stadt Würzburg im Jahre 2000 erstellten Broschüre „Regenwasser nutzen – Trinkwasser sparen“ erhält gerade vor dem Hintergrund einer Klimaveränderung besonderes Gewicht und steht voll in aktuellem Kontext mit dem dringenden Aufruf zum Wassersparen der UN-Umweltkonferenz in Südkorea Ende März diesen Jahres. Diese Broschüre wendet sich vor allem an Bauherren und Architekten, ökologische und naturverträgliche Lösungen als Alternative zu herkömmlichen und zentralen Regenwasserableitungen anzuwenden. Die Broschüre enthält anschauliche Maßnahmen und Verfahren zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser vor Ort und zur Nutzung von Regenwasser im Haushalt. Neben dieser Broschüre mit ihren Empfehlungen und Ratschlägen forciert die Stadt Würzburg auch konkret eine verbesserte Bewirtschaftung des Niederschlagswassers. Um den Grundsatz „Regenwasser versickern, dort wo es anfällt“ Rechnung zu tragen, muss einerseits gemäß Entwässerungssatzung Niederschlagswasser nach Möglichkeit auf dem selben Grundstück verwertet oder versickert werden. Andererseits müssen für die Einleitung von Niederschlagswasser in den Kanal Gebühren entsprechend der angeschlossenen Fläche bezahlt werden, so dass eine ökologische Bewirtschaftung des Niederschlagswassers sich auch finanziell lohnt.

Auch wenn wirklich immer noch nicht eindeutig geklärt ist auf welche Ursachen eine Klimaveränderung zurückzuführen ist und inwieweit menschliches Verhalten sich darauf auswirkt, gilt es, Konzepte zu finden, wie mit diesem Phänomen umzugehen ist und die Weichen für geeignete Vorsorgemaßnahmen möglichst frühzeitig zu stellen sind. Auf kommunaler Ebene findet gerade die praxisorientierte Fachkenntnis der Wasserwirtschaftsverwaltung und des Deutschen Wetterdienstes großes Interesse. Ich wünsche Ihnen allen bei der beginnenden Veranstaltung viel Erfolg, einen fruchtbaren Gedankenaustausch und Ergebnisse, die auch den Kommunen helfen, geeignete vorbeugende Maßnahmen zu ergreifen. Ein nachhaltiger Umgang mit den Naturgütern und Ressourcen im Sinne der Agenda 21 wird sicherlich eine richtige Handlungsmaxime sein. Ich wünsche Ihnen an diesem Tagungsort – der Festung – nicht nur einen herrlichen Blick auf unsere Stadt. Ich wünsche Ihnen, thematisch bezogen, einen Ausblick über das, was geschehen ist, was möglich ist, Einblick in die Gesetzmäßigkeiten, einen guten Überblick, was alles noch zu tun ist und vor allen Dingen die Formulierung des Weitblickes, auf dass wir auf Dauer günstige Lebensbedingungen haben. Ich wünsche Ihnen einen guten Aufenthalt in dieser Stadt und wenn Sie Zeit haben, sollten Sie auch vielleicht auch die derzeitige bekannte Riemenschneider-Ausstellung hier auf der Festung nebenan oder im Museum am Dom besuchen, aber Sie sollten natürlich, das weiß jeder in Würzburg, nicht den Wein außer acht lassen, denn er ist eingefangener Sonnenschein und da haben Sie heute Gelegenheit, denn Sie wissen, wer Wein trinkt, weiß, dass die Zunge gelöst wird, der Dialog kommt zustande und wir müssen im Dialog ja einiges besprechen und Sie tun etwas für Ihre Gesundheit, weil die Ärzte sagen, Wein regelmäßig getrunken, ist sehr gut und Sie tun auch immer einen guten Zweck, wenn Sie Wein trinken, denn die meisten Weine kommen aus Gütern, aus deren Erträgen und Stiftungen gute Werke in der Stadt und für die Menschen in der Region finanziert werden. Einen guten Aufenthalt – eine gute Tagung.



Klimaschutz – Herausforderung des 21. Jahrhunderts

Werner Schnappauf

Bayerischer Staatsminister für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Vielen Dank, Herr Göttle,
meine sehr verehrten Damen und Herren,

ein herzliches Willkommen auch von meiner Seite zu dieser Tagung an exponierter Stelle und ich möchte die Gelegenheit nutzen, zunächst meinen Kollegen aus Baden-Württemberg ein herzliches „Grüß Gott“ zu entbieten: lieber Stefan Mappus, wir haben eine exzellente Zusammenarbeit sowohl auf der politischen Ebene wie auch auf der kollegialen Ebene der beiden Ministerien, der Landesämter, ein herzliches Dankeschön, ein herzliches Willkommen an die Baden-Württemberger Gäste, an unsere Partner beim KLIWA-Projekt, Herr Regierungspräsident, lieber Herr Beinhofer, Herr Bauer, Herr Bürgermeister von meiner Seite auch noch einmal eine herzliche Gratulation der Stadt zu ihrem großem runden Jubiläum. Der Ministerpräsident hat ja am Freitag die Glückwünsche der Staatsregierung überbracht, und ich freue mich sehr, dass wir heute in der Jubiläumsstadt diese bedeutende Tagung haben. Ich freue mich, dass viele Gäste hier sind, ganz besonders Willkommen den internationalen Gästen. Denn letzten Endes ist das Thema, was wir besprechen, auch ein internationales.

Ein Thema, meine sehr verehrten Damen und Herren, das uns alle zutiefst bewegt und ganz besonders in einer Zeit, in der wir vor riesigen Herausforderungen jedweder Art stehen. Das gilt wirtschaftlich genauso wie ökologisch. Wirtschaftlich, insbesondere für Deutschland sind wir in den letzten Jahren zurückgefallen auf den letzten Platz im Wirtschaftswachstum mit dramatischen Einnahmeausfällen bei den Steuern und je weniger Steuern wir einnehmen, um so schwieriger wird es, öffentliche Aufgaben auch - und gerade ökologische -, das gilt genauso für soziale und kulturelle Aufgaben, zu finanzieren. Diese Schwierigkeit Deutschlands, sich ökonomisch im weltweiten Wettbewerb zu behaupten, hemmt das Engagement in vielen Bereichen. Es wird immer schwieriger, Klimaschutz, Hochwasserschutz und andere Maßnahmen im notwendigen Tempo zu verwirklichen und deshalb sind wir alle aufgerufen, ganzheitlich zu denken und das Leitbild nachhaltiger Entwicklung auch wirklich mit Leben zu erfüllen. Denn es hat weder die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit etwas davon, noch die ökologische Verträglichkeit. Wenn wir zurückfallen, dann nimmt beides Schaden. Und deshalb, meine sehr verehrten Damen und Herren, wollen wir, gerade die beiden Länder Baden-Württemberg und Bayern, die auch wirtschaftlich zu den stärksten Ländern in Deutschland gehören, auch einen ganz bewussten Beitrag leisten, Klimaschutz und Hochwasserschutz zu forcieren, um damit deutlich zu machen, dass für uns das Leitbild nachhaltiger Entwicklung das Credo ist, dem wir folgen und d. h. wir setzen einerseits auf innovatives wirtschaftliches Wachstum und andererseits auf konkrete ökologische Verträglichkeit dieser weiteren Entwicklung unserer beiden Länder. Und deshalb, meine sehr verehrten Damen und Herren, wollen wir mit diesem Kongress und dem Thema, was inmitten steht, auch deutlich machen, dass für uns es in diesem Zusammenhang zwei große Stellschrauben gibt. Die eine Stellschraube ist aktiver Klimaschutz und die zweite große Stellschraube konsequenter Hochwasserschutz. Aktiver Klimaschutz schon deshalb, weil die Erwärmung kontinuierlich fortschreitet. Wir gehen davon aus, dass bis zum Jahr 2100 wir einen weiteren Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur haben werden von 1,4 bis 5,8° C.

Wir haben in Bayern eine regionale Klimastudie machen lassen, um ausgehend von diesen Welttemperaturerhöhungen berechnen zu können, was bedeutet es konkret im Freistaat. Und wir haben – ich darf das jetzt mal etwas zusammenfassend sagen – in einer sehr großen Studie, die uns auch sehr viel Geld gekostet hat (waren fast 20 Mill. Euro) über 100 Forschungsvorhaben verschiedenster Hochschulen und Institute, die hier zusammengefasst eingeflossen sind. Wir können zusammenfassend sagen, es wird im gesamten Land kontinuierlich wärmer, im Süden Bayerns wärmer und noch feuchter und im Norden, also im Fränki-



schen wird es wärmer und noch trockener. Wenn ich sage, „noch feuchter und noch trockener“, dann vor dem Hintergrund, dass heute schon Südbayern etwa dreimal so viel Niederschlag hat wie der Norden Bayerns. Im Süden, vor allem im Voralpenraum, kräftige Niederschläge, häufigere Niederschläge ohnehin schon zu Hause, wird es wärmer und noch feuchter. Im Bodenseeraum, so sagt es die Klimastudie Bayern, bis 2050 ist eine Temperaturzunahme von bis zu 6 °C zu erwarten mit all den Folgen verstärkter Niederschlagsgewittertätigkeit, Starkregenereignisse und den Konsequenzen für den Hochwasserschutz. Auch darüber hinaus, was Murenabgänge etc. angeht; und im Fränkischen, in Nordbayern, wärmer und noch trockener mit all den Konsequenzen hier, vor allem also für die Trinkwasserversorgung – Herr Bürgermeister Bauer hat eben davon gesprochen -. Die Regierung unternimmt ja große Anstrengungen, die Trinkwasserversorgung zu verbessern im Unterfränkischen. Das wird im Zuge der Klimaerwärmung eine noch zugespitztere Bedeutung erfahren, also, wenn es wärmer und noch trockener im Fränkischen wird mit den Konsequenzen vor allem für Trinkwasser, aber auch für Landwirtschaft und Pflanzenbau.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, vor diesen Hintergrund ist ein aktiver Klimaschutz zwingend notwendig. Bayern hat dazu ein eigenes Klimaschutzprogramm gestartet. Zum Vergleich: Wir haben in Bayern etwa 7 Tonnen CO₂-Ausstoß pro Kopf und Jahr, Deutschland liegt zwischen 10 und 11 Tonnen, die USA bei 20 bis 22 Tonnen. Und wenn Sie sehen, gestern Abend und heute Morgen – ich bitte um Nachsicht, dass ich mich etwas verspätet habe, aber wir hatten gestern Abend den Besuch des chinesischen Ministerpräsidenten Wen Jiabao in München mit einem großen Empfang und heute Morgen war die ganze Stadt hermetisch abgeriegelt durch den Besuch. Wen Jiabao hat ein Land mit 1,3 Mrd. Menschen mit einem gigantischen Wirtschaftswachstum und heute schon einen CO₂-Ausstoß pro Kopf in der Größenordnung von 4 Tonnen. Und wenn Sie hier die Quantitäten sehen: Wir in Bayern haben 12 Mio. Einwohner, Stefan, wie viel hat Baden-Württemberg Einwohner? – 11 Mio. Also zwei Länder mit ähnlichen Größenordnungen. 11, 12 Mio. Einwohner, die im Klimaschutz Vorbildliches leisten in Deutschland, aber dieses ist letzten Endes ein Tropfen auf dem heißen Stein, wenn man sieht, was weltweit los ist. Einerseits die USA mit um die 20 Tonnen pro Kopf und Jahr bei 250 Mio. Einwohner und wenn Sie sehen, China heute mit um die 4 Tonnen bei 1,3 Mrd. und einer kräftig steigenden Wirtschaft jedes Jahr um die 10 %, ähnlich in Indien mit 1,2 Mrd. Einwohnern, wobei Indien in wenigen Jahren China überholt haben wird, weil das Bevölkerungswachstum die Geburtenkontrolle bei weitem nicht so im Griff ist wie in China. Also hier im Asiatischen mit rd. 2,5 Mrd. Einwohnern und einer wachsenden Wirtschaft, einem wachsenden Energiehunger, der zum beachtlichen Teil mit fossilen Energien befriedigt wird, zeigt, welche Bedeutung der Schutz unseres Ökosystems, also das Bemühen, das Ökosystem in Balance zu halten, in den nächsten Jahren haben wird.

Ich will das hier jetzt nicht vertiefen, meine sehr verehrten Damen und Herren, sondern lassen Sie mich abrundend sagen: Selbst wenn es gelänge, was völlig utopisch ist, aber selbst wenn es gelänge, den CO₂-Ausstoß heute auf Null zu setzen, hätten wir die nächsten 30 / 40 Jahre mit der schon in der Atmosphäre vorhandenen CO₂-Menge eine weitere Erwärmung zu vergegenwärtigen mit all den Folgen und nachdem es unmöglich ist, den CO₂-Ausstoß auf Null zu setzen, heißt das, das sich das über die Jahrzehnte, es ist zu befürchten, auch weit über das 21. Jahrhundert hinaus, fortsetzen wird, so dass also aktiver Klimaschutz global international das Gebot der Stunde ist, um das Ökosystem in Balance zu halten. Wir müssen deshalb heute schon uns mit Anpassungsstrategien beschäftigen, nachdem die Klimaerwärmung fortschreiten wird. Unaufhaltsam in den kommenden Jahrzehnten ist es notwendig, dass wir uns frühzeitig mit Anpassungsstrategien befassen, wenn es auf der einen Seite wärmer und trockener und auf der anderen Seite wärmer und noch feuchter wird, sind Strategien für die Trinkwasserversorgung, für die Landschaft, für den Waldbau genauso erforderlich, wie Strategien für den Hochwasserschutz.

Ich möchte mich hier bei allen verantwortlichen Repräsentanten des KLIWA-Projektes ganz herzlich bedanken, bei den Baden-Württemberger Kollegen, beim Deutschen Wetterdienst,

bei unseren bayerischen Verantwortlichen, Herr König, der, ich glaube 1999 schon dieses Projekt mit den Baden-Württembergern kreiert hat mit dem Deutschen Wetterdienst. Damals hat noch keine breite Öffentlichkeit so intensiv über Anpassungsstrategien gesprochen. Sie haben aber mit den Kollegen zusammen das Projekt schon seinerzeit kreiert, Herr Göttle, für das Landesamt. Allen ein ganz herzliches Dankeschön, denn heute können wir – fünf Jahre später – erste Ergebnisse vorlegen. Ziel des Projektes ist die gemeinsame Suche nach Lösungen, um die Klimaerwärmung beim Hochwasserschutz zu berücksichtigen. Wir wollen deshalb ganz bewusst deutlich machen, dass wir diese Herausforderung aufnehmen und, meine sehr verehrten Damen und Herren, als erste Konsequenz aus den Untersuchungen des KLIWA-Projektes wollen wir heute auf diesem Kongress eine Zwischenbilanz ziehen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass in Süddeutschland, also im Raum Baden-Württemberg und Bayern, in den vergangenen 70 Jahren, konkret seit 1931, die Temperatur im Jahresmittel je nach Gebiet zwischen 0,5 und 1,2° C zugenommen hat. Vor allem im Winterhalbjahr ist die Temperaturzunahme besonders ausgeprägt. Dort ergibt sich ein höherer Wert, der im Dezember bis zu 2,7° C Erwärmung reicht. Ich glaube, wir spüren das ja alle, der Wunsch nach weißer Weihnacht ist in den letzten Jahren immer weniger Realität gewesen, sondern man hat dann eher im Frühjahr – Januar, Februar, März – Niederschläge in Form von Schnee, aber kaum mehr Weihnachten. Insgesamt können wir feststellen, dass im Winter und im Frühjahr die Niederschläge zunehmen entsprechend der Klimastudie Bayern, auch durch die KLIWA-Studie belegt. Die Starkniederschläge nehmen vor allen Dingen im Winter und Frühjahr zu. Die Schneedeckendauer nimmt in den mittleren Höhenlagen kontinuierlich ab. Auf Deutsch gesagt, in den Mittelgebirgen gibt es immer weniger und kürzer Schnee. Auch, wenn aus den KLIWA-Projekten noch kein eindeutiger Trend für die Zunahme von Hochwasser zu erkennen ist, ist doch auffällig die Häufung von Hochwässern in den letzten 30 Jahren und deshalb, meine sehr verehrten Damen und Herren, gilt es Vorsorge zu treffen.

Das Vorsorgeprinzip groß schreiben heißt, vorzubeugen und damit Vorsorge zu treffen, weil es nicht nur besser ist, vorzusorgen, sondern auch billiger. Wir erinnern uns alle an das große Pfingsthochwasser in Bayern 1999, wo wir Hunderte von Millionen Euro Schäden hatten und Sie erinnern sich alle an das große Sommerhochwasser 2002, wo wir an der Elbe und benachbarten Gebieten Schäden in der Summe von 9 Milliarden Euro hatten. Das heißt also, eine sich verschärfende Hochwassergefahr von vornherein zu berücksichtigen, ist besser und billiger, als hinterher hohe volkswirtschaftliche Schäden zu haben, reparieren bzw. bezahlen zu müssen. Deshalb hat das KLIWA-Projekt diese weltweiten Annahmen für die Temperaturerhöhung, die globalen Klimamodelle runtergebrochen, die weltweiten Modelle haben eine Rastergröße von 70 km, die zu groß ist, um daraus regionale Rückschlüsse zu ziehen. Im Schnitt wurde ein Raster auf 7 km runtergebrochen und 3 unterschiedliche Szenarien / 3 unterschiedlichen Methoden geprüft. Auch wenn mir unsere Fachleute vermittelt haben, dass die regionalen Klimaszenarien noch nicht eine solche abschließende Sicherheit vermitteln, dass man darauf schon abschließende Rückschlüsse ziehen kann, meine ich doch, dass diese durchgeführten Szenarien außerordentlich wichtige Anhaltspunkte geben. Ich möchte mich bei allen Experten, die hier mitgewirkt haben, sehr herzlich bedanken. Es sind bei allen 3 unterschiedlichen Methoden, die beauftragt worden waren, doch Erkenntnisse zusammengetragen worden, die uns als politisch verantwortlichen Kollegen Mappus in Baden-Württemberg und Kollegen Uli Müller in Baden-Württemberg genauso wie hier bei uns in Bayern mir doch das klare Signal geben, dass vor allem im Winter öfters mit Hochwasser, vor allem mit mittleren Hochwassern gerechnet werden muss und dass wir damit die Gefahr vor uns haben, dass Hochwasserereignisse häufiger kommen und größere Ausmaße annehmen, gerade wenn die Niederschläge als sogenannte Starkregenereignisse niedergehen und darauf, meine sehr verehrten Damen und Herren, gilt es, sich frühzeitig einzurichten.

Ich meine deshalb, dass die Konsequenz aus dem bisherigen Stand der Untersuchungen des KLIWA-Projektes folgende sein muss: Dass wir ab sofort für neue Hochwasserschutz-



planungen im Freistaat Bayern einen Klimaänderungsfaktor berücksichtigen, dass wir auch bestehende Hochwasserschutzanlagen und bestehende Planungen nachrechnen, ob ein Klimaänderungsfaktor Auswirkungen auf bestehende Planungen, bestehende Hochwasserschutzanlagen hat. Wir werden dies nach flussgebietsbezogenen Teilräumen Bayerns jeweils konkretisieren. Anders als Baden-Württemberg, haben wir ja sehr unterschiedliche Flussgebietseinzugsräume, so dass wir für die jeweiligen Flusseinzugsgebiete diesen Klimaänderungsfaktor konkret bestimmen oder abschätzen werden. Die Kollegen aus unserem Hause haben mir gesagt, dass man zum Beispiel für das Obere Main-Gebiet, das ist also das westliche Oberfranken, Raum Bamberg-Lichtenfels, einen Klimaänderungsfaktor in einer Größenordnung von + 15 % erwartet und damit für künftige Planungen zugrunde legt. Ich glaube, dass dies außerordentlich wichtig ist, dass wir auf diese Art und Weise auch deutlich machen, dass wir nicht abwarten, bis etwas geschieht, sondern dass wir alles daran setzen, vorbeugend künftige Gefahren bereits einzubeziehen.

Meine sehr verehrten Damen und Herren, daran zeigt sich auch, wie wichtig eine insgesamt aufeinander abgestimmte Politik ist, nachhaltige Entwicklung, habe ich ganz am Anfang gesagt. Es macht keinen Sinn, wenn wir heute in vielfältiger Weise, ich sage mal, Geld verbrennen, indem wir international nicht koordiniert vorgehen. Beim Klimaschutz haben wir heute die Situation, dass wir eine Klimaschutzselbstverpflichtung der deutschen Wirtschaft haben. Wir haben ein scharfes Bundesimmissionsschutzgesetz. Wir setzen im Moment obendrauf den europäischen Treibhausgashandel, das EEG, die KWK (Kraftwärmekopplung), verschiedenste Förderungen, die damit einhergehen. Alles das ist nicht sinnvoll aufeinander abgestimmt. Sie kennen die Gutachter, auch aus dem Bundeswirtschaftsministerium, die sagen, dass die EEG-Förderung, dass die erneuerbare Energieförderung obsolet wird im Zuge des Treibhausgashandels. Hier werden Milliarden Euro möglicherweise fehlgeleitet, während wir sie im Klimaschutz, konkret im Hochwasserschutz, sinnvoll brauchen können. Deshalb gilt es, auch hier die Rahmenbedingungen zu schaffen, dass wir entsprechend vorbeugen, denn der Grundsatz „Vorbeugen ist besser und billiger“ gilt überall: im Klimaschutz, im Hochwasserschutz, in der Gesundheitsvorsorge. Überall müssen wir mehr zur Prävention kommen, um nicht später als die Reagierenden, als Reparierende dazustehen. In diesem Sinne haben Sie bei dieser Tagung eine außerordentlich wichtige Aufgabe: dass Sie diese Ergebnisse dieser KLIWA-Studien bewerten, "handle"-bar machen für die Praxis und damit die Grundlage legen für ein neues Verständnis vorbeugenden Handelns in der Umweltpolitik, in der Hochwasserschutzpolitik für Süddeutschland.

Letzten Endes könnte ich mir sehr gut vorstellen, dass das aber sehr schnell zum nationalen und internationalen Maßstab wird, was hier die Länder Baden-Württemberg und Bayern mit Unterstützung des Deutschen Wetterdienstes auf den Weg gebracht haben. Deshalb noch einmal, meine Herren, herzlichen Dank an Sie, Herr König, Herr Schindele, unserem Team: Herr Hafner, ein großes Kompliment, Herr Göttle, dem LfW und ich denke, dass wir damit einmal mehr eine Vorreiterrolle in Deutschland übernehmen. Aber auch hier muss man sehen, dass wir einfach abhängig sind von der nationalen Entwicklung, wenn die großen Weichen falsch gestellt sind und die Steuereinnahmen nicht mehr so sprudeln, können auch wir nicht mehr alles sofort und zu jeder Zeit verwirklichen. Deshalb hängt alles mit allem zusammen. Das wollte ich in der Kürze der Zeit deutlich gemacht haben. Mit dem Dank an Sie wünsche ich der Veranstaltung einen guten Verlauf, gute Ergebnisse, auf dass wir damit unseren Bürgerinnen und Bürgern Nutzen bieten können für ihre Sicherheit, für Hab und Gut, für Leib und Leben. Herzlichen Dank.

Klimaveränderung und Hochwasserschutz

Stefan Mappus

Staatssekretär im Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg

Sehr geehrter Herr Staatsminister Dr. Schnappauf,
sehr geehrter Herr Prof. Göttle, Herr Regierungspräsident, Herr Bürgermeister,
meine sehr verehrten Damen und Herren,

Die Flutkatastrophe 2002 an der Elbe, der Jahrhundertssommer 2003 und deutlich gestiegene Schadenszahlen durch Sturmereignisse sind für viele Anzeichen einer sich abzeichnenden Klimaveränderung. Dies lässt sich auch am Beispiel des Schwarzwaldes bei uns in Baden-Württemberg belegen. So gab es zu Beginn der 90er Jahre des vorigen Jahrhunderts eine Häufung verheerender Hochwasserereignisse an Enz und Nagold. Zudem richteten die Stürme Wiebke und Lothar große Schäden in der Forstwirtschaft an.

Betrachtet man die Temperaturerhöhung im letzten Jahrhundert um ca. 1° und stellt diese einmal der Temperaturerhöhung zwischen der Eiszeit und Warmzeit von ca. 4° gegenüber, so erkennt man die Dimension der bevorstehenden Klimaveränderung, die wir, nach allem, was wir heute wissen, zur Kenntnis zu nehmen haben und mit deren Auswirkungen wir in den nächsten Jahren und Jahrzehnten leben müssen.

Baden-Württemberg, Bayern und der Deutsche Wetterdienst, haben sich diesen Problemen, wie ich finde, frühzeitig angenommen und das Projekt KLIWA 1999 gestartet. Es soll uns Informationen über das Wettergeschehen in den nächsten 50 Jahren liefern, um die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft und hier insbesondere auf den Hochwasserschutz besser beurteilen zu können.

Letztendlich, müssen wir aber auch unsere Hochwasserschutzstrategie den veränderten Rahmenbedingungen anpassen. Neben dem technischen Hochwasserschutz, mit einem jährlichen Investitionsvolumen von knapp 60 Mio. € in Baden-Württemberg, werden wir künftig die Flächenvorsorge und natürlich auch die Hochwasservorsorge intensivieren müssen. Denn alles auf Klimaveränderungen zu schieben, wäre zu einfach. Trotz zum Teil bekannter Risiken wurde in der Vergangenheit immer wieder in Talauen gebaut und so die Schadenspotentiale vergrößert.

Mit der Erstellung von Hochwassergefahrenkarten gemeinsam mit den Kommunen in Baden-Württemberg zeigen wir erstmals landesweit die Überflutungssituation in Abhängigkeit verschiedener Wiederkehrintervalle von Hochwasserereignissen an unseren Gewässern auf. Künftig werden alle Gebiete innerhalb eines hundertjährigen Ereignisses als Vorranggebiete für den Hochwasserschutz in die Regionalpläne aufgenommen.

Mit der Änderung des Wassergesetzes des Landes Baden-Württemberg im Dezember 2003 werden diese so gekennzeichneten Flächen kraft Gesetzes Überschwemmungsgebiete. Es bedarf nun keiner Rechtsverordnung mehr, um diese Flächen vor Bebauung oder anderweitiger Nutzung zu schützen. Diese Maßnahmen dienen dazu, ein Ansteigen der Schadenspotenziale in überflutungsgefährdeten Gebieten zu verhindern, was angesichts der ersten Ergebnisse aus KLIWA, die heute und morgen hier diskutiert werden, auch dringend geboten ist.

Aber auch die Hochwasservorsorge und die damit verbundenen Vorteile müssen noch stärker als bisher ins Bewusstsein der Verantwortlichen vor Ort dringen. So haben wir uns entschlossen, landesweit Hochwasserpartnerschaften zu gründen, um regional vor Ort in einem Einzugsgebiet das Bewusstsein für Hochwasserschutz und Hochwasservorsorgemaßnah-



men wach zu halten. Mit dieser Einrichtung sind wir auch in der Lage, sehr gezielt und vor allem auch sehr flexibel auf neue Erkenntnisse einzugehen und kurzfristig aktuelle Themen wie z. B. hochwassersicheres Bauen oder sichere Heizöllagerung zu behandeln.

Ein sehr wichtiger Faktor ist für uns auch die dauernde Verbesserung der Hochwasservorhersage, die bei uns seit 10 Jahren sehr erfolgreich durch die Hochwasservorhersagezentrale bei der Landesanstalt für Umweltschutz in Karlsruhe betrieben wird. Ich darf hier zwei Projekte, RADVOR und RADOLAN, nennen, die die Verbesserung der Vorhersage insgesamt und auch für kleine Einzugsgebiete zum Ziel haben und die uns wiederum sehr eng mit dem Deutschen Wetterdienst verbinden.

Es muss natürlich auch mehr denn je um Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen gehen. Ein Verzicht auf Maßnahmen zur Verringerung der Treibhausgasemissionen und nur das alleinige Vertrauen auf spätere technische Anpassungsmaßnahmen wäre ein „Spiel mit dem Feuer“ und mit einer verantwortungsvollen Politik nicht vereinbar. Die Klimaveränderungen verhindern können wir nicht mehr. Wir können nur durch geeignete Maßnahmen versuchen, den Temperaturanstieg durch die Verringerung von Treibhausgasemissionen zu mindern. Denn wenn wir auch nicht zu den ersten Verlierern des Klimawandels gehören, so trifft uns als Industriestaat und Verursacher doch ein besonderes Maß an Verantwortung. So hat Baden-Württemberg ein Förderprogramm „Klimaschutz-Plus“ aufgelegt, dass Maßnahmen zur CO₂-Reduzierung fördert, wie z. B. den baulichen Wärmeschutz, den Einbau von Blockheizkraftwerken oder den Einsatz regenerativer Energien. Gerade bei dem letzten Punkt ist es unser Ziel, den Anteil erneuerbarer Energien in den nächsten Jahren zu verdoppeln.

Erneuerbare Energien fördern heißt von Ideologien loszulassen und nach Effizienzgesichtspunkten vorzugehen. Wir sind der Meinung, dass wir mit der Kombination aus Klimaschutzmaßnahmen und angepassten Strategien in der Wasserwirtschaft und speziell im Hochwasserschutz und Hochwassermanagement gut aufgestellt sind, um den sich abzeichnenden Klimawandel begegnen zu können. Im Detail sind allerdings noch vielfältige und sicherlich schwierige Probleme zu lösen. Die ersten Ergebnisse aus KLIWA zeigen, dass die Erkenntnisse, die bisher gewonnen wurden, insbesondere, was die Entwicklung regionaler Klimaszenarien angeht, auch auf andere Bereiche übertragbar sind. So untersuchen wir in einem Verbundvorhaben mit dem Namen KLARA für „Klimawandel, Auswirkungen, Risiken, Anpassungen“ die Auswirkungen der bereits erfolgten und der zu erwartenden Klimaveränderungen auch auf andere Sektoren, wie z. B. Land- und Forstwirtschaft oder Gesundheitsschutz, Energiewirtschaft, Tourismus und Naturschutz. Die Ergebnisse aus KLIWA können wir hierbei exzellent verwenden.

Das 2. KLIWA-Symposium hat, wie ich glaube zu Recht, auch den Themenschwerpunkt Hochwasser gewählt. Dies wird insbesondere durch die Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellberechnungen für das Neckar-Einzugsgebiet und die daraus aufgezeigten Folgen für die wasserwirtschaftliche Planung deutlich. Wir müssen handeln, und zwar rasch. Gerade wenn es darum geht, bereits bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen die derzeit bekannten Auswirkungen der Klimaveränderungen zu berücksichtigen ist rasches Handeln erforderlich, denn eine Anpassung bestehender Anlagen an neue Situationen ist immer sehr viel aufwändiger und kostenintensiver als die Berücksichtigung dieser Faktoren bereits im Planungsstadium.

Ich darf mein Statement abschließen mit einem Dank für die exzellente Zusammenarbeit mit den Kolleginnen und Kollegen aus Bayern. Vor kurzem stand in einer großen deutschen Zeitschrift: „Bayern und Baden-Württemberg – der bessere Teil Deutschlands“. Es hat sich schwerpunktmäßig auf ökonomische Daten bezogen, aber ich glaube, auch was die Ökologie angeht und vor allem, was die Zusammenarbeit mit Blick auf die Regierungen betrifft, klappt diese Zusammenarbeit ganz hervorragend. Dafür, lieber Werner Schnappauf, ein



herzliches Dankeschön an die bayerische Seite und ich danke auch dem Deutschen Wetterdienst für die hervorragende Zusammenarbeit und ich hoffe natürlich, dass wir uns vielleicht nicht erst in drei oder vier Jahren in einem schönen Landesteil von Baden-Württemberg zur nächsten Sitzung treffen. Ich wünsche der Tagung anregende Diskussionen und freue mich auf die Ergebnisse, die mit Sicherheit einen weiteren Meilenstein in diesem so wichtigen Themenbereich bilden werden.



Perspektiven der Klimamodellierung mit aktuellen Beispielen

Ulrich Cubasch

Institut für Meteorologie der Freien Universität Berlin

3. Das Klimasystem

Im Lehrbuch steht: Das geographische Klima ist die für einen Ort, eine Landschaft oder einen größeren Raum typische Zusammenfassung der erdnahen und die Erdoberfläche beeinflussenden atmosphärischen Zustände und Witterungsvorgänge während eines längeren Zeitraums – gekennzeichnet durch eine charakteristische Verteilung der häufigsten, mittleren und extremen Werte.

Das Klima entsteht durch das Zusammenwirken und interne Schwankungen der Komponenten des Klimasystems (Abb. 1). Eine Komponente ist die Atmosphäre, die mit der Hydrosphäre (Ozean und Wasserkreislauf), der Kryosphäre (Eis und Schnee), der Biosphäre (Pflanzen und Tiere), der Pedosphäre (Boden) und der Lithosphäre (Gestein) in Wechselwirkung steht. Die unterschiedlichen Zeitskalen, in denen die Klimasubsysteme schwanken, bestimmen die Dynamik des Klimasystems. Die Schwankungen des Untersystems Atmosphäre beispielsweise sind gemeinhin als „Wetter“ bekannt: Wolken und Luftdruckgebiete verändern sich innerhalb weniger Stunden und Tage. Die Tiefenströmungssysteme der Ozeane oder die Zustände großer Eismassen dagegen wandeln sich in Zeitskalen von Jahrhunderten bis Jahrtausenden. Die Schwankungen innerhalb der Sphären sowie die gegenseitige Beeinflussung der Klimasubsysteme bezeichnet man als „Klimarauschen“.

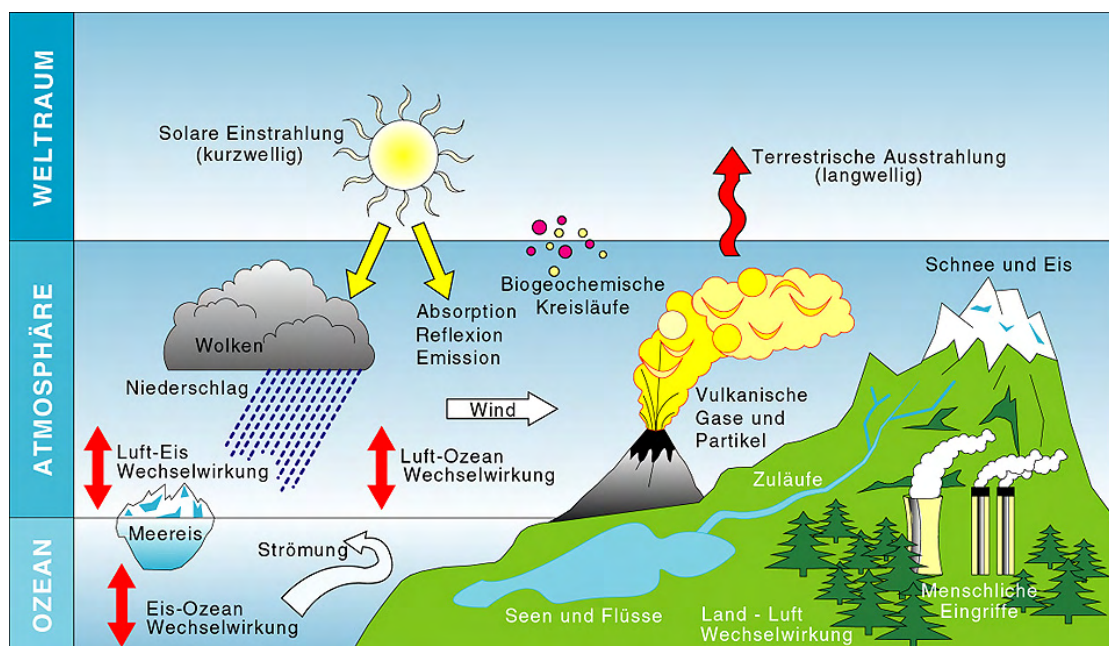


Abb.1: Das Klimasystem und seine Komponenten

Im Klimasystem können kleine interne Störungen durch nichtlineare Wechselwirkungen potenziell große Wirkungen hervorrufen. Außerdem spielen auch externe Anregungsfaktoren mit. Dazu gehören Veränderungen in der Sonneneinstrahlung, bedingt dadurch, dass sich die Bahn der Erde um die Sonne sowie die Lage der Erdachse mit der Zeit ändern. Auch ist die Sonneneinstrahlung zeitlich nicht konstant, sondern unterliegt Schwankungen. Und schließlich zählt der Vulkanismus zu den externen Antrieben.

In der aktuellen Klimadebatte werden die anthropogenen Faktoren, also der zusätzliche Treibhauseffekt und die Schadstoffbelastung der Atmosphäre, separat betrachtet.

3. Klimamodelle

Klimamodelle beschreiben das Klimasystem mit Hilfe physikalisch-mathematischer Gleichungen, die dann mit Hilfe eines Computers gelöst werden. Hierzu werden die Erdatmosphäre sowie der Ozean in Gitterzellen zerlegt. Diese Gitterzellen haben heutzutage eine Kantenlänge von typischerweise 250 bis 500 km in der Horizontalen und 9-20 Schichten in der Vertikalen. Vorgänge, die innerhalb einer Gitterzelle ablaufen, wie z. B. Wolkenbildung, werden parametrisiert, d. h. aus den an den Rändern der Gitterzelle bekannten Werten hergeleitet.

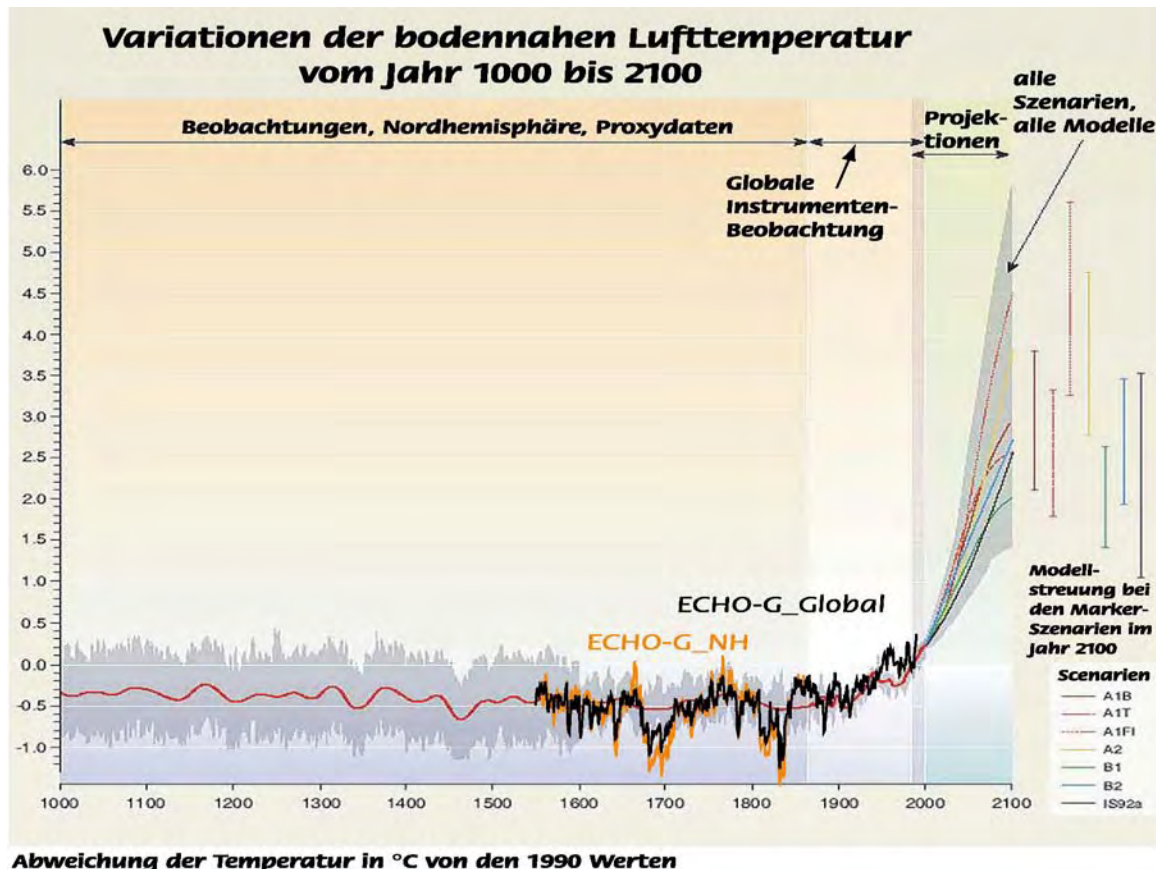


Abb. 2: Die Änderung der global gemittelten bodennahen Lufttemperatur in Bezug auf das Jahr 1990. Vom Jahr 1000 bis zum Jahr 1860 wurde nur die Nordhemisphäre gemittelt, da für die Südhemisphäre keine Daten vorliegen. In diesem Zeitraum handelt es sich um aus Baumringen, Korallen, Eisbohrkernen und historischen Überlieferungen hergeleitete Daten. Die rote Linie zeigt das 50-Jahresmittel, das graue Band das 95%-Vertrauensintervall der Jahresdaten. Von 1860 bis 2000 sieht man die mit Instrumenten gemessenen Werte, die rote Linie zeigt das 10-Jahresmittel. Vom Jahr 1990 bis zum Jahr 2100 wird die Temperaturhochrechnung für die sechs Standard-SRES-Szenarien sowie das IS92a-Szenarium des vorletzten IPCC-Berichtes gezeigt, die mit einem Modell mittlerer Klimasensitivität berechnet wurden. Das graue Band mit der Bezeichnung „alle Szenarien - alle Modelle“ zeigt die Ergebnisbandbreite, wenn man alle 35 SRES-Szenarien in Betracht zieht und alle unterschiedlichen Modelle. Ebenfalls eingezeichnet: Das Ergebnis einer Simulationen mit einem Klimamodell, dass die Veränderlichkeit der Sonne, den Vulkanismus sowie der Treibhausgase mit berücksichtigt (beige Kurve: im Mittel für die Nordhalbkugel, schwarze Kurve: globales Mittel).

Die heutigen Klimamodelle sind häufig Weiterentwicklungen von Wettervorhersagemodellen, was den Vorteil hat, dass sie schon routinemäßig erprobt worden sind. Die Klimamodelle werden „geeicht“, indem man mit ihnen das heutige Klima nachrechnet und mit den Beobachtungen vergleicht.

3. Ergebnisse verschiedener Simulationen

3.1 Historisches Klima

Mittlerweile sind die Rechenanlagen so schnell geworden, dass man die Modelle auch für die Simulation des Klimageschehens der letzten Jahrhunderte einsetzen kann.

Man geht davon aus, dass zu Beginn dieses Zeitraums der Einfluss des Menschen auf das globale Klima gering war. Zwar gibt es keine direkten Temperaturmessungen, doch eine Vielfalt von Aufzeichnungen (Ernteerträge, Deichreparaturkosten, Segelzeiten von Schiffen) sowie Proxy-Daten (also etwa Baumringe oder Sedimentbohrkerne), aus denen man das historische Klima rekonstruieren kann. In einer Klimasimulation der letzten 450 Jahre wurden die Sonnenaktivität, der Vulkanismus (beide aus Proxy-Daten hergeleitet), sowie die Treibhausgase (die bis zu Beginn der Industrialisierung überwiegend natürlichen Ursprungs sind), als Antrieb vorgeschrieben. In diesem numerischen Experiment ist man in der Lage, die globale Klimaentwicklung (Abb. 2) und die europäische Temperaturverteilung, wie sie zum Ende der kleinen Eiszeit herrschte, realistisch zu simulieren.

Diese Klimaberechnung zeigt, dass besonders während des „Späten Maunder Minimums“ (1675-1715) das Klima global kälter war als heute. Diese Kältephase wird durch historische Aufzeichnungen für Europa dokumentiert. Ein Vergleich der Rekonstruktion des Klimas aus Überlieferungen mit der Modellsimulation zeigt für Mitteleuropa eine gute Übereinstimmung (Abb. 3). In Nordeuropa dagegen sieht man deutliche Unterschiede, was man aber auch auf die schlechte Datenlage in diesen Gebieten zurückführen kann. Die Modellsimulation zeigt deutlich, dass eine wesentliche Ursache dieser kleinen Eiszeit im Wechselspiel zwischen veränderter Sonnenaktivität, Vulkanismus und einer Kopplung von Atmosphäre, Ozean und Meereis liegen muss.

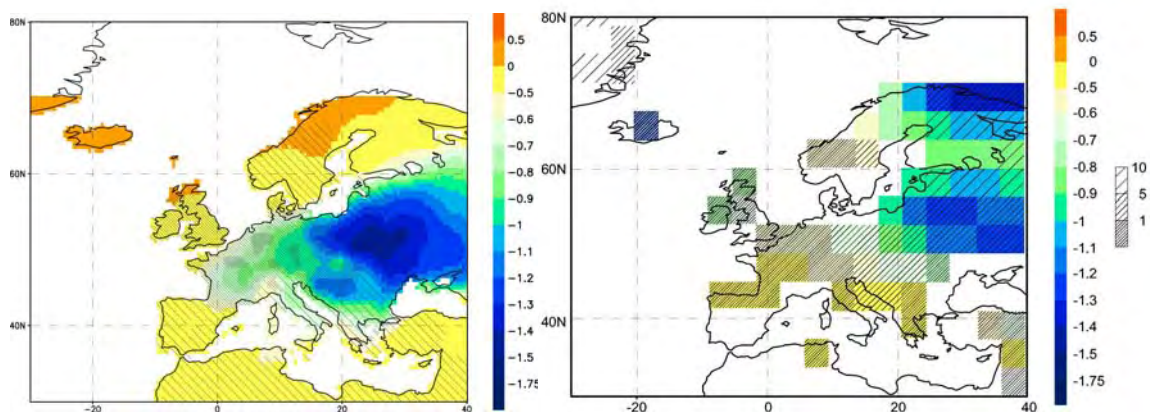


Abb. 3: Die Temperaturabweichung während des „Späten Maunder Minimums“ (1675-1715). Links: Modellsimulation; rechts: rekonstruiert aus historischen Überlieferungen. Die Straffierung gibt die Signifikanz wieder.

3.2 Das derzeitige Klima seit Beginn der Industrialisierung

Eine häufig in der Öffentlichkeit gestellte Frage ist, inwieweit die Sonne und die Vulkane an den seit den letzten 150 Jahren beobachteten Klimaveränderungen beteiligt sind, oder ob diese Schwankungen durch die Industrialisierung hervorgerufen worden sind.

Hierzu hat man mehrere Klimaexperimente durchgeführt, in denen man a) nur die natürlichen Klimaantriebe berücksichtigt hat; b) nur die anthropogenen; und c) die natürlichen und



die anthropogenen. Wie man aus Abb. 4 erkennen kann, muss man den natürlichen und anthropogenen Antrieb benutzen, um mit der Beobachtung eine optimale Übereinstimmung zu erhalten.

Die simulierte jährliche globale Mitteltemperatur

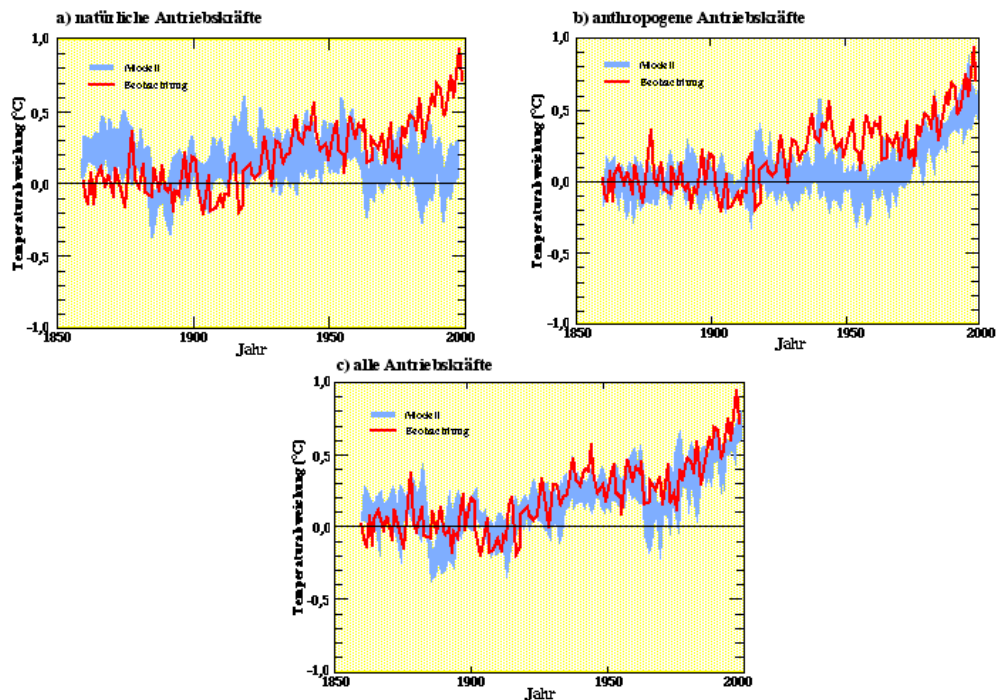


Abb.4: Man kann Klimamodelle nutzen, um getrennt die Temperaturänderungen zu berechnen, die durch natürliche oder anthropogene Ursachen hervorgerufen werden. In Abbildung a) werden nur die natürlichen Antriebe, d. h. solare Variabilität und Vulkanismus, berücksichtigt, in Abbildung b) nur die anthropogenen Anteile (Treibhausgase und Sulfat-Aerosole). In Abbildung c) werden sowohl natürliche als auch anthropogene Faktoren eingebracht. Das blaue Band gibt die Modellhochrechnungen einschließlich einer Abschätzung ihrer Unsicherheiten wieder, die rote Kurve den beobachteten Klimaverlauf. Man bekommt die beste Simulation der Beobachtungskurve, wenn man sowohl anthropogene als auch natürliche Antriebsfaktoren nutzt.

3.3 Klimahochrechnungen

Um realistisch abzuschätzen, wie sich das Klima in der Zukunft entwickeln wird, werden so genannte Szenarien entwickelt. In diese Szenarien fließt ein, wie sich die Weltbevölkerung verändern wird, welchen Lebensstandard sie erreichen wird, wie viel Energie verbraucht werden wird und welche Energieträger man dafür nimmt. Man hat sich in internationalen Gremien auf ca. 35 IPCC-SRES¹-Szenarien geeinigt, die verschiedene Entwicklungen (story lines) annehmen. Diese Szenarien werden in 4 Szenarienfamilien (Abb. 5) unterteilt, und werden durch 6 Standardszenarien repräsentiert (fett gedruckt):

A1: Die A1-Szenarienfamilie beschreibt eine Welt mit sehr schnellem Wirtschaftswachstum, einer Weltbevölkerung, die in der Mitte des nächsten Jahrhunderts ihr Maximum erreicht und danach abnimmt, und die schnelle Einführung neuer und effizienterer Technologien. Regionale Unterschiede im Lebensstandard und Einkommen werden ausgeglichen. Diese A1 Familie kann in drei Gruppen unterteilt werden, welche die technologischen Möglichkeiten der Energiegewinnung berücksichtigen: **A1FI** (fossil intensive) sieht das Schwergewicht auf fossilen Brennstoffen (Kohle, Öl, Erdgas), bei der Gruppe **A1T** geht man von nicht-fossilen Energieträgern aus, und **A1B** beruht auf einer Mischung von verschiedenen Energieträgern.

¹ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (www.ipcc.ch)
 SRES: Second Report on Emission Scenarios

A2: Die A2-Szenarien-Familie beschreibt eine sehr heterogene Welt. Man geht von einer regionalen Autarkie und dem Erhalt lokaler Unterschiede aus. Die Weltbevölkerung nimmt kontinuierlich zu. Die ökonomische Entwicklung, der Lebensstandard und die Einkommen sind regional sehr unterschiedlich, der technologische Wandel geht nur langsam voran.

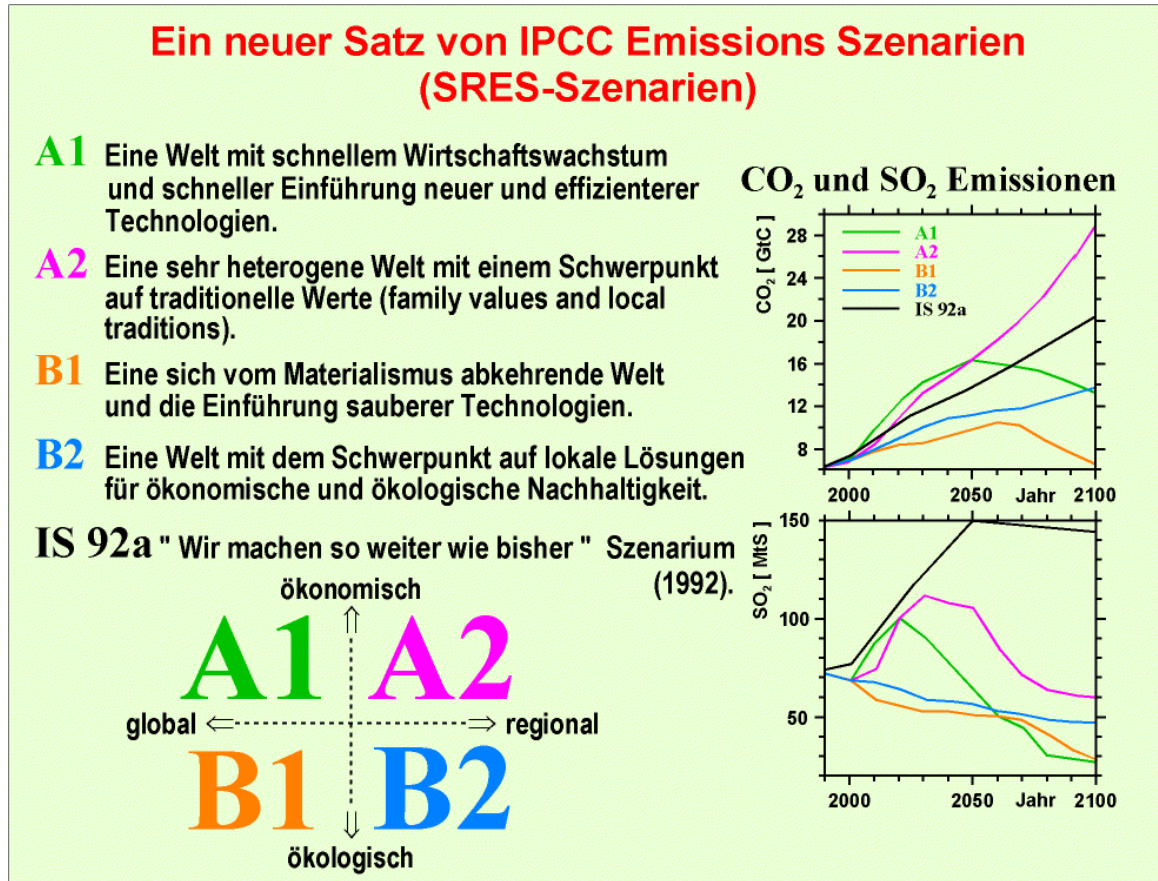


Abb. 5: Die vier Leitszenarien im Überblick zusammen mit dem älteren „business as usual“ Szenarium. Links oben findet man die globalen Kohlendioxid-, links unten die Schwefeldioxid-Emissionen jeweils bis zum Jahre 2100.

B1: Die B1-Szenarien-Familie geht wie A1 von einer Weltbevölkerung aus, die nur bis Mitte des nächsten Jahrhunderts anwächst. Die ökonomische Entwicklung geht aber mehr in Richtung Dienstleistungs- und Informationsgesellschaft mit weniger Materialverbrauch und der Einführung von sauberen und effizienten Technologien. Das Gewicht liegt auf globalen nachhaltigen Lösungen der ökonomischen, sozialen und Umwelt- Probleme.

B2: Die B2-Szenarien-Familie nimmt eine Welt an, in der lokale nachhaltige Lösungen zu ökonomischen, sozialen und Umwelt- Problemen gefunden werden. Die Bevölkerung steigt kontinuierlich an, aber langsamer als in A2. Es gibt eine weniger schnelle ökonomische Entwicklung und eine mehr diverse technologische Entwicklung als in den anderen Szenarien. Der Schwerpunkt liegt auf Umweltschutz und sozialer Gerechtigkeit, aber mehr auf lokaler und regionaler Ebene.

3.4 Das zukünftige Klima

Es wird hochgerechnet, dass die global gemittelte bodennahe Lufttemperatur um 1.4 bis 5.8° C für den Zeitraum 1990 bis 2100 ansteigt. Dieses Resultat umspannt alle 35 SRES Szenarien und basiert auf mehreren Klimamodellen (Abb. 2). Die zu erwartende Erwärmung ist größer als die, die man im 20. Jahrhundert beobachtet hat und ist sehr wahrscheinlich die



höchste der letzten 10 000 Jahre. Der globale Wasserdampfgehalt in der Atmosphäre wird zunehmen. In der zweiten Hälfte des 21ten Jahrhunderts wird der Niederschlag in den mittleren und hohen Breiten der Nordhemisphäre zunehmen. Dort wird auch die Variabilität anwachsen.

Die Schnee- und Eisbedeckung auf der Nordhalbkugel wird weiter abnehmen. Auch die Gletscher und Eiskappen werden sich weiter zurückziehen. Die südpolare Eiskappe wird wegen des größeren Niederschlages leicht an Masse gewinnen, während Grönland an Masse verlieren wird, weil die vermehrten Niederschläge durch das angewachsene Abschmelzen überkompensiert werden.

Der Meeresspiegel wird in den nächsten 100 Jahren um 0,09 bis 0,88 m ansteigen. Dieses ist in erster Linie auf Wärmeausdehnung und das Abschmelzen der Gletscher zurückzuführen.

Das Erdsystem-Modell

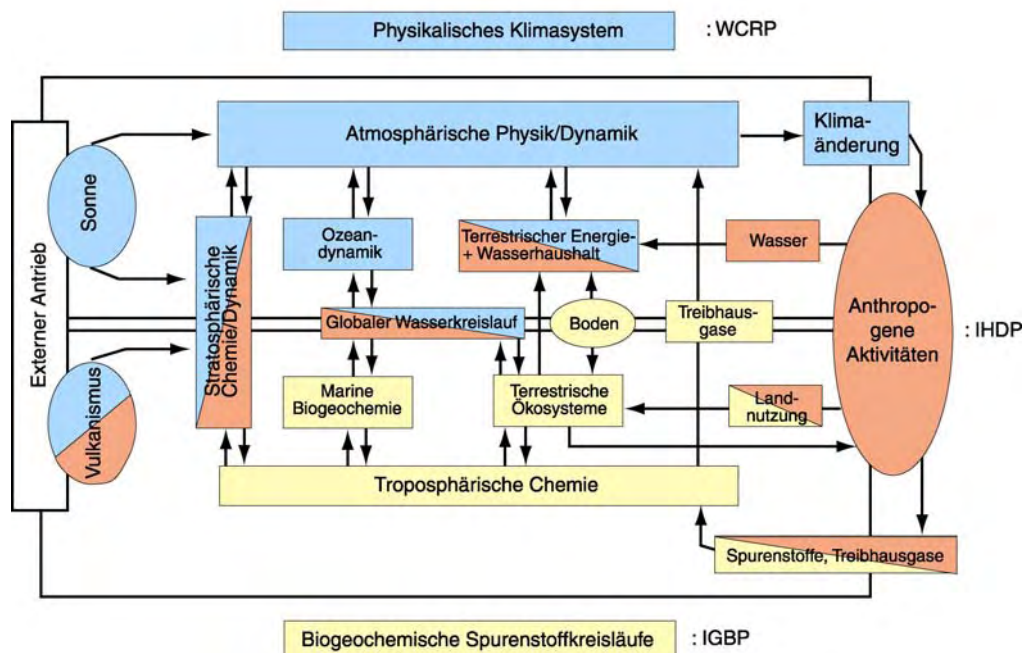


Abb. 6: Schematische Darstellung eines Erdsystemmodells und der dazugehörigen Komponenten.

Tab. 1 zeigt, welche Extremereignisse zunehmen werden, und ob man schon jetzt derartige Trends in den Beobachtungen findet. Viele sehr kleinräumige Phänomene (z. B. Tornados, Gewitter) können allerdings wegen der groben Auflösung der Modelle nicht berechnet werden.

3. Die Zukunft der Klimamodellierung

Die Modelle werden in der Zukunft mit Teil-Modellen für die Chemie, die Biologie, der Spurenstoffkreisläufe sowie die Stratosphäre erweitert werden, so dass man zu einem Erdsystemmodell kommt (Abb. 6). Derartige Modelle sind sehr rechenzeitintensiv. Um ideale Modellexperimente durchzuführen und um damit die Aussagen besser abzusichern, müsste man zusätzlich eine Vielzahl von Rechnungen mit den komplexen Erdsystem-Modellen wiederholen. Insgesamt sind für die Klimaforschung massive Rechnerkapazitäten notwendig. In Japan wurde mittlerweile eine Rechneranlage gebaut, mit der man derartige Simulationen

rechnen kann (Earth Simulator: <http://www.es.jamstec.go.jp>). Man geht dort davon aus, dass sich diese massive Investition rechnet, da es bei der Klimafrage um Energiepolitik und damit um Milliarden von Euros geht.

Tab. 1: Wahrscheinlichkeitslevel beobachteter und prognostizierter Veränderungen extremer Wetter- und Klimaereignisse.

Wahrscheinlichkeitsstufe beobachteter Veränderungen (zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts)	Phänomen	Wahrscheinlichkeitsstufe prognostizierter Veränderungen (während des 21. Jahrhunderts)
Wahrscheinlich	<i>Höhere Maximum-Temperaturen und mehr heiße Tage in nahezu allen Landgebieten</i>	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	<i>Höhere Minimum-Temperaturen, weniger kalte Tage und Frosttage in nahezu allen Landgebieten</i>	Sehr wahrscheinlich
Sehr wahrscheinlich	<i>Reduzierter Unterschied zwischen Tagesmaxima und -minima in den meisten Landgebieten</i>	Sehr wahrscheinlich
Wahrscheinlich, in vielen Gebieten	<i>Höherer Hitze-Index in Landgebieten</i>	Sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Wahrscheinlich, in vielen Langgebieten der mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel	<i>Häufigere Starkregen</i>	Sehr wahrscheinlich, in den meisten Gebieten
Wahrscheinlich, in wenigen Gebieten	<i>Zunahme kontinentaler Trockenheit und Dürreerisiken im Sommer</i>	Wahrscheinlich, in den meisten kontinentalen Gebieten der mittleren Breiten (Fehlen konsistenter Prognosen über andere Gebiete)
In den wenigen vorliegenden Analysen nicht beobachtet	<i>Zunahme der Windgeschwindigkeitsspitzen in Hurrikanen</i>	Wahrscheinlich, in einigen Gebieten
Zu wenige Daten für eine Beurteilung	<i>Zunahme der mittleren und extremen Niederschlagsstärken bei Hurrikanen</i>	Wahrscheinlich, in einigen Gebieten

3. Weiterführende Literatur

Cubasch, U. und D. Kasang, 2000: Anthropogener Klimawandel. Klett-Perthes-Verlag, Stuttgart, ISBN 3-623-00856-7, 128 S

IPCC 2001: Projections of future climate change. In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J. T., Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, C. I. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, ISBN 0521 01495 6.



Das Kooperationsvorhaben KLIWA Zielsetzung, Konzeption, Sachstand

Hans Weber
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

Vorbemerkung: Die nachstehenden Ausführungen sollen einen Überblick über das Kooperationsvorhaben KLIWA geben. Der Schwerpunkt liegt dabei darauf, die Struktur und „Philosophie“ dieses umfangreichen Untersuchungsprogramms nachvollziehbar zu machen. Auf die Darstellung von Untersuchungsergebnissen, die in den nachfolgenden Fachbeiträgen ausführlich behandelt werden, ist deshalb weitgehend verzichtet.

1. Anlass des Vorhabens

Das Phänomen Klimawandel ist seit einigen Jahrzehnten der Schwerpunkt der Klimaforschung. Neben den Arbeiten zum besseren Verständnis des komplexen Systems Klima mit seiner natürlichen Variabilität ist auch die Frage nach der anthropogenen Beeinflussung des globalen Klimas zunehmend in das Blickfeld der Wissenschaft gerückt. Mittlerweile befasst sich weltweit eine große Zahl von Institutionen und Forschungseinrichtungen mit dem Klimawandel und seinen Folgen.

Mitte der 1980er Jahre wurden die ersten Erkenntnisse über den globalen Klimawandel ein mediales und damit öffentliches Thema; dabei ist der sich schon abzeichnende Klimawandel teilweise bereits als beginnende „Klimakatastrophe“ dargestellt worden. Diese Thematisierung löste international, national und regional gesellschaftliche und politische Reaktionen aus. Beispielhaft seien hier nur die Gründung des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) durch die WMO und die UNEP im Jahre 1988 und die Einrichtung von Bay-FORKLIM, dem Bayerischen Klimaforschungsverbunds, durch den Landtag und die Staatsregierung im Jahre 1989 erwähnt.

Das gehäufte Auftreten außergewöhnlicher Hochwasserereignisse auch im mitteleuropäischen Raum wie die Rheinhochwasser vom Dezember 1993 und vom Januar 1995 sind in der Öffentlichkeit sofort mit der anthropogen verursachten Klimaveränderung in Zusammenhang gebracht worden. Dies war für die Wasserwirtschaft Anlass, die Beschäftigung mit der Thematik Klimawandel zu verstärken. Insbesondere rückte zunehmend die Frage, wie sich der prognostizierte globale Klimawandel regional bzw. flussgebietsbezogen auswirken könnte, in das fachliche Blickfeld. Die verstärkten Arbeiten seit Mitte der 1990er Jahre sowohl in Baden-Württemberg (BW) wie in Bayern (BY) zusammen jeweils mit dem Deutschen Wetterdienst (DWD) machten die gemeinsame Interessenlage offenkundig. Vor der Komplexität der Fragestellungen her lag es dann nicht mehr allzu fern, eine Zusammenarbeit zur Behandlung der gleichartigen Fachfragen zu versuchen.

2. Rahmenbedingungen des Vorhabens

Nach vorausgegangenen orientierenden Einzeluntersuchungen konnten bei erforderlichen Abstimmungsgesprächen im Jahr 1998 die Wasserwirtschaftsverwaltungen von Baden-Württemberg und von Bayern mit dem Deutschen Wetterdienst einen fachlichen Konsens erzielen und sich über die Konzeption des Kooperationsvorhabens „**K**limaveränderung und Konsequenzen für die **W**asserwirtschaft“ (KLIWA) einigen. Für die Durchführung des Untersuchungsprogramms wurde Anfang 1999 eine Verwaltungsvereinbarung abgeschlossen, die die Grundsätze der geplanten Zusammenarbeit regelt und unbefristet angelegt ist.



Abb. 1: Projektrahmen KLIWA mit den verschiedenen Projektbereichen.

Die Rahmenvereinbarung zu KLIWA legt die Projektbereiche fest, die gemeinsam bearbeitet werden sollen. Es handelt sich dabei um die folgenden Arbeitsfelder (siehe Abb. 1):

- Projektbereich A: Ermittlung bisheriger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Projektbereich B: Abschätzung der Auswirkungen möglicher Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt
- Projektbereich C: Integriertes Messprogramm zur Erfassung künftiger Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts
- Projektbereich Ö: Öffentlichkeitsarbeit

sowie zwischenzeitlich als weiteres Aufgabenfeld

- Projektbereich D: Auswirkungen auf das wasserwirtschaftliche Handeln.

Der Konzeption dieser Untersuchungsbereiche lagen folgende Überlegungen zugrunde: Die Untersuchungen sollen zunächst Erkenntnisse liefern über die Variabilität der Klimagrößen in der jüngsten, messtechnisch erfassten Zeit und über eventuelle Klimaänderungssignale. Aufbauend auf diesen retrospektiven Betrachtungen sollen dann prognostisch die nach dem heutigen Erkenntnisstand zu erwartenden Klimaveränderungen mittels regionaler Klimaszenariensimulationen abgeschätzt werden. Die Bewertung der simulierten Veränderungen liefert dann frühzeitig Erkenntnisse darüber, in welchen Bereichen im Sinne des Vorsorgeprinzips frühzeitig wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien vorzusehen sind. Da die Gebiete der Länder Baden-Württemberg und Bayern vergleichbare hydrologische und meteorologische Rahmenbedingungen aufweisen, war hierfür von Anfang an eine gemeinsame Vorgehensweise zweckmäßig.

Die Rahmenvereinbarung wird durch ein Vorgehenskonzept konkretisiert. Dieses Vorgehenskonzept enthält für die einzelnen Projektbereiche die zugehörigen Einzelprojekte mit einer Kurzbeschreibung und den erforderlichen Kosten. Es wird in regelmäßigen Abständen entsprechend den Arbeitsergebnissen angepasst; derzeit liegt die zweite Fortschreibung von Oktober 2003 vor. Ergänzt ist das Vorgehenskonzept schließlich durch eine mehrjährige Finanzierungsplanung. Das Vorgehenskonzept KLIWA ist derzeit bis Ende 2006 angelegt.

Die Steuerung, Planung und konzeptionelle Anpassung des umfangreichen Untersuchungsprogramms sind Aufgabe der Steuerungsgruppe KLIWA, der Vertreter der zuständigen Länderministerien, des DWD und des Arbeitskreises KLIWA angehören. Der Arbeitskreis KLIWA, besetzt mit Fachleuten des DWD, der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg und des Bayer. Landesamts für Wasserwirtschaft sowie eines Vertreters der Bundesanstalt für Gewässerkunde, ist für die Umsetzung der Einzelprojekte zuständig. Es ist erklärtes Ziel, für die Bearbeitung von Einzelprojekten in geeigneten Fällen als externe Experten fachkundige Institute und Ingenieurbüros einzuschalten.

3. Darstellung der Projektbereiche und zugehörigen Einzelprojekte

Die vorstehend schon angesprochenen Projektbereiche umfassen jeweils eine ganze Reihe von Einzelprojekten. Die Struktur der Projektbereiche und die Einzelprojekte mit ihrem jeweiligen Bearbeitungsstand sind nachfolgend im Überblick dargestellt; auf projektbezogene Arbeitsergebnisse ist dabei bewusst verzichtet.

Bereich A – Ermittlung bisheriger Veränderungen

Die Erweiterung des Kenntnisstands über die Variabilität und eventuelle systematische Veränderungen in langen Zeitreihen der gemessenen Klima- und Wasserhaushaltsgrößen ist eine wichtige Informationsgrundlage für weiterführende, in die Zukunft weisende Untersuchungen. Dafür war eine systematische Analyse möglichst vieler langer Messzeitreihen von räumlich und zeitlich repräsentativen Messstationen vorgesehen.

Die statistischen Auswertungen bezogen sich einmal auf die hydrometeorologischen Größen Niederschlag, Verdunstung und Lufttemperatur (siehe Abb. 2). Insbesondere die Wasserhaushaltsgröße Niederschlag wurde unter verschiedenen Aspekten als Gebietsniederschlag, als punktbezogener Starkniederschlag und als Schnee hinsichtlich Langzeitverhaltens betrachtet. Die Auswertearbeiten sind mittlerweile zum größten Teil abgeschlossen; detektierte signifikante Trends u. a. bei den Auswertegrößen Lufttemperatur, Starkniederschläge und Schneedeckendauer lassen deutliche Veränderungen seit den 1960/70er Jahren erkennen.

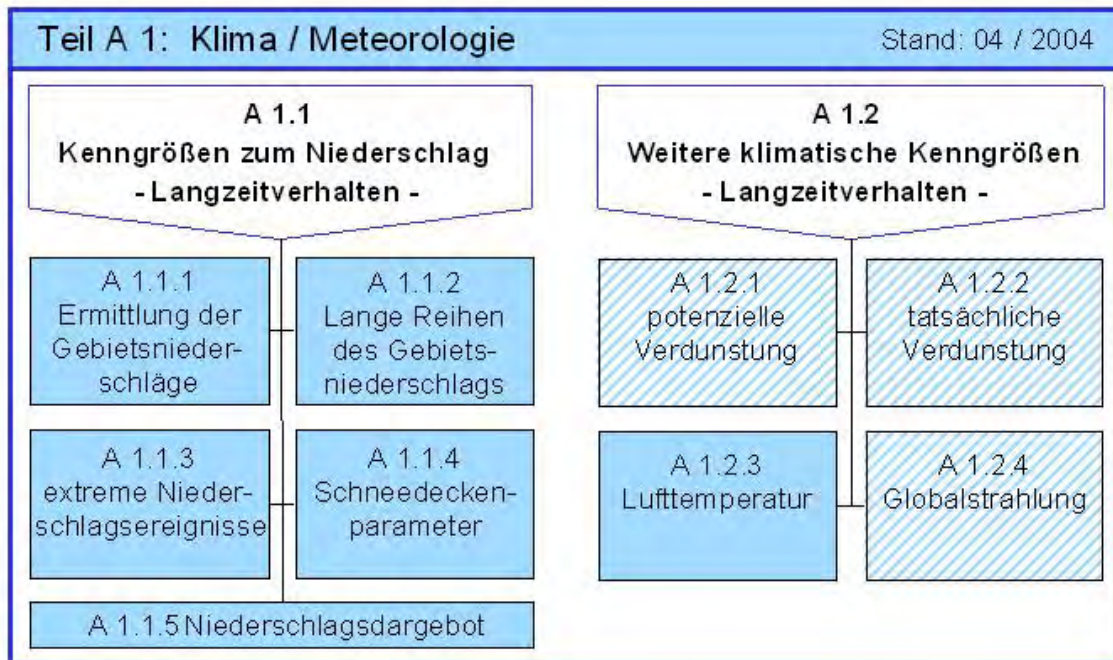


Abb. 2: Projektbereich A -Einzelprojekte des Teils "Klima/Meteorologie"

Schwerpunkte des Projektteils Wasser (siehe Abb. 3) waren zunächst das Langzeitverhalten der mittleren und der Hochwasser-Abflüsse. Hierzu wurden alle verfügbaren repräsentativen Pegelmesszeiten möglichst langer Beobachtungsdauer herangezogen. Die statistischen Auswertungen ergaben nur für wenige Pegel eine trendhafte Veränderung; die zusätzlichen Auswertungen unter Einbeziehung der hydrometeorologischen Größen sind noch nicht abgeschlossen. In Zusammenhang mit den durchgeführten Zeitreihenanalysen wurden daneben neuartige statistische Verfahren probeweise eingesetzt, um die Problematik von Instationaritäten und Langzeitkorrekturen in Zeitreihen zu beleuchten. Die Fragestellungen werden derzeit neben KLIWA in einem Forschungsvorhaben weitergeführt; für KLIWA werden neue Untersuchungsmethoden erwartet, welche weiterführende Schlussfolgerungen aus dem Zeitreihenverhalten und über eventuelle Klimaveränderungssignale zulassen.

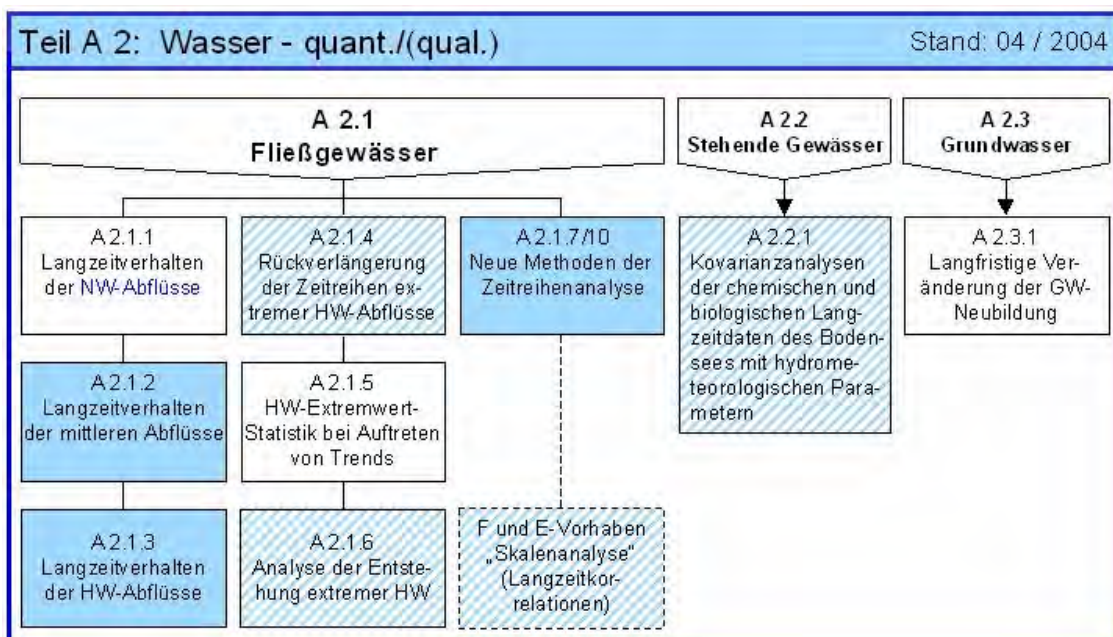


Abb. 3: Projektbereich A -Einzelprojekte des Teils "Wasser"

Bereich B – Abschätzung der künftigen Veränderungen

Die Auseinandersetzung mit der prognostizierten Klimaveränderung ist für das in die Zukunft gerichtete wasserwirtschaftliche Handeln von besonderer Bedeutung. Daher ist es erforderlich, die Aussagen zum globalen Klimawandel in fassbare Auswirkungen im regionalen Maßstab, d. h. in Flussgebieten, zu übertragen.

Im Teil „Klima/Meteorologie“ war die Entwicklung regionaler Klimaszenarien vorgesehen, um damit konsistente hydrometeorologische Datensätze der künftig möglichen Entwicklung des Klimas zu erzeugen, die dann als Input für die anschließende Wasserhaushaltsmodellierung dienen sollten (siehe Abb.4). Da bisher kein optimales Verfahren zur Ableitung regionaler Klimaszenarien vorhanden ist, wurde der Weg der Ensemble-Abschätzung beschritten. Es sind drei unterschiedliche Verfahren sowohl mit statistischen wie dynamischen Ansätzen führender Forschungsinstitute ausgewählt worden, um so zu einer Bandbreitenabschätzung für den regionalen Bereich zu kommen. Die Klimaszenarien sind für den Zeithorizont 2021/2050 ausgerichtet; Ausgangspunkt waren das Globalmodell ECHAM4 mit dem Emissionsszenario B2 und einem mittleren Temperaturstieg von 1,4 °C bis 2050. Die Szenarienergebnisse der drei Modellansätze liegen seit kurzem vor und sind zunächst für die 9 Regionen, in die das gesamte Untersuchungsgebiet aufgeteilt wurde, summarisch ermittelt. Eine vertiefte Auswertung ist in die Wege geleitet.

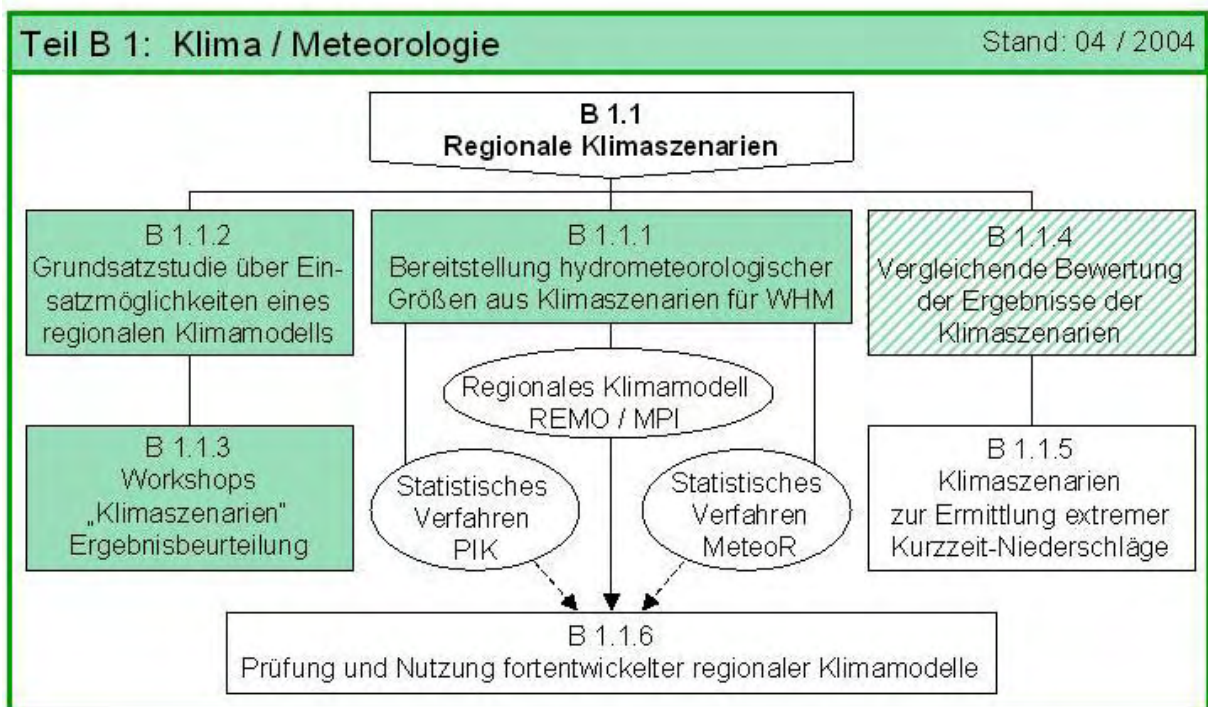


Abb. 4: Projektbereich B -Einzelprojekte des Teils "Regionale Klimaszenarien"

Im Teil „Wasser“ sind die hydrometeorologischen Größen des künftigen Klimas flussgebietsbezogen und in täglicher Auflösung, für spezielle Fragestellungen auch in Stundenwerten, in die einzelnen Größen des Gebietswasserhaushalts umzusetzen. Als Instrumente werden dazu Wasserhaushaltsmodelle verwendet, mit denen dann rasterbasiert, üblicherweise in eine Auflösung von 1 km x 1 km, die physikalischen Prozesse abgebildet und die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufes simuliert werden. Für die Wasserhaushaltsmodellierung wird in BW das Modell LARSIM, in BY das Modell ASGi verwendet; die Anpassung des benutzten Modellsystems ist in BW weitgehend und in BY für eine Reihe von Flussgebieten in Nordbayern abgeschlossen. Die Szenariensimulations-Rechnungen sind begonnen wor-



den und zunächst beispielhaft auf die Veränderungen des Hochwasserabflussgeschehens ausgewählter Flussgebiete ausgerichtet. Die Ermittlung des Abflusskontinuums und der Grundwasserneubildung, später auch Simulationen zu Landnutzungsänderungen unter geänderten klimatischen Rahmenbedingungen, werden sich anschließen (siehe Abb.5).

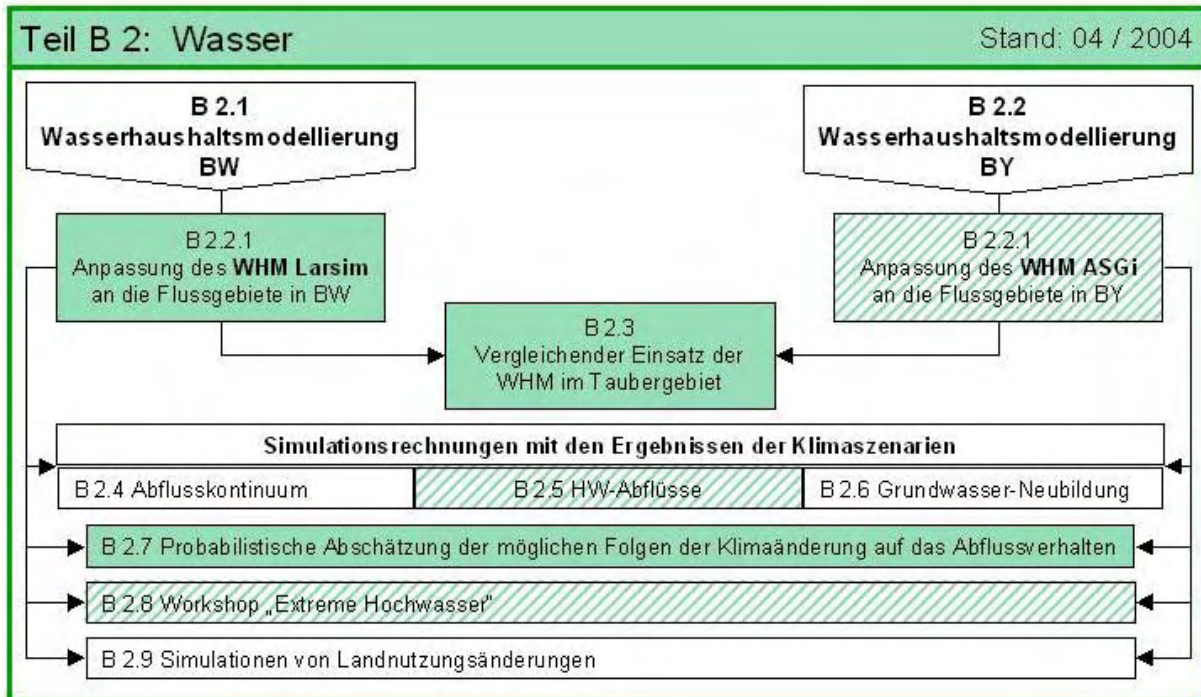


Abb. 5: Projektbereich B -Einzelprojekte des Teils "Wasserhaushaltsmodelle"

Bereich C – Monitoring zur Erfassung der Klimaveränderung

Die weiteren Schwankungen und Veränderungen von Klima und Wasserhaushalt sollen über ein länderübergreifendes integriertes Messnetz erfasst werden. Dazu werden aussagekräftige Messstellen aus den vorhandenen Messnetzen für die hydro(meteoro)logischen Größen ausgewählt und regelmäßig gezielt im Hinblick auf die Fragestellungen des Klimawandels ausgewertet. Die hier gewonnenen Erkenntnisse sollen auch modellbegleitend Verwendung finden. Ziel ist ein Langzeitmonitoring für die Beobachtung des Klimawandels nach einem klaren Konzept. Die Teilprojekte sind aus verschiedenen Gründen erst teilweise bearbeitet (siehe Abb.6). Das integrierte Messnetz soll zunächst etwa 200 Messstellen haben und dabei Klimastationen, Niederschlagsstationen, Abflusspegel und Grundwassermessstellen, die repräsentativ sind für die Einzugsgebiete Donau, Main, Neckar und Rhein, im Untersuchungsgebiet von BW und BY umfassen.

Bereich D – Auswirkungen für das wasserwirtschaftliche Handeln

Dieser Projektbereich ist erst bei der letzten Fortschreibung des Vorgehenskonzepts unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse konkretisiert worden (siehe Abb.7).

Daher stehen hier die Arbeiten noch am Anfang; lediglich die Frage der Hochwasserverstärkung und ihrer sozio-ökonomischen Folgewirkungen wurde bisher an ausgewählten Gebieten beispielhaft näher, aber noch nicht erschöpfend behandelt. Leitidee für die weiteren Arbeiten ist hier, dass der Klimawandel zu einer Veränderung des Wasserhaushalts in den einzelnen Flussgebieten führt und dadurch eine Veränderung der Wasserverfügbarkeit nach sich zieht. Die Tendenz dieser Veränderung kann durch Vergleichsbetrachtungen zwischen der simulierten Zukunft und der Ist-Situation abgeschätzt werden. Daraus ist dann zu

ermitteln, inwieweit durch die zu erwartenden Veränderungen des Wasserhaushalts die bestehenden wasserwirtschaftlichen Systeme bzw. die vorhandenen Schutz- und Nutzfunktionen beeinträchtigt werden. In Abhängigkeit von der Betroffenheit oder auch Schadensanfälligkeit sind vorausschauend sachgerechte wasserwirtschaftliche Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen zu entwickeln. Dass hier weit in die Zukunft gerichtete kostenträchtige Maßnahmen vor dem Hintergrund zunehmender Unsicherheiten zu untersuchen und festzulegen sind, darin liegt eine besondere Herausforderung im Zusammenhang mit der Problematik des Klimawandels.

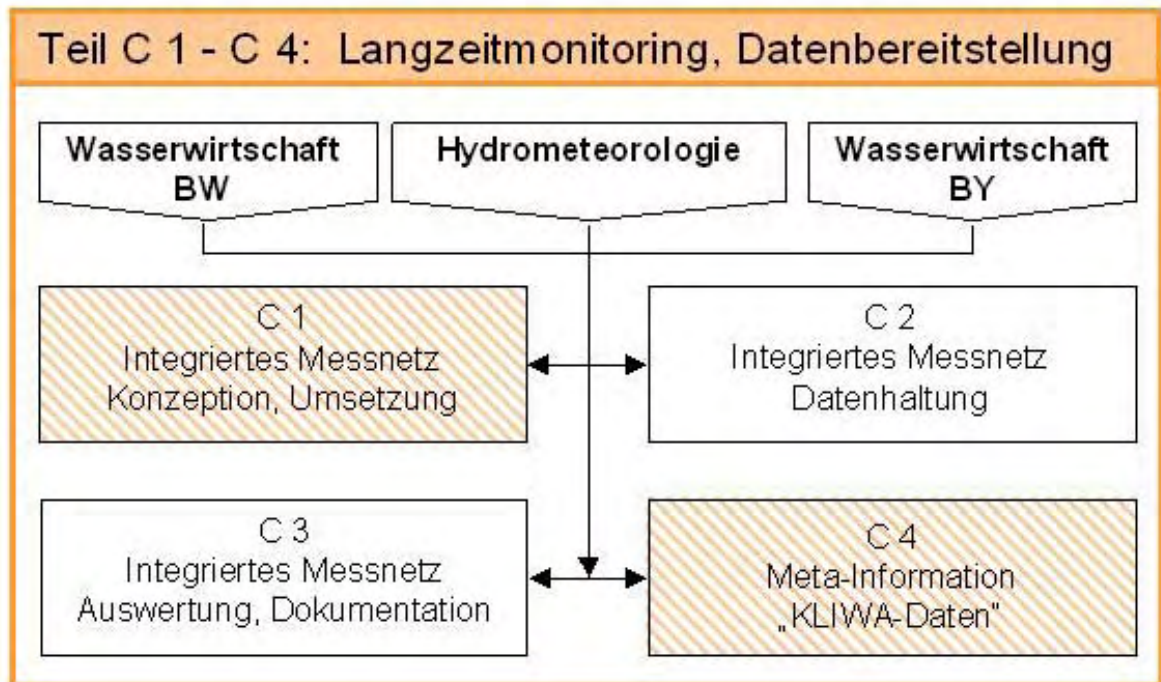


Abb. 6: Projektbereich C -Einzelprojekte für das Langzeitmonitoring

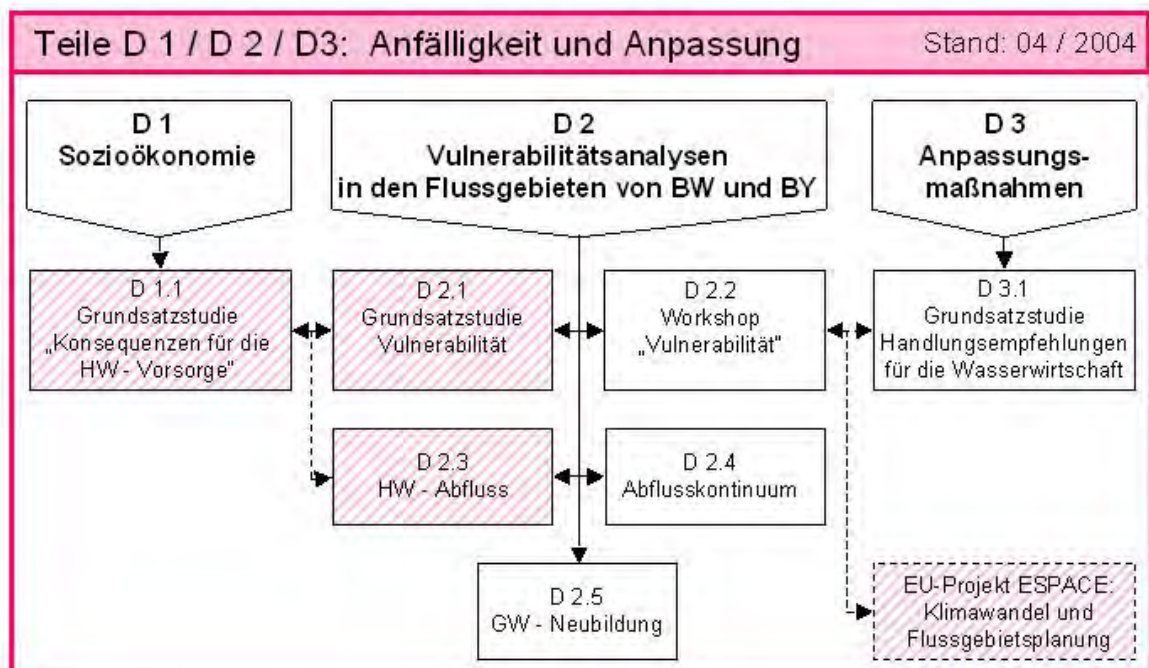


Abb. 7: Projektbereich D -Einzelprojekte zur Ableitung von Anpassungsmaßnahmen

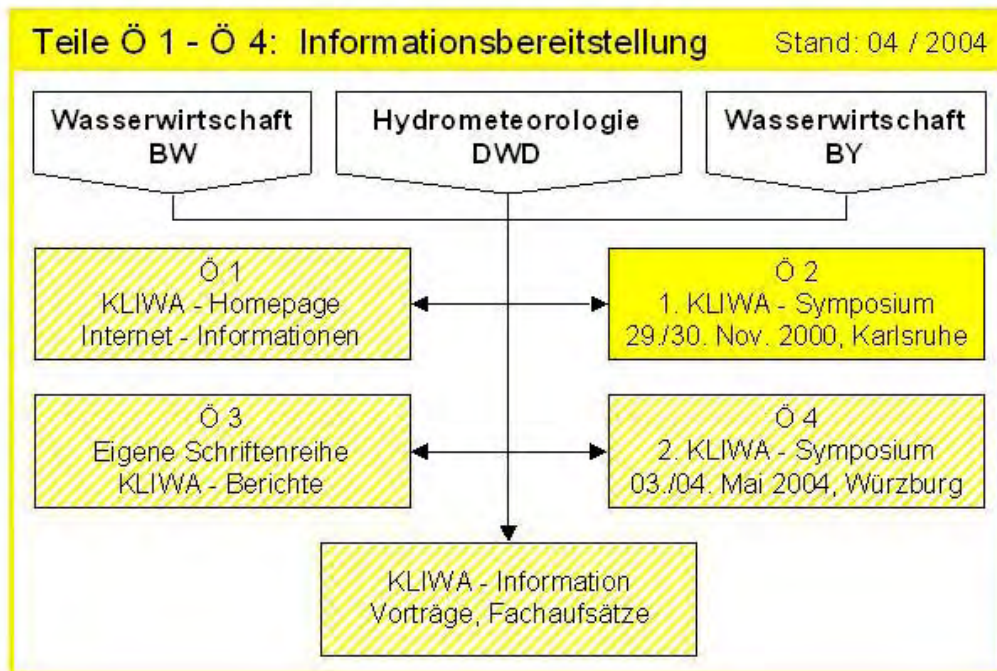


Abb. 8: Projektbereich Ö -Einzelprojekte für die Informationsverbreitung

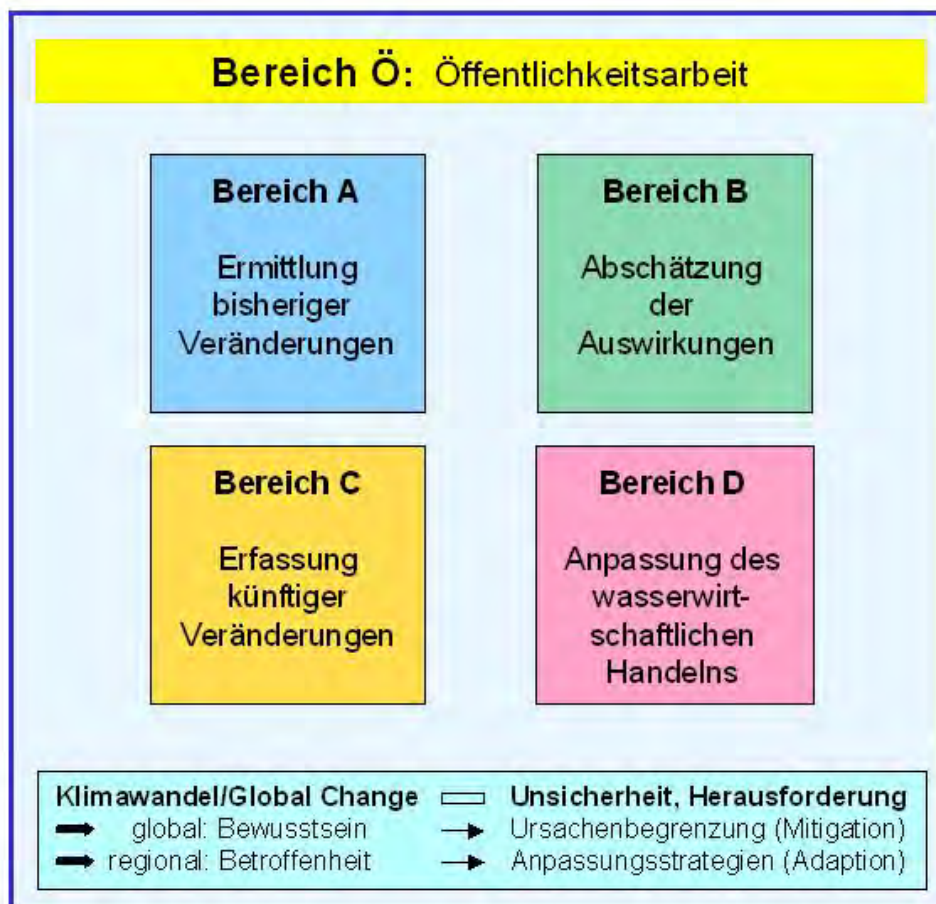


Abb. 9: Schematische Struktur des Gesamtvorhabens KLIWA

Den skizzierten Problemstellungen geht das BLfW seit September 2003 auch im Rahmen des transnationalen EU-Projektes ESPACE „Klimawandel und Flussgebietsplanung“ nach. In zwei Fallstudien aus dem Maingebiet sollen hier zweckmäßige Vorgehensweisen zur Anpassung an den Klimawandel entwickelt werden. Davon werden auch positive Rückwirkungen für KLIWA erwartet.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Der globale Klimawandel wird heutzutage überwiegend als eine Bedrohung bewertet, deren erste negative Auswirkungen auf den Naturhaushalt und auf den Menschen mittlerweile bereits spürbar sind. Auffälligstes Anzeichen ist die globale Erwärmung, die zum großen Teil auf die gestiegene CO₂-Konzentration der Atmosphäre zurückgeführt wird, mithin also anthropogen verursacht ist. Der Temperaturanstieg wird sich allein schon aufgrund der Trägheit des Klimasystems nach einhelliger Fachmeinung fortsetzen.

Die Auswirkungen des Klimawandels können durch globales wie regionales Handeln noch abgemildert werden. Um im regionalen Maßstab die gesellschaftliche Akzeptanz für rechtzeitige Anpassungsmaßnahmen zu finden, müssen die Klimaveränderung und die mittel- bis langfristig zu erwartenden Auswirkungen quantifiziert und dann in das öffentliche Bewusstsein gebracht werden. Aus diesem Grund umfasst das Vorhaben KLIWA auch noch den Projektbereich „Öffentlichkeitsarbeit“ (siehe Abb.8). Durch die verschiedenen Aktivitäten sollen die Erkenntnisse aus KLIWA nicht nur der Fachwelt, sondern auch der interessierten Öffentlichkeit zugänglich sein. Besondere Bedeutung kommt hier der eigenständigen Projekt-Homepage im Internet (www.kliwa.de) zu.

Der Klimawandel in seiner gesellschaftsrelevanten wie globalen Dimension wird in den kommenden Jahren nicht nur Aufgabengebiet von Meteorologie und Wasserwirtschaft bleiben. Die sachgerechten Schlagworte auf die neue Herausforderung Klimawandel sind Ursachenbegrenzung (mitigation) für den globalen und Anpassung (adaptation) für den regionalen Bereich. BW und BY sind mit dem unbefristet angelegten Untersuchungsprogramm KLIWA (siehe Abb.9) gut aufgestellt, um die politischen und gesellschaftlichen Erwartungen fachlich gut erfüllen zu können. Im Bereich Klimawandel entwickelt sich der wissenschaftliche Erkenntnisstand wegen der intensiven Forschungsaktivitäten ständig weiter. KLIWA wird dabei versuchen, den Erkenntnisfortschritt (z.B. auf dem Gebiet der regionalen Klimamodellierung) in die eigenen Untersuchungen zu integrieren. Damit soll die Qualität der Ergebnisse und Aussagen entsprechend der Zielsetzung des Vorhabens laufend gesteigert und die Handlungsempfehlungen schrittweise verbessert werden.



Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen

Thilo Günther

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Berlin

3. Einleitung

Die globale Durchschnittstemperatur ist im letzten Jahrhundert um $0,6 \pm 0,2$ Grad angestiegen. Für die nächsten 100 Jahre sagen die Klimamodelle einen beschleunigten Anstieg der mittleren globalen bodennahen Lufttemperatur um 1,4 bis 5,8 Grad voraus (IPCC, 2001). Eine solche signifikante globale „Klimaveränderung“ hat auch spürbare Auswirkungen auf den Wasserhaushalt. Detaillierte Erkenntnisse und Abschätzungen über Änderungen der Klimagrößen im regionalen Maßstab, z. B. für einzelne Flussgebiete, liegen bisher nur vereinzelt vor. Dies trifft auch für Süddeutschland zu.

Um dieses Defizit zu beseitigen, wurde im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA („Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“) im Projektbereich A1 unter Federführung des DWD für Baden-Württemberg und Bayern das Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen flächendeckend untersucht. Die Untersuchungen erfolgten unter Einsatz der gängigen statistischen Verfahren (Zeitreihenanalyse) sowie bewährter hydrometeorologischer Modelle und Verfahren und konnten sich auf eine umfangreiche Datengrundlage stützen. Da die meteorologischen Zeitreihen auf Punktmessungen basieren, müssen für hydrologische Betrachtungen die Punktergebnisse auf die Fläche übertragen werden. Dafür wurden problemspezifische, komplexe Regionalisierungsverfahren entwickelt.

Die angewandten statistischen Methoden zur Zeitreihenanalyse und die Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten der einzelnen hydrometeorologischen Größen werden im vorliegenden Beitrag beispielhaft und im Überblick vorgestellt. Weitergehende Informationen zum Zeitreihen- und Trendverhalten der Lufttemperatur, des Schneedeckenregimes, der Gebietsniederschläge, der Starkniederschläge sowie der Verdunstungs- und Bilanzgrößen werden in Einzelpublikationen in der Reihe KLIWA-Berichte im Detail mitgeteilt (Klämt, 2004; Günther & Matthäus, 2004; Reich, 2004; Bartels & Dietzer, 2004; Klämt, 2005).

3. Datengrundlagen und Methodik

2.1 Datengrundlage

Lufttemperatur

Im Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg und Bayern liegen Messreihen der Lufttemperatur von insgesamt 354 Stationen vor. Über den gesamten Untersuchungszeitraum 1931/2000 stehen jedoch nicht von allen Stationen vollständige Messwertreihen zur Verfügung. Im Falle verkürzter bzw. lückenhafter Messreihen erfolgte eine Datenergänzung mit Hilfe von Regressionsbeziehungen zu vorhandenen Messreihen benachbarter Stationen. Erwartungsgemäß ist die Anzahl der Stationen in den Anfangsjahren der Untersuchungsperiode bis etwa 1935 und nachfolgend, bis in die Nachkriegszeit hinein, gering und erforderte umfangreichere Ergänzungen.

Von einigen Stationsstandorten in Baden-Württemberg und Bayern existieren lange Zeitreihen, die zum Teil bis vor 1900 zurückgehen (Karlsruhe, Bamberg, München). Die insgesamt 110-jährigen geprüften Zeitreihen der Lufttemperatur dieser Stationen wurden zu Zeitreihenvergleichen mit der bearbeiteten Reihe 1931/2000 herangezogen.

Für das im Rahmen der KLIWA-Langzeitanalysen abgestimmte Gitternetz von ca. 7 km x 7 km (vgl. Abb. 1b) waren Rasterwerte der Tagesmitteltemperaturen der Zeitreihe 1931/2000

bereitzustellen. Als das geeignetste Verfahren für die vorliegende Aufgabenstellung der Regionalisierung von Tageswerten der Lufttemperatur wurde das Universal Kriging mit gleitendem Suchkreis ausgewählt (KLIWA 2003).

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Lufttemperaturen konzentriert sich auf die Untersuchung der Trends in den Zeitreihen der Jahresmitteltemperaturen und im innerjährlichen Temperaturverlauf (Monatsmitteltemperaturen) sowie auf die Untersuchung der Stabilität dieser Trends. Die Berechnungen basieren auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe. Die Trendschätzung erfolgt nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate. Zur Bewertung der Signifikanz der berechneten Trends wurde das Testverfahren nach MANN-KENDALL eingesetzt. Eine Prüfung der Stabilität der Trends in der Untersuchungsperiode wurde anhand so genannter vor- und rückwärtsschreitender Trends vorgenommen.

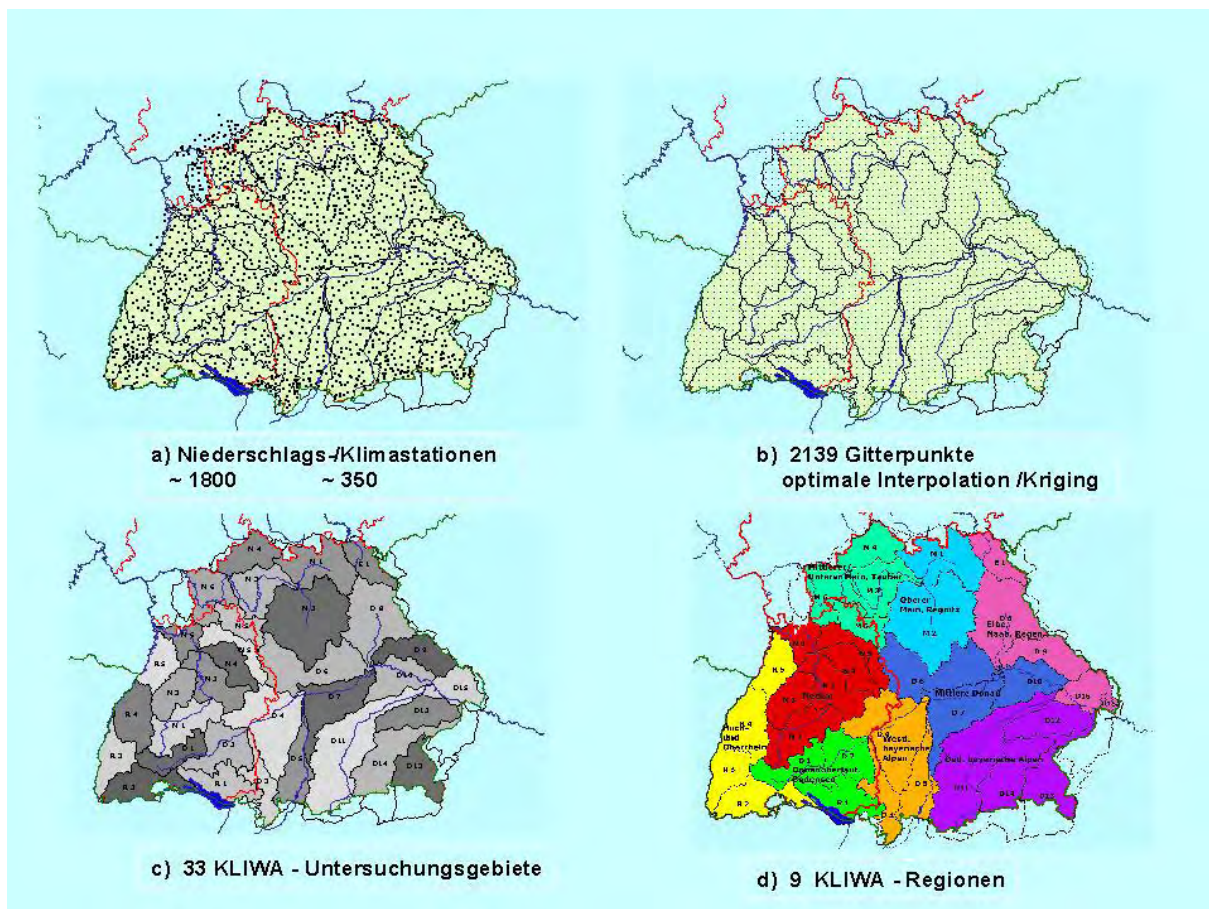


Abb. 1: Lage der verwendeten Niederschlags- und Klimastationen (a), der Gitterpunkte (b) sowie der Grenzen der 33 Untersuchungsgebiete (c) und der 9 KLIWA-Regionen (d) in Süddeutschland.

Schneedecke

Für die Langzeituntersuchung der Schneedeckenverhältnisse konnte auf insgesamt 508 Datenreihen zurückgegriffen werden. Diese große Zahl verfügbarer Zeitreihen wurde durch eine umfangreiche Nacherfassung von Archivmaterial erreicht (Abb. 2). Es konnte flächendeckend eine relativ gleichmäßige, hohe Stationsdichte erreicht werden. Auf ca. 200 km² entfällt im Durchschnitt eine Station, das entspricht einem mittleren Stationsabstand von 14 km. Leider kam es als Folge der Kriegseinwirkungen zu Ausfällen der Schneedeckenbeobachtungen, die sich vielfach über mehrere Jahre und flächendeckend erstrecken. Diese Defekte lassen es nicht zu, insbesondere auch wegen der hohen Variabilität der Schneede-

ckenparameter, Ergänzungen vorzunehmen. Als Beginn der verwendeten Bezugsperiode wurde deshalb die Winterperiode 1951/52 gewählt. Mit dieser Festlegung ist einerseits der Vorteil verbunden, für die Zeitreihenuntersuchungen (Trendanalyse) lückenlose Datenreihen zur Verfügung zu haben, zugleich aber folgt daraus die einschneidende Beschränkung auf lediglich 45 Winterperioden (1951/52 bis 1995/96).

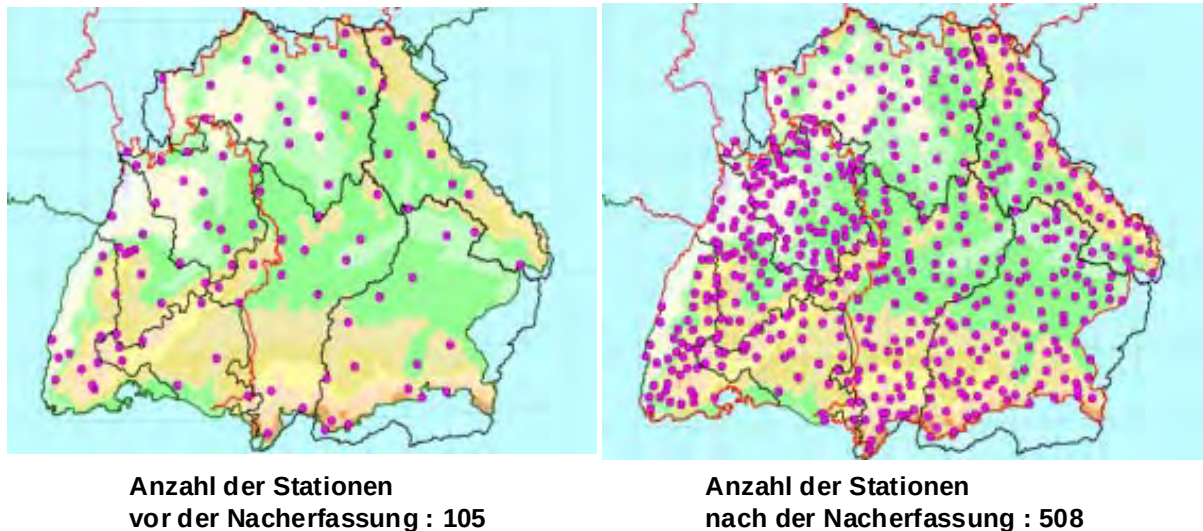


Abb. 2: Stationen mit Schneedeckendaten, Süddeutschland, 1951 bis 1996.

Gebietsniederschläge

Für Baden-Württemberg und Bayern und dem Zeitraum von 1931 bis 1997 wurden aus mehr als 1800 teils kurzen, teils sehr langen Niederschlagsmessreihen unter Ausnutzung klimatologisch-statistischer Hintergrundinformationen Reihen von Tageswerten des Niederschlags an 2139 Gitterpunkten berechnet. Der Berechnung der Gitterpunktswerte hat das Verfahren BONIE (Reich, 2004) zugrunde gelegen. Das Verfahren ermöglicht durch Kombination von statistischer (optimaler) Interpolation und numerischer Klassifikation bei Erkennung von Niederschlagsverteilungsmustern die Abbildung einer beliebigen Menge an räumlich unregelmäßig vorliegenden Messwerten auf ein regelmäßiges Netz von Gitterpunkten. Die Maschenweite in Ost-West-Richtung beträgt 6' und in Nord-Süd-Richtung 4', was einem Abstand zwischen den Gitterpunkten von etwa sieben Kilometern entspricht. Die eigentliche Gebietswertberechnung erfolgt durch arithmetische Mittelung der Gitterpunktswerte. Die Abb. 1 zeigt das Gitternetz und die Grenzen der 33 KLIWA-Untersuchungsgebiete in Baden-Württemberg und Bayern. Die Gebiete haben eine durchschnittliche Größe von 1500 bis 2500 km².

Starkniederschläge

Für die Untersuchung der Niederschlagshöchstwerte wurden von 415 Niederschlagsstationen die Messungen (Tageswerte) für den Zeitraum 1931 bis 2000 herangezogen. Darunter befinden sich 92 Stationen, die auch den längeren Zeitraum der Jahre 1901 bis 2000 abdecken. Als Basisdatenmaterial für die Untersuchungen werden die jeweiligen Höchstwerte einer Zeitspanne (Jahr, Sommer- und Wintermonate) sowie die Andauer von extremen Nass- und Trockenperioden zugrunde gelegt. Die Niederschlagsstationen der Zeitreihe 1931-2000 decken in ihrer räumlichen Verteilung Süddeutschland relativ gut ab. Die Stationen mit langen Zeitreihen (1901-2000) sind dagegen ungleichmäßiger verteilt und können daher nur für einzelne Landesteile als repräsentativ angesehen werden. Die betrachteten Stationen repräsentieren in ihrer Höhenverteilung überwiegend die Geländehöhen zwischen 500 bis 1000 m ü. NN.

Verdunstungs- und Bilanzgrößen



Als Datengrundlage zur Berechnung der Stationswertreihen der potentiellen Verdunstung (PET) wurden von 354 Stationen des Klimamessnetzes in Süddeutschland die täglichen Mittelwerte bzw. Summen der benötigten meteorologischen Messgrößen für die Zeitreihe 1931 bis 1997 aufbereitet. Während Anzahl und regionale Verteilung der Stationen, deren Messreihen im Zeitraum ab 1946/47 und 1951 einsetzen, zufriedenstellend sind, stehen aus dem davor liegenden Zeitraum nur wenige und wenig repräsentativ verteilte Stationen zur Verfügung. Die erforderlichen Datenergänzungen beziehen sich daher schwerpunktmäßig auf den Zeitabschnitt vor 1951. Die aus den Datenergänzungen ggf. resultierenden künstlichen Brüche und Trends in den Zeitreihen der PET werden mit Hilfe von Homogenitätstests bewertet und, wenn erforderlich, korrigiert. Aus den 354 Stationswertreihen der PET (monatliche und jährliche Werte) wurden durch eine mit der Entfernung gewichtete regionale Interpolation Rasterwerte für die in Abb. 1 b gezeigten Raster erzeugt. In das Interpolationsverfahren wurde ein Modell einbezogen, das die Abhängigkeit der PET von der Geländehöhe ü. NN regional und im Jahresverlauf differenziert berücksichtigt. Die Datengrundlage für die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz (KWB), die als Differenz aus korrigierter² Niederschlagshöhe und potentieller Verdunstungshöhe definiert ist, bildeten die Rasterwertreihen dieser Größen. Aus den Rasterwerten wurden monatliche und daraus jährliche Gebietsmittelwerte (PET, KWB) für die 33 Untersuchungsgebiete (s. Abb. 1 c) erstellt.

2.2 Statistische Verfahren

Die langen hydrometeorologischen Zeitreihen repräsentieren leider nicht nur den wahren natürlichen zeitlichen Verlauf der Messgrößen, sondern können z. B. durch veränderte Messmethodik und Messgeräte, Urbanisierung oder Fehler des Beobachters mit Sprüngen und Trends behaftet sein. Da bei der Charakterisierung des Langzeitverhaltens diese nicht naturbedingten Inhomogenitäten stören, mussten sie zunächst, falls vorhanden, aufgedeckt und gegebenenfalls entfernt werden. Das Auffinden solcher Inhomogenitäten mit so genannten Homogenitätstests stand daher am Beginn der Arbeiten. Auf die ausreichend homogenen Reihen wurden dann Tests, die auf vorhandene Trends, Zyklizitäten und Brüche prüfen, angewandt. Außerdem wurden bei einigen Zeitreihen deskriptive Untersuchungen zur Verteilungsform, zur Wahrscheinlichkeitsverteilung von Extremwerten, Überschreitungsdauern u. ä. durchgeführt.

Bei einer Beschreibung langjähriger Veränderungen der meist hochvarianten meteorologischen Zeitreihen ist zu beachten, dass diese weder nur durch so genannte Bruchstellen noch ausschließlich durch lineare Trends möglich ist. Vielmehr setzen sich die Variationen aus periodischen Schwankungen, kurzfristigen Veränderungen und langfristigen Tendenzen zusammen, so dass jedes Untersuchungsverfahren nur einen Teilaspekt der Entwicklung zu erfassen im Stande ist. Trotzdem lässt sich durch Trendbeträge das Ausmaß stattgefundener Veränderungen gut veranschaulichen (Reich, 2004). Die Analyse des Langzeitverhaltens der hydrometeorologischen Größen in Süddeutschland konzentriert sich daher auf die Untersuchung der Trends in den meist 70-jährigen Zeitreihen (1931/2000). Die Berechnungen basieren auf der Annahme eines linearen Trends in der jeweils betrachteten Zeitreihe.

Zur Bewertung der Signifikanz der berechneten Trends wurde das verteilungsfreie Testverfahren nach MANN-KENDALL eingesetzt. Die Signifikanz S wird in Prozent angegeben. Der Signifikanzwert $S = 80\%$ wurde im Rahmen von KLIWA als unterster Schwellenwert für eine signifikante Zeitreihenänderung festgelegt. Bei Signifikanzbefunden von $S > 80\%$ erfolgen in den Ergebnisdarstellungen graduelle Abstufungen mit Kennzeichnung von Überschreitungen der S-Werte von 90 %, 95 %, 99 % und 99,9 %.

Weitergehende Informationen zur Datengrundlage, einzelnen Arbeitsschritten und den angewandten statistischen Methoden können den Einzelpublikationen in der Reihe KLIWA-

² Die Korrektur der systematischen Messfehler (Verluste des Hellmann-Niederschlagsmessers infolge von Benetzung, Windeinfluss und Verdunstung) erfolgte nach dem Verfahren von Richter (1996).

Berichte entnommen werden (Klämt, 2004; Günther & Matthäus, 2004; Reich, 2005; Bartels & Dietzer, 2005; Klämt, 2005).

3. Untersuchungsergebnisse zum Langzeitverhalten

3.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur ist für Wasserhaushaltsprozesse von erheblicher Bedeutung. Die Wasserhaushaltskomponente Verdunstung und damit auch das Niederschlagsgeschehen ist maßgeblich von ihr abhängig. Im Winterhalbjahr beeinflusst die Lufttemperatur unter den klimatischen Bedingungen Mitteleuropas die Ausbildung und Andauer einer Schneedecke und damit den zeitlichen Verlauf des hydrologisch verfügbaren Niederschlagsangebots. Weiterhin handelt es sich bei der Lufttemperatur um eine hydrometeorologische Größe, die in Zusammenhang mit der Klimaveränderung noch am besten mit den Klimamodellen simuliert werden kann. Auch aus diesem Grunde und für Verifikationszwecke ist die Kenntnis über die Entwicklung dieser Größe von besonderem Interesse.

Das Trendverhalten der Lufttemperaturen im KLIWA-Untersuchungsraum Baden-Württemberg/Bayern ist in der Untersuchungsperiode 1931/2000 flächendeckend durch eine hoch signifikante Zunahme der Jahresmitteltemperaturen gekennzeichnet (Abb. 3).

In Baden-Württemberg sind die stärksten Zunahmen von ≥ 1 K und Signifikanzen $> 99,9$ % im Nordwesten am Rhein (uh. Murg), an der Enz und dem Unterlauf des Neckar (uh. Jagst) zu finden. Die geringsten Zunahmen der Jahresmitteltemperaturen treten in BW in den höher gelegenen Gebieten von Donauoberlauf und Bodensee, Hochrhein und Neckaroberlauf auf. Die Trendwerte liegen hier bei $+0,6$ K mit Signifikanzen von 96 % bis 98 %.

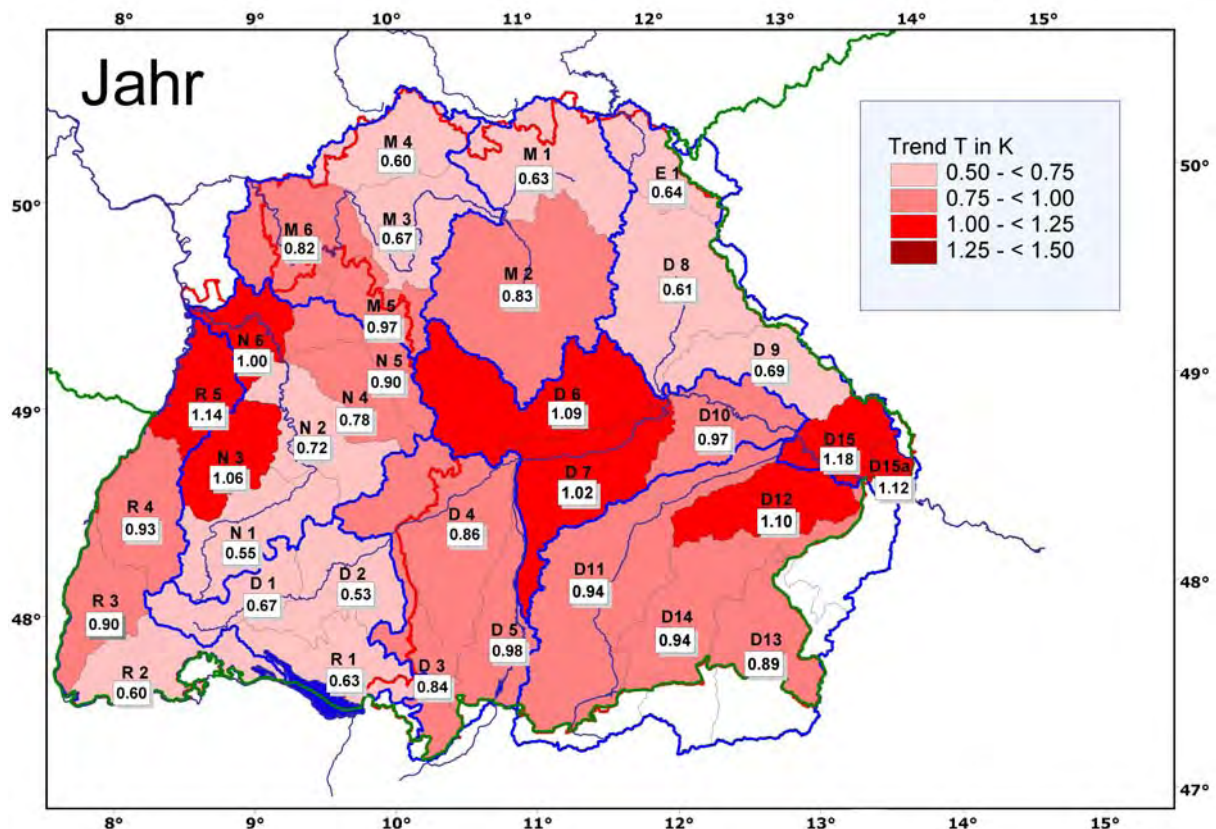


Abb. 3: Trends (in K) der Jahresmitteltemperatur, Gebietswerte in Baden-Württemberg und Bayern, 1931 bis 2000.

In Bayern finden sich die stärksten Zunahmen der Jahresmitteltemperaturen von > 1 K in der Region der mittleren Donau bzw. den östlichsten Gebieten Bayerns uh. Isar. Die geringsten



Lufttemperaturtrends um $+0,6$ K mit Signifikanzen bei 98 % finden sich in Bayern im Norden und Nordosten (Main, Naab).

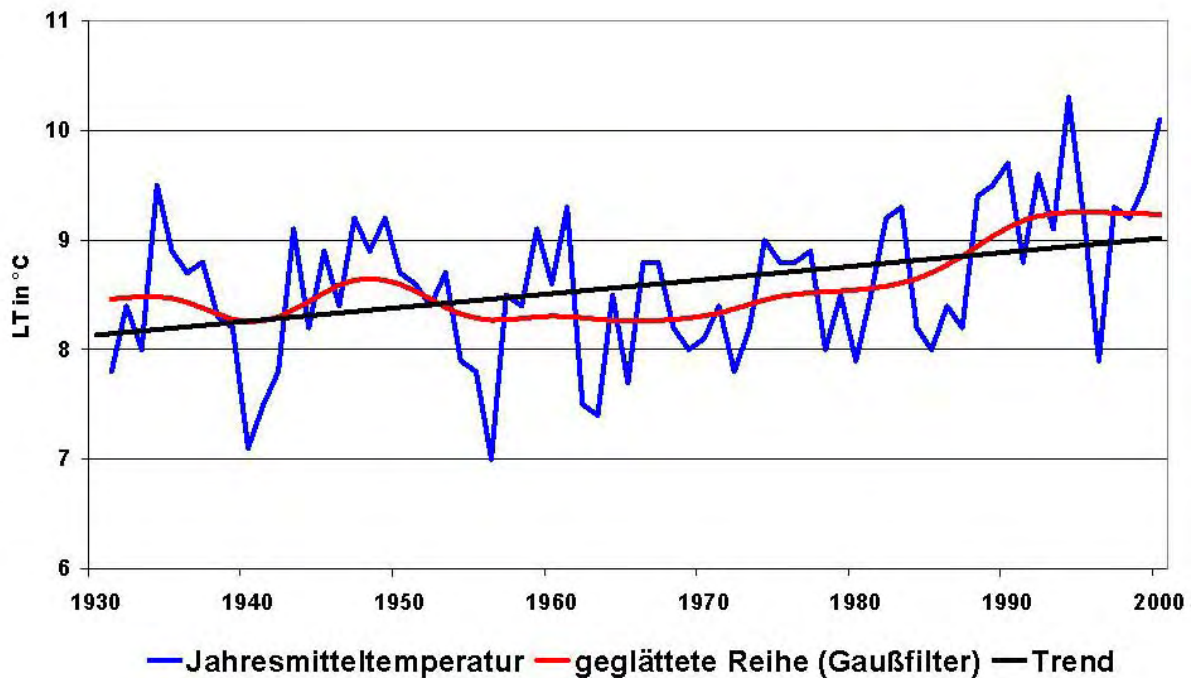


Abb. 4: Jahreswertreihe der Gebietsmitteltemperatur in der Region Hoch- und Oberrhein, 1931 bis 2000.

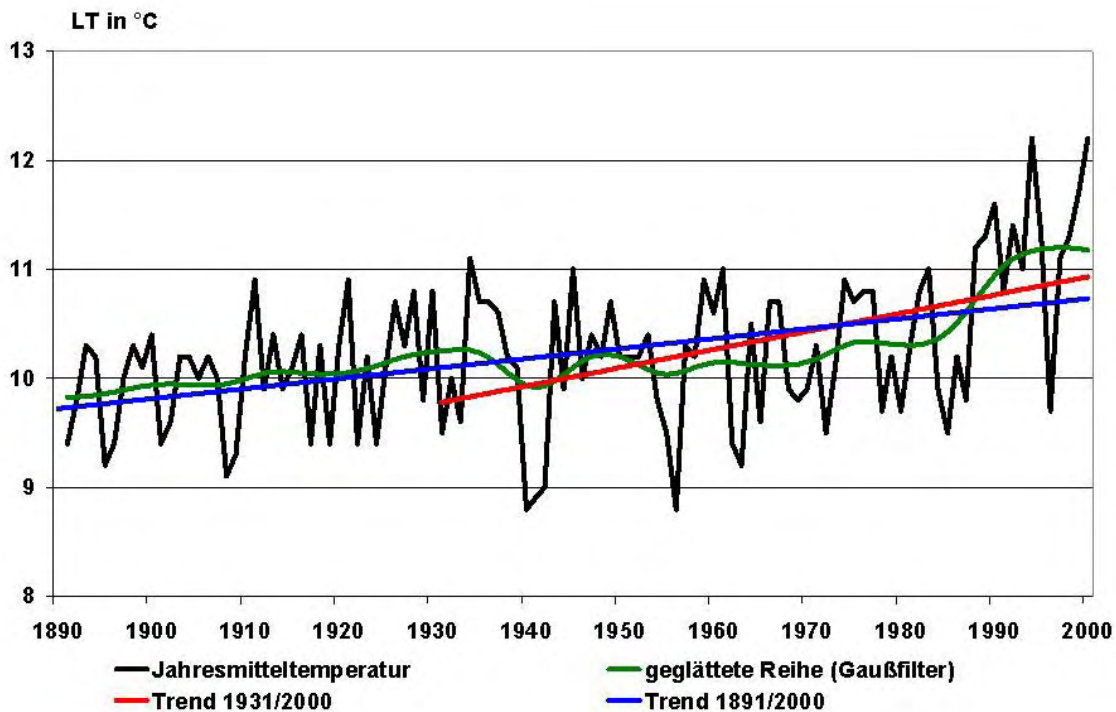


Abb. 5: Zeitreihe der Lufttemperatur in °C, Trends der Lufttemperatur im Zeitreihenvergleich 1891/2000 und 1931/2000, Karlsruhe

Die Analysen der Zeitreihen der Jahresmitteltemperaturen – in Abb. 4 dargestellt am Beispiel der Region Hoch- und Oberrhein – zeigen im ersten Drittel der Untersuchungsperiode bis in die Mitte der 1950er Jahre eine hohe interannuelle Variabilität. In der zweiten Jahrhunder-

hälfte ist bei geringerer Variabilität eine kontinuierliche Erwärmung zu verzeichnen. Trendbestimmend für die gesamte Untersuchungsperiode sind insbesondere die hohen Jahresmitteltemperaturen des 1990er Dezenniums, in welchem aber auch die Variabilität wieder zunimmt.

Im Vergleich der 70-jährigen und 110-jährigen Lufttemperaturreihe am Beispiel von Karlsruhe (Abb. 5) zeigt sich eine zunehmende Erwärmung seit Messreihenbeginn: Der Trend der 70-jährigen Reihe ab 1931 ist größer als der Trend der 110-jährigen Gesamtreihe ab 1891. Die stärkste Temperaturzunahme des 20. Jahrhunderts ist dabei ab 1989 zu verzeichnen. Mit Beginn der 1930er und der 1990er Jahre nimmt die interannuelle Variabilität der Jahresmitteltemperaturen zu (vgl. Abb. 4, Gebietsmitteltemperatur Hoch-, Oberrhein). Von Messreihenbeginn 1891 bis 1930 ist die Variabilität vergleichsweise gering. Für die Gesamtreihe ergibt sich somit eine Zunahme der Streuung.

Im innerjährlichen Verlauf liegt der Schwerpunkt der Temperaturzunahmen im hydrologischen Winterhalbjahr und in diesem im Dezember. Die Monatsmitteltemperaturen des Dezember weisen im Untersuchungsraum hoch signifikante Zunahmen (> 99 %) zwischen 1,8 K (Naab, Regen) und 2,7 K (Enz) auf (Abb. 6). In regionaler Sicht sind die Trends im Westen Süddeutschlands größer als im Osten und sie sind auf die unteren Höhenlagen bis etwa 500 m ü. NN konzentriert. Insbesondere im Spätwinter (Februar/März) sind in den Hochlagen von Schwarzwald und Alpen nur noch geringe und teils nicht mehr signifikante Zunahmen der Monatsmitteltemperaturen zu verzeichnen.

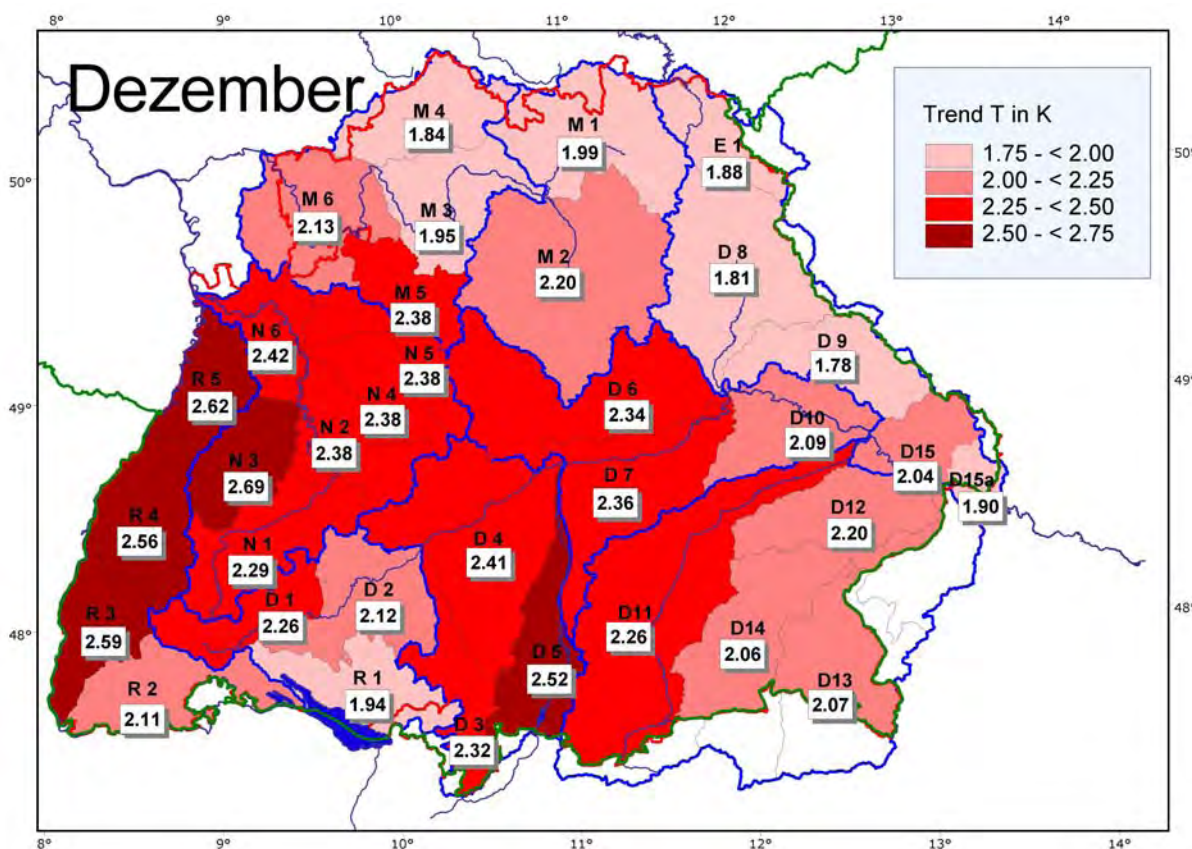


Abb. 6: Trends (in K) der Monatsmitteltemperatur Dezember, Gebietswerte in Baden-Württemberg und Bayern, 1931 bis 2000

Die Ursache der Temperaturzunahmen im Winterhalbjahr ist in den veränderten Häufigkeiten der Wetterlagen zu finden. Zugenommen hat in diesem Jahreszeitraum, insbesondere im Dezember, die Häufigkeit der West- und Südwestlagen, bei welchen im Winterhalbjahr relativ milde ozeanische Luftmassen nach Mitteleuropa geführt werden; abgenommen hat hingegen die Häufigkeit der winterkalten Nord- und Ostlagen.

Diese signifikanten Änderungen der Wetterlagenhäufigkeiten führen bei den Monatsmitteltemperaturen zu einer Zunahme der Mittelwerte und zu einer Abnahme der Streuung.

Im Sommerhalbjahr sind die Lufttemperaturtrends nicht so deutlich und in ihrer regionalen Verteilung nicht so einheitlich ausgeprägt wie im Winterhalbjahr.

Die stärksten Trends im Sommerhalbjahr ergeben sich für Monatsmitteltemperaturen des August (Abb. 7) mit flächendeckenden und gebietsweise hoch signifikanten Zunahmen von 0,7 K (D 2: Donau v. Lauchert bis Iller) bis 1,7 K (R 5: Rhein v. Murg bis Neckar). Der Schwerpunkt der Erwärmung liegt in den unteren Gebietslagen bis etwa 500 m ü. NN.

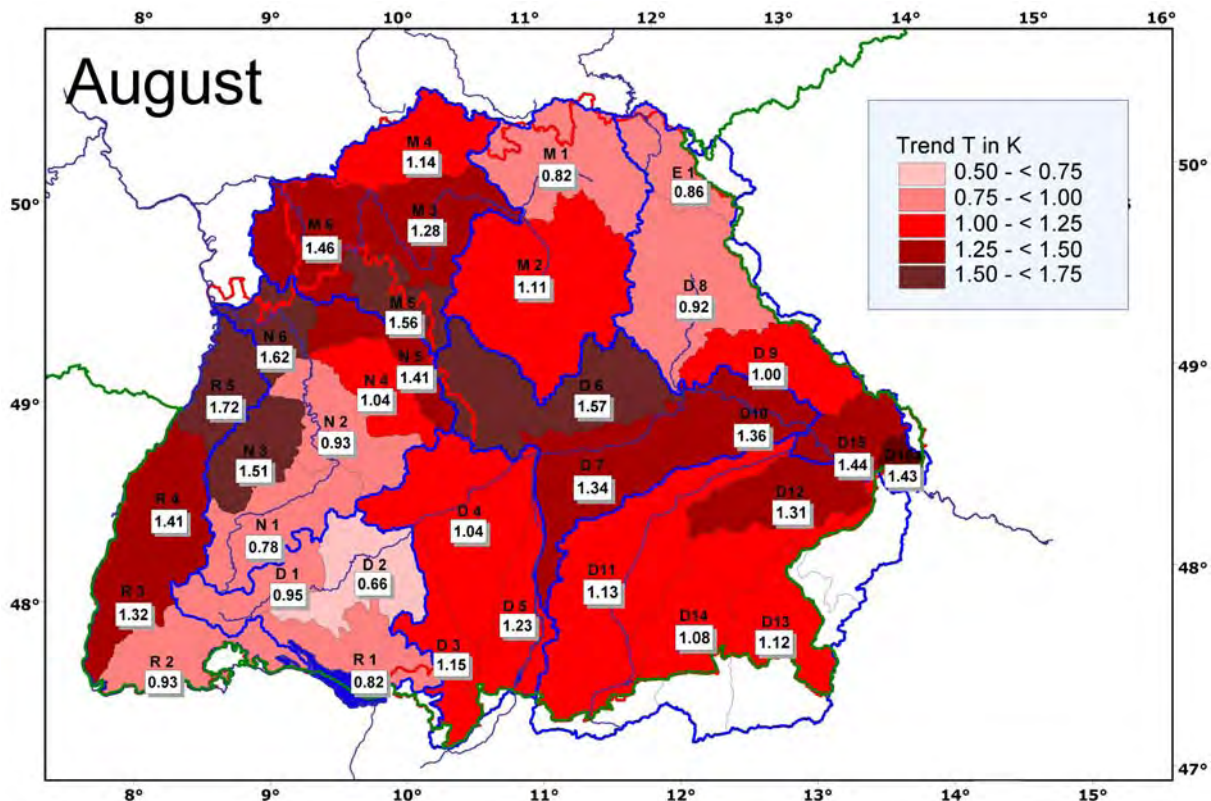


Abb. 7: Trends (in K) der Monatsmitteltemperatur August, Gebietswerte in Baden-Württemberg und Bayern, 1931 bis 2000.

3.2 Schneedecke

Auch Veränderungen des Schneedeckenregimes haben nachhaltige Auswirkungen auf den Wasserhaushalt (Grundwasserneubildung) und das Abflussregime (Hochwasserbildung). Für hydrologisch-wasserwirtschaftliche Belange sind besonders die zeitliche Verzögerung und die veränderte Intensität, mit der die in der Schneedecke gespeicherten Niederschläge abflusswirksam werden können, von Bedeutung. Untersuchungen des Langzeitverhaltens der Schneedeckenparameter verdienen daher besondere Beachtung, weil als Folge von Klima-veränderungen auch Änderungen im Schneedeckenregime erwartet werden müssen.

Für die Untersuchungen der langfristigen Schwankungen und Änderungen der Schneedeckenverhältnisse wurden folgende Parameter ausgewählt (Günther & Matthäus, 2004) und einer Zeitreihenanalyse unterworfen:

- Schneedeckendauer (Anzahl der Schneedeckentage in einer bestimmten Zeitspanne, z. B. in einer Winterperiode)
- Schneedeckenzeit (Zeitspanne zwischen dem Datum des Auftretens der ersten und der letzten Schneedecke einschließlich schneedeckenfreier Tage)

- Schneedeckenperiode (Zeitspanne ununterbrochen aufeinanderfolgender Schneedeckentage; die maximale Andauer in einer Winterperiode wird „Winterdecke“ genannt)
- Datum des Eintritts der maximalen Schneedeckenhöhe
- Die „Beständigkeit“ der Schneedecke und die „Erhaltung der Winterdecke“ sind abgeleitete Größen und geeignet, Änderungen im Andauerverhalten zu charakterisieren
- Maximalwerte des Wasseräquivalents

Die Schneedeckendauer ist die aussagekräftigste, unmittelbar aus Messungen und Beobachtungen ermittelte Grundgröße zur Beschreibung der Schneedeckenverhältnisse. Aus diesem Grunde wird diese Größe vorrangig genutzt, um nach einer Bestätigung der vermuteten schneehydrologisch relevanten Trends und deren regionalen Unterschiede im Untersuchungsgebiet zu suchen.

Für die mittlere Schneedeckendauer (Abb. 8) ergab die Analyse in der Bezugsperiode 1951/52 bis 1995/96 überwiegend, d. h. fast flächendeckend, einen Rückgang (negativer rel. Trend). Der Rückgang beträgt in den tiefer liegenden Gebieten (< ca. 300 m ü. NN) 30 bis 40 % und mehr. In den mittleren Höhenlagen (zwischen 300 und 800 m ü. NN) verringert sich der Rückgang auf 10 bis 20 % und sinkt in den höher gelegenen Gebieten (> 800 m ü. NN) auf weniger als 10 % bzw. es kommt teilweise sogar zu einer leichten Zunahme der Schneedeckendauer. In den östlichen Teilen des Untersuchungsgebietes verstärkt sich die Tendenz der Abschwächung des negativen Trends mit zunehmender Geländehöhe bis zur Trendumkehr (positiver Trend) in den höheren Lagen.

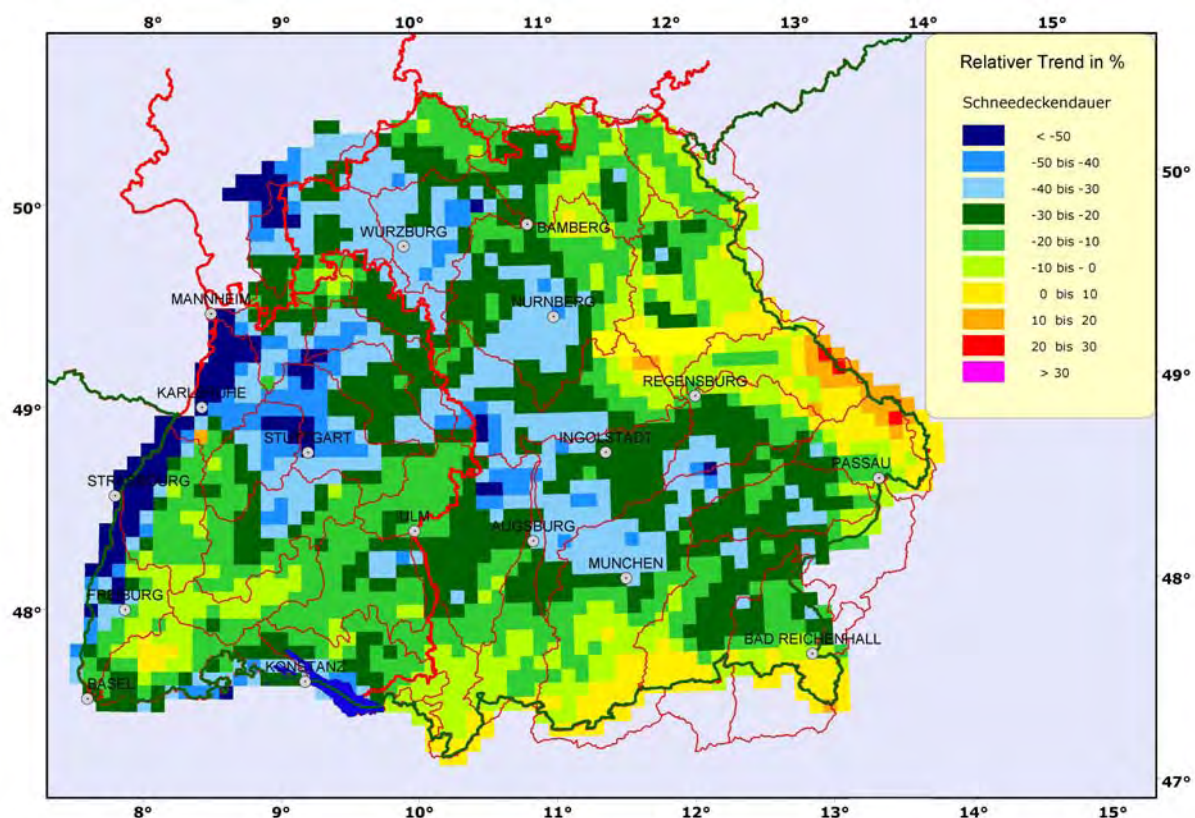


Abb. 8: Relativer Trend der mittleren Anzahl der Tage mit einer Schneedecke (Schneedeckendauer) in Baden-Württemberg und Bayern, 1951/52 bis 1995/96.

Die mittlere Schneedeckenzeit (Zeitspanne zwischen erstem Tag/letztem Tag mit Schneedecke einschließlich schneedeckenfreier Tage) weist im Trendverhalten im Vergleich zu den Befunden für die Schneedeckendauer Unterschiede auf. So haben z. B. große Anteile des Untersuchungsgebietes einen positiven Trend (vgl. Abb. 9). Eine Erklärung dafür könnte die Zunahme extremer Witterungsbedingungen sein, d. h., Schneefallereignisse können bereits im frühen Herbst bzw. noch im Frühling auftreten. Eine trendbeeinflussende Verlängerung

der Schneedeckenzzeit in Süddeutschland dürfte auch mit dem Rückgang der Monatsmitteltemperaturen des April zusammenhängen (Klämt 2004).

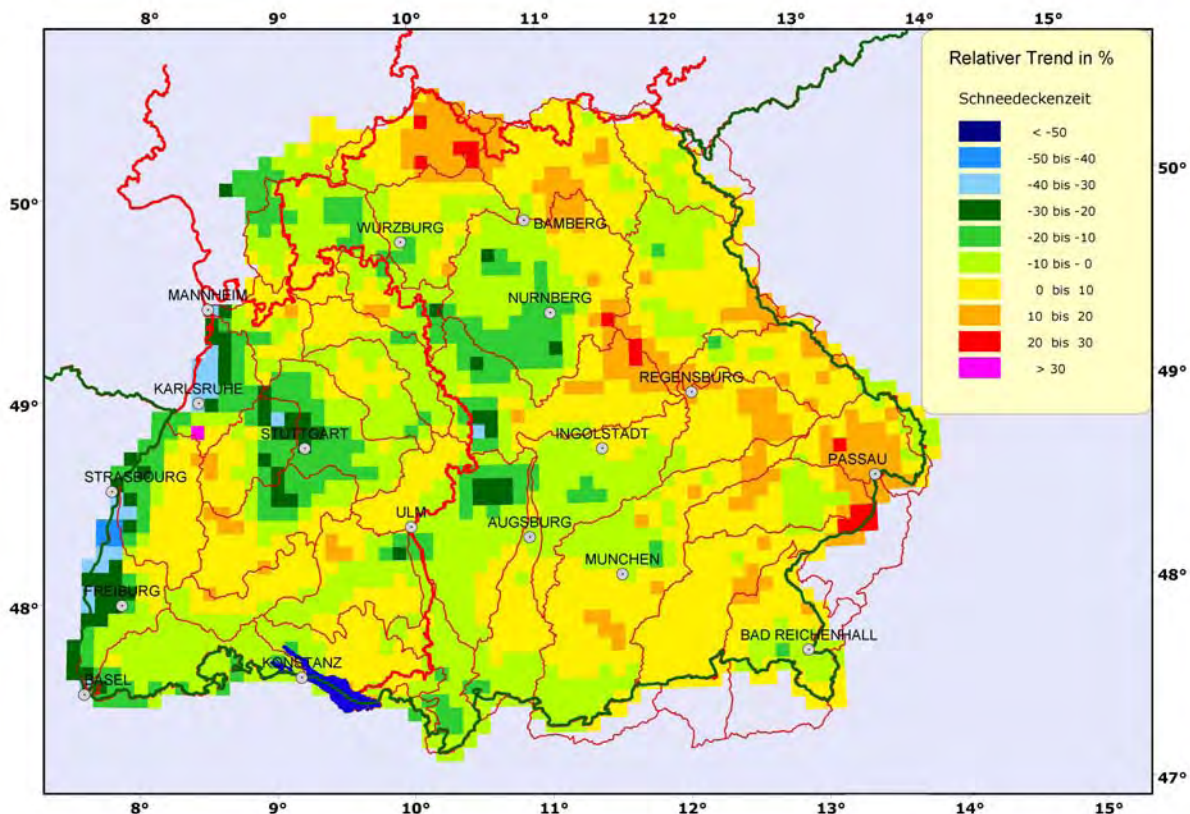


Abb. 9: Relativer Trend der mittleren Schneedeckenzzeit (Zeitspanne zwischen erstem Tag/ letztem Tag mit Schneedecke einschließlich schneedeckenfreier Tage) in Baden-Württemberg und Bayern, 1951/52 bis 1995/96.

Alle untersuchten Schneedeckenparameter weisen im Mittel straff korrelierte statistische Beziehungen zur Geländehöhe auf. Für die Abhängigkeit der mittleren Schneedeckendauer von der Geländehöhe im Gesamtgebiet Süddeutschland wurde eine hohe Korrelation ($R = 0,91$) und eine geringe Standardabweichung ermittelt (Abb. 10).

Die Schneedeckendauer ändert sich im Mittel um 12,5 Tage je 100 m Höhenunterschied, wobei die Änderungen/Höhenunterschied auf den Westseiten der Mittelgebirge etwas größer als auf den Ostseiten sind. Bei einem Rückgang der Schneedeckendauer um 25 Tage (entspricht etwa dem Trend in der Untersuchungsperiode für die unteren Lagen), bedeutet dies bezüglich der mittleren Schneedeckenverhältnisse die „Verlagerung“ eines Ortes um ca. 200 m in tiefere Lagen.

Die Ergebnisse der Zeitreihenanalysen für die weiteren untersuchten Parameter, wie z. B. die Beständigkeit der Schneedecke und die Erhaltung der Winterdecke, signalisieren in gleicher Weise wie für die oben beschriebenen Parameter, dass die Zahl „kernloser“ Winter zugenommen hat, d. h., dass insgesamt die Schneedeckenzzeit eine geringere Zahl von Schneeperioden aufweist und diese überwiegend von kürzerer Dauer sind. Wegen der großen Variabilität der Schneedeckenparameter lässt sich die statistische Signifikanz der Veränderungen nur vereinzelt nachweisen. Wenngleich die Auswirkungen von Klimaveränderungen auf das Schneedeckenregime statistisch nicht zweifelsfrei nachweisbar sind, so kann aus dem flächendeckend übereinstimmenden Trendverhalten der verschiedenen Größen die Existenz realer Veränderungen als gesichert angenommen werden.

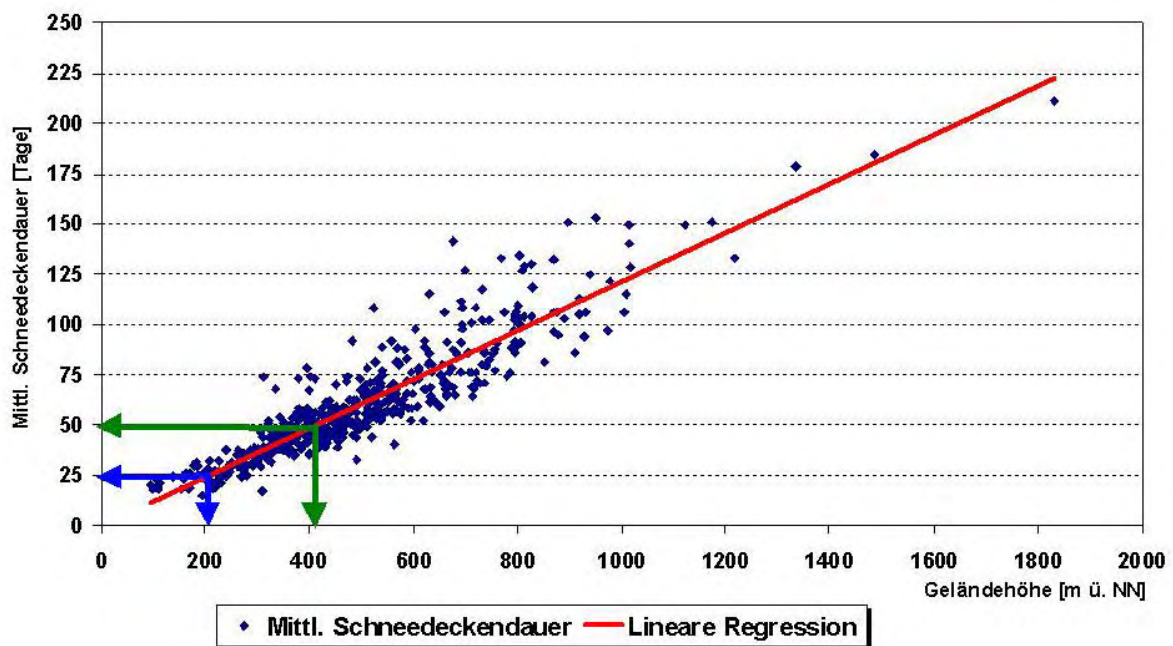


Abb. 10: Mittlere Schneedeckendauer (Tage) in Abhängigkeit von der Geländehöhe, Gesamtgebiet Baden-Württemberg und Bayern, 1951/52 bis 1995/96.

Die mitgeteilten Trendergebnisse repräsentieren das über den gesamten Bezugszeitraum gemittelte Verhalten der Zeitreihen. Es ist deshalb besonders darauf hinzuweisen, dass innerhalb dieses Zeitraums längere, mehrere Jahre andauernde Phasen mit z. T. sehr stark vom mittleren Gang abweichende Zustände zu beachten sind (kurzzeitige Persistenz). Dabei ist das Beharrungsvermögen gleichgerichteter Abweichungen ebenso zu nennen, wie der Wechsel zu sehr gegensätzlichem „Trendverhalten“.

Um Rückschlüsse hinsichtlich der Sensibilität des „Systems Schneedecke“ gegenüber Veränderungen des Klimas, vor allem aber der Lufttemperatur, ziehen zu können, wurden Variantenrechnungen mit Hilfe des Simulationsmodells SNOW-K (Rachner & Schneider 2002) durchgeführt. Die im Szenario II angenommenen Veränderungen – 1,0 K erhöhte Lufttemperatur und 10 % erhöhte Niederschlagswerte – entsprechen annähernd den Änderungen im Bezugszeitraum 1951/52 bis 1995/96. Für die Abschätzungen wurden Stationen ausgewählt, die die verschiedenen Regionen in Süddeutschland bestmöglich repräsentieren. Beispielhaft wird die Veränderung der Schneedeckenentwicklung für zwei Szenarien an der Station Stötten, Winter 1983/84 in Abb. 11 a dargestellt. Trotz der sehr vereinfachenden Annahmen, liefern die Szenario-Rechnungen wichtige Informationen. So darf angenommen werden, dass sich bei weiterer winterlicher Erwärmung die maximalen Wasseräquivalente deutlich verringern werden und dass es zu einem häufigeren Auf- und Abbau der Schneedecke in tieferen und mittleren Lagen kommen wird (wie z.B. im Winter 1999/2000, Abb. 11 b), was zu einer Zunahme der Häufigkeit kleiner Hochwasser im Winterhalbjahr führen kann.

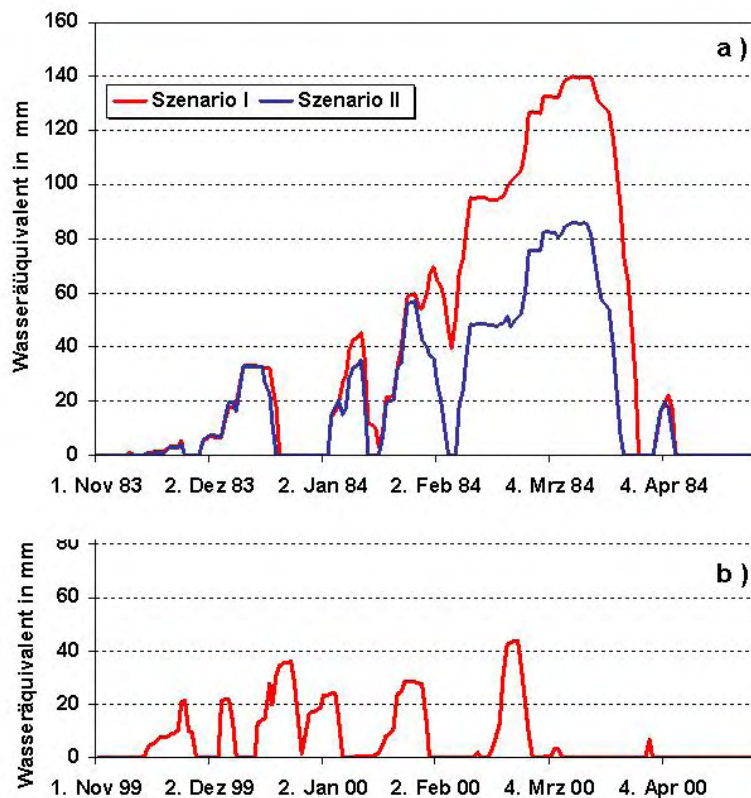


Abb. 11: Schneedeckenentwicklung für verschiedene Szenarien, Station Stötten

Szenario I: Berechnung mit Originalmesswerten (rote Kurve)

Szenario II: Berechnung mit um 1 K erhöhten Lufttemperaturen und 10 % erhöhten Niederschlagswerten (blaue Kurve)

Winter 1983/1984 (obere Grafik)

Winter 1999/2000 (untere Grafik)

3.3 Gebietsniederschläge

Grundlage für die Berechnung der Gebietswertreihen bilden 2139 Gitterpunktzeihen, die unter Ausnutzung klimatologisch-statistischer Hintergrundinformationen aus Tageswerten der Niederschlagshöhe an 1815 Niederschlagsstationen berechnet wurden. Für 33 Flussgebiete wurden monatlich aus den Tageswerten des Untersuchungszeitraums (1931 bis 1998) fünf statistische Parameter – Tagesmittelwert, Standardabweichung, Unteres Quartil, Median und Überschreitungshäufigkeit von 15 mm/d – bestimmt und die daraus resultierenden Monatswertreihen mit unterschiedlichen Verfahren zur Zeitreihenanalyse untersucht, um Inhomogenitäten und tendenzielle Entwicklungen zu ermitteln (Reich, 2005).

Die Analyse des Langzeitverhalten der Gebietsniederschläge erbrachte zusammenfassend folgende Ergebnisse:

Die im Verlauf des Jahres (Januar bis Dezember) gefallenen Niederschläge haben um 0,1 bis 0,2 % pro Jahr nur gering zugenommen. Lediglich ~ 25 % der Gebiete zeigen einen signifikanten Trend. Deutlicher als die Jahresniederschlagssummen verändert sich die Häufigkeitsverteilung. Einer Zunahme „trockener Tage“, d. h. solcher ohne oder mit nur geringem Niederschlag, steht eine Zunahme der Niederschläge an jenen Tagen gegenüber, an denen überdurchschnittliche (jedoch nicht extreme) Beträge gemessen werden.

Im Sommer (Juni bis August) nimmt in der Mehrzahl der untersuchten Gebiete der Niederschlag ab. Diese Abnahme wird vor allem durch einen gleichzeitigen Rückgang der Häufigkeit von Tagen mit hohen Gebietsniederschlägen verursacht. Nur in Südbayern kommt es zu

einer geringfügigen Zunahme der Niederschläge, die wiederum durch einen Anstieg der Häufigkeit von Tagen mit starken Niederschlägen verursacht wird. Die langfristige Entwicklung der Gebietsniederschläge des Winters (Dezember bis Februar) stellt in gewisser Weise das Gegenstück des sommerlichen Verlaufs dar: Erhöhung der mittleren täglichen Niederschlagserwartung und erhöhte Wahrscheinlichkeit von Tagen mit sehr hohen Niederschlägen (s. Abb. 12).

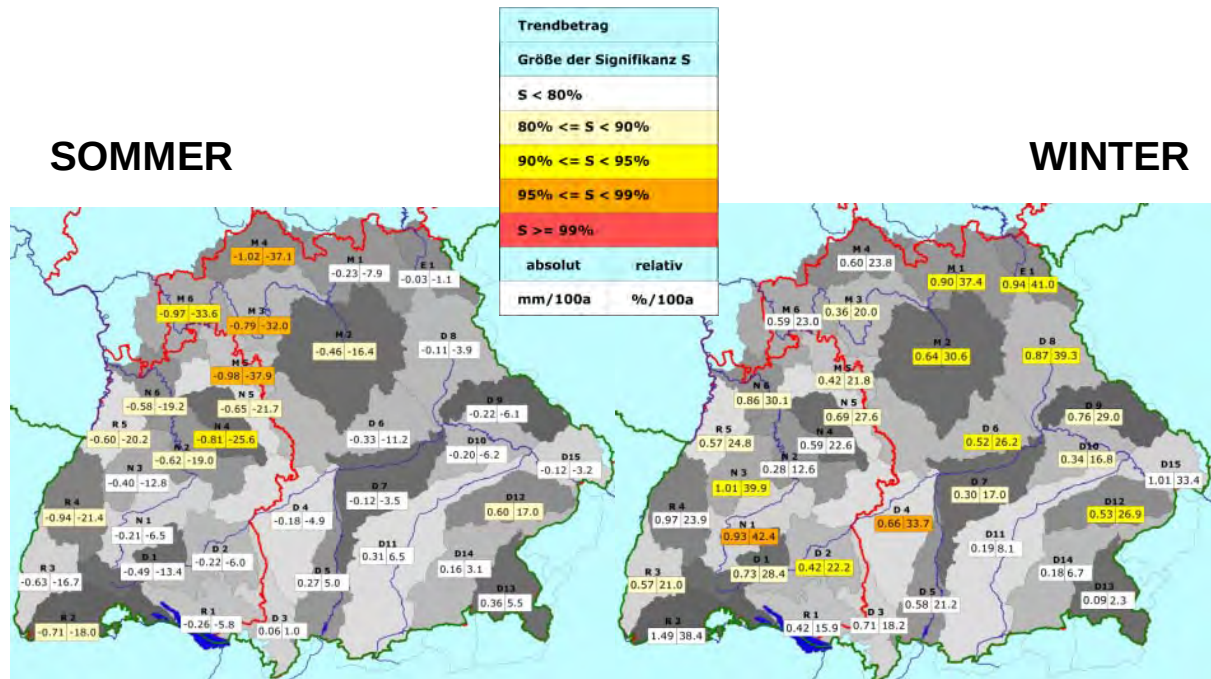


Abb. 12: Regionale Verteilung der absoluten und relativen Trends für den Gebietsniederschlag (Tagesmittelwert), Sommer und Winter, Süddeutschland, 1931 bis 1997

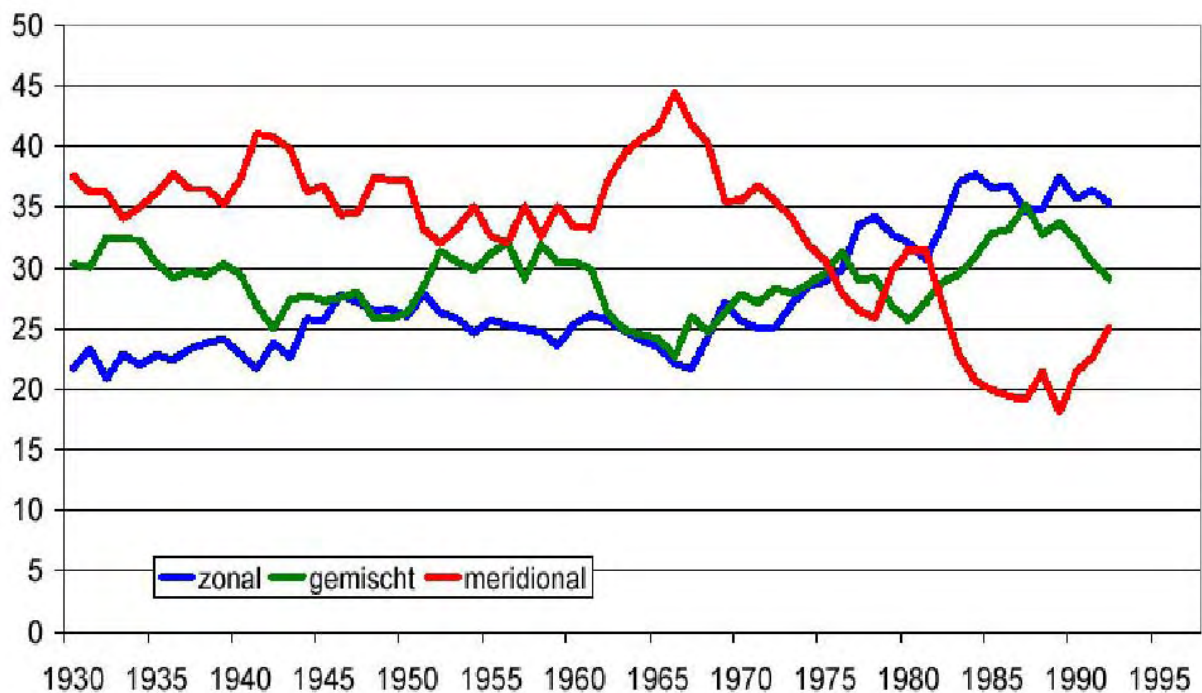


Abb. 13: Häufigkeit von Zirkulationsformen in Mitteleuropa, Winter, 1931 bis 1997 (zehnjährig übergreifende Mittelwerte) (nach Gerstengarbe, Werner und Rüge, 1999).



Im Rahmen von KLIWA wurde auch untersucht, ob Zusammenhänge zwischen dem Zeitreihenverhalten des Niederschlags und den jahreszeitlichen Häufigkeiten der atmosphärischen Zirkulationsformen (zonal, meridional, gemischt) bestehen. Basierend auf dem Katalog der Großwetterlagen in Mitteleuropa (Gerstengarbe et al. 1999) sind in Abb.13 zehnjährig übergreifende mittlere Häufigkeiten der drei Zirkulationsformen dargestellt. Ein Vergleich der Gebietswertreihen mit vieljährigen Reihen der Häufigkeit bestimmter Wetterlagen in Mitteleuropa im Winter zeigt, dass beide Entwicklungen miteinander verknüpft sind und dass die Verstärkung der Niederschläge im Winter durch eine höhere Häufigkeit der zonalen und gemischten Zirkulationsformen erklärbar ist (vgl. Abb. 13).

3.4 Starkniederschlagshöhen

In Süddeutschland zeigen die Starkniederschlagshöhen (halbjährliche Höchstwerte) im Zeitraum 1931 bis 1998/99 im Winterhalbjahr (Oktober bis April) einen deutlichen positiven Trend zwischen 30 und 35 %, während im Sommerhalbjahr (Mai bis September) nur geringe bis keine Veränderungen zu verzeichnen sind (siehe Abb. 14). Gleichzeitig ist die Anzahl der Stationen mit signifikantem Trend im Winterhalbjahr deutlich höher als im Sommerhalbjahr. Im Winterhalbjahr weisen je nach betrachteter Dauerstufe ca. 40 bis 60 % aller Stationen signifikante Zunahmen auf.

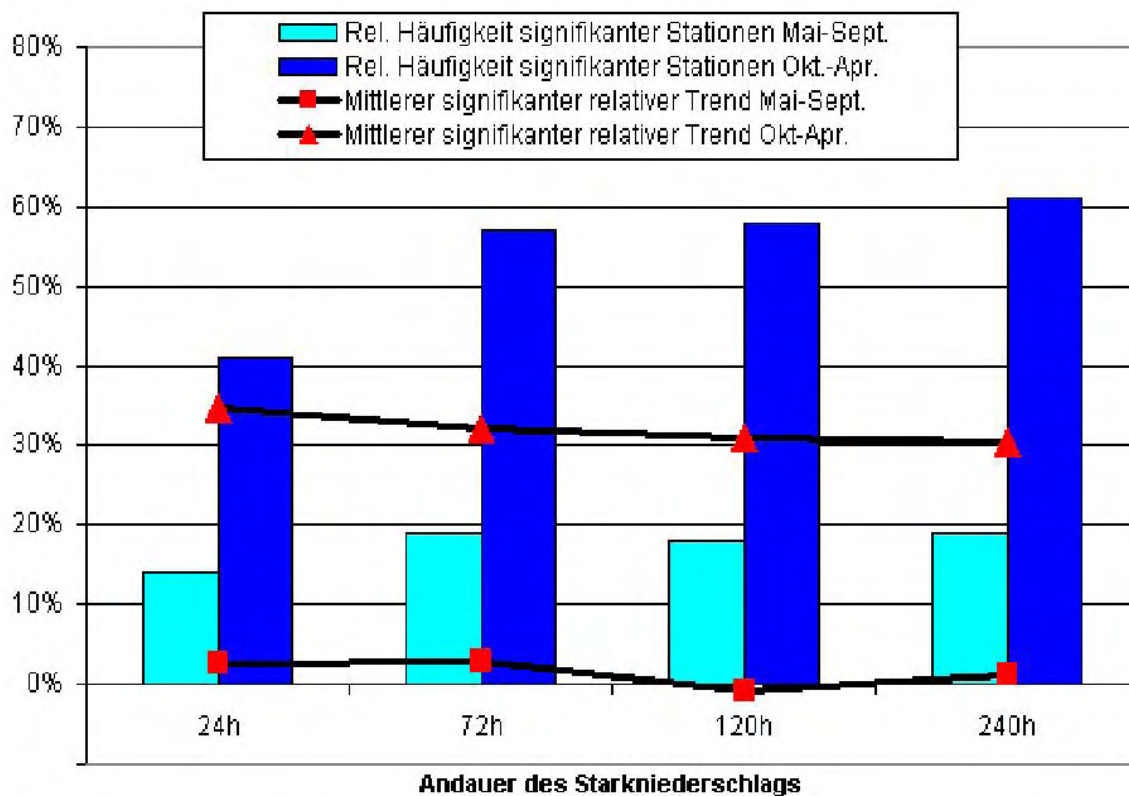


Abb. 14: Mittlerer signifikanter relativer Trend der Starkniederschlagshöhen unterschiedlicher Dauerstufen (D) und relative Häufigkeit von Stationen mit signifikantem Trend ($S \geq 90\%$), Süddeutschland, 1931 bis 1998/99.

In der Abb. 15 ist die räumliche Verteilung der Zunahmen (blaue Kreise) und Abnahmen (rote Kreise) der Starkniederschläge in Prozent des Mittelwertes für die Dauerstufe $D = 24\text{ h}$ und das hydrologische Winterhalbjahr dargestellt. Der Prozentwert entspricht dem ausgefüllten Flächenanteil des Kreises: ein viertel gefüllter Kreis bedeutet 25 %, halb gefüllt 50 % usw. Die Signifikanz der Trends wird durch die Größe der Kreise ausgedrückt.

Um die regionale Verteilung des Trendverhaltens besser dokumentieren zu können, wurden alle Stationen eingetragen, auch wenn sie keine Signifikanz aufweisen. Regionale Schwerpunkte für die Zunahmen im Winterhalbjahr sind in Bayern das Gebiet von Franken sowie Teile des Bayerischen Waldes, in Baden-Württemberg der Schwarzwald sowie der Nordosten des Landes (Bartels & Dietzer 2005).

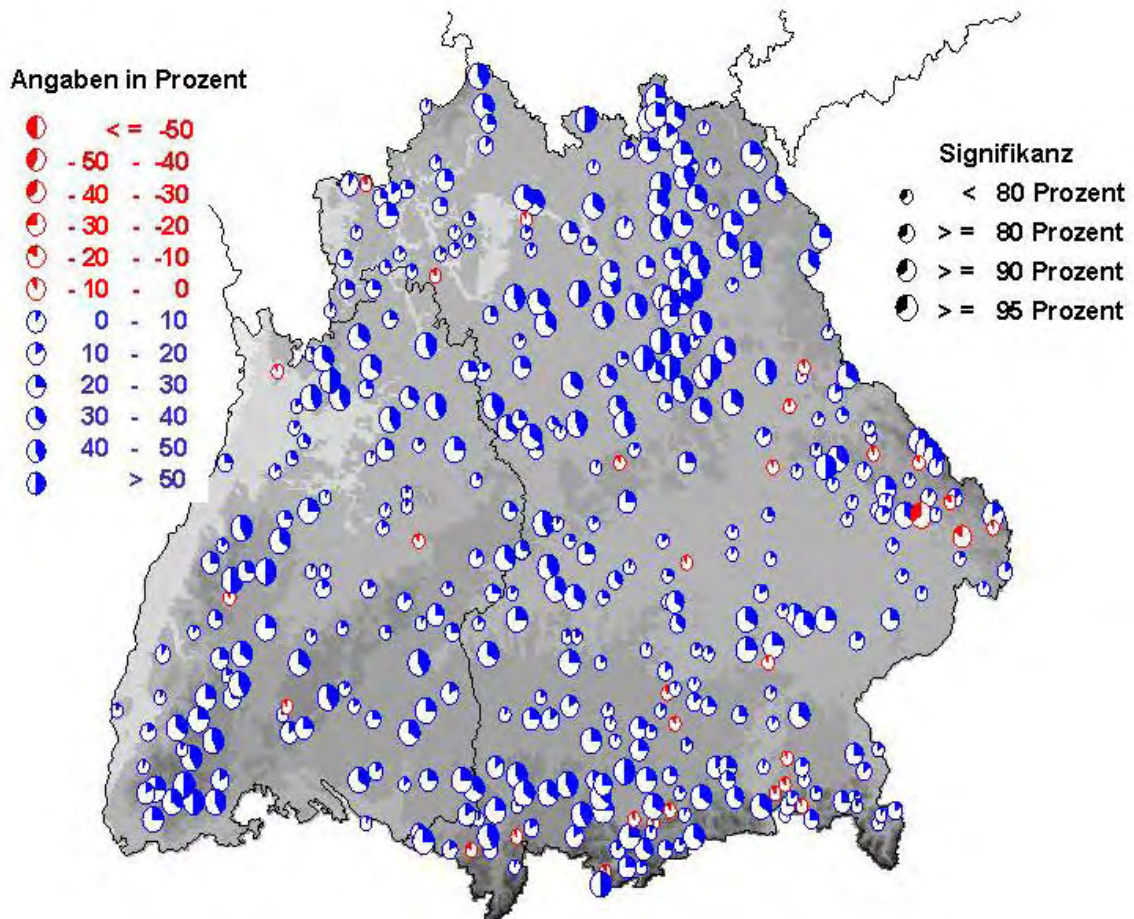


Abb. 15: Zu- und Abnahme der Starkniederschläge in Prozent des Mittelwertes (rel. Trend) in Süddeutschland, Hydrologisches Winterhalbjahr, Dauerstufe D = 24 h, halbjährliche Höchstwerte, 1931 bis 2000.

Die extremen Nassperioden (Aufeinanderfolge von mindestens 8 Tagen mit Niederschlag > 1 mm/Tag) nahmen regional ebenfalls im Winterhalbjahr zu, im Sommerhalbjahr treten dagegen keine bzw. nur geringfügige Änderungen auf, was sich mit dem Befund bei den Starkniederschlägen deckt. Bei den extremen Trockenperioden (Aufeinanderfolge von mindestens 11 Tagen mit Niederschlag < 1 mm/Tag) sind die Änderungen im Vergleich zu den Nassperioden deutlich geringer: im Winterhalbjahr nahmen sie geringfügig zu, im Sommerhalbjahr geringfügig ab.

Zur Erklärung der Ursachen für diese Veränderungen bieten sich natürlicherweise auch hier die Formen der atmosphärischen Zirkulation an. Eine Analyse der relativen Häufigkeiten von Zirkulationstypen bei Starkniederschlagsereignissen im zeitlichen Verlauf ergab, dass diese im Winterhalbjahr eng mit dem zonalen Zirkulationstyp verknüpft sind. Die Zunahme der Häufigkeit des zonalen Zirkulationstyps etwa ab Mitte der 1960er Jahre korrespondiert dabei eindeutig mit den Veränderungen im Langzeitverhalten der Starkniederschläge (vgl. auch Abb. 13).

3.5 Potentielle Verdunstung (PET), Klimatische Wasserbilanz (KWB)

Die potentielle Verdunstung (PET) nach TURC/IVANOV (Klämt, 2005) zeigt im Untersuchungsgebiet Baden-Württemberg und Bayern eine regionale Schwankungsbreite zwischen mittleren Jahreswerten von < 350 mm in den Gipfellagen der Alpen und den Werten von > 700 mm entlang des Oberrheingrabens (s. Abb. 16). In den Hochlagen des Schwarzwaldes und der östlichen Mittelgebirge Bayerns (Fichtelgebirge, Bayerischer-, Böhmerwald) liegen die mittleren Jahreswerte der PET bei 500 mm. Deutlich erkennbar wird die Abhängigkeit der PET von der Geländehöhe.

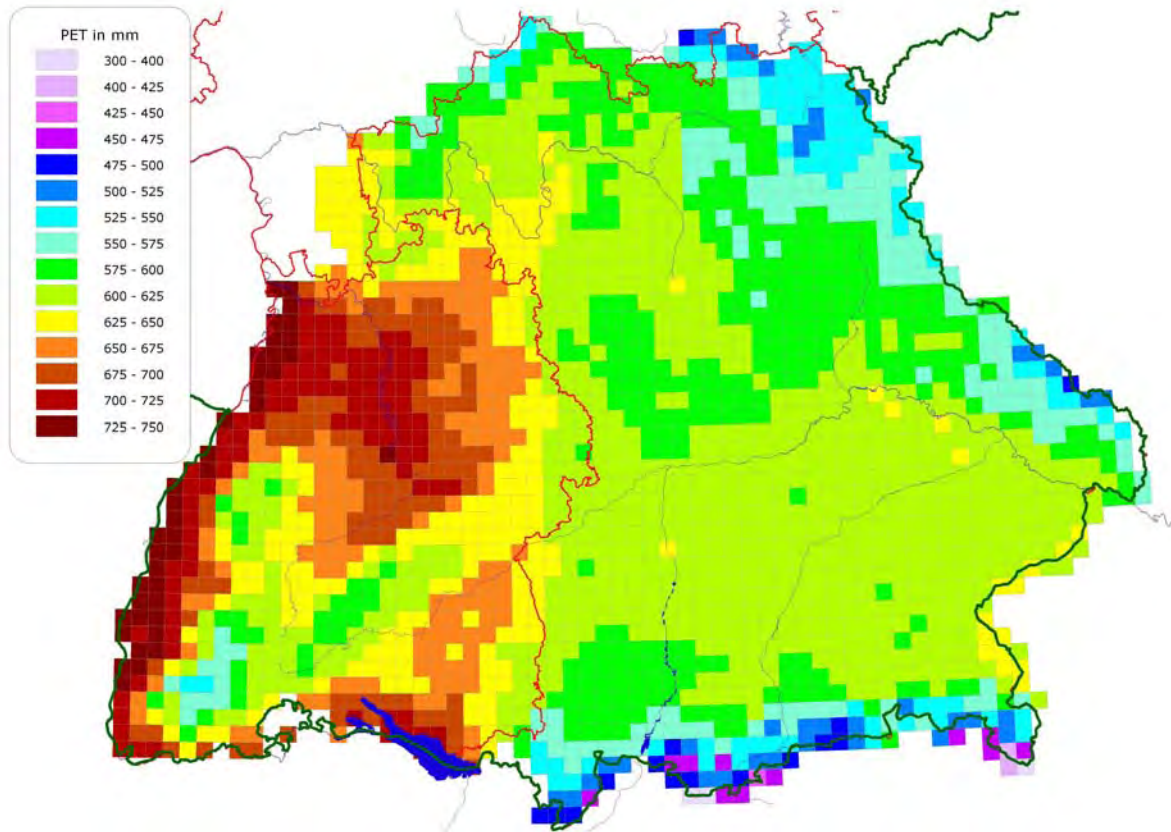


Abb. 16: Mittlere jährliche potentielle Verdunstung (in mm) nach TURC/IVANOV, Süd-deutschland, 1931 bis 1997.

Die klimatische Wasserbilanz, definiert als Differenz aus (korrigierter) Niederschlagshöhe und potentieller Verdunstung, ist im süddeutschen Raum im vieljährigen Mittel nahezu flächendeckend positiv (s. Abb. 17). Ausnahmen bilden das Schweinfurter Becken, bedingt durch seine relativ geringen Niederschläge, sowie Teile des Oberrheingrabens – hier wird das Bilanzdefizit wesentlich durch die hohe potentielle Verdunstung hervorgerufen. In weiten Teilen des Neckarraumes, der mittleren Donau und in Mainfranken liegen die mittleren Jahreswerte der KWB bei 100 mm bis 300 mm. In den niederschlagsreichen Hochlagen des Schwarzwaldes werden Bilanzüberschüsse bis 1500 mm und in den Alpen bis 3000 mm erreicht.

Die Jahreswertreihen (Gebietsmittelwerte) der potentiellen Verdunstung weisen in Süddeutschland für die Untersuchungsperiode 1931/1997 flächendeckend einen negativen Trend auf (s. Abb. 18 a), signifikante Befunde ergeben sich jedoch nur bei den hoch gelegenen Untersuchungsgebieten im Süden von Baden-Württemberg und am Main unterhalb Regnitz (M3, M3, M6). Aus dem Trendverhalten von Niederschlag (Zunahme) und potentieller Verdunstung (Abnahme) ergeben sich für die jährliche klimatische Wasserbilanz (Abb.

18 b) signifikante Zunahmen in der Größenordnung zwischen ca. 100 mm und 150 mm im Südteil Baden-Württembergs (insbesondere Neckaroberlauf und Enz) und im Nordosten und Osten Bayerns (Höchstwerte an der Donau uh. Isar).

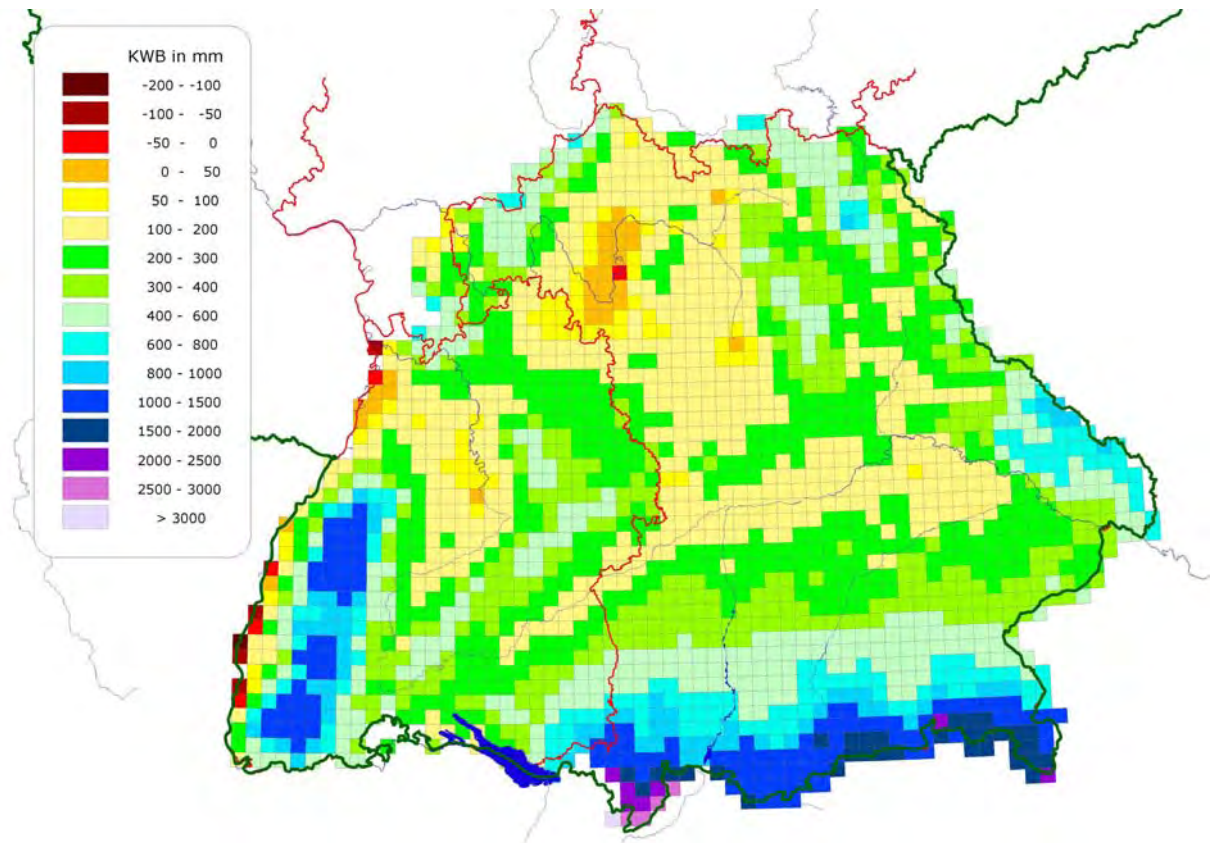


Abb. 17: Mittlere jährliche klimatische Wasserbilanz (in mm), Süddeutschland, 1931 bis 1997.

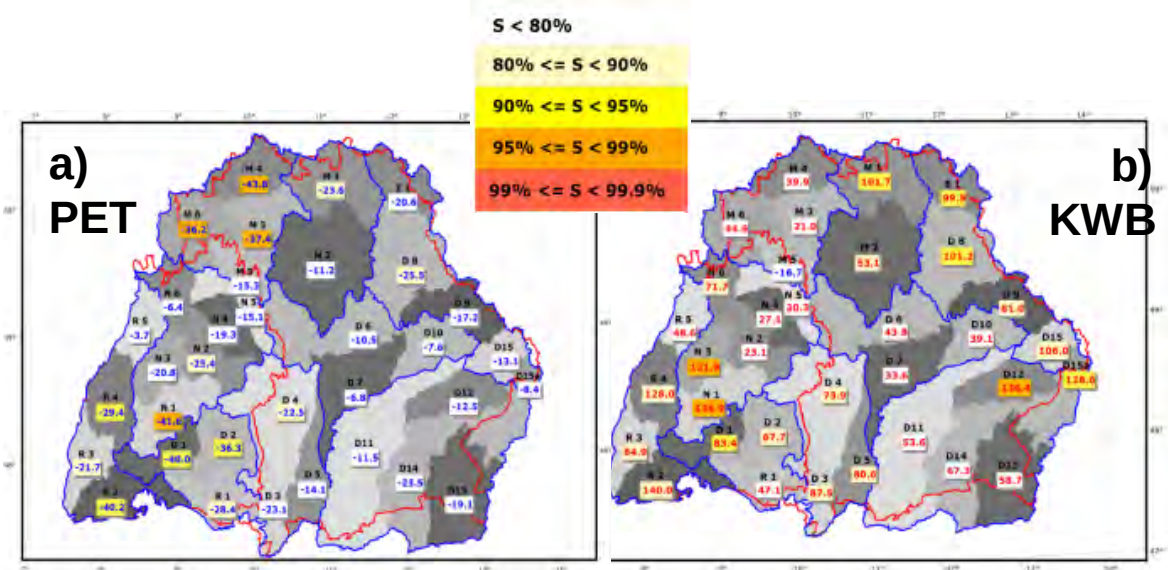


Abb. 18: a) Trends der jährlichen potentiellen Verdunstung, (Gebietsmittelwerte in mm), Süddeutschland, 1931 bis 1997
b) Trends der jährlichen klimatischen Wasserbilanz (Gebietsmittelwerte in mm), Süddeutschland, 1931 bis 1997



Am Beispiel der Gebietsmittelwerte des Gebietes R2/Hochrhein (Bodensee bis Wiese) werden mit den Grafiken in Abb. 19 wesentliche Aspekte im Verhalten der klimatischen Wasserbilanzen beschrieben. Abb. 19 a zeigt den Verlauf der jährlichen Niederschlags- und potentiellen Verdunstungshöhen im Gebiet R2 – die Fläche zwischen den beiden Kurven entspricht der Höhe der klimatischen Wasserbilanz (KWB). Die Jahreswerte der KWB weisen in der Untersuchungsperiode einen positiven Trend auf: Der Effekt der Niederschlagszunahme wird in der Bilanz durch die abnehmende potentielle Verdunstung noch verstärkt. Aus den Zeitreihenverläufen der Komponenten wird ersichtlich, dass der Niederschlag eine wesentlich höhere Variabilität aufweist als die PET. Variabilität und Trendverhalten der KWB werden stärker durch den Niederschlag als durch die PET bestimmt.

Bei Betrachtung der KWB für die hydrologischen Halbjahre (Abb. 19 b) zeigt sich, dass für das Sommerhalbjahr ein negativer Trend zu verzeichnen ist, während im Winterhalbjahr ein positiver Trend vorliegt.

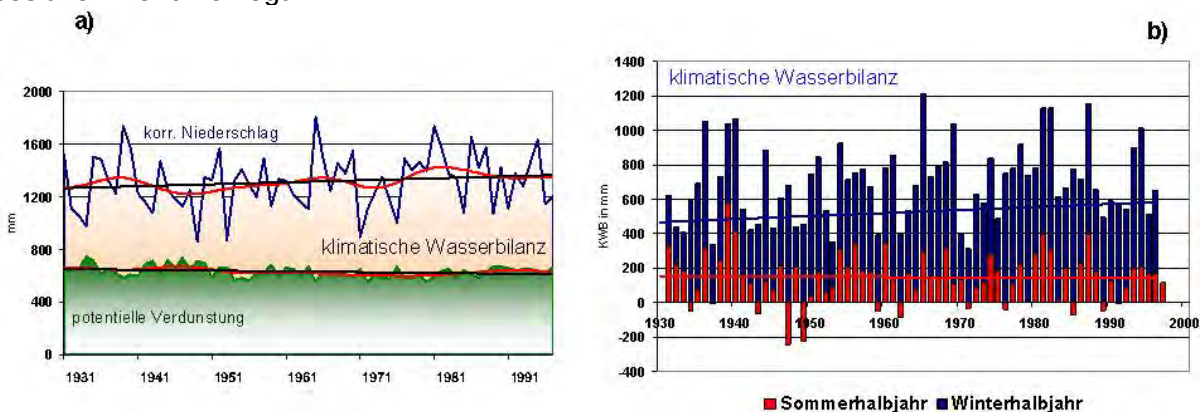


Abb. 19a) Jahreswerte korrigierter Niederschlag, potentielle Verdunstung, klimatische Wasserbilanz, Gebiet R2/Hochrhein (Bodensee bis Wiese), 1931 bis 1997.
 b) Klimatische Wasserbilanz für die hydrologischen Halbjahre, Gebiet R2/Hochrhein (Bodensee bis Wiese), 1931 bis 1997.

3. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen

Hinsichtlich der Auswirkungen von Klimaveränderungen auf den Wasserhaushalt sind die hydrometeorologischen Größen Lufttemperatur, Niederschlag einschließlich Schneedecke und Verdunstung von besonderer Bedeutung. Sowohl langfristige Veränderungen (Tendenzen, Trends) des mittleren Zustandes als auch langfristige Veränderungen im Schwankungs- und Extremverhalten dieser Größen haben Auswirkungen auf den Oberflächenabfluss, das Ausmaß und die Häufigkeit von Hochwasser und Trockenheit und die Grundwasserneubildung. Um die Risiken solcher Wirkungen abschätzen zu können, sind sowohl Auswertungen langer Zeitreihen klimatologischer und hydrologischer Daten als auch intensive Szenariountersuchungen mit regionalen Klimamodellen erforderlich. Im Kooperationsvorhaben KLIWA wurde in acht Einzelprojekten im Projektbereich A 1 ein Beitrag zur ersten dieser beiden Teilaufgaben geleistet und regional differenzierte Informationen über das Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen flächendeckend und rasterbezogen erarbeitet.

Als wichtiges „Nebenprodukt“ der Arbeiten konnten weitere geeignete lange Messreihen des DWD aufbereitet, nacherfasst, geprüft und regionalisiert werden und dadurch die für die Verifikation der Ergebnisse von Klimamodellen unerlässliche Datenbasis erheblich erweitert werden.

Die Analyse des Langzeitverhaltens erbrachte zusammenfassend folgende Ergebnisse für Süddeutschland:

- Die Jahresmitteltemperaturen haben im Untersuchungszeitraum 1931 bis 2000 deutlich zugenommen, vor allem in den 1990er Jahren und dabei besonders im Winter. Die Tem-

peraturzunahmen sind in den unteren Gebietslagen und im Westen Süddeutschlands stärker. Das Trendverhalten der Lufttemperaturen ist flächendeckend durch eine hohe Signifikanz gekennzeichnet.

- Die Anzahl der Tage mit Schneedecke hat in den tieferen und mittleren Höhenlagen deutlich abgenommen (mildere schneeärmere Winter). Mit zunehmender Geländehöhe (> ca. 800 m ü. NN) und in den östlichen Teilen von Bayern vermindert sich diese Tendenz, teilweise kommt es sogar zu einer leichten Zunahme.
- Die innerjährliche Niederschlagsverteilung verändert sich bei etwa gleich bleibendem Jahresniederschlag (Winterhalbjahr feuchter, Sommerhalbjahr trockener).
- Die Starkniederschläge haben regional im Winterhalbjahr deutlich zugenommen.
- Die potentielle Verdunstung zeigt eine flächendeckende Abnahme der Jahreswerte, signifikante Ergebnisse ergeben sich jedoch nur in einigen Gebieten. Die Jahreswerte der klimatischen Wasserbilanz weisen in der Untersuchungsperiode einen positiven Trend auf.

Fazit: Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland haben sich im vergangenen Jahrhundert – insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte – erkennbar verändert. Die gefundenen Veränderungen überschreiten regional-spezifisch und interannuell die bisher aus langen Zeitreihen bekannte Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen. Da die Ergebnisse der Trendanalyse auch von den Modellrechnungen (Klimaszenarien) gestützt werden, kommt dem beobachteten Trendverhalten mit ziemlich hoher Wahrscheinlichkeit auch prognostische Bedeutung zu.

3. Dank

An dieser Stelle sei allen Bearbeitern im Deutschen Wetterdienst/Geschäftsfeld Hydrometeorologie für die Durchführung der Untersuchungen im Rahmen der KLIWA-Teilprojekte zum Thema „Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen“ gedankt. Dank gilt auch allen weiteren an diesen Teilprojekten Beteiligten, insbesondere den Herren Dipl.-Met. Franz M. Albrecht, Dr. Klaus Blümel, Dr. Martin Rachner sowie Frau Dipl.-Met. Petra Jankiewicz, die durch engagierte Zusammenarbeit mit den Projektbearbeitern im Rahmen von Werkverträgen zahlreiche Teilergebnisse ermöglicht haben.

3. Literatur

- Bartels, H.; Dietzer, B. (2005): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Bericht (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 104 S.
- DVWK (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen, DVWK-Merkblätter 238, Bonn, 135 S.
- Gerstengarbe, F.-W.; Werner, P.C.; Rüge, U. (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881 – 1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowski, Potsdam, Offenbach a. M., 5. erg. u. verbesserte Aufl., 138 S.
- Günther, Th.; Matthäus, H. (2004): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 80 S.
- IPCC (2001): Intergovernmental Panel on Climate Change. Third Assessment Report Part I: The Scientific Basis.
- Klämt, A. (2004): Langzeitverhalten der Lufttemperaturen in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 74 S.
- Klämt, A. (2005): Langzeitverhalten der Verdunstungs- und Bilanzengrößen in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA.
- KLIWA (2003): Erarbeitung und Bereitstellung von langen Reihen interpolierter Gitterpunktwerte (Tageswerte) und Analyse des Langzeitverhaltens von Gebietsmittelwerten der Lufttemperatur in BW und BY, Zwischenbericht zum KLIWA-Einzelprojekt KLIWA-TEMP (A1.2.3)/BW-BY, 230 S.



-
- Rachner, M.; Schneider, G. (1992): Ermittlung extremer Werte des Niederschlagsdargebots aus Schneeschmelze und Regen auf der Grundlage der langjährigen Potsdamer Reihe (1883 bis 1987). Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 36, H. 3/4, S. 115-119.
- Reich, T. (2005): Langzeitverhalten der Gebietswertreihen des Niederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Bericht (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 104 S.
- Richter, D. (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers, Ber. DWD, Nr. 194, Offenbach.

Langzeitverhalten von hydrologischen Größen

Helmut Straub

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

1. Einleitung

In jüngster Vergangenheit traten in verschiedenen Flussgebieten Hochwasserereignisse auf, die erhebliche Schäden verursacht haben. Weiterhin führte die lang anhaltende Trockenheit im Sommer/Herbst 2003 zu einem extremen Niedrigwasser mit teilweise erheblichen Auswirkungen auf die Ökologie der Gewässer und zu Folgen bei der Energieerzeugung. Daher kamen in der Öffentlichkeit Diskussionen auf, ob solche Naturereignisse das Ergebnis einer bereits eingetretenen Klimaveränderung sind. In diesen Diskussionen fehlen jedoch weitgehend Zahlen und Fakten für eine objektive Beurteilung. Um diesen Mangel zu beheben, wurde im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA für den Bereich der Länder Baden-Württemberg und Bayern das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse sowie der mittleren Abflüsse untersucht und bewertet. Dabei sind die derzeit gängigen statistischen Verfahren zur Anwendung gekommen.

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Abflüsse erstreckte sich primär auf die Ermittlung eventuell vorhandener Trends. Bei den Hochwasserabflüssen wurden die Höhe der jährlichen und halbjährlichen Werte sowie deren Häufigkeit untersucht, bei den mittleren Abflüssen nur die Höhe der jährlichen Werte. Die halbjährlichen Höchstabflüsse wurden zusätzlich untersucht, um insbesondere das Verhalten im Winterhalbjahr, in dem die Starkniederschläge in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben, besser bewerten zu können.

Über die Ergebnisse zum Langzeitverhalten der jährlichen Hochwasserabflüsse wurde bereits beim 1. KLIWA-Symposium (KLIWA, 2001) berichtet. Teil dieser Ausarbeitung sind Ergebnisse nur zu den halbjährlichen Hochwasserabflüssen und zu den mittleren jährlichen Abflüssen. Zu den Ergebnissen der Untersuchungen zum Langzeitverhalten der jährlichen Hochwasserabflüsse (KLIWA, 2002) und der mittleren jährlichen Abflüsse (KLIWA, 2003) liegen KLIWA-Hefte bereits vor.

Die jeweiligen Untersuchungen hat das Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe im Auftrag der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg und des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft durchgeführt.

2. Datengrundlage

Grundlage der statistischen Analyse für die halbjährlichen Reihen der Hochwasserabflüsse waren die Daten von 90 Pegeln, die über lange (meist 70 bis 80 Jahre) Beobachtungsreihen verfügen (Abb. 1). Die Pegel (30 in Baden-Württemberg (dunkelgrau), 60 in Bayern (hellgrau)) decken unterschiedliche Einzugsgebietsgrößen ab (Abb. 2); die meisten Pegel liegen in den Einzugsgebiets-Klassen 500 bis 1000 und 1000 bis 2500 km².

Den Untersuchungen der mittleren jährlichen Abflüsse lagen 160 Pegel zugrunde.

Den Trenduntersuchungen lagen jeweils zwei unterschiedliche Kollektive zugrunde: die „langen Zeitreihen“ (mit unterschiedlichem Beginn bis 1998) und die „Zeitreihen 1932 bis 1998“ (einheitliche Zeitspanne von 67 Jahren für alle Pegel).

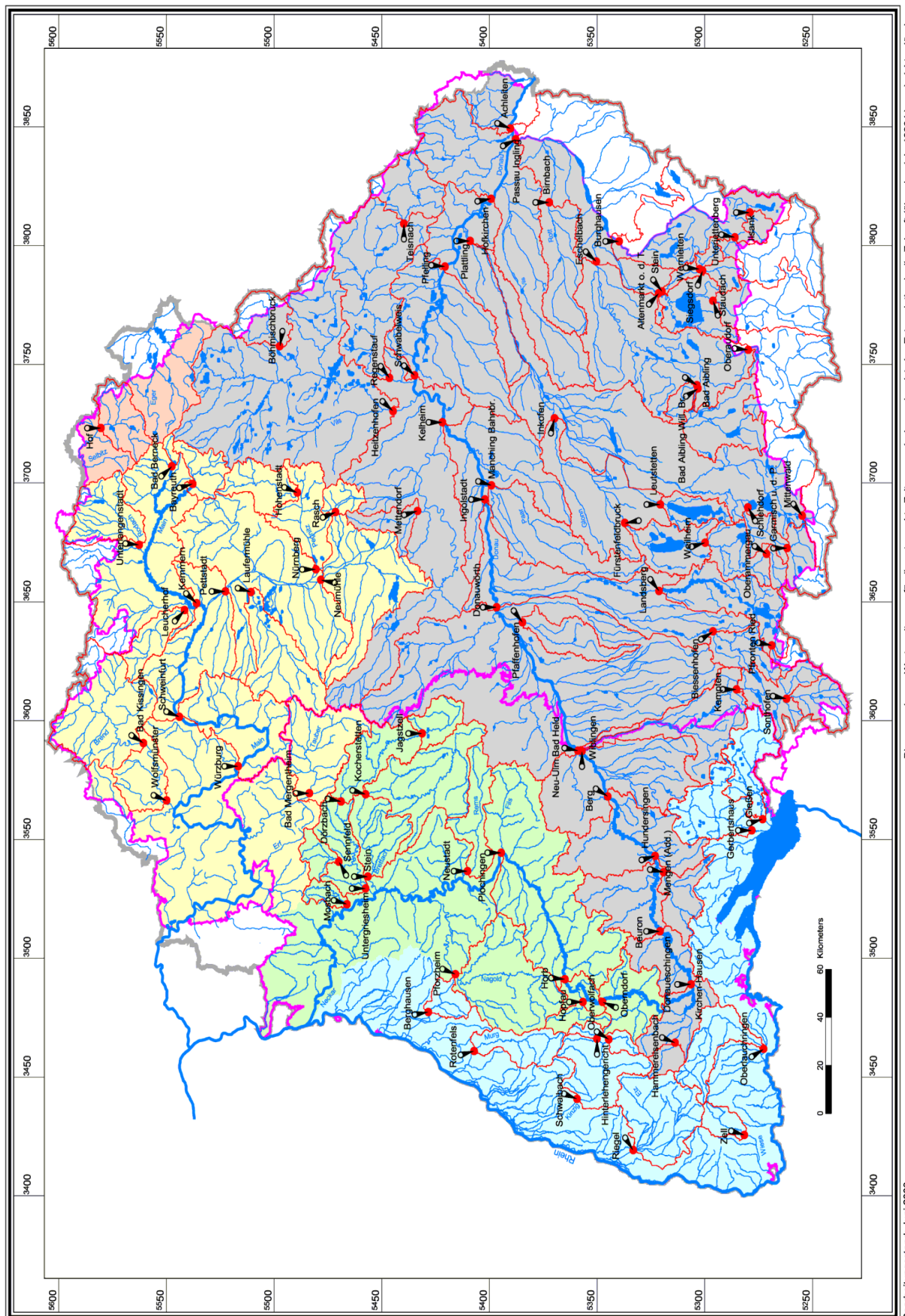


Abb. 1: Einbezogene Pegel (für Untersuchung der halbjährlichen Hochwasserabflüsse).

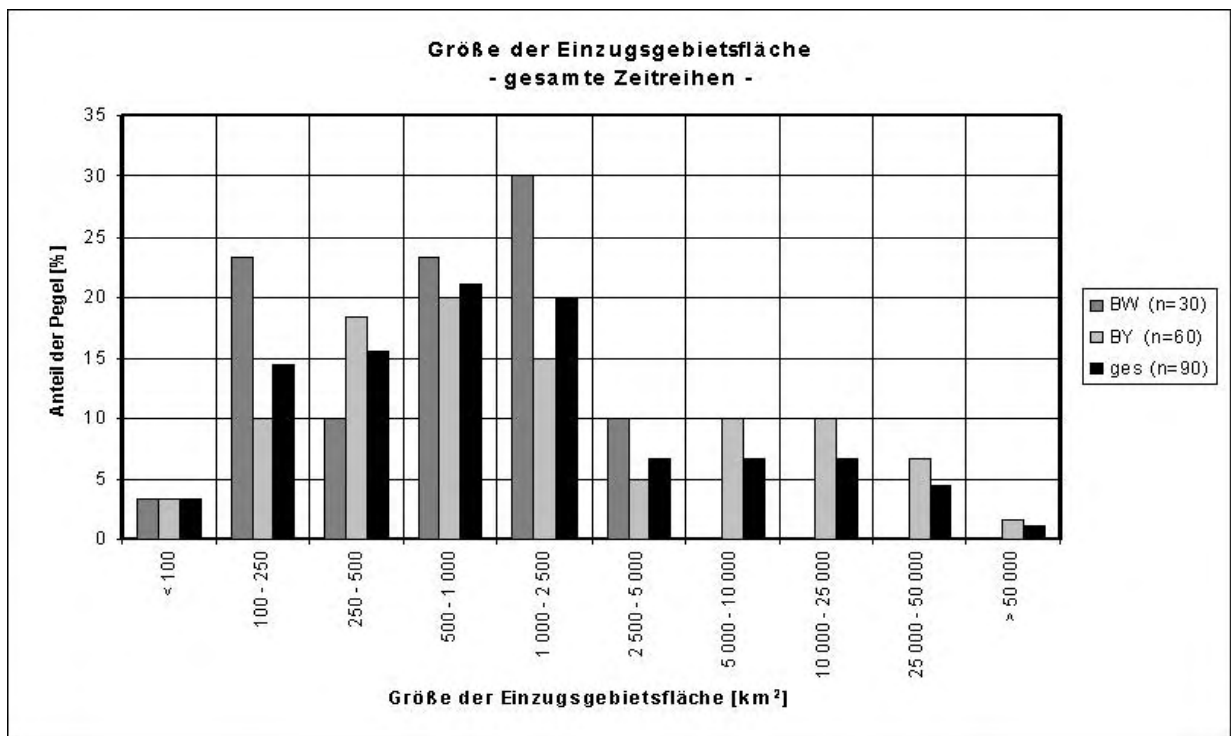


Abb. 2: Verteilung der Pegel auf die Größe der Einzugsgebiete

3. Verwendete Methoden und Ergebnisdarstellungen

Bei den Untersuchungen kamen folgende statistischen Methoden zur Anwendung:

- **Trendberechnung**
Ermittlung des linearen Trends nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate („Fehlerquadratsumme“)
- **Trend-Test nach MANN-KENDALL**
Die Bewertung des Signifikanzniveaus erfolgte wie folgt:

$\alpha < 80\%$:	nicht signifikant
$80\% \leq \alpha \leq 90\%$:	schwach signifikant
$90\% < \alpha \leq 99\%$:	wahrscheinlich signifikant
$\alpha > 99\%$:	hoch signifikant

- **Bruchpunktanalyse nach MANN-WHITHNEY**

Tritt in einer Zeitreihe ein Trend auf, kann mit der Bruchpunktanalyse der Zeitpunkt („Bruchpunkt“) ermittelt werden, zu dem mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eine Änderung im Abflussverhalten vorliegt.

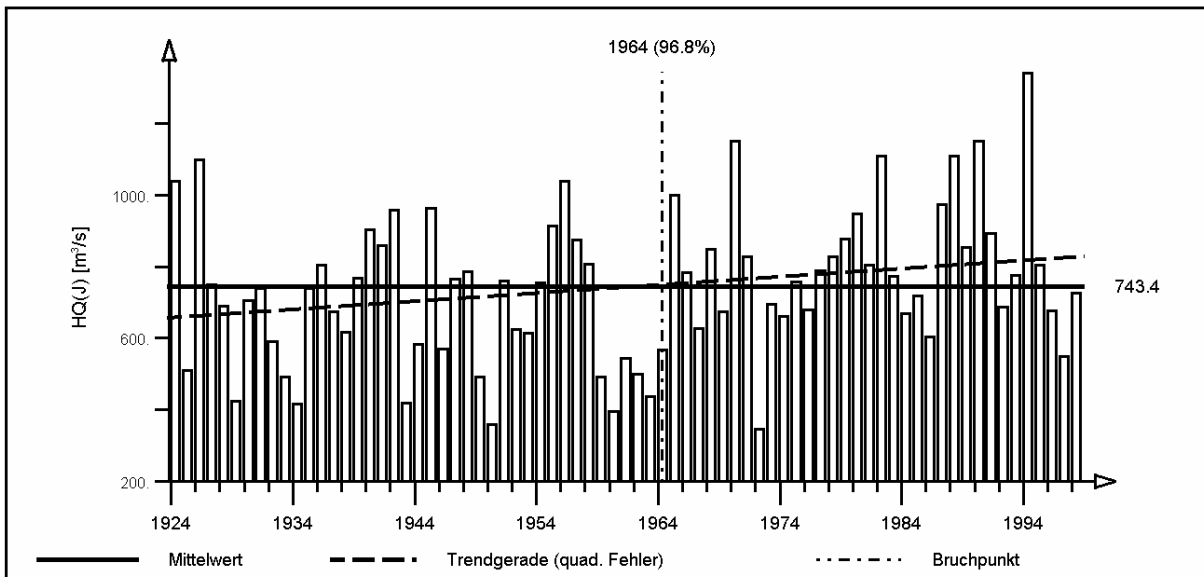
Zeitreihen mit einem „Bruchpunkt“ zeigen vor und nach diesem Zeitpunkt häufig eine Veränderung im Mittelwert der Teilzeitreihen. Dies bedeutet, dass sich das Abflussverhalten „sprunghaft“ verändert hat. Da jedoch zu erwarten ist, dass sich infolge der Klimaänderung eine „schleichende“ Änderung einstellt, wurde das Trendverhalten jeweils für die vollständige Zeitreihe untersucht.

- **Summenlinienanalyse**

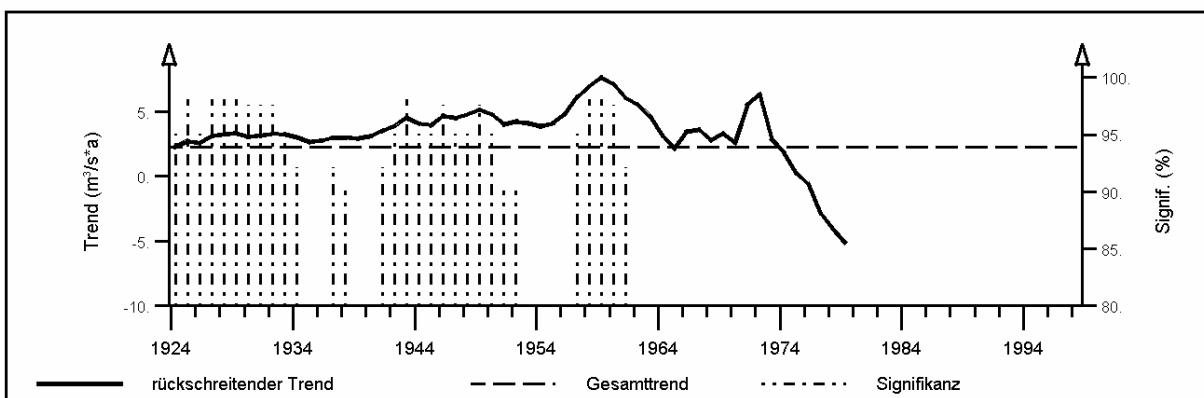
Die Methoden sind in (KLIWA, 2002) und (KLIWA, 2003) beschrieben. Sie wurden bei dem Vorhaben KLIWA als Arbeitsmethoden vereinbart. Daher kamen bei allen Untersuchungen zum Langzeitverhalten der hydrologischen Größen, bei denen die Zeitreihen der an den Pe-



geln ermittelten Hochwasserabflüsse und der mittleren Abflüsse Grundlage waren, die o. a. Verfahren zur Anwendung.



Mittelwert, Bruchpunkt nach Mann-Whitney und linearer Trend: $2.286 \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{a}$
(Trend-Signifikanz nach Mann-Kendall: 95%)



Rückschreitender Trend mit Signifikanz nach Mann-Kendall

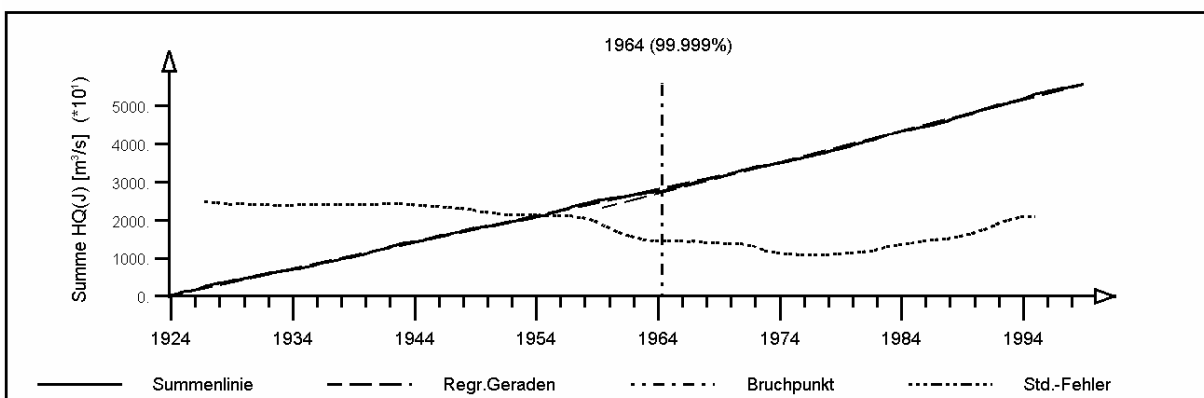


Abb. 3: Ergebnisdarstellung „Analyse zum Langzeitverhalten der jährlichen Höchstabflüsse HQ(J)“

In den jeweiligen Untersuchungsberichten sind die Ergebnisdarstellungen zu den Trenduntersuchungen sowie tabellarische Zusammenstellungen für alle Pegel enthalten. Abb. 3 zeigt

die Ergebnisdarstellung zu dem Langzeitverhalten der jährlichen Hochwasserabflüsse exemplarisch für den Pegel Donauwörth/Donau, der über eine Zeitreihe von 1925 bis 1998 verfügt. Sie enthält folgende Informationen:

oberes Diagramm: Zeitreihe der mittleren Jahresabflüsse HQ(J) mit Kennzeichnung von:

- mittlerer Hochwasserabfluss MHQ mit Angabe des Werts in m^3/s : $743,4 \text{ m}^3/\text{s}$
- Trendgerade mit Angabe der jährlichen Abflussänderung (absoluter Trend) in der Diagrammunterschrift in $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$: $2,286 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot \text{a})$
- Trendsignifikanz nach MANN-KENDALL in der Diagrammunterschrift: 95%
- Kennzeichnung des Bruchpunkts nach MANN-WHITNEY (im Falle Wahrscheinlichkeit von $P > 50\%$) mit Angabe des Jahres und der Wahrscheinlichkeit P: 1964, 96,8%

mittleres Diagramm: rückschreitender Trend mit:

- rückschreitendem Trend ermittelt aus mindestens 20 Jahren.
Die Größe des Trends ist auf der Zeitachse an dem Jahr dargestellt, an dem die jeweils betrachtete Teilzeitreihe beginnt (linke Achse).
- Trend über die gesamte Zeitreihe (Gesamtrend)
- Signifikanzniveau des Trends für $\alpha > 80\%$ nach MANN-KENDALL.
Die Höhe des Signifikanzniveaus ist an dem Jahr dargestellt, an dem die jeweils betrachtete Teilzeitreihe beginnt (rechte Achse).

unteres Diagramm: Summenlinieanalyse mit:

- Summenlinie mit Zeitskalierung über das Abflussjahr.
Treten in einer Zeitreihe Datenlücken auf, werden diese aus der Zeitreihe entfernt. Die Zeitskalierung wird in solchen Fällen durch eine fortlaufende Nummer der Jahre ersetzt.
- Kennzeichnung des wahrscheinlichen Bruchpunkts nach MANN-WHITNEY
- Darstellung der Regressionsgeraden für die beiden Teilzeitreihen, die sich durch Teilung der Gesamtreihe am Bruchpunkt ergeben.
- Darstellung der Summe des Standardfehlers aus jeweils zwei Regressionsgeraden. Hierbei wird der Zeitpunkt des betrachteten Bruchpunkts kontinuierlich über die gesamte Zeitreihe variiert. Das Minimum dieser Kurve gibt den Zeitpunkt der Zeitreihenteilung an, für den sich aus den beiden Regressionsrechnungen der kleinste Standardfehler ergibt.
- Angabe des Jahres, in dem der Bruchpunkt nach MANN-WHITNEY liegt, und Angabe der Signifikanz der Änderung des Steigungsmaßes nach dem t-Test: 1964, 99,999%.

4. Ergebnisse zum Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse

Wie unter Kap.1 erwähnt, wurden in Ergänzung zur Untersuchung der jährlichen Hochwasserabflüsse (Ergebnisse siehe KLIWA, 2002) auch die halbjährlichen Höchstabflüsse mit den gleichen statistischen Verfahren analysiert. Dafür liegen die Ergebnisse folgender Analysen vor:

- Analyse des Trends der halbjährlichen (Winter- und Sommerhalbjahr) Höchstabflüsse HQ(J)
- Analyse des Trends der Häufigkeit der halbjährlichen Höchstabflüsse
- Analyse des Jahresgangs der monatlichen Höchstwerte HQ(m)

4.1 Trend der halbjährlichen Höchstabflüsse



Bei den Trenduntersuchungen der „gesamten Zeitreihen“ zeigte es sich, dass die Winterhalbjahre bei ca. 60 % der Pegel nach dem Test nach MANN-KENDALL keinen signifikanten Trend aufweisen (Abb. 4); die jeweiligen Anteile der Pegel aus Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY) sind etwa gleich groß. Der Anteil der Pegel mit wahrscheinlichen und sehr wahrscheinlichen Trends liegt in BW geringfügig höher als in BY.

Die Ergebnisse für das Sommerhalbjahr weichen davon wenig ab; ebenso weist das Kollektiv „Zeitreihen ab 1932“ ähnliche Werte auf.

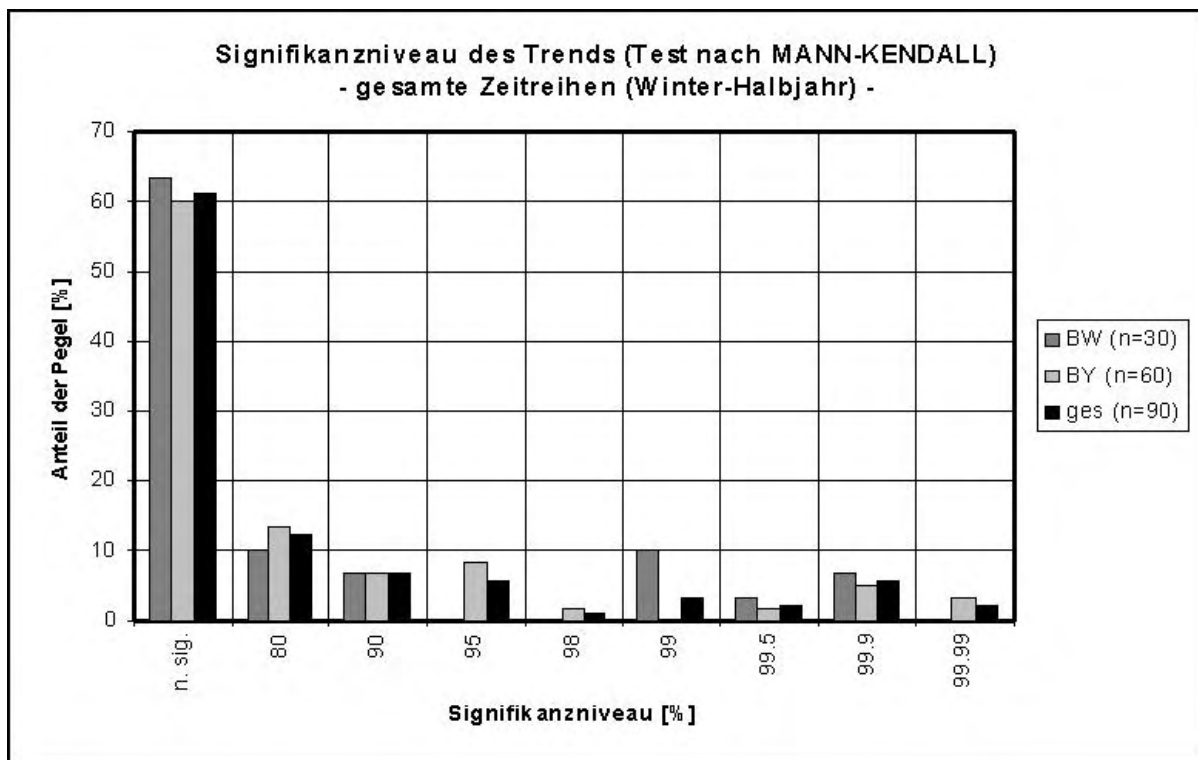


Abb. 4: Signifikanz des Trends der Hochwasserabflüsse im Winterhalbjahr.

Die Größe des Trends der 35 signifikanten (Signifikanz >80%) Pegel ist für das Winterhalbjahr in Abb. 5 dargestellt. Sie ist bei dem überwiegenden Teil dieser Pegel positiv (Zunahme der Abflüsse). Die Zunahmen liegen bei den meisten Pegeln in den Trend-Klassen zwischen 0,25 bis 1,0 % pro Jahr, bezogen auf den langjährigen MHQ-Wert. Die größte Zunahme mit 1,25 % pro Jahr tritt am Pegel Hammereisenbach (im Oberlauf der Donau) auf; dies entspricht einer Zunahme von $0,125 \cdot 50,7$ (=MHQ) = 0,63 m³/s pro Jahr.

Im Sommerhabjahr sind ebenfalls Zunahmen vorhanden; sie sind jedoch geringer.

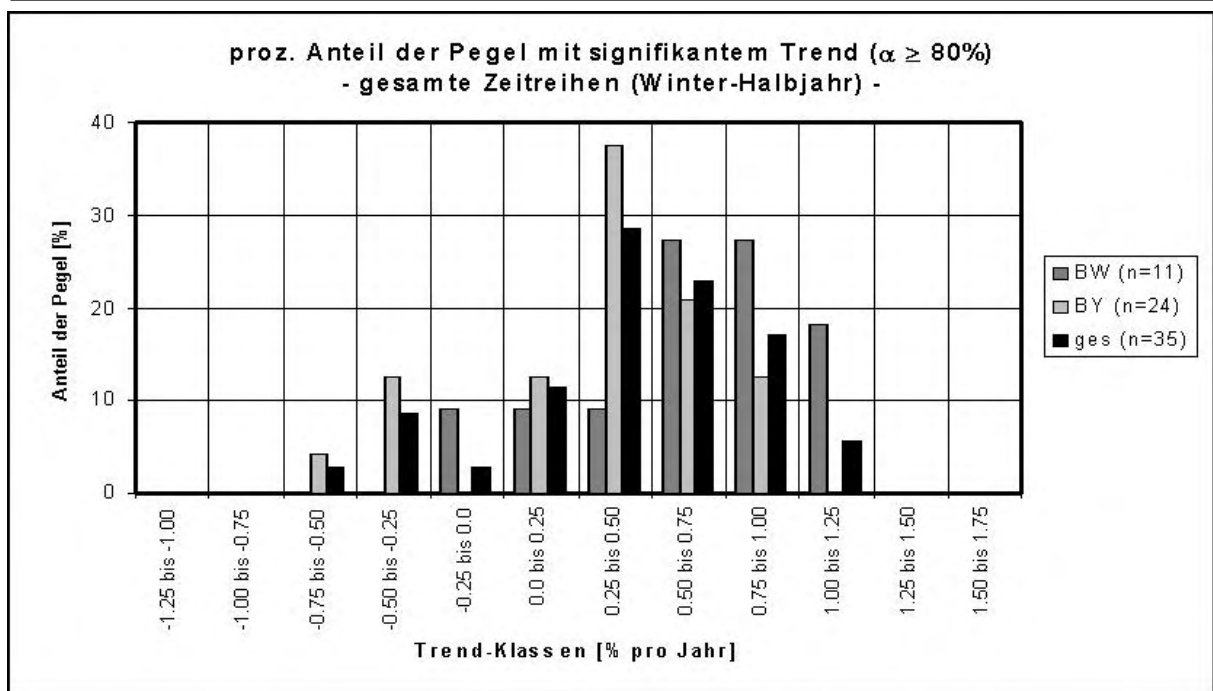


Abb. 5: Größe des Trends bei den 35 signifikanten Pegeln, Winterhalbjahr.

Aus der flächenhaften Darstellung der Ergebnisse (Abb. 6) wird deutlich, dass die überwiegende Zahl der Einzugsgebiete (jedem Pegel ist das Einzugsgebiet farblich zugeordnet) viele Abnahmen, viele geringe Zunahmen (gelb) und nur wenige starke Zunahmen aufweisen. Die Abnahmen und geringen Zunahmen sind meist „nicht signifikant“ oder „schwach signifikant“, die starken Zunahmen jedoch „wahrscheinlich signifikant“ und „sehr wahrscheinlich signifikant“.

4.2 Analyse der Häufigkeiten

Eines der Ziele der Untersuchung war die Frage, ob die Hochwasser in den letzten Jahren häufiger aufgetreten sind als in den früheren Jahren. Hierzu wurde die jährliche Häufigkeit des Auftretens der Abflüsse über ausgewählten Schwellenwerten ermittelt. Als Schwellenwert wurde für jeden Pegel der Median der Monatshöchstwerte festgelegt. Die so generierten Zeitreihen für die Winter- und Sommerhalbjahre wurden dann nach den o.g. statistischen Verfahren ausgewertet.

Aus der flächenhaften Darstellung (Abb. 7) des Trends der Häufigkeiten ist ersichtlich, dass bei einer – im Vergleich zu den Aussagen zum Trend der Höhe der Hochwasserabflüsse – größere Zahl von Pegeln von einer signifikanten Zunahme der Hochwasser-Häufigkeit betroffen ist. Vor allem der Anteil der Pegel mit „wahrscheinlichem“ und „sehr wahrscheinlichem“ Trend hat zugenommen, und zwar hauptsächlich im südlichen Teil beider Bundesländer.

Die Untersuchung hat ergeben, dass die Zunahme der Häufigkeit hauptsächlich durch die kleineren Hochwasser bedingt ist. Weiterhin hat sich ergeben, dass die Änderung der Häufigkeit bei den meisten Pegeln in den Jahren 1960 bis 1965 erfolgt ist.

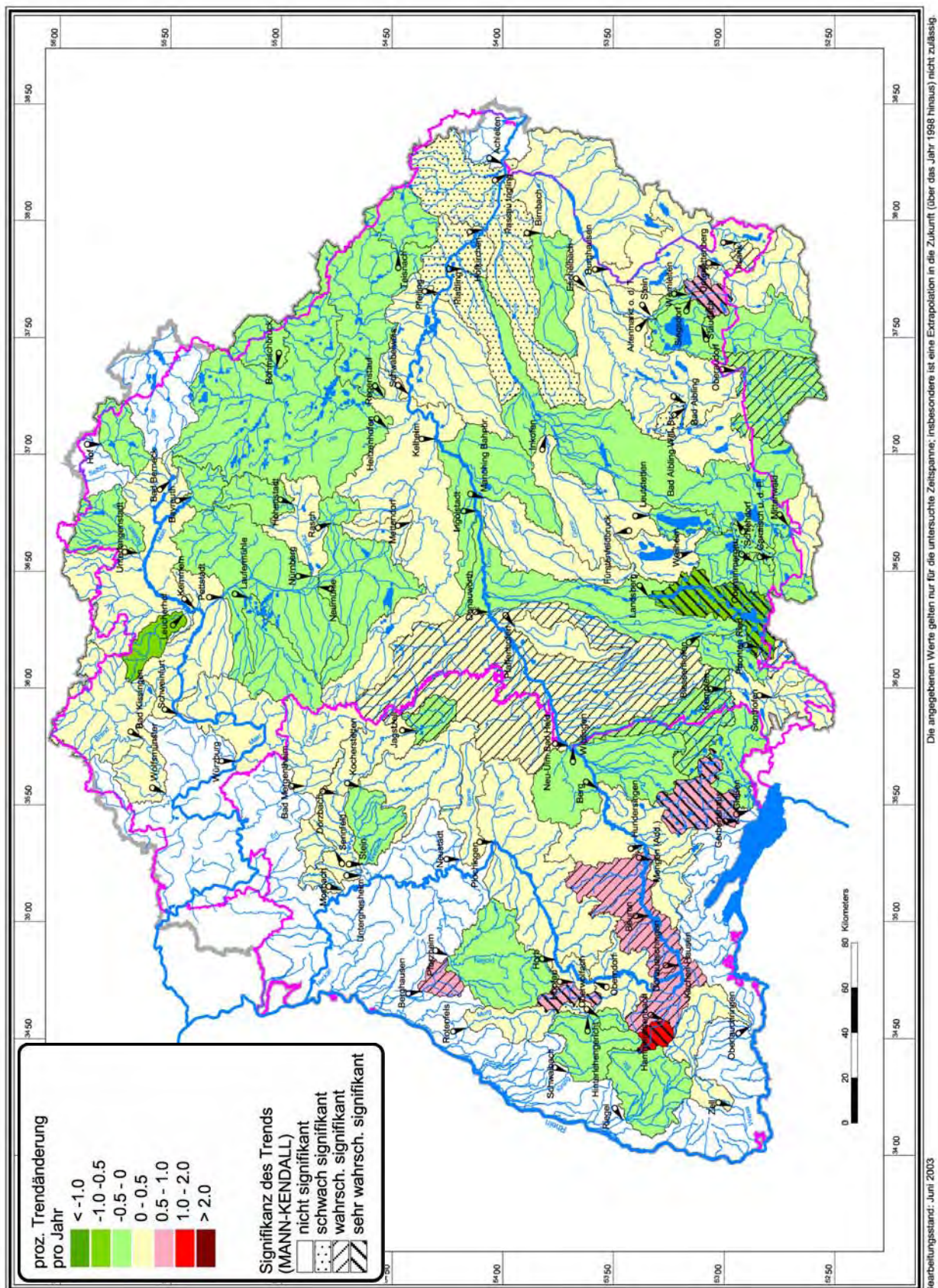


Abb. 6: Trend der Hochwasserabflüsse (bezogen auf MHQ), Winterhalbjahr.

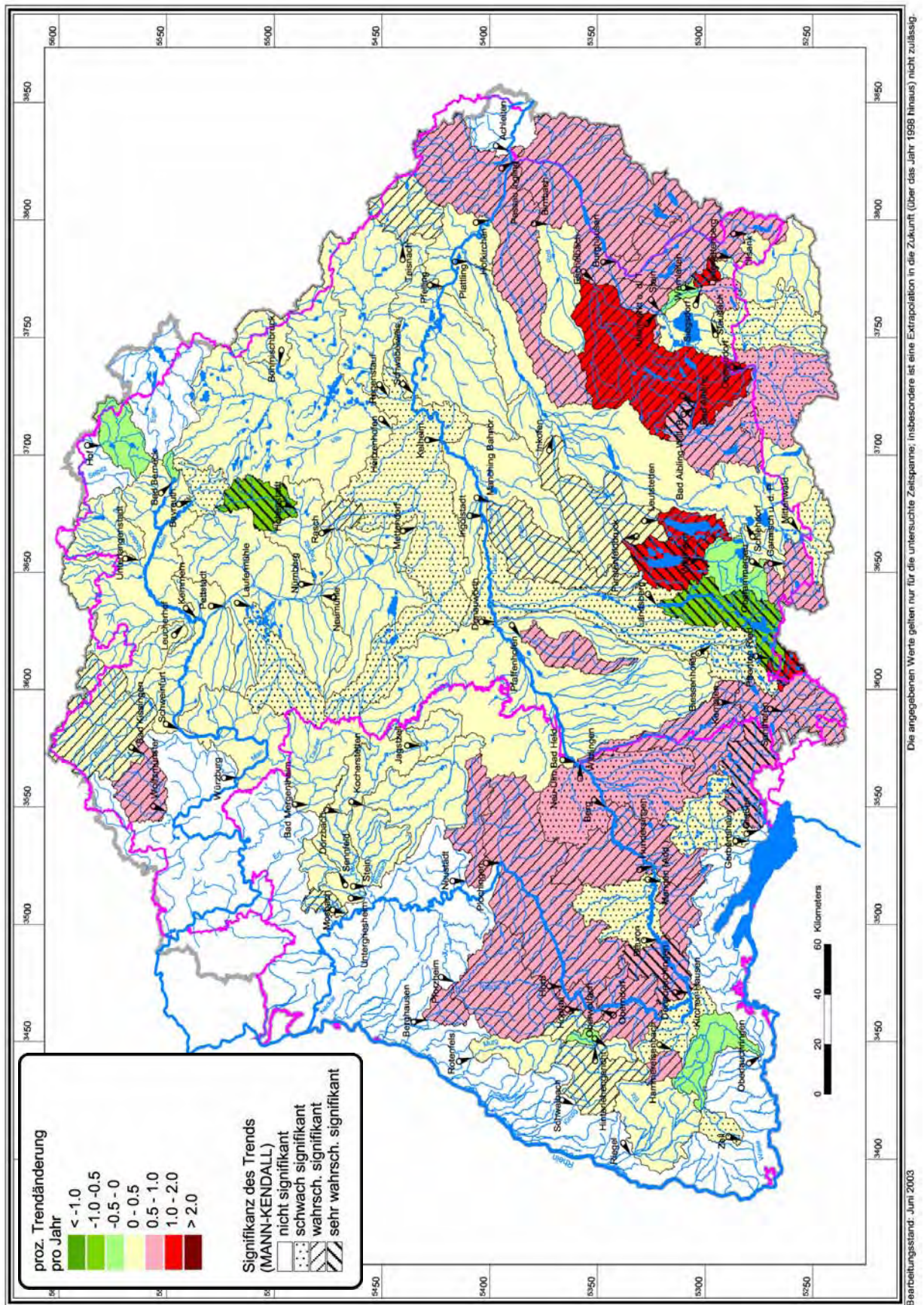


Abb. 7: Trend der Hochwasserhäufigkeiten, Winterhalbjahr.



4.3 Analyse des Jahresgangs

Analog zu den vorliegenden Untersuchungen zum Jahresgang der jährlichen monatlichen Höchstabflüsse wurde in der Ergänzungsuntersuchung für die 90 Pegel auch der Jahresgang der halbjährlichen monatlichen Höchstabflüsse für die Kollektive „gesamte Zeitreihen“ und „Zeitreihen ab 1932“ untersucht. Die jeweiligen kompletten Zeitreihen wurden dabei auf Grund der „Bruchpunkt-Analyse“ in Teilzeitreihen vor und nach 1974 bzw. vor und nach 1964 aufgeteilt.

Die Untersuchungen wurden getrennt für die Zeitreihen des gesamten Jahres und der Halbjahre (Winter- und Sommerhalbjahr) durchgeführt.

Am Beispiel des Pegels Donauwörth/Donau ist erkennbar (Abb. 8), dass die monatlichen Mittelwerte nach 1974 deutlich höher sind als vor 1974; die Zunahmen sind im Winter stärker ausgeprägt als im Sommer.

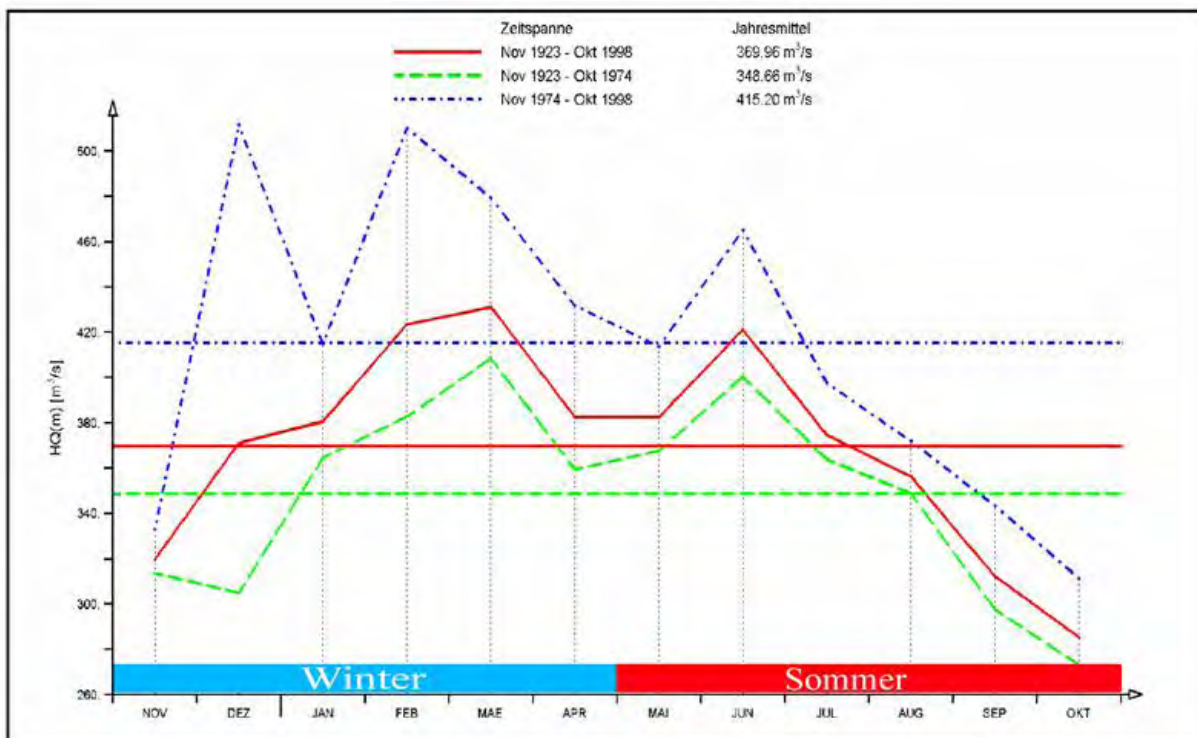


Abb. 8: Ergebnisdarstellung „Analyse des Jahresganges der monatlichen Höchstabflüsse“, Beispiel für Pegel Donauwörth/Donau.

Die Höhe der prozentualen Abweichungen der monatlichen Höchstabflüsse im Winterhalbjahr vom langjährigen MHQ-Wert sind für die Teilzeitreihen vor und nach 1974 in Abb. 9 dargestellt. Vor 1974 gibt es überwiegend Abnahmen, nach 1974 dagegen überwiegend Zunahmen. Vor 1974 liegen ca. 80% der Pegel in den Klassen „-10 bis -5%“ und „-5 bis 0%“, nach 1974 liegen ca. 60% der Pegel in den Klassen „5 bis 10%“ und „10 bis 15%“ des MHQ-Wertes.

Im Sommerhalbjahr ergeben sich analoge Ergebnisse; die Zu- bzw. Abnahmen sind jedoch kleiner, sie sind in den Klassen „-5 bis 0%“ bzw. „0 bis 5%“.

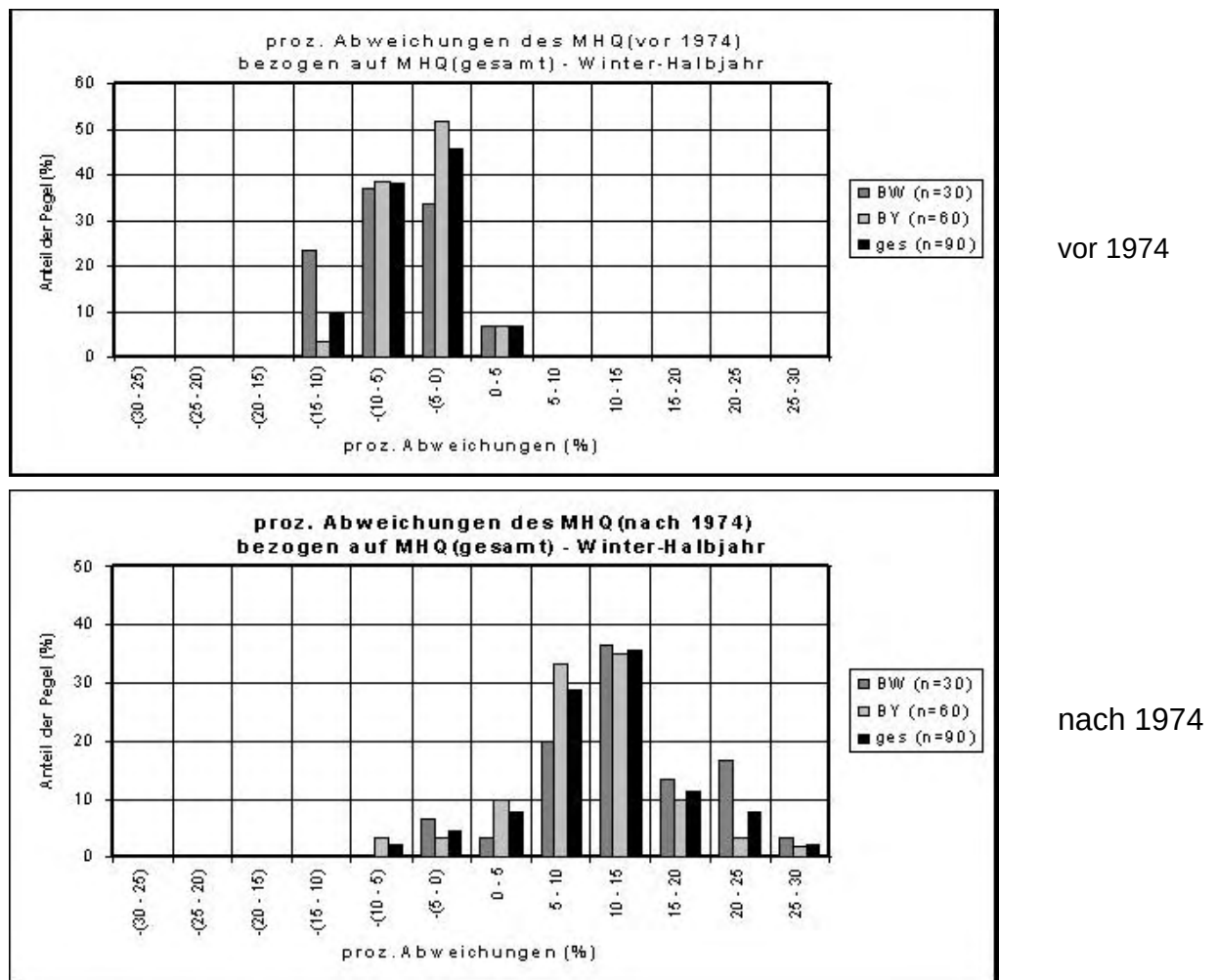


Abb. 9: Prozentuale Abweichungen der monatlichen Höchstabflüsse vom MHQ vor und nach 1974, Winterhalbjahr.

Die Untersuchungen für das Kollektiv mit der Zeitreihentrennung im Jahr 1964 ergab, dass sich die Ergebnisse nur wenig von denen für die Zeitreihenteilung im Jahr 1974 unterscheiden.

5. Ergebnisse zum Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse

Wie unter Kap.1 erwähnt, wurden neben den jährlichen Hochwasserabflüsse auch die jährlichen mittleren Abflüsse (Ergebnisse siehe KLIWA-2003) mit den gleichen statistischen Verfahren analysiert. Dafür liegen die Ergebnisse folgender Analysen vor:

- Analyse des Trends der jährlichen mittleren Abflüsse MQ(J)
- Analyse des Jahresgangs der monatlichen Mittelwerte MQ(m)

5.1 Analyse des Trends

Bei den Trenduntersuchungen der „Zeitreihen ab 1932“ zeigte es sich, dass ca. 80 % der Pegel nach dem Test nach MANN-KENDALL keinen signifikanten Trend aufweisen (Abb.



10); die jeweiligen Anteile der Pegel aus Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY) sind etwa gleich groß.

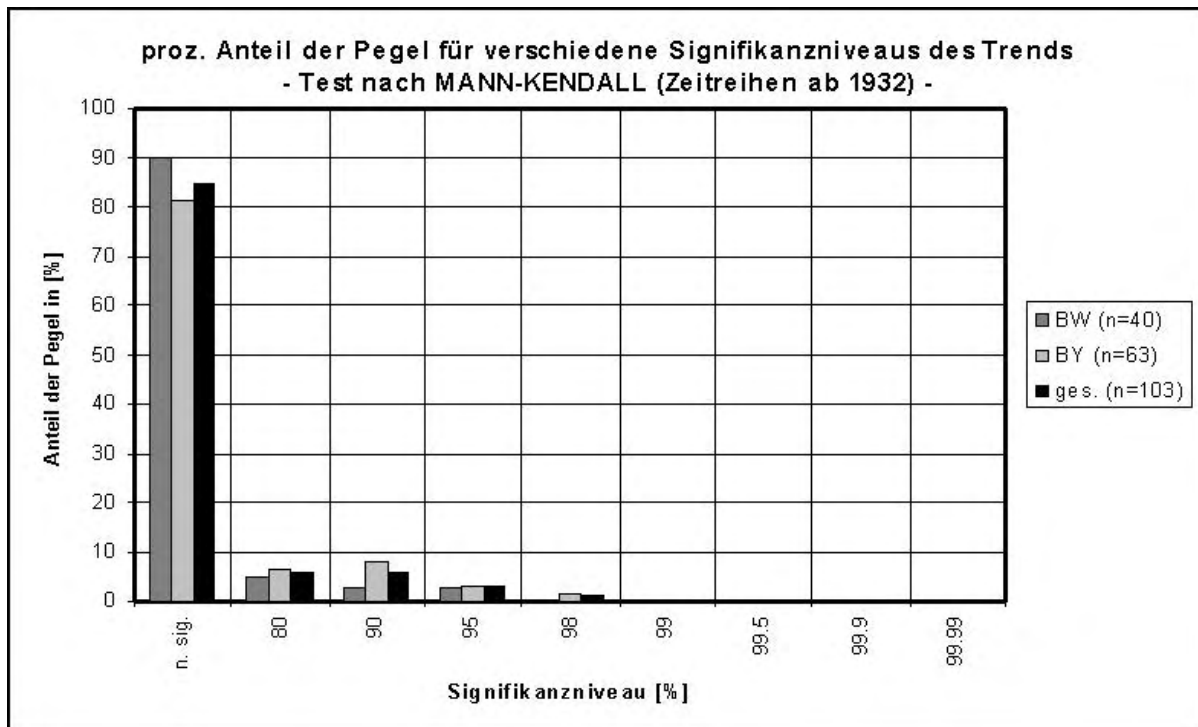


Abb. 10: Signifikanz des Trends der mittleren jährlichen Abflüsse („Zeitreihe ab 1932“).

Aus der flächenhaften Darstellung der Ergebnisse (Abb. 11) wird deutlich, dass die überwiegende Zahl der Einzugsgebiete (jedem Pegel ist das Einzugsgebiet farblich zugeordnet) nicht bzw. gering signifikante Abnahmen oder geringe Zunahmen aufweisen. Größere Zunahmen traten im Kollektiv „gesamte Zeitreihen“ nur an einem Pegel („wahrscheinlich signifikant“) auf; im Kollektiv „Zeitreihe ab 1932“ traten hochsignifikante Trends nicht auf.

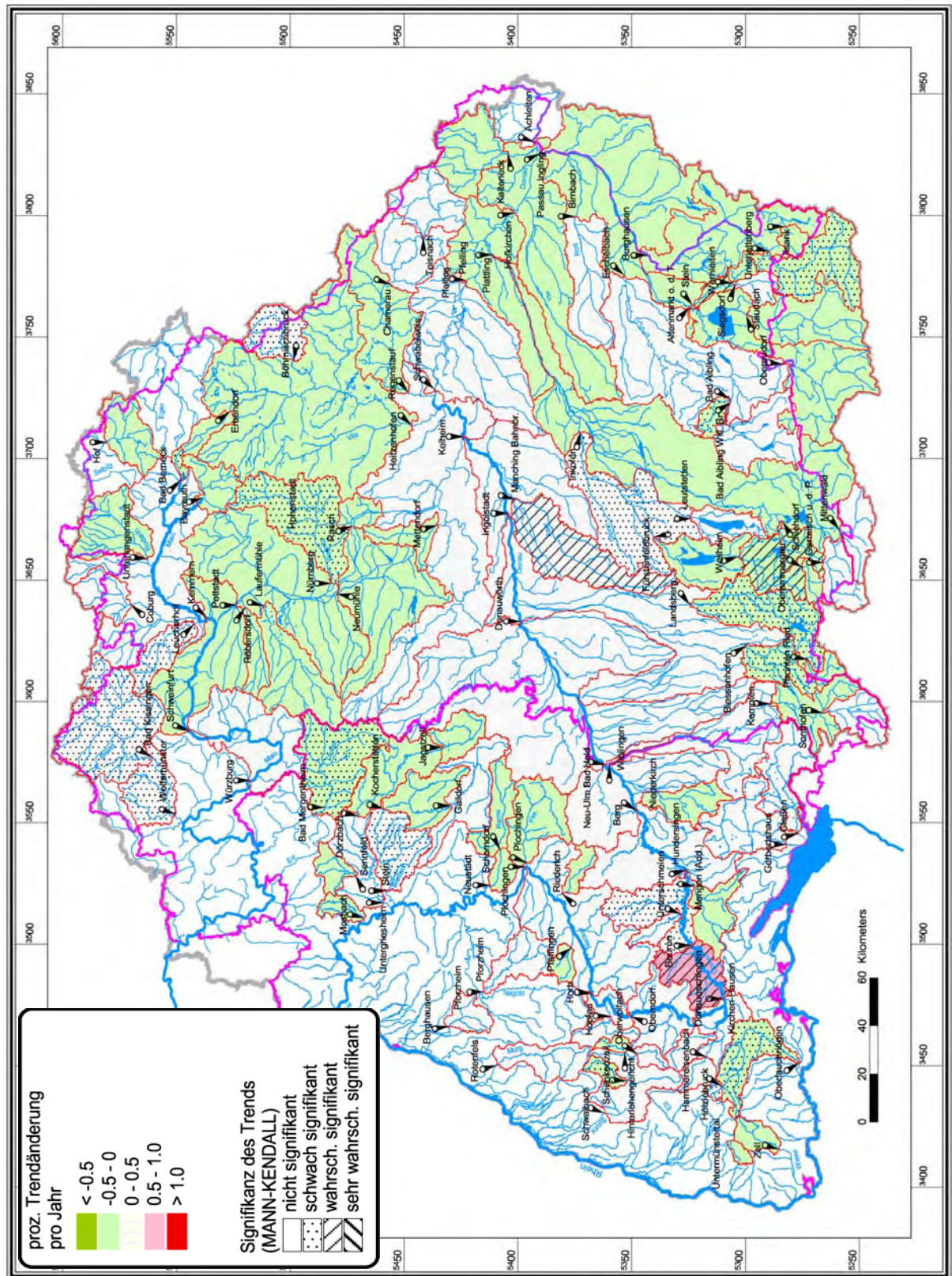


Abb. 11: Trend der jährlichen mittleren Abflüsse MQ(J), „gesamte Zeitreihe“.



5.2 Analyse des Jahresgangs

Analog zu den vorliegenden Untersuchungen zum Jahresgang der monatlichen Hochwasserabflüsse wurde für 144 Pegel auch der Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse untersucht. Die kompletten Zeitreihen wurden dabei auf Grund der „Bruchpunkt-Analysen“ in Teilzeitreihen vor und nach 1964 aufgeteilt.

Am Beispiel des Pegels Hundersingen/Donau ist erkennbar (Abb. 12), dass die monatlichen Mittelwerte nach 1964 deutlich höher sind als vor 1964; die Zunahmen sind im Winter stärker ausgeprägt als im Sommer.

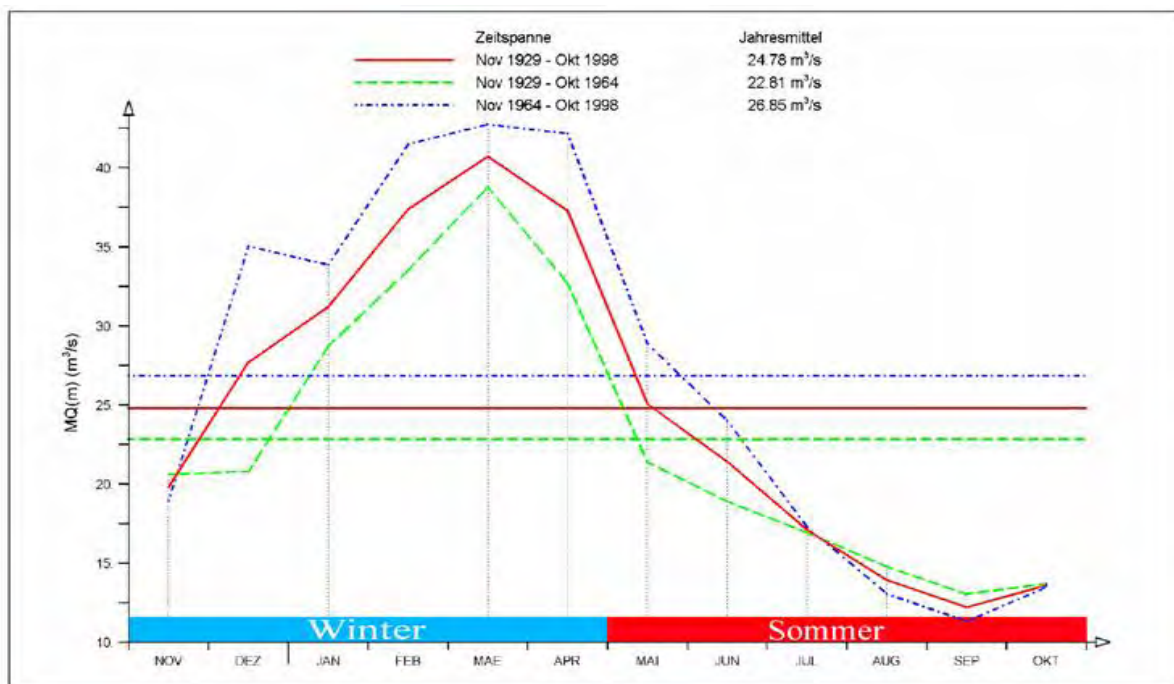


Abb. 12: Ergebnisdarstellung „Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse MQ(m³)“, Pegel Hundersingen/Donau.

Der Jahresgang zeigt, dass die Erhöhung der mittleren Abflüsse nicht gleichmäßig über das ganze Jahr vorhanden ist. Bestimmte Monate, insbesondere die Wintermonate mit den meist hohen Abflüssen, weisen nach 1964 auf einen Anstieg hin, während die übrigen Monate nahezu unverändert sind. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Beurteilung des Langzeitverhaltens auch die Veränderung des innerjährlichen Verhaltens von Bedeutung ist.

Die Höhe der prozentualen Abweichungen der mittleren monatlichen Abflüsse vom langjährigen MQ-Wert der Gesamtreihe ist für die Teilzeitreihen vor und nach 1964 in Abb. 13 dargestellt. Vor 1964 gibt es überwiegend Abnahmen, nach 1974 dagegen überwiegend Zunahmen. Vor 1964 liegen ca. 70% der Pegel in den Klassen „-10 bis -5%“ und „-5 bis 0%“, nach 1974 liegen ca. 80% der Pegel in den Klassen „0 bis 5%“ und „5 bis 10%“ des langjährigen MQ-Wertes.

Die mittleren monatlichen Abflüsse weisen in der überwiegenden Zahl der Pegel eine Erhöhung nach 1964 auf. Die mittleren Abflüsse und damit die Abfluss-Summen während der Monate Dezember bis Juni eines Abflussjahres sind ab 1964 höher als in der Zeit davor. Die

Ursachen dafür sind vermutlich die, vor allem seit den 70er Jahren, vergleichsweise höheren Niederschläge.

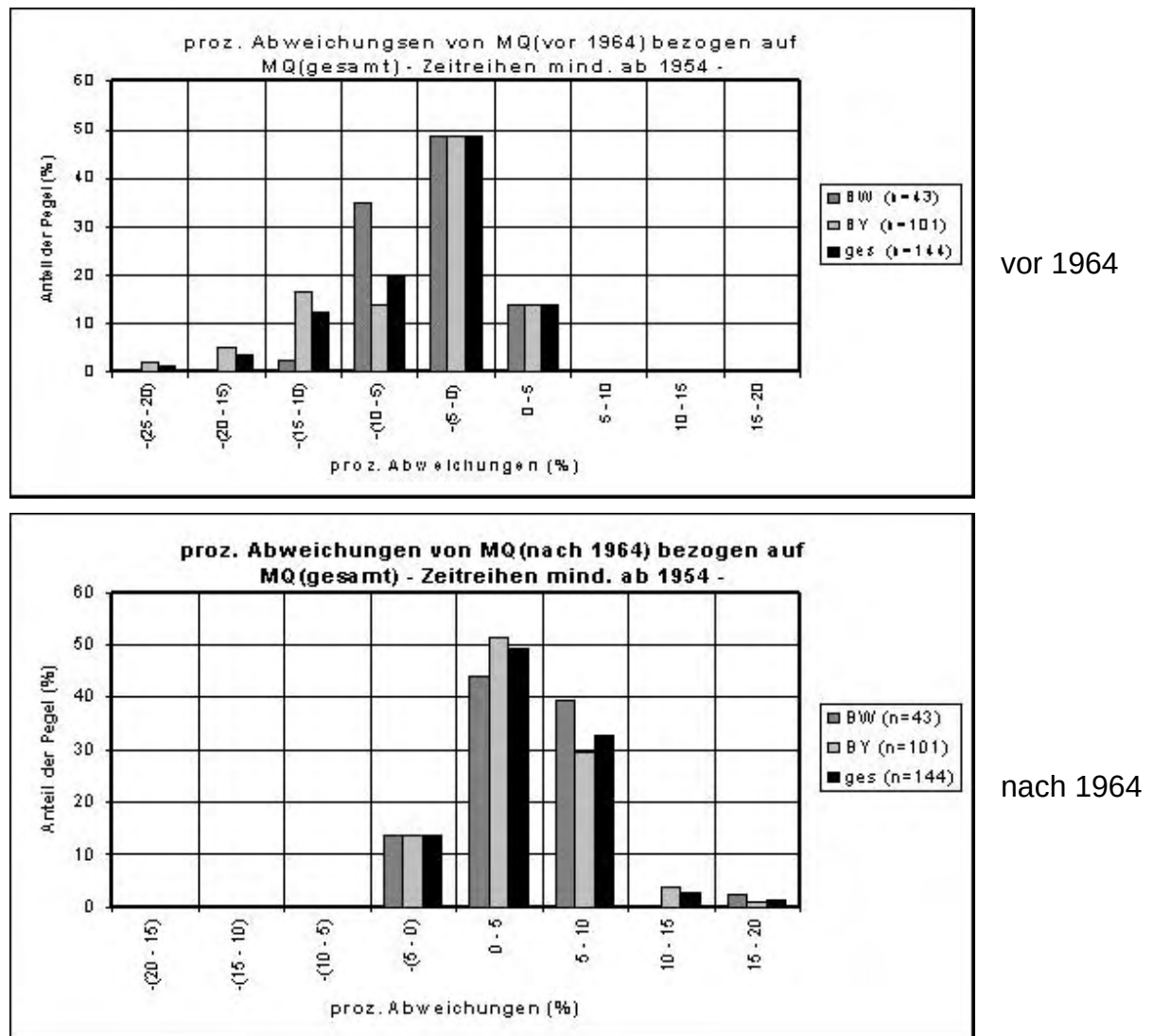


Abb. 13: Prozentuale Abweichungen der mittleren monatlichen Abflüsse vom MQ vor und nach 1964, „gesamte Zeitreihe“.

6. Zusammenfassung

In Ergänzung zu den Untersuchungen des Langzeitverhaltens der jährlichen Hochwasserabflüsse und der jährlichen mittleren Abflüsse wurden noch das Langzeitverhalten der halbjährlichen Hochwasserabflüsse und deren Häufigkeit untersucht. Dies erschien notwendig, um insbesondere das Verhalten im Winterhalbjahr, in dem die Starkniederschläge in den letzten Jahrzehnten zugenommen haben, näher zu analysieren.

Die Analyse des Langzeitverhaltens der Hochwasserabflüsse und der mittleren Abflüsse erbrachte folgende Ergebnisse:

- Die überwiegende Zahl der untersuchten Pegel weist bei der Betrachtung der gesamten Zeitreihen keinen signifikanten Trend für eine Zunahme der Hochwasserabflüsse und der mittleren Abflüsse auf. Bei der Betrachtung nur der letzten 30 bis 40 Jahre weisen die meisten Pegel jedoch Zunahmen auf.



- Der Jahresgang der monatlichen Abflüsse hat sich bei den meisten Pegeln geändert. Der mittlere Hochwasserabfluss und der mittlere Abfluss ist in der Zeit nach 1974 bzw. 1964 höher als in den früheren Jahren.
- Die Häufigkeit der Hochwasser hat sich verändert. Insbesondere in den südlichen Flussgebieten von Baden-Württemberg und vereinzelt in Bayern hat die Häufigkeit der Winterhochwasser seit den 70er Jahren zugenommen; hauptsächlich sind dies jedoch kleinere Hochwasser. Im Sommerhalbjahr treten Zunahmen hauptsächlich in Baden-Württemberg auf; in Bayern sind überwiegend Abnahmen feststellbar.

Generell lässt sich auf Grund der durchgeführten Untersuchungen ableiten, dass eine signifikante, flächendeckende Veränderung im Langzeitverhalten der Höhe der Hochwasserabflüsse und der mittleren Abflüsse bisher nicht eingetreten ist. Auffällig sind jedoch die Änderungen im Jahresgang und die Zunahme der Häufigkeit der Hochwasser im Winterhalbjahr in Teilen Baden-Württembergs.

7. Literatur

KLIWA (2001): Fachvorträge beim KLIWA-Symposium am 29. und 30.11.2000 in Karlsruhe, S. 122-139, KLIWA-Heft 1.

KLIWA (2002): Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Heft 2.

KLIWA (2003): Langzeitverhalten der mittleren Abflüsse in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Heft 3.

Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland

Hella Bartels

Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie, Offenbach

1. Einführung

Das Klimasystem der Erde hat sich seit der vorindustriellen Zeit sowohl auf globaler wie auch auf regionaler Ebene verändert. Durch den Anstieg der atmosphärischen Konzentration von Treibhausgasen und Aerosolen sind einige dieser Veränderungen auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen. Während der Strahlungsantrieb aus anthropogenen Treibhausgasen in der Regel positiv ist, ist der aus der direkten Wirkung der Aerosole negativ – aber kleiner. Der negative Antrieb aus der indirekten Wirkung der Aerosole auf Wolken könnte dagegen groß sein, ist aber derzeit noch nicht quantifizierbar. Hinzu kommen natürliche Faktoren, wie Vulkanausbrüche, Veränderungen in der solaren Einstrahlung und Landnutzungsänderungen. Eine gute Übereinstimmung zwischen Modellsimulationen und Beobachtungen kann daher nur erzielt werden, wenn alle diese Einflussgrößen (anthropogen und natürlich) berücksichtigt werden.

Die wichtigsten Ergebnisse aus den KLIWA-Untersuchungen zum Langzeitverhalten von hydrometeorologischen und hydrologischen Größen in Süddeutschland sind in den Beiträgen dieses Heftes von Günther und Straub vorgestellt worden. In Übereinstimmung mit den globalen Beobachtungen hat die mittlere Lufttemperatur vor allem in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts und im hydrologischen Winterhalbjahr (Klämt, 2004) zugenommen. Verbunden damit ist ein Rückgang der Schneedeckendauer in tiefen und mittleren Höhenlagen (Günther & Matthäus, 2004) sowie eine regionsspezifische Zunahme der winterlichen Starkniederschläge (Bartels & Dietzer, 2005) in Höhe und Dauer. Korrespondierend ist die Häufigkeit kleinerer Hochwasser besonders im Winterhalbjahr gebietsweise angestiegen.

Verursacht werden diese Veränderungen durch eine Umstellung der Zirkulationsmuster etwa ab Mitte der 60er Jahre. Von besonderem Interesse für den Hochwasserschutz ist das bevorzugte Auftreten von Starkniederschlagsereignissen bei bestimmten Großwetterlagen bzw. Zirkulationsformen (Gerstengarbe et al., 1999), die in den Abbildungen 1a und 1b dargestellt sind. Es ist zu erkennen, dass das Auftreten der jeweils 50 größten Starkniederschlagsereignisse (partielle Serie) im Vergleich zur Gesamthäufigkeit der Zirkulationsform im zeitlichen Verlauf von 1931 bis 2000 in Süddeutschland während des hydrologischen Winterhalbjahrs sehr eng mit der zonalen Zirkulationsform – vor allem den zyklonalen Westlagen – verknüpft ist. Die zunehmende Kopplung beginnt in den 60er Jahren, erreicht ihr Maximum Mitte der 90er Jahre und pendelt sich daran anschließend auf einem höheren Niveau ein. Im hydrologischen Sommerhalbjahr dagegen ist ein Anstieg des bevorzugten Auftretens von Starkniederschlägen bei der meridionalen Zirkulationsform – vor allem bei den Großwetterlagen Trog über Westeuropa und Trog über Mitteleuropa – ab den 70er Jahren zu verzeichnen, der sich ebenfalls ab den 90er Jahren auf einem höheren Niveau einzuschwingen scheint. Diese Veränderungen der Zirkulationsformen spiegeln sich deutlich im Trendverhalten der winterlichen Starkniederschläge wider.

Auch wenn die regionalen Änderungen noch nicht mit sehr hoher statistischer Sicherheit der menschlich verursachten globalen Klimaveränderung zugeschrieben werden können, deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass sich das regionale Klima sehr wahrscheinlich auch in der Zukunft weiter verändern wird. Allerdings bestehen in der Bewertung und Beurteilung über das quantitative Ausmaß der zukünftigen regionalen Entwicklung des Wasserkreislaufs noch erhebliche Unsicherheiten.

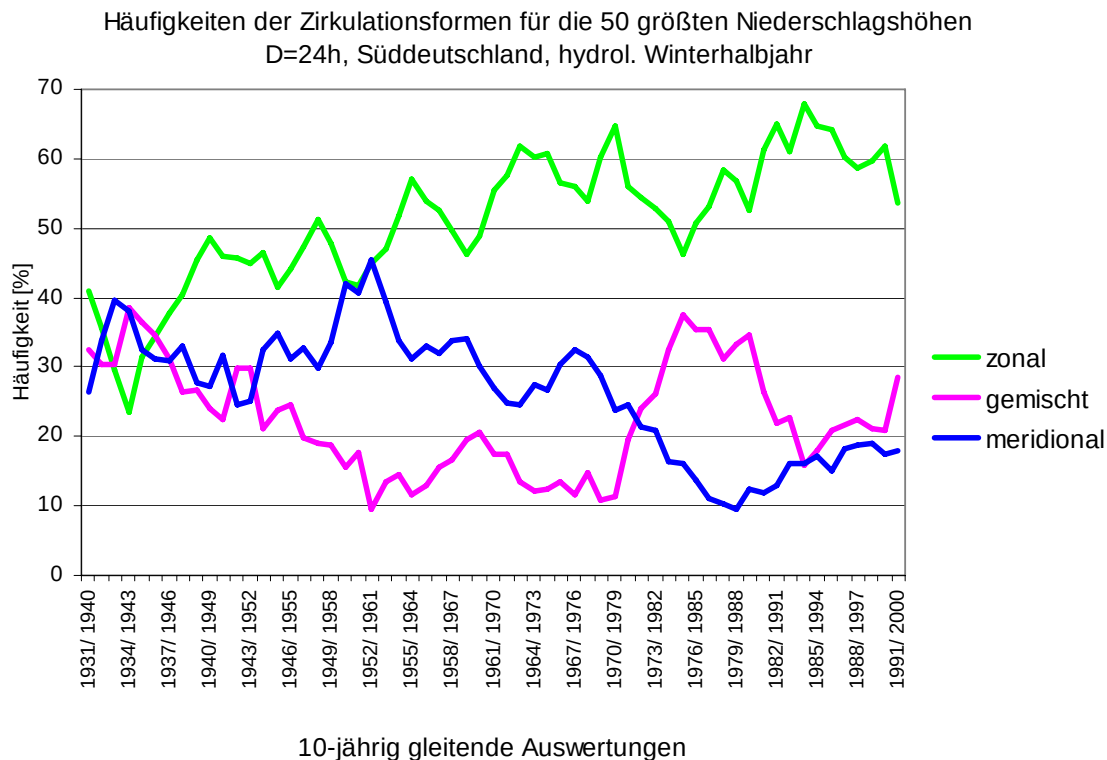


Abb 1a/b: Relative Häufigkeit von Zirkulationsformen bei Starkniederschlägen für das hydrologische Sommerhalbjahr (a = oben) und Winterhalbjahr (b = unten), Zeitraum 1931-2000

2. Vorgehensweise bei der Ermittlung von Klimaszenarien

2.1. Erkenntnisse aus dem 1. KLIWA-Symposium

Das 1. KLIWA-Symposium im November 2000 führte zum Ergebnis, dass die globalen Klimamodelle bei der Simulation des Wasserkreislaufs sehr große Unterschiede mit hohen Spannweiten (Schumann et al., 2001) zeigen und regionale Klimamodelle noch erhebliche Defizite (Schär et al., 2000, 2001) aufweisen. Zu beseitigen sind diese Schwächen sowohl bei den globalen als auch den regionalen Klimamodellen nur durch intensive Interaktionen zwischen beobachteten Daten sowie theoretischen und modellgestützten Ansätzen unter Berücksichtigung der atmosphärischen Wechselwirkungen. Einen großen Einfluss üben auch die Einschätzungen der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgase und Aerosole in Form von Emissionsszenarien aus (IPCC, 2001).

Um das vorrangige Ziel der Ableitung von Handlungsempfehlungen für eine zukunftsweisende Wasserbewirtschaftung – zunächst ausgerichtet auf den Hochwasserschutz - unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf soziale und wirtschaftliche Systeme zu erreichen, haben die KLIWA-Partner die folgenden Maßnahmen beschlossen:

- Ergänzung der Untersuchungen zum Langzeitverhalten hydrometeorologischer und hydrologischer Größen an Hand langer zurückliegender Zeitreihen mit besonderer Beachtung des Trendverhaltens der Lufttemperatur, des Starkniederschlags, der Schneedeckendauer sowie der Hochwasserereignisse.
- Eingrenzung des Prognosezeitraums für mögliche Klimaveränderungen auf einige Jahrzehnte, um möglichst gesicherte Aussagen zu erhalten.

- Neben dem Einsatz regionaler dynamischer Klimamodellierungen Hinzuziehung statistischer und statistisch-dynamischer Verfahren zur Ermittlung von Klimaszenarien auf der Basis von Mess- und Beobachtungszeitreihen hydrometeorologischer Größen.

2.2. Methodische Vorgehensweise

Durch die Langzeituntersuchungen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen hat sich der Erkenntnisstand über die vergangenen und derzeitigen Auswirkungen des Klimas auf den Wasserhaushalt von Flusseinzugsgebieten in Süddeutschland verbessert. Die gefundenen Veränderungen – insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte – lassen einen Rückschluss über mögliche zukünftige Klimaveränderungen zu. Darüber hinaus stellt die Ermittlung von Klimaszenarien einen zentralen Baustein des Vorhabens KLIWA und damit – trotz der vermuteten Unsicherheiten in den Ergebnissen – eine wichtige Grundlage der zu treffenden fachlichen Aussagen (auch aus politischer Sicht) und der abzuleitenden Empfehlungen für vorbeugende wasserwirtschaftliche Maßnahmen dar.

In einer Grundsatzstudie von Schär et al. (2000, 2001) wird deutlich gemacht, dass derzeit noch keine gesicherten regionsspezifischen Aussagen aus Klimaszenarien mit Hilfe regionaler Klimamodelle insbesondere im Zusammenhang mit dem Wasserkreislauf und dem Auftreten extremer Niederschlagsereignisse gemacht werden können.

Die in verschiedenen Workshops vorgestellten Methoden zur Entwicklung von Klimaszenarien haben auf Grund verschiedener Ursachen Unsicherheiten und weisen für alle Verfahren Vor- und Nachteile auf, so dass kein optimales Verfahren erkennbar ist. Die sowohl in den globalen als auch den regionalen Klimamodellen enthaltenen Schwachpunkte ergeben sich durch die

- unvollständigen bzw. fehlerhaften Anfangs- und Randbedingungen
- Beschränkung auf die Simulation von relevanten Prozessen
- Beschreibung von Prozessen durch Näherungslösungen (Parametrisierungen)
- Beschreibung eines Teils der Prozesse nur approximativ .

Gemeinsam mit den Modellierer-Gruppen wurde daher die folgende Vorgehensweise festgelegt:

1. Es ergibt sich zwangsläufig die Notwendigkeit zur Durchführung verschiedener Modellierungen, um auf diese Weise eine Bandbreite der möglichen zukünftigen Klimaveränderungen zu erhalten.
2. Um die Szenarienergebnisse miteinander vergleichen zu können, sind möglichst einheitliche Ausgangsbedingungen zu schaffen.
3. Die Festlegungen umfassen die Nutzung des globalen Klimamodells mit einem bestimmten Emissionsszenario, das die Eingangsdaten für regionale Anschlussverfahren liefern kann.
4. Die Verfahren sind an bereitzustellenden Datensätzen hydrometeorologischer Größen für die Bestimmung des Jetztzeit-Klimas zu verifizieren.
5. Die aus den Klimaszenarien erwarteten Ergebnisse müssen Zeitreihen (ca. 30 Jahre) aller hydrometeorologischen Größen liefern, um sie anschließend in vorhandene, kalibrierte Wasserhaushaltsmodelle verschiedener Flusseinzugsgebiete in Süddeutschland als Eingangsgrößen einzugeben.



6. Die jeweiligen Methoden der Zukunftsszenarien sind miteinander zu vergleichen und die Ergebnisse in Relation zum Erkenntnisstand des Langzeitverhaltens hydrometeorologischer Größen und zum Jetztzeit-Klima zu bewerten.

3. Klimaszenarien

3.1. Ausgangsbedingungen

Die beteiligten Modellierer-Gruppen sollten die folgenden Vorgaben einhalten:

- Alle regionalen Modelle und Verfahren setzen auf den Ergebnissen des gekoppelten globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI) auf.
- Es wird das Emissionsszenario B2 (SRES-Szenarien nach IPCC, 2001) verwendet. Das Emissionsszenario B2 beschreibt eine Welt, in der das Schwergewicht auf lokalen Lösungen hin zu wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit liegt. Unter Berücksichtigung einer eigenständigen Umweltpolitik bewegt sich die wirtschaftliche Entwicklung auf einem mittleren Niveau. Die CO₂-Konzentration wächst bis 2050 etwa auf das 1,4-fache an..
- Für den Zeitraum 1951 bis 2000 werden geprüfte und lückenlose Datensätze von rund 75 Klimastationen und 450 Niederschlagsstationen zur Verfügung gestellt. Sie umfassen die Größen Niederschlag, Lufttemperatur, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung oder Sonnenscheindauer und Windgeschwindigkeit.
- Die Güte der regionalen Simulationen wird an Hand der Mess- und Beobachtungsdaten von 1971 bis 2000 verifiziert. Dadurch werden die veränderten klimatischen Bedingungen der jüngsten Vergangenheit insbesondere hinsichtlich der Temperaturerhöhungen und der Zunahme der Niederschlagshöhen im hydrologischen Winterhalbjahr berücksichtigt. Im parallel durchzuführenden Kontrolllauf (Jacob 2003,2004; Enke, 2003) wird der Einfluss des globalen Klimamodells für die gleiche Zeitreihe sichtbar. Mit Hilfe dieses Kontrolllaufs werden gleichzeitig die Differenzen zum vorgesehenen Zukunftsszenariozeitraum bestimmbar, wodurch systematische Fehler des globalen Modells zum Teil ausgeglichen werden können.
- Für die Verifikation werden statistische Kennzahlen zu den Mittel- und Extremwerten, zur Schwellenwertüber- bzw. -unterschreitung sowie zum Andauerverhalten für hydrologische Halbjahre der o.a. hydrometeorologischen Größen festgeschrieben.
- Für den Vergleich der regionalen Klimaszenarien wird ein einheitlicher, in der näheren Zukunft liegender Zeithorizont von 2021 bis 2050 vorgegeben.
- Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen sind als Zeitreihen von Tageswerten der hydrometeorologischen Größen bereitzustellen. Ausnahme ist die dynamische Modellierung, die stündliche Auflösungen liefert.

3.2. Kurzbeschreibung der Modelle/Verfahren

Die ausgewählten Klimamodelle, statistischen und statistisch-dynamischen Verfahren unterscheiden sich primär durch die vom globalen Klimamodell benötigten Eingabedaten auf folgende Weise:

1. Das statistische Downscaling nach GERSTENGARBE et al. (2002) nutzt nur die vom ECHAM4/OPYC3 prognostizierte (relativ sichere) Temperaturverteilung und stellt mit Hilfe von Clusteranalysen einen Zusammenhang mit den Feldverteilungen der bishe-

- rigen hydrometeorologischen Beobachtungen und Messungen (1951 bis 2000) her. Datenbasis sind mehrfach überprüfte und homogenisierte Datensätze von 68 Klimastationen. Um eine Wahrscheinlichkeitsaussage zur Sicherheit des Eintretens der simulierten Klimaveränderungen zu treffen, werden mittels einer Monte-Carlo-Simulation 100 Simulationsläufe (Realisierungen) sowohl für das Istzeit-Klima als auch für das Zukunftsszenario durchgeführt.
2. Der Vorteil besteht darin, dass die systematischen Fehler des ECHAM4/OPYC3 auf ein Minimum reduziert sind und relativ geringe Abweichungen bei der Verifikation auftreten. Nachteilig wirkt sich aus, dass die Veränderungen von Wasserhaushaltsgrößen auf dem Klima der Vergangenheit basieren, so dass keine neuen Extrema und Änderungen im Andauerverhalten simuliert werden können; Veränderungen in den Zirkulationsmustern werden ebenfalls nur zum Teil berücksichtigt.
 3. Im statistisch-dynamischen Downscaling nach ENKE (2003) werden die vom ECHAM4-OPYC3 prognostizierten (weniger sicheren) Zirkulationsmuster bzw. Wetterlagen verwendet und über objektive Wetterlagenklassifikationen für Lufttemperatur (10 Klassen) und Niederschlag (8 Klassen) statistisch mit den bisherigen Beobachtungen/Messungen verknüpft. Als Datenbasis für Süddeutschland gehen die geprüften, lückenlosen Datensätze von 75 Klimastationen und 450 Niederschlagsstationen ein. Die Bestimmung der objektiven Wetterlagenklassifikation erfolgt über horizontale und vertikale Luftdruckdifferenzen sowie über die vorticity und relative Topographie verschiedener Höhenschichten. Zur Ableitung der Wetterlagenklassifikation für das Jetztzeit-Klima wird auf die dreidimensionalen Re-Analysen des NCAR (Nationales Zentrum für Atmosphärenforschung) zurückgegriffen. Durch verschiedene Regressionsanalysen werden für die regionalen Klimaszenarien der Zukunft die im Ist-Zustand ermittelten räumlichen und zeitlichen Temperatur- und Niederschlagsfelder mit den Wetterlagen aus dem globalen Klimamodell verknüpft und dessen Einfluss reduziert. Ergänzend werden 10 Simulationsläufe zur Absicherung der Eintrittswahrscheinlichkeit durchgeführt.
 4. Die berechneten Zeitreihen der zukünftigen Szenarien enthalten zusätzliche Extrema, veränderte Schwellenwertüberschreitungen und ein verändertes Andauerverhalten. Die Verifikation zeigt geringe Abweichungen. Von Nachteil ist, dass großräumige Zirkulationsveränderungen, wie z. B. die ausgeprägte Zunahme der Westwetterlagen im ECHAM4/OPYC3, trotz der verschiedenen Anpassungsverfahren sich auch im regionalen scale auswirken.
 5. Im dynamischen regionalen Klimamodell nach JACOB (2003, 2004) werden alle vom ECHAM4/OPYC3 prognostizierten und mit Unsicherheiten verbundenen Größen als Antrieb für das doppelt genestete regionale Klimamodell REMO (1/6 Grad) eingesetzt. Das dreidimensionale hydrostatische Klimamodell ist aus dem Europa-Modell des DWD hervorgegangen. REMO wird mit der ECHAM4-Physik gerechnet, da diese auf Klimasimulationen abgestimmt ist. Die Validierung von REMO für das Jetztzeit-Klima basiert auf den dreidimensionalen Re-Analysen des EZMW (Europäisches Zentrum für Mittelfristvorhersage). Trotz der Anpassungen können insbesondere bei der Niederschlagssimulation größere Abweichungen auftreten. Für die Überprüfung der Startbedingungen im Ist-Zustand wird ein Kontrolllauf für REMO mit den Randbedingungen des globalen Klimamodells durchgeführt. Für die Verifikation stehen die geprüften, lückenlosen Datensätze der Klima- und Niederschlagsstationen sowie die korrigierten Gebietsniederschläge nach BONIE (Reich, 2005) zur Verfügung.
 6. Die dynamische regionale Klimamodellierung ist das prinzipiell am besten geeignete Instrument zur Ermittlung zukünftigen Klimas, wobei zusätzlich eine höhere zeitliche Auflösung vorteilhaft ist. Die bisherigen Ergebnisse sind jedoch noch unbefriedigend, weil sowohl die Güte von REMO als auch die des globalen Modells noch eine Reihe ungelöster Fragen offen lässt, so dass weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich sind; z.B. bei der verbesserten Simulation des Wasserkreislaufs sowie dessen Jahresgang und interannuelle Variabilität in der Atmosphäre (Wasserdampf, Wolkenwasser) und



am Boden (Schnee, Bodenwasser, Grundwasser, Abfluss). Wegen des hohen Rechenaufwands kann zudem nur eine einzige Simulation bereitgestellt werden.

3.3. Auswertungen

Um den Unterschieden in den Ausgabedatensätzen der Szenarienberechnungen sowie den darin enthaltenen räumlichen und zeitlichen Unsicherheiten Rechnung zu tragen empfiehlt sich zunächst eine einfache Mittelung in Zeit und Raum. Es bietet sich daher eine pragmatische Vorgehensweise mit Einsatz von robuste Verfahren zur Regionalisierung der Ergebnisse und zum Vergleich miteinander an.

Die Ergebnisse des statistischen und statistisch-dynamischen Modells (GERSTENGARBE und ENKE) liegen als Punktwerte vor, die Ergebnisse des dynamischen Klimamodells (JACOB) hingegen als Flächenmittel mit einer Auflösung von $1/6$ Grad (ca. 18×18 -km-Raster). Auf Grund der Erfahrungen aus dem Langzeitverhalten der Wasserhaushaltsgrößen werden in einem ersten Schritt nur die hydrologischen Halbjahre betrachtet und die dort definierten 33 Untersuchungsgebiete in Süddeutschland in neun sog. KLIWA-Regionen mit Flächengrößen von rund 10.000 km^2 zusammengefasst. Die räumliche Verteilung der Punktinformationen aus Klimastationen ebenso wie die Rasterfeldverteilung sind für eine solche regionsspezifische Auswertung zum größten Teil ausreichend dicht. Mit nur zwei Klimastationen ist allerdings die Region „Westalpen“ unterrepräsentiert.

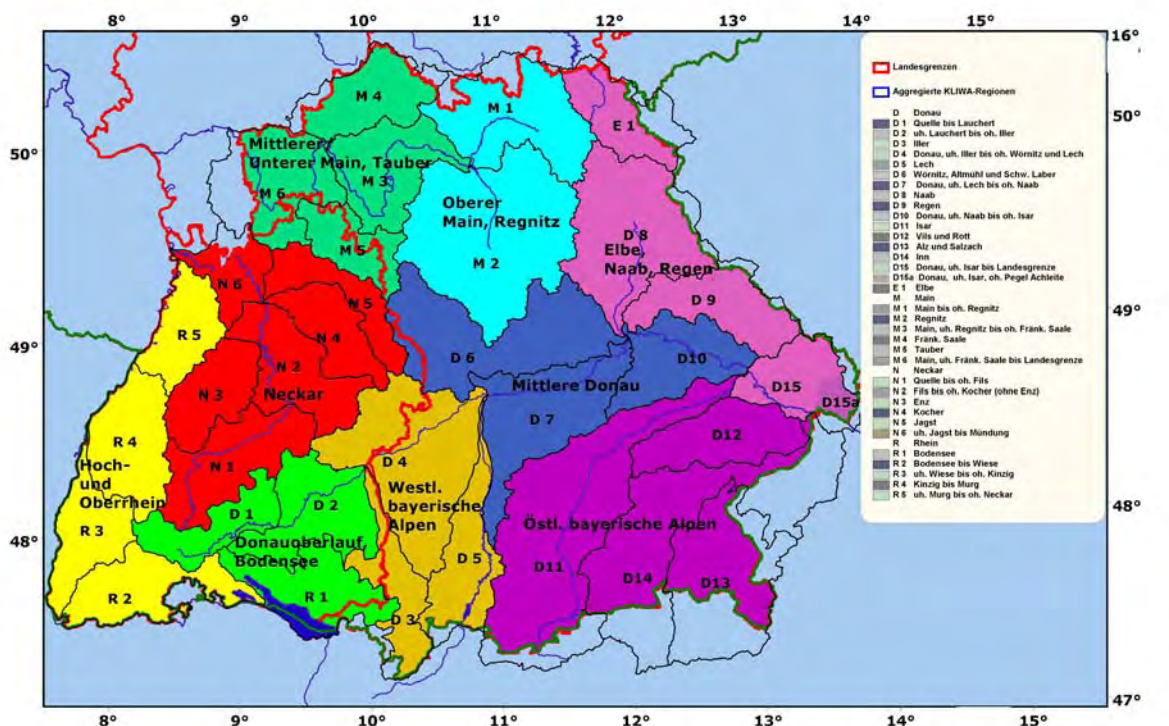


Abb. 2: Neun zusammengefasste KLIWA-Regionen in Süddeutschland (rund 106.300 km^2)

In Abbildung 2 sind die neun aggregierten KLIWA-Regionen der Teileinzugsgebiete von Rhein und Donau eingetragen und farblich gekennzeichnet. Sie können den Stromgebieten Rhein (Hoch- + Oberrhein = Rhein, Neckar, Oberer Main + Regnitz = Oberer Main, Mittlerer + Unterer Main + Tauber = Unterer Main) und Donau (Donauoberlauf + Bodensee = Donau und Bodensee, Westl. bayerische Alpen = Westalpen, Östl. bayerische Alpen = Ostalpen,

Mittlere Donau sowie Elbe + Naab + Regen = Bayerisches Mittelgebirge) – jeweils bis zu den Landesgrenzen von Baden-Württemberg und Bayern – zugeordnet werden.

Der Zeitraum 1971 bis 2000 wird als Ist-Zustand/Jetztzeit-Klima und der Zeitraum 2021 bis 2050 als Zukunftsszenario definiert. Die Auswertungen konzentrieren sich dabei auf die hydrologisch als besonders wichtig eingestuften Größen der mittleren Tagestemperatur und der Niederschlagshöhe. Grundbedingung ist, dass so viel Gemeinsamkeiten der Modellierer wie möglich genutzt werden sollen.

Die von den drei Modellierer-Gruppen zur Verfügung gestellten Datensätze von Zeitreihen lassen die folgenden vergleichenden Auswertungen zu:

- Simulation des Ist-Zustands zur Verifikation (außer GERSTENGARBE)
- Differenzen zwischen simuliertem Ist-Zustand und homogenisierten Messdaten
- Simulation des Ist-Zustands zur Kontrolle des globalen Modells für verschiedene räumliche Auflösungen T42 (ca. 250 km) und T106 (ca. 100 km) (nur JACOB)
- Zukunftsszenario
- Differenzen zwischen Zukunftsszenario und homogenisierten Messdaten
- Differenzen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand zur Verifikation (außer GERSTENGARBE)
- Differenzen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand zur Kontrolle des globalen Modells (nur JACOB)

4. Ergebnisse des Szenarienvergleichs

Die im folgenden vorgestellten Ergebnisse beschränken sich auf Süddeutschland, die neun KLIWA-Regionen und die hydrologischen Halbjahre.

Die Güte der regionalen Szenarienrechnungen für das Jetztzeit-Klima wird durch die Betrachtung der Differenzen zwischen dem simulierten Ist-Zustand (Verifikations- bzw. Validierungslauf) und den homogenisierten Messdaten 1971 bis 2000 von Tagesmittelwerten der Lufttemperatur und der mittleren Niederschlagshöhe sowie den Untersuchungsergebnissen der Modellierer (GERSTENGARBE) nachgewiesen. Der Einfluss des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 kann nur über die Kontrollläufe mit T42 und T106 von JACOB eingeschätzt werden. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, ist dieser Einfluss beim Einsatz der Leitgröße Temperatur (GERSTENGARBE) mit kleinen Fehlern, beim Einsatz der Leitgröße Wetterlagenklassifikation (ENKE) mit mittleren Fehlern und beim Einsatz von REMO (JACOB) mit allen Fehlern aus dem globalen Modell verbunden. Um einigermaßen realistische Einschätzungen des Vergleichs für die zukünftige Entwicklung (2021 bis 2050) vornehmen zu können, ist es daher notwendig, nicht die absoluten Ergebnisse der Zukunftsszenarien zu untersuchen, sondern – soweit vorhanden – die Differenzen zwischen Zukunftsszenario und simuliertem Ist-Zustand (Verifikationslauf bzw. Kontrolllauf) zu bewerten.

4.1. Güte der regionalen Szenarienrechnungen

GERSTENGARBE gibt eine befriedigende Anpassungsgüte des simulierten Ist-Zustands von weniger als 10% für alle Wasserhaushaltsgrößen an. Voraussetzung ist, dass die Datensätze der zugrundeliegenden Klimastationen sehr aufwändig überprüft und homogenisiert sind.

Die Differenzen zwischen simuliertem Ist-Zustand und den homogenisierten Messdaten der mittleren halbjährlichen Lufttemperatur und der mittleren halbjährlichen Niederschlagshöhe 1971 bis 2000 liefern für die KLIWA-Regionen bei ENKE in beiden Halbjahren eine gute Anpassung.

Bei JACOB ergibt sich für das hydrologische Sommerhalbjahr durch den Validierungslauf gegenüber den homogenisierten Messdaten eine Überschätzung von mehr als +2K/Halbjahr



für Süddeutschland. Auffällig ist die besonders hohe Abweichung in der Region „Ostalpen“ von mehr als +4K/Halbjahr. Die Anpassungsgüte der Lufttemperatur ist im hydrologischen Winterhalbjahr zufrieden stellend. Der simulierte Ist-Zustand der Validierungsläufe der mittleren Niederschlagshöhen stimmt zwar für die Gesamtfläche von Süddeutschland einigermaßen überein. In den einzelnen Regionen treten allerdings Über- und Unterschätzungen von – 15% bis +30% auf, die ohne weitergehende Untersuchungen nicht erklärbar sind.

4.2. Zukunftsszenarien

Wegen der geringen Abweichungen zwischen simuliertem Ist-Zustand und den homogenisierten Messdaten werden einheitlich bei GERSTENGARBE und ENKE auch die Änderungen in den Zukunftsszenarien den Messdaten gegenübergestellt. Bei JACOB wird der Kontrolllauf als Bezugsbasis zugrundegelegt.

Der im Langzeitverhalten der mittleren Lufttemperatur im hydrologischen Sommerhalbjahr gefundene schwache Trend verstärkt sich im Zukunftsszenario mit einer Bandbreite der Modellierungen von +1,2 K bis +1,7 K/Halbjahr in Süddeutschland.

Die im hydrologischen Sommerhalbjahr für das Zukunftsszenario berechneten Niederschlagsverteilungen weisen übereinstimmend bei allen Modellierer-Gruppen ähnliche Ergebnisse mit einer schwachen Zunahme auf. Im Langzeitverhalten ist bei den sommerlichen Starkniederschlägen auf Grund der hohen räumlichen Variabilität kein Trend festzustellen. Es ist aber nicht auszuschließen, dass dennoch künftig eine Intensivierung der Kurzzeitniederschläge auftreten kann. Die für das Zukunftsszenario berechneten sommerlichen Niederschlagsänderungen sind in den Abbildungen 3a bis 3c für die neun KLIWA-Regionen eingetragen.

Der im Langzeitverhalten gefundene Trend des hydrologischen Winterhalbjahrs setzt sich bei mittleren Zunahmen der Lufttemperatur zwischen +1,0 K und +2,0 K/Halbjahr über Süddeutschland entsprechend den Modellrechnungen in der Zukunft fort.

Die im Wasserkreislauf bestimmende Größe ist aber der Niederschlag und dort – wie die Langzeituntersuchungen der Starkniederschläge zeigen – das hydrologische Winterhalbjahr. Daher werden die Modellergebnisse der Niederschlagsänderungen für das Zukunftsszenario eingehender betrachtet. Sie sind den Abbildungen 4a bis 4d zu entnehmen.

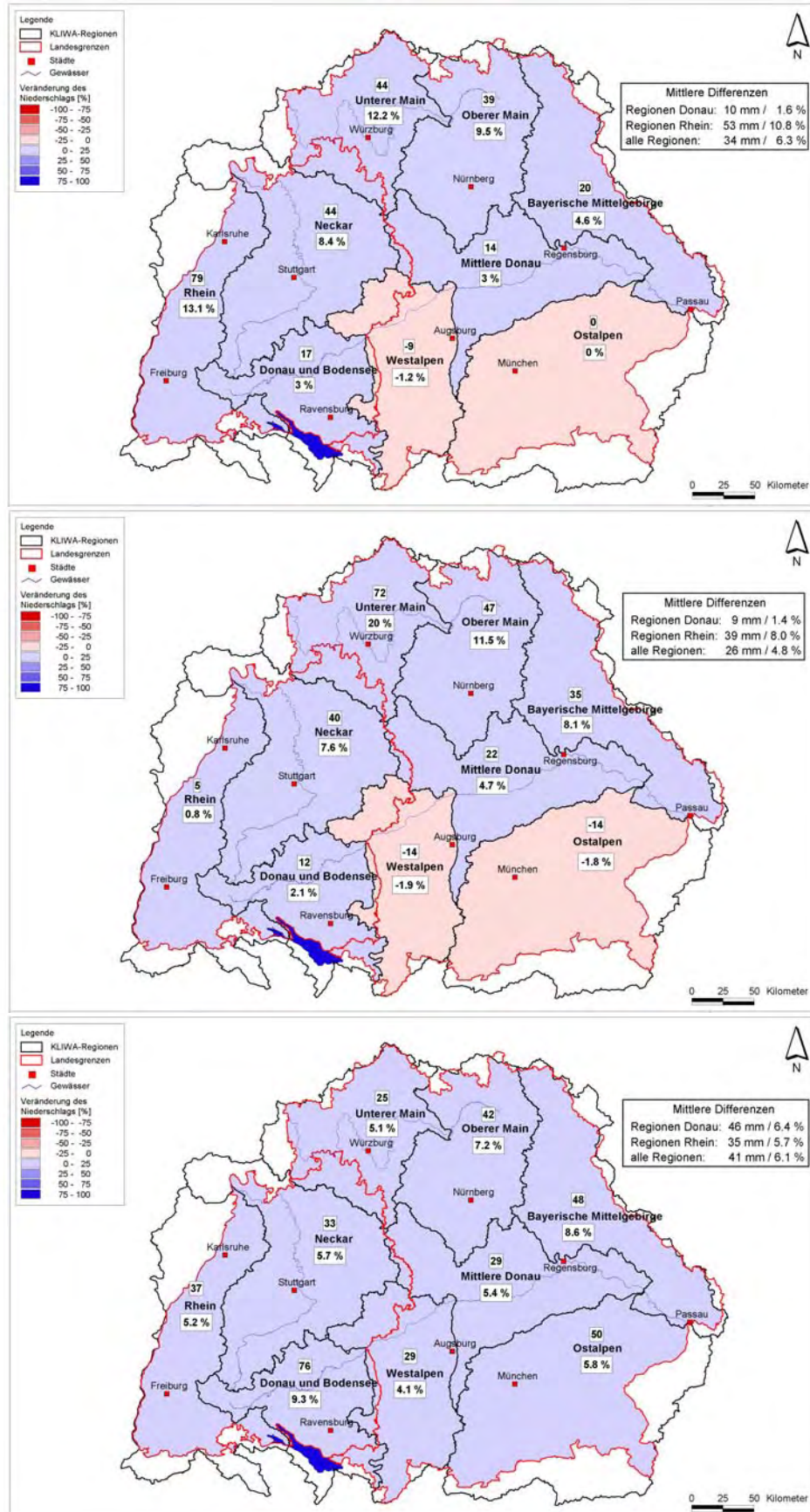


Abb. 3a-3c: Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation Ist-Zustand 1971-2000/1970-1999. Mittlerer Niederschlag - hydrol.. Sommerhalbjahr (Gerstengarbe, Enke, Jacob)

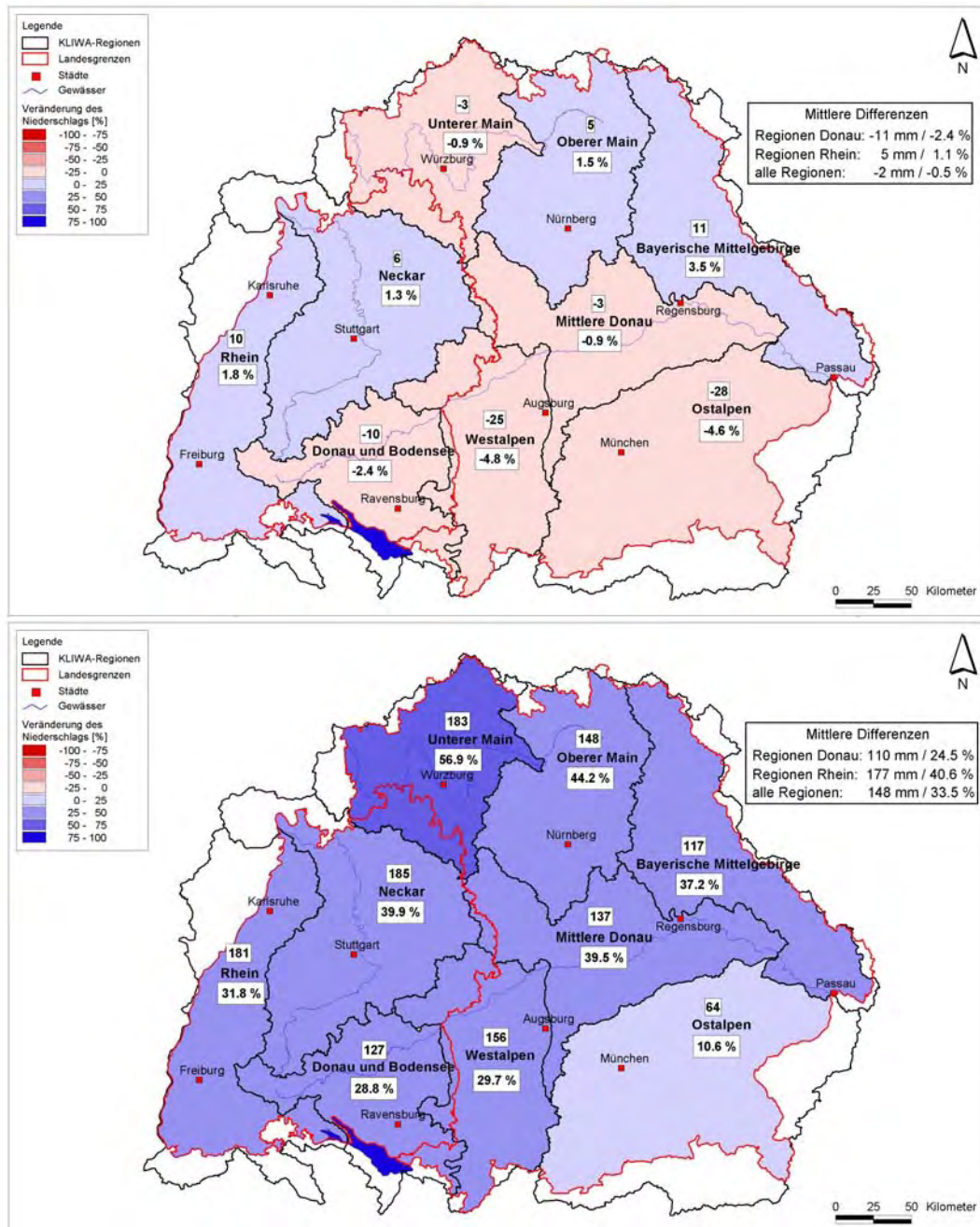


Abb. 4a-4b: Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation Ist-Zustand 1971-2000/1970-1999, Mittlerer Niederschlag – hydrol. Winterhalbjahr (Gerstengarbe, Enke)

Die untere Grenze der Bandbreite mit positiven und negativen minimalen Niederschlagsänderungen liefert GERSTENGARBE, die obere Grenze mit maximalen Niederschlagszunahmen von 34% für Süddeutschland erreicht ENKE. Hier scheint sich der Einfluss der überschätzten Häufigkeit von Westwetterlagen im globalen Klimamodell noch auszuwirken. Die Differenz zwischen dem Zukunftsszenario und den beiden Kontrollläufen von JACOB zeigen ebenfalls eine Bandbreite, und zwar zwischen 0% (Abb. 4c für T42) und +22% (Abb. 4d für T106) für Süddeutschland.

Da sich die oben aufgeführten zukünftig erwarteten Temperaturzunahmen mit den geringen Niederschlagserhöhungen im hydrologischen Winterhalbjahr nicht mit dem in Abbildung 1 dargestellten Trendverhalten der zonalen Zirkulationsform (zyklonale Westwetterlagen) und

unter Berücksichtigung der Erhaltungsneigung von atmosphärischen Vorgängen in Übereinstimmung bringen lassen, wird nachfolgend versucht, eine Begründung für die Diskrepanz der Ergebnisse der verschiedenen Kontrollläufe von JACOB zu finden. In Abbildung 5a/b sind daher alle verfügbaren gemessenen und berechneten Zeitreihen für das hydrologische Winterhalbjahr von Lufttemperatur und Niederschlag zusammengestellt.

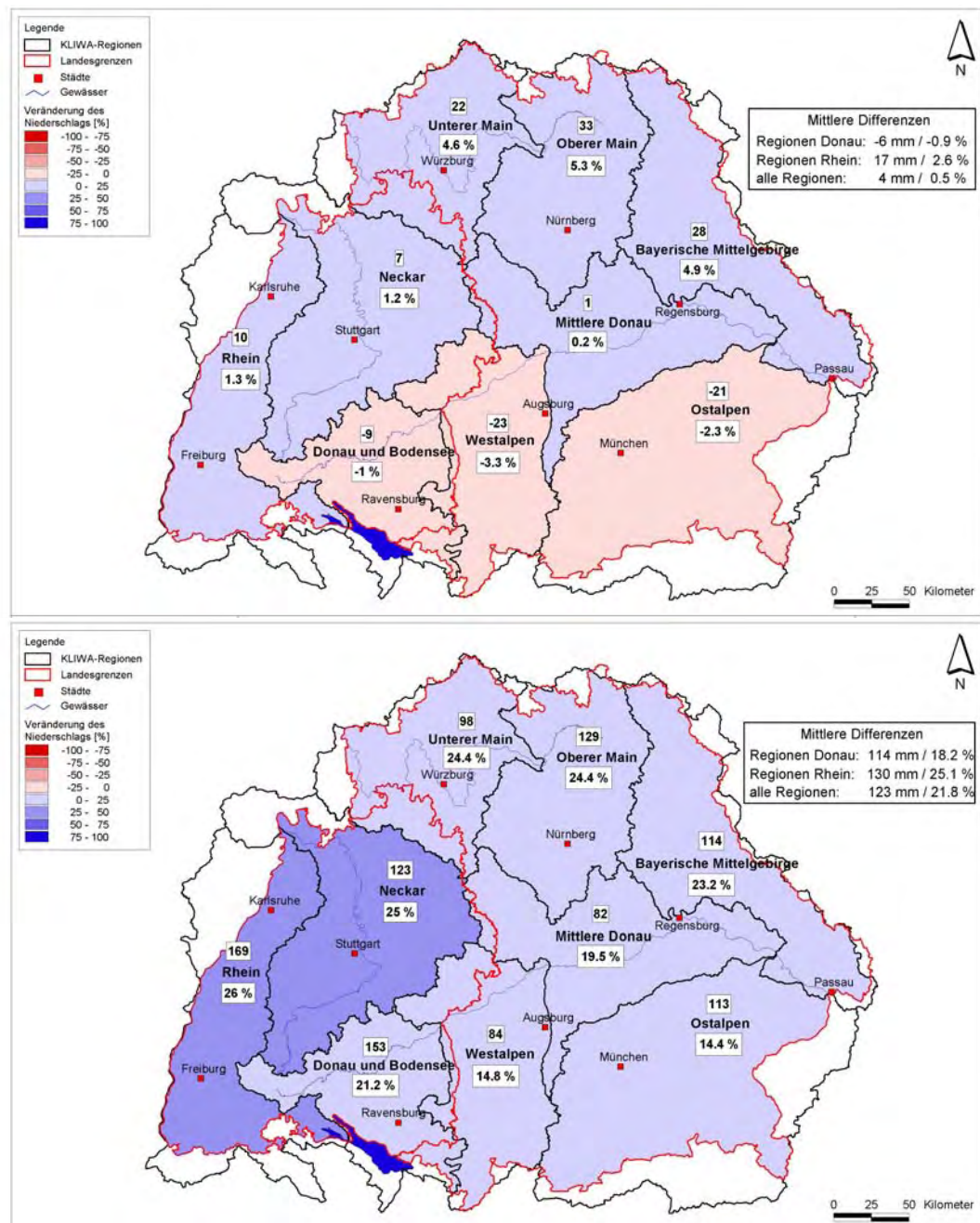


Abb. 4c-4d: Differenz zwischen Szenario 2021-2050 und Simulation Ist-Zustand 1971-2000/1970-1999, Mittlerer Niederschlag – hydrol. Winterhalbjahr (Jacob T42, T106)

Ein Vergleich zwischen den beiden Kontrollläufen zeigt, dass sie hinsichtlich der regionalen Temperaturverteilung sehr ähnliche Ergebnisse liefern (Abb. 5a), während sie hinsichtlich der regionalen Niederschlagsverteilung zum Teil sehr verschieden ausfallen (Abb. 5b). Unter der Voraussetzung einer annähernd dem Ist-Zustand entsprechenden Häufigkeit zyklonalen Westlagen ist bei steigenden Temperaturen auch mit einer zunehmenden Niederschlagsstä-



tigkeit im Winterhalbjahr zu rechnen. Daher dürfte die in Abbildung 4d dargestellte Niederschlagsänderung eher wahrscheinlich sein als die in Abbildung 4c.

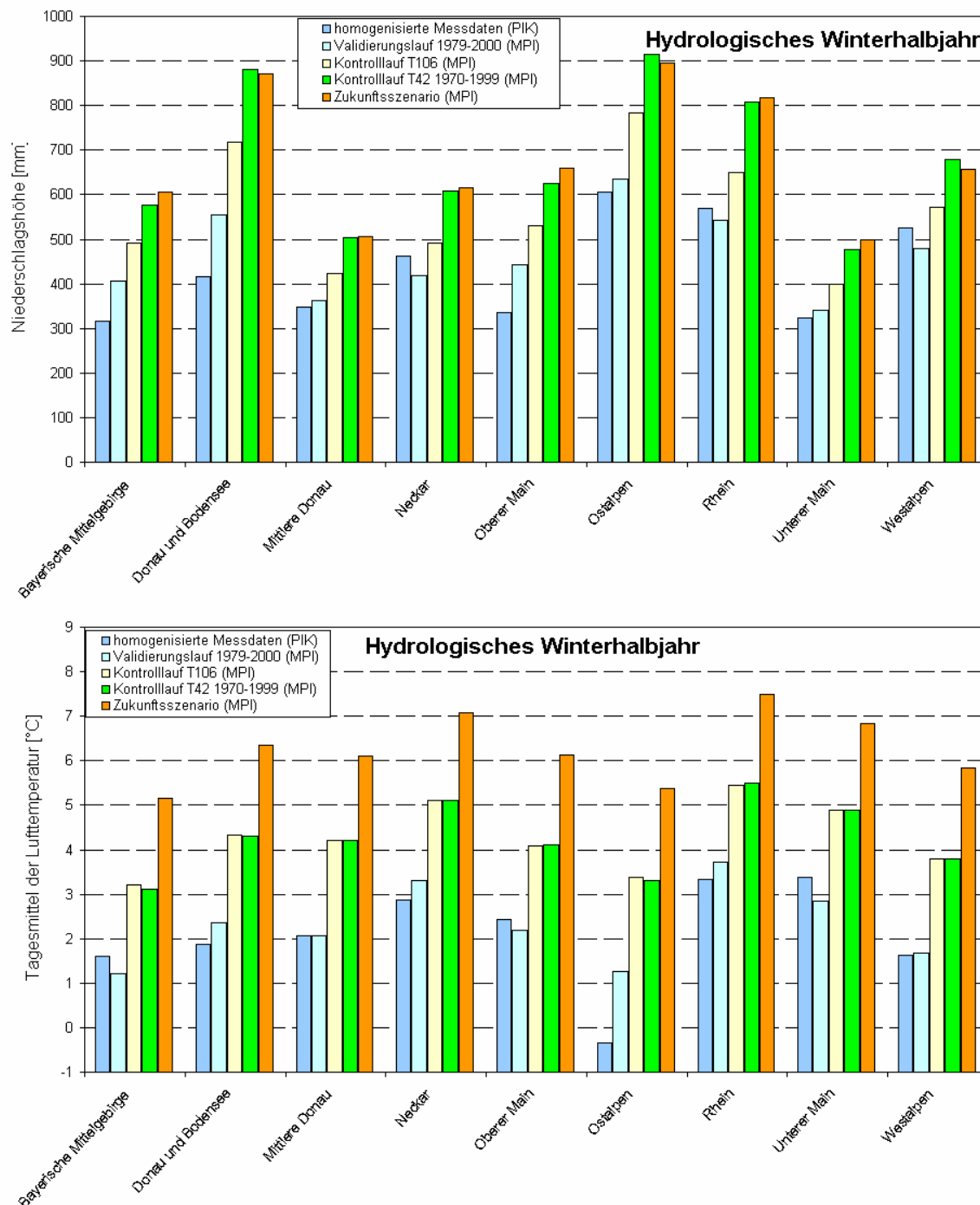


Abb. 5a/b: Vergleich verschiedener Simulationen für Lufttemperatur (a) und Niederschlag (b) nach JACOB für 9 KLIWA Regionen – hydrologisches Winterhalbjahr

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der drei Klimamodellierungen für den zukünftigen Zeithorizont 2021 bis 2050 im Vergleich zum Ist-Zustand des Klimas (1971 bis 2000) in Süddeutschland zeigen die folgenden Bandbreiten:

1. Temperaturänderungen (jeweils nahezu gleichmäßig über die gesamte Fläche verteilt)

- im hydrolog. Sommerhalbjahr: zwischen +1,2 und +1,7 K/Halbjahr
- im hydrolog. Winterhalbjahr: zwischen +1,0 und +2,0 K/Halbjahr

2. Niederschlagsänderungen (s. Abb. 3a bis 3c und Abb. 4a bis 4d)

- im hydrolog. Sommerhalbjahr: zwischen +5 % und +13 %/Halbjahr
- im hydrolog. Winterhalbjahr: zwischen 0 % und +34 %/Halbjahr.

Um eine Gewichtung der verschiedenen Szenarienergebnisse herbeiführen zu können, ist es notwendig, Bewertungskriterien zu finden, die die jeweiligen Randbedingungen und die Methodik der drei Verfahren berücksichtigen.

Solche Bewertungskriterien für die regionalen Klimaszenarienrechnungen aus Sicht der hydrometeorologisch-wasserwirtschaftlichen Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen können sich aus den folgenden Merkmalen zusammensetzen:

- Anpassungsgüte des Ist-Zustands
- Mögliche Erzeugung neuer Extremwerte
- Mögliche Veränderung des Andauerverhaltens
- Räumliche Dichte der Eingangs- und Ergebnisinformationen
- Fehlereinflüsse des globalen Klimamodells
- Zeitliche Diskretisierung der Ergebnisdaten
- Physikalische Plausibilität der Ergebnisse
- Plausibilität der Ergebnisse im Vergleich zum bisherigen Langzeitverhalten.

Derzeit erscheinen die Ergebnisse der Klimaszenarienrechnungen nach ENKE auf der Basis von Messdaten, verknüpft mit einer dynamischen Wetterlagenklassifikation – trotz einer Reihe von Unzulänglichkeiten – für die Zukunftsszenarien 2021 bis 2050 am wahrscheinlichsten, da sie tendenziell mit den aus den Langzeituntersuchungen abgeleiteten Erfahrungswerten übereinstimmen. Weiterentwicklungen sind wünschenswert.

Mittelfristig wird die dynamische regionale Modellierung am besten geeignet sein, um das breite Spektrum der Anwendungsgebiete der Klimafolgen abdecken zu können. Allerdings werden für REMO (1/6 Grad) von JACOB noch intensive Entwicklungen hinsichtlich der Anpassungsgüte (Validierung) ebenso wie für die globale Modellierung (Kontrolllauf) notwendig sein.

Das Modell GERSTENGARBE stellt auf Grund der verfahrensbedingten Einschränkungen die untere Grenze möglicher regionaler Klimaveränderungen dar, so dass die Ergebnisse für Süddeutschland im wesentlichen dem Jetztzeit-Klima entsprechen.

Zur Absicherung dieser ersten Ergebnisse aus den Zukunftsszenarien sind die Tageswerte der gesamten Zeitreihe 2021 bis 2050 auf Plausibilität zu prüfen. Dies kann durch die Anwendung von Wasserhaushaltsmodellen in den KLIWA-Regionen erfolgen. Weitere Hinweise zur Sicherstellung der Plausibilität liefert die Betrachtung der Absolutwerte und der räumlichen Verteilung von extremen Einzelereignissen. Schließlich kann ein Vergleich insbesondere für das Andauerverhalten in den Zukunftsszenarien mit dem des Jetztzeit-Klimas Aufschluss über die Belastbarkeit der Simulationsergebnisse geben.

6. Dank

Mein besonderer Dank gilt den Mitgliedern der Modellierer-Gruppen, die den KLIWA-Partnern in häufigen Diskussionen bereitwillig zur Verfügung standen. Gedankt sei an dieser



Stelle auch Herrn Professor Graßl für seine Hinweise zur Vorgehensweise und zur Absicherung der Ergebnisse. Schließlich sei auch den Mitarbeitern des Ingenieurbüros Ludwig für die prompte Umsetzung der zahlreichen Wünsche zur Darstellung der Ergebnisse gedankt.

7. Literatur

- Bartels, H; B. Dietzer (2005): Langzeitverhalten der Starkniederschläge in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Bericht (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, ca .100 S.
- Enke, W. (Meteo-Research) (2003): Abschlussbericht – Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM 4 Klimasimulationslaufs (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. Meteo-Research, Berlin, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 55 Seiten Text, Abbildungen und Tabellen im Anhang.
- Gerstengarbe, F.-W.; P.C. Werner u. Rüge (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881 – 1998) nach Paul Hess und Helmuth Brezowski, Potsdam, Offenbach a. M., 5. erg. u. verbesserte Aufl., 138 S.
- Gerstengarbe, F. W., P. C. Werner, H. Österle, T. Zenker (PIK) (2002): Abschlussbericht zum Werkvertrag B-Mr- 10029524/43, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 29 Seiten Text, Abbildungen und Tabellen im Anhang.
- Günther, Th.; H. Matthäus, H. (2004): Langzeitverhalten der Schneedecke in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Berichte (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 80 S.
- IPCC (2001): Climate Change – The Scientific Basis, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 944 S.
- Jacob, D., K. Bülow (MPI) (2003, 2004): Abschlussbericht – Dynamische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1 Klimaszenarien, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 11 Seiten Text, Abbildungen im Anhang.
- Klämt, A. (2004): Langzeitverhalten der Lufttemperaturen in Baden-Württemberg und Bayern. KLIWA-Berichte (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 74 S.
- Reich, T. (2005): Langzeitverhalten der Gebietswertreihen des Niederschlags in Baden-Württemberg und Bayern, KLIWA-Bericht (in Vorbereitung), Herausgeber Arbeitskreis KLIWA, 104 S.
- Schär, Ch., Frei, Ch., Vidale, P.-L., Kleinn, J. & J. Gurtz (2000): Grenzen und Möglichkeiten der globalen und regionalen Klimamodellierung für die Quantifizierung des Wasserhaushalts, Studie für KLIWA, Klimaforschung ETH Zürich, unveröffentlicht (Internet: www.kliwa.de), 21 Seiten.
- Schär, Ch., Frei, Ch., Fukutome, S., Lüthi, D., Kleinn, J., Seneviratne, S., Vidale P.L. (2001): Regionale Klimamodelle – Möglichkeiten und Grenzen. KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 92-103.
- Schumann, A., Geyer, J., Antl, M., 2001: Probabilistische Abschätzung der möglichen Folgen von Klimaveränderungen auf den Abfluss der Donau bis oberhalb der Illermündung. KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 170-186.

Simulation des Wasserhaushalts im Neckareinzugsgebiet unter Verwendung regionaler Klimaszenarien

Kai Gerlinger

Ingenieurbüro Dr.-Ing. K. Ludwig, Beratender Ingenieur, Karlsruhe

1. Einleitung

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens "Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft" (KLIWA-Projekt) arbeiten die Länder Baden-Württemberg und Bayern sowie der Deutsche Wetterdienst (DWD) zusammen, um u.a. die Auswirkungen der zukünftigen Klimaveränderungen auf den regionalen Wasserhaushalt abzuschätzen und Handlungsempfehlungen abzuleiten (Bartels et al. 2004).

Um Aussagen über die zukünftig zu erwartende Veränderung der hydrometeorologischen Größen in Süddeutschland zu erhalten, wurden innerhalb des KLIWA-Projekts die folgenden drei Verfahren zur Ermittlung von regionalen Klimaszenarien ausgewählt (Bartels 2004):

- statistisches Verfahren des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung (PIK, Gerstengarbe et al. 2002),
- statistisches Verfahren der Firma Meteo-Research (MR, Enke 2003),
- dynamisches Modell REMO (Version 5.1) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI, Jacob et al. 2003).

Mit allen drei Verfahren wurden hydrometeorologische Daten (Lufttemperatur, Niederschlag, relative Luftfeuchte, Luftdruck, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit) sowohl für den Ist-Zustand (1971-2000) als auch für ein Zukunftsszenario (2021-2050) simuliert. Basis für die Berechnung des Zukunftsszenarios der drei Verfahren sind die Berechnungsergebnisse des globalen Zirkulationsmodells ECHAM4/OPYC3 unter Annahme des Emissionsszenarios B2 (IPCC 2000).

Die Ergebnisse der regionalen Klimaszenarien wurden als Eingangsdaten für Simulationen mit einem Wasserhaushaltsmodell (WHM) verwendet. Die Resultate dieser Simulationen werden im folgenden vorgestellt. Bei der Verwendung des WHM für die Klimaszenarienberechnung für das Zukunftsszenario wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die zukünftige Landnutzungsverteilung mit der heutigen übereinstimmt, da zum heutigen Zeitpunkt nicht abzuschätzen ist, welche klimatisch oder anthropogen bedingte Landnutzungsveränderung in der Zukunft eintritt. Auch die bei der Kalibrierung des Modells festgelegten Parameter werden unverändert für die Zukunft übernommen.

Im Rahmen des KLIWA-Projekts wurden für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg hochaufgelöste WHM (1 km x 1 km-Raster) mit dem Programmsystem LARSIM (Bremicker 2000) erstellt. Diese WHM sind auch für andere Fragestellungen anwendbar, wie z.B. für die operationelle Niedrig- und Mittelwasserberechnung und Hochwasserfrühwarnung für das Neckargebiet (Gerlinger et al. 2003). Im weiteren wird das WHM Neckar ($A_{EZG} = \text{ca. } 14.000 \text{ km}^2$) betrachtet (Abb. 1), da hierfür die ersten Ergebnisse der Umsetzung der Klimaszenarien vorliegen. Für alle anderen Gebiete in Baden-Württemberg werden derzeit Berechnungen auf Grundlage der Klimaszenarien durchgeführt.

Die Ergebnisse des WHM Neckar werden zunächst nur in Hinblick auf das Abflussgeschehen untersucht, da dies den Einfluss der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt insgesamt, integrierend über das Einzugsgebiet, wiedergibt.

Mit einem WHM werden aber außer dem Abfluss auch alle flächenhaft vorliegenden Komponenten des Wasserhaushalts (wie z.B. reale Verdunstung, Bodenfeuchte, Grundwasserneubildung, Wasseräquivalent der Schneedecke) berechnet. Diese bereits vorliegenden Ergebnisse des WHM und ihre Veränderungen werden zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet.

2. Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells mit Messdaten

Die Ergebnisse des WHM zeigen auch dann Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Abflüssen, wenn das WHM mit gemessenen Klimadaten angetrieben wird. Um die Genauigkeit einzuschätzen, die bei der Umsetzung der Ergebnisse der Klimaszenarien mit dem WHM erreicht werden kann, ist somit zunächst die Modellgüte des WHM bei Verwendung von gemessenen hydrometeorologischen Eingangsdaten zu überprüfen.

Dies erfolgte für das WHM Neckar für den vierzigjährigen Zeitraum 1961-2000 unter Verwendung von gemessenen Tageswerten. Für die Kalibrierung des Modells wurde der fünfjährige Zeitraum 1987-1991 ausgewählt.

Zur Bewertung der Simulationsgüte des Modells wurden statistische Gütemaße berechnet. Die Modelleffizienz nach Nash-Sutcliffe an den untersuchten Pegeln im WHM Neckar liegt in jedem Jahr des Rechenlaufs in der Regel über 0,7 und belegt eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung. Modellabweichungen treten vor allem bei Hochwasserspitzen auf. Dies liegt daran, dass durch die Verwendung von Tageswerten die gemessenen Hochwasserspitzen nicht korrekt nachgebildet werden können. Die Modelleffizienz für die logarithmierten Abflüsse, die als Maß für die Modellgüte im Niedrig- und Mittelwasserbereich dient und weniger stark die Hochwasser wichtet, liegt daher im allgemeinen sogar höher.

Abb. 2 zeigt exemplarisch für den Pegel Rockenau ($A_{EZG} = 12.800 \text{ km}^2$) den zeitlichen Verlauf der beiden Gütemaße. Die hohen Gütemaße über unterschiedlich trockene und feuchte Jahre innerhalb des 40-Jahreszeitraums belegen, dass das Modell auch bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen verlässliche Ergebnisse liefert.

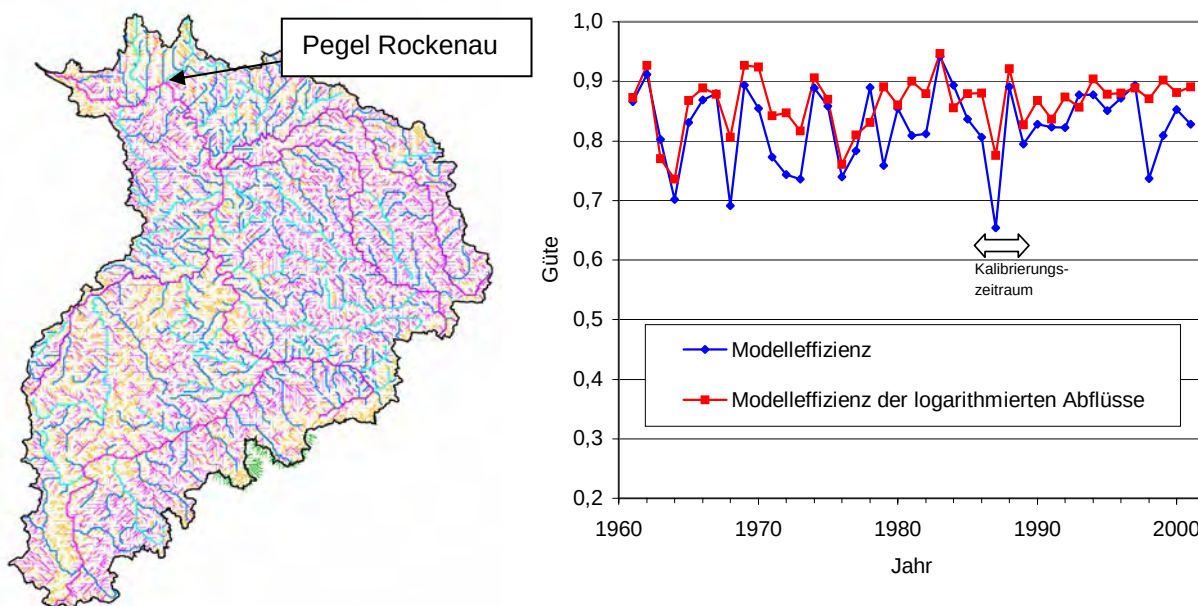


Abb. 1: Modellvernetzung des WHM Neckar

Abb. 2: Modellgüte des WHM Neckar für die Zeitreihe 1961–2000 für den Pegel Rockenau/Neckar

In Abb. 3 sind der Jahresgang der mittleren monatlichen Abflüsse (MoMQ) sowie der mittleren monatlichen Höchstabflüsse (MoMHQ) für die Mess- und für die Simulationswerte dargestellt. Dabei wurde der Zeitraum 1971-2000 ausgewählt, der im Weiteren bei der Verwendung der Klimaszenarien betrachtet wird. Es zeigt sich, dass auf Grund der Verwendung von Tageswerten die simulierten MoMHQ etwas unterhalb der gemessenen Werte liegen, während die simulierten MoMQ sehr gut mit den gemessenen Werten übereinstimmen. Auch die in Abb. 3 dargestellten Standardabweichungen stimmen gut überein, so dass nicht nur das Mittel, sondern auch die Schwankungsbreiten der simulierten und gemessenen Werte vergleichbar sind.

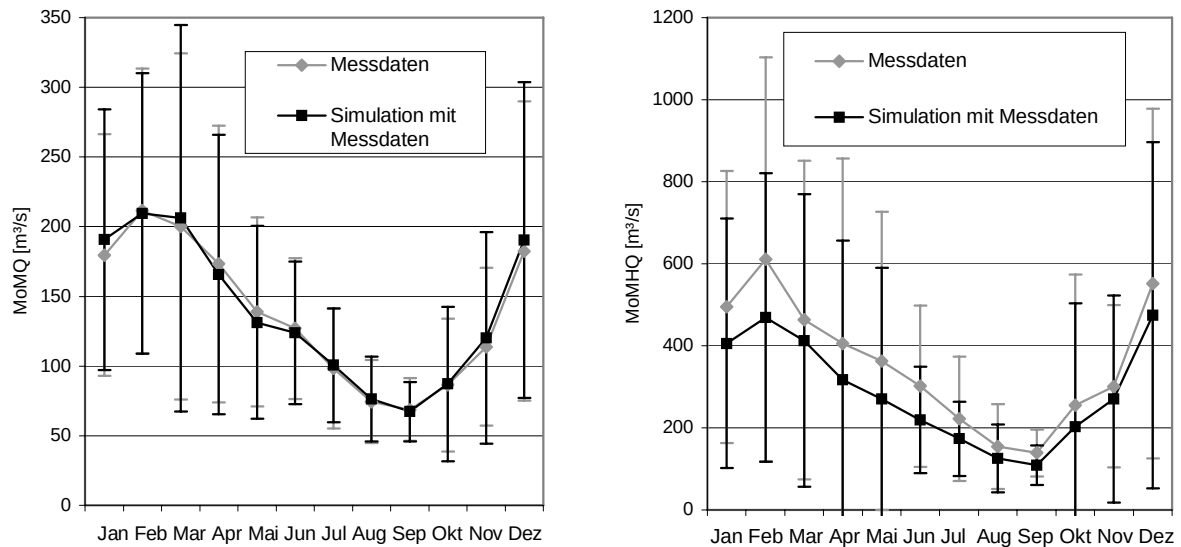


Abb. 3: Mittlere monatliche Mittelwasserabflüsse MoMQ und mittlere monatliche Hochwasserabflüsse MoMHQ (jeweils mit Standardabweichung): Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung von gemessenen Klimawerten (Pegel Rockenau/Neckar, Zeitraum 1971-2000)

3. Regionalisierung der Klimaszenarien

3.1 Regionalisierung der stationsbezogenen Niederschlagsdaten

Die Ergebnisse der statistischen regionalen Klimamodelle (PIK und Meteo-Research) liegen für alle Klimagrößen punktuell für 70 Klimastationen in Süddeutschland vor. Davon befinden sich nur 18 Klimastationen im Neckargebiet sowie im angrenzenden Bereich.

Alle Klimagrößen außer dem Niederschlag werden mit dem in LARSIM implementierten Inversen-Distanz-Verfahren auf die hohe räumliche Auflösung des WHM interpoliert. Dabei erfolgt auch eine modellinterne Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur.

Da die Verteilung des Niederschlags im allgemeinen wesentlich heterogener ist als die Verteilung der anderer Klimagrößen, wird auf Grund der geringen Stationsdichte für den Niederschlag eine Regionalisierung der Niederschlagsdaten durchgeführt. Die Regionalisierung des Niederschlags wird mit Hilfe von Hintergrundfeldern durchgeführt, die eine höhere räumliche Auflösung besitzen (vgl. Kleinn 2002). Diese räumliche Verteilung wird übernommen und auf die durch die Klimamodelle simulierten Zeitreihen aufgeprägt.

Als Hintergrundfelder werden hier die REGNIE-Daten des DWD verwendet, die als monatliche Mittelwerte des Niederschlags aus dem Zeitraum 1971-2000 im ca. 1 x 1 km² Raster



vorliegen. Hierzu wurde ein Programm erstellt zur entfernungsgewichteten, stationstreuen Dateninterpolation unter Verwendung der REGNIE-Daten, basierend auf Dietzer (2003).

Die Einschränkung des Verfahrens liegt in der Annahme, dass bei der Regionalisierung der Niederschlagsdaten des Zukunftsszenarios von einer räumlich gleichen Niederschlagsverteilung wie in der heutigen Zeit ausgegangen wird. Zudem können einzelne Niederschlagsereignisse (insbesondere beim Durchgang konvektiver Zellen) vom zugrunde gelegten Muster, wie es sich aus den mittleren Monatswerten ergibt, abweichen.

Um die Wirkung der Regionalisierung zu überprüfen, wurden Vergleichsrechnungen für den Zeitraum 1961-2000 mit dem WHM Neckar durchgeführt (LfU 2003a). Die Simulationsergebnisse bei einer Verwendung der 18 Klimastationen im Bereich des Neckars ohne Regionalisierung der Niederschläge weichen recht deutlich von den gemessenen Abflüssen ab. Die Niederschläge an den 18 Klimastationen repräsentieren daher den Gebietscharakter nur unzureichend. Werden dagegen die Niederschläge der 18 Stationen unter Verwendung der REGNIE-Hintergrundfelder regionalisiert, liegen die Ergebnisse nahe an den gemessenen Abflüssen. Die Regionalisierung trägt somit wesentlich zur Verbesserung der Modellergebnisse bei.

3.2 Filterung der rasterbezogenen Niederschlagsdaten

Bei den Ergebnissen des dynamischen Klimamodells REMO kann eine gewisse räumliche Unschärfe bei den advektionsabhängigen Größen (vor allem Wind und Niederschlag) im Bereich von Mittelgebirgen festgestellt werden. So ergibt sich tendenziell im Luv von Mittelgebirgen eine zu hohe Abregnung, im Lee ist dagegen die Abtrocknung zu hoch. Für das Neckargebiet werden daher mit REMO im Lee des Scharzwaldhauptkamms (z.B. Einzugsgebiet der Enz) zu geringe Niederschläge simuliert.

Um diesen Effekt zu mildern, wird ein einfacher Filteralgorithmus angewandt. Dabei wird zuerst der Gebietsniederschlag jeder REMO-Rasterzelle mit dem Faktor 0,6 multipliziert. Dann werden die Gebietsniederschläge der umliegenden acht REMO-Rasterzellen mit dem Faktor 0,05 gewichtet und dazu addiert. Analog wird mit den Windgeschwindigkeiten verfahren.

Vergleichsrechnungen mit und ohne Filterung haben allerdings gezeigt, dass der Einfluss der Filterung auf die Ergebnisse der Umsetzung der REMO-Klimaszenarien mit dem Wasserhaushaltsmodell bei der Betrachtung größerer Einzugsgebiete gering ist. So verringert sich z.B. der mittlere Jahresniederschlag durch die Filterung sowohl für die Simulation des Ist-Zustands als auch für das Zukunftsszenario nur um ca. 2 %. Im weiteren werden die gefilterten REMO-Daten verwendet.

3.3 Regionalisierung der rasterbezogenen Niederschlagsdaten

Die REMO-Ergebnisse liegen für alle Klimagrößen als flächige Gebietsmittelwerte für die jeweils 17 x 17 km² großen Rasterzellen vor. Daher ist innerhalb einer Rasterzelle der Wert der jeweiligen Klimagröße überall gleich groß. In Abb. 4 links ist beispielhaft für einen Tag die mit REMO simulierte Verteilung des Niederschlags im Neckargebiet dargestellt.

Um die Niederschlagswerte innerhalb der Rasterzellen räumlich zu differenzieren, wurden die Niederschlagswerte ebenfalls unter Verwendung der REGNIE-Hintergrundfelder auf die 1 x 1 km² großen Rasterzellen des WHM Neckar regionalisiert. Dazu wurde ein Programm zur räumlichen Gewichtung der flächigen Gebietsmittelwerte der REMO-Daten erstellt. Dabei bleibt der Gebietsniederschlag als Mittelwert der Gebietsfläche innerhalb der 17 x 17 km² großen REMO-Zelle erhalten, und auch der zeitliche Verlauf bleibt unverändert. Durch die

Hintergrundinformation des REGNIE-Rasters wird aber innerhalb der REMO-Rasterzelle der Niederschlag besser differenziert.

Abb. 4 rechts zeigt den gleichen Tag wie Abb. 4 links, aber diesmal nach Filterung und Regionalisierung. Gerade am südwestlichen Rand des Neckargebietes, im Lee des Schwarzwaldhauptkamms, wird der Niederschlag räumlich differenzierter verteilt.

Die weiteren hydrometeorologischen Klimagrößen aus REMO neben dem Niederschlag werden mit dem in LARSIM implementierten Inversen-Distanz-Verfahren interpoliert.

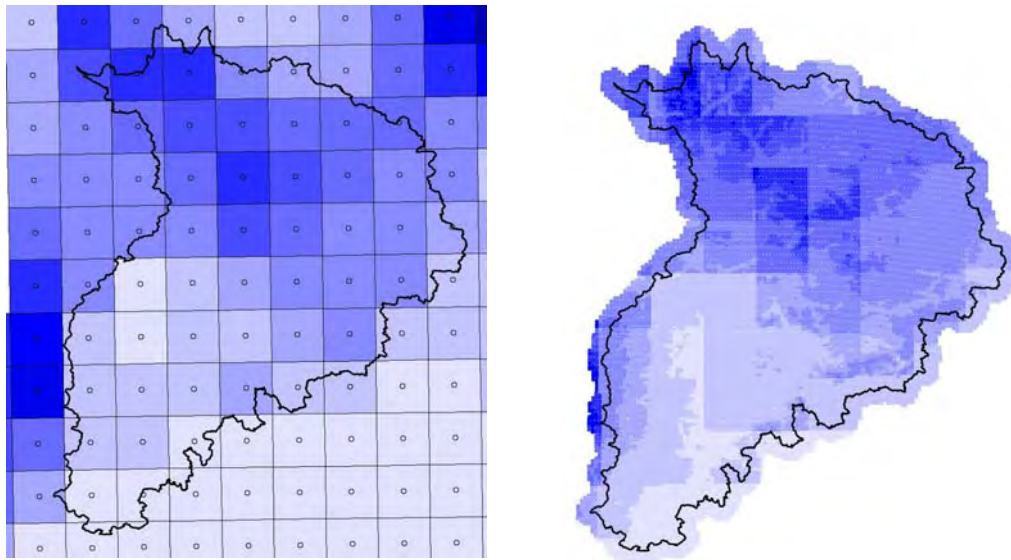


Abb. 4: Niederschlagsverteilung im Neckareinzugsgebiet aus REMO ohne (links) und mit (rechts) Filterung und Regionalisierung (Beispieltag: 26.12.1978)

4. Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells mit Klimaszenarien

4.1 Vorgehensweise zur Umsetzung der Klimaszenarien

Um Aussagen über die klimatisch bedingte Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen unter Verwendung der Klima- und Wasserhaushaltsmodelle ableiten zu können, wurde die in Abb. 5 schematisch dargestellte Vorgehensweise gewählt. Diese wird im weiteren in den einzelnen Schritten erläutert.

1) Ergebnisse der Klimamodelle: Die Klimamodelle liefern sowohl für den Ist-Zustand als auch für das Zukunftsszenario Klimadaten als Simulationsergebnisse. Durch den Vergleich der Simulationsergebnisse der Klimamodelle für den Ist-Zustand...

- (a) ...mit den gemessenen Klimadaten des selben Zeitraums können die Klimamodelle überprüft werden,
- (b) ...mit dem Zukunftsszenario können Aussagen zu den zukünftig zu erwartenden Veränderungen der Klimadaten (z.B. Niederschlag, Lufttemperatur) gemacht werden.

Sowohl (a) die Überprüfung der Modelle (Vergleich Simulationsergebnisse Ist-Zustand mit gemessenen Klimadaten) als auch (b) die Auswertung der Änderungen im Szenariolauf gegenüber dem Ist-Zustand wurden bereits von den Klimamodellierern für ihr jeweiliges Modell vorgenommen. Eine regionenspezifische Auswertung für Süddeutschland verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Klimamodelle (LfU-LfW 2003, Bartels 2004).



Für die Übertragung der Ergebnisse regionaler Klimaszenarien in hydrologische Modelle kann der sogenannte „delta change approach“ (z.B. Andréasson et al. 2004) verwendet werden. Dabei werden zunächst die relativen Veränderungen der hydrometeorologischen Variablen, insbesondere des Niederschlags, zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios (Fall (b)) auf die beobachteten Daten übertragen. Anschließend werden Simulationen mit dem Wasserhaushaltsmodell mit den durch diese sogenannten Änderungsvektoren veränderten Beobachtungswerten durchgeführt, um Aussagen über die zukünftigen Änderungen zu erhalten. Durch den „delta change approach“ können eventuell vorhandene systematische Fehler des Klimamodells verringert werden.

Nachteilig ist allerdings, dass die Verwendung eines Änderungsvektors (z.B. eines multiplikativen Faktors) zu Fehleinschätzungen führen kann, wenn die Häufigkeit von Niederschlagsereignissen zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios differiert. Die erforderliche Linearität zwischen den Variablen ist nicht gegeben.

Im KLIWA-Projekt wird daher im ersten Schritt ein anderes Verfahren durchgeführt, in dem zunächst die Ergebnisse der Klimaszenarien für die Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios unverändert im Wasserhaushaltsmodell verwendet werden.

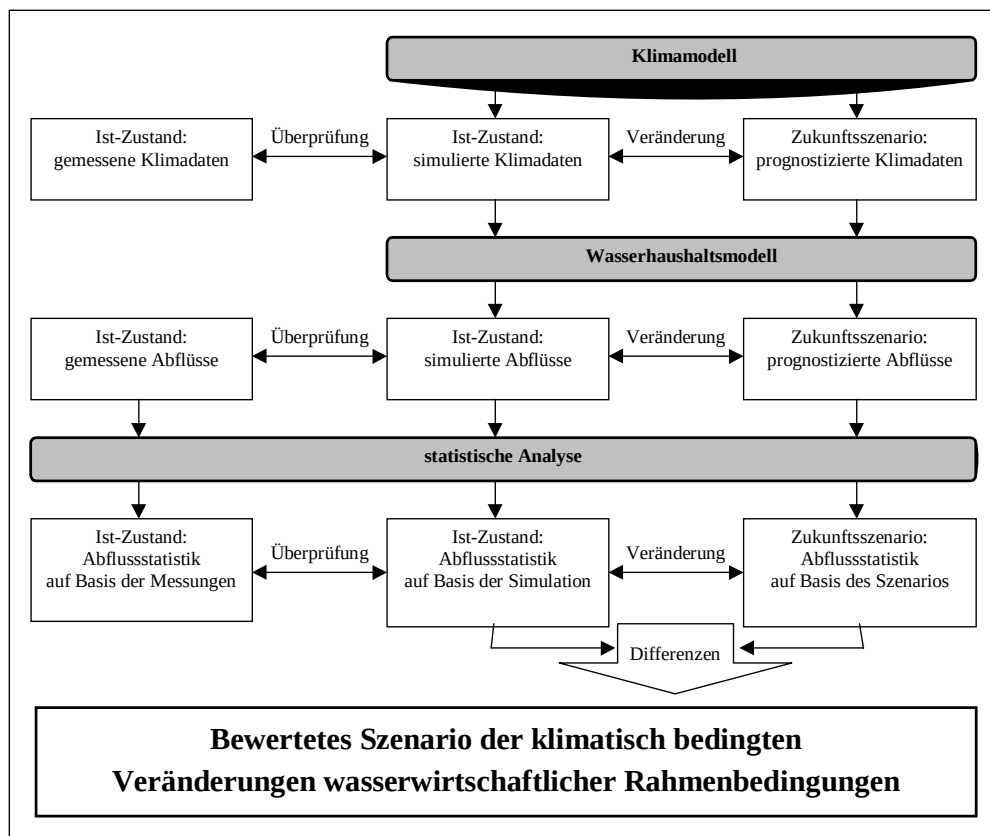


Abb. 5: Vorgehensweise bei der Umsetzung von Klimaszenarien in Wasserhaushaltssimulationen (bezogen auf die Abflüsse) (nach LfU 2003b)

2) Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle: Durch den Vergleich der Ergebnisse aus den Wasserhaushaltssimulationen für den Ist-Zustand...

(a) ...mit den gemessenen Abflussdaten kann die Vertrauenswürdigkeit der kombinierten Klima- und Wasserhaushaltssimulation überprüft werden, d.h. die Unsicherheiten beider Modelle sind hierin enthalten.

(b) ...mit dem Zukunftsszenario ergeben sich die auf Basis des Szenarios zu erwartenden Veränderungen, wobei systematische Modellfehler eliminiert werden. Es werden somit die

relativen Veränderungen zwischen Simulation des Ist-Zustands und des Szenarienlaufs erst nach der Wasserhaushaltssimulation betrachtet. Diese sind dann auf die Messdaten zu übertragen. Ein direkter Vergleich zwischen Zukunftsszenario und Messdaten des Ist-Zustandes würde zu einer Verfälschung der Aussagen führen.

3) Statistische Analyse: Da die Klimamodelle keine zeitgenauen Prognosen für einen bestimmten Tag liefern, sind für den Abfluss keine zeitgenauen Prognosen für einzelne Ereignisse möglich. Somit sind die Klimagrößen und die wasserwirtschaftlichen Größen bei einer Analyse der Ergebnisse im statistischen Sinne zu betrachten. Daher werden die gemessenen und simulierten Abflüsse statistisch ausgewertet (mittlere jährliche Werte (MHQ, MQ, MNQ), mittlere monatliche Werte (MoMHQ, MoMQ, MoMNQ) sowie Dauerlinien und Rangfolgen). Extremwertstatistische Auswertungen unter Verwendung der WHM-Simulationen wurden von Ihringer (2004) durchgeführt.

4) Analyse der relativen Veränderungen: Zur endgültigen Abschätzung der klimatisch bedingten Veränderungen der wasserwirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden dann im Anschluss an die statistische Analyse die Differenzen zwischen der Simulation des Ist-Zustands und des Zukunftsszenarios betrachtet.

Im folgenden werden somit im Schwerpunkt die relativen Veränderungen der Ergebnisse aus den Wasserhaushaltssimulationen für den Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario statistisch ausgewertet. Dies erfolgt am Beispiel des Pegels Rockenau ($A_{EZG} = 12.800 \text{ km}^2$, vgl. Abb. 1). Die Analyse weiterer Pegel im Neckargebiet, die hier nicht dargestellt ist, erbrachte vergleichbare Ergebnisse (vgl. auch Ihringer 2004).

4.2 Verwendung der Klimaszenarien des PIK

Für die Simulation des Ist-Zustands liegt kein Ergebnis von Seiten des PIK vor, so dass die Ergebnisse für das Zukunftsszenario nur direkt mit den Messdaten verglichen werden können. Dieses Vorgehen ist methodisch nur dann zulässig, wenn davon ausgegangen wird, dass die gemessenen und simulierten Daten des Ist-Zustands weitestgehend identisch sind.

Darüber hinaus sind beim PIK-Modell folgende Einschränkungen vorhanden:

- Die für die Zukunft simulierten Extremwerte überschreiten nicht die heutigen Werte.
- Die räumlichen Strukturen der Verteilung der hydrometeorologischen Klimagrößen für den Ist-Zustand werden auch im Zukunftsszenario beibehalten.
- Die Dauer zusammenhängender Perioden mit ähnlichen klimatischen Bedingungen wird generell unterschätzt (mangelnde Persistenz). Daher fehlen z.B. mehrtägige zusammenhängende Feucht- oder Trockenperioden. Demzufolge ergibt sich beim PIK-Modell für das Zukunftsszenario 2021-2050 eine Erhöhung der NQ-Werte und eine Verringerung der HQ-Werte im Vergleich zu den jeweiligen Messdaten des Zeitraums 1971-2000.

Im weiteren wird daher auf die Ergebnisse des PIK-Modells nicht detaillierter eingegangen.

4.3 Verwendung der Klimaszenarien von Meteo-Research (MR)

Für das Zukunftsszenario werden von MR für jede Dekade 10 unterschiedliche Realisationen zur Verfügung gestellt. Jede Realisation ist ein mögliches Szenario für die betrachtete Dekade. In Abb. 8 sind für die mittlere Dekade 2031-2040 die Ergebnisse der 10 Realisationen dargestellt, um deren Schwankungsbreite zu verdeutlichen. Um nicht in der weiteren Betrachtung der Ergebnisse des MR-Modells alle 10 Realisationen zu diskutieren, wird ein Lauf



als repräsentativ definiert, der sich etwa im oberen Drittel der 10 Realisationen befindet. Dieser Lauf, der in Abb. 8 rot markiert ist, wurde auch von Ihringer (2004) weiter verwendet.

Beim MR-Modell ist anzumerken, dass auf Grund des gewählten Berechnungsverfahrens für das Zukunftsszenario an einigen Stationen sehr hohe Einzelniederschläge an einem Tag auftreten können, die allerdings nicht zu großräumigeren Hochwasserereignissen führen. Hier wird eine gewisse Schwäche des statistischen Verfahrens ersichtlich.

Vergleich Ist-Zustand mit Messdaten: Die mit dem WHM simulierten mittleren monatlichen Niedrig- und Mittelwasserabflüsse (MoMNQ, MoMQ) unter Verwendung der Ergebnisse des MR-Modells zeigen eine hohe Übereinstimmung mit Messdaten (Abb. 6). Die simulierte Dauerlinie (Abb. 9) weicht etwas stärker von den Messungen ab, v.a. bei den Extremwerten. Bei den mittleren monatlichen Hochwasserabflüssen (MoMHQ) treten höhere Abweichungen auf (Abb. 7). Diese sind aber vor allem auf die Abweichungen des Wasserhaushaltsmodells bei der Hochwassersimulation auf Grund der Verwendung von Tageswerten zurückzuführen (vgl. Abb. 3 rechts). Insgesamt wird also der Ist-Zustand relativ gut wiedergegeben.

Vergleich Ist-Zustand mit Zukunftsszenario: Beim MR-Modell ähneln die simulierten sommerlichen MoMNQ des Zukunftsszenarios denen des Ist-Zustands. Demzufolge ist zukünftig im Mittel mit keinen niedrigeren Abflüssen im Sommer zu rechnen (Abb. 6 links). Auch die Analyse der Rangfolge der jährlichen NQ-Werte zeigt keine niedrigeren Werte im Zukunftsszenario im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustands. Die mittleren Abflüsse MoMQ erhöhen sich mit Ausnahme des Sommers (Abb. 6 rechts). Diese Abflusserhöhung zeigt sich auch deutlich bei den Hochwassern, wobei die winterlichen MoMHQ im Zukunftsszenario doppelt so hohe Werte wie bei der Simulation des Ist-Zustands erreichen (Abb. 7).

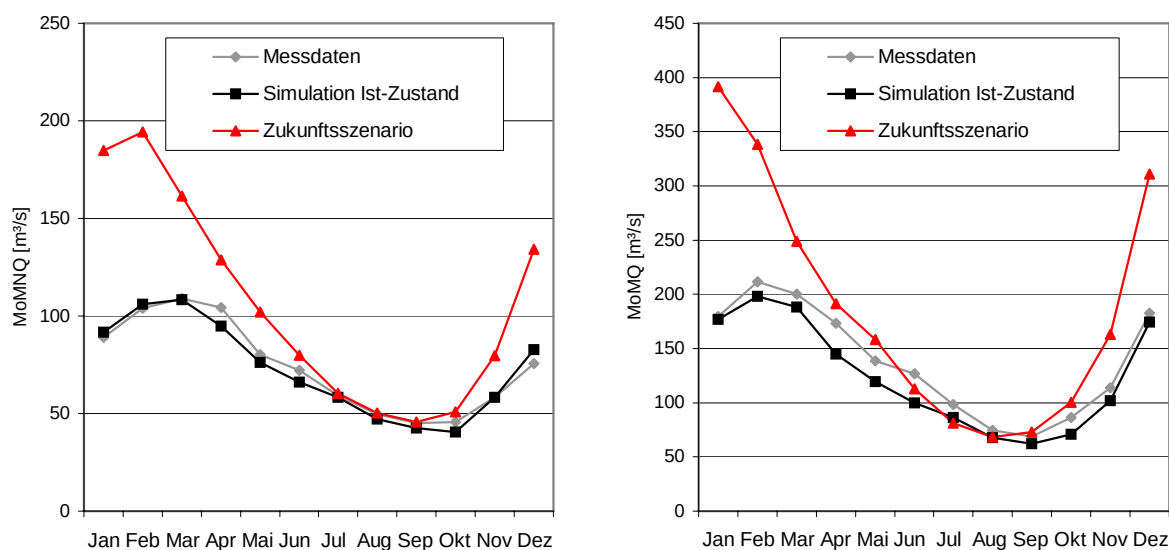


Abb. 6: MoMNQ und MoMQ: Messwerte und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des MR-Modells

Auch bei Betrachtung der Dauerlinie und der Rangfolge der jährlichen HQ-Werte liegen die Abflüsse des Zukunftsszenarios über denen der Simulation des Ist-Zustands (Abb. 9 und Abb. 10). Allerdings ist der HHQ-Wert des Zukunftsszenarios nicht höher als der des Ist-Zustands. Daher ist v.a. von einer Erhöhung mittlerer Hochwasser auszugehen. Eventuell kann aber auch hier ein systematisches Problem im statistischen Verfahren vorliegen, welches die Möglichkeiten von Extremwerten im Zukunftsszenario begrenzt.

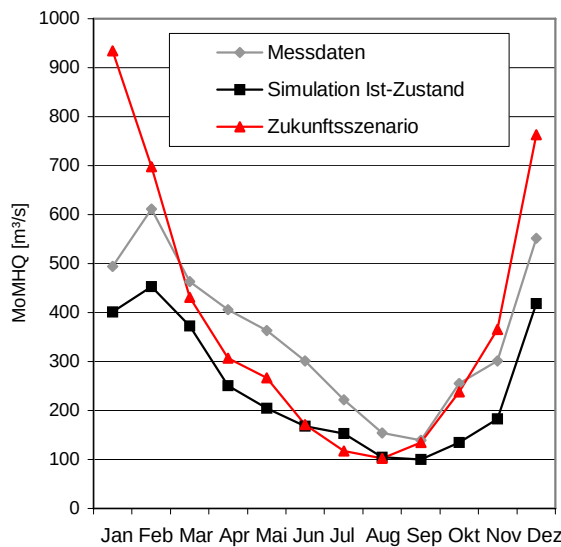


Abb. 7: MoMHQ: Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des MR-Modells

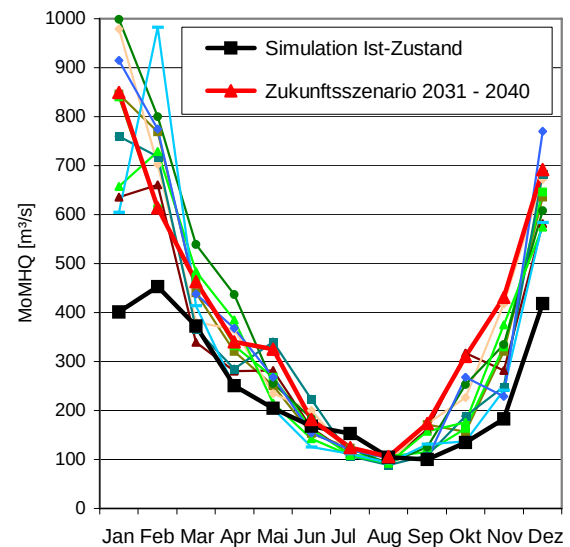


Abb. 8: MoMHQ (Dekade 2031-2040): Simulierte Daten unter Verwendung der 10 Realisationen des MR-Modells sowie der als repräsentativ definierten Realisation (rot).

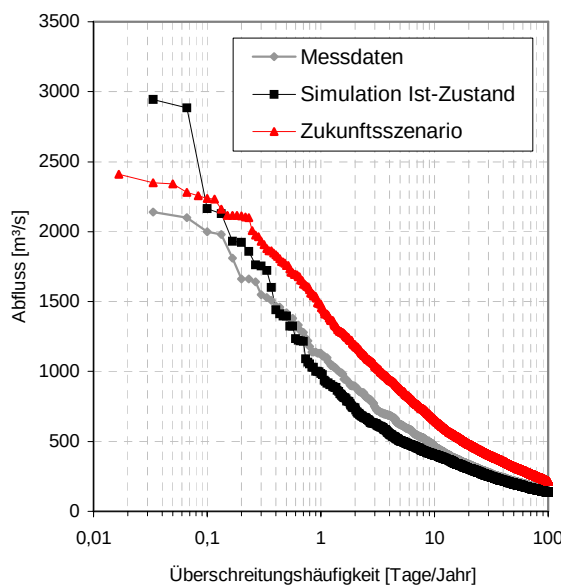


Abb. 9: Der Größe nach sortierte Tagesabflüsse der WHM-Simulationen mit dem MR-Modell

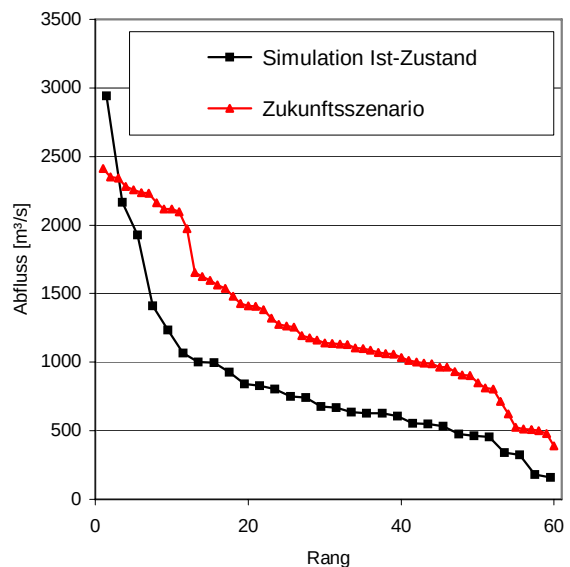


Abb. 10: Der Größe nach sortierte Jahreshöchstwerte der WHM-Simulationen mit dem MR-Modell

4.4 Verwendung der Klimaszenarien des MPI

Für REMO liegen im Unterschied zu den beiden statistischen Modellen zwei Simulationsläufe für den Ist-Zustand vor, die als Validierungslauf und Kontrolllauf bezeichnet werden:



- Beim Validierungslauf wird REMO an den Modellrändern über Reanalysedaten an das reale Wettergeschehen angepasst. Daher sind die Ergebnisse des Validierungslaufs mit Messdaten vergleichbar und erlauben eine unmittelbare Überprüfung der Güte des REMO-Modells. Auf Grund der Verfügbarkeit der Reanalysedaten liegt der Validierungslauf nur für den Zeitraum 1979-2000 vor.
- Beim Kontrolllauf, bei dem der Randantrieb von REMO mit ECHAM4 erfolgt, sind die Unsicherheiten dieses Globalen Zirkulationsmodells (GCM) mit enthalten. Da sich bei der dynamischen Modellierung im Vergleich zu den statistischen Verfahren systematische Abweichungen im GCM am stärksten durchpausen, sollten die Ergebnisse des Zukunftsszenarios insbesondere hier nicht direkt mit Beobachtungen verglichen werden. Die Einschätzung der zukünftig zu erwartenden Veränderungen muss stattdessen aus dem Vergleich zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenario erfolgen, da auch das Zukunftsszenario mit dem GCM angetrieben wird.

Als Randantrieb für den Kontrolllauf liegen die Ergebnisse von ECHAM4 in zwei unterschiedlichen horizontalen Auflösungen T42 (ca. 250 km Raster) und T106 (ca. 100 km Raster) vor. Für das Zukunftsszenario stehen aber als Randantrieb nur Ergebnisse von ECHAM4 T42 zur Verfügung. Zudem ist die vertikale Auflösung des T106-Laufes zu gering. Daher wird im weiteren nur auf die Ergebnisse des Kontrolllaufs unter Verwendung der Ergebnisse von ECHAM4 T42 und nicht von ECHAM4 T106 eingegangen.

Vergleich Ist-Zustand Validierungslauf mit Messdaten: Die simulierten MoMQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Validierungslaufs zeigen eine relativ hohe Übereinstimmung mit den Messdaten (Abb. 11 links). Leicht höhere Abweichungen ergeben sich bei MoMHQ (Abb. 11 rechts) und MoMNHQ. Auch die Standardabweichungen zeigen bei den MoMHQ größere Abweichungen.

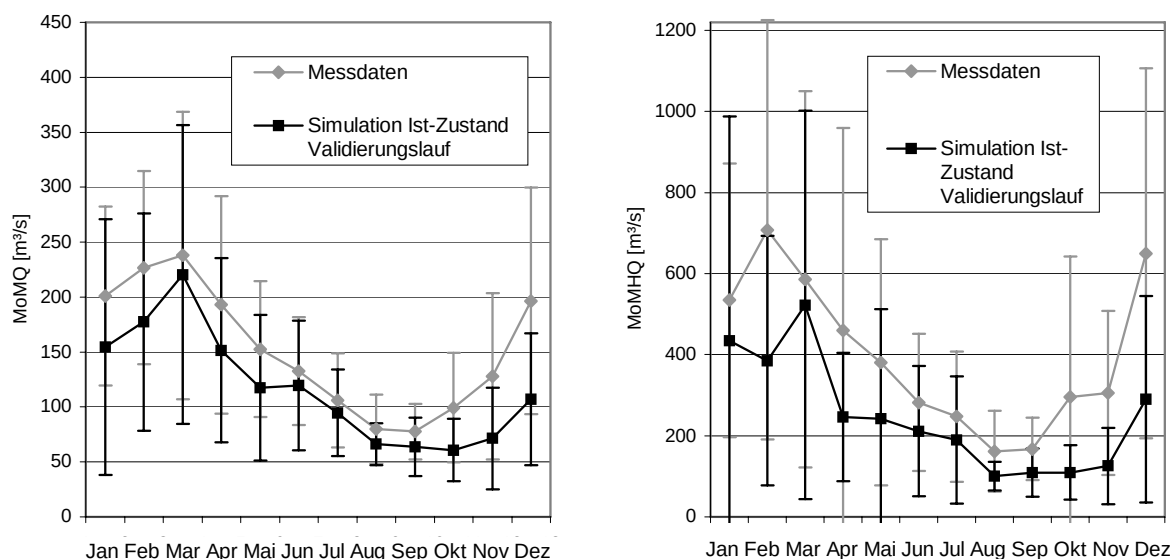


Abb. 11: MoMQ und MoMHQ: Messwerte und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells für den Validierungslauf (1979-2000)

Dennoch kann die Übereinstimmung zwischen den Messdaten und den Modellergebnissen unter Verwendung der REMO-Ergebnisse insgesamt als hoch eingestuft werden. Offenbar ist REMO geeignet, bei entsprechend richtigem Randantrieb das regionale Klimageschehen im hydrologischen Sinne korrekt wiederzugeben.

Vergleich Ist-Zustand Kontrolllauf mit Messdaten: Die simulierten MoMNQ und MoMQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Kontrolllaufs zeigen eine deutliche Überschätzung der Messdaten, v.a. im Winter (Abb. 12). Auch die Werte der Dauerlinie der simulierten Abflüsse liegen immer über den Messwerten (Abb. 14). Durch den Randantrieb mit ECHAM4 berechnet REMO für den Kontrolllauf zu feuchte Bedingungen und der mittlere Gebietsniederschlag im Neckar-Einzugsgebiet wird um fast 20 % überschätzt. Die simulierten MoMHQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse des Kontrolllaufs zeigen geringere, aber immer noch hohe Abweichungen zu den Messdaten (Abb. 13). Hier wird ein gewisser Teil der Unterschätzung der Simulationsergebnisse des WHM (vgl. Abb. 3 rechts) durch die zu feuchten Bedingungen des Kontrolllaufs kompensiert.

Vergleich Ist-Zustand Kontrolllauf mit Zukunftsszenario: Die simulierten MoMNQ unter Verwendung der REMO-Ergebnisse zeigen im Szenariolauf eine gewisse Verminderung der Abflüsse im Frühjahr und in geringem Maße auch im Sommer (Abb. 12 links). Da aber im Sommer nur eine geringe Unterschreitung der MoMNQ-Werte des Kontrolllaufs auftritt, ist auch im Zukunftsszenario des MPI-Modells nicht mit deutlich geringeren mittleren sommerlichen Niedrigwasserabflüssen zu rechnen. Die MoMQ und MoMHQ weisen im Zukunftsszenario einen Anstieg der Werte im Winter und eine Verringerung der Werte im Frühjahr im Vergleich zum Kontrolllauf auf (Abb. 12 rechts und Abb. 13). Dabei wird eine vergleichbare Größenordnung der winterlichen MoMHQ-Werte wie mit dem MR-Modell erreicht. Allerdings sind die relativen Abflusserhöhungen im Winter zwischen Kontrolllauf und Szenariolauf nicht so deutlich wie beim MR-Modell.

In Abb. 15 ist die Rangfolge der simulierten HQ-Werte des Zukunftsszenarios im Vergleich zur Simulation des Ist-Zustands aufgetragen. Im MPI-Modell nehmen relativ zum Ist-Zustand die Hochwasser mittlerer Jährlichkeit nicht zu, wie es beim MR-Modell der Fall ist.

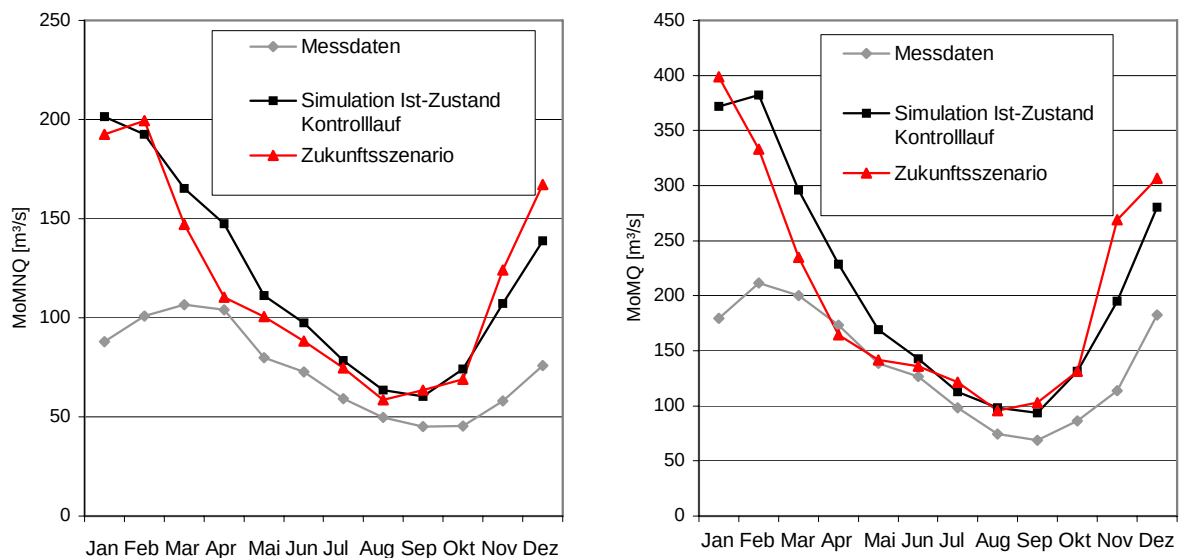


Abb. 12: MoMNQ und MoMQ: Messdaten und simulierte Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells

Wie die Dauerlinie zeigt, werden aber mit dem REMO-Modell höhere Extremabflüsse für das Zukunftsszenario simuliert als mit dem MR-Modell (Abb. 9 und 14). Somit ist weniger mit einer generellen Zunahme der mittleren Hochwasserabflüsse zu rechnen wie bei den Ergebnissen des MR-Modells, sondern eher mit stärkeren Extremen.

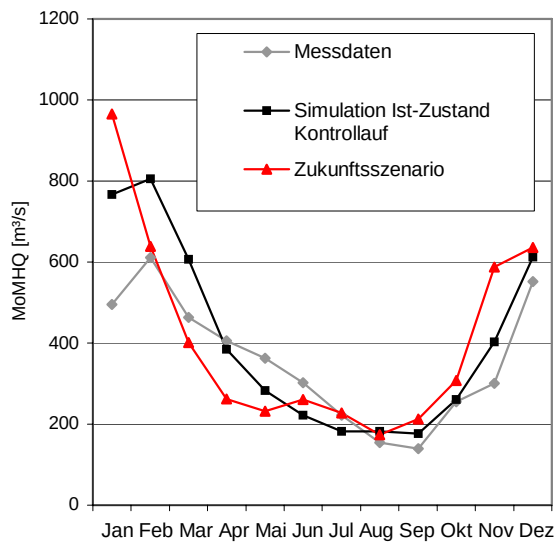


Abb. 13: MoMHQ: Messdaten und simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells

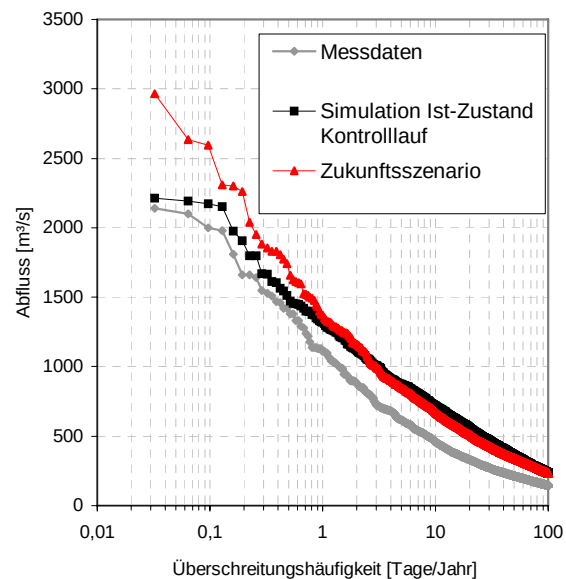


Abb. 14: Der Größe nach sortierte Abflusswerte der WHM-Simulationen des REMO-Modells

4.5 Verwendung von Klimaszenarien mit Stundenwerten

Die in Baden-Württemberg vorliegenden WHM werden schrittweise auch für die Verwendung von Daten in Stunden-Zeitschritten nachkalibriert. So können auch die im Stundenzeitschritt vorliegenden Ergebnisse des MPI-Modells REMO zur WHM-Simulation verwendet werden.

In Abb. 16 sind die Rangfolgen der höchsten simulierten Abflüsse mit Stunden- und Tageswerten dargestellt. Es zeigt sich, dass die WHM-Simulationen mit den Stundenwerten vergleichbare Ergebnisse wie die Tageswertsimulationen ergeben. Da die Spitzenabflüsse bei Stundenwerten besser erfasst werden, sind die absoluten Abflusswerte allerdings höher. Wie die Verhältnisse zwischen den HQ-Werten des Szenario- und des Kontrolllaufs in Abb. 17 verdeutlichen, liegen bei der Stundenwertsimulation die HQ-Werte des Szenariolaufs häufiger über denen des Kontrolllaufs als bei der Tageswertsimulation. Es werden in der Regel größere Verhältnisse von Szenario- zu Kontrolllauf erreicht. Zudem liegen die Verhältnisse bei den Stundenwerten meist über 1, was die relative Zunahme der HQ-Werte im Szenariolauf belegt. Somit weisen die Ergebnisse bei der REMO-Stundenwertsimulation in die gleiche Richtung wie beim MR-Modell, da auch eine Erhöhung der Hochwasser mittlerer Jährlichkeiten auftritt. Allerdings ist diese Erhöhung bei REMO geringer, aber dafür werden höhere Extremwerte des Abflusses erreicht.

Beim Vergleich der MoMHQ, MoMQ und MoMNQ ergeben sich bei den Stundenwertsimulationen entsprechend höhere absolute Werte als bei den Tageswertsimulationen. Das prinzipielle Verhalten mit einer Zunahme des mittleren Hochwasser-Abflusses (mit Ausnahme des Frühjahrs) zeigt sich bei der Stunden- wie bei der Tageswertsimulation (Abb. 18).

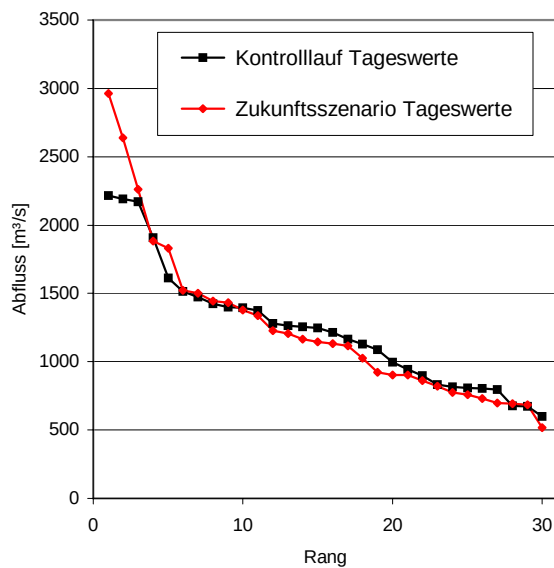


Abb. 15: Der Größe nach sortierte Jahreshöchstwerte der simulierten Abflüsse unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells für den Kontrolllauf und für das Zukunftsszenario.

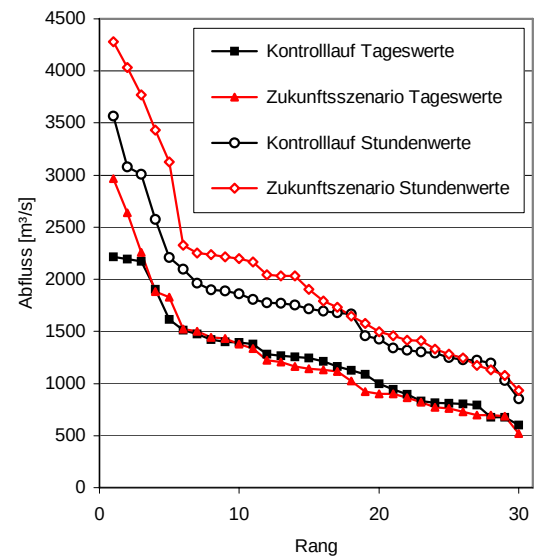


Abb. 16: Vergleich zwischen den ermittelten Rangfolgen des Zukunftsszenarios mit dem Kontrolllauf bei Verwendung von Tages- und Stundenwerten des REMO-Modells

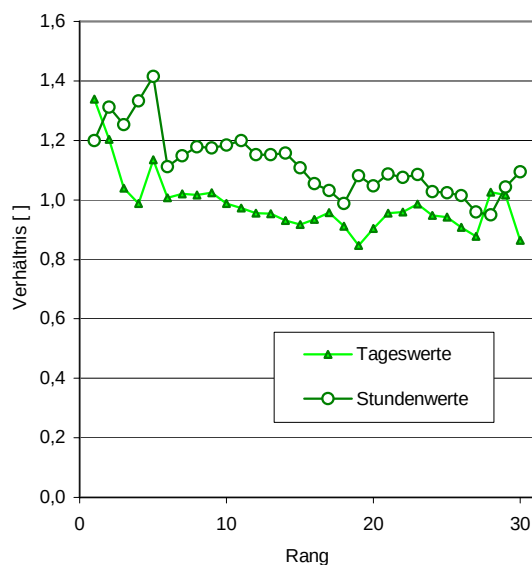


Abb. 17: Verhältnis zwischen den HQ-Werten der Rangfolge des REMO-Szenario- und Kontrolllaufs mit Tages- und mit Stundenwerten

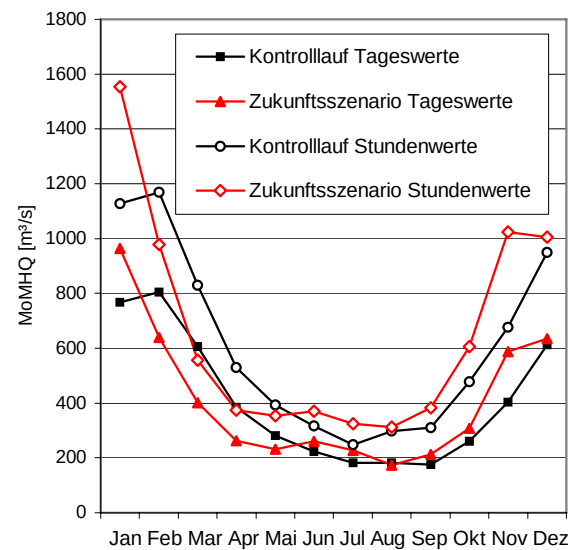


Abb. 18: MoMHQ: simulierte Daten unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells bei Verwendung von Tages- und Stundenwerten

5. Zusammenfassung und Fazit

Die Ergebnisse aus drei unterschiedlichen regionalen Klimamodellen für die Simulation des Ist-Zustands (1971-2000) und des Zukunftsszenarios (2021-2050) werden verwendet, um mit Hilfe des Wasserhaushaltsmodells Neckar auf Grundlage des Programmsystems LARSIM



Aussagen über die Änderung des Abflussverhaltens in Folge der Klimaänderung abzuleiten. Grundlage der drei regionalen Klimamodelle sind die Simulationsergebnisse des Globalen Zirkulationsmodells ECHAM4 T42.

Das Wasserhaushaltsmodell kann die gemessenen Abflüsse bei Verwendung von hydrometeorologischen Messdaten als Eingabegröße gut nachbilden, wie die Simulation über einen vierzigjährigen Zeitraum (1961-2000) zeigt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass in der Modellkette Klimamodell-Wasserhaushaltsmodell durch das Wasserhaushaltsmodell die Unschärfe der Ergebnisse nicht deutlich vergrößert wird.

Bevor die Ausgabedaten der regionalen Klimamodelle im Wasserhaushaltsmodell als Eingabedaten verwendet werden, sind diese auf die hohe räumliche Auflösung des Wasserhaushaltsmodells (1 x 1 km²-Raster) umzurechnen. Für den Niederschlag werden dazu Regionalisierungsverfahren unter Verwendung von Hintergrundfeldern angewandt. Alle anderen Klimagrößen werden mit einem Inversen-Distanz-Verfahren interpoliert.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse des Wasserhaushaltsmodells sind die relativen Unterschiede zwischen den Ergebnissen für den simulierten Ist-Zustand und für das Zukunftsszenario zu vergleichen, um systematische Modellfehler zu minimieren. Zudem sind die Ergebnisse des Wasserhaushaltsmodells im statistischen Sinne (z.B. mittlere monatliche Abflüsse, Rangfolgen) auszuwerten.

Die Ansätze der drei Klimamodelle werden wie folgt eingeschätzt:

- Das PIK-Modell kann auf Grund der systematischen Schwächen des derzeit vorliegenden Verfahrens (v.a. mangelnde Persistenz) nur als bedingt geeignet angesehen werden, weswegen es nicht weiter betrachtet wird.
- Die Simulation des Ist-Zustands zeigt beim MR-Modell eine hohe Übereinstimmung mit den Messdaten. Das Modell stellt für das Zukunftsszenario mehrere Simulationsergebnisse zur Verfügung. Dadurch wird die Schwankungsbreite der Ergebnisse besser einschätzbar und es kann ein repräsentativer Lauf ausgewählt werden. Durch die Simulation von häufigeren extremen Wetterlagen ist die Entstehung von neuen Extrema mit diesem statistischen Verfahren in gewissen Maßen möglich. Allerdings werden in dem Verfahren auch gewisse Faktoren und Annahmen für die Berechnung des Zukunftsszenarios verwendet, die nicht nachvollziehbar und somit subjektiv sind.
- Der REMO-Validierungslauf stimmt recht gut mit den Messdaten überein und zeigt die Eignung des Modells zur regionalen Klimamodellierung. Der REMO-Kontrolllauf, bei dem der Randantrieb des Modells mit den zu feuchten Ergebnissen des ECHAM4 T42 erfolgt, weist jedoch hohe Abweichungen zu den Messwerten auf. Hier ist der relative Vergleich der Modellergebnisse zwischen Kontrolllauf und Zukunftsszenario besonders wichtig, da dadurch der zu feuchte Randantrieb durch das ECHAM4 als systematischer Fehler minimiert wird. Von allen drei Klimamodellen pausen sich Modellunsicherheiten beim ECHAM4 bei der dynamischen Modellierung am stärksten auf die Simulationsergebnisse durch.

Vorteilhaft ist, dass REMO als einziges der drei Klimamodelle Daten in Stundenzeitschritten zur Verfügung stellen kann.

Als Fazit aus den Abflusssimulationen mit dem MPI-Modell und dem MR-Modell am Beispiel des Pegels Rockenau/Neckar ergibt sich:

- Niedrigwasser: Für das Neckargebiet ergibt sich bei beiden Modellen für das Zukunftsszenario keine Verringerung der Niedrigwasser-Extremwerte, wie die Untersuchung der NQ-Rangfolgen zeigt. Auch die mittleren Abflüsse in den Sommermonaten nehmen nicht ab (Abb. 6 und 12). Dies zeigt sich zusammenfassend auch in Abb. 19, in der die Ver-

hältnisse der monatlichen mittleren Niedrigwasserabflüsse von Szenario- zu Kontrolllauf für beide Modelle aufgetragen sind. Für REMO ergeben sich zwar im Frühjahr Verhältnisse deutlich kleiner 1, aber in der sommerlichen Niedrigwasserperiode liegen die Verhältnisse nahe 1.

Auf Grundlage der bisherigen Modellergebnisse scheint demnach eine zukünftige Zuspitzung der Niedrigwasserproblematik weniger wahrscheinlich. Allerdings wird bei dieser Untersuchung nur der Zeitraum bis 2050 betrachtet, so dass durch vermutlich weiter ansteigende Temperaturen nach 2050 eine Verschärfung der Niedrigwassersituation möglich ist.

- Hochwasser: Bei beiden Modellen ist eine Zunahme der mittleren Winterhochwasser erkennbar (Abb. 7 und 13). Beim MPI-Modell ist die relative Erhöhung der mittleren Winterhochwasser zwischen Kontroll- und Szenariolauf nicht so stark ausgeprägt. Dies zeigt sich auch im Verhältnis zwischen Szenario- und Kontrolllauf (Abb. 19). Dafür nehmen einzelne Hochwasser-Extreme im MPI-Modell deutlicher zu (Abb. 14 und 15). Dies zeigt sich v.a. bei Betrachtung der Ergebnisse der Stundenwert-Simulationen (Abb. 16), wobei auch eine Erhöhung der Abflüsse mittlerer Jährlichkeiten erkennbar ist. Beim MR-Modell dagegen ergibt sich eine sehr deutliche Erhöhung der mittleren Winterhochwasser (Abb. 19). Hier nehmen die Hochwasser-Extreme mittlerer Jährlichkeiten besonders stark zu (Abb. 9 und 10).

Zusammenfassend zeigt sich, dass Wasserhaushaltsmodelle geeignete Werkzeuge sind, um in Kombination mit regionalen Klimamodellen die Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt abzuschätzen. Auf Grund der Ergebnisse der WHM-Simulationen sowohl mit den Daten des statistischen MR-Modells als auch mit denen des dynamischen MPI-Modells kann davon ausgegangen werden, dass die Hochwassergefahr für das Neckargebiet zunimmt.

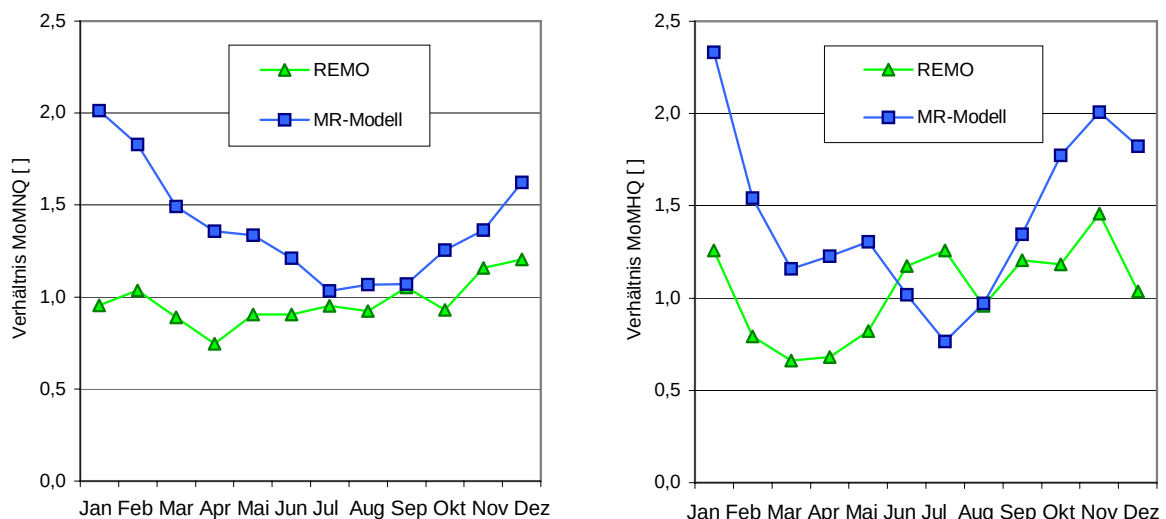


Abb. 19: Verhältnis zwischen Szenariolauf und Kontrolllauf mit den simulierten Daten aus dem WHM unter Verwendung der Klimadaten des REMO-Modells und des MR-Modells für die MoMNQ (links) und die MoMHQ (rechts)

Daher erscheint eine rechtzeitige Adaptation an mögliche höhere Wasserstände in diesem Gebiet in Folge der Klimaänderung ratsam.



Vorgesehen sind in nächster Zukunft regional differenziertere Auswertungen durch Anwendung der Wasserhaushaltsmodelle mit den Klimaszenarien als Eingabewerte in verschiedenen Einzugsgebieten in Baden-Württemberg. Darüber hinaus ist die Analyse weiterer Ausgabegrößen der Wasserhaushaltsmodelle (flächenhafte Werte wie Verdunstung, Schneedecke, Grundwasser-Neubildung, etc.) geplant.

6. Literatur

- Andréasson J., Bergström S., Carlsson B., Graham L.P., Lindström G. (2004): Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33 No. 4-5, Royal Swedish Academy of Sciences.
- Bartels H. (2004): Vergleich regionaler Klimaszenarienrechnungen für Süddeutschland – Vorgehensweise und Ergebnisse. *KLIWA-Heft 4*, S.73-86.
- Bartels H., Katzenberger B., Weber H. (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. - *Wasserwirtschaft Heft 4*, S. 15 - 19
- Bremicker M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Bd. 11, Institut für Hydrologie, Universität Freiburg.
- Dietzer B. (2003): Das Programm INTPRR zur Übertragung von Werten an Stationen auf das Raster von REGNIE. Programm Deutscher Wetterdienst Offenbach (unveröffentlicht).
- Enke W. (2003): Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufes (Szenario B) zur Abschätzung regionaler Klimaveränderungen für Süddeutschland - Abschlussbericht zum Werkvertrag (unveröffentlicht).
- Gerstengarbe F.-W., Werner P.C., Österle H., Zenker T. (2002): Abschlussbericht zum Werkvertrag B.-Nr. 10029524/13 (unveröffentlicht).
- Gerlinger K., Bremicker M., Haag I. (2003): Echtzeit-Vorhersagen des Abflusses mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM am Beispiel des Neckargebiets. – In: Kleeberg, H. (Hrsg.): *Klima, Wasser, Flussgebietsmanagement im Lichte der Flut*, Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 4.2003, S. 163 – 166.
- Ihringer J. (2004): Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasserstatistik. *KLIWA-Heft 4*, S. 153-168.
- IPCC (2000): *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge University Press, Cambridge
- Jacob D., Bülow K., Milliez M. (2003): Dynamische und statistische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1.1 ‚Klimaszenarien‘ - *KLIWA-Abschlussbericht Mai 2003* (unveröffentlicht).
- Kleinn J. (2002): *Climate Change and runoff statistics in the Rhine basin: a process study with a coupled climate – runoff model*. Dissertation ETH Zürich No. 14663
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2003a): Überprüfung der Repräsentativität der in KLIWA verwendeten Klimastationen für das Neckar-Einzugsgebiet. Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (2003b): Vorschlag zur Umsetzung der Klimaszenarien in Wasserhaushaltsmodellen Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht).
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) und Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW) (2003): Regionenspezifische Auswertung der KLIWA-Klimaszenarien. Untersuchungsbericht des Ingenieurbüros Dr. Ludwig, Karlsruhe (unveröffentlicht).

Simulation des Wasserhaushalts für das Obere Maingebiet

Esther Barth², Tibor Molnar¹, Halvor Øverland²

¹Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

²Dr. Blasy – Dr. Øverland Beratende Ingenieure GbR, Eching am Ammersee

1. Veranlassung

In dem Vorhaben Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft (KLIWA) der Länder Bayern und Baden-Württemberg sowie des Deutschen Wetterdienstes wird das Auftreten einer Klimaänderung und die möglichen Auswirkungen auf den Wasserhaushalt untersucht. Auf diese Fragestellung hin werden zum einen langjährig beobachtete Klimadaten ausgewertet und zum anderen Szenarien mit deterministischen Modellen berechnet. Das Bayerische Landesamt für Wasserwirtschaft untersucht federführend die Flusseinzugsgebiete in Bayern. Als Instrumentarium wird hierfür das Wasserhaushaltsmodell ASGi (Becker et al., 1998) eingesetzt.

In diesem Zusammenhang wird für das Flussgebiet Oberer Main ein Wasserhaushaltsmodell für das Programmsystem ASGi auf der Grundlage von digitalen Geländedaten, Landnutzungsdaten und Bodendaten erstellt. Anhand von gemessenen Zeitreihen im Tagesintervall (Niederschlag, Abfluss, Temperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte, Luftdruck und Sonnenscheindauer) wird das Modell kalibriert. Mit dem angepassten Modell werden die Wasserhaushaltskomponenten für Klimaszenarien mit Voraussagen für die Zukunft des Instituts für Klimaforschung Potsdam, der Firma Meteo-Research Stahnsdorf und des Max-Planck-Instituts Hamburg berechnet.

2. Beschreibung des Einzugsgebiets

Das Flussgebiet Oberer Main, das in der Abb. 2.1 dargestellt ist, liegt zum überwiegenden Teil in dem Regierungsbezirk Oberfranken. Als oberes Einzugsgebiet grenzt es im westlichen Norden an die Hauptwasserscheide zum Flussgebiet der Weser und im östlichen Norden an die Hauptwasserscheide zum Flussgebiet der Elbe. Die Größe des Einzugsgebiets beträgt etwa 4440 km², mit einer größten Ausdehnung in der Ost-West-Richtung von 90 km und in der Nord-Süd-Richtung von 70 km (LfW, 1978). Das Gebiet liegt zu etwa 75% auf einer Höhe von 200 - 500 m +NN. Die restlichen Gebietsfläche von etwa 25% ist eine Bergregion zwischen 500 - 850 m +NN. Im Fichtelgebirge wird eine maximale Höhe von 1040 m +NN erreicht. Das Gebiet ist mit 5% dünn besiedelt. Etwa 50% der Gebietsfläche wird landwirtschaftlich genutzt, 30% besteht aus Waldfläche. Die überwiegend anzutreffende Bodenart ist Braunerde.

Das Hauptgewässer ist der Oberlauf des Mains, der durch den Zusammenfluss des Roten und des Weißen Mains gebildet wird, mit einer Fließstrecke bis zu Mündung der Regnitz von 71 km. Der Weiße Main hat seinen Ursprung im Fichtel-Gebirge, in dem die höchsten Niederschläge des Einzugsgebiets auftreten. Bei Schwüritz mündet die Rodach, das zweitgrößte Gewässer des Einzugsgebiets, in den Main. Die Rodach entspringt in dem niederschlagsreichen Frankenwald. Bei Kemmern münden die Itz und die Baunach in den Main. Die mittleren jährlichen Niederschlagshöhen betragen zwischen 700 mm in den nordwestlichen und 1500 mm in den östlichen Gebietsteilen.

Am Pegel Kemmern, nahe des Gebietsausgangs, weist der Main einen mittleren Abfluss von $MQ = 43,7 \text{ m}^3/\text{s}$ und einen mittleren Höchstabfluss von $MHQ = 355 \text{ m}^3/\text{s}$ auf. Im Jahr 1967 wurde der höchste im Zeitraum 1931 bis 2003 beobachtete Abfluss von $HQ = 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ er-

reicht. Der mittlere Niedrigwasserabfluss beträgt $MNQ = 9,85 \text{ m}^3/\text{s}$, wobei der niedrigste Abfluss von $NQ = 3,10 \text{ m}^3/\text{s}$ im Jahre 1934 aufgetreten ist (Lfw, 1997).

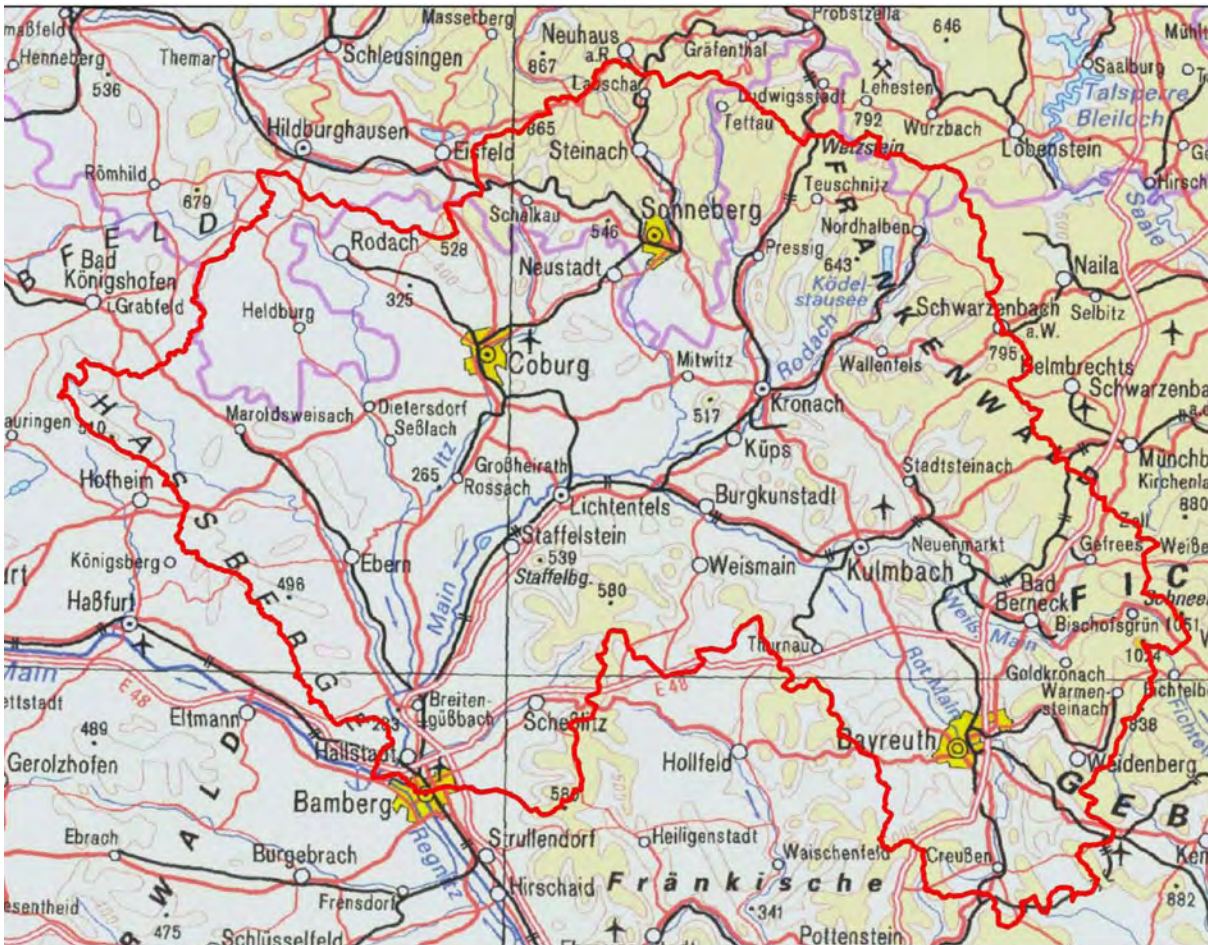


Abb. 2.1: Einzugsgebiet des Oberen Mains

3. Modellstruktur

Mit dem Wasserhaushaltsmodells ASGi werden die maßgeblichen Niederschlag-Abfluss-Prozesse weitgehend physikalisch, aber auch mit konzeptionellen Ansätzen bei unzureichender Datenlage, nachgebildet. Das Gebiet wird durch regelmäßige Raster beschrieben, für welche die lateralen und vertikalen Wasserflüsse berechnet werden. Der Gesamtabfluss wird zum Gebietsauslass durch Translation und anschließender Retention verschoben. In der Abb. 3.1 ist die Modellstruktur schematisch dargestellt.

4. Datengrundlage

4.1 Gebietsdaten

Die Gebietsdaten, mit denen das Wasserhaushaltsmodell des Oberen Mains beschrieben wird, werden abgeleitet aus Rasterdaten mit einer Zellweite von $50 \times 50 \text{ m}$, den sogenannten Datenrastern.

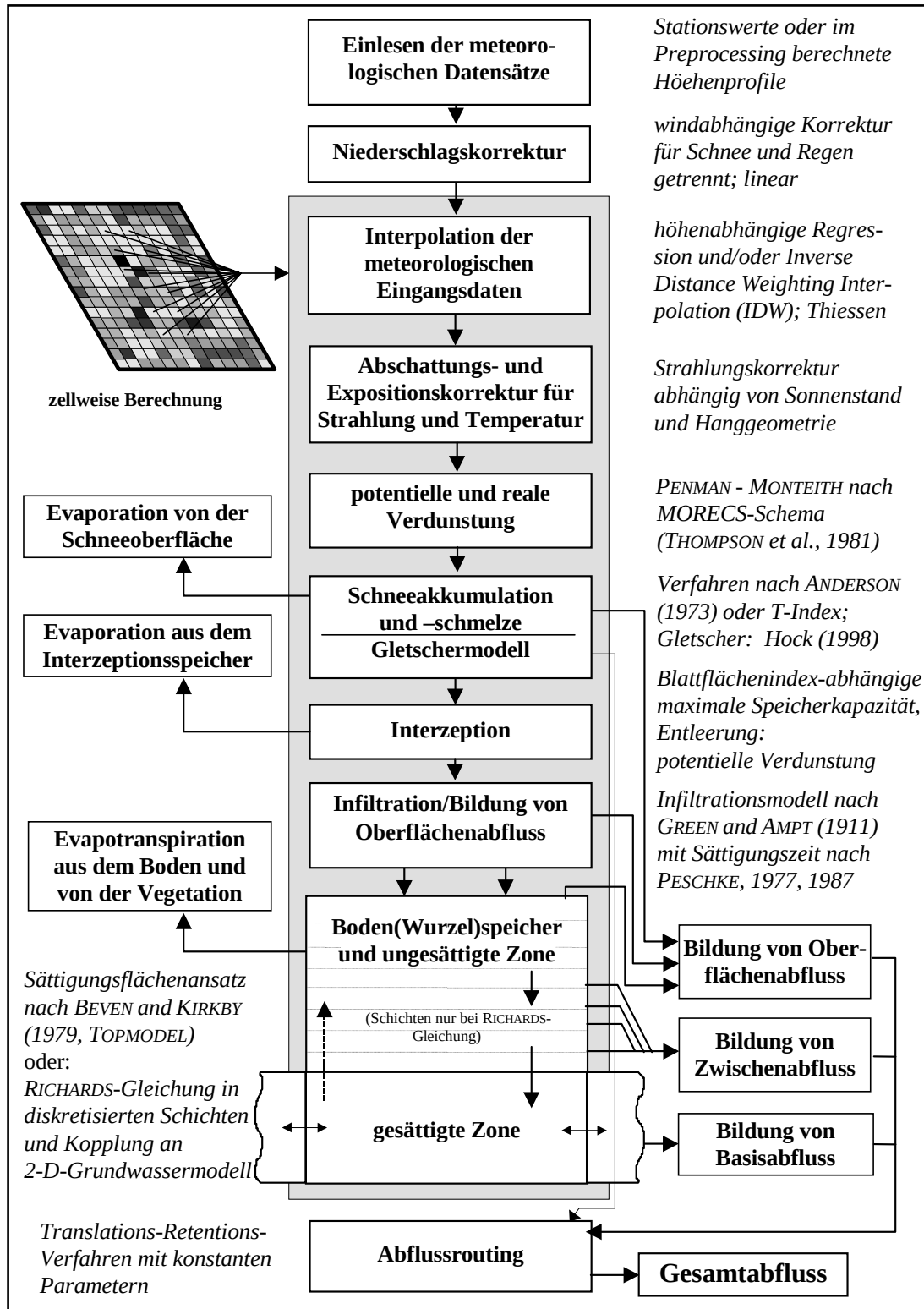


Abb. 3.1: Struktur des Wasserhaushaltsmodells ASGi

Folgende Datenraster werden zum Modellaufbau herangezogen:

- Digitales Geländemodell DGM 25
- Digitale Landnutzungsdaten aus dem Corine Projekt für Deutschland
- Bodenartdaten für Bayern aus der Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 1 000 000 (BÜK 1000)

Über Zuordnungstabellen werden den Landnutzungen und Bodenarten die Werte der Parameter zugewiesen, die von den Algorithmen des Wasserhaushaltsmodells benötigt werden. Für die Landnutzung sind dies unter anderem das Albedo, die Monatswerte der Oberflächenwiderstände sowie der Blattflächenindex, die effektive Bewuchshöhe, der Vegetationsbedeckungsgrad, und die Wurzeltiefe an vier bestimmten Tagen im Jahr, zwischen denen durch lineare Interpolation Tag für Tag die genannten Größen ermittelt werden. Bodenartabhängige Parameter sind beispielsweise die nutzbare Feldkapazität, der maximale nutzbare Bodenwassergehalt, die hydraulische Leitfähigkeit und die Saugspannung an der Feuchtf front.

Aus den Datenraster, die in Abbildung 4.1 bis Abbildung 4.3 dargestellt sind, werden die weiteren Gebietsdaten, die für die Simulation des Wasserhaushalts erforderlich sind, abgeleitet, wie zum Beispiel das Gewässernetz, die Pegeleinzugsgebiete an vorgegebenen Pegelstandorten, das Gefälle, der topographischer Faktor, die Expositionsrichtung, die Fließzeitsummen, die nutzbare Feldkapazität und die hydraulische Leitfähigkeit.

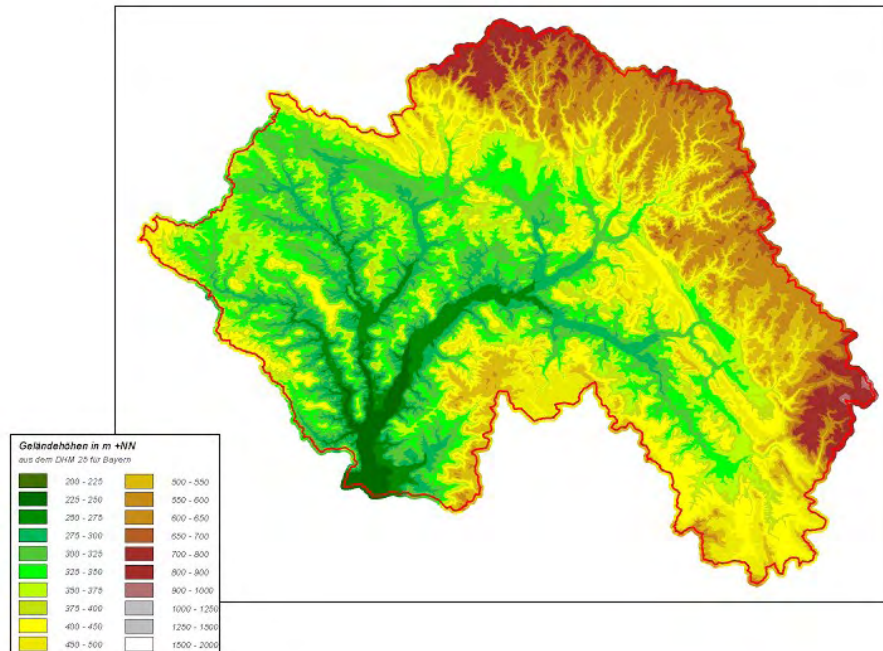


Abbildung 4.1: Digitales Geländemodell vom Einzugsgebiet des Oberen Mains.

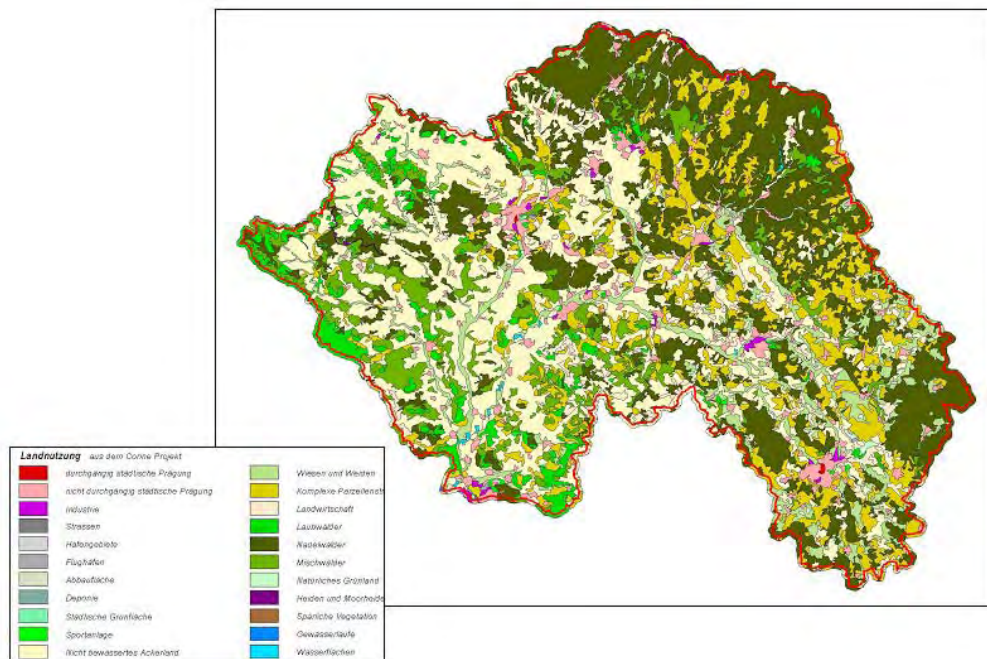


Abbildung 4.2: Landnutzung im Einzugsgebiet des Oberen Mains

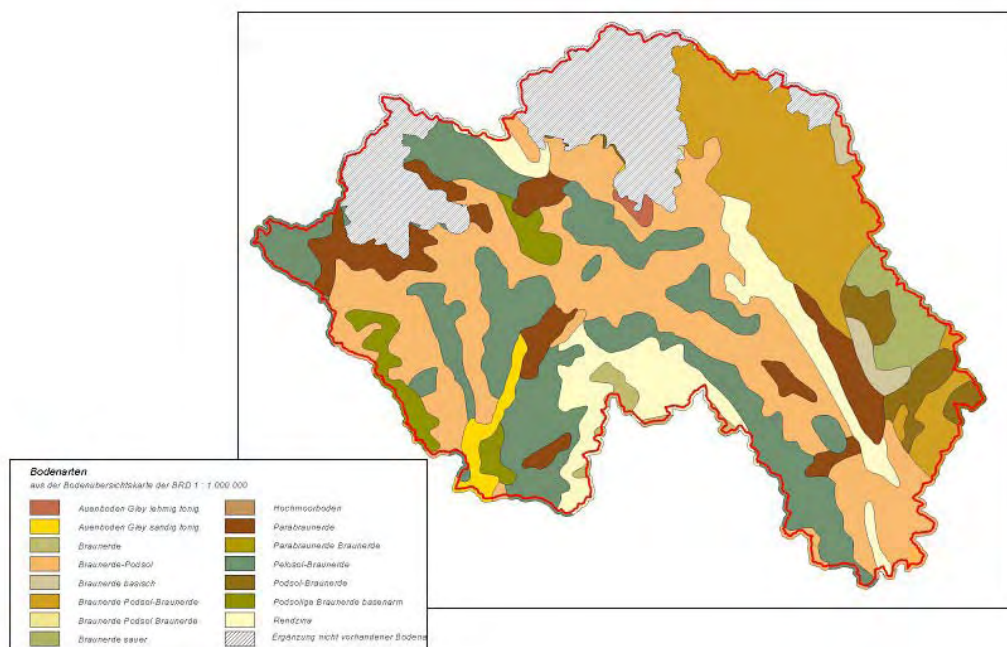


Abbildung 4.3: Geologie im Einzugsgebiet des Oberen Mains

4.2 Zeitreihendaten

Für die Simulation des Wasserhaushalts werden folgende meteorologische Daten in das Modell aufgenommen mit Messungen im Tagesintervall:

- Niederschlag
- Luftdruck
- Lufttemperatur
- Relative Luftfeuchte
- Sonnenscheindauer
- Windgeschwindigkeit

Die Daten erstrecken sich über den Zeitraum 1961 – 1990. Niederschlagsmessungen stehen von 89 Tagesstationen zur Verfügung. Messungen der übrigen meteorologischen Daten sind je nach Datenart für 6 bis 24 Stationen vorhanden. Die geographische Lage der Messstationen kann der Abbildung 4.4 entnommen werden.

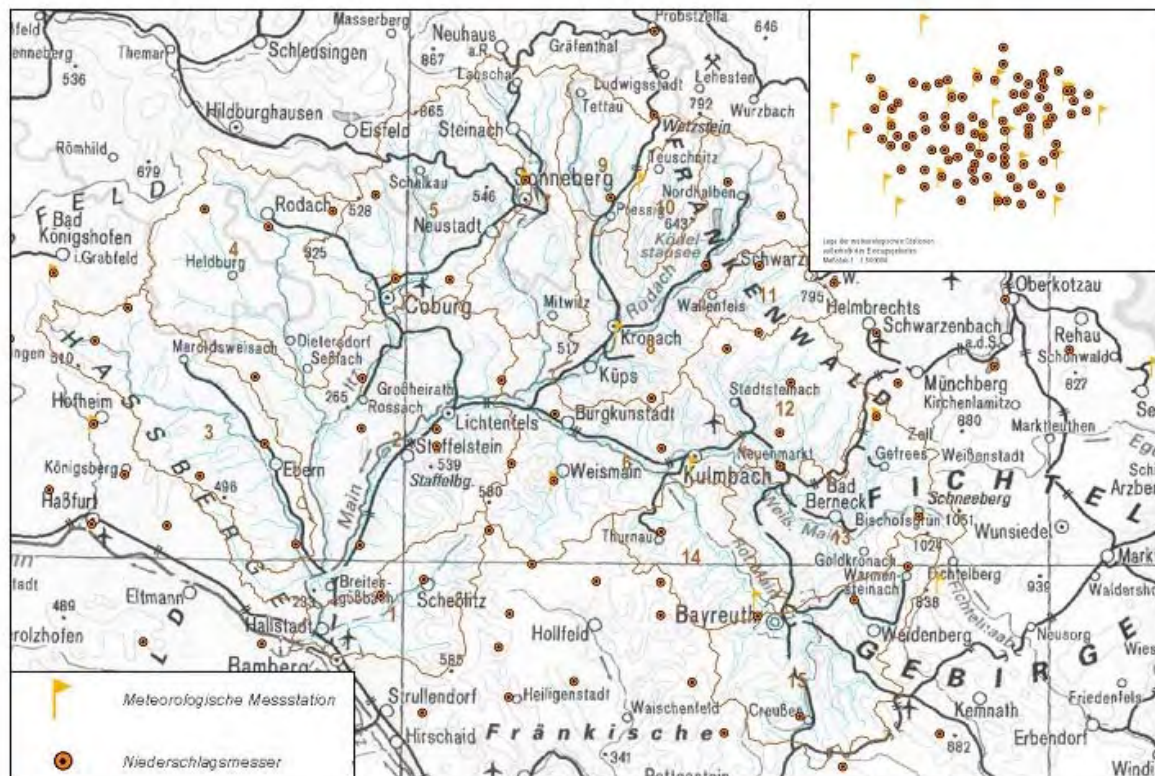


Abbildung 4.4: Messstationen im Einzugsgebiet des Oberen Mains.

Die Niederschlagsdaten sind von Fehlern durch Wind-, Benetzungs- und Verdunstungsverluste mit dem Richterverfahren korrigiert. Mit diesen Niederschlagsdaten ergibt sich durch räumliche Interpolation in Abhängigkeit des Entfernungsreziproks (IDW-Methode) eine räumliche Verteilung der mittleren jährlichen Niederschlagssumme für den Zeitraum 1961 - 1990, wie sie in der Abbildung 4.5 zu sehen ist.

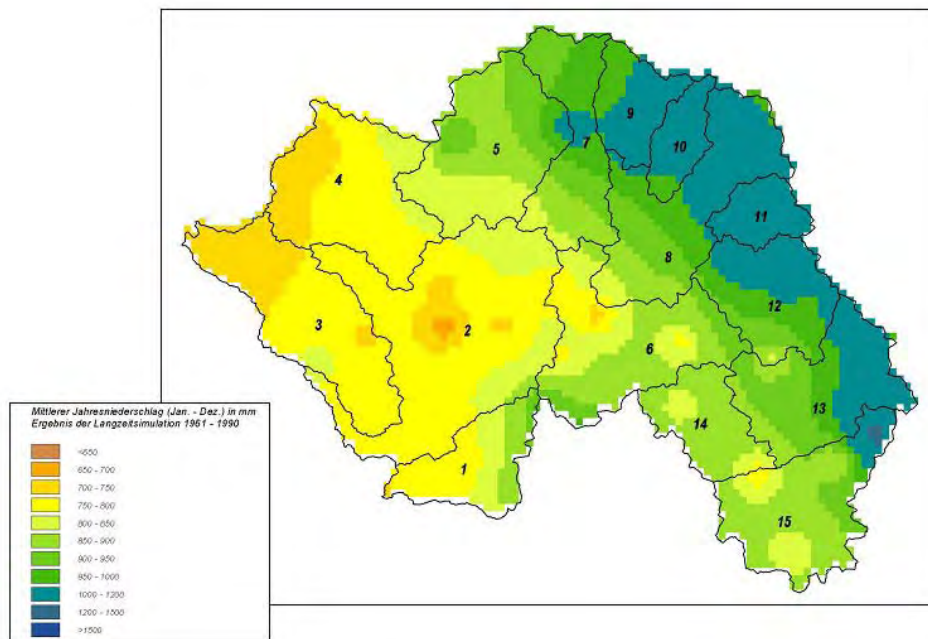


Abbildung 4.5: Mittlere jährliche Niederschlagssummen von 1961 – 1990 im Einzugsgebiet des Oberer Mains.

Für die Modellkalibrierung und Verifizierung werden Abflussmessungen im Tagesintervall von 14 Pegeln herangezogen. Für jeden Pegel wird das zugehörige Pegel-einzugsgebiet gebildet, an dessen Ausgangspunkt die simulierten Abflüsse ausgegeben werden, so dass an jedem Pegelstandort die simulierte Abflussganglinien mit der gemessenen verglichen werden kann. Die Abbildung 4.6 stellt die verwendeten Pegel mit den zugehörigen Pegel-einzugsgebieten dar.

Das Einzugsgebiet ist in 15 Teileinzugsgebiete unterteilt. Davon sind 10 Teileinzugsgebiete Kopfgebiete, die restlichen 5 Teileinzugsgebiete sind Zwischengebiete. Der Gebietsbeginn der Teileinzugsgebiete 2 bis 15 entspricht jeweils einem Pegelstandort. Der Gebietsbeginn von Teileinzugsgebiet 1 ist der Anfang des Einzugsgebiets Oberer Main, weist aber keinen Pegel auf.

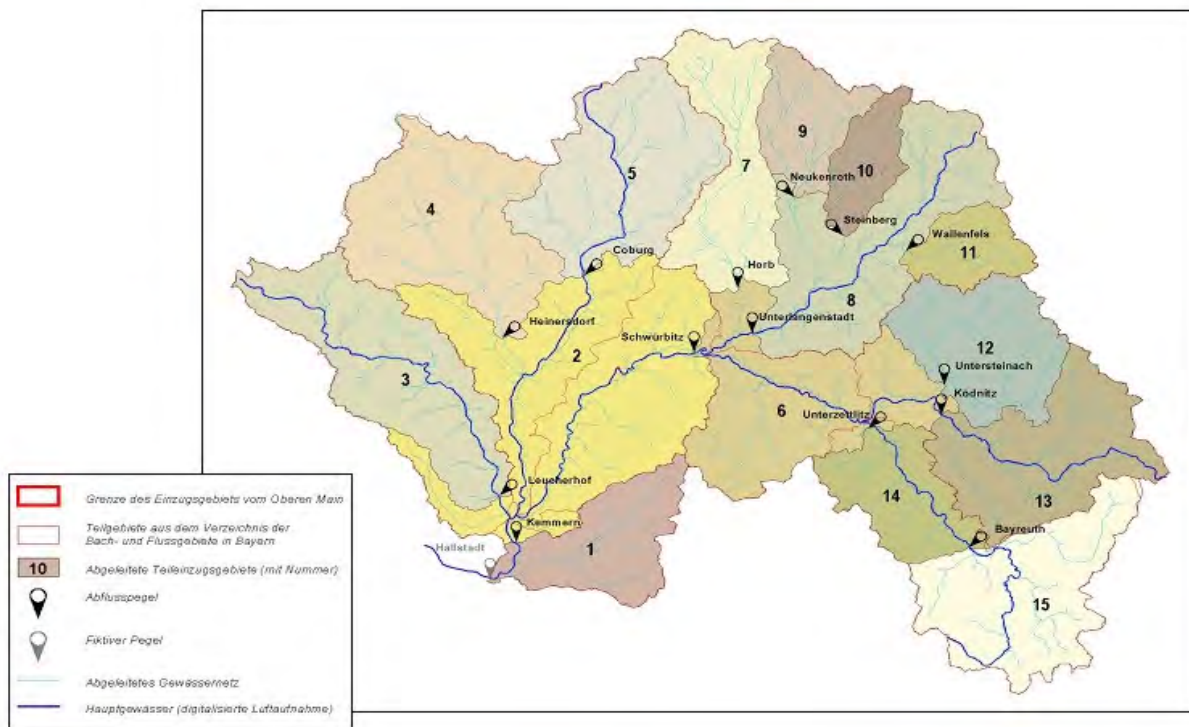


Abbildung 4.6: Pegeleinzugsgebiete des Wasserhaushaltsmodells Oberer Main.

5. Modellkonfiguration

Die Kalibrierung und Verifizierung des Wasserhaushaltsmodells wird mit der folgenden Modellkonfiguration vorgenommen.

- | | |
|---------------------------|---------------------------------------|
| • Zeitschritt: | 1 Tag |
| • Rasterweite: | 1000 m |
| • Niederschlagskorrektur: | keine (Daten sind bereits korrigiert) |
| • Verdunstungsmodell: | Penman-Monteith |
| • Schneemodell: | Temperaturindex |
| • Interzeptionsmodell: | Speicheransatz nach MORECS |
| • Infiltrationsmodell: | Zweistufenmodell nach Peschke |
| • Bodenmodell: | TOPMODELL |

Abflussroutingmodell: Translation, anschließende Retention (Linearspeicher)

Die Regression der Niederschlagsdaten auf die Rasterflächen erfolgt mit abstandsgewichteter Interpolation. Die anderen meteorologischen Messgrößen werden durch eine Kombination aus abstandsgewichteter Interpolation und höhenabhängiger Regression auf die Rasterflächen übertragen.

6. Kalibrierung

6.1 Vorgehensweise

Bei der Kalibrierung wird für jedes Pegeleinzugsgebiet ein eigener Parametersatz für das Bodenmodell gesucht, so dass die simulierten Abflüsse möglichst gut mit den gemessenen übereinstimmen. Da das Wasserhaushaltsmodell für die kontinuierliche Simulation der Wasserhaushaltsgrößen herangezogen werden soll, wird besonderes Augenmerk auf die Anpassung des Mittelwasser- und Niedrigwasserabflusses gelegt. Hochwasserscheitelabflüsse werden nicht vorrangig angepasst. Die Anpassung erfolgt sowohl durch optischen Vergleich der gemessenen und berechneten Abflussganglinien als auch durch Optimierung der Gütewerte, insbesondere des logarithmische Bestimmtheitsmasses $\log. R^2$.

Die Kalibrierung erfolgt über den Zeitraum 01.09.1977 bis 31.10.1979. Dieser Zeitraum wird repräsentativ für den Gesamtzeitraum angesehen, da er Niedrigwasser im Sommer und Mittelwasser im Winter aber kein extremes Hochwasser beinhaltet. Es wird erwartet, dass die Modellparameter, die für diesen Zeitraum ermittelt werden, repräsentativ für den gesamten Zeitraum sind. Die Messdaten weisen in diesem Zeitraum keine Lücken auf. Die Kalibrierung wird für 12 Pegeleinzugsgebiete statt der vorhandenen 14 durchgeführt, da die Abflussmessungen zweier Pegel unplausible Ganglinien liefern.

6.2 Simulationsergebnisse

In der Abbildung 6.1 ist die berechnete Abflussganglinie am Pegel Kemmern, dem untersten Pegel des Untersuchungsgebiets, der gemessenen Abflussganglinie gegenübergestellt. Es ist zu sehen, dass der Verlauf der gemessenen Abflüsse gut durch die berechneten Abflüsse nachgebildet wird.

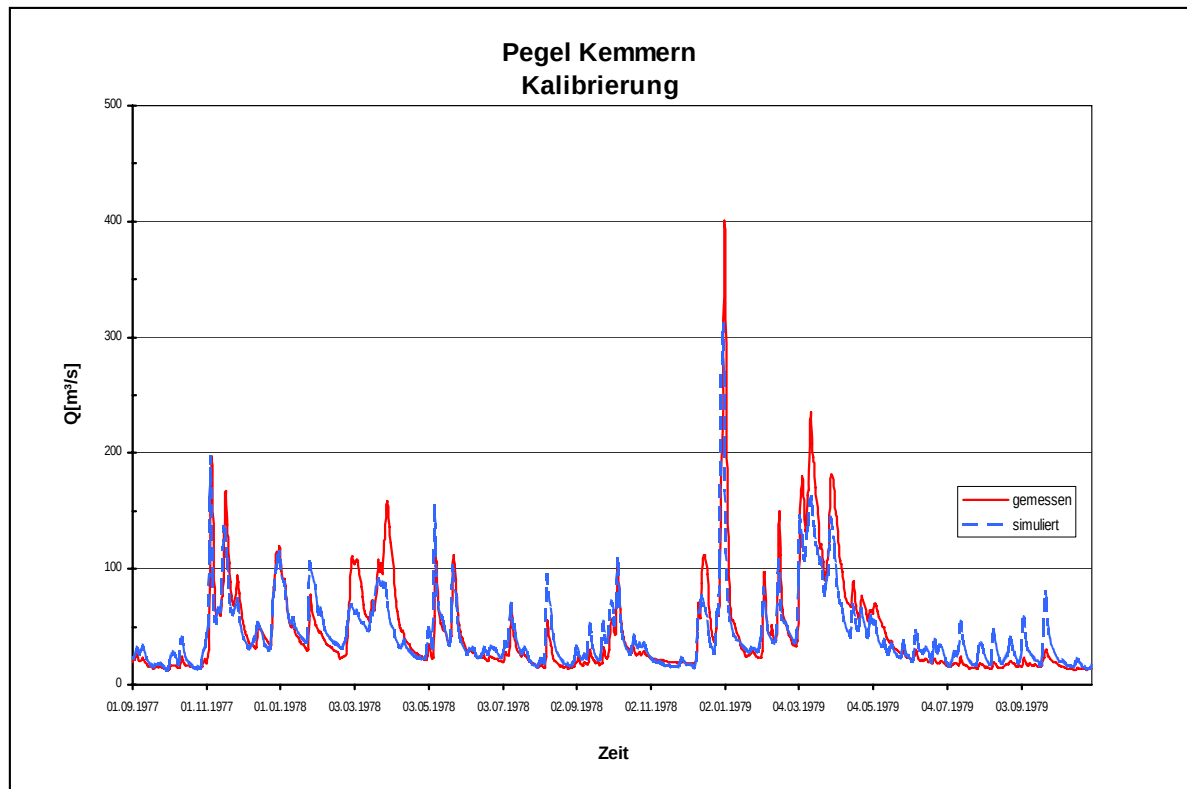


Abbildung 6.1: Berechnete und gemessene Abflüsse am Pegel Kemmern, Kalibrierung.



Die Gütewerte sowie die Bilanz vom simulierten bezogen auf das gemessene Abflussvolumen über den gesamten Kalibrierungszeitraum sind in der Tab. 6.1 zusammengefasst.

Tabelle 6.1: Gütewerte der Kalibrierung

Pegel	Teileinzugsgebiet	A _E GKJ [km ²]	Bilanz sim / gem	lin.R ²	log.R ²
Kemmern	2	4251	0,97	0,82	0,81
Leucherhof	3	383	0,93	0,59	0,76
Heinersdorf	4	378	0,93	0,57	0,77
Coburg	5	365	1,00	0,69	0,62
Schwürlitz	6	2424	0,97	0,84	0,80
Horb	7	255	0,98	0,70	0,64
Unterlangenstadt	8	713	0,98	0,77	0,62
Neukenroth	9	139	1,00	0,77	0,56
Steinberg	10	95	0,97	0,67	0,47
Untersteinach	12	245	0,88	0,76	0,80
Ködnitz	13	313	0,98	0,78	0,82
Bayreuth	15	333	0,99	0,81	0,82

Das logarithmische Bestimmtheitsmaß, das aussagekräftig für die Bewertung des Abflusskontinuums ist, liegt in dem Wertebereich von 0,47 bis 0,82. Eine Simulation ist als akzeptabel zu bewerten, wenn sie ein Bestimmtheitsmaß von 0,6 erreicht. Für die Pegel Neukenroth und Steinberg liegt das logarithmische Bestimmtheitsmaß unter 0,6. An den restlichen Pegeln wird ein Bestimmtheitsmaß größer 0,6 erreicht. Damit kann die Qualität der Kalibrierung für die meisten Pegel als akzeptabel bezeichnet werden.

7. Verifizierung

Mit den in der Kalibrierung ermittelten Modellparametern wird eine Langzeitsimulation über den Zeitraum 1.1.1961 – 30.12.1990 durchgeführt, die auch zur Modellverifizierung dienen soll. Die gemessene und berechnete Abflussganglinie am Pegel Kemmern sind in der Abbildung 7.1 aufgetragen. Die Gütewerte sind in der Tabelle 7.1 aufgeführt.

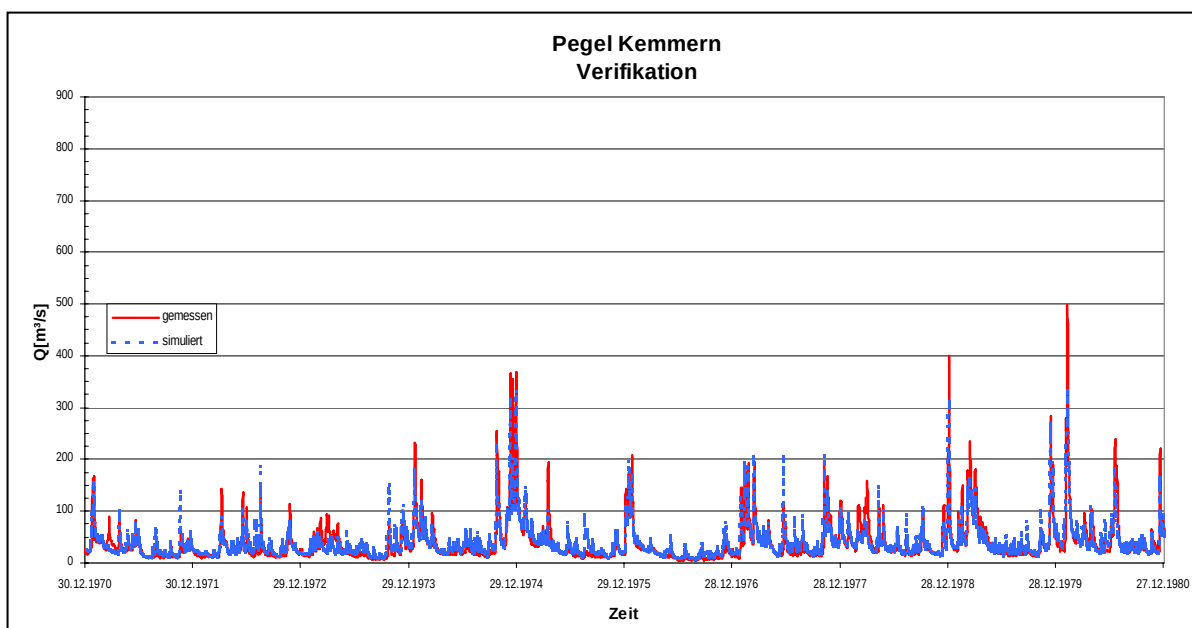


Abbildung 7.1: Berechnete und gemessene Abflüsse am Pegel Kemmern, Verifizierung.

Tabelle 7.1: Gütewerte der Langzeitsimulation.

Pegel	Teileinzugs- gebiet	A _E [km ²]	Bilanz sim / gem	lin.R ²	log.R ²
Kemmern	2	4251	1,0	0,81	0,79
Leucherhof	3	383	1,01	0,67	0,72
Heinersdorf	4	378	0,98	0,59	0,73
Coburg	5	365	0,99	0,68	0,63
Schwürlitz	6	2424	0,99	0,80	0,78
Horb	7	255	0,96	0,69	0,62
Unterlangenstadt	8	713	1,06	0,75	0,61
Neukenroth	9	139	0,97	0,73	0,61
Steinberg	10	95	1,02	0,64	0,54
Untersteinach	12	245	0,96	0,75	0,78
Ködnitz	13	313	1,05	0,72	0,78
Bayreuth	15	333	1,08	0,68	0,71

Auch bei der Langzeitsimulation wird der Verlauf der gemessenen Abflussganglinie akzeptabel wiedergegeben. Die Gütewerte der meisten Pegeln haben sich zwar im Vergleich zur Kalibrierung etwas verschlechtert, doch wird auch in der Langzeitsimulation (abgesehen vom Pegel Steinberg) ein logarithmisches Bestimmtheitsmaß größer 0,6 erreicht. Das lineare Bestimmtheitsmaß nach ASGi bewegt sich zwischen 0,59 und 0,81. Das Verhältnis des simulierten zum gemessenen Abflussvolumen liegt an den verwendeten Pegeln zwischen 96 % und 107 %. Die Ungenauigkeit in einigen oberen Teileinzugsgebieten wird an den nachfolgenden Pegeln kompensiert. Am Pegel Kemmern ist das Verhältnis der Abflussvolumina ausgeglichen.

Das Niveau des Basisabflusses und die mittleren Abflussspitzen werden durch das Modell gut wiedergegeben. Die extremen Abflussspitzen werden dagegen von der Simulation nicht erreicht. Ziel der Kalibrierung war es, Modellparameter zu finden, mit denen die Mittel- und Niedrigabflüsse über den gesamten Kalibrierungszeitraum möglichst gut wiedergegeben werden. Um aber auch über ein Modell zu verfügen, mit dem die Hochwasserscheitelabflüsse nachgebildet werden, wird ein weiteres Wasserhaushaltsmodell für den Oberen Main auf Stundenbasis erstellt, das verstärkt auf den Hochwasserabfluss kalibriert wird.

8. Berechnung von Klimaszenarien

8.1 Verwendete Szenarien

Mit dem angepassten Wasserhaushaltsmodell werden Klimaszenarien der folgenden drei Institute bearbeitet:

- Max-Planck-Institut Hamburg (MPI)
- Firma Meteo-Research Stahnsdorf (Meteo-Research)
- Instituts für Klimaforschung Potsdam (PIK)

Die Klimaszenarien der Institute beruhen auf unterschiedlichen Verfahren. Das Max-Planck-Institut verwendet ein regionales dynamisches Klimamodell. Die Firma Meteo-Research ermittelt die Klimaszenarien mit einem speziellen statistischen Modell anhand von Wetterlagen und auch das Institut für Klimaforschung zieht eine statistische Methode heran.

Für alle Klimaszenarien gelten die gleichen Randbedingungen. Die Modellanpassung erfolgt mit Messdaten ab 1951. Die Verifikation wird für den Zeitraum 1981 – 2000 ausgeführt. Als Eingangsdaten in die Zukunftsszenarien werden der Temperaturtrend, das Emissionsszenario

B2 sowie Szenarien der weiteren Eingangsgrößen aus dem Globalmodell ECHAM 4 ange-
setzt. Der Zeithorizont für das Zukunftsszenario ist 2021 – 2050.

Von den Instituten werden anhand der jeweiligen Verfahren sämtliche für die Wasserhaus-
haltsmodellierung der Klimaszenarien notwendigen Eingangsgrößen wie Niederschlag,
Temperatur, Windgeschwindigkeit und Luftfeuchte an bestimmten Stationen oder Raster-
punkten ermittelt. Beispielhaft werden hier die Niederschläge, als die für den Abfluss wich-
tigste Eingangsgröße, dargestellt. Die Abbildung 8.1 zeigt die räumlichen Verteilungen der
mittleren jährlichen Niederschlagssummen, die sich aufgrund der Zukunftsszenarien (2021 –
2050) ergeben.

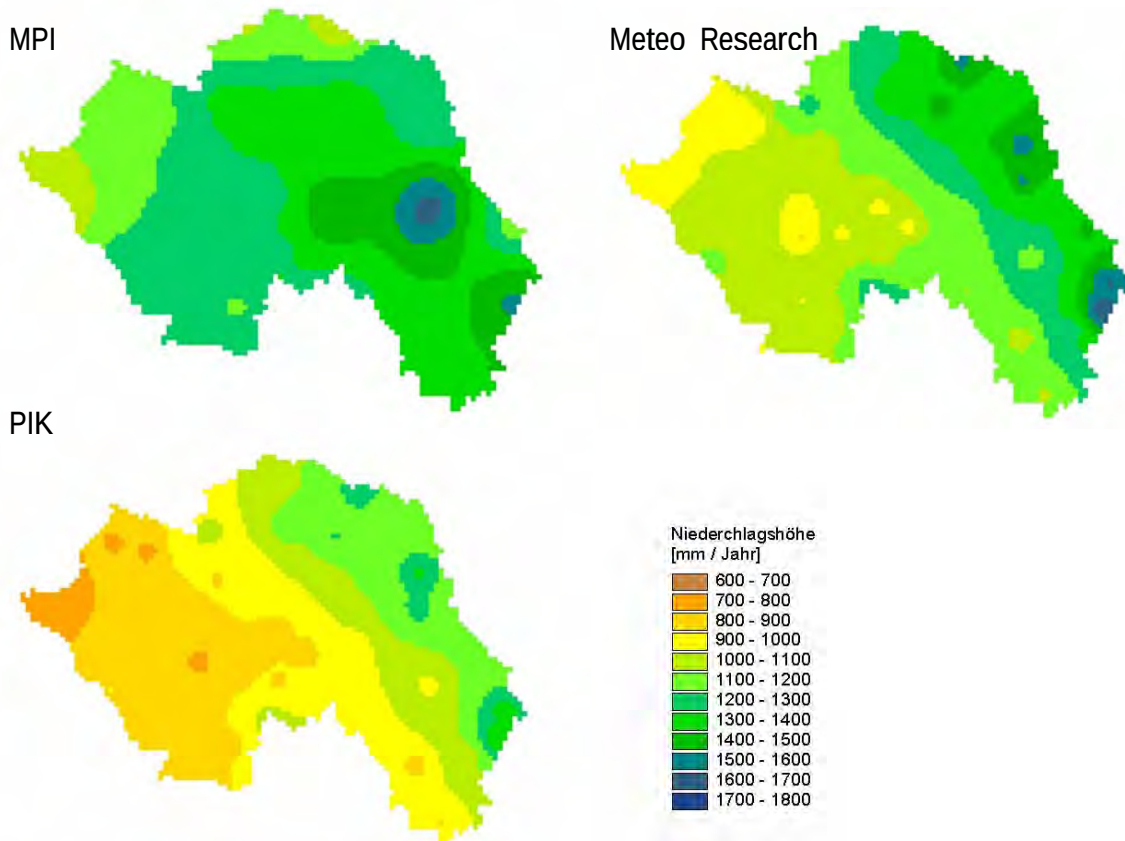


Abbildung 8.1: Mittlere jährliche Niederschlagshöhen aufgrund der Zukunftsszenarien (2021 – 2050) der genannten Institute.

Die Abbildung 8.1 zeigt die Differenz der mittleren jährlichen Niederschlagshöhen ermittelt aus den Daten von Meteo-Research für den Istzustand (1961 – 1990) und den gemessenen Niederschlägen. Es zeigt sich, dass die Niederschläge von Meteo-Research um etwa 10 % höher liegen als die gemessenen.

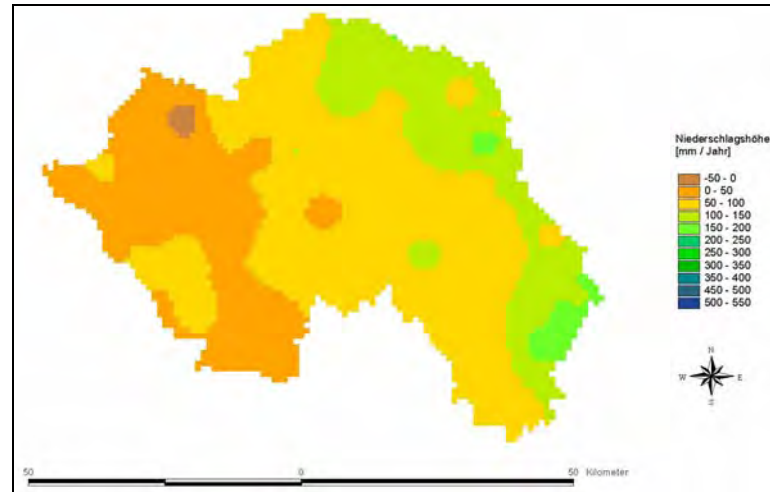


Abbildung 8.2: Differenz der mittleren jährliche Niederschlagshöhen zwischen den Daten von Meteo-Research und den Messwerten.

In der Abbildung 8.3 sind die Differenzen der jährliche Niederschlagshöhen ermittelt aufgrund des Zukunftsszenarios (2021 – 2050) und des Istzustands (1961 – 1990) von Meteo-Research dargestellt. Die Niederschläge des Zukunftsszenarios liegen um etwa 100 bis 250 mm über dem Istzustand.

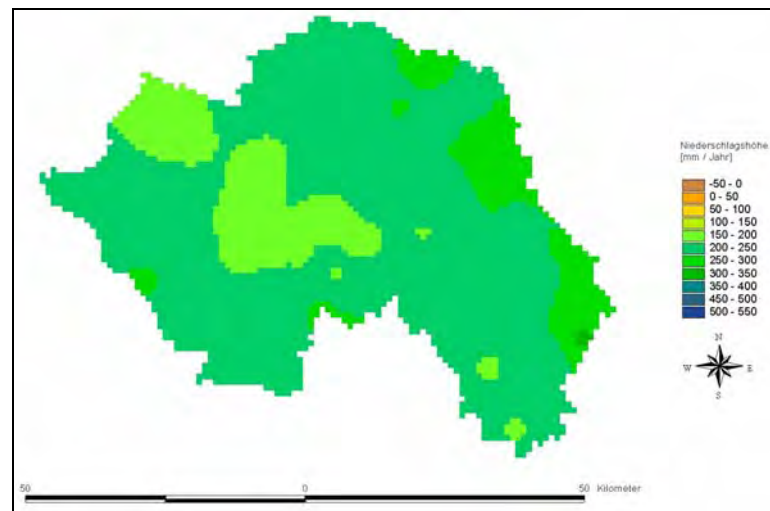


Abbildung 8.3: Differenz der mittleren jährliche Niederschlagshöhen zwischen Zukunftsszenario und Istzustand von Meteo-Research.

8.2 Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen mit den Klimaszenarien

Am Beispiel der Klimaszenarien der Firma Meteo-Research werden die Ergebnisse der Simulation der Klimaszenarien mit dem Wasserhaushaltsmodell vorgestellt. Simuliert wird der Istzustand für den Zeitraum 1961 – 1990 und das Zukunftsszenario für den Zeitraum 2021 – 2050.

Die Abbildung 8.4 zeigt die mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse am Pegel Kemmern. Gegenübergestellt sind die gemessenen Abflüsse, die Ergebnisse der Simulation mit dem Wasserhaushaltsmodell mit gemessenen Niederschlägen und mit Niederschlagsdaten von Meteo-Research für den Istzustand sowie für das Zukunftsszenario. Die simulierten Ab-



flüsse für den Istzustand von Meteo-Research liegen oberhalb der gemessenen und der simulierten mit gemessenen Niederschlägen. Dies liegt daran, dass die Niederschläge für den Istzustand von Meteo-Research höher sind als die gemessenen. Das Zukunftsszenario ergibt gegenüber dem Istzustand von Meteo-Research in den Wintermonaten eine Zunahme der Mittelwasserabflüsse um bis zu 80 %, während in den Sommermonaten eine geringfügige Abnahme zu verzeichnen ist.

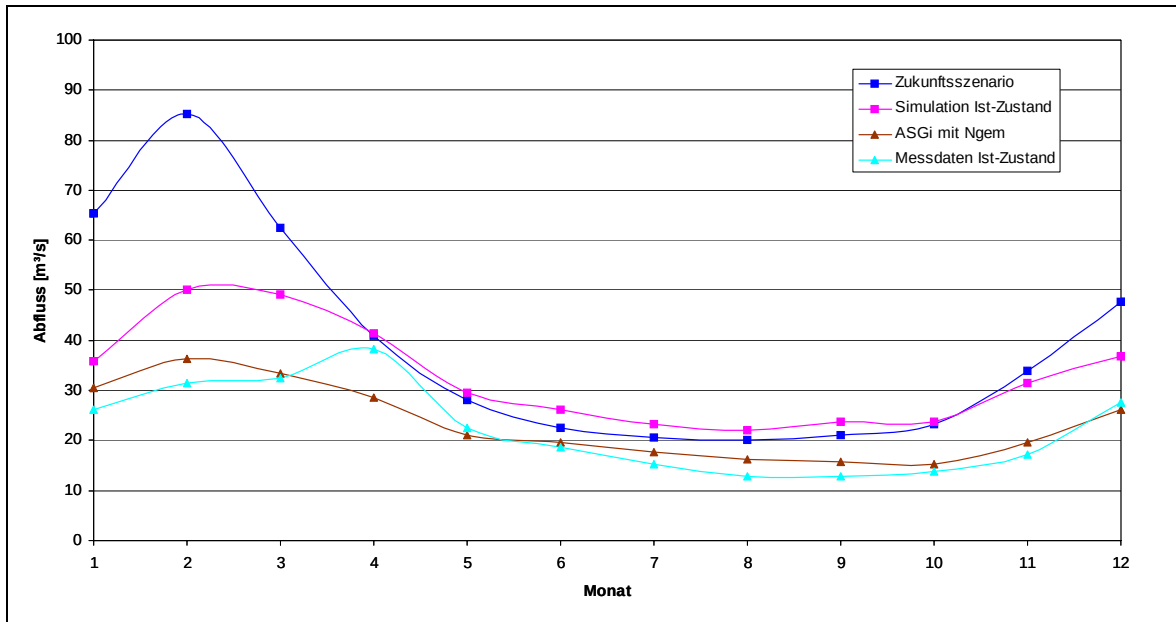


Abbildung 8.4: Vergleich der mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse (MNQ) für den Istzustand und dem Zukunftsszenario von Meteo-Research.

Die mittleren monatlichen Mittelwasserabflüsse sind in der Abbildung 8.5 dargestellt. Wiederum sind die Abflüsse für den Istzustand von Meteo-Research höher als die gemessenen und die simulierten mit gemessenen Niederschlägen. Ähnlich wie bei den mittleren monatlichen Niedrigwasserabflüsse ergeben sich für das Zukunftsszenario in den Wintermonaten bis zu 100 % höhere Abflüsse gegenüber dem Istzustand. Auch hier ist in den Sommermonaten eine geringfügige Abnahme der Abflüsse zu verzeichnen.

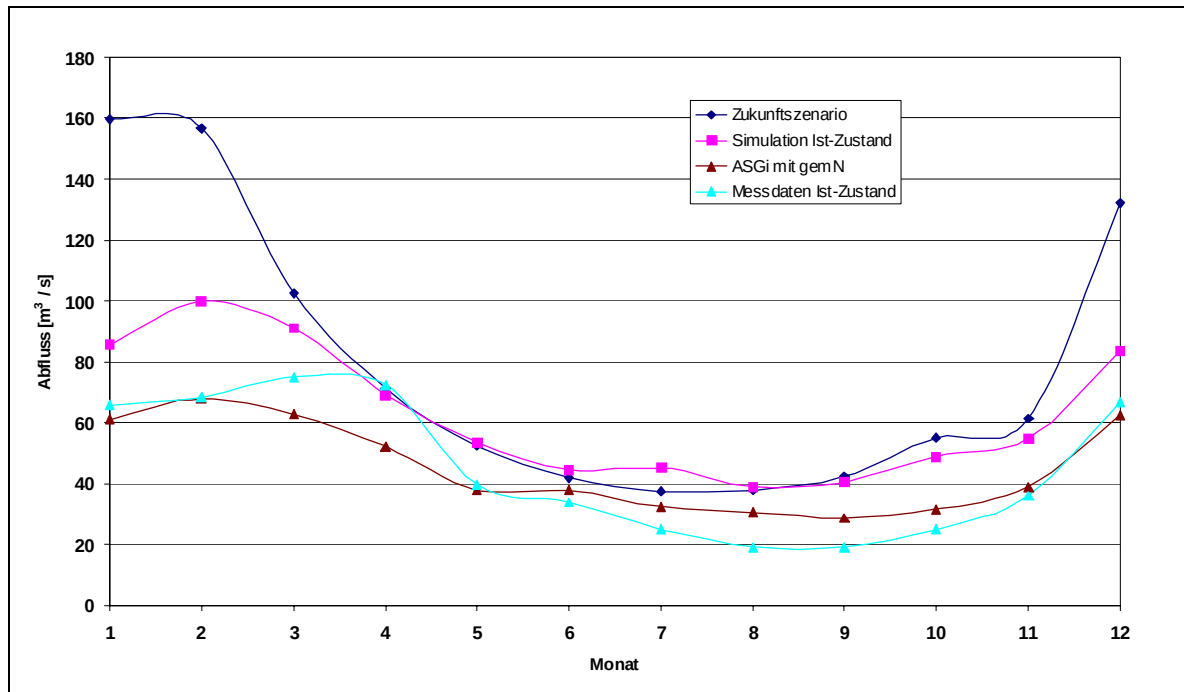


Abbildung 8.5: Vergleich der mittleren monatlichen Abflüsse (MMQ) für den Istzustand und dem Zukunftsszenario von Meteo-Research.

Bei den mittleren Hochwasserabflüssen, die in der Abbildung 8.6 zu sehen sind, bewegen sich die simulierten Abflüsse für den Istzustand von Meteo-Research besonders in den Wintermonaten, in denen die höchsten Abflüsse auftreten, nur wenig über den Messwerten. Auffallend ist, dass zu dieser Jahreszeit die simulierten Abflüsse mit gemessenen Niederschlägen um etwa 25 % unterhalb der gemessenen Abflüsse liegen. Dies macht deutlich, dass das auf Mittel- und Niedrigwasserabflüsse ausgelegte Modell die Hochwasserabflüsse unterschätzt. Damit ist zu vermuten, dass auch die Simulation der Ist- und Zukunftsszenarios von Meteo-Research mit dem vorliegenden Modell niedrigere Hochwasserabflüsse ergeben als mit einem Modell, dass auf den Hochwasserabflussbereich ausgerichtet ist. Dennoch ist dem Vergleich der simulierten Hochwasserabflüsse von Zukunftsszenario und Istzustand zu entnehmen, dass die Hochwasserabflüsse in den Wintermonaten in Zukunft ansteigen, sich in den Sommermonaten dagegen nicht wesentlich ändern.

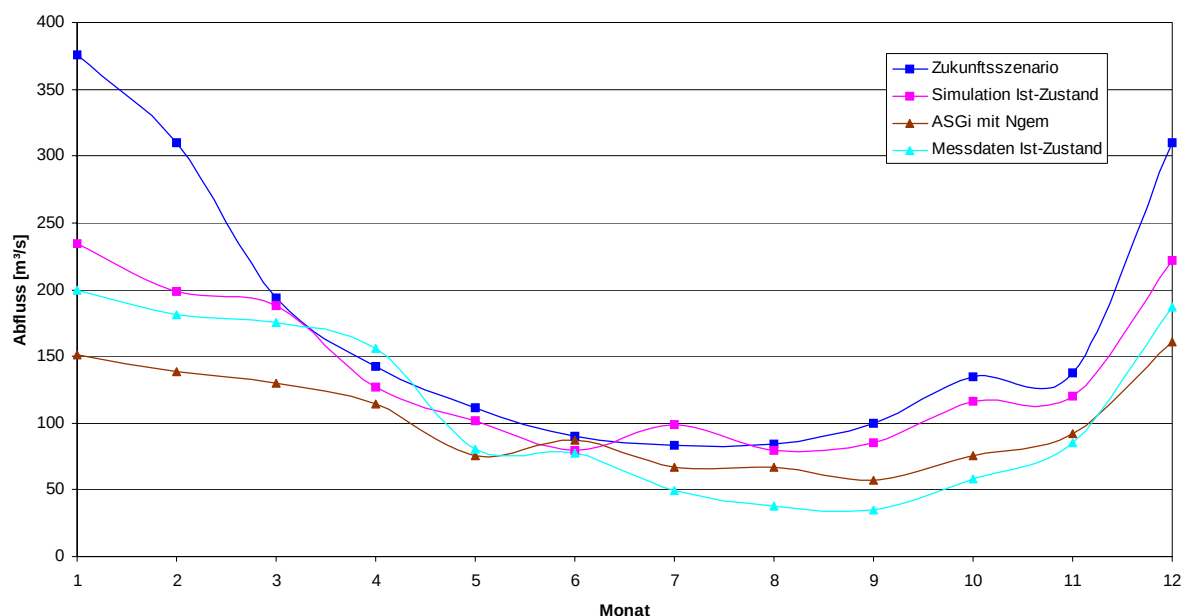


Abbildung 8.6: Vergleich der mittleren monatlichen Hochwasserabflüsse (MHQ) für den Istzustand und dem Zukunftsszenario von Meteo-Research.

Um die Verhältnisse bei extremen Hochwasserereignissen genauer zu untersuchen, wird eine statistische Auswertung der jährlichen Höchstabflüsse für die gemessenen und simulierten Abflüsse des Istzustands und des Zukunftsszenarios von Meteo-Research vorgenommen. In Abbildung 8.7 sind die jährlichen Höchstabflüsse für den Pegel Kemmern in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit aufgetragen. Der 100-jährliche Scheitelabfluss ist für den simulierten Istzustand von Meteo-Research um etwa 25 % geringer als der gemessene, obwohl die Niederschlagsdaten von Meteo-Research höhere Werte aufweisen als die gemessenen. Hier zeigt sich, dass die Hochwasserabflüsse durch das Wasserhaushaltsmodell unterschätzt werden. Der 100-jährliche Hochwasserabfluss des Zukunftsszenarios liegt um nahezu 50 % oberhalb des Istzustands von Meteo-Research. Genaue Aussagen über die Zunahme der Hochwasserscheitelabflüsse zwischen Istzustand und Zukunftsszenario können allerdings mit diesem auf Mittelwasser- und Niedrigwasserabflüssen ausgelegtem Wasserhaushaltsmodell nicht getroffen werden.

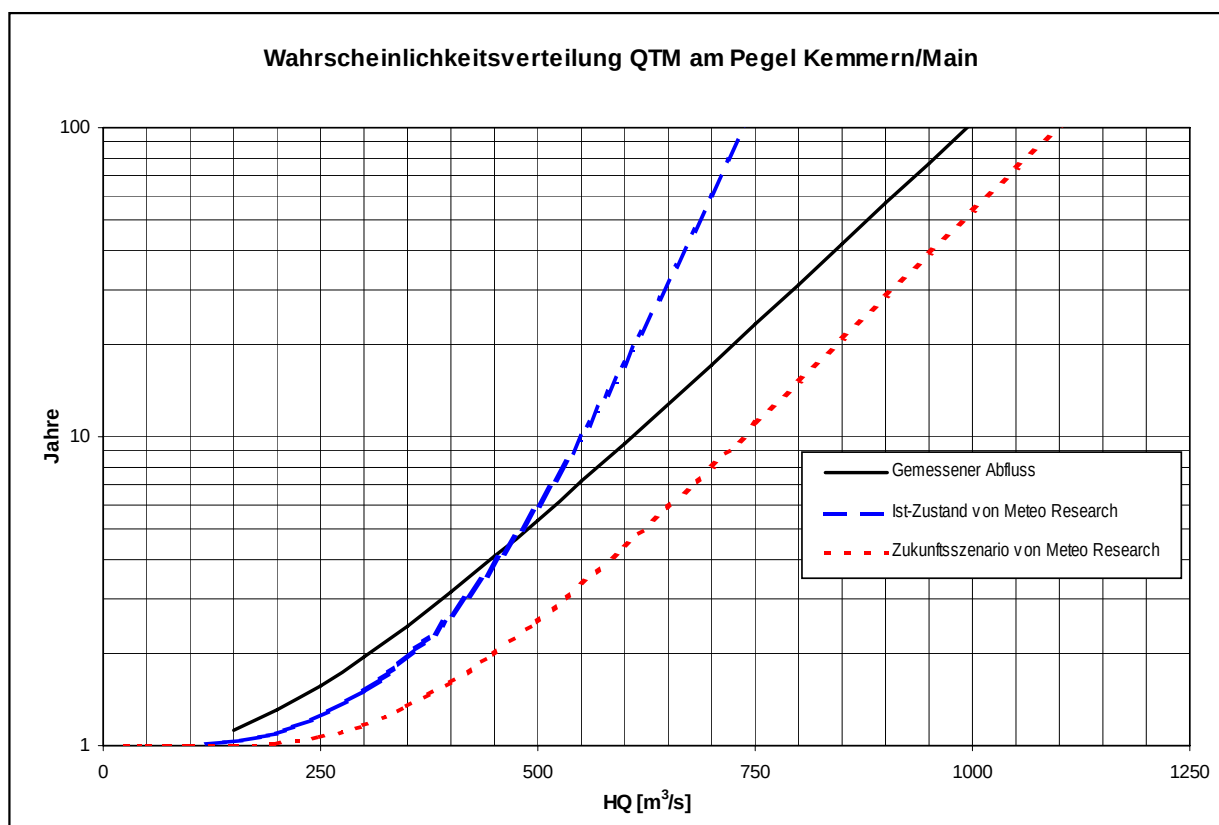


Abbildung 8.7: Wahrscheinlichkeitsverteilung der jährlichen Höchstabflüsse in Abhängigkeit der Wiederkehrzeit für Messung, Istzustand und Zukunftsszenario von Meteo-Research.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Für das Flussgebiet des Oberen Mains wird ein Wasserhaushaltsmodell auf Tageswertbasis für das Programmsystem ASGi erstellt und anhand von gemessenen Zeitreihen kalibriert. Mit dem Wasserhaushaltsmodell können Mittel- und Niedrigwasserabflüsse gut wiedergegeben werden, Hochwasserabflüsse werden dagegen unterschätzt. Für die Hochwassermodellierung ist eine Modellanpassung mit Stundenwerten in Bearbeitung.

Mit dem Wasserhaushaltsmodell auf Tageswertbasis werden Klimaszenarien verschiedener Institutionen berechnet. Im vorliegenden Bericht werden nur die Untersuchungen der von Meteo-Research ermittelten Szenarien vorgestellt. Die Niederschlagsdaten der Klimaszenarien zeigen nach der räumlichen Interpolation erhebliche Differenzen zu den Messwerten. Aber auch untereinander weichen die Ergebnisse stark von einander ab. Somit ist die Auswirkung auf die simulierten Abflüsse in erster Linie durch das verwendete Klimaszenario bestimmt. Aufgrund der Szenarien der Firma Meteo-Research ergibt sich für das Zukunftsszenario gegenüber dem Istzustand sowohl bei den Mittelwasser- als auch bei den Niedrigwasserabflüssen in den Wintermonaten eine Zunahme um bis zu 100 %. In den Sommermonaten tritt dagegen eine geringfügige Abnahme der Abflüsse auf.

Die Simulationen mit dem Tageswertmodell zeigen, dass die Hochwasserabflüsse für die Zukunftsszenarien voraussichtlich steigen werden. Aufgrund der Ausrichtung des Modells auf Mittel- und Niedrigwasserabflüsse ist die bestehende Modellkonfiguration nicht dafür geeignet genauere Aussagen über Hochwasserabflüsse vorzunehmen. Es ist zu erwarten, dass genauere Aussagen mit dem in Bearbeitung befindlichen Wasserhaushaltsmodell auf Stundenbasis getroffen werden können.



10. Literatur

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1997): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch, Rheingebiet, Teil II, Main.

Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (1978): Verzeichnis der Bach- und Flussgebiete in Bayern.

Becker M., Kleeberg H.-B.(1998): ASGi - Kontinuierlicher Abfluss- und Stofftransport – Integrierte Modellierung unter Nutzung von Geo-Informationssystemen, Universität der Bundeswehr München und Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft.

BÜK 1000: Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland, 1 : 1 000000.

Simulation des Wasserhaushalts für das Rheingebiet

Peter Krahe¹⁾, Mailin Eberle¹⁾, Karl-Gerd Richter²⁾, Klaus Wilke¹⁾

¹⁾Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz

²⁾Dr.-Ing. Karl Ludwig, Beratender Ingenieur Wasserwirtschaft-Wasserbau, Karlsruhe

1. Kurzfassung

Zur Quantifizierung der Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf den Abfluss des Rheins und seiner schiffbaren Nebenflüsse sind hydrologische Berechnungen unter Verwendung von regionalen Klimaszenarien und das gesamte Stromgebiet des Rheins abdeckenden Wasserhaushalts- bzw. Flussgebietsmodellen erforderlich. Für die vorliegende Untersuchung standen drei regionale Klimaszenarien zur Verfügung, die im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA für den süddeutschen Raum erstellt wurden. Davon deckt das vom Max-Planck Institut für Meteorologie (MPI) in Hamburg mit dem regionalen Klimamodell REMO erstellte Klimaszenarium das gesamte Rheineinzugsgebiet ab. Dieses Klimaszenarium wird sowohl mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM als auch mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell HBV-SMHI in Abflüsse umgesetzt. Die Modellergebnisse werden in Hinblick auf mögliche klimabedingte Änderungen für ausgewählte Pegel analysiert. Die Anwendung verschiedener hydrologischer Modelle in Kombination mit nach verschiedenen Verfahren erstellten regionalen Klimaszenarien ermöglicht eine Abschätzung der methodisch bedingten Unsicherheiten. Diese bilden eine wichtige Grundlage für die Interpretation und Verwendung der Ergebnisse in der hydrologisch-wasserwirtschaftlichen Impakt-Forschung einerseits und für die operative Wasserwirtschaft andererseits. Die Ergebnisse werden vorgestellt und ihre Belastbarkeit wird diskutiert. Die in den Untersuchungen aufgezeigten systembedingten Modellunsicherheiten stammen überwiegend aus den derzeit verfügbaren globalen Klimaszenarien und sind noch so hoch, dass nur Tendenzen zu künftigen Änderungen im Abflussregime des Rheins sowie zum Hochwasserregime gegeben werden können. Es lässt sich erkennen, dass die Problematik der natürlichen Klimavariabilität wie auch der anthropogen bedingten Klimaänderung und der damit einhergehenden Unsicherheit über das zukünftige Verhalten der Wasserhaushaltskomponenten die Entwicklung angepasster Strategien für ein nachhaltiges Wassermanagement erfordern.

2. Einleitung

Mit der Abschätzung der Folgen von anthropogen verursachten Klimaänderungen auf den Abfluss im Rheingebiet haben sich seit 1995 schon mehrere nationale und internationale Arbeitsgruppen beschäftigt. Hierbei kam eine Vielzahl von Modellen zum Einsatz, die anfänglich auf das gesamte Rheingebiet bezogen noch auf Monatswerten beruhten, wie beispielsweise das Modell RHINEFLOW (Kwadijk, 1993) und in neuerer Zeit über 10- (Middlekoop, 1999) und 1-Tageswerte (HBV-SMHI; Eberle et al., 2001 und LARSIM; Ebel et al., 2000), bis hin zu 1-Stundenwerten (WASIM-ETH; Kleinn, 2002) basieren. Diese Modelle wurden in den entsprechenden Studien weiterhin mit den verschiedensten Klimaszenarien betrieben, die sich durch das zugrundeliegende Emissionsszenarium, das Globale Klimamodell (i.d.R. sind dies gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle, OAGCMs), die Methodik zur Regionalisierung der globalen Klimamodellergebnisse sowie bezüglich des angestrebten Zeithorizontes für die Zielprojektion unterscheiden.

Diese Arbeiten haben über die Wirkungen von zu erwartenden Klimaänderungen im Sinne von Sensitivitätsstudien sowie für das Aufzeigen des methodischen Vorgehens wertvolle Erkenntnisse geliefert. Die erzielten Aussagen zu den Abflussszenarien selbst stellen allerdings wegen der nicht abgestimmten Klimaszenarien nur bedingt eine Grundlage zur Ermittlung belastbarer Zahlenwerte dar, die wiederum zur Ableitung wasserwirtschaftlicher Hand-



lungsanweisungen benötigt werden. Ein Ziel der hier durchgeführten Untersuchungen ist es letztlich für das Rheingebiet ein Instrumentarium aufzubauen, das für die Entscheidungsfindung hinsichtlich wasserwirtschaftlicher Probleme zu den Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Abfluss herangezogen werden kann. Hierzu gehört als ein wesentlicher Bestandteil eine Abschätzung der Unsicherheiten der einzelnen Glieder der eingesetzten Modellkette.

Im Kooperationsvorhaben „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“ (KLIWA), das in enger Zusammenarbeit zwischen dem Deutschen Wetterdienst (DWD) und den Wasserwirtschaftsverwaltungen der Länder Baden-Württemberg (BW) und Bayern (BY) durchgeführt und von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) fachlich begleitet wird, wird eine derartige Methodik erarbeitet (Bartels et al., 2004b). Neben den im Rahmen von KLIWA bereits durchgeführten und noch vorgesehenen Wasserhaushaltsuntersuchungen auf der regionalen Maßstabsebene, ist es das Ziel der BfG Abflussszenarien des Rheinlaufes und seiner schiffbaren Nebenflüsse zu erstellen und zu bewerten. Dabei kommt der Berücksichtigung der ausländischen Gebietsanteile auf Grund des hohen ausländischen Abflussanteiles (52.5 % an der deutsch/niederländischen Grenze) und der insbesondere im alpinen Teil des Rheingebietes (40 % an der deutsch/schweizerischen Grenze) zu erwartenden großen Änderungen eine hohe Bedeutung zu.

Aussagen zur Hochwasserproblematik stehen besonders im Mittelpunkt des Interesses. Dabei ist zu beachten, dass diese auf Grund der den Szenarienrechnungen noch innewohnenden Unsicherheiten einerseits sowie allgemein gültiger statistischer Gesetzmäßigkeiten andererseits besonders schwer zu ermitteln und zu bewerten sind. Der Schwerpunkt der Impaktanalyse liegt deshalb zunächst auf Aussagen zur Entwicklung der mittleren Abflüsse im hydrologischen Winterhalbjahr. Diese Kenngröße kann als ein Indikator für eine mögliche Zu- oder Abnahme des Hochwasserrisikos insbesondere für den Mittel- und Niederrheinabschnitt des Rheins angesehen werden.

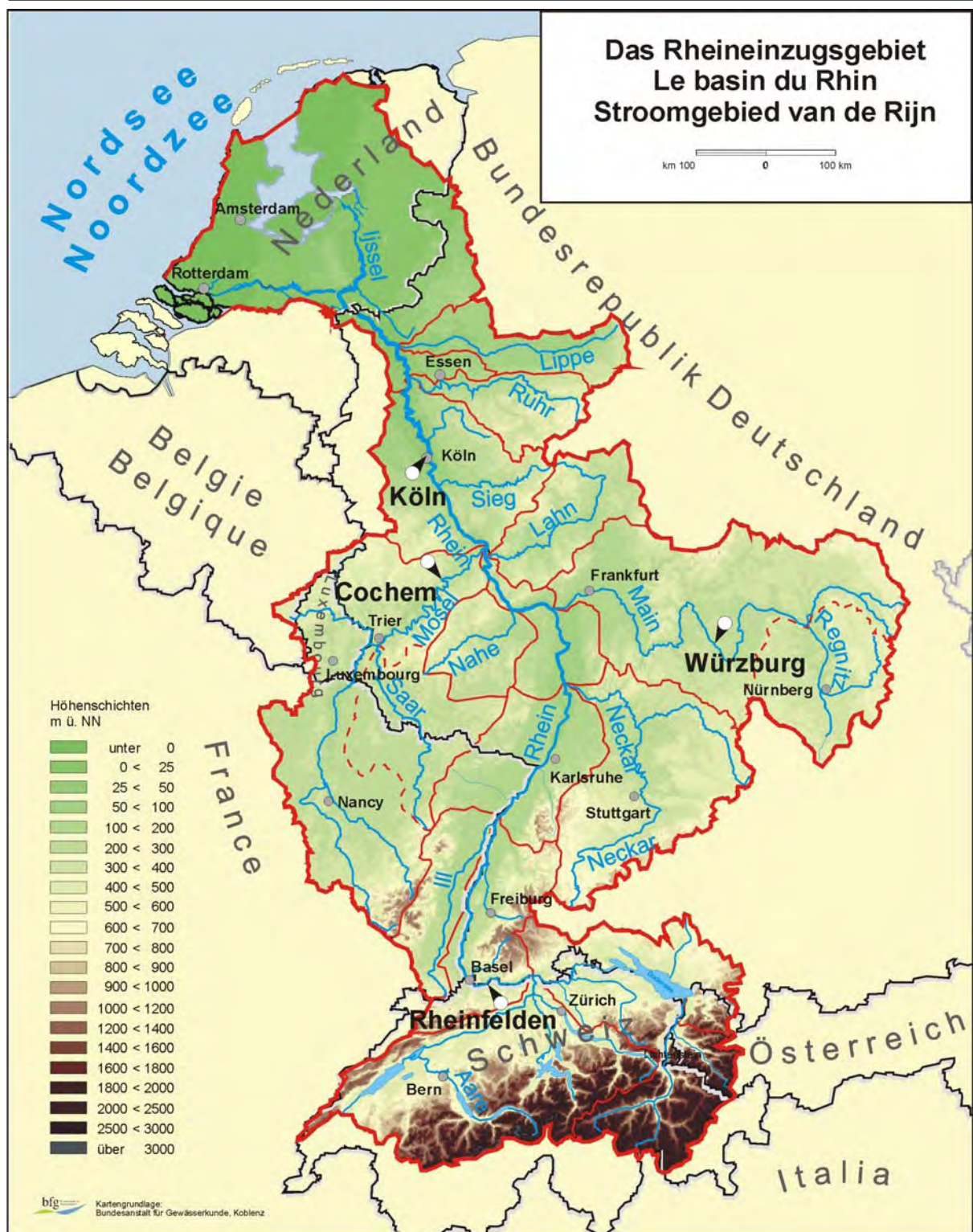


Abb. 1: Das Rheingebiet mit Lage der ausgewerteten Pegel

3. Methodik

Um eine Basis für die Ableitung wasserwirtschaftlicher Handlungsstrategien zu schaffen, ist es notwendig, zunächst mit Hilfe geeigneter regionaler Klimaszenarien Aussagen über Veränderungen der hydrometeorologischen Größen im Rheingebiet (Abb. 1) für die nächsten Jahrzehnte zu erhalten und in Verbindung mit Wasserhaushaltsmodellen diese in Abfluss-



szenarien umzurechnen. In Abb. 2 ist schematisch das prinzipielle Vorgehen wiedergegeben.

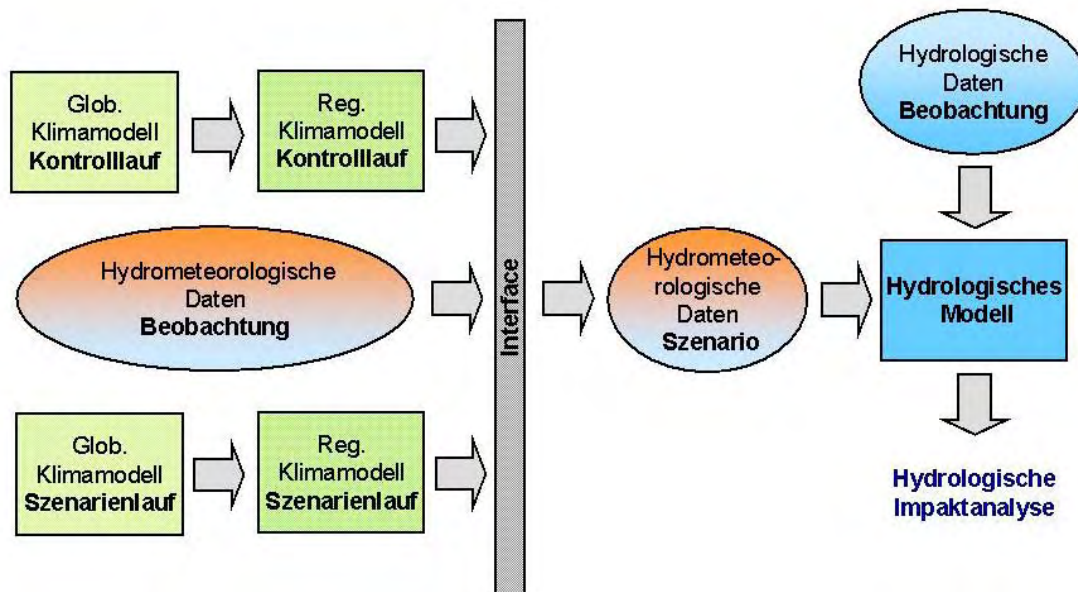


Abb. 2: Methodik zur Kopplung der Ergebnisse von globalen und regionalen Klimamodellen zur hydrologischen Impaktanalyse (modifiziert nach Andréasson et al., 2004)

3.1 Globale Klimamodelle

Mit den vom Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2001) festgelegten sieben Szenarien (A1B, A1T, A1FI, A2, B1, B2, IS92a) zur zukünftigen Entwicklung der Emissionen der s.g. Treibhausgase werden weltweit von verschiedenen Klimaforschungszentren mit gekoppelten Ozean/Atmosphären-Klimamodellen (OAGCM – Ocean-Atmosphere General Circulation Model) entsprechende Klimaszenarien berechnet und deren Ergebnisse vergleichend in Hinblick auf das anthropogene Klimasignal analysiert. Für Aussagen zum Klimasignal im mitteleuropäischen Raum werden insbesondere das Modell ECHAM4/OPYC3 (Roeckner et al., 1996) des Max-Planck-Instituts für Meteorologie (MPI) in Hamburg sowie das Modell Had/CM3 des Hadley-Centers in England (Gordon et al., 2000) herangezogen. Zur Berücksichtigung der modell- und systembedingten Fehler der OAGCM's werden neben den eigentlichen Szenarienläufen auch ein sogenannter Referenz- oder Kontrolllauf durchgeführt. Bei diesem wird die Konzentration der Treibhausgase in der Atmosphäre ab einem bestimmten Zeitpunkt, beispielsweise 1990, für die Simulation festgehalten. Aussagen zum Klimasignal erhält man dann durch den statistischen Vergleich zwischen Kontroll- und Szenarienlauf.

3.2 Regionalisierung der Klimamodellergebnisse

Die großen Gitterweiten der OAGCM's ($\sim 2.8^\circ \times 2.8^\circ$, bzw. $3.75^\circ \times 2.5^\circ$) erlauben insbesondere für den Niederschlag noch keine genügende raum-zeitliche Simulation, so dass deren Ergebnisse für regionale Aussagen und für weiterführende Impaktstudien nicht direkt verwendet werden können. Zur Regionalisierung (engl. „downscaling“) der Ergebnisse globaler Klimamodelle stehen verschiedene Verfahren zur Verfügung. Alle bis heute in Betracht kommenden Regionalisierungsverfahren wie regionale Klimamodelle (dynamisches Verfahren) sowie indirekte Methoden, die sich nach Krüger (2002) in multivariate, statistische sowie statistisch-dynamische Verfahren unterteilen lassen, weisen aus verschiedenen Gründen Unsicherheiten und verfahrensbedingte Vor- und Nachteile auf. Eine zu bevorzugende Me-

thode hängt letztlich von dem Anwendungszweck ab und ist deshalb für den jeweils vorliegenden konkreten Anwendungsfall zu bewerten. Erstes Ziel im Zuge der Ermittlung zukünftiger regionaler Klimaszenarien ist es deshalb, durch die Anwendung unterschiedlicher Regionalisierungsverfahren eine Bandbreite von Ergebnissen aufzuzeigen. Die innerhalb des Vorhabens KLIWA verfügbaren regionalen Szenarien werden von Bartels vergleichend beschrieben und bewertet (Bartels et al., 2004a).

Diese nutzen alle die Ergebnisse des globalen Klimamodells ECHAM4/OPYC3 des Max-Planck-Instituts für Meteorologie in Hamburg (MPI) für das Emissionsszenarium B2, weil letzteres eine eigenständige europäische Umweltgesetzgebung und Umweltpolitik zulässt. Für die Szenarienrechnungen wurde ein einheitlicher, in der näheren Zukunft liegender Zeithorizont von 2021 bis 2050 festgelegt.

Die beiden statistischen Regionalisierungsverfahren des PIK (Gerstengarbe et al., 2002) und von Meteo-Research (Enke, 2003) liefern Szenarienergebnisse für Punkte (Stationen). Diese können für die rheinweite Modellierung noch nicht verwendet werden, da die Stationsdichte in den ausländischen Einzugsgebietsanteilen eine Szenarienerstellung nicht zulässt. Es ist jedoch vorgesehen, für ausgewählte Nebenflüsse des Rheins, diese Szenarienergebnisse zur Abschätzung der Bandbreite der Ergebnisse regionaler Klimaszenarien anzuwenden. Die hydrologische Impaktanalyse wurde mit den vom MPI mit dem regionalen Klimamodell REMO (Jacob und Podzun, 1997) berechneten Ergebnissen (Jacob et al., 2003) durchgeführt. Die Ergebnisse liegen als Stundenwerte auf einem Raster von 18 km x 18 km vor.

3.3 Hydrologische Modellierung

Die Aufgabe erfordert die Modellierung der Wasserhaushaltskomponenten reale Verdunstung, Grundwasserneubildung, Bodenfeuchte, Wasseräquivalent der Schneedecke und schließlich Abfluss. Für das Rheingebiet liegen das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Bremicker, 2000; Ebel et al., 2000) und das Niederschlag-Abfluss-Modell HBV-SMHI (Bergström, 1996; Eberle et al., 2001) flächendeckend bis zum Pegel Lobith an der deutsch/niederländischen Grenze (AEo= 159500 km²) vor.

Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM (Large Area Runoff Simulation Model) berechnet auf einem Flächenraster von 18 km x 18 km die Prozesse Interzeption, aktuelle Evapotranspiration, Schneedeckenaufbau, -setzung und -schmelze, Bodenwasser- und Grundwasserspeicherung, lateraler Wassertransport zum Gewässer (Abflusskonzentration) sowie Translation und Retention im Gewässer. Die Verdunstung wird nach Penman-Monteith (Thompson et al., 1981) berechnet und unterscheidet zwischen 14 Landnutzungseinheiten. Zudem können anthropogene Maßnahmen (z.B. Wasserüberleitungen sowie Abflussregelungen durch Rückhaltebecken und Talsperren) im Modell nachgebildet werden. Die Rasterweite stimmt mit der Gitterweite des regionalen Klimamodells REMO überein. Das Modell wurde anhand gemessener hydrologischer und meteorologischer Daten für den Zeitraum 1992-1997 kalibriert und für den Zeitraum 1987 bis 1991 verifiziert.

Das Modell HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) ist eine Entwicklung des Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI). Die hydrologische Berechnungseinheit bilden Teileinzugsgebiete, innerhalb derer über eine Flächen-Höhen-Verteilung in Verbindung mit einer vereinfachten Landnutzungsunterteilung (Wald, Nicht-Wald, Wasser und Gletscher) klimatische und landnutzungsbedingte Heterogenitäten, insbesondere zur Modellierung der Schneeprozesse berücksichtigt werden können. Die FAO-Gras-Referenzverdunstung nach Wendling (1995) wird extern berechnet und dient als Modelleingang. Alternativ ist eine vereinfachte Verdunstungsberechnung nach einem Temperaturindex-Verfahren (Lindström et al., 1997) möglich. Es wurde ursprünglich als ein auf Tageswertbasis arbeitendes Langzeitsimulationsmodell entwickelt und ist den semi-distributiven konzeptionellen Modellen zuzuschreiben. Für die Modellierung im Rheingebiet werden Teil-



einzugsgebiete verwendet, welche in der Regel eine Flächengröße zwischen 500 km² und 2000 km² aufweisen. Es wurde für Teilperioden aus dem Zeitraum 1961 bis 1995 angeeicht und verifiziert (Eberle et al., 2001)

Die Beurteilung der Güte der Modellanpassungen erfolgte für beide Modelle u.a. durch die Modelleffizienz nach Nash-Sutcliff. In der Regel werden Modelleffizienzen von 0,80 und besser für Einzugsgebiete mit einer Größe von 300 km² und mehr mit LARSIM (Ebel et al., 2000) und für Gebiete mit 1000 km² und mehr für das HBV-SMHI-Modell (Eberle et al., 2001) in der Kalibrierungs- und Verifizierungsperiode erreicht.

3.4 Hydrologische Impaktanalyse

Der Betrieb der makroskaligen Niederschlag-Abfluss- bzw. Wasserhaushaltsmodelle erfordert kontinuierliche Zeitreihen des Niederschlages, der Lufttemperatur und der Referenzverdunstung. Wird die Verdunstungsberechnung wie im Falle von LARSIM modellintern durchgeführt, werden zusätzlich Größen, wie Sonnenscheindauer (Globalstrahlung), Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit sowie Luftdruck benötigt. Abhängig von dem gewählten Regionalisierungsverfahren liegen raster- oder stationsbezogene Eingangsdaten vor, die je nach Wahl des hydrologischen Modells wiederum auf Raster interpoliert oder zu Einzugsgebietsflächen aggregiert werden müssen. Die hierdurch verursachten Unsicherheiten sind bei einer Fehleranalyse in die Bewertung mit einzubeziehen. Von größerer Bedeutung ist aber die Frage, ob die regionalisierten hydrometeorologischen Werte, abgesehen von den notwendigen Interpolations- oder Aggregierungsverfahren, direkt in das hydrologische Modell eingehen, oder ob weitere Modifikationen zur Korrektur von systematischen Fehlern vorgenommen werden müssen.

So hat die Güte der dynamischen Regionalisierungsverfahren zwar zugenommen, aber insbesondere in Verbindung mit den globalen Klimamodellergebnissen als Antrieb bestehen bei der Modellierung des Niederschlages immer noch große systematische Fehler (engl. „bias“) sowohl hinsichtlich Höhe als auch jahreszeitlicher und räumlicher (Luv/Lee-Effekte) Verteilung. Eine mögliche Vorgehensweise ist deshalb zunächst die Änderungen der hydrometeorologischen Größen, bezogen auf einen Referenzzustand, zu bestimmen, d.h. das Klimasignal zu extrahieren und anschließend diese Änderungsvektoren mit beobachteten meteorologischen Zeitreihen zu verbinden. Dieses Vorgehen, das auch als „delta change approach“ bezeichnet wird, wurde beispielsweise von Andréasson et al. (2004) für hydrologische Impaktstudien in Schweden und von Shabalova et al. (2002) für entsprechende Studien im Rheingebiet benutzt. Es bestehen jedoch erhebliche Schwierigkeiten bei der tatsächlichen Umsetzung. Bezüglich der Vor- und Nachteile dieser Vorgehensweise sei auf die Literatur verwiesen. In den bisher durchgeführten Berechnungen wurde zunächst die direkte Kopplung der Ergebnisse des regionalen Klimamodells durchgeführt, da vor der eigentlichen Interpretation und Bewertung der hydrologischen Wirkung von Klimaänderungen der Schwerpunkt zunächst auf der Fehleranalyse liegt. Dem Interface zwischen den regionalisierten Klimadaten und den Eingangsdaten der hydrologischen Modelle (s. Abb. 2) kommt innerhalb des Versuchsaufbaues eine große Bedeutung zu. Diese Schnittstellenfrage kann derzeit jedoch als noch nicht endgültig gelöst betrachtet werden.

Die Ergebnisse der hydrologischen Modellrechnungen können zunächst in Hinblick auf das Änderungsverhalten des Abflussvolumens, ausgedrückt durch die mittleren Jahresabflüsse (MQ-Jahr) sowie die mittleren Abflüsse der hydrologischen Winter- und Sommerhalbjahre (MQ-HyWi, MQ-HySo) und hinsichtlich Änderungen der jahreszeitlichen Verteilung der mittleren monatlichen Abflüsse (MQ-Mo), bzw. ausgedrückt als Pardé-Koeffizienten (Verhältnis MQ-Mo/MQ-Jahr), analysiert werden. Hierzu gehören auch Auswertungen zu den mittleren monatlichen niedrigsten und höchsten Werten (MNQ-Mo und MHQ-Mo). Änderungen der Auftretenswahrscheinlichkeiten hydrologischer Extremwerte können prinzipiell über eine Ex-

tremwertanalyse von Hoch- und Niedrigwasserkennwerten, angewendet auf die Abflusssszenarien, bestimmt werden. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass die Aussagekraft der Ergebnisse, insbesondere in der Hochwasserstatistik, auf Grund der zeitlichen Auflösung von einem Tag mit kleiner werdenden Einzugsgebieten abnimmt. Auch ist diese Analyse besonders anfällig hinsichtlich der Wahl des Interface zwischen regionalem Klimamodell und hydrologischem Modell. Die Interpretation der mit dem „delta change approach“ erzielten Ergebnisse ist in diesem Fall sehr schwierig. Die direkte Kopplung weist hier Vorzüge auf. Inwieweit die oft über die Mittelwertstatistik ausgewiesenen systematischen Fehler der regionalen Klimaszenarien auch für den Witterungsablauf einzelner Hochwasserperioden anzusetzen sind und damit die Auswertung einer Extremwertanalyse beeinflussen, muss in gesonderten Studien noch geklärt werden.

4. Ergebnisse der Modellrechnungen

4.1 Verifizierung der Modellkette

Zur Verifizierung der einzelnen Glieder der Modellkette wurden schwerpunktmäßig Untersuchungen zur Güte der hydrologischen Modellierung sowie des dynamischen Regionalisierungsverfahrens angestellt. Hierzu stehen die mit beobachteten meteorologischen Daten simulierten Abflüsse der Modelle HBV-SMHI und LARSIM für den Zeitraum 1981 bis 1995 zur Verfügung. Unter Vorgabe der global verfügbaren atmosphärischen Re-Analysen (1971-1993) und Analysen (1994-1997) des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (EZMW) wurden vom MPI mit REMO die entsprechenden regionalen Datensätze berechnet. Diese als Validierungslauf bezeichneten Daten wurden mit dem Modell LARSIM in Abflüsse (VL-REMO/LARSIM) umgerechnet und können hier für eine hydrologische Bewertung der Güte des dynamischen Regionalisierungsverfahrens herangezogen werden.

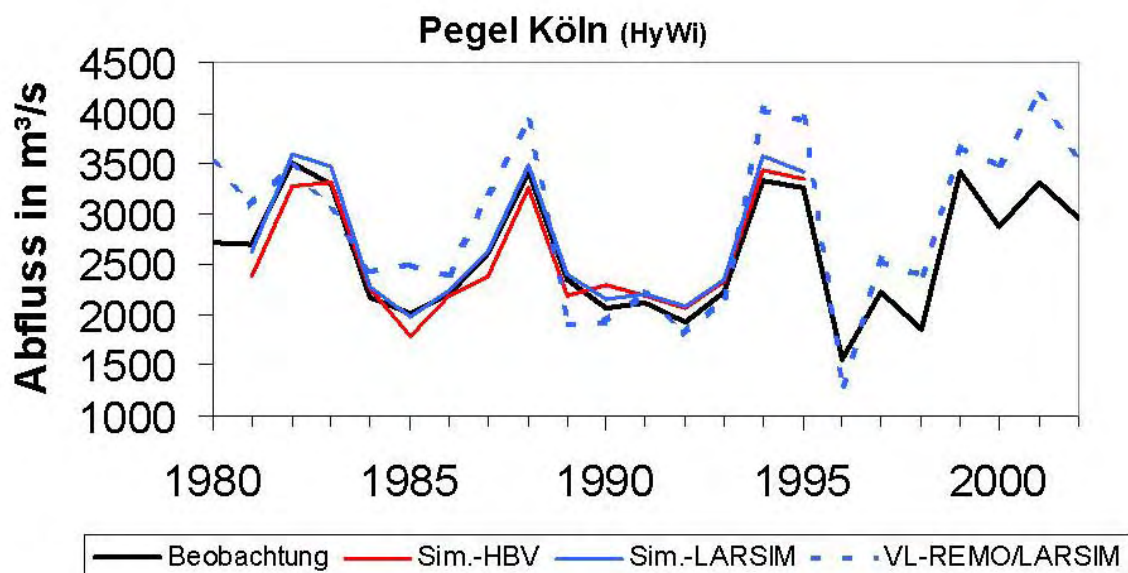


Abb. 3: Mittlere beobachtete und simulierte Abflüsse des hydrologischen Winterhalbjahres am Pegel Köln

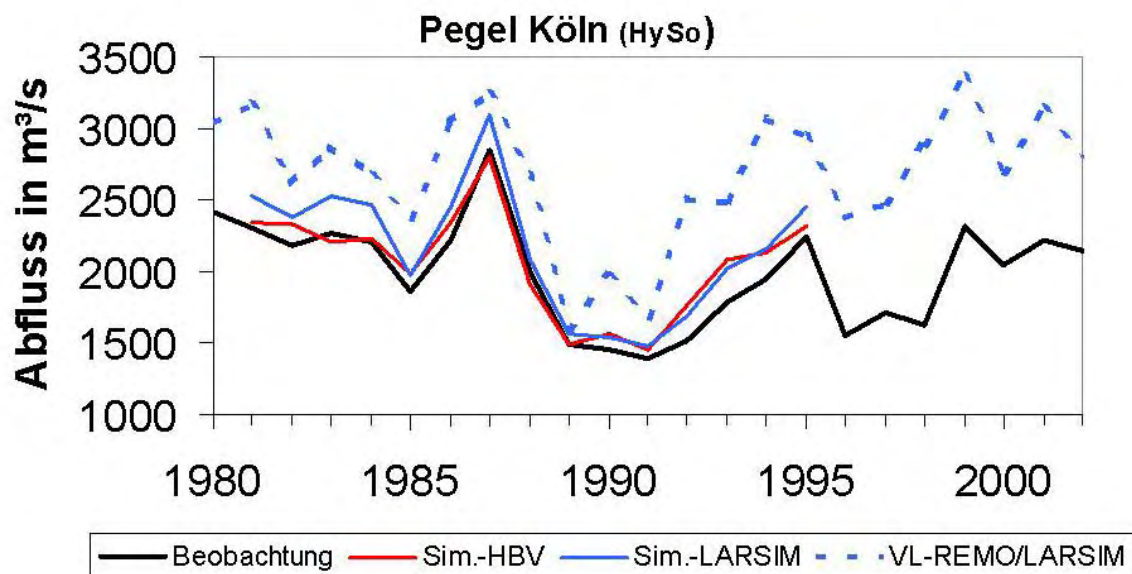


Abb.4: Mittlere beobachtete und simulierte Abflüsse des hydrologischen Sommerhalbjahres am Pegel Köln

Die Fehleranalyse erfolgt zunächst in Hinblick auf systematische Fehler (Mittelwert) und deren Schwankungsbreite (Standardabweichung und mittlerer quadratischer Fehler RMS). Die wichtigsten Ergebnisse sind in Tabelle 1 aufgeführt. Die Güte der hydrologischen Simulation der Mittelwerte des Abflusses für die hydrologischen Halbjahre Winter (November des Vorjahres bis zum April) und Sommer (Monate Mai bis Oktober) lässt sich darüber hinaus an Hand der mit den Modellen LARSIM und HBV-SMHI berechneten Abflüsse im Vergleich zu den Beobachtungsdaten (Abb. 3 und 4) erkennen. Generell wird der Abfluss gut simuliert, wobei sich eine leichte Überschätzung der Werte durch das Modell LARSIM und eine Unterschätzung durch das Modell HBV-SMHI im Winter abzeichnet. Für das hydrologische Sommerhalbjahr ist eine leichte systematische Überschätzung der Abflusswerte durch beide Modelle festzustellen. Das Trendverhalten des Abflusses wird durch beide Modelle gleich gut wiedergegeben.

Tab. 1: Ergebnisse der Modellverifikationen für die mittleren Abflüsse der hydrologischen Halbjahre in m³/s (Variationskoeffizient in %)

	Hydrol. Winterhalbjahr				Hydrol. Sommerhalbjahr			
	Mittel	Std.-Abw. (Var.-Koef.)	Differenz zu Beob.	RMS	Mittel	Std.-Abw. (Var.-Koef.)	Differenz zu Beob.	RMS
Beobachtung	2612	584	-	-	1981	404	-	-
1981/1995		(22)				(20)		
HBV-SMHI	2579	561 (22)	-33	169	2062	372 (18)	81	133
LARSIM	2699	618 (23)	87	119	2161	458 (21)	180	192
EZMW/ REMO/LARSIM	2800	779 (28)	188	395	2593	514 (20)	612	664

An Hand der in den Abb. 3 und 4 ebenfalls dargestellten Abflusswerte des Validierungslaufes (Modellkette: EZMW/REMO/LARSIM) zeigt sich, dass generell die jährliche zeitliche Dynamik des Abflusses bei Verwendung der Eingangsdaten aus dem regionalen Modell gut wiedergegeben wird. Am Pegel Köln tritt jedoch eine größere systematische Überschätzung des Abflusses im Sommerhalbjahr auf. Bei einer detaillierten Analyse sämtlicher zur Verfügung stehenden Pegel zeigt sich, dass diese große Abweichung vornehmlich auf eine Überschätzung der Niederschläge des Sommerhalbjahres im alpinen Einzugsgebiet des Rheins (Pegel Basel) zurückzuführen ist. Bezogen auf die Standardabweichung des Beobachtungszeitraumes (1981/95) betragen die nicht-systematischen Fehler (RMS-Fehler) der hydrologischen Modellierung am Pegel Köln ca. 20 % bis 30% während die der regionalen Klimamodellierung, abzüglich der Unsicherheit der hydrologischen Modellierung, mit ca. 40% anzusetzen sind.

5. Abflussszenarien

Für die Berechnung der Abflussszenarien stehen die mit REMO regionalisierten Modellergebnisse des ECHAM4/OPYC3-Laufes der Referenzperiode 1990 bis 1999 sowie des B2-Szenarienlaufes der Zeitreihe 2020 bis 2049 zur Verfügung. Diese dienen als Eingangsdaten für das hydrologische Modell LARSIM. Ein dreißigjähriger Kontrolllauf stand zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht zur Verfügung, befindet sich aber in der Bearbeitung. Die Auswertung der Szenarien in Hinblick auf ein Klimasignal erfolgt deshalb zunächst durch Vergleich der drei zehnjährigen Zeitscheiben 2020/29, 2030/39 und 2040/49 mit der Referenzperiode 1990/99 (s. Tab.2).

Tab. 2: Beobachtetes Klima und Mittelwerte der Differenzen bzw. Abweichungen der regionalen Klima- und Abflussszenarienberechnungen der hydrologischen Halbjahre für den Pegel Köln (berechnet mit dem Modellsystem ECHAM4/OPYC3/REMO/LARSIM auf Grundlage des B2-Emissionsszenariums)

	Beobachtetes Klima		Differenz bzw. proz. Abweichung		
	Mittelwert 1961/90	Std.-Abw. 1961/90	2020/2029	2030/2039	2040/2049
Lufttemperatur	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Jahr	8.5	0.6	1.5	1.3	2.0
Hydrol. Winter.	2.7	1.29	1.9	1.5	2.1
Hydrol. Sommer.	14.3	0.6	1.1	1.1	1.8
Gebietsniederschlag	[mm]	[mm]	[%]	[%]	[%]
Jahr	975	134	-0.5	7.6	-0.7
Hydrol. Winter	455	88	-1.9	7.4	1.3
Hydrol. Sommer	520	76	1.1	7.8	-2.9
Abfluss	[m³/s]	[m³/s]	[%]	[%]	[%]
Jahr	2205	499	-0.6	16.0	0.8
Hydrol. Winter	2415	640	2.1	20.4	10.5
Hydrol. Sommer	1998	472	-4.7	8.7	-13.9

An Hand der mittleren monatlichen Differenzen der Lufttemperatur zwischen Szenarienlauf und Referenzperiode (Abb. 5) ist eine Temperaturzunahme in allen drei Zeitabschnitten festzustellen. Die stärksten Temperaturzunahmen sind mit ca. 1.5 °C bis 3.5 °C in den Monaten Januar bis April anzutreffen, die der verbleibenden Monate liegen zwischen 0.5°C und 2°C. Ebenso wie für die Lufttemperatur ist auch beim Niederschlag (Abb. 6) immer noch eine große dekadische Variabilität in den Szenarienläufen vorhanden. Bei den relativen Abweichung der monatlichen Gebietsniederschlagshöhe bis zum Pegel Köln treten große positive Abweichungen von bis zu 40% in den Monaten Januar und November auf. In einigen Monaten (März, April, Oktober, Dezember) sind jedoch auch negative Abweichungen anzutreffen.

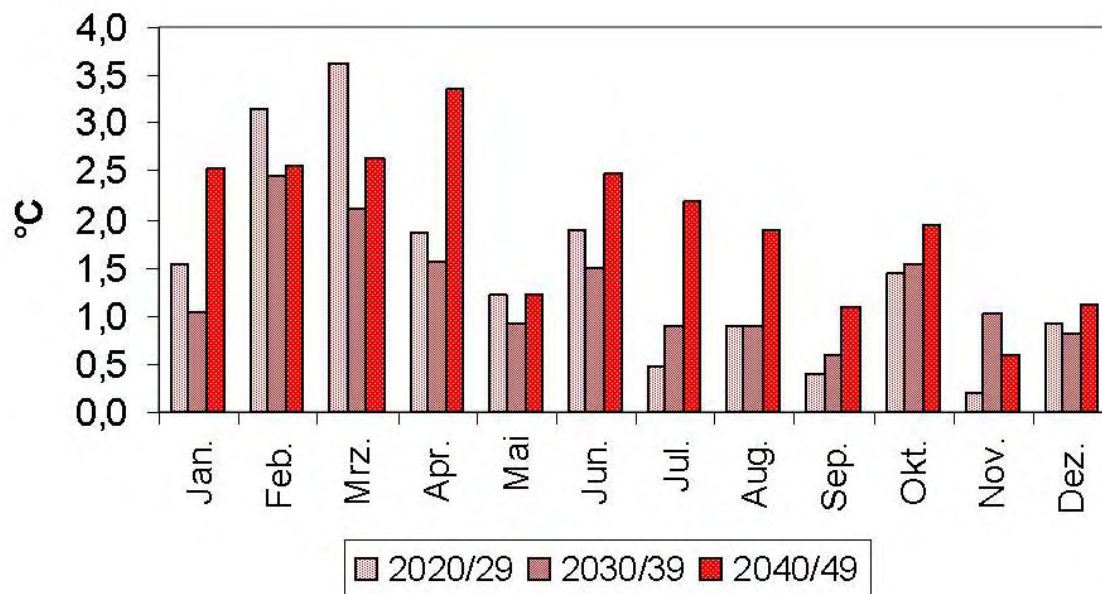


Abb.5: Differenz der mittleren monatlichen Lufttemperatur für verschiedene Zeitscheiben des Szenarienlaufes (2020-2049) zum Kontrolllauf (1990-1999) für das Einzugsgebiet des Rheins bis zur deutsch/niederländischen Grenze. Berechnet mit ECHAM4/OPYC3/REMO.

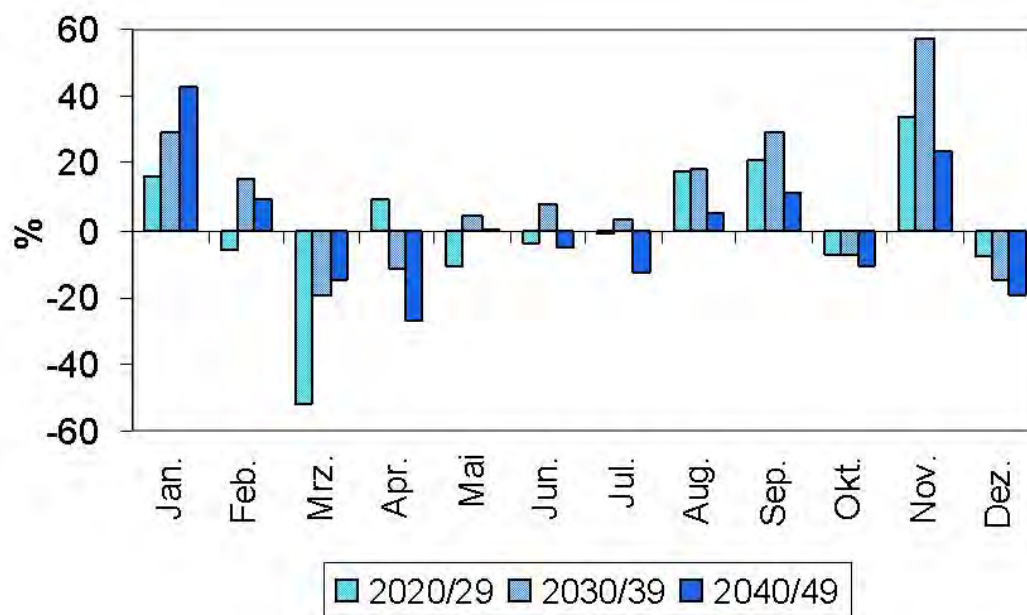


Abb.6: Relative Abweichungen der monatlichen Niederschlagshöhen für verschiedene Zeitscheiben des Szenarienlaufes (2020-2049) zum Kontrolllauf (1990-1999) für das Einzugsgebiet des Rheins bis zur deutsch/niederländischen Grenze. Berechnet mit ECHAM4/OPYC3/REMO

In Verbindung mit dem hydrologischen Modell führen diese Änderungen zu einer Zunahme des monatlichen Abflusses in den Monaten Februar und November sowie abgemildert im August und September am Pegel Köln ($A_{E0}=144231\text{km}^2$). Ein Rückgang des Abflusses findet sich für die Monate März bis Juni/Juli (Abb. 7). Stellt man die monatlichen Abflüsse in Form der Abflusskoeffizienten nach Pardé dar (Abb. 8), zeigt sich neben einer Intensivierung des Abflussjahresganges auch eine Umverteilung der Abflüsse mit einer Tendenz der Zunahme der winterlichen Abflüsse von November bis Februar zu Lasten einer Verringerung der Abflüsse in den Frühjahrsmonaten.

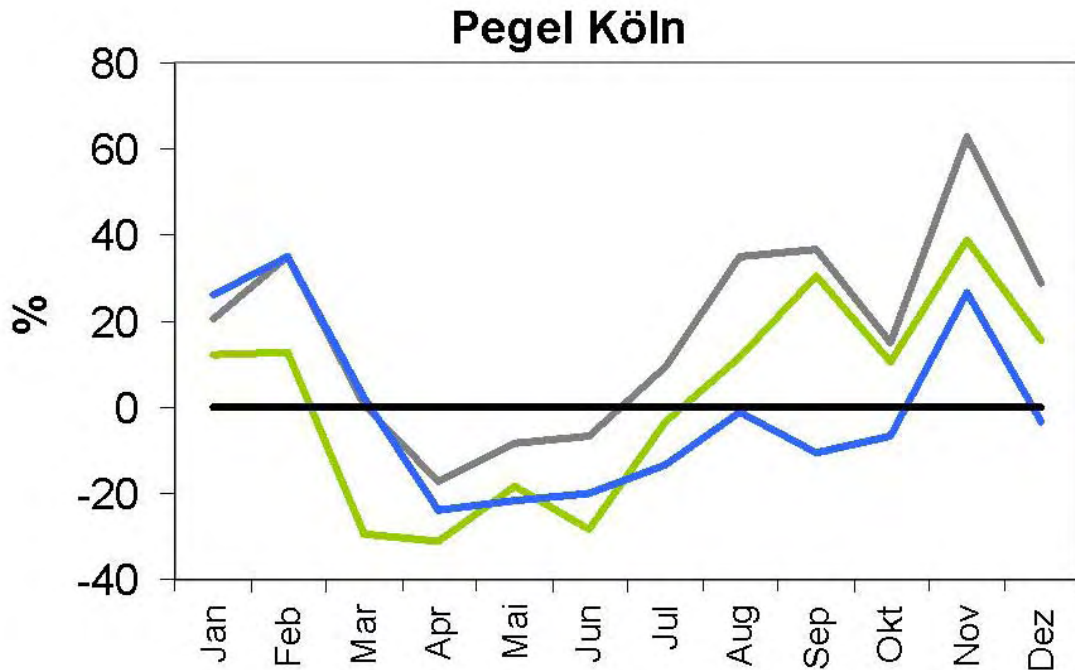


Abb.7: Relative Änderungen des monatlichen Abflusses für drei verschiedene zehnjährige Zeitscheiben des Szenarienlaufes (2020-2049) bezogen auf den Kontrolllauf (1990-1999) für das Einzugsgebiet des Rheins bis zum Pegel Köln. Simuliert wurde mit der Modellkette ECHAM4/OPYC3/REMO/LARSIM

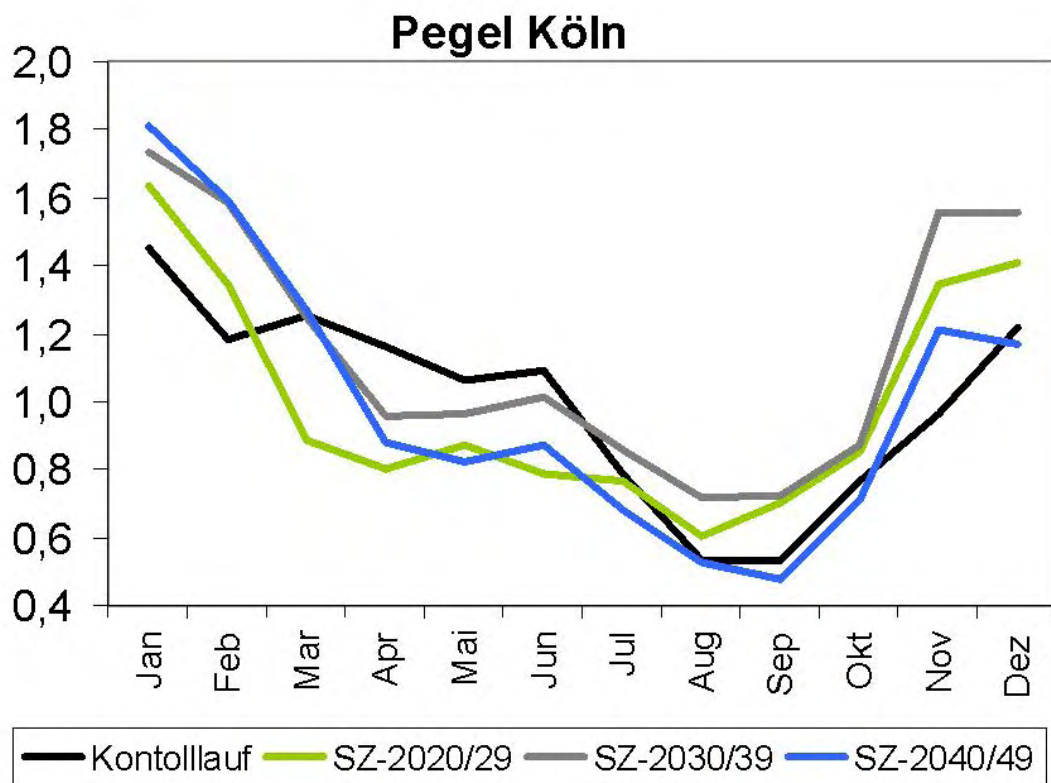


Abb.8: Pardé-Koeffizienten (MQ-Mo/MQ-Jahr) des Abflusses für drei verschiedene zehnjährige Zeitscheiben des Szenarienlaufes (2020-2049) und den Kontrolllauf (1990-1999) für das Einzugsgebiet des Rheins bis zum Pegel Köln. Simuliert wurde mit der Modellkette ECHAM4/OPYC3/REMO/LARSIM.



Diese Intensivierung der innerjährlichen Abflussdynamik lässt sich auch an Hand der Veränderung des Quotienten von Winter- zu Sommerabfluss ausdrücken. In der Abb. 9 sind für den Rhein und seine beiden großen Nebenflüsse Main ($A_{E0}=27200 \text{ km}^2$) und Mosel ($A_{E0}=28150 \text{ km}^2$) die Änderungen dieser Verhältniszahl, bezogen auf den Kontrollzeitraum, dargestellt. Danach ist die Tendenz zu einer Intensivierung des Jahresganges an allen Pegeln festzustellen. Allerdings ergeben sich räumliche Unterschiede in der Ausprägung. Zu beachten ist, dass die Intensivierung einmal auf eine Zunahme des Winterabflusses, wie z.B. am Pegel Rheinfelden ($A_{E0}= 34550 \text{ km}^2$), andererseits aber auch auf eine Verringerung des Sommerabflusses, wie z.B. am Pegel Cochem/Mosel ($A_{E0}= 27088 \text{ km}^2$), zurückgeführt werden kann. Am Pegel Würzburg/Main ($A_{E0}= 14030 \text{ km}^2$) sind dagegen sowohl im Winter- als auch im Sommerhalbjahr in allen Zehnjahresperioden gegenüber der Referenzperiode deutlich höhere Abflusszunahmen zu verzeichnen, so dass die innerjährliche Verteilung des Abflusses unverändert bleibt.

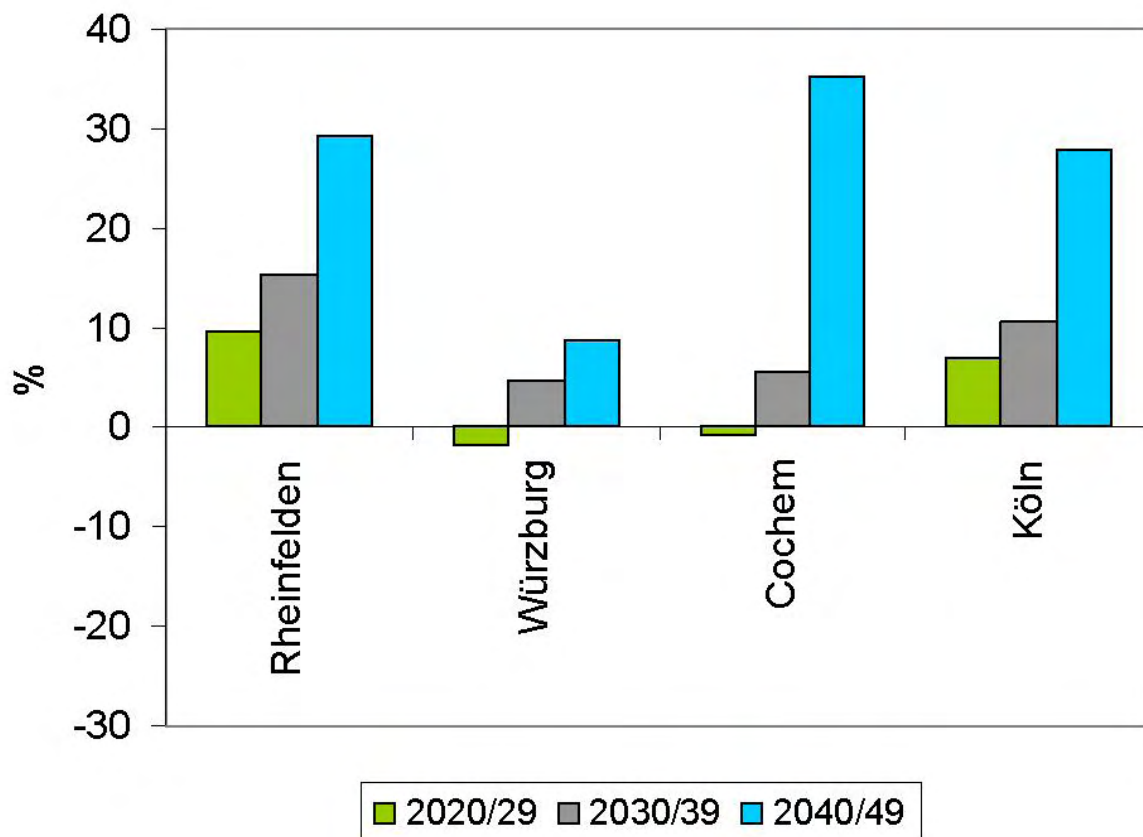


Abb.9: Änderungen des Quotienten MQ-HyWi/MQ-HySo für drei verschiedene zehnjährige Zeitscheiben des Szenarienlaufes (2020-2049) bezogen auf den Kontrolllauf (1990-1999) an verschiedenen Pegeln im Einzugsgebiet des Rheins. Simuliert wurde mit der Modellkette ECHAM4/OPYC3/REMO/LARSIM

6. Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Generierung eines raum-zeitlich hochaufgelösten Klimaszenariums wird das regionale Klimamodell REMO eingesetzt. Die mit REMO auf einem $1/6^\circ$ simulierten Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Lufttemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit und Strahlung dienen als Eingangsgrößen für die Wasserhaushaltsmodelle LARSIM und HBV-SMHI. Vergleichende Simulationen des gegenwärtigen Klimas und des Klimaszenariums erlauben es, die Auswirkungen auf den Wasserhaushalt und mit Einschränkung auch auf das Hoch- und Niedrigwassergeschehen zu quantifizieren.

Danach zeichnet sich für den Zeithorizont bis 2050 bei Zugrundelegung des B2-Emissionsszenariums und der Ergebnisse des ECHAM4/OPYC3-Laufs als Randantrieb eine Veränderung des Abflussregimes für den Rhein und seine Nebenflüsse ab. Insbesondere in den Monaten November und Februar ist eine deutliche Zunahme der Abflüsse zu verzeichnen. Auf Grund dieser Tendenz ist auch eine Verschärfung der Hochwassersituation nicht auszuschließen, da neben einer zunehmenden Auffeuchtung des Gebietes auch die Veränderung des Abflussjahresganges im alpinen Teil des Rheingebietes die Ausgangsbedingungen für winterliche Hochwasserereignisse am Mittel- und Niederrhein begünstigen.

Die Ergebnisse der Szenarienrechnungen sind jedoch unter Berücksichtigung der möglichen Unsicherheiten der Modellkette mit entsprechender Vorsicht zu interpretieren und zu bewerten. Diese Unsicherheiten sind vorrangig auf die derzeit verfügbaren globalen Klimamodellergebnisse zurückzuführen, aber auch die Regionalisierungsverfahren und die hydrologische Modellierung sind noch zu verbessern. Aus den genannten Gründen lassen sich derzeit auch nur Tendenzen ableiten. Diese sind noch nicht als eine Projektion, d.h. als ein real anzusetzendes Belastungsszenarium anzusehen. Gleichwohl sind die Ergebnisse so zu interpretieren, dass sie die hydrologischen Auswirkungen von Klimaänderungen quantitativ aufzeigen und es somit erlauben, die Größenordnung von Tendenzen möglicher Änderungen abzuschätzen.

Die sich abzeichnenden Änderungen erreichen ein Ausmaß, das nach einer vertieften Bewertung der betroffenen wasserwirtschaftlichen Nutzfunktionen und Schutzsysteme in Hinblick auf den Klimawandel verlangt. Zusammen mit noch laufend weiter zu verbessernden Klima- und Abflussszenarien stellt dies eine wesentliche Grundlage für die Erarbeitung von Anpassungsstrategien dar, die flussgebietsbezogen zu entwickeln sind, um im Sinne der Schadensvorsorge den denkbaren durch Klimaänderungen hervorgerufenen negativen Auswirkungen auf die Nutz- und Schutzfunktionen eines Gewässers frühzeitig entgegenzutreten. Hierzu sollte der Blick in die Zukunft modellmäßig bis zum Jahr 2100 erweitert werden. Dieser Zeithorizont wird von den globalen Klimaszenarien in der Regel abgedeckt und externe Untersuchungen deuten auf eine verstärkte Auswirkung des Klimawandels in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts hin.

Dank

Unser Dank gilt den KLIWA-Partnern und den Mitgliedern der Modellierer-Gruppen, insbesondere Frau Dr. Jacob und ihren Mitarbeitern vom Max-Planck Institut für Meteorologie, die in häufigen Diskussionen bereitwillig zur Verfügung standen bzw. durch ihre Zuarbeit wesentlich zu den hier dargelegten Untersuchungen beigetragen haben.

7. Literatur

- Andréasson, J., Bergström, S., Carlsson, B., Graham, L.P. & Lindström, G. (2004): Hydrological Change - Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33, No. 4-5, S. 228-234.
- Bartels, H., K. Hofius, B. Katzenberger, P. Krahe & H. Weber (2004a): Klima und Wasserwirtschaft. *PROMET* Jg. 30, Nr. 4. Deutscher Wetterdienst.
- Bartels, H., B. Katzenberger & H. Weber (2004b): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland. *Wasserwirtschaft*, 4, S. 15-19.
- Bergström, S. (1996): The HBV Model. In: V. P. Singh (Hrsg.): *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Colorado, USA, S. 443-476.
- Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM – Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. *Freiburger Schriften zur Hydrologie*, Band 11, 119 S.
- Ebel, M., K. Ludwig & K.-G. Richter (2000): Mesoskalige Wasserhaushaltsmodellierung im Rheineinzugsgebiet mit LARSIM. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, Heft 6, S. 308-312.



- Eberle, M., E. Sprockereef, K. Wilke & P. Krahe (2001): Hydrological Modelling in the River Rhine Basin, Part II. Report on Hourly Modelling. BfG - 1338. Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz.
- Enke, W. (2003): Abschlussbericht – Anwendung einer Wetterlagenklassifikation für Süddeutschland auf Kontrolllauf und Szenario eines transienten ECHAM4 Klimasimulationslaufs (Szenario B2) zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für Süddeutschland. Meteo-Research, Berlin, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 55 Seiten Text, Abbildungen und Tabellen im Anhang.
- Gerstengarbe, F. W., P. C. Werner, H. Österle & T. Zenker (2002): Abschlussbericht zum Werkvertrag B-Mr- 10029524/43, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung e.V., Potsdam, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 29 Seiten Text, Abbildungen und Tabellen im Anhang.
- Gordon, C., C. Cooper, C.A. Senior, H. Banks, J.M. Gregory, T.C. Johns, J.F.B. Mitchell & R.A. Wood (2000): The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustment. *Climate Dyn.*, 16, 147-168.
- IPCC (2001): *Climate Change – The Scientific Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 944 S.
- Jacob, D. & Podzun, R. (1997): Sensitivity studies with the Regional Climate Model REMO. *Meteorol. Atmos. Phys.*, 63, S. 119-129.
- Jacob, D., K. Bülow & M. Milliez (2003): Abschlussbericht – Dynamische Erstellung von hochaufgelösten Klimaszenarien (1/6°) als Basis für wasserwirtschaftliche Handlungsempfehlungen im KLIWA-Projekt B 1.1.1 Klimaszenarien., Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, im Auftrag des AK KLIWA, unveröffentlicht, 11 Seiten Text, Abbildungen im Anhang.
- Kleinn, J. (2002): *Climate Change and Runoff Statistics in the Rhine basin: A Process Study with a Coupled Climate – Runoff Model*. Dissertation ETH No. 14663, Zürich.
- Krüger, A. (2002): *Statistische Regionalisierung des Niederschlags für Nordrhein-Westfalen auf Grundlage von Beobachtungsdaten und Klimaszenarien*. Dissertation, Mitt. aus dem Inst. für Geophysik und Meteorologie der Universität Köln, Heft 149.
- Kwadijk, J.C.J. (1993): *The impact of climate change on the discharge of the River Rhine*. PhD-thesis Utrecht University, Department of Physical Geography, The Netherlands, KNAG/NGS publication 171.
- Lindström, G., B. Johansson, M. Persson, M. Gardelin & S. Bergström (1997): Development and test of the distributed HBV96 model, *J. Hydrol.* 201, 272-288.
- Middlekoop, H. (1999): *Estimating the effect of climate change on peak flows of the River Rhine*. RIZA report 99.064, Arnhem/Utrecht:RIZA/Utrecht University.
- Roeckner, E.K., L. Bengtsson, M. Christof, M. Claussen, L. Dümenil, M. Esch, M. Giogretta, U. Schlese & U. Schulzweida (1996): *The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate*. Max-Planck-Institut für Meteorologie, Report 218.
- Shabalova, M.V., W.P.A. van Deursen & T.A. Buishand (2002): *Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model*. Preprints 2002-16, KNMI, De Bilt.
- Thompson, N., I. A. Barrie & M. Ayles (1981): *The Meteorological Office rainfall and evaporation calculation system: MORECS (July 1981)*. Hydrological Memorandum No. 45, Meteorological Office (GB), 69 S.
- Wendling, U. (1995): *Berechnung der Gras-Referenzverdunstung mit der FAO Penman-Monteith-Beziehung*. *Wasserwirtschaft* 85, 602-604.

Zunahme „kritischer“ Wetterlagen als Ursache für die Entstehung extremer Hochwasser in Südwestdeutschland

Hans J. Caspary

Fachhochschule Stuttgart – Hochschule für Technik

1. Einleitung

Für zahlreiche Gewässer Südwestdeutschlands und der Beneluxstaaten ist seit Mitte der siebziger Jahre regional eine starke Häufung von Hochwasserereignissen zu beobachten. Die Hochwasser des Februar 1990, Dezember 1993, Januar 1995, Februar 1997, Oktober 1998 und März 2002 verursachten dabei Milliarden Schäden. Stellvertretend für die Einzugsgebiete, die von diesen Extremhochwassern besonders stark betroffen waren, werden im folgenden die maximalen Jahresabflüsse von 4 Gewässern Südwestdeutschlands einer Analyse unterzogen. Abb. 1 zeigt die Lage der Gewässer und Pegel. Das Einzugsgebiet des Pegels Pforzheim hat eine Einzugsgebietsfläche von 1 477 km². Die Bodennutzung setzt sich aus zirka 60 % Waldfläche, zirka 30 % landwirtschaftlicher Nutzfläche und ca. 8 % Siedlungsfläche zusammen. Die Donau hat am Pegel Beuron eine Einzugsgebietsfläche von 1 320 km² mit einem Siedlungsanteil von ca. 5%. Bedingt durch die geringen Anteile der Siedlungsflächen ist somit der versiegelte Anteil an diesen beiden Pegeleinzugsgebieten sehr gering, womit die Urbanisierung und damit eine zunehmende Versiegelung im Einzugsgebiet als Ursache für die Extremhochwasser dieser Untersuchungsgebiete ausgeschlossen werden kann. Abb. 2 zeigt die Jahresmaxima des Abflusses an den betrachteten Pegeln der vier Flüsse für die gesamten zur Verfügung stehenden Messzeiträume zusammen mit je einer Ausgleichskurve in Form eines Polynoms vierten Grades. Auffallend ist, dass alle vier Ausgleichskurven seit Mitte der siebziger Jahre einen deutlichen Anstieg aufweisen. Dies gilt selbst für die Mosel, bei der die Messreihe bis zum Jahr 1816 zurückreicht.

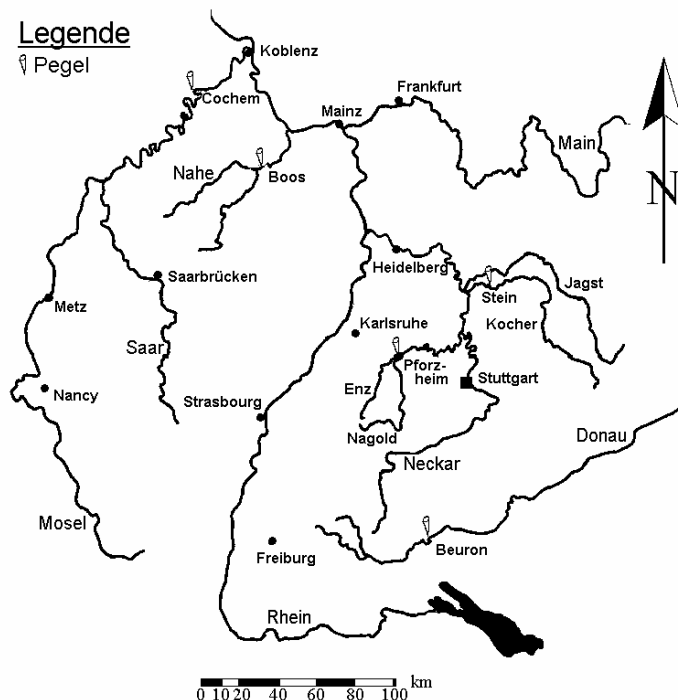


Abb. 1. Südwestdeutschland mit den untersuchten Gewässern Donau, Enz, Kocher, Nahe und Mosel.



Mit Hilfe nicht-parametrischer Tests (Pettitt, 1979) wurden die maximalen Jahresabflüsse (HQ-Werte) einer Bruchpunktanalyse unterzogen. Der Bruchpunkt einer Zeitreihe ist der Zeitpunkt, der die Zeitreihe in zwei statistisch unterschiedliche Mengen aufteilt. Für die maximalen Jahresabflüsse der Donau liegt der Bruchpunkt mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.7 % im Jahr 1977, für die Messreihe des Pegels Pforzheim/Enz mit 96.2 % im Jahr 1976. Was ist die Ursache für den regionalen Anstieg der Hochwasserabflüsse während der letzten drei Jahrzehnte und die nahezu zeitgleich auftretenden Bruchpunkte in den Zeitreihen?

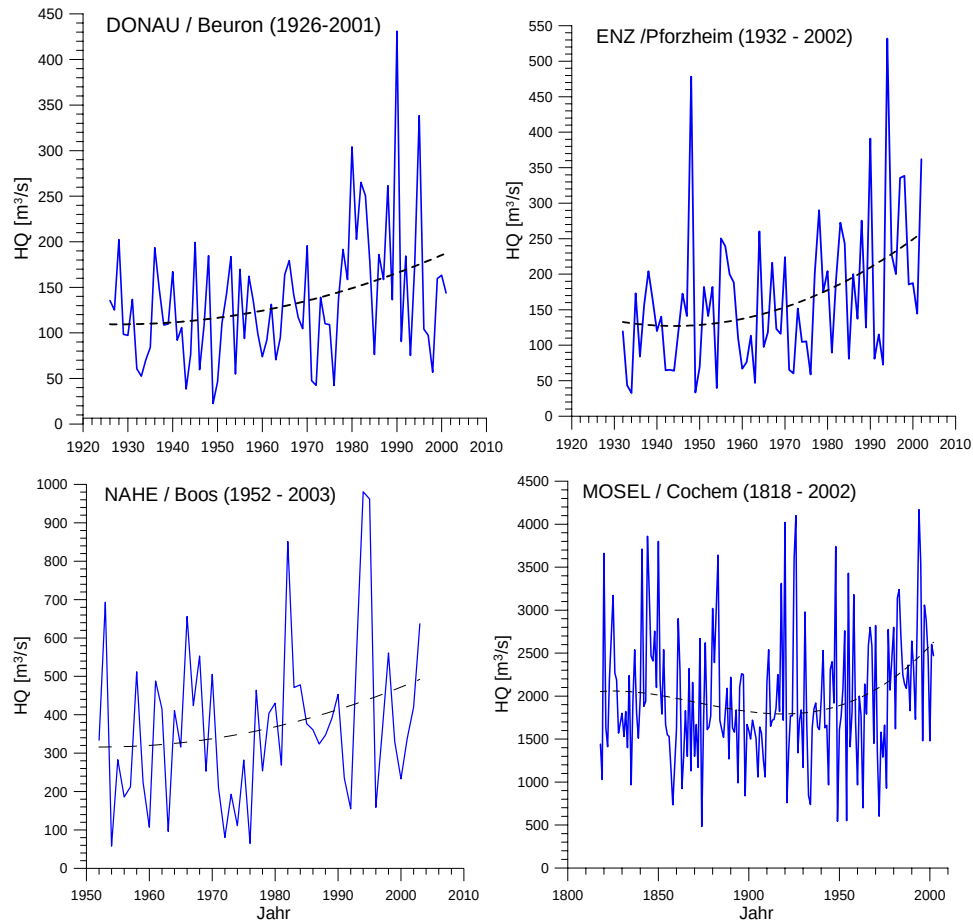


Abb. 2: Jahresmaxima des Abflusses HQ [m³/s] der Donau am Pegel Beuron ($A_E = 1\,320\text{ km}^2$) im Zeitraum 1926–2001, der Enz/Nordschwarzwald am Pegel Pforzheim ($A_E = 1\,477\text{ km}^2$) im Zeitraum 1932–2002, der Nahe am Pegel Boos ($A_E = 2\,382\text{ km}^2$) im Zeitraum 1952–2003 und der Mosel am Pegel Cochem ($A_E = 27\,088\text{ km}^2$) im Zeitraum 1818–2002.

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

2. Großwetterlagen Europas und extreme Winterhochwasser in Südwestdeutschland

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

2.1 Großwetterlagen Europas

Atmosphärische Zirkulationsmuster wurden erstmals von Baur et al. (1944) für Mitteleuropa in sogenannte "Großwetterlagen Europas" klassifiziert. Sie beschreiben das atmosphärische Strömungsverhalten über dem Nordatlantik und Europa in einem Fenster über der Nordhalbkugel von Grönland bis zum Ural (40° westlicher bis 60° östlicher Länge) und vom Nordpol bis zur Sahara (30° bis 90° Grad nördlicher Breite). Eine Großwetterlage (GWL) wird definiert als die mittlere Luftdruckverteilung eines Großraumes, mindestens von der Größe Europas, während eines mehrtägigen Zeitraumes, in welchem gewisse Züge aufeinanderfolgender Wetterlagen gleich bleiben. Merkmale bestimmter GWL sind die geographische Lage der Steuerungszentren (Hoch- und Tiefdruckgebiete) und die Lage und Erstreckung von Frontalzonen. Zudem werden zyklonale und antizyklonale Verhältnisse unterschieden. Auf diese Weise wurden für Europa 29 verschiedene GWL definiert, die in Hess & Brezowsky (1969) detailliert beschrieben und katalogisiert sind. 1993 wurde der Katalog von Gerstengarbe & Werner (1993) nochmals bis 1992 aktualisiert. Die Großwetterlagen Europas liegen für den langen Zeitraum von 1881 bis heute als Tageswerte vor und werden auch weiterhin vom Deutschen Wetterdienst (DWD) klassifiziert. Ab dem Jahr 2003 stellt der DWD die Großwetterlagen zusammen mit weiteren detaillierten Informationen über Witterung, Bodenluftdruckkarten, 500hPa Höhenkarten, Anomaliekarten der Lufttemperatur und des Niederschlages gegen Gebühr im Internet zur Verfügung.

2.2 Instationarität der Großwetterlage "Westlage zyklonal" im Winter

Eine umfangreiche Zeitreihenanalyse der Großwetterlagen Europas wurde bereits von Bárdossy & Caspary (1990) für den Zeitraum 1881 bis 1989 durchgeführt. Bezüglich der Auswirkungen auf eine mögliche Hochwassergefährdung resultierte hieraus als wichtigstes Ergebnis, dass die Häufigkeiten zonaler Zirkulationen für die zusammengefassten Wintermonate Dezember und Januar einen drastischen Anstieg in den beiden letzten Jahrzehnten aufweisen. Zu den zonalen Zirkulationen gehören die vier Großwetterlagen „Westlage antizyklonal“ (Wa), „Westlage zyklonal“ (Wz), „südliche Westlage (Ws)“ und „winkelförmige Westlage“ (Ww). Die aus hydrologischer Sicht mit Abstand bedeutendste Wetterlage ist die "Westlage zyklonal" (Wz). Abb. 3 zeigt die Bodenluftdruckkarte der Wz-Lage des Zeitraumes 08.-24.12.1993. Die äußerst ergiebigen Niederschläge dieser 17 Tage ohne Unterbrechung andauernden Wz-Wetterlage haben an zahlreichen Gewässern Südwestdeutschlands das extreme „Weihnachtshochwasser 1993“ verursacht. Aus Abb. 3 ist die für Wz typische Lage eines Hochdruckgebietes im Bereich der Azoren (Azorenhoch) und eines steuernden Zentraltiefs nördlich von 60°N (Islandtief) ersichtlich. Dabei liegen der Nordatlantik und das europäische Nordmeer im Bereich tiefen Luftdruckes. Durch die Lage der Hoch- und Tiefdruckgebiete wird eine großräumige, nahezu Breitengradparallele Westströmung vom Atlantik nach Mitteleuropa verursacht. Die Witterung ist häufig bestimmt durch den raschen Durchzug von Fronten und langandauernde, sehr ergiebige Niederschläge. Nähere Informationen zum Dezemberhochwasser 1993 sind in BfG (1994) und LfU Baden-Württemberg (1994) enthalten.

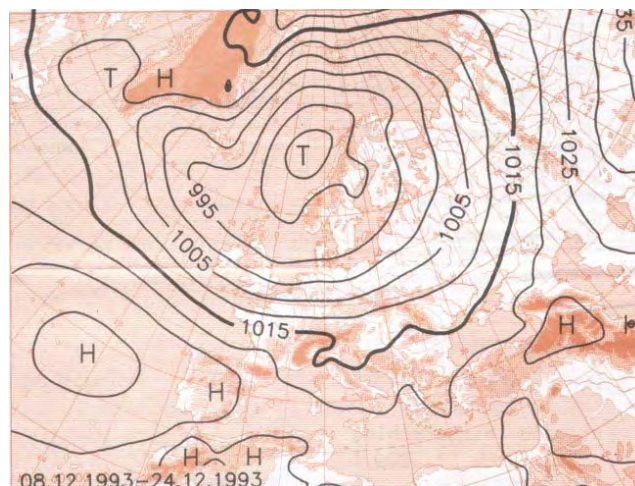


Abb. 3: Bodenluftdruckkarte der „Westlage zyklonal“ (Wz) für den Zeitraum 08.-24.12.1993, nach DWD, 1994.

Abb. 4 zeigt die Zeitreihen der Häufigkeiten und der maximalen Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Perioden der GWL „Westlage zyklonal“ (Wz) für die Winter (Dez.-Feb.) des Zeitraumes 1881-2004. Beide Abbildungen enthalten je eine Ausgleichskurve in Form eines Polynom 4. Grades. Beide Zeitreihen weisen signifikant ansteigende Trends auf. Mit Hilfe nicht-parameterischer Tests nach Mann-Whitney (Pettitt, 1979) kann für beide Zeitreihen übereinstimmend ein Bruchpunkt im Jahr 1981 berechnet werden, der für die Häufigkeiten auf dem 99%-Niveau und für $T_{\max}$ auf dem 95 % Niveau statistisch signifikant ist.

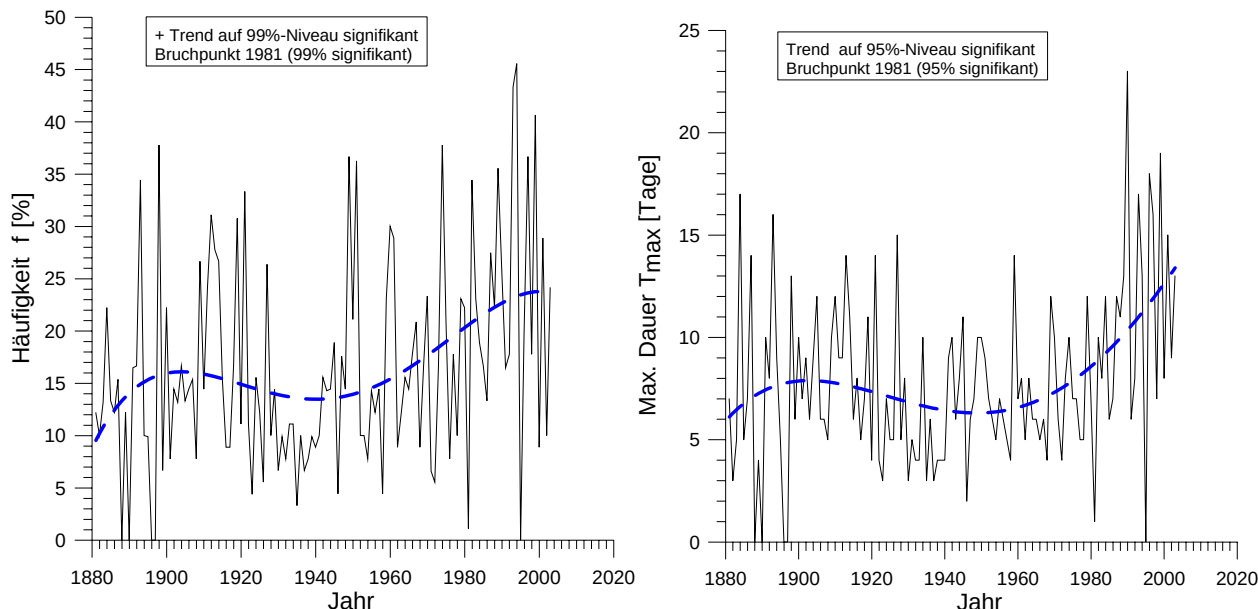


Abb. 4: „Westlage zyklonal“ (Wz) für die Winter (Dez.-Feb.) des Zeitraumes 1881-2004. Linkes Bild: Häufigkeiten f [%], rechtes Bild: max. Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Wz-Perioden [Tage]. Ausgleichskurven: Polynom 4. Grades.

In Abb. 5 sind statt der Zeitreihen die beiden Parameter $T_{\max}$ und f für alle Winter des Zeitraumes 1881-2004 in einem Scatterplot aufgetragen, wobei die Winter vor dem Bruchpunkt (1881/82-1981/82) mit Dreiecksymbolen und die Winter nach dem Bruchpunkt (1982/83-2003/04) mit quadratischen Symbolen dargestellt sind.

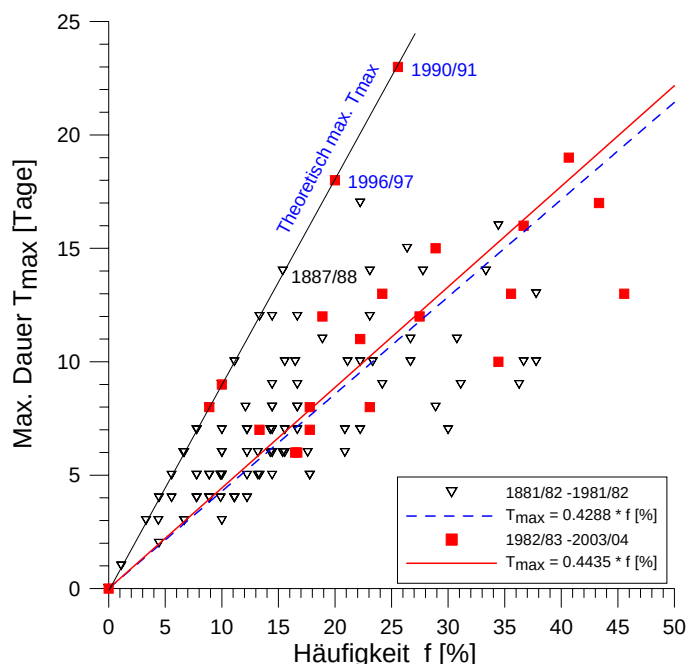


Abb. 5: Max. Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Wz-Perioden als Funktion der Häufigkeit f [%] für die Winter der Zeiträume 1881/82-1981/82 und 1982/83-2003/04 zusammen mit zugehörigen Regressionsgeraden.

Zusätzlich sind in Abb. 5 die Regressionsgeraden eingezeichnet. Diese müssen in beiden Fällen durch den Ursprung verlaufen. Auf den ersten Blick fällt bereits eine Häufung der Quadratsymbole im Bereich hoher Häufigkeiten und großer $T_{\max}$ -Werte auf. Andererseits stimmen die Regressionsgeraden für beide Zeitreihen nahezu überein. Die max. Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Wz-Perioden nimmt im Winter (Dez.-Feb.) mit zunehmender Häufigkeit f zu. Für den Zeitraum 1982/83-2003/04 gilt nach Gl. (1)

$$T_{\max} = 0,443 \cdot f \quad (1)$$

Hierin bedeuten:

- $T_{\max}$ = maximale Dauer einer zusammenhängender Wz-Periode im Winter (Dez.-Feb.) des Zeitraumes 1982/83-2003/04 [Tage]
- f = Häufigkeit der Großwetterlage Wz im Winter (Dez.-Feb.) [%]

Die obere Einhüllende der Punkte in Abb. 5 wird durch die theoretisch maximale mögliche Dauer zusammenhängender Wz-Perioden abgegrenzt. So lässt sich hieraus z.B. entnehmen, dass ein Winter mit einer Häufigkeit von $f = 10\%$ Wz-Wetterlagen von einer einzigen zusammenhängenden Wz-Periode von 9 Tagen gebildet wird. Für kleine Häufigkeiten ($f \leq 10\%$) kann man vermuten, dass dies in der Praxis auftreten kann. Überraschend ist jedoch, dass auch Winter mit hohen Wz-Häufigkeiten, wie z.B. der Winter 1990/91 mit einer Häufigkeit $f = 25,6\%$ aus einer einzigen zusammenhängenden Wz-Periode - 1990/91 waren es 23 Tage - bestehen können.

Für die Entstehung von Hochwasser in größeren Einzugsgebieten sind ergiebige Niederschläge infolge langandauernder Wz-Lagen maßgebend. Aus diesem Grund ist in Abb. 6 eine Schranke von $T_{\max} = 13$ Tagen eingetragen. Eine getrennte Analyse für die beiden Zeiträume zeigt, dass die Wahrscheinlichkeiten eines Winters mit $T_{\max} \geq 13$ Tagen für den Zeitraum vor dem Bruchpunkt (1881/82-1981/82) $P_{\bar{U}} = 7,9\%$ betrug. Sie ist nach dem Bruchpunkt (1982/83-2003/04) auf $P_{\bar{U}} = 40,9\%$ angestiegen. **Dies bedeutet, dass das Risiko einen Winter mit einer langen zusammenhängenden Wz-Periode ($T_{\max} \geq 13$) zu erhalten**



für den Zeitraum nach dem Bruchpunkt im Vergleich mit dem Zeitraum vor dem Bruchpunkt um mehr als das 5fache angestiegen ist.

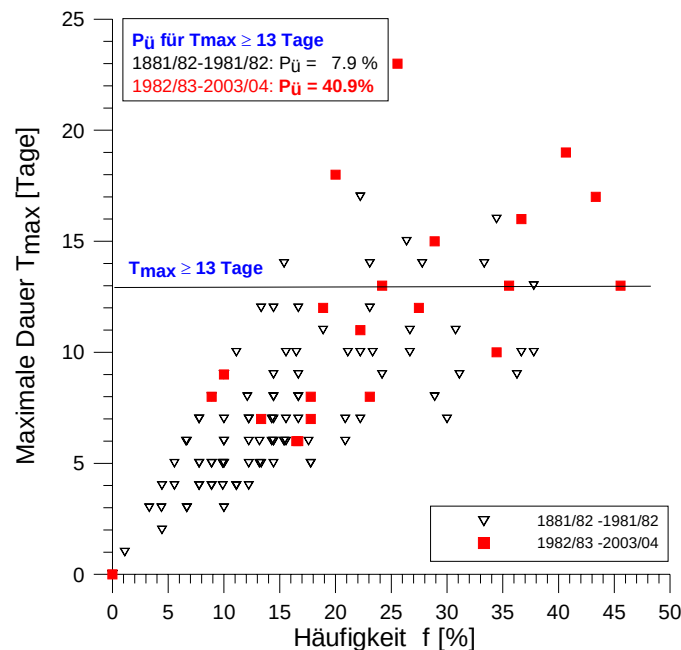


Abb. 6: Max. Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Wz-Perioden als Funktion der Häufigkeit f [%] für die Winter (Dez-Feb.) der Zeiträume 1881/82-1981/82 und 1982/83-2003/04 mit Schwellenwert $T_{\max} \geq 13$ Tage.

In Abb. 7 werden Winter mit großer Häufigkeit an Wz-Lagen ($f \geq 35\%$) und einer langen zusammenhängenden Wz-periode ($T_{\max} \geq 13$ Tage) betrachtet. Während in den 101 Jahren des Zeitraumes 1881/82-1981/82 nur ein Winter im grau hinterlegten „kritischen“ Sektor lag, entfallen 5 der letzten 22 Winter und damit 22,7% auf den Zeitraum nach dem Bruchpunkt (1982/83-2003/04). Hieraus folgt, dass **das Risiko einen niederschlagsreichen, milden Winter im „kritischen“ Sektor ($T_{\max} \geq 13$ Tage $\cap$ $f \geq 35\%$) zu erhalten bereits heute im Vergleich zu dem Zeitraum vor dem Bruchpunkt um mehr als den Faktor 22 angestiegen ist.**

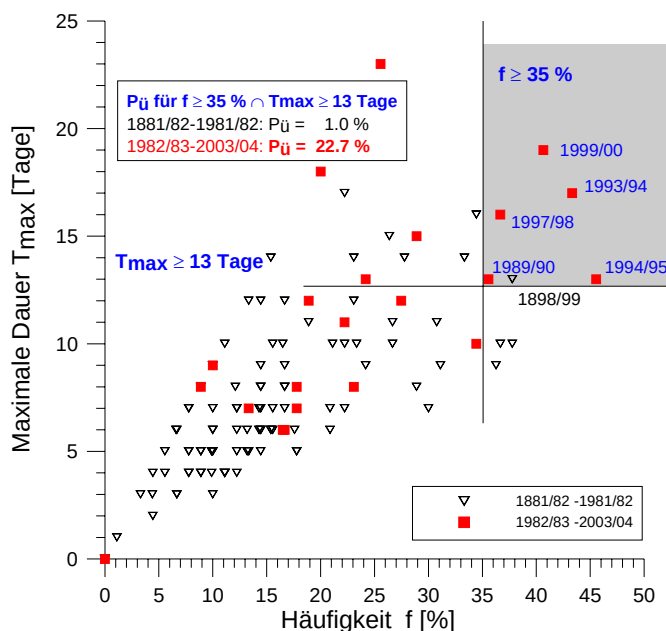


Abb. 7: Max. Dauer $T_{\max}$ zusammenhängender Wz-Perioden als Funktion der Häufigkeit f [%] für die Winter (Dez.-Feb.) der Zeiträume 1881/82-1981/82 und 1982/83-2003/04 mit „kritischem“ Sektor ($T_{\max} \geq 13$ Tage $\cap$ $f \geq 35\%$).

2.3 Zonale Wetterlagen als Auslöser extremer Hochwasser in Südwestdeutschland

Um die für das Auftreten von Hochwasser verantwortlichen und damit "kritischen" Großwetterlagen herauszufinden, wurde in (Caspary, 2003) aus den Messreihen der 5 Pegel jeweils eine Rangliste mit den größten HQ-Werten ermittelt. Diesen wurden dann die jeweils auslösenden GWL zugeordnet. Tab. 1 zeigt eine Zusammenfassung der Ergebnisse in Form einer Rangliste der 5 größten Hochwasser für die Pegel Donau/Hundersingen, Enz/Pforzheim, Kocher/Stein und Alb/Ettlingen zusammen mit den auslösenden Großwetterlagen (GWL). Aus Tab. 1 wird deutlich, dass nahezu alle großen Hochwasser an den untersuchten Pegeln durch die GWL "Westlage zyklonal" (Wz) ausgelöst wurden. In wenigen Fällen ist auch eine Kombination von Wz mit den Wetterlagen „südliche Westlage“ (Ws), „winkelförmige Westlage“ (wW) und „Nordwestlage zyklonal“ (NWz) maßgebend. In fast allen Fällen handelt es sich um langandauernde (6-23 Tage) Wz-Perioden im Zeitraum Oktober bis März, wobei ein klarer Schwerpunkt auf den Winter (Dez.-Feb.) entfällt. Für die Hochwasserbildung an größeren Gewässern Baden-Württembergs muss die „Westlage zyklonal“ somit als äußerst „kritische“ Wetterlage angesehen werden.

2.4 Zonale Großwetterlagen als Auslöser gefährlicher Winterstürme über Europa

Ergänzend muss erwähnt werden, dass die zonalen Großwetterlagen (GWL) nicht nur extreme Niederschläge und Hochwasser bewirken können, sondern auch für ganze Orkanserien über Europa mit katastrophalen Schäden mitverantwortlich sind. So verursachten die während zweier Wz-Perioden (24.–30.01.1990 und 25.02.–01.03.1990) aufgetretenen Orkane "Daria" (25/26.01.), "Vivian" (25.–27.02.) und "Wiebke" (28.02.–01.03.) in Europa volkswirtschaftliche Gesamtschäden in Höhe von 14,8 Milliarden US \$, von denen 10,2 Milliarden US \$ auf versicherte Schäden entfielen und forderten 230 Todesopfer (Münchener Rück, 1993). Auch die Winterorkanserie im Dezember 1999 über Europa wurde durch zonale Großwetterlagen verursacht. Von dem Winterorkan "Anatol" (3./4.12.), der auf eine Wz-Periode (01. –13.12.) entfiel, war vornehmlich West- und Nordeuropa betroffen. Die beiden Orkane "Lothar" (26.12.) und "Martin" (27.12.), die dramatische Schäden in Frankreich,



Deutschland, der Schweiz und Spanien auslösten, entfielen auf die zonale GWL "südliche Westlage (Ws)"

Rang	Datum	HQ [m³/s]	auslösende GWL		Dauer [Tage]
			Zeitraum	GWL	
Donau / Hundersingen; Messzeitraum: 1930-2001					
1	16.02.1990	491.6	09.02. - 16.02.1990	Wz	8
2	06.02.1980	376.3	30.01. - 07.02.1980	Wz	9
3	27.01.1995	355.5	18.01. - 22.01.1995	wW	5
			23.01. - 02.02.1995	Wz	11
4	27.03.1988	324.5	15.03. - 20.03.1988	Wz	6
			21.03. - 28.03.1988	Ws	8
5	07.01.1982	315.0	01.01. - 05.01.1982	SWz	5
			06.01. - 08.01.1982	HNFa	3
Enz / Pforzheim ; Messzeitraum:1932-2002					
1	21.12.1993	532	08.12. - 24.12.1993	Wz	17
2	29.12.1947	478	20.12. - 23.12.1947	NWz	4
			24.12. - 31.12.1947	Ws	8
3	15.02.1990	391	09.02. - 16.02.1990	Wz	8
4	22.03.2002	362	18.03. - 22.03.2002	Wz	6
5	29.10.1998	338.5	09.10. - 31.10.1998	Wz	23
6	26.02.1997	335.7	11.02. - 28.08.1997	Wz	18
Kocher / Stein ; Messzeitraum: 1920-2001					
1	21.12.1993	620	08.12. - 24.12.1993	Wz	17
2	29.12.1947	558	20.12. - 23.12.1947	NWz	4
			24.12. - 31.12.1947	Ws	8
3	24.12.1919	519	21.12. - 31.12.1919	Wz	11
4	30.10.1998	517	09.10. - 31.10.1998	Wz	23
5	26.02.1997	513	11.02. - 28.02.1997	Wz	18
Alb / Ettlingen; Messzeitraum: 1963-2002					
1	29.10.1998	96.5	09.10. - 31.10.1998	Wz	23
2	21.03.2002	95	18.03. - 22.03.2002	Wz	5
3	24.05.1978	78.9	23.05. - 25.05.1978	TM	3
4	21.12.1993	68.7	08.12. - 24.12.1993	Wz	17
5	26.02.1997	58	11.02. - 28.02.1997	Wz	18

Tab. 1: Rangliste der 5 größten Hochwasser für die Pegel Donau/Hundersingen, Enz/Pforzheim, Kocher/Stein und Alb/Ettlingen sowie auslösende Großwetterlagen (GWL), nach Caspary, 2003.

des Zeitraumes 23. bis 29. Dezember. Die Winterstürme des Dezember 1999 forderten mehr als 160 Todesopfer und verursachten volkswirtschaftliche Schäden in Höhe von 18,5 Milliarden US-Dollar, wovon 10,75 Milliarden auf versicherte Schäden entfielen (Münchener Rück, 2001). Für West- und Mitteleuropa besteht durch die Zunahme der winterlichen Wz-Häufigkeiten eine erhöhte Sturmgefährdung auch ohne Zunahme der Sturmaktivität über dem Nordatlantik (von Storch et al., 1998).

Ein Vergleich mit den zugehörigen Daten in Abb. 7 zeigt, dass die 3 durch extreme Sturmserien gekennzeichneten Winter (1989/90, 1997/98 und 1999/2000) alle im „kritischen Sektor“ liegen. In Tab. 2 sind die Ergebnisse sowohl für die Hochwasser als auch die Winterstürme zusammengefasst. Gemäß Abb. 7 **entfallen von den letzten 15 Wintern (1989/90-2003/04) fünf Winter auf den „kritischen Sektor“.** Die langandauernden Wz-Wetterlagen dieser Winter haben Hochwasser- und Wintersturmschäden von nahezu 40 Milliarden US \$ verursacht.

Winter	Ereignis	Datum	Land/Region/ Einzugsgebiet	GWL Wz		Volkswirt. Schäden [Mio. US \$]	Versicherte Schäden [Mio. US \$]	Todes- opfer
				Häufigkeit f [%]	max. Dauer T _{max} [Tage]			
1989/90	Winterstürme, "Daria", "Vivian", "Wiebke"	25.01.-01.03.1990	Westeuropa GB, D, F, Benelux	35,6	13	14 800	10 200	230
	Donauhochwasser	25.-26.02.1990	Oberlauf Donau					
1993/94	Weihnachtshochwasser	20.12.-31.12.1993	Rhein, Mosel, Nahe Neckar, Enz, Kocher	43,3	17	2 000	800	14
1994/95	Hochwasser	19.01.-03.02.1995	Rhein, Nahe, Main, Mosel, Lahn, Benelux, Oberlauf Donau	45,5	13	3 500	910	28
1997/98	Winterstürme	23.12.-05.01.1998	GB, IR, D, F	36,7	16	650		15
1999/2000	Winterstürme "Anatol"	03.-04.12.1999	DK, D, GB, S, PL	40,7	19	18 500	10 750	230
	"Lothar"	26.12.1999	F, D, CH, B, A					
	"Martin"	27.12.1999	F, ES, CH					
Σ =						39 450		

Tab. 2: Winter (Dez.- Feb.) des Zeitraumes 1982/83-2003/04 im „kritischen“ Sektor mit ($T_{\max} \geq 13$ Tage $\cap$ $f \geq 35\%$), hierdurch ausgelöste Hochwasser in Südwestdeutschland und Winterstürme in West- u. Mitteleuropa und verursachte Schäden.

3. Auswirkungen der Instationarität der Hochwasserabflüsse auf die hydrologische Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Betrachten wir die Ergebnisse einer herkömmlichen Hochwasserstatistik unter Verwendung der Gumbelverteilung, so können hiermit die für die hydrologische Bemessung wasserwirtschaftlicher Anlagen maßgeblichen Scheitelabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit T berechnet werden (Tabelle 3). Hier ist beispielsweise ein HQ100 als Hochwasserscheitelabfluss mit der Jährlichkeit $T = 100$ definiert. Dies bedeutet, dass der Abfluss HQ100 im statistischen Mittel in 100 Jahren nur einmal erreicht oder überschritten wird. Es handelt sich also um einen statistischen Wert und nicht um einen gemessenen Hochwasserabfluss. Die Gumbelverteilung ist eine in der Hydrologie häufig benutzte analytische Extremwertverteilung, die an die Beobachtungsdaten der gemessenen maximalen Jahresabflüsse (HQ-Werte) angepasst wird.

Nahezu zeitgleich mit dem Anstieg der Häufigkeit und der Persistenz der Großwetterlage "Westlage zyklonal (Wz)" im Winter steigen die Extremabflüsse für zahlreiche Pegel auf ein im Vergleich zur Vergangenheit (1930–1976) deutlich erhöhtes Niveau an, bei gleichzeitiger drastischer Zunahme der Variabilität der maximalen Jahresabflüsse (vergleiche auch Caspary & Bárdossy (1995) für die Enz/Nordschwarzwald sowie Caspary (1996) für den Oberlauf der Donau). Bei der hydrologischen Extremwertanalyse wird bisher stets auf der Grundlage der Stationaritätsannahme die Zeitreihe des gesamten Messzeitraumes herangezogen. Die Stationaritätsannahme besagt, dass die einzelnen HQ-Werte zwar einer natürlichen Variabilität unterliegen, dass aber wichtige Einflussfaktoren wie das Klima keine systematischen Veränderungen erfahren.

Tab. 3 (jeweils obere und mittlere Zeilen, insbesondere fette Zahlen) zeigt sehr deutlich, wie stark die Hochwasser des Februar 1990, Dezember 1993 und Januar 1995 die Einschätzung eines potentiellen Hochwasserschutzes verändert haben. Für den Pegel Pforzheim, bei dem auch im Februar 1997 und März 2002 größere Hochwasser auftraten, entspricht das 100jährige Hochwasser (HQ100) des Zeitraumes 1932 bis 1976 nur noch dem 30jährigen



DONAU / BEURON	Wiederkehrintervall T [Jahre]							
Messzeitraum	2	5	10	20	25	50	100	200
1926 - 1976	104 ±12 %	147 ±12 %	175 ±16 %	202 ±17 %	210 ±18 %	237 ±19 %	263 ±20 %	289 ±20 %
1926 - 2001	125 ±12 %	187 ±13 %	229 ±15 %	269 ±16 %	281 ±16 %	320 ±17 %	359 ±18 %	397 ±18 %
1977 - 2001	167 ±19 %	245 ±22 %	297 ±24 %	346 ±26 %	362 ±27 %	410 ±28 %	458 ±31 %	

ENZ / PFORZHEIM	Wiederkehrintervall T [Jahre]							
Messzeitraum	2	5	10	20	30	50	100	200
1932 - 1976	120 ±19 %	193 ±20 %	241 ±21 %	287 ±22 %	314 ±23 %	347 ±24 %	392 ±24 %	437 ±25 %
1932 - 2002	148 ±15 %	238 ±15 %	297 ±17 %	354 ±18 %	386 ±18 %	428 ±19 %	483 ±19 %	538 ±20 %
1977 - 2002	193 ±20 %	292 ±22 %	358 ±25 %	421 ±26 %	457 ±27 %	502 ±28 %	563 ±29 %	

NAHE / BOOS	Jährlichkeit T [Jahre]							
Messzeitraum	2	5	10	20	30	50	100	200
1952 - 1976	276 ±25 %	443 ±24 %	555 ±24 %	662 ±25 %	723 ±25 %	800 ±26 %	904 ±26 %	1 007 ±26 %
1952 - 2003	340 ±15 %	527 ±15 %	651 ±16 %	770 ±16 %	838 ±17 %	923 ±17 %	1 038 ±17 %	1 153 ±18 %
1977 - 2003	4028 ±17 %	571 ±18 %	684 ±19 %	792 ±20 %	854 ±21 %	931 ±21 %	1 036 ±21 %	

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

Hochwasser (HQ_{30}) des Zeitraumes 1932 bis 2002. Beim Pegel Beuron/Donau entspricht das HQ_{100} des Zeitraumes 1926 bis 1976 lediglich dem HQ_{20} des Zeitraumes 1926 bis 2001! Ähnliches kann für die Nahe am Pegel Boos abgelesen werden. Bereits die reguläre Berücksichtigung der drei jüngsten Extremhochwasser vom Februar 1990, Dezember 1993 und Januar 1995 hat somit rein rechnerisch für die Enz zu einer **mehr als Verdreifachung des Hochwasserrisikos** beziehungsweise zu einem Anstieg der HQ_T -Werte um ca. 23 % für große Jährlichkeiten geführt. Entsprechend ergibt sich für die Donau gegenüber dem Zeitraum 1926 bis 1976 ein **fünffach größeres Hochwasserrisiko**, was einem Anstieg der HQ_T -Werte um 35 bis 37 % für große Jährlichkeiten entspricht.

Bei dieser Analyse werden die gesamten Messwerte als stationäre Zeitreihe angesehen: Das Vorgehen berücksichtigt noch nicht die systematische Zunahme der Häufigkeit und Persistenz der winterlichen Wz-Großwetterlagen, durch welche die extremen Winterniederschläge und die Hochwasserabflüsse der hier betrachteten Einzugsgebiete gleich einem

Quantensprung auf ein höheres Extremabflusniveau angehoben werden. Die zentrale Frage ist nun: **Kann für die beschriebenen Einzugsgebiete diese Stationaritätsannahme bei der Ermittlung der Bemessungshochwasserabflüsse in Zukunft beibehalten werden?**

Die Wasserwirtschaftsverwaltungen der Bundesländer in Deutschland beantworteten diese Frage bis vor wenigen Monaten mit "Ja" und dies sicherlich auch aus wirtschaftlichen Erwägungen.

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

Was aber ist zu tun, wenn man die oben gestellte Frage mit "nein" beantwortet hat? Man muss sich für diese Gebiete von der traditionellen Bemessungspraxis abweichende Verfahren überlegen. Wie könnten solche Verfahren aussehen? Aufgrund der Instationarität müssen die HQ-Meßwerte für den Zeitraum vor und nach dem Bruchpunkt einer getrennten Analyse unterzogen werden. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Instationarität wird in den jeweils letzten Zeilen von Tabelle 3 hierzu eine **erste grobe Abschätzung** vorgenommen. Dabei wurden nur noch die HQ-Werte des Zeitraumes ab 1977, nach dem Auftreten der Bruchpunkte in allen betrachteten Zeitreihen, berücksichtigt. Dies führt für die Enz/Nord-schwarzwald zu einer Verschiebung der Jährlichkeiten gegenüber dem Zeitraum 1930 bis 1976 etwa um den Faktor 10. Für das HQ100 bedeutet es einen Anstieg um 61 %.

Bei der Donau fällt die Erhöhung des Hochwasserrisikos noch deutlicher aus. Hier entspricht das HQ100 des Zeitraumes 1926 bis 1976 nur noch dem HQ5 des Zeitraumes 1977 bis 2001, das HQ₁₀₀ steigt um 74 % an. Selbst unter Einbeziehung des gesamten Messzeitraumes von 1926-2001 würde das HQ100 nur noch dem HQ25 des Zeitraumes 1977-2001 entsprechen, das zugehörige HQ100 steigt um ca. 28% an.

Dies bedeutet, dass in den beiden Einzugsgebieten infolge der bereits eingetretenen Klimaänderungen während der Wintermonate ein früherer Schutz gegen ein 100jährliches Hochwasser zukünftig nicht einmal mehr einem 10jährlichen Hochwasserschutz entsprechen würde! Wie analoge statistische Untersuchungen in Tab. 3 und die Zeitreihen der HQ-Werte in Abb. 2 zeigen, gehören auch das Nahe- und Moseleinzugsgebiet zu den von der Winterklimaänderung besonders betroffenen "kritischen Hochwasserregionen" Deutschlands.

Die Referenzperioden (beispielsweise 1926–1976 für die Donau) liegen in einem Zeitraum relativer „hydrologischer Ruhe“, eine Tatsache, die zu einer Kritik an dieser Abschätzung herangezogen werden könnte. Bedauerlicherweise diente aber gerade dieser Zeitraum als Grundlage für die herkömmliche hydrologische Berechnung der Bemessungsabflüsse und damit zur Dimensionierung zahlreicher wasserwirtschaftlicher Anlagen. Der alleinige Bezug auf das relativ kurze Intervall nach Einsetzen des Bruchpunktes in der Zeitreihe der HQ-Werte (1977–2001) führt natürlich zur Vergrößerung des Konfidenzintervalles. So kann aus Tab. 3 abgelesen werden, dass das "zukünftige" HQ10 des Pegels Enz/Pforzheim mit 95 % Wahrscheinlichkeit in den Grenzen $358 \text{ m}^3/\text{s} \pm 25 \%$ liegt, das heißt $268 \text{ m}^3/\text{s} \leq \text{HQ}_{10} \leq 447 \text{ m}^3/\text{s}$.



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

Zur scheinbaren Widerlegung dieser Hypothese werden zuweilen Pegel mit meist langen Beobachtungsreihen genannt, die keine Instationarität der Hochwasserabflüsse aufweisen. Der Autor hat jedoch stets mit Nachdruck darauf hingewiesen, dass das Problem der Zunahme der Hochwasserabflüsse nicht alle Einzugsgebiete Deutschlands betrifft. Niederschlagsreiche Westwetterlagen regnen sich meist in den west- und südwestdeutschen Mittelgebirgen ab, so dass Gebiete, die weiter östlich liegen, davon wenig betroffen sind. Hier sind andere GWL für die Hochwasser-Auslösung verantwortlich. **Das zunehmende Hochwasserrisiko ist somit sowohl für Baden-Württemberg als auch für andere Bundesländer im Südwesten und Westen Deutschlands kein flächendeckendes, aber ein sehr ernstes regionales Problem** (Caspary, 2001; Caspary & Haeberli 1999; Caspary 1998 u. 1996; Caspary & Bárdossy 1995). Die hydrologischen Dienste der betroffenen Bundesländer sollten daher die neue intellektuelle Herausforderung annehmen, die Problemgebiete ausfindig machen, die zugehörigen Pegeldaten auswerten und für diese Regionen tragfähige Konzepte eines zukunftsweisenden Hochwasserschutzes unter Berücksichtigung der Klimaänderung ausarbeiten. Das derzeit von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern im Rahmen des KLIWA-Projektes entwickelte Vorgehen wird sicherlich für Deutschland wegweisend sein.

4. Empfehlungen zur Berücksichtigung der „Klimaänderung bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen

Aus den in den Abschnitten 2 und 3 gewonnenen Ergebnissen lassen sich einige Hinweise und Empfehlungen für die wasserwirtschaftliche Praxis ableiten. Da einerseits mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einem weiteren Anstieg der Extremniederschläge und Hochwasser im Winter infolge eines zunehmenden anthropogenen Treibhauseffektes zu rechnen ist, andererseits die Quantifizierung dieser Auswirkungen derzeit noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist, sollte auf der Basis des „wasserwirtschaftlichen Vorsorgeprinzips“ gehandelt werden.

1. Es ist dringend eine **permanente Aktualisierung der Hochwasserstatistik** aller Pegel für die von Instationarität betroffenen Problemregionen in Südwestdeutschland erforderlich.
2. Der für weite Teile Südwestdeutschlands nachgewiesene z.T. drastische Anstieg der extremen Winterniederschläge für größere Niederschlagsdauern (≥ 24 h) macht eine umgehende **Aktualisierung der Extremniederschlagsstatistik** für Baden-Württemberg in Zusammenarbeit mit dem DWD dringend erforderlich! Hierbei sollten die aktuellen Daten bis 2003 einbezogen werden. Die Extremwertstatistik für **Gebietsniederschläge** sollte dabei nicht für Einzelstationen sondern auf Einzugsgebietsflächen bezogen werden. Es erscheint zudem dringend erforderlich die Extremniederschlagsstatistik auf längere Niederschlagsdauern (5 -10 -15 Tage) auszudehnen, da diese für die Hochwasserbildung in größeren Einzugsgebieten sehr wichtig sind. Der bisherige KOSTRA-Atlas endet bei Niederschlagsdauern von 72 Stunden.
3. Die Theorie der Niederschlag-Abfluss-Modellierung geht von der zentralen Annahme aus, dass ein n-jährlicher Bemessungsniederschlag einen n-jährlichen Bemessungs-

abfluss verursacht. Diese Annahme setzt eine mittlere Bodenfeuchte zu Beginn des Bemessungsniederschlags voraus. Für große Einzugsgebiete zeigt die Auswertung der in den letzten Jahrzehnten aufgetretenen Extremhochwasser jedoch eine vollkommen andere Genese. Die Ereignisse sind fast ausnahmslos durch langandauernde, ergiebige Niederschläge ausgelöst worden, die zu einer Sättigung der Böden führten. Auf diese Flächen fielen dann kürzere Extremniederschläge, die die Extremhochwasserwellen mit sehr hohen Abflussbeiwerten verursachten. Es erscheint dringend geboten diese Abweichung von Theorie und Praxis der Entstehung von Bemessungsabflüssen eingehender zu untersuchen. Insbesondere erscheint eine systematische Analyse der Abflussbeiwerte in Regionen, die von Instationaritäten der Extremniederschläge und Hochwasserabflüsse betroffen sind dringend geboten.

4. Die derzeitige Unsicherheit bei der quantitativen Berücksichtigung von Auswirkungen der Klimaänderung bei der Festlegung von Bemessungsabflüssen macht die Einführung einer Strategie der „Flexible Response“ bei der Planung und dem Bau von Hochwasserschutzmaßnahmen dringend erforderlich. Hierbei ist besonders auf die Überlastbarkeit von Systemen (z.B. der Hochwasserentlastungsanlagen) zu achten. Ferner sollten bei Neuanlagen bereits in der Planungsphase spätere Erweiterungsmaßnahmen berücksichtigt werden, da hierin, wie die umfangreichen Untersuchungen von Wald (2004) gezeigt haben, ein erheblichen Kosteneinsparpotenzial liegt. Schließlich sollten alle am Hochwasserschutz beteiligten Gruppen die Ausweisung von Überschwemmungsgebieten intensivieren.
5. Es erscheint auch eine **Schwerpunktverschiebung in KLIWA erforderlich**. So sollte eine Konzentration auf Extremwerte vorgenommen werden. Dies bezieht sich sowohl auf Extremniederschläge, Hochwasser, aber – wie der Sommer 2003 gezeigt hat – auch Trockenzeiten, Niedrigwasser und gesundheitliche Auswirkungen von Hitzewellen. Ganz wichtig erscheint die Einbeziehung der Stürme, da insbesondere die schweren Winterstürme durch die gleichen „kritischen“ Wetterlagen verursacht wurden wie die langandauernden Extremniederschläge und Hochwasser.
6. Es erscheint dringend geboten die **Hochwasservorhersagen** durch einen weiteren Ausbau der Hochwasservorhersagezentrale **zu verbessern**. Hierbei könnte die Hochwasservorhersage durch Verwendung von Niederschlagsradardaten auch auf mittlere Einzugsgebiete ausgedehnt werden. Dennoch bleibt der weitere Ausbau und langfristige Betrieb des Messnetzes aus Abflusspegeln und Niederschlagsstationen unerlässlich.
7. Der Deutsche Wetterdienst (DWD) und private Wetterdienste müssen dringend die **Zuverlässigkeit** der quantitativen **Vorhersage von Extremniederschlägen** verbessern. Bisher können die Vorhersagen bei der quantitativen Hochwasservorhersage nur eingeschränkt verwendet werden.
8. Was passiert „hinter“ den Deichen **bei Überschreitung des Bemessungshochwassers**? Diese früher tabuisierte Frage muss insbesondere für Hochwasserproblemregionen dringend beantwortet werden. Die katastrophalen Schäden des Elbehochwassers im August 2002 haben diese Frage bei den Wasserwirtschaftsverwaltungen, Kommunen, der Industrie und der Versicherungswirtschaft in den Vordergrund gerückt. In besonders gefährdeten Regionen erscheint die Durchführung von Katastrophenschutzübungen (z.B. „Hochwasser infolge Deichbruch“) sehr sinnvoll.
9. Auch die Forschung sollte sich zukünftig verstärkt auf **Extremwerte** konzentrieren. Ein Beispiel hierfür ist das **EU-Forschungsprojekt „STARDEX“**: „Statistical and Re-gional dynamic Downscaling of Extremes for European regions“, das im Feb. 2002 begonnen hat und eine Laufzeit von 3,5 Jahre besitzt (www.cru.uea.ac.uk/cru/projects/stardex). **Um aus der Erfahrung anderer Länder zu lernen erscheint es auch sinnvoll im Rahmen einer Studie der Frage nachzugehen, wie international (z.B.**



in den Niederlanden, UK, USA etc.) die Klimaänderung derzeit bei der praktischen Festlegung der Bemessungsniederschläge und –abflüsse berücksichtigt wird.

5. Sind die jüngsten Extremhochwasserereignisse bereits Signale der befürchteten Klimaänderung durch den verstärkten Treibhauseffekt?

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

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

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (LAWA, 1995), ein Zusammenschluss der für die Wasserwirtschaft zuständigen Ministerien der Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland, weist in ihren "Leitlinien für den zukunftsweisenden Hochwasserschutz" darauf hin, dass es in den letzten Jahren Hinweise auf eine Verstärkung der Winterniederschläge bei gleichzeitiger Abnahme der Schneelagenhäufigkeit gibt. Diese Vermutung ist durch die umfangreiche Auswertung von Niederschlagsdaten für Süddeutschland im Rahmen des

KLWA-Projektes zwischenzeitlich bestätigt (Günther, 2004; Dietzer, 2001). Die LAWA befürchtet, dass infolge einer Verstärkung des Treibhauseffektes zukünftig mit einer Zunahme von Wetterextremen zu rechnen ist. Sollten sich diese Prognosen bestätigen, so kann nach Auffassung der LAWA die Zunahme der Regenfälle alle anderen Hochwasserrisiken aus anthropogenen Einflüssen (wie Versiegelung, Gewässerausbau, Verlust an Retentionsflächen) im Einzugsgebiet deutlich übertreffen (LAWA, 1995). Diese Auffassung kann nur mit Nachdruck bestätigt werden.

Der Autor ist ferner der Überzeugung, dass die Extremhochwasser des Februar 1990, Dezember 1993, Januar 1995 und Februar 1997 sowie die damit verbundenen dramatischen Hochwasserschäden hydrologische Signale einer Winterklimaänderung für die betroffenen Einzugsgebiete waren. Auch die Winterorkane der Jahre 1990 und 1999 über Europa mit ihren katastrophalen Schäden sind Zeichen eines veränderten Winterklimas! Allerdings lässt sich die Frage, ob die nachgewiesenen Klimaänderungen durch die natürliche Klimavariabilität oder zumindest zum Teil bereits anthropogen verursacht wurden, derzeit nicht abschliessend beantworten. Es ist jedoch zu vermuten, dass es sich um eine Überlagerung der natürlichen Klimavariabilität mit einem zunehmenden anthropogen verursachten Anteil handelt.

Danksagung

Der Autor dankt der Wasserwirtschaftsverwaltung Baden-Württemberg und der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg für die zur Verfügung gestellten Abflussdaten.

6. Zusammenfassung

Die kombinierte Auswertung der Hochwasser und Wetterlagen in verschiedenen Regionen Baden-Württembergs zeigt, dass nahezu alle extremen Hochwasser an großen Gewässern durch langandauernde Perioden (6-23 Tage) der Wetterlage „Westlage zyklonal“ (Wz) im Winter (Dez.-Feb.) und den hieraus resultierenden ergiebigen Niederschlägen ausgelöst wurden. In wenigen Fällen ist auch eine Kombination von Wz mit den Wetterlagen „südliche Westlage“ (Ws), „winkelförmige Westlage“ (wW) und „Nordwestlage zyklonal“ (NWz) maßgebend. Für die Hochwasserbildung an größeren Gewässern Baden-Württembergs muss die „Westlage zyklonal“ als äußerst „kritische“ Wetterlage angesehen werden.

Die Zeitreihen der „kritischen“ Großwetterlage Wz zeigen für die Winter (Dez.-Feb.) des Messzeitraumes 1881-2004 sowohl für die Häufigkeiten als auch für die maximale Dauer zusammenhängender Wz-Perioden signifikant ansteigende Trends und einen signifikanten Bruchpunkt im Jahr 1981. Die Instationarität der kritischen Wetterlagen ist Ursache für den in grossen Teilen Südwestdeutschlands nachweisbaren drastischen Anstieg der langandauernden extremen Winterniederschläge.

Das Risiko eines „extrem zonalen Winters“ hat im Zeitraum 1982/83-2003/04 gegenüber dem Zeitraum 1881/82-1981/82 um den Faktor 23 dramatisch zugenommen. Von den letzten 15 Wintern (1989/90-2003/04) entfallen 5 auf den „kritischen Sektor“. Sie haben Hochwasser- und Sturmschäden in Höhe von 40 Milliarden US \$ verursacht. Langandauernde, zusammenhängende Perioden der „kritischen“ Zirkulationsmuster sind somit im Winter (Dez.-Feb.) für zahlreiche größere Einzugsgebiete Baden-Württembergs zwar keine hinreichende, aber eine notwendige Bedingung für das Auftreten großer Hochwasser. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse werden Empfehlungen zur Berücksichtigung der Klimänderung bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen erarbeitet.

Die aus den Beobachtungsdaten abgeleiteten Ergebnisse sind konsistent mit den aus Klimamodellszenarien abgeleiteten Ergebnissen. Wenngleich die Szenarien derzeit noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind, so scheint doch in den heute bereits durch die Winterklimaänderung betroffenen Regionen eine Berücksichtigung der Klimaänderung in der



wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis dringend geboten. Der von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern im Rahmen des KLIWA-Projektes entwickelte Ansatz zur Berücksichtigung der Klimaänderung bei der Festlegung des Bemessungshochwassers ist hierbei ein erster erfolgversprechender Schritt, der sicherlich für die Wasserwirtschaft in Deutschland und darüber hinaus wegweisend sein wird.

7. Literatur

- Bárdossy, A., Caspary, H. J. (1990): Detection of Climate Change in Europe by analyzing European atmospheric circulation patterns from 1881-1989. *Theoretical and Applied Climatology* 42, 155-167.
- Baur, F., Hess, P., Nagel, N. (1944): *Kalender der Großwetterlagen Europas 1881 - 1939*. Bad Homburg.
- Black, A. J. (1996): Major flooding and increased flood frequency in Scotland since 1988. *Physics and Chemistry of the Earth* 20, No. 5-6, 463-468.
- Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) (1994): *Das Hochwasser 1993/94 im Rheingebiet*. Koblenz, 96 S.
- Caspary, H. J., Bárdossy, A. (1995): Markieren die Winterhochwasser 1990 und 1993 das Ende der Stationarität in der Hochwasserhydrologie infolge von Klimaänderungen? *Wasser & Boden* 47, H. 3, 18-24.
- Caspary, H. J. (1995): Berücksichtigung potentieller Klimaänderungen bei der Festlegung des Bemessungshochwassers – Strategiepapier für Baden-Württemberg. Nov. 1995, 57 S.
- Caspary, H. J. (1996): Recent winter floods in Germany caused by changes in the atmospheric circulation across Europe. *Physics and Chemistry of the Earth* 20, No. 5-6, 459-462.
- Caspary, H. J., 1998: Hochwasserverschärfung infolge von Klimaänderungen. In: Lozan, J., Graßl, H., Hupfer, P., (Hrsg.): *Warnsignal Klima - Wissenschaftliche Fakten*. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, S. 259-264.
- Caspary, H. J., Haeberli, W., 1999: Klimaänderungen und die steigende Hochwassergefahr. In: Graßl, H. (Hrsg.): *Wetterwende*. Campus Verlag, Frankfurt, S. 206-229.
- Caspary, H. J. (2001): Zusammenhang zwischen der Verschärfung des Hochwasserrisikos in Südwestdeutschland seit Mitte der siebziger Jahre und einem veränderten Winterklima. *GAIA - Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics* 10, No. 4, pp. 286-293.
- Caspary, H. J. (2003): „Kritische“ Wetterlagen für die Hochwasserbildung in Südwestdeutschland – Klassifikation und Analyse mit Hilfe von Beobachtungs- und Klimamolldaten – KLIWA-Bericht im Auftrag der LfU, Dez. 2003, Karlsruhe, 52 S.
- Dietzer, B. (2001): „Langzeitverhalten extremer Niederschläge – Ergebnisse aus KLIWA – KLIWA-Berichte, Heft 1, 1. KLIWA-Symposium 2000, 29.-30.11.2000, Karlsruhe, S. 46-67.
- Gerstengarbe, F.-W., Werner, P. C. (1993): *Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881 - 1992*. 4. völlig neubearbeitete Aufl. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 113, Selbstverlag des DWD, Offenbach a.M., 249 S.
- Günther, T. (2004): Langzeitverhalten hydrometeorologischer Größen – KLIWA Bericht 4, 2. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 37-56.
- Engel, H. (1994): Das Weihnachtshochwasser 1993 im Rheingebiet. *Wasserwirtschaft*, Januarhochwasser 1995. Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz.
- Hess, P., Brezowsky, H. (1969): *Katalog der Großwetterlagen Europas*. *Berichte des Deutschen Wetterdienstes* 113, Bd. 15. Selbstverlag des DWD, Offenbach a.M., 14 pp.
- International Commission for the hydrology of the Rhine (CHR) (1997): *Impact of Climate Change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine Basin*. CHR -report no. I-16, Lelystad, 172 pp.
- IPCC WGII (1996): *Climate Change 1995 -Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses*. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Watson, R. T., Zinyowera, M.C. & Moss, R. H. (eds.), Cambridge University Press, New York, USA, 876 pp.

-
- IPCC-WGI (2001): Climate Change 2001 -The Scientific Basis. Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., Van Der Linden, P.J., Dai, X., Maskell, K., Johnson, C.A. (eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 pp.
- Katzenberger, B. (2004): Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA – Handlungsempfehlungen. KLIWA Bericht 4, 2. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 197-204.
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (LfU) (1994): Hochwasser Dezember 1993. Handbuch Wasser 2, Nr. 12, Karlsruhe, 57 S.
- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1995): Leitlinien für einen zukunftsweisenden Hochwasserschutz. Stuttgart, 24 S.
- Münchener Rück (1993): Winterstürme in Europa - Schadanalyse 1990, Schadenpotentiale. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München, 55 S.
- Münchener Rück (2001): Winterstürme Anatol, Lothar und Martin 1999. In: Münchener Rück, 2001: Topics - Jahresrückblick Naturkatastrophen 2000. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München, S. 22-27.
- Pettitt, A. N. (1979): A non-parametric approach to the change point problem. Journal Royal Statistical Society (Ser. C) 28., pp. 126-135.
- Rapp, J., Schönwiese, C.-D. (1996): Atlas der Niederschlags- und Temperaturrends in Deutschland 1891-1990. Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B, Meteorologie und Geophysik Bd. 5, Universität Frankfurt, Frankfurt a. M., 255 pp.
- Storch, von H., Langenberg, H., Pohlmann, T. (1998): Stürme, Seegang und Sturmfluten im Nordatlantik. In: Lozan, J., Graßl, H., Hupfer, P., (Hrsg.): Warnsignal Klima - Wissenschaftliche Fakten. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, S. 182-189.
- Wald, J. (2004): Auswirkungen der Klimaänderungen auf Planungen - Praxisbeispiele. KLIWA Bericht 4, 2. KLIWA Symposium, Würzburg, 03.-04.05.2004, München, S. 169-186.



Ergebnisse von Klimaszenarien und Hochwasser-Statistik

Jürgen Ihringer
Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik
Universität Karlsruhe

1. Einleitung

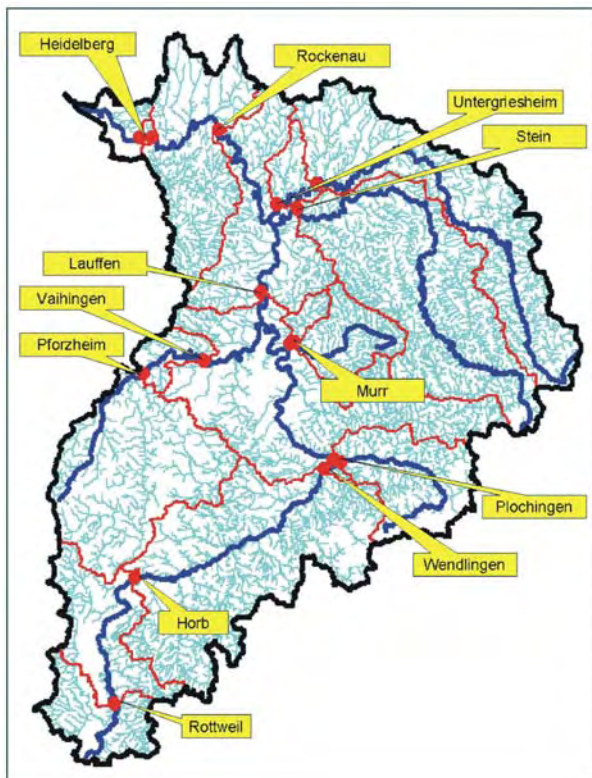
Für die Beurteilung des Hochwasserschutzgrads entlang von Gewässerläufen und für die Bemessung von Hochwasserschutzmaßnahmen sind T_n -jährliche Hochwasserabflüsse (Hochwasserbemessungswerte) erforderlich. Diese werden in der Regel über statistische Auswertungen der Beobachtungszeitreihen an Pegeln für den aktuell vorhandenen Zustand eines Einzugsgebiets ermittelt. Aufgrund der Häufung von Hochwasserereignissen in der jüngsten Vergangenheit kommt der Frage einer Veränderung von Hochwasserbemessungswerten infolge Klimawandel eine besondere Bedeutung zu. Es sollte möglichst frühzeitig erkannt werden, in welchem Maß sich ein Klimawandel auf Hochwasserbemessungswerte auswirkt, damit bereits heute insbesondere bei Neuplanungen die zukünftige Entwicklung berücksichtigt werden kann.

Im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA wurde diese Fragestellung intensiv untersucht. Hierbei sollte insbesondere betrachtet werden, welche Abflussveränderungen auf der Basis der heute vorliegenden meteorologischen Erkenntnissen über das zukünftige Niederschlagsverhalten zu erwarten sind. Zur Untersuchung der zu erwartenden Abflussveränderungen lässt die Landesanstalt für Umweltschutz (LfU) in Karlsruhe durch das Ingenieurbüro Dr. Ludwig in Karlsruhe mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM flächendeckend für Baden-Württemberg Abflusssimulationen für drei unterschiedliche Klimaszenarien durchführen. Die Ergebnisse dieser Abflusssimulationen werden anschließend am Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik (IWK) der Universität Karlsruhe über statistische Methoden bezüglich dem Hochwasserabfluss-Verhalten untersucht und bewertet.

In dem vorliegenden Beitrag werden die ersten Ergebnisse dieser Auswertungen für das Einzugsgebiet des Neckars vorgestellt. Dabei wurden auf der Basis von Tagesmittelwerten des Abflusses der mittlere Jahresgang der Monatshöchstwerte und die zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte zur Beurteilung des mittleren Hochwasserabfluss-Verhaltens betrachtet. Über die Extremwertstatistik konnten Auswirkungen des prognostizierten Klimawandels auf Hochwasserbemessungswerte ermittelt werden. Die analysierten Auswirkungen führen anschließend zu einem ersten Vorschlag für das Einzugsgebiet des Neckars, wie eine zukünftige Klimaentwicklung bei der Festlegung von Hochwasserbemessungswerte berücksichtigt werden kann.

2. Datengrundlage

Grundlage für die Untersuchungen waren im ersten Bearbeitungsschritt die in Abb. 1 dargestellten Pegel im Einzugsgebiet des Neckars. Die Auswahl der Pegel erfolgte unter folgenden Gesichtspunkten: Es sollen möglichst große Einzugsgebiete betrachtet werden, für die einerseits ausreichend lange und gesicherte Beobachtungszeitreihen vorliegen und die andererseits erlauben, sowohl das Abflussverhalten räumlich differenziert als auch räumlich integriert beurteilen zu können. Einbezogen wurden deshalb Pegel im Oberlauf des Neckars (Rottweil, Horb, Wendlingen), im Mittellauf (Plochingen, Lauffen) und im Unterlauf (Rockenau, Heidelberg), sowie an der Enz aus dem westlichen Neckargebiet und an Fils, Murr, Kocher und Jagst aus dem östlichen Neckargebiet. Die Einzugsgebietsgrößen der Pegel variieren zwischen ca. 450 km² und knapp 14 000 km².



Einzugsgebiet: Neckar

Pegel:		A_{E_0} km ²
Neckar	Rottweil	452.94
	Horb	1112.63
	Wendlingen-KLA	3237.17
	Plochingen	3963.32
	Lauffen	7884.38
	Rockenau	12650.32
	HD-Ziegelhausen	13739.72
	HD-Karlstor	13759.65
Fils	Plochingen	704.01
Murr	Murr	505.05
Enz	Pforzheim	1479.31
	Vaihingen	1662.10
Kocher	Stein	1935.97
Jagst	Untergriesheim	1825.81

Abb. 1: Einzugsgebiet des Neckars mit Lage der untersuchten Pegel und deren Einzugsgebietsgröße A_{E_0} in [km²]

Die jeweils an den Pegeln vorhandenen und in die Auswertung einbezogenen Beobachtungszeitreihen sind in Abb. 2 (links) zusammengestellt. Betrachtet wurden dabei jeweils die Zeitreihen der mittleren Tagesabflüsse $MQ(d)$. Aus der Wasserhaushaltsmodellierung, die vom Ingenieurbüro Dr. Ludwig in Karlsruhe durchgeführt wurden, standen ebenfalls als Tagesmittelwerte die Abflusssimulationen für folgende Klimaszenarien zur Verfügung (Abb. 2, rechts):

- "Gerstengarbe" (PIK Potsdam): Die Klimaszenarien des Potsdamer Instituts für Klimafolgenforschung (PIK) umfassen eine Nachbildung des vorhandenen Klimazustands (Ist-Zustand) für den Zeitraum 1971 bis 2000 und den Prognosezustand (Zukunftsszenario) 2021 bis 2050, abgeleitet aus einem statistischen Klimamodell.
- "Enke" (MR): Die Klimaszenarien der Universität Berlin bzw. Firma Meteo-Research (MR) umfassen eine Simulation des vorhandenen Klimazustands (Ist-Zustand) für den Zeitraum 1971 bis 2000 und den Prognosezustand (Zukunftsszenario) 2021 bis 2050. Für das Zukunftsszenario liegen dabei zwei Realisationen (insgesamt 60 Jahre) vor, die dem mittleren Zustand 2021 – 2050 entsprechen. Zur Auswertung der zusammenhängenden Zeitreihe wurde diese ersatzweise den Jahren 2001 bis 2060 zugeordnet. Die Szenarien wurden aus einem statistischen Klimamodell abgeleitet.
- "Jacob" (MPI Hamburg): Das Max-Planck-Institut (MPI) stellt aus dem dynamischen, regionalen Klimamodell drei Simulationen zur Verfügung. Zunächst wird in einem Validierungslauf der vorhandene Klimazustand betrachtet. Dabei wird das dynamische Klimamodell mit reanalysierten "Messwerten" als Randbedingung für den Zeitraum 1979 bis 2002 betrieben. Diese Simulation kann direkt mit den Messwerten verglichen werden. Mit dem "Kontrolllauf" für 1971 bis 2000 erfolgt die Simulation des vorhandenen Klimazustands. Dabei werden die Randbedingungen des dynamischen Klimamodells aus dem globalen Klimamodell übernommen. Die Prognoserechnungen (Zukunftsszenario) umfassen wiederum die Jahre 2021 bis 2050.

Alle Klimaszenarien beziehen sich auf das Kalenderjahr von Januar bis Dezember. Die Szenarien "Gerstengarbe" und "Enke" liefern die Eingangsdaten für das Wasserhaushaltsmodell jeweils nur als Tagesmittelwerte. Die Szenarien "Jacob" umfassen zusätzlich auch eine zeitliche Auflösung in Stundenwerten. Um die unterschiedlichen Simulationen jedoch miteinander vergleichen zu können, beziehen sich die hier vorgestellten Ergebnisse jeweils auf die Tageswertzeitreihen (auch für die Messwerte der Pegel und die Szenarien des MPI).

In den folgenden Auswertungen werden jeweils verglichen Abfluss-Kennwerte der gesamten vorliegenden Beobachtungszeitreihe mit den Kennwerten der auf die Jahre 1971 bis 2000 verkürzten Beobachtungszeitreihe und den entsprechenden Kennwerten abgeleitet aus den Klimaszenarien für den Ist- und Zukunftszustand.

Messdaten der Pegel (Tageswerte):			Modellrechnungen (Tageswerte):		
Neckar	Rottweil	1939 - 2002	Wasserhaushaltsmodell mit Eingabedaten (Klimaszenarien) von:		
	Horb	1932 - 2002	Gerstengarbe	Ist-Zustand	1971 - 2000
	Wendlingen-KLA	1972 - 2002	(PIK-Potsdam)	Szenario	2021 - 2050
	Plochingen	1919 - 1998			
	Lauffen	1949 - 1997	Enke	Ist-Zustand	1971 - 2000
	Rockenau	1951 - 2002	(MR-Berlin)	Szenario	2021 - 2050
	Ziegelhausen	1979 - 2002		Szenario	2001 - 2060
	HD-Karlstor	keine	Jacob	Validierung	1979 - 2002
Fils	Plochingen	1927 - 2002	(MPI-Hamburg)	Kontroll-Lauf	1971 - 2000
Murr	Murr	1946 - 2002		Szenario	2021 - 2050
Enz	Pforzheim	1932 - 2002			
	Vaihingen	1929 - 2002			
Kocher	Stein	1884 - 2002			
Jagst	Untergriesheim	1925 - 2002			

Abb. 2: Datengrundlage an den ausgewählten Pegeln des Neckareinzugsgebiets: Beobachtungszeitreihe der Messdaten (links) und mit dem Wasserhaushaltsmodell berechnete Zeitreihe für die Klimaszenarien (rechts)

3. Auswertung von mittleren Monatshöchstwerten

Zur Auswertung der mittleren Monatshöchstwerte und der zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte wurden aus den verschiedenen Abflusszeitreihen zunächst die jeweiligen Monatshöchstwerte bestimmt und anschließend monatsweise über die zugrunde liegende Anzahl von Jahren gemittelt. Aus dem so abgeleiteten Jahresgang der Monatshöchstwerte erhält man die zugehörigen Jahres- und Halbjahresmittelwerte. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Originaldaten aus den Klimaszenarien und aus den Abflusssimulationen das Kalenderjahr als Jahresbezug besitzen. Zur Beurteilung der Halbjahresmittelwerte, die das Abflussverhalten im Winterhalbjahr (November bis April) und im Sommerhalbjahr (Mai bis Oktober) wiedergeben sollen, müssen die Abflusssimulationen unter Vernachlässigung von Monatswerten auf das Abflussjahr bezogen werden.

Abb. 3 zeigt für ausgewählte Pegel des Neckargebiets den mittleren Jahresgang der Monatshöchstabflüsse bezogen auf das Kalenderjahr (linke Diagramme) und das Abflussjahr (rechte Diagramme) zusammen mit den zugehörigen Jahres- bzw. Halbjahresmittelwerten. Dabei sind jeweils dargestellt die mittleren Monatshöchstwerte der verkürzten Beobachtungszeitreihe 1971-2000 (schwarz) und der Abflusssimulation aus dem Klimamodell "Enke" für den Ist-Zustand (rot) sowie für den Zukunftszustand (blau: 30 Jahre; grün: 60 Jahre). In die Darstellungen sind zusätzlich die zugehörigen Jahres- bzw. Halbjahresmittelwerte eingetragen.

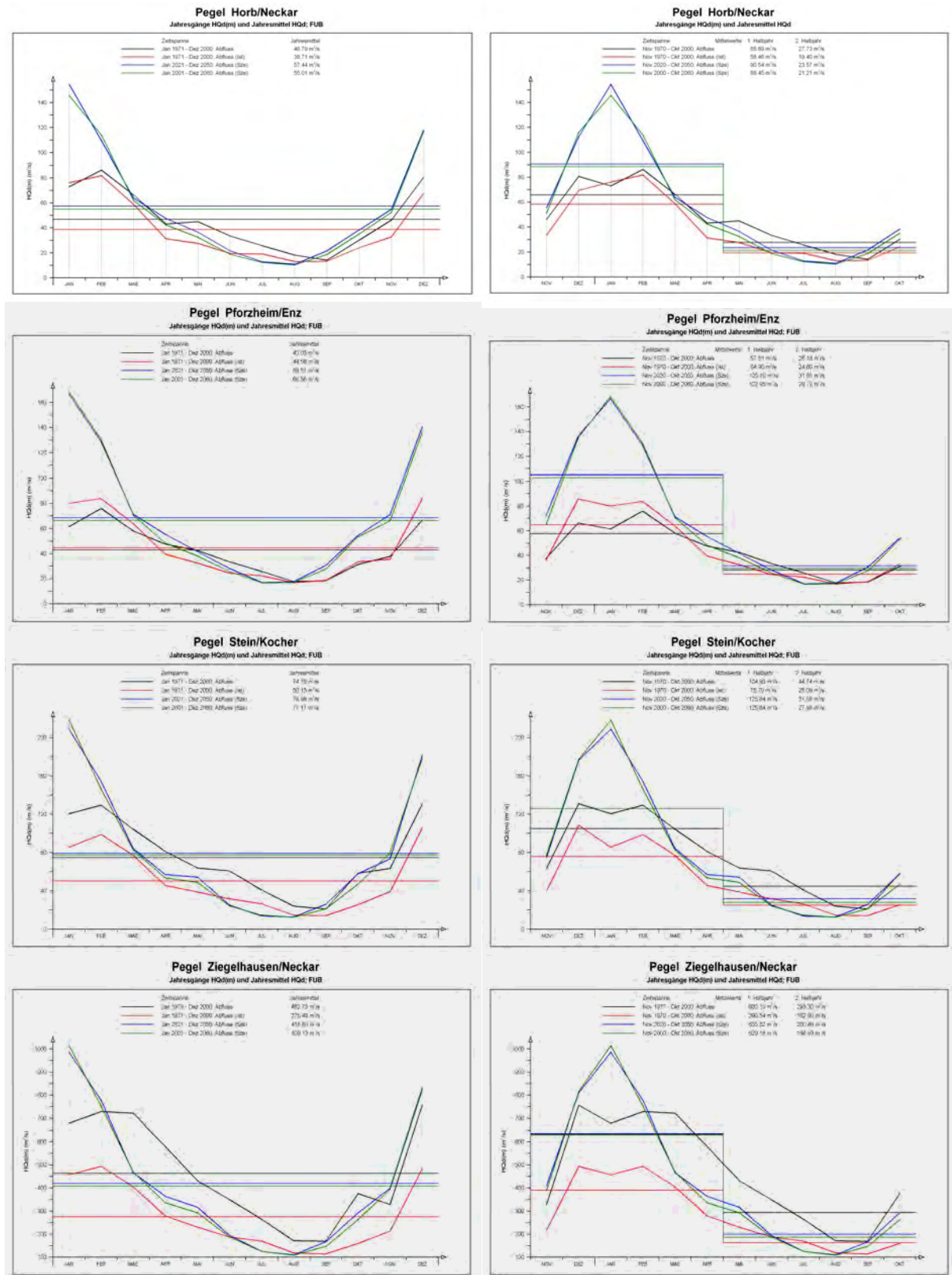


Abb. 3: Jahresgang der mittleren Monatshöchstwerte für die Messwerte und für verschiedene Berechnungsszenarien auf der Basis der Niederschlagsszenarien von "Enke" (Berlin) mit den zugehörigen Jahres- (links) und Halbjahresmittelwerten (rechts) an ausgewählten Pegeln des Neckareinzugsgebiets

Für die Pegel des Neckargebiets ergibt sich: Die Abflusssimulationen für den Ist-Zustand bilden in den Einzugsgebieten der Pegel Horb/Neckar und Pforzheim/Enz die beobachteten Monatshöchstwerte über das gesamte Jahr gut ab. Im Einzugsgebiet des Kochers (Pegel Stein) und auch im Gesamtgebiet des Neckars (Pegel Ziegelhausen) werden die beobachteten Monatshöchstwerte (schwarz) durch die Abflusssimulationen des Ist-Zustand (rot) unterschätzt. Diese Unterschätzung nimmt mit zunehmender Gebietsgröße zu.

Die Abflusssimulationen für den Zukunftszustand zeigen über das gesamte Jahr eine Zunahme der mittleren Monatshöchstwerte, wobei die beiden Auswertungen (30 und 60 Jahre) sehr geringe Unterschiede aufweisen. Es zeigt sich somit, dass die Zukunftsprognosen sehr stabile Ergebnisse liefern. Insgesamt ergibt sich sowohl eine Zunahme des Jahresmittelwerts als auch der beiden Halbjahresmittelwerte. Von dieser Zunahme besonders betroffen ist dabei das Winterhalbjahr. Deutliche Abflusserhöhungen liegen jeweils in den Monaten Dezember, Januar und Februar vor.

Zur gemeinsamen Beurteilung der prognostizierten Abflussveränderungen über alle einbezogenen Pegel wurde pegelspezifisch das Verhältnis zwischen den Jahres- und Halbjahresmittelwerten von Zukunftszustand zu Ist-Zustand ermittelt. Abb. 4 zeigt diese Verhältniswerte für alle einbezogenen Pegel getrennt für den Jahresmittelwert und die beiden Halbjahresmittelwerte. Die Abfolge der Pegel in der Diagrammdarstellung entspricht von links nach rechts der Abfolge der Pegel entlang des Neckars.

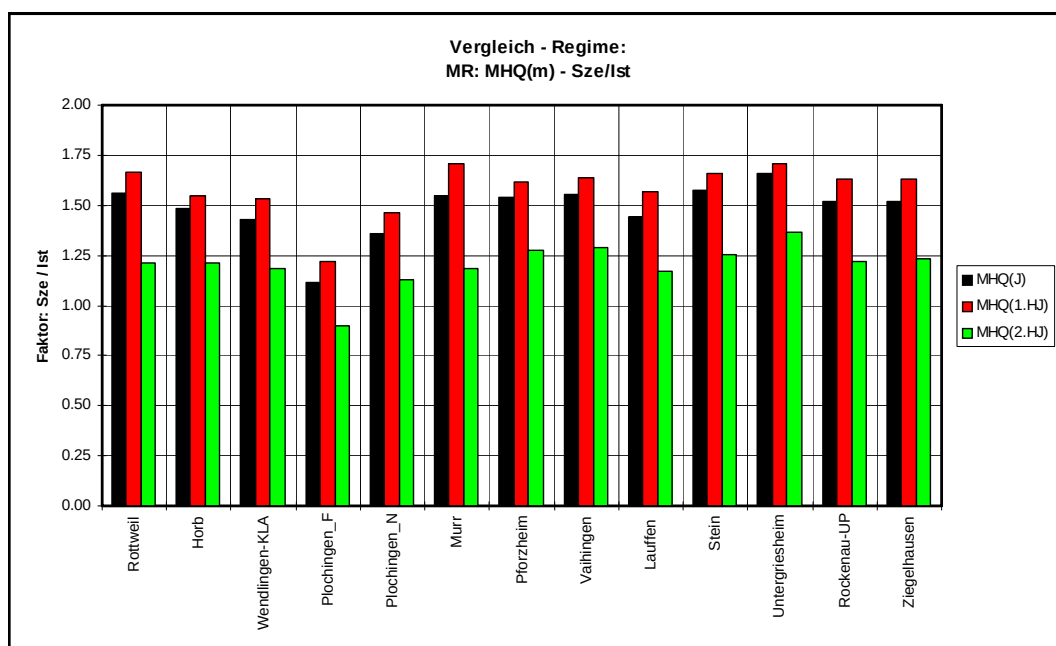


Abb. 4: Verhältnis der jährlich mittleren Monatshöchstwerte aus der Szenarienrechnung für den Zustand mit Klimaänderung zu der Berechnung des Ist-Zustands auf der Basis der Niederschlagsszenarien von "Enke" (MR Berlin) für die Pegel des Neckareinzugsgebiets

Die Abflussveränderungen (Abb. 4) liegen für alle einbezogenen Pegel in einer sehr vergleichbaren Größe. Für das Gesamtjahr wird auf der Basis des Klimamodells "Enke" prognostiziert, dass der Jahresmittelwert mit einem Faktor von ca. 1,5 zunimmt. Im Winterhalbjahr ist dieser Faktor geringfügig höher und beträgt ca. 1,6. Im Sommerhalbjahr ist die Abflusserhöhung geringer und zeigt einen Faktor von ca. 1,25. Da diese Faktoren für die einbezogenen Pegel mit Ausnahme des Pegels Plochingen/Fils nur geringe Unterschiede aufweisen, erscheint keine regionale Unterteilung des Neckargebiets notwendig zu sein. Die geringeren Faktoren am Pegel Plochingen/Fils sind bezüglich der Ursachen weiter zu prüfen.



Aus der Betrachtung der monatlichen Höchstwerte wird auf der Basis des Klimamodells "Enke" infolge des Klimawandels eine deutliche Erhöhung des mittleren Hochwasserabflusses für das Neckareinzugsgebiet prognostiziert. Die anderen Klimamodelle wurden in diese Auswertung nicht einbezogen.

4. Auswertung von Extremwerten (Extremwertstatistik)

Für die Festlegung von Hochwasserbemessungswerten sind mögliche Abflussveränderungen infolge eines Klimawandels im Bereich der großen Hochwasserereignisse von entscheidender Bedeutung. Zur Analyse der zu erwartenden Abflussveränderungen im hohen Abflussbereich erfolgte für jede vorliegende Datenzeitreihe eine Abschätzung der T_n -jährlichen Abflüsse mithilfe der Methoden der Extremwertstatistik. Betrachtet wurden dabei Jährlichkeiten zwischen $T_n = 2$ a und $T_n = 200$ a. Aus den Zeitreihen der Tagesmittelwerte ergeben sich die zugehörigen Jahres- und Halbjahreshöchstwerte. Diese lassen sich mithilfe von Plotting-Positions in einem Wahrscheinlichkeitsnetz darstellen. An die Jahres- bzw. Halbjahreshöchstwerte wurden zusätzlich analytische Verteilungsfunktionen angepasst, wobei für jede Datenserie die Verteilungsfunktion ausgewählt wurde, die im Extremwertbereich eine gute Anpassungsgüte besitzt. Über einen Vergleich der hieraus abgeleiteten T_n -jährlichen Hochwasserabflüsse HQ_T kann anschließend das Abflussverhalten im Extrembereich vergleichend beurteilt werden.

Ausgewertet wurden die Jahres- und Halbjahreshöchstwerte für alle einbezogenen Pegel für folgende Datenserien, jeweils auf der Basis der Tageswerte:

- beobachtete Höchstwerte; abgeleitet aus der gesamten vorliegenden Beobachtungszeitreihe
- beobachtete Höchstwerte; abgeleitet aus der verkürzten Beobachtungszeitreihe für die Jahre 1971 bis 2000
- Höchstwerte aus den Abflusssimulationen auf der Basis der drei Klimamodelle für die in Abschnitt 2 beschriebenen Szenarien

In Abb. 5 bis Abb. 7 sind exemplarisch die Ergebnisse für die Auswertung der Jahreshöchstwerte an den Pegeln Pforzheim/Enz, Stein/Kocher und Ziegelhausen/Neckar dargestellt. Jede Abbildung zeigt dabei die Auswertungen der Abflussberechnungen auf der Basis der Klimamodelle "Enke" (oberes Diagramm), "Gerstengarbe" (mittleres Diagramm) und "Jacob" (unteres Diagramm). In jedem Diagramm sind dargestellt die zugrunde liegenden Jahreshöchstwerte (Punkte) und die angepasste analytische Verteilungsfunktion (Kurve). Die Ergebnisse aus den Klimamodellen werden verglichen mit der Auswertung der gesamten Beobachtungszeitreihe (schwarz) und der verkürzten Beobachtungszeitreihe (rot). Für die gesamte vorliegende Beobachtungszeitreihe ist zusätzlich der statistische Streubereich für das Signifikanzniveau $\alpha = 95\%$ eingetragen.

Für die drei Klimamodelle zeigen die Diagramme:

- "Enke" (MR): Ist-Zustand (blau), Zukunftsszenario (grün: 30 Jahre; braun: 60 Jahre)
- "Gerstengarbe" (PIK): Ist-Zustand (blau); Zukunftsszenario (grün)
- "Jacob" (MPI): Validierungslauf für 1997 - 2002 (lila), Kontrolllauf für 1971 - 2000 (blau), Zukunftsszenario (grün)

Die Ergebnisse für die exemplarisch ausgewählten Pegel lassen sich folgendermaßen interpretieren:

- Pegel Pforzheim/Enz (Abb. 5): Die Auswertung der Jahreshöchstwerte aus der verkürzten Beobachtungszeitreihe weist gegenüber der Gesamtzeitreihe erhöhte Extremwerte auf. Die Ursache hierfür liegt in dem Trend in den Jahreshöchstwerten, der an diesem Pegel vorhanden ist.

Die Abflusssimulationen auf der Basis des Klimamodells "Enke" für den Ist-Zustand reproduziert die Extremwerte der verkürzten Beobachtungsreihe sehr gut. Die beiden Zukunftsszenarien (30 und 60 Jahre) weisen nahezu dieselben Ergebnisse auf. Sie zeigen, dass eine deutliche Abflusserhöhung im Bereich der kleinen Jährlichkeiten zu erwarten ist. Diese Erhöhung geht jedoch mit zunehmender Jährlichkeit zurück. Die Extremwerte mit $T_n \geq 100$ a liegen in derselben Größenordnung wie die Extremwerte aus den beobachteten Zeitreihen bzw. den Simulationen des Ist-Zustands.

Die Abflusssimulationen mit dem Klimamodell "Gerstengarbe" zeigen für den Ist-Zustand eine geringe Erhöhung der Extremwerte gegenüber den Beobachtungsdaten. Beim Zukunftsszenario ergeben sich gegenüber dem Ist-Zustand kleinere Extremwerte.

Die Extremwerte abgeleitet aus dem Klimamodell "Jacob" liegen für alle drei Simulationsläufe deutlich unterhalb der Beobachtungswerte. Bereits beim Validierungslauf, der mit den Beobachtungsdaten vergleichbar ist, erkennt man, dass die zugehörige Verteilungsfunktion eine deutlich geringere Steigung aufweist. Die kleinen Hochwasserereignisse werden deutlich unterschätzt. Erst bei großen Extremwerten ist eine Annäherung der Simulationsergebnisse an die Größenordnung der Beobachtungswerte vorhanden. Beim Kontrolllauf werden die Beobachtungswerte weit unterschätzt und beim Zukunftsszenario erreichen die Extremwerte die Größenordnung der Extremwerte des Validierungslaufs.

- Pegel Stein/Kocher (Abb. 6): Die Auswertung der Jahreshöchstwerte aus der verkürzten Beobachtungszeitreihe und der Gesamtzeitreihe weisen vergleichbare Größen auf. Die Abflusssimulationen auf der Basis des Klimamodells "Enke" für den Ist-Zustand unterschätzen insbesondere bei kleinen Jährlichkeiten die Extremwerte der Beobachtungsreihe. Die beiden Zukunftsszenarien (mit 30 und 60 Jahre) weisen auch an diesem Pegel nahezu dieselben Ergebnisse auf. Sie zeigen auch hier, dass eine deutliche Abflusserhöhung im Bereich der kleinen Jährlichkeiten zu erwarten ist. Extremwerte mit $T_n \geq 100$ a liegen wiederum in derselben Größenordnung wie die Extremwerte aus den beobachteten Zeitreihen und der Simulation des Ist-Zustands. Die Abflusssimulationen mit dem Klimamodell "Gerstengarbe" zeigen sowohl für den Ist-Zustand als auch für den Zukunftszustand im Vergleich zu den Beobachtungsdaten kleinere Extremwerte im Bereich der kleinen Jährlichkeiten. Erst ab einer Jährlichkeit von ca. $T_n = 20$ a wird die Größenordnung der beobachteten Extremwerte erreicht. Auch an diesem Pegel sind die Extremwerte des Zukunftsszenario kleiner als die Extremwerte für den Ist-Zustand. Das Klimamodell "Jacob" bildet beim Validierungslauf das Extremwertverhalten der Beobachtungswerte gut nach. Die Extremwerte des Kontrolllaufs liegen jedoch deutlich unter den beobachteten Werten und die Extremwerte des Zukunftsszenario liegen in der Größenordnung der Beobachtungswerte.
- Pegel Ziegelhausen/Neckar (Abb. 7): Die Beobachtungsreihe des Pegels beginnt erst im Jahr 1979. Deshalb ist für die beiden dargestellten Auswertungen der beobachteten Extremwerte nur ein sehr geringer Unterschied vorhanden. Die Abflusssimulationen auf der Basis des Klimamodells "Enke" für den Ist-Zustand zeigen eine deutliche Unterschätzung der Beobachtungswerte. Die Form der Verteilungsfunktion wird schlecht nachgebildet. Die beiden Zukunftsszenarien (mit 30 und 60 Jahre) weisen wie auch an den zuvor beschriebenen Pegeln eine deutliche Abflusserhöhung im Bereich der kleinen Jährlichkeiten auf. Extremwerte mit $T_n \geq 100$ a liegen auch hier in der Größenordnung der Extremwerte aus den beobachteten Zeitreihen und der Simulation des Ist-Zustands. Die Abflusssimulationen mit dem Klimamodell "Gerstengarbe" zeigen sowohl für den Ist-Zustand als auch für den Zukunftszustand im Vergleich zu den Beobachtungsdaten auch für das Gesamtgebiet des Neckars kleinere Extremwerte im Bereich der kleinen Jährlichkeiten. Die Extremwerte des Zukunftsszenario sind deutlich kleiner als die Extremwerte für den Ist-Zustand. Das Klimamodell "Jacob" bildet beim Validierungslauf das Extremwertverhalten der Beobachtungswerte gut nach. Die Extremwerte des Kontrolllaufs liegen jedoch deutlich



unter den beobachteten Werten und die Extremwerte des Zukunftsszenario liegen wiederum in der Größenordnung der Beobachtungswerte.

Die Beurteilung einer möglichen Abflussveränderung infolge des Klimawandels muss sich auf einen Vergleich der Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand und für den Zukunftszustand beziehen, damit Unsicherheiten, die bei der Modellierung vorhanden sind, nicht in die Bewertung eingehen. Deshalb wurde zur gemeinsamen Bewertung der Ergebnisse für alle einbezogenen Pegel aus den statistisch ermittelten Extremwerten jeweils das Verhältnis zwischen dem Extremwert des Zukunftsszenario zum Extremwert des Ist-Zustands bzw. Kontrolllaufs ermittelt. Abb. 8 zeigt diese Verhältniswerte für die Hochwasserabfluss-Kennwerte MHQ, HQ₁₀, HQ₅₀ und HQ₁₀₀, abgeleitet aus den drei Klimamodellen, in der Abfolge der einbezogenen Pegel entlang des Neckars.

Aus Abb. 8 ergibt sich folgende zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse für:

- **"Enke" (MR):** Das Klimamodell zeigt für alle einbezogenen Pegel beim Vergleich der Simulationen von Zukunftszustand zum Ist-Zustand sehr vergleichbare Ergebnisse. Beim mittleren Hochwasserabfluss MHQ ergibt sich bei Betrachtung der Jahreshöchstwerte eine Zunahme der Hochwasserabflüsse um einen Faktor von im Mittel knapp 1,5. Mit zunehmender Jährlichkeit wird die Abflusszunahme deutlich geringer. Beim 10-jährlichen Ereignis HQ₁₀ ergibt sich im Mittel ein Faktor von ca. 1,2. Beim HQ₅₀- und HQ₁₀₀-Ereignis ergibt sich jedoch ein Faktor, der kleiner als 1,0 ist. Diese Abnahme bei den hohen Jährlichkeiten ist jedoch sehr von der Wahl der angepassten Verteilungsfunktion abhängig. Wie Abb. 5 bis Abb. 7 zeigen, weisen die Jahreshöchstwerte im oberen Datenbereich eine gewisse Stagnation auf, während im unteren Datenbereich eine deutlich ansteigende Tendenz vorhanden ist. Ein solches Extremwertverhalten ist mit den üblichen analytischen Verteilungsfunktionen, die sich für Hochwasseranalysen bewährt haben, i.d.R. nicht nachvollziehbar. Aufgrund der Lage der Datenpunkte in der Wahrscheinlichkeitsdarstellung kann geschlossen werden, dass bezogen auf das 100-jährliche Ereignis keine oder nur geringe Abflusserhöhungen vorhanden sind.
- **"Gerstengarbe" (PIK):** Das Klimamodell zeigt für alle Pegel unplausible Tendenzen. Die Simulationen des Zukunftszustands ergeben bei den meisten Pegeln für die kleinen Jährlichkeiten eine Abnahme der Hochwasserereignisse (Faktor ist kleiner 1,0). Erst bei Ereignissen mit hohen Jährlichkeiten erfolgt eine Annäherung des Faktors an die Grenze 1,0 und überschreitet diese beim 100-jährlichen Ereignis geringfügig. Die Ursache hierfür liegt vermutlich in dem statistischen Verfahren, das in dem Klimamodell zur Anwendung kommt.
- **"Jacob" (MPI):** Das Klimamodell weist beim Vergleich des Zukunftsszenarios zum Kontrolllauf erhebliche Abflussveränderungen für nahezu alle einbezogenen Pegel und betrachteten Jährlichkeiten auf. Beim mittleren Hochwasserabfluss ergibt sich eine Vergrößerung der Hochwasserereignisse zwischen ca. 1,5 und 2,0. Dieser Faktor nimmt mit zunehmender Jährlichkeit zu und erreicht beim 100-jährlichen Ereignis einen Bereich zwischen ca. 2,0 und 3,0. Ausgenommen hiervon sind lediglich die beiden Oberlaufpegel Rottweil und Horb am Neckar, bei denen eine gegenläufige Tendenz vorhanden ist. Für diese Pegel nimmt der Faktor mit steigender Jährlichkeit ab und liegt beim 100-jährlichen Ereignis ungefähr bei 1,0.

Nach Abschluss der hier vorgestellten Auswertungen hat es sich erwiesen, dass sich bei der Berechnung des Kontrolllaufs beim MPI eine Inkonsistenz bei der räumlichen Auflösung eingeschlichen hat. Deshalb wird die Klimasimulation des Kontrolllaufs neu bereitgestellt. Nach Simulation der Abflusszeitreihen mit dem Wasserhaushaltsmodell wird anschließend eine erneute statistische Analyse und Bewertung vorgenommen. Aus diesem Grunde werden die Ergebnisse des vorliegenden Klimamodells des MPI zunächst nicht weiter betrachtet.

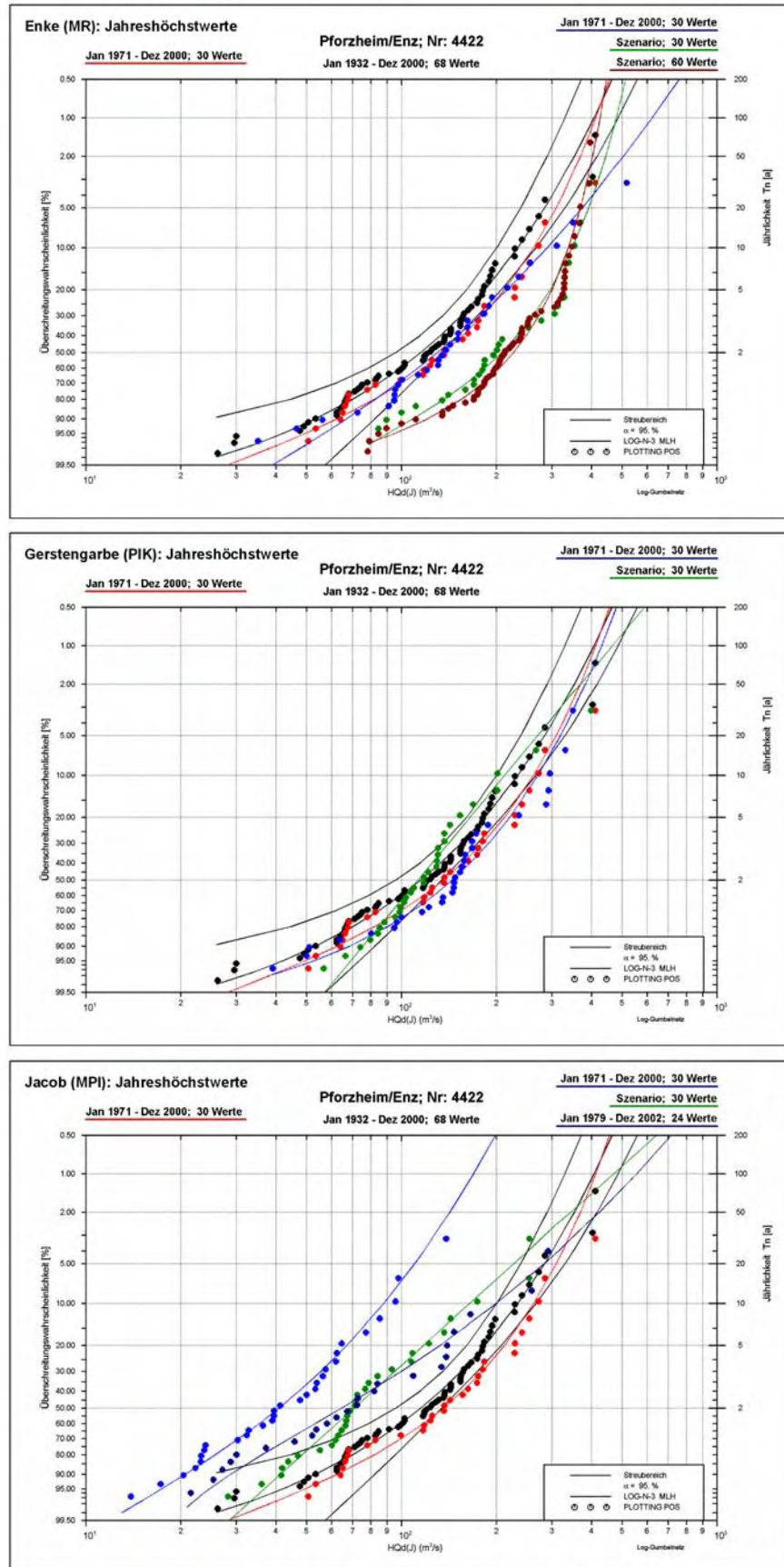


Abb. 5: Vergleich der Hochwasserstatistiken (Jahreshöchstwerte) für die Messwerte und für die Niederschlagsszenarien für den Ist-Zustand und für den Zustand mit Klimaänderung am Pegel Pforzheim/Enz.

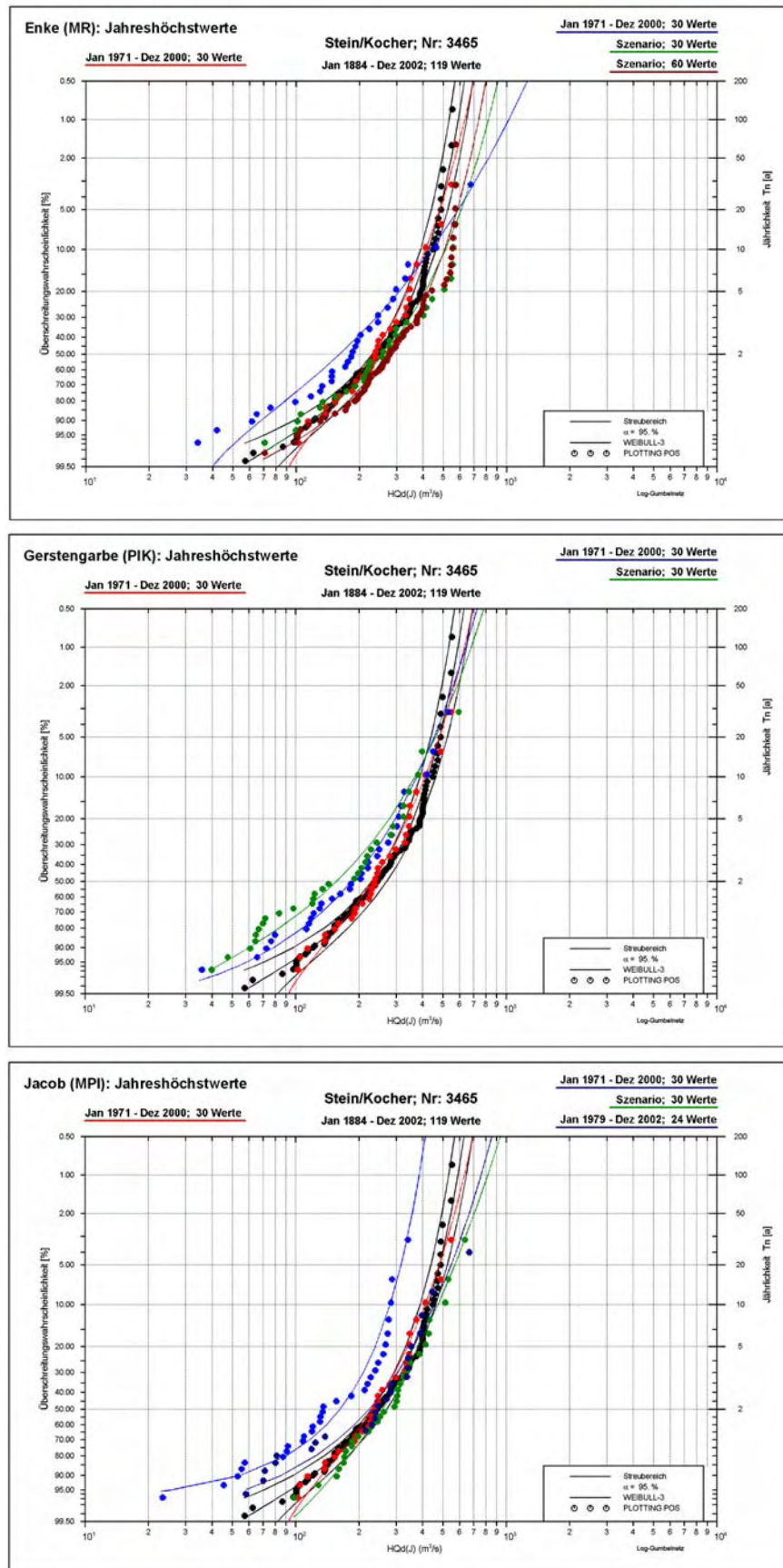


Abb. 6: Vergleich der Hochwasserstatistiken (Jahreshöchstwerte) für die Messwerte und für die Niederschlagsszenarien für den Ist-Zustand und für den Zustand mit Klimaänderung am Pegel Stein/Kocher.

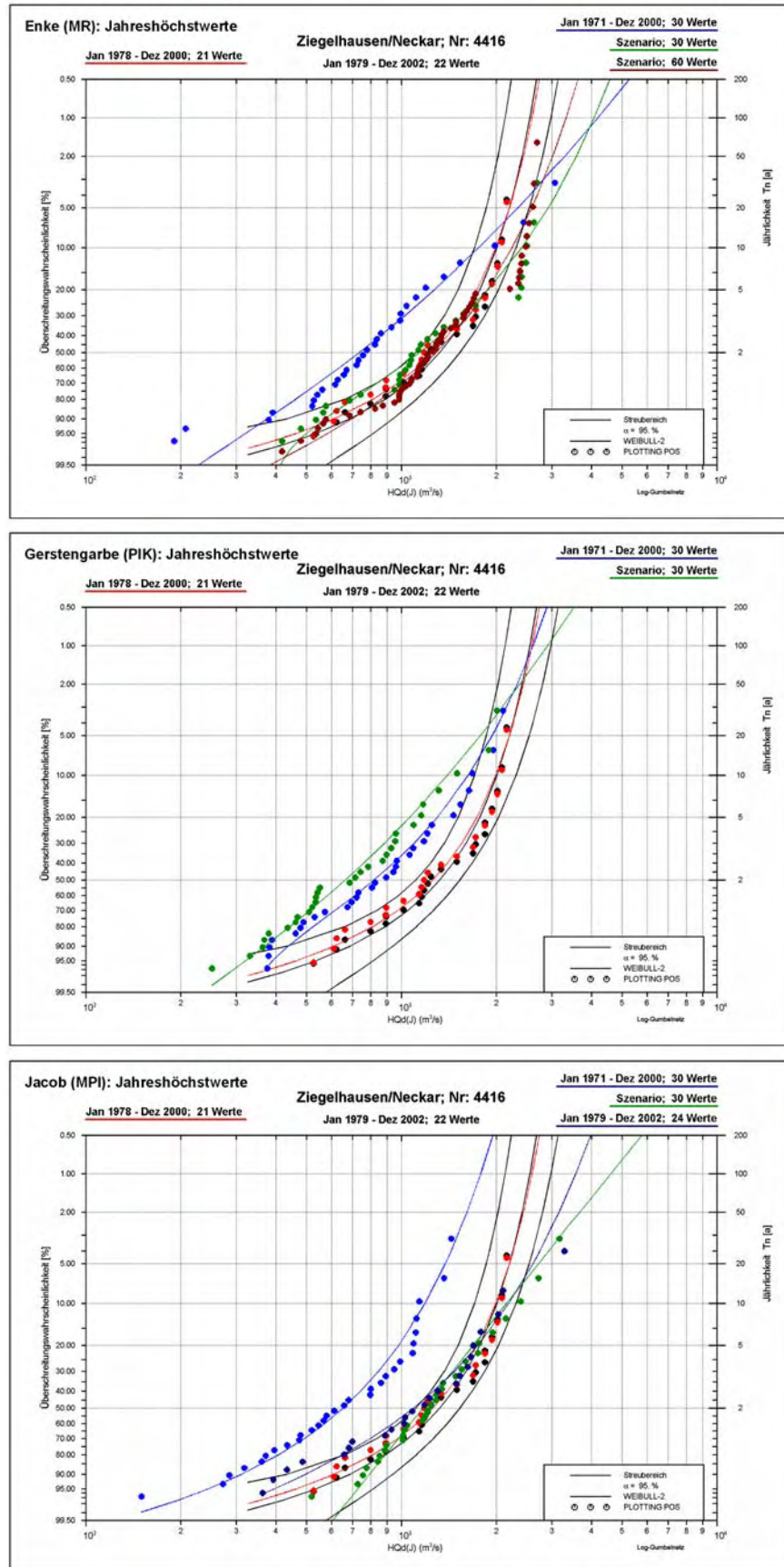


Abb. 7: Vergleich der Hochwasserstatistiken (Jahreshöchstwerte) für die Messwerte und für die Niederschlagsszenarien für den Ist-Zustand und für den Zustand mit Klimaänderung am Pegel Ziegelhausen/Neckar

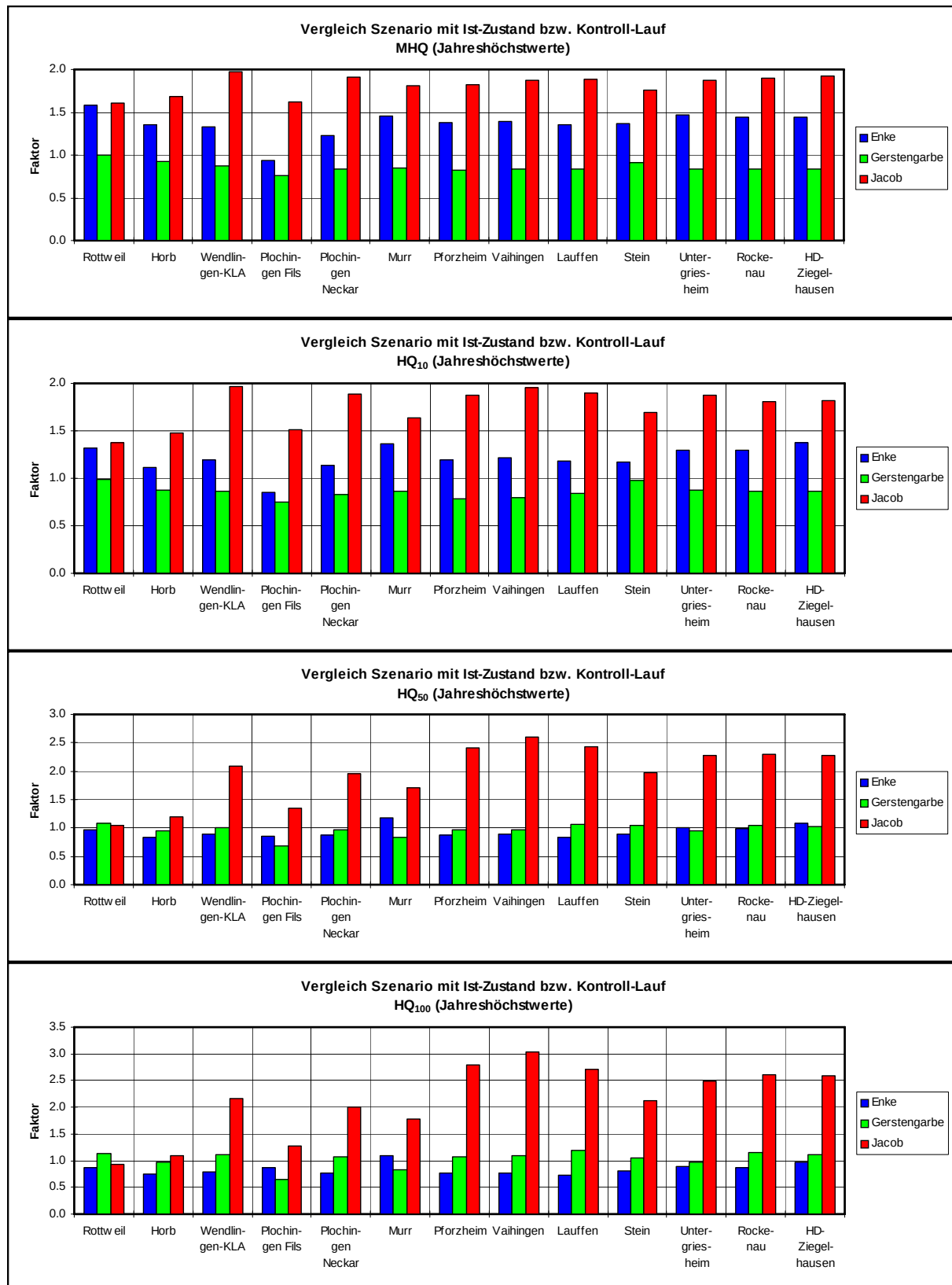


Abb. 8: Veränderung ausgewählter Hochwasser-Kennwerte (MHQ, HQ₁₀, HQ₅₀ und HQ₁₀₀) aufgrund der Klimaszenarien für die Pegel im Neckareinzugsgebiet auf der Basis der Jahreshöchstwerte

5. Faktor "Klimaänderung"

Wie die statistischen Analysen der Hochwasserereignisse zeigen, liegen zur Zeit plausible Erkenntnisse bezüglich einer Abflussveränderung infolge Klimawandel lediglich auf der Basis des Klimamodells "Enke" (MR) vor. Aus diesem Grunde wurden die prognostizierten Abflüsse, die über das Wasserhaushaltsmodell aus dem Klimamodell "Enke" abgeleitet wurde, weitergehend analysiert. Betrachtet wurde der Jahresgang der monatlichen Höchstabflüsse sowie die zugehörigen mittleren Jahres- und Halbjahreswerte (siehe Abschnitt 3). Zur Abschätzung der Auswirkung des Klimawandels auf Hochwasserbemessungswerte wurden statistische Extremwertauswertungen sowohl für die Jahreshöchstabflüsse (siehe Abschnitt 4) als auch für die Höchstwerte der beiden Halbjahre (Winter- und Sommer-Halbjahr) durchgeführt.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse der Extremwertauswertungen für Jahres- und Halbjahreswerte in Tab2 aufgelistet. Aufgeführt sind die prognostizierten Veränderungen ausgewählter Hochwasserabfluss-Kennwerte, abgeleitet aus dem Klimamodell "Enke", als Verhältnisse zwischen dem Zukunftszustand (Sze) und dem Ist-Zustand (Ist). Dabei ist jeweils angegeben die mittlere Veränderung über alle einbezogenen Pegel des Neckargebiets und die maximale Veränderung, die an einem Pegel aufgetreten ist. Aus dem Klimamodell "Enke" (MR) ist somit ein deutliches Signal erkennbar, dass infolge des Klimawandels eine Zunahme der Hochwasserabflüsse insbesondere im Bereich der mittleren Hochwasserabflüsse zu erwarten ist. Der mittlere Hochwasserabfluss MHQ nimmt bei den Jahreshöchstwerten im Mittel über alle Pegel um einen Faktor von $f = 1,36$ zu. Das Maximum liegt bei $f = 1,58$. Bei den beiden Halbjahren liegt die Zunahme in derselben Größenordnung. Der etwas höhere Maximalwert im 2. Halbjahr (Sommer) sollte nicht überbewertet werden, da die Berechnungsergebnisse für den Ist-Zustand zeigen, dass gerade im Sommerhalbjahr die Hochwasserabfluss-Scheitelwerte ungenauer abgebildet werden als im Winterhalbjahr. Nimmt die Jährlichkeit zu, ergibt sich eine deutliche Abnahme der Veränderungsfaktoren. Ab ca. dem 100-jährlichen Ereignis liegen selbst die Maximalwerte nur noch geringfügig über $f = 1,0$. Die Abnahme der Veränderungsfaktoren mit zunehmender Jährlichkeit ist in der graphischen Darstellung der Faktoren in Abb. 9 erkennbar.

Auf der Basis dieser Ergebnisse wird hiermit in Abstimmung mit der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg ein erster Vorschlag vorgestellt, wie der Einfluss der Klimaänderung bei der Festlegung von Hochwasserbemessungsgrößen berücksichtigt werden kann. Durch Vorgabe eines Faktors "Klimaänderung" $f_{T,K}$, abhängig von der Jährlichkeit T des Ereignisses, kann die zu erwartende Veränderung der Hochwasserbemessungswerte $HQ_{T,K}$ auf der Basis der aktuellen Extremwertstatistik HQ_T über

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

abgeschätzt und bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen berücksichtigt werden. Auf der Grundlage des aktuellen Kenntnisstands werden die Faktoren "Klimaänderung" aus Tab.3 vorgeschlagen. Bei häufigen Ereignissen der Jährlichkeit $T = 2$ a ergibt sich eine Abflusserhöhung um den Faktor $f_{T,K} = 1,5$. Dieser Faktor nimmt mit zunehmender Jährlichkeit deutlich ab und beträgt beim 100-jährlichen Ereignis $f_{T,K} = 1,15$. Ab Ereignissen mit Jährlichkeiten von $T \geq 1000$ a ist keine Abflussveränderung zu erwarten. Diese Faktoren beziehen sich auf das gesamte Neckargebiet. Die Auswirkung des Faktors "Klimaänderung" auf die Pegelstatistik ist in Abb. 10 für ausgewählte Pegel des Neckargebiets dargestellt.

6. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Ermittlung der Veränderung von Hochwasserbemessungsabflüssen infolge Klimawandel wurden die Abflussberechnungen auf der Grundlage von drei Klimamodellen statistisch bezüglich des Extremwertverhaltens untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass auf dem aktuellen Kenntnisstand lediglich die Szenarien des Klimamodells "Enke" (MR) plausible Tenden-



zen aufweisen. Das Klimamodell "Jakob" (MPI) ist zur Zeit in der Überarbeitung und kann somit erst zu einem späteren Zeitpunkt in diese Betrachtung einbezogen werden.

Aus dem Klimamodell "Enke" ergibt sich eine deutliche Tendenz zu einer Abflusserhöhung, die sich jedoch hauptsächlich im Bereich der kleineren häufigen Ereignisse auswirkt. Bei zunehmender Jährlichkeit nimmt die prognostizierte Abflusserhöhung deutlich ab und ist bei sehr hohen Jährlichkeiten vernachlässigbar klein.

Auf der Basis dieser Erkenntnisse kann für das Einzugsgebiet des Neckars ein erster Vorschlag zur Berücksichtigung der Klimaänderung bei der Festlegung von Hochwasserbemessungswerten gemacht werden. Durch die Einführung des Faktors "Klimaänderung" als Funktion der Jährlichkeit können aus den aktuell gültigen Abflussstatistiken die infolge Klimawandel veränderten Hochwasserereignisse ermittelt werden. Aufgrund der vergleichbaren Ergebnisse der einbezogenen Pegel des Neckargebiets wird der Faktor "Klimaänderung" für das Gesamtgebiet des Neckars räumlich konstant angenommen.

Die Untersuchungen sollen im Laufe des Jahres 2004 auf die Flussgebiete von Donau, Rhein und Main (Tauber) in Baden-Württemberg ausgedehnt werden. Somit ist zu erwarten, dass bis Ende des Jahres 2004 flächendeckende Aussagen über die prognostizierten Veränderungen von Hochwasserbemessungswerten in Baden-Württemberg vorliegen werden.

Sze/Ist	Jahr		1. Halbjahr		2. Halbjahr	
	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum	Mittelwert	Maximum
MHQ	1.36	1.58	1.42	1.59	1.38	1.78
HQ ₁₀	1.21	1.37	1.23	1.37	1.38	1.91
HQ ₂₀	1.08	1.28	1.07	1.22	1.27	1.79
HQ ₅₀	0.94	1.18	0.90	1.06	1.12	1.59
HQ ₁₀₀	0.84	1.10	0.80	1.02	1.01	1.44
HQ ₂₀₀	0.76	1.03	0.71	1.00	0.92	1.38

Tab2: Veränderung von Hochwasserabfluss-Kennwerten auf der Basis des Klimamodells "Enke" (MR) für Jahres- und Halbjahreshöchstwerte; Verhältnis zwischen Zukunftszustand (Sze) und Ist-Zustand (Ist)

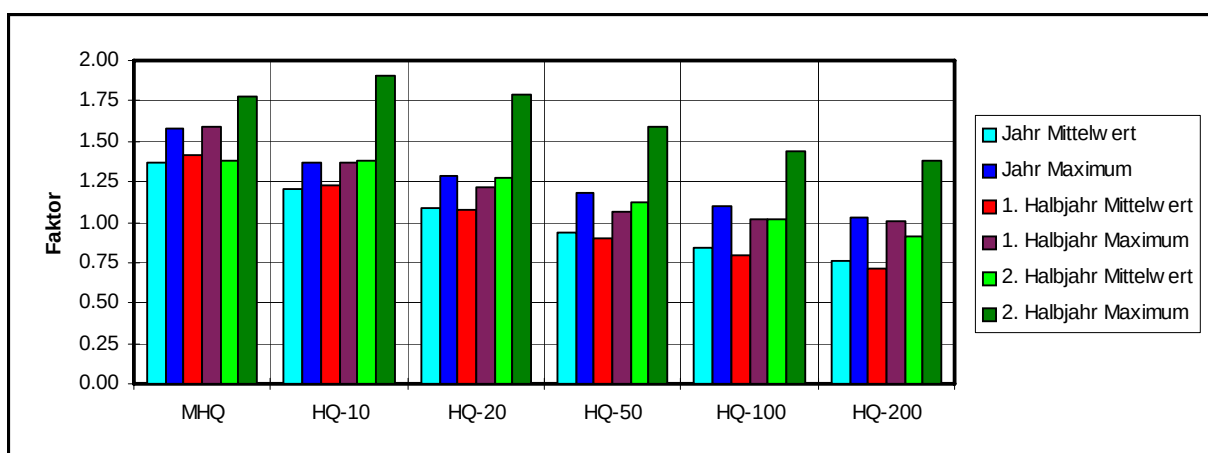


Abb. 9: Graphische Darstellung der Veränderung von Hochwasserabfluss-Kennwerten auf der Basis des Klimamodells "Enke" (MR) für Jahres- und Halbjahreshöchstwerte; Verhältnis zwischen Zukunftszustand (Sze) und Ist-Zustand (Ist)

Jährlichkeit in [a]	2	5	10	20	50	100	200	500	≥1000
Faktor $f_{T,K}$	1,5	1,45	1,4	1,33	1,23	1,15	1,08	1,03	1,0

Tab.3: Faktor "Klimaänderung" $f_{T,K}$ für Hochwasserereignisse unterschiedlicher Jährlichkeit, abgeleitet aus dem Klimamodell "Enke" (MR)

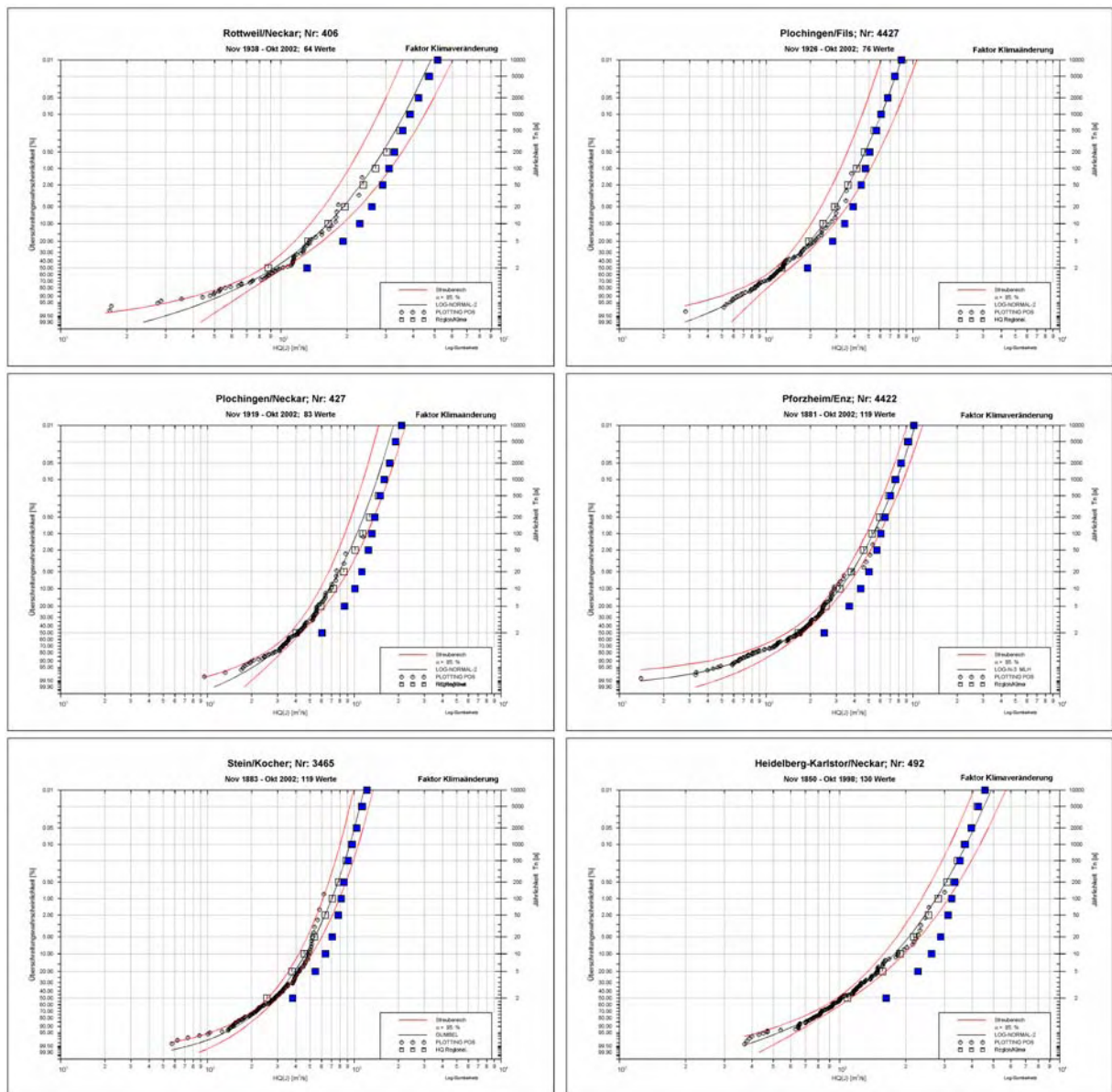


Abb. 10: Veränderung der Hochwasserextremwerte infolge Berücksichtigung des Faktors "Klimaänderung" $f_{T,K}$ für ausgewählte Pegel des Neckareinzugsgebiets



Auswirkungen der Klimaveränderungen auf Planungen – Praxisbeispiele

Joachim Wald

WALD + CORBE Beratende Ingenieure, Hügelsheim

1. Einleitung

Die bisherigen Untersuchungen im Rahmen von KLIWA haben gezeigt, dass die Häufigkeit von Hochwasserereignissen in den letzten 30 Jahren zugenommen hat und in bestimmten Regionen z.B. von Baden-Württemberg eine Erhöhung der extremen Hochwasserabflüsse festzustellen ist. Auch der Deutsche Wetterdienst kommt zu dem Ergebnis, dass insbesondere die Starkniederschläge (Dauerstufen > 24 h) im Winterhalbjahr vor allem im Schwarzwald und im Nordosten von Baden-Württemberg signifikante Zunahmen aufweisen. Welche Konsequenzen diese Erkenntnisse für die Planung und Dimensionierung von technischen Hochwasserschutzmaßnahmen mit sich bringen, wurde im Rahmen einer Pilotstudie exemplarisch für ausgewählte Beispiele in Baden-Württemberg untersucht.

2. Untersuchungsumfang

2.1 Anlagen des technischen Hochwasserschutzes

Die Untersuchung sollte einen sehr engen und aktuellen Bezug zur heutigen wasserwirtschaftlichen Praxis haben. Betrachtet wurden deshalb nur Anlagen des technischen Hochwasserschutzes, die in den letzten Jahren gebaut oder für die Planungen nach den derzeitigen Erkenntnissen (ohne Berücksichtigung von möglichen Abflusserhöhungen aufgrund von Klimaveränderungen) erstellt wurden.

Im Einzelnen wurden folgende Anlagen bzw. Anlagentypen einbezogen:

- Hochwasserrückhaltebecken (HRB)
- Lokale Hochwasserschutzmaßnahmen z.B. Hochwasserdeiche, Hochwassermauern, Gewässerausbau, mobile Maßnahmen

Für alle ausgewählten Anlagen lagen aus vorausgegangenen Flussgebietsuntersuchungen und Planungsarbeiten hydrologische und hydraulische Berechnungsmodelle vor, so dass die Bemessungsabflüsse, Bemessungswasserstände oder Hochwasserganglinien unter Berücksichtigung veränderter Randbedingungen (Klimaveränderung) leicht ermittelt werden konnten.

2.2 Ausgewählte Hochwasserrückhaltebecken

Hochwasserrückhaltebecken werden nach DIN 19700 Teil 12 in sehr kleine, kleine, mittlere und große Hochwasserrückhaltebecken eingeteilt. Diese Klassifizierung richtet sich nach der Höhe des Absperrbauwerks (bezogen auf die Gründungssohle) bzw. nach der Größe des Stauraums (Rückhaltevolumen). Nach dieser Klassifizierung wurden zwei „kleine Becken“ (50.000 m³ bis 100.000 m³) und zwei „mittlere Becken“ (100.000 m³ bis 1.000.000 m³) für die Untersuchung ausgewählt. Bei den ausgewählten Beispielen handelt es sich um Beckengrößen, die in der Praxis am häufigsten eingesetzt werden. In Tab. 1 sind die wichtigsten technischen Daten für die ausgewählten Hochwasserrückhaltebecken zusammengestellt. Die



angegebenen maximalen Dammhöhen beziehen sich auf den Taltefpunkt und nicht auf den tiefsten Punkt der Gründungssohle.

Das HRB-Beispiel 1 ist als einzigstes Becken derzeit noch nicht gebaut. Die Anlage ist aber bereits genehmigt. Bei allen anderen ausgewählten Beispielen handelt es sich um fertiggestellte Anlagen, die in Betrieb sind. Die Becken wurden so ausgewählt, dass sie auch unterschiedliche Bauweisen, insbesondere im Hinblick auf die Ausbildung der Hochwasserentlastungsanlage repräsentieren. Die Bilder 1 bis 4 zeigen die ausgewählten Rückhaltebecken.

Tab. 1: Technische Daten zu den ausgewählten Hochwasserrückhaltebecken

Technische Daten	ausgewählte HRB-Beispiele			
	1	2	3	4
Größe des Einzugsgebietes [km ²] an der Sperrenstelle	45	83	4	6
Wiederkehrzeit des Bemessungshochwassers für das Rückhaltevolumen [Jahre]	50	100	100	100
Rückhaltevolumen [m ³]	250.000	115.000	54.000	62.000
max. Dammhöhe [m] über Tal	11	4,20	2,60	9,50
luftseitige Dammneigung	1:3	1:10	1:8	1:4
Zufluss HQ ₁₀₀ [m ³ /s]	86,5	57,5	5,5	5,2
max. Abfluss aus dem HRB [m ³ /s]	33,6	42,2	1,7	2,6
Hochwasserentlastungsanlage	2 Klappen 5,0 m x 2,0 m	überströmbarer Damm	überströmbarer Damm	Raugerinne

Bei dem HRB-Beispiel 1 handelt es sich um ein Rückhaltebecken mit einem kombinierten, nach oben offenen Auslassbauwerk, in das zwei Tiefschütze zur Regulierung der Abflüsse (Betriebsauslass) und die Hochwasserentlastungsanlage in Form von zwei Fischbauchklappen eingebaut sind.

Die HRB-Beispiele 2 und 3 sind ebenfalls mit offenen Auslassbauwerken ausgestattet, in denen die Abflussregulierung über Tiefschütze erfolgt. In beiden Fällen ist die Hochwasserentlastungsanlage allerdings nicht in diesem Bauwerk integriert, sondern als teil- bzw. vollüberströmbarer Damm hergestellt.

Bei Beispiel 4 ist der Betriebsauslass in dem Absperrdamm als geschlossener Stollen ausgeführt. Die Hochwasserentlastungsanlage wurde in Form eines Raugerinnes mit verklammertem Steinsatz an den Talhang gelegt.



Bild 1: Fotosimulation des HRB-Beispiels 1



Bild 2: HRB-Beispiel 2



Bild 3: HRB-Beispiel 3



Bild 4: HRB-Beispiel 4

2.2.1 Ausgewählte lokale Hochwasserschutzmaßnahmen

Unter lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen versteht man flussbegleitende Maßnahmen, mit denen punktförmig oder linienförmig das Überfluten bebauter Gebiete verhindert werden soll. Hierzu gibt es verschiedene Elemente (Varianten) der Ausführung, wie z.B. Hochwasserschutzdeiche (Verwallungen), Mauern, Gewässeraufweitungen oder der Bau von Flutmulden. Im Rahmen der Studie wurden nicht die einzelnen Möglichkeiten im Vergleich zueinander untersucht, sondern es wurde aufgezeigt, wie sich insgesamt für eine Ortslage oder für einen zu sichernden Gewässerabschnitt die Randbedingungen für bereits geplante oder ausgeführte Maßnahmen ändern und ob eine Anpassung der Maßnahmen an die zu erwartenden Auswirkungen der Klimaveränderung möglich ist, welche Kosten damit verbunden sind oder wie sich die Kostensituation darstellt, wenn dieser Lastfall bereits bei der Planung berücksichtigt worden wäre. In Tab. 2 sind die ausgewählten Beispiele für solche lokalen Maßnahmen kurz beschrieben. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Kombinationen verschiedener Elemente.

Die Bilder 5 und 6 zeigen Ausführungsbeispiele für solche lokale Hochwasserschutzmaßnahmen.

Tab. 2: Übersicht über die untersuchten lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen

Maßnahme / Beispiel	Einzugsgebiet $A_E[\text{km}^2]$	$HQ_{100} [\text{m}^3/\text{s}]$	Kurzbeschreibung
LM-1	209	172	Neubau Ufermauern und Verwallungen
LM-2	326	252	Neubau Ufermauer und Hochwasserschutzdeich
LM-3	102	97	Vorlandabtrag und Flutmulde
LM-4	111	105	Neubau/Erhöhung Ufermauern, Neubau zusätzliches Wehrfeld
LM-5	197	215	Vorlandabgrabungen, Neubau Verwallungen und Ufermauern, Neubau Hochwasserschutzdeich



Bild 5: Beispiele für lokale Hochwasserschutzmaßnahmen



Bild 6: Beispiel für eine Vorlandabgrabung / Gewässeraufweitung

2.3 Untersuchte Lastfälle

2.3.1 Hochwasserrückhaltebecken

Die durch ein Hochwasserrückhaltebecken sicherzustellende Hochwasserschutzwirkung wird durch die Größe des gewöhnlichen Hochwasserrückhalterauges und die Abgabe an das Unterwasser bestimmt. Die Bemessung des erforderlichen Rückhaltevolumens erfolgt auf der Basis von Abflussganglinien, die mit Hilfe eines Niederschlag-Abfluss-Modells oder eines hydrologischen Flussgebietsmodells berechnet werden. Eingangsgrößen in diese Modelle sind Bemessungsniederschläge des Deutschen Wetterdienstes (KOSTRA, Niederschläge bestimmter Dauer und Wiederkehrzeit). Da vor dem Hintergrund einer Klimaveränderung von einer Zunahme dieser Bemessungsniederschläge auszugehen ist, müssen die Bemessungsganglinien für die höheren Niederschlagsmengen neu ermittelt werden.

Bei der Planung von Hochwasserrückhaltebecken ist neben der angestrebten Hochwasserschutzwirkung auch die Hochwassersicherheit der Anlage nachzuweisen. Grundlage hierfür ist die DIN 19700. Untersucht werden müssen dabei je nach Klassifizierung des Beckens Hochwasserereignisse mit Wiederkehrzeiten bis zu 5.000 oder 10.000 Jahren. Nach der neuesten Ausgabe der DIN vom Juli 2004 darf bei der Ermittlung der anzusetzenden Bemessungsabflüsse von leeren Becken ausgegangen und damit die Retentionswirkung einbezogen werden. Dies setzt jedoch wiederum voraus, dass die Abflussganglinien für die hierfür zu untersuchenden Extremereignisse aus den entsprechenden Extremniederschlägen berechnet werden.

Konkrete Angaben über die Größenordnung der Zunahme der hierfür anzusetzenden Bemessungsniederschläge lagen zum Zeitpunkt der Studie noch nicht vor. Um eine mögliche Bandbreite der zu erwartenden Auswirkungen aufzeigen zu können, wurden deshalb drei Lastfälle festgelegt.

Untersuchung von Hochwasserrückhaltebecken	Lastfall „Klimaveränderung“		
	1	2	3
Erhöhung der Bemessungsniederschläge um	5 %	10 %	20 %

2.3.2 Lokale Hochwasserschutzmaßnahmen

Die Bemessung der lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen erfolgt üblicherweise für einen vorgegebenen Bemessungsabfluss bzw. einen daraus ableitbaren Bemessungshochwasserstand. Infolge der Klimaveränderung ist zumindest bereichsweise von einer Erhöhung der bisherigen Bemessungsabflüsse auszugehen. Konkrete Angaben über die Zunahme lagen auch hier zum Zeitpunkt der Studie noch nicht vor. In Anlehnung an die Vorgehensweise bei den Hochwasserrückhaltebecken wurden ebenfalls 3 Lastfälle untersucht.

Untersuchung von lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen	Lastfall „Klimaveränderung“		
	1	2	3
Erhöhung der Bemessungsabflüsse um	10 %	20 %	30 %



3. Auswirkungen bei Hochwasserrückhaltebecken

3.1 Änderung der Hochwasserabflüsse

Die durchgeführten Simulationsrechnungen für die ausgewählten HRB-Beispiele zeigten, dass eine Erhöhung des Niederschlags zu überproportionalen Anstiegen der Füllen und der Scheitelwerte der Hochwasserwellen führt. In Tab. 3 sind die berechneten Hochwasserscheitelwerte für verschiedene Wiederkehrzeiten für die ausgewählten HRB-Beispiele zusammengestellt. Bild 8 zeigt die hieraus berechneten prozentualen Erhöhungen der Scheitelwerte für das HRB-Beispiel 1. Entsprechend dieser Darstellung ergeben sich in etwa auch die prozentualen Abflusserhöhungen für die anderen Hochwasserrückhaltebecken.

Für die Bemessung des Hochwasserrückhalteriums ist in erster Linie die Fülle der Hochwasserganglinien maßgebend. Bild 7a und Bild 7b zeigen exemplarisch für ein 4-Stunden- und ein 48-Stunden-Regenereignis mit einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren die berechneten Hochwasserganglinien für die 3 untersuchten Lastfälle. Aus diesen Abbildungen wird deutlich, dass insbesondere bei langanhaltenden Niederschlägen von einer großen Zunahme des Rückhaltevolumens auszugehen ist.

Tab. 3: Berechnete Hochwasserscheitelabflüsse (Zufluss zum HRB) für verschiedene Niederschlagserhöhungen und Wiederkehrzeiten

HRB-Beispiel	Niederschlags- erhöhung	HQ ₁₀ [m³/s]	HQ ₂₀ [m³/s]	HQ ₅₀ [m³/s]	HQ ₁₀₀ [m³/s]	HQ ₅₀₀ [m³/s]	HQ ₅₀₀₀ [m³/s]
1 (oberhalb liegende HRB wurden berücksichtigt)	Ist-Zustand	43,2	51,1	62,4	71,8	97,7	131,6
	5 %	47,2	55,7	67,9	77,9	101,5	138,0
	10 %	51,2	60,4	73,6	84,1	108,2	151,5
	20 %	59,7	70,2	85,1	96,8	122,3	180,8
2 (oberhalb liegende HRB wurden berücksichtigt)	Ist-Zustand	28,0	33,1	40,7	47,4	65,7	95,0
	5 %	29,7	35,4	44,0	51,4	71,2	102,6
	10 %	32,1	38,3	47,7	55,8	77,1	110,5
	20 %	37,1	44,4	55,6	64,8	89,4	126,5
3 (oberhalb keine HRB)	Ist-Zustand	2,8	3,6	4,7	5,5	7,7	11,3
	5 %	3,0	3,9	5,1	6,0	8,4	12,2
	10 %	3,3	4,2	5,5	6,4	9,0	13,2
	20 %	3,9	4,9	6,3	7,4	10,3	15,1
4 (oberhalb keine HRB)	Ist-Zustand	3,0	3,7	4,9	5,8	8,3	11,8
	5 %	3,3	4,1	5,3	6,2	8,9	12,8
	10 %	3,5	4,4	5,7	6,6	9,5	13,8
	20 %	4,1	5,2	6,5	7,5	10,9	15,7

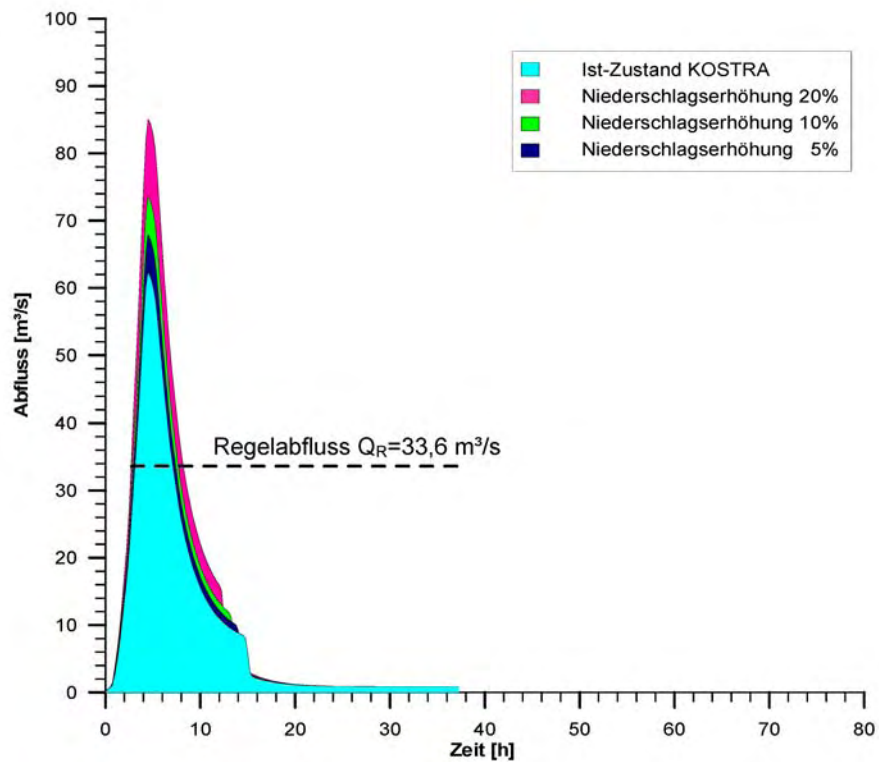


Bild 7a: Veränderung einer 50-jährlichen Bemessungsganglinie ($T_D = 4 \text{ h}$) für das HRB-Beispiel 1.

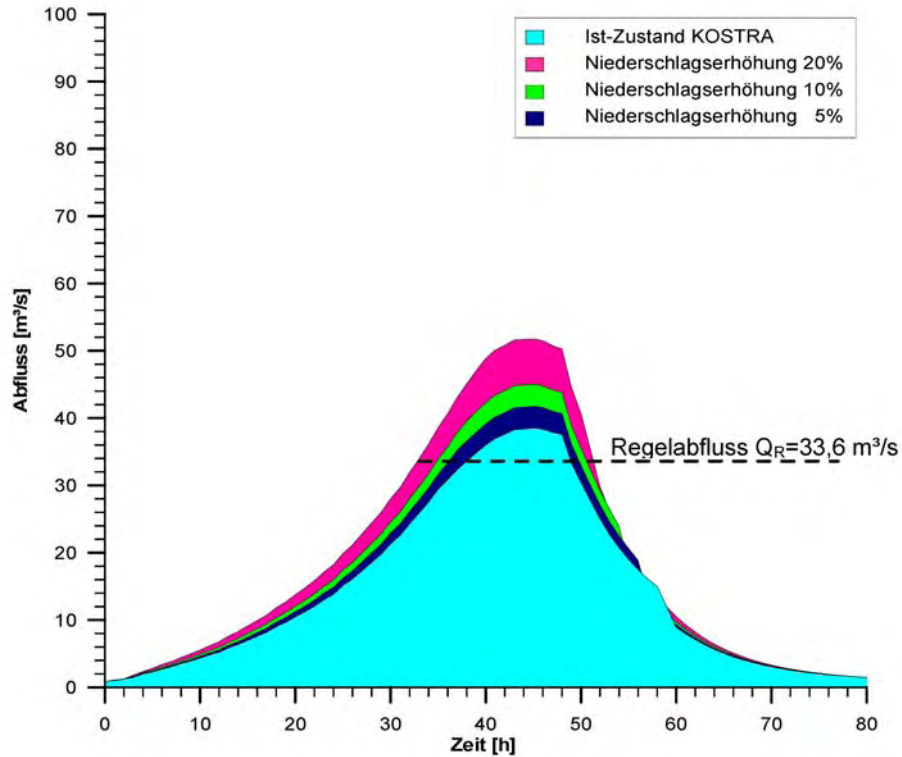


Bild 7b: Veränderung einer 50-jährlichen Bemessungsganglinie ($T_D = 48 \text{ h}$) für das HRB-Beispiel 1

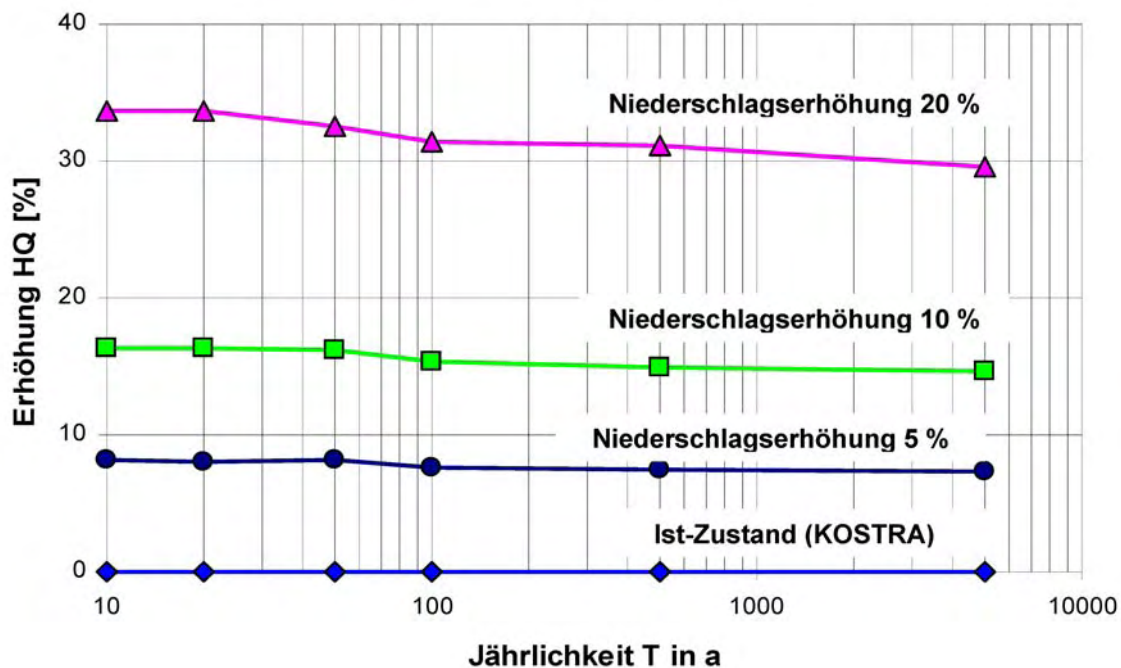


Bild 8: Berechnete prozentuale Erhöhung der Hochwasserscheitelwerte HQ_T für unterschiedliche Jährlichkeiten und die untersuchten Niederschlagserhöhungen (HRB-Beispiel 1)

3.2 Erforderliche Anpassungen bei Beibehaltung der Schutzwirkung

Will man die Hochwasserschutzwirkung für die Unterlieger an den ausgewählten HRB-Standorten beibehalten, müssten bei einer Erhöhung der Bemessungsniederschläge deutlich höhere Rückhaltevolumina bereitgestellt werden. Dies lässt sich z.B. in Bild 7b ablesen. Hier ist die 50-jährliche Abflussganglinie für das 48-Stunden Regenereignis im Vergleich zu den Abflussganglinien bei 5 %, 10 % und 20 % Niederschlagserhöhung dargestellt. Ebenfalls eingetragen ist der Regelabfluss Q_R , auf den das Becken gesteuert wird. Das erforderliche Rückhaltevolumen (Fläche über dem Regelabfluss) steigt um ein Vielfaches an. Um dieses zusätzliche Rückhaltevolumen herstellen zu können, müssten die Absperrrämme einschließlich der Auslassbauwerke erhöht werden.

In Tab. 4 sind die erforderlichen Volumina der Lastfälle „Klimaveränderung“ für die 4 untersuchten HRB-Beispiele zusammengestellt. Während die Volumenzunahme bei den kleineren Becken noch relativ moderat ausfällt, sind bei den beiden größeren Becken dramatische Erhöhungen festzustellen.

Im Rahmen der Studie wurden die Möglichkeiten einer nachträglichen Anpassung der Hochwasserrückhaltebecken an die vorgegebenen Lastfälle untersucht und die dafür aufzuwendenden Mehrkosten im Vergleich zu den bisherigen Investitionskosten ermittelt. Um aufzuzeigen, welche Mehrkosten anfallen würden, wenn die Auswirkungen der Klimaveränderung bereits im Planungsstadium berücksichtigt worden wären, wurden auch für diesen Fall Kostenschätzungen durchgeführt.

I

In Tabelle 4 sind die erforderlichen Anpassungen (Volumen, Dammhöhen) sowie die kostenmäßige Bewertung für die ausgewählten Beispiele zusammengestellt. Während bei den kleineren Becken eine nachträgliche Anpassung sich durchaus als machbar erweist, gibt es für die beiden größeren Becken (Beispiel 1 und Beispiel 2) kaum Möglichkeiten. Bild 9 zeigt

die notwendigen Erhöhungen im Bereich des Auslassbauwerkes für das HRB-Beispiel 1. Eine Anpassung des Auslassbauwerkes an diese Höhen erfordert einen Abbruch und anschließenden Neubau des Bauwerkes. Beim HRB-Beispiel 2 erscheint eine Anpassung für eine Niederschlagserhöhung von 5 % gerade noch machbar. Die Anpassungskosten betragen aber bereits 40 – 55 % der ursprünglichen Herstellungskosten. Größere Erhöhungen sind auch aufgrund der geologischen und topografischen Randbedingungen nicht realisierbar.

Wesentlich besser lassen sich die kleineren Becken mit den als Hochwasserentlastung dienenden überströmbaren oder teilüberströmbaren Dämmen anpassen. Da diese Becken auch meist an den Oberläufen liegen (kleinere Abflüsse !) fallen die Erhöhungen deutlich geringer aus. Sie sind außerdem aufgrund ihrer Bauart auch leichter modifizierbar. Bild 10 zeigt die Dimensionen der erforderlichen Anpassungen für das HRB-Beispiel 3.

Die Untersuchung zeigt aber auch, dass es bei allen untersuchten HRB-Beispielen wesentlich günstiger wird, wenn eine Erhöhung der Niederschlagswerte bereits im Rahmen der Planung berücksichtigt wird. In den meisten Fällen (siehe Tab. 4) liegen die Mehrkosten für die Schaffung größerer Rückhaltevolumina dann zwischen 5 bis 15 % und sind damit deutlich unter den Kosten für eine spätere Anpassung der Anlagen.

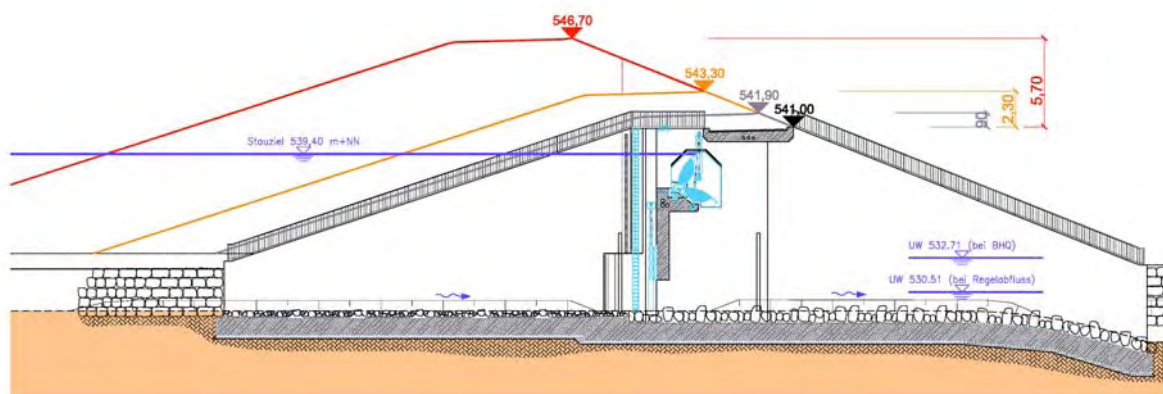


Bild 9: Erforderliche Erhöhungen des Rückhaltedammes und des Auslassbauwerkes beim HRB-Beispiel 1 zur Vergrößerung des Rückhaltevolumens

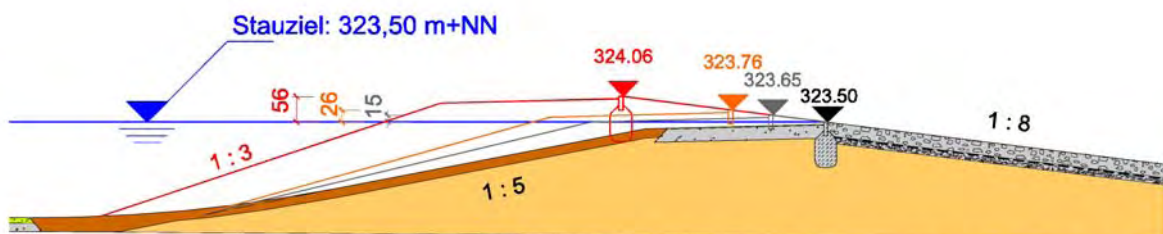


Bild 10: Erforderliche Erhöhungen des Rückhaltedammes beim HRB-Beispiel 3 zur Vergrößerung des Rückhaltevolumens



Tab. 4: Erforderliche Rückhaltevolumina und Dammerhöhungen bei einer Beibehaltung der bisherigen Hochwasserschutzwirkung sowie Abschätzung der Mehrkosten

HRB-Beispiel		Lastfall „Klimaveränderung“ Niederschlagserhöhung von		
		5 %	10 %	20 %
1	Rückhaltevolumen (Ist)	Erforderliches Rückhaltevolumen $S_{\text{erf,Plan}}$		
	$S_{\text{vorh,Ist}} = 250.000 \text{ m}^3$	336.000 m ³	467.000 m ³	807.000 m ³
	erforderliche Erhöhung des Rückhaltedammes	+0,90 m	+2,30 m	+5,70 m
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	nicht machbar		
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 4 %	+ 11 %	+ 40 – 50 %
2	Rückhaltevolumen (Ist)	Erforderliches Rückhaltevolumen $S_{\text{erf,Plan}}$		
	$S_{\text{vorh,Ist}} = 115.000 \text{ m}^3$	245.000 m ³	435.000 m ³	>500.000 m ³
	erforderliche Erhöhung des Rückhaltedammes	+1,50 m	+3,50 m	> 6,00 m
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	40 – 55 %	nicht machbar	
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 14 – 19 %	+ 40 - 50 %	nicht machbar
3	Rückhaltevolumen (Ist)	Erforderliches Rückhaltevolumen $S_{\text{erf,Plan}}$		
	$S_{\text{vorh,Ist}} = 53.000 \text{ m}^3$	60.000 m ³	66.000 m ³	80.000 m ³
	erforderliche Erhöhung des Rückhaltedammes	+0,15 m	+0,26 m	+0,56 m
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 13 %	+ 20 %	+ 19 %
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 3 %	+ 8 %	+ 14 %
4	Rückhaltevolumen (Ist)	Erforderliches Rückhaltevolumen $S_{\text{erf,Plan}}$		
	$S_{\text{vorh,Ist}} = 62.000 \text{ m}^3$	71.000 m ³	82.000 m ³	104.000 m ³
	erforderliche Erhöhung des Rückhaltedammes	+0,45 m	+0,95 m	+1,64 m
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 11 %	+ 22 %	+ 35 – 40 %
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 4 %	+ 10 %	+ 15 – 20 %

3.3 Nachweis der Hochwassersicherheit der Anlagen

Die Erhöhung der Scheitelabflüsse (siehe Tab. 3) führt bei den Nachweisen zur Hochwassersicherheit (Hochwasserentlastungsanlage, Freibord) nach DIN 19700 neu bei den untersuchten Hochwasserrückhaltebecken bis zu Niederschlagserhöhungen von 10 % entweder zu keinen oder zu relativ geringen Anpassungen. Wo sie notwendig werden, können diese noch relativ kostengünstig durchgeführt werden.

Die Ursache liegt darin, dass die untersuchten Hochwasserrückhaltebecken in der Planung nach der alten DIN 19700 bemessen wurden. Die Hochwassersicherheit war danach für den außergewöhnlichen Lastfall für ein Hochwasserereignis mit einer Wiederkehrzeit von $T_n = 1.000$ Jahren nachzuweisen. Dabei war von einem bis zum Stauziel gefüllten Becken auszugehen und der Abfluss durch den Betriebsauslass durfte nicht berücksichtigt werden. Nach der neuen DIN 19700 vom Juli 2004 sind die Lastfälle BHQ_1 und BHQ_2 zu untersuchen, wobei für kleine und mittlere Becken Bemessungshochwasserzuflüsse mit Wiederkehrzeiten von 500 Jahren (BHQ_1) und 5.000 Jahren (BHQ_2) zugrundegelegt werden müssen. Da jedoch insbesondere beim BHQ_2 der Betriebsauslass als Parallelentlastung berücksichtigt werden darf und bei Systemen von mehreren Hochwasserrückhaltebecken jetzt auch oberhalb liegende Becken berücksichtigt werden dürfen, unterscheiden sich die maßgebenden Bemessungsabflüsse für die Hochwasserentlastungsanlagen auch bei Berücksichtigung der Lastfälle „Klimaveränderung“ teilweise nur geringfügig von den bei der ursprünglichen Planung zugrundegelegten Bemessungsgrößen.

Bei den HRB-Beispielen 1 und 3 sind deshalb selbst bei Niederschlagserhöhungen in der Größenordnung von 20 % noch keine Anpassungsmaßnahmen erforderlich. Die geforderten Sicherheitsanforderungen können mit den geplanten Einrichtungen eingehalten werden. Dies ist beim Beispiel 1 vor allem der großen Leistungsfähigkeit des Betriebsauslasses zuzuschreiben. Beim Becken 3 erweist sich der voll überströmbar ausgebildete Damm als sehr belastbar. Außerdem ist bei dieser Ausführungsvariante der Hochwasserentlastungsanlage kein Freibord einzuhalten.

Bei den anderen beiden Becken (HRB-Beispiel 2 und 4) erfordern Niederschlagserhöhungen von 5 und 10 % bereits geringfügige Anpassungen. Die zusätzlichen Kosten sind jedoch noch relativ gering. Bei einer Zunahme des Bemessungsniederschlags um 20 % sind dann aber doch umfangreichere Maßnahmen im Bereich der Hochwasserentlastungsanlagen und zur Sicherstellung des Freibords (Dammerhöhung) notwendig. Diese Maßnahmen schlagen bei nachträglicher Durchführung mit Mehrkosten von ca. 20 % der ursprünglichen Investitionskosten zu Buche. Wenn diese Belastungen bereits in der Planungsphase berücksichtigt worden wären, hätten die Mehrkosten unter 10 % betragen.

Es ist davon auszugehen, dass die nachträglichen Anpassungen höher ausfallen würden, wenn die Planung der Hochwasserrückhaltebecken bereits auf der Grundlage der neuen DIN 19700 durchgeführt worden wären. Durch die Neufassung der DIN 19700 im Juli 2004 sind „Reserven“ in den Anlagen enthalten, die die Anpassungsmaßnahmen und damit auch die Mehrkosten etwas geringer ausfallen lassen. Dies ist bei der Bewertung der Ergebnisse zu berücksichtigen.



Tab. 5: Erforderliche Anpassungsmaßnahmen zur Einhaltung der Hochwassersicherheit der Anlagen sowie Abschätzung der Mehrkosten

HRB-Beispiel		Lastfall „Klimaveränderung“ Niederschlagserhöhung von		
		5 %	10 %	20 %
1	Maßnahmen	keine Maßnahmen erforderlich		
2	Maßnahmen	Dammkrone 5 cm erhöhen	Dammkrone 7 cm erhöhen	Dammkrone 14 cm erhöhen Deckwerk verklammern
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 0,10 %	+ 0,10 %	+ 20 %
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 0,03 %	+ 0,03 %	+ 8 %
3	Maßnahmen	keine Maßnahmen erforderlich		
4	Maßnahmen	keine Maßnahmen erforderlich	Dammkrone 5 cm erhöhen, Dammscharte 1,5 m verbreitern	Dammkrone 14 cm erhöhen, Dammscharte 5 m verbreitern
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	---	+ 6,10 %	+ 20 %
	bei Berücksichtigung in der Planung	---	+ 3,10 %	+ 9 %

4. Auswirkungen bei lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen

4.1 Änderung der Bemessungswasserstände

Tabelle 6 zeigt die berechneten Erhöhungen der Bemessungswasserstände für die untersuchten Lastfälle im Bereich der lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen. Die bereichsweise großen Erhöhungen bei den Beispielen LM-3 und LM-5 sind darauf zurückzuführen, dass unterhalb liegende Brücken bei dem erhöhten Bemessungsabfluss jetzt zuschlagen und einen zusätzlichen Wasserspiegelanstieg oberhalb verursachen.

Alle Maßnahmen sind mit einem Freibord von 50 cm bemessen. Ein Überströmen der Schutzmaßnahmen ist somit erst gegeben, wenn dieses Maß überschritten wird. Die entsprechenden Fälle sind in Tab. 6 markiert. Bei diesen Fällen liegt somit der größte Handlungsbedarf vor. Bei den Anstiegen kleiner oder gleich 50 cm ist der Schutz durch die Hochwasserschutzmaßnahmen auch mit Klimaveränderung noch gewährleistet. Lediglich der Freibord entspricht nicht mehr den ursprünglichen Vorgaben.

Tab. 6: Änderung der Bemessungswasserstände für die ausgewählten lokalen Maßnahmen bei den untersuchten Lastfällen „Klimaveränderung“

Maßnahme / Beispiel	BHQ =HQ _{100,ist}	Änderung der Bemessungswasserstände		
		Lastfall 1 BHQ + 10%	Lastfall 2 BHQ + 20%	Lastfall 3 BHQ + 30%
LM-1	172 m ³ /s	+ 15 cm	+ 29 cm	+ 44 cm
LM-2	252 m ³ /s	+ 15 cm	+ 30 cm	+ 45 cm
LM-3	97 m ³ /s	+ 40 cm	+ 60 cm	+ 74 cm
LM-4	105 m ³ /s	+ 22 bis 24 cm	+ 38 bis 45 cm	+ 50 bis 59 cm
LM-5	215 m ³ /s	+ 5 cm	+ 9 cm	+ 13 cm
		+ 13 cm	+ 27 cm	+ 40 cm
		+ 18 bis 27 cm	+ 40 bis 62 cm	+ 56 bis 80 cm

 Wasserspiegeländerung größer als der Freibord

4.2 Anpassung der lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen

Durch die Erhöhung der Bemessungshochwasserstände ergeben sich für die lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen neue Randbedingungen. Um die bisherige Schutzwirkung wiederherzustellen, müssen sie teilweise ausgedehnt, erhöht und gegebenenfalls auch verstärkt werden. Die erforderlichen Maßnahmen ergeben sich aus den neuen Bemessungswasserständen sowie den baustatischen und geotechnischen Erfordernissen. Dabei können ortsgestalterische Aspekte und die vorhandenen Platzverhältnisse ein limitierender Faktor sein, der oftmals neue Lösungen erfordert.

Mobile Hochwasserschutzmaßnahmen, Hochwasserschutzmauern und –deiche sind grundsätzlich für den Lastfall „Wasserstand bis Oberkante Mauer“ oder „bis Oberkante Deichkrone“ zu bemessen. Somit sind alle Lastfälle, bei denen die Wasserspiegeländerungen unter dem Freibordmaß bleiben, mit den vorhandenen Maßnahmen aus konstruktiver Sicht noch beherrschbar. Gemäß den geltenden Vorschriften ist jedoch der Freibord wiederherzustellen. Bei Mauern bzw. mobilen Schutzmaßnahmen oder Kombinationen aus beiden muss neben der Erhöhung auch oftmals eine Verstärkung im Bereich der Fundamente erfolgen, sofern diese nicht vorausschauend für höhere Wasserstände ausgelegt wurden. Wenn eine Anpassung aus baustatischen Gründen nicht mehr möglich ist, muss das Bauwerk abgebrochen und neu gebaut werden.

Die Erhöhung von Flussdeichen kann durch eine Verbreiterung bzw. Verstärkung des Deiches erfolgen. In der Regel wird dabei die wasserseitige Böschung beibehalten, aufwärts verlängert und landseitig ein größerer Stützkörper mit neuer Böschung aufgebaut. Wenn die Breite des Deichlagers und der Deichkrone sowie die Neigungen der Böschungen es zulassen, kann der Deich aber auch ohne Verbreiterung bzw. Verstärkung erhöht werden.

In Bild 11 sind die Anpassungsmöglichkeiten für Hochwasserschutzmauern bzw. -deiche schematisch für unterschiedliche Belastungszustände aufgezeigt.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden die erforderlichen Maßnahmen für die ausgewählten Beispiele lokaler Hochwasserschutzmaßnahmen ermittelt und kostenmäßig abgeschätzt. Es zeigte sich auch hier, dass eine spätere Anpassung meist um ein Vielfaches teurer ist, als eine Berücksichtigung der höheren Belastungen bereits im Planungsstadium. Die Mehrkosten sind in Tab. 7 zusammengestellt. Besonders teuer wird es immer dann, wenn aufgrund der höheren Abflüsse bestehende Anlagen (Mauern und Brücken) abgebrochen und neu gebaut werden müssen, um das angestrebte Schutzziel zu erreichen.

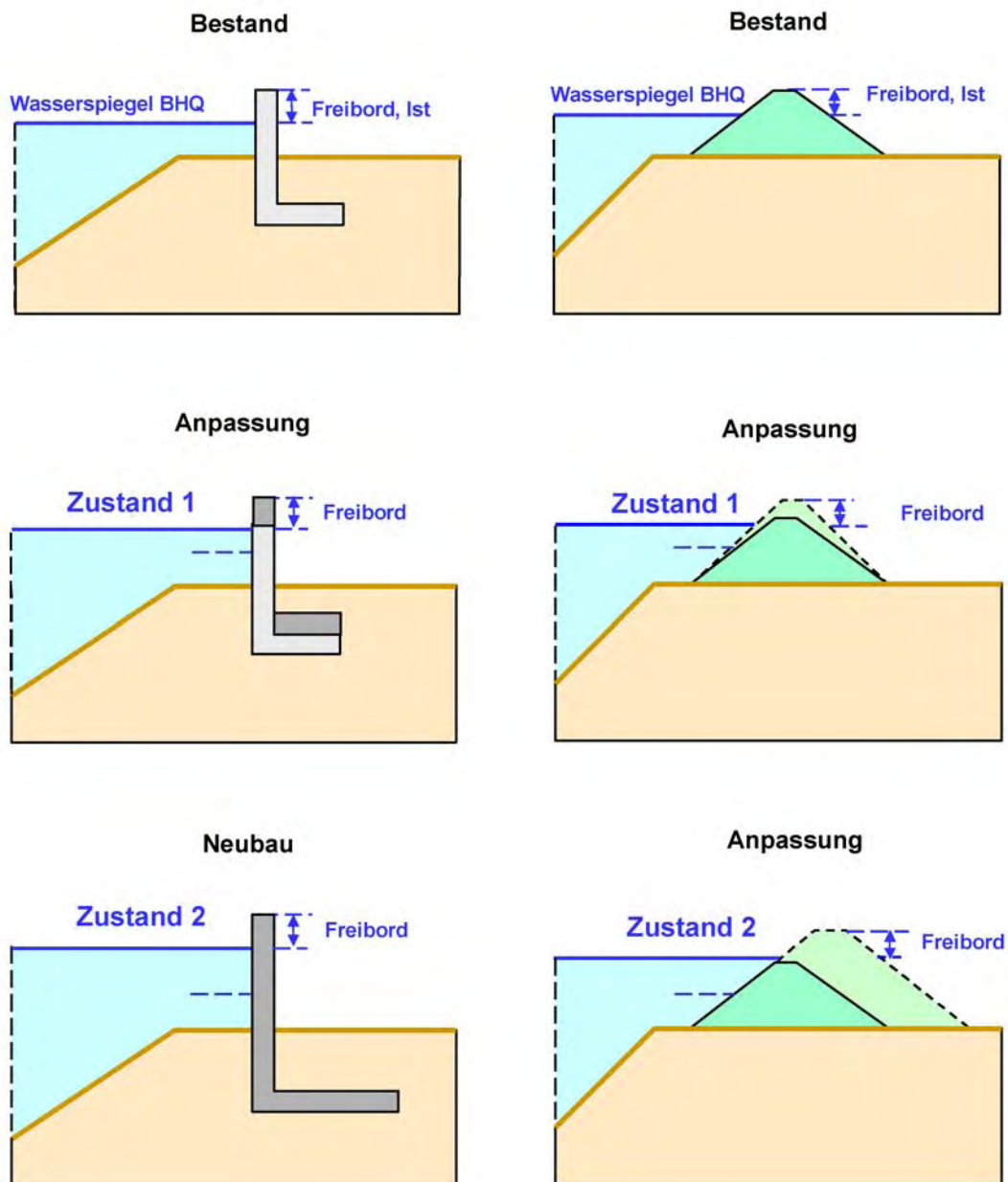


Bild 11: Schematische Darstellung der Anpassungsmöglichkeiten bei Hochwasserschutzmauern und Hochwasserschutzdeichen.

Tab. 7: Mehrkosten bei Anpassung der ausgewählten lokalen Maßnahmen an die Lastfälle „Klimaveränderung“

Maßnahme / Beispiel		Maßnahmen und Mehrkosten		
		Lastfall 1 BHQ + 10%	Lastfall 2 BHQ + 20%	Lastfall 3 BHQ + 30%
LM-1	Maßnahmen bei nachträglicher Anpassung	mobile Maßnahmen auf Mauer aufsetzen	mobile Maßnahmen auf Mauer aufsetzen	Abbruch/Neubau Ufermauer
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 22%	+ 55%	+ 157%
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 9%	+ 10%	+ 13%
LM-2	Maßnahmen	Deich erhöhen, Mauer durch mobile Teile erhöhen	Deich erhöhen, Mauer durch mobile Teile erhöhen	Deich erhöhen. Abbruch/Neubau Mauer
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 18%	+ 56%	+ 133%
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 9%	+ 18%	+ 24%
LM-3	Maßnahmen	Verwallung erhöhen	Neubau Deich	Abbruch/Neubau Brücke, Neubau Deich
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 9%	+ 33%	+ 218%
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 7%	+ 28%	+ 185%
LM-4	Maßnahmen	Erhöhung Verwallung und Ufermauer	Erhöhung Verwallung und Ufermauer	Erhöhung Verwallung, Neubau Ufermauer
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 9%	+ 39%	+ 47%
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 6%	+ 22%	+ 25%
LM-5	Maßnahmen	Erhöhung Deich und Mauer	Erhöhung Deich, Abbruch/Neubau Mauer	Erhöhung Deich, Abbruch/Neubau Mauer u. Brücke
	Mehrkosten			
	bei nachträglicher Anpassung	+ 6%	+ 34%	+ 81%
	bei Berücksichtigung in der Planung	+ 4%	+ 9%	+ 49%



5. Zusammenfassung

Im Rag von Hochwasserschutzmaßnahmen exemplarisch für ausgewählte Beispiele in Baden-Württemberg untersucht.

Die Untersuchung zeigte auf, dass insbesondere die Zunahme der Bemessungsniederschläge bei den längeren Niederschlagsdauern zu Problemen bei Hochwasserrückhaltebecken führt. Während die Erhöhung der Scheitelabflüsse bei den untersuchten Hochwasserrückhaltebecken meist noch relativ unproblematisch ist und Anpassungen, dort wo sie notwendig werden, auch bei bestehenden Anlagen noch relativ kostengünstig durchgeführt werden können, ist eine Beibehaltung der Schutzwirkung nach unterhalb vor allem bei den größeren Becken kaum noch möglich. Eine Zunahme der Bemessungsniederschläge um 10 % würde in einem Fall bereits zu einer Verdopplung des Rückhaltevolumens, im anderen Fall sogar fast zu einer Vervierfachung führen. Bei Neuplanungen könnten solche Änderungen teilweise noch berücksichtigt werden und würden auch zu einer verhältnismäßig geringen prozentualen Kostenerhöhung führen. Eine Anpassung bestehender Anlagen ist jedoch in diesen Fällen aus ökonomischen Gründen nicht mehr sinnvoll. Als Konsequenz müsste eine geringere Schutzwirkung nach unterhalb in Kauf genommen werden oder das bisherige Schutzziel durch ergänzende lokale Hochwasserschutzmaßnahmen in den betroffenen Ortslagen bzw. alternativ durch zusätzliche Hochwasserrückhaltebecken hergestellt werden.

Die Untersuchung der ausgewählten lokalen Hochwasserschutzmaßnahmen ergab, dass Abflusserhöhungen von bis zu ca. 20 % in den meisten Fällen noch innerhalb des vorhandenen Freibords abgeführt werden können. Eine Wiederherstellung des Freibords erfordert eine Erhöhung der Anlagen. Hierzu sind Anpassungsmaßnahmen durchzuführen. Nachträgliche Anpassungen erwiesen sich ab einer Zunahme des Bemessungsabflusses um 15 % bis 20 % als sehr teuer, da sie oftmals den Abbruch der vorhandenen Anlagen und einen Neuaufbau erfordern.

Die durchgeführten Kostenschätzungen zeigen, dass in den meisten Fällen eine Berücksichtigung dieses zusätzlichen Lastfalles einer Klimaveränderung zu relativ moderaten Kostensteigerungen geführt hätte, wenn er bereits bei der Planung berücksichtigt und beim Bau entsprechende Vorkehrungen für eine spätere Anpassung getroffen worden wären. Es ist deshalb zu empfehlen, Planungen zukünftig unter dem Aspekt der Klimaveränderung zu prüfen und ggf. diesen Lastfall bereits in die Dimensionierung der Anlagen einzubeziehen.

6. Maßgebliche Normen und verwendete Literatur

DIN 1045	2001-7	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teile 1 bis 4
DIN 1054	2003-01	Baugrund
DIN 1055-2	2003-2	Bodenkenngößen
DIN 4017	2001-06	Baugrund – Berechnung des Grundbruchwiderstands von Flachgründungen
DIN 19700	1986-01	Stauanlagen - Hochwasserrückhaltebecken Teil 12
DIN 19700	2004-07	Stauanlagen Teil 10, Teil 11 und Teil 12
DIN 19702	1992-10	Sicherheit von Massivbauwerken im Wasserbau
DIN 19712	1997	Flussdeiche
BWK	Februar 2004	Merkblatt 6/BWK, Mobile Hochwasserschutzsysteme, Gelbdruck

Hochwasserverschärfung und Vulnerabilität

Reinhard F. Schmidtke
Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

1. Einleitung

Wasserwirtschaftliches Handeln umfasst kurz-, mittel- und langfristige Vorsorgestrategien. Darin einzubetten sind die Anpassungen, die sich aus Klimaveränderungen ergeben. KLIWA ist das Arbeitsprogramm, mit dem für die Länder Baden-Württemberg und Bayern diese Herausforderung angegangen wird.

Die bisher in KLIWA durchgeführten Modellrechnungen zeigen für den gewählten Prognosezeitraum 2021 bis 2050 Verschärfungen der Hochwasserabflüsse an. Je nach Bereich der Verteilungsfunktion, der betrachteten Region und der Größe des Einzugsgebietes sind Unterschiede feststellbar oder zu erwarten, doch signalisieren die vorliegenden Erkenntnisse insgesamt, dass im integrierten Hochwassermanagement der Faktor „Klimaveränderung“ bereits heute Berücksichtigung finden muss.

Die in den Szenariobetrachtungen, den heute zur Verfügung stehenden Modellen und den eingeschränkten Datenbeständen liegenden Ursachen für die vorhandenen Unsicherheiten in den hydrologischen Aussagen, sollten keine Hinderungsgründe mehr darstellen, sich in den konkreten Planungen und Entscheidungen über Hochwasserschutzmaßnahmen mit der Problematik von Abflussverschärfungen auseinander zu setzen. Dies gebietet beim heutigen Erkenntnisstand allein schon die konsequente Beachtung des Vorsorgeprinzips. In Verfolgung der Wirkungsketten resultiert daraus die Frage nach den zusätzlichen Belastungen in der Hochwasserbetroffenheit und den sich daraus ergebenden Konsequenzen. Es liegt in der Natur der Sache, dass Hochwasserverschärfungen die Vulnerabilität erhöhen. Bevor der Frage nachgegangen werden soll, in welchem Ausmaß dies geschehen kann und welche Methoden und Daten zur Verfügung stehen, um diese Informationen zu ermitteln, ist die Motivation darzulegen, warum im Gegensatz zu konventionellen Planungsansätzen das integrierte Hochwassermanagement auf quantitative Aussagen über die Vulnerabilität nicht verzichten kann.

2. Bedeutung von Vulnerabilitätsanalysen

2.1 Begriff „Vulnerabilität“

Der Begriff der Vulnerabilität ist für die wasserwirtschaftliche Planungspraxis relativ neu, mithin gewöhnungsbedürftig. In den Sicherheitswissenschaften und damit auch in der Klimafolgenforschung findet man ihn als einen gängigen Ausdruck, allerdings mit recht verschiedenen Definitionen, so dass die mit Vulnerabilitätsanalysen verbundenen Untersuchungen ein unterschiedlich weit abgestecktes Aufgabenfeld mit entsprechend divergierenden Inhalten umfassen können. Hier soll er aus pragmatisch wasserwirtschaftlicher Sicht im Sinne von Verletzbarkeit (Verwundbarkeit), also in bezug auf Hochwasser von Schadensanfälligkeit, verwendet werden. Es geht mithin um die Information, welches Schadensausmaß mit einem Hochwasserereignis bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden ist bzw. wie es sich als Funktion über das gesamte Spektrum der Schaden erzeugenden Hochwasser darstellt. Die Ermittlung dieser Werte ist Aufgabe der Vulnerabilitätsanalyse, wie sie hier gesehen wird.



In der bekannten planungsmethodologischen Sprachregelung entspricht sie inhaltlich den sozio-ökonomisch-ökologischen Wirkungsanalysen sowie deren analytischer Bewertung (LAWA 1981). Da es sich beim Hochwasser ausschließlich um negative Effekte handelt, ist die Verwendung des Begriffs Vulnerabilität eine sprachliche Präzisierung. Ihm kommt im integrierten Hochwassermanagement mit seinen komplexen Kommunikations- und pluralistischen Willensbildungsprozessen eine klare Signalwirkung gegenüber den Beteiligten und Betroffenen zu, so dass seine Verwendung auch aus psychologischen Gründen zu sehen ist.

2.2 Vulnerabilitätsanalysen im Planungs- und Entscheidungsprozess des integrierten Hochwassermanagements

Im rational angelegten Handeln des integrierten Hochwassermanagements kommt den Vulnerabilitätsanalysen eine wesentliche Steuerungsfunktion zu. Zur Verdeutlichung dieser Aussage sei von der prinzipiellen Makrostruktur des wasserwirtschaftlichen Planungs- und Entscheidungsprozesses ausgegangen. Abbildung 1 zeigt die vier funktionalen Aufgaben auf, die stets zu bearbeiten sind.

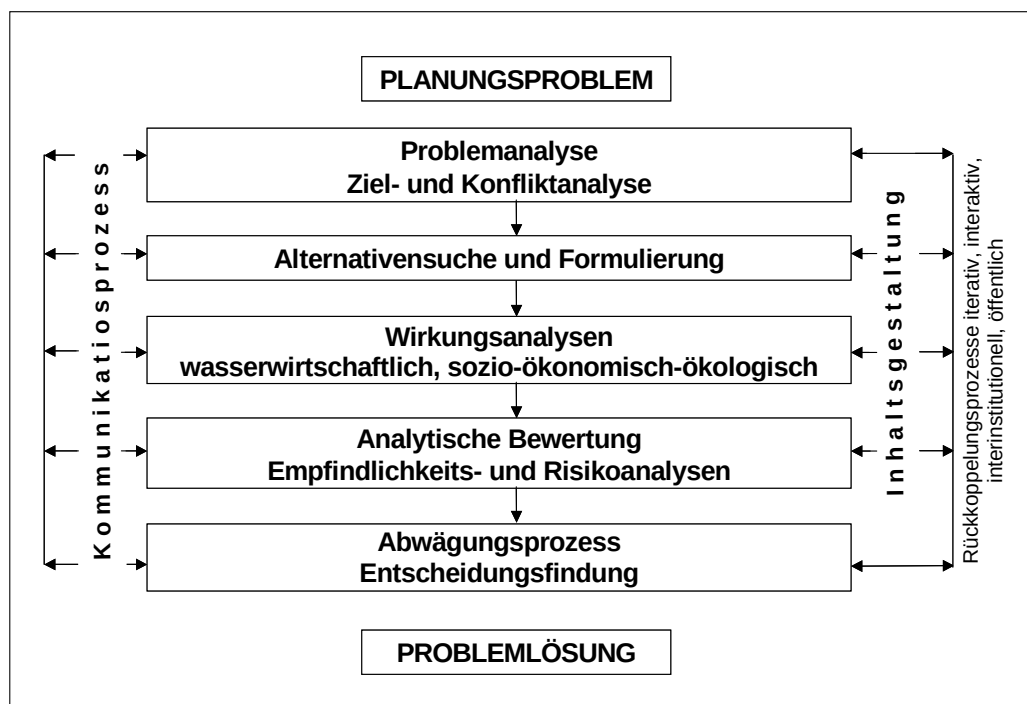


Abb. 1: Funktionale Aufgaben im rationalen Planungs- und Entscheidungsprozess

Bringt man nun die Vulnerabilitätsanalyse in dieses Schema ein, so ist festzustellen, dass sie - wie bereits bei der Sprachregelung erwähnt - den auf der hydrologisch-hydraulischen Hochwasserbetroffenheit des Raumes aufsetzenden sozio-ökonomisch-ökologischen Wirkungsanalysen sowie deren analytischer Bewertung entspricht. In den Wirkungsanalysen wird die physische Betroffenheit ermittelt, wie sie sich aus den hydraulischen Gegebenheiten ableiten lassen. Es handelt sich mithin zunächst um die unmittelbaren materiellen und immateriellen Schadenseffekte im sozio-ökonomischen, ökologischen und sozio-kulturellen Bereich. Daraus können sich Folgewirkungen ableiten, d.h., wesentlich weiter reichende Konsequenzen ergeben. Ein Dammbbruch beschädigt das Bauwerk, löst aber eine Dammbrechwelle mit all ihren Folgen aus, eine Fabrik erleidet einen Vermögensschaden, woraus eine Unterbrechung der Produktion resultiert, ein Wohnhaus mit seinem unbeweglichen und beweglichen Inventar erleidet einen Überschwemmungsschaden und ist für einen gewissen Zeitraum nicht nutzbar.

Diese Beispiele deuten an, dass die Zusammenhänge teilweise recht vielschichtig sein können. Der Analyse der komplexen Wirkungsketten und –netze kommt daher eine hohe Bedeutung zu. Die physischen Schadenseffekte bedürfen einer anschließenden In-Wert-Setzung. Über die Funktionen solcher analytischer Bewertungen existiert umfangreiche Literatur, wobei hier nochmals auf die LAWA-Schrift „Grundzüge der Nutzen-Kosten-Untersuchungen“ (LAWA 1981) hingewiesen werden soll.

2.3 Informationsbereitstellung durch Vulnerabilitätsanalysen

Die Vulnerabilitätsanalysen stellen in der Ausarbeitung von Hochwasseraktionsplänen und Einzelmaßnahmen sowie in der Entscheidungsfindung trotz des in den letzten Jahren deutlichen Fortschritts noch immer ein sehr schwaches, wenn nicht sogar das schwächste Glied in der Kette der durchzuführenden Arbeitsschritte dar. Der Stellenwert der mit diesem Instrument zu beschaffenden Informationen war in der traditionellen Entwicklung infrastruktureller Schutzkonzepte aus zwei wesentlichen Gründen relativ gering. Zum einen arbeitete man ausschließlich mit der Vorgabe eines Bemessungshochwassers, zum anderen thematisierte man die verbleibende Gefährdung jenseits des bautechnisch realisierten Schutzgrades nicht. Schadenspotenzialbetrachtungen konnten daher mehr oder wenig verbal-argumentativ behandelt werden, zumal die Hochwasserschutzprogramme und die darauf basierenden Bauaktivitäten weitgehend durch spezielle Katastrophenerfahrungen im Sinne eines Krisenmanagements gesteuert wurden.

Die in jüngerer Vergangenheit gesammelten Erfahrungen mit extremeren Ereignissen haben zur Entwicklung einer allgemein anerkannten Hochwasservorsorgestrategie auf hohem rationalem Niveau geführt, welche die Prinzipien der Nachhaltigkeit und Vorsorge verinnerlicht. Das Grundkonzept beinhaltet als fundamentale Teilstrategien das Hochwasser-Flächenmanagement, den technisch-infrastrukturellen Hochwasserschutz und die weitergehende Hochwasservorsorge (3-Säulen-Strategie). Darüber gibt es zahlreiche Publikationen. Deshalb sei hier nur beispielsweise auf die Leitlinien Baden-Württembergs (UVM BW 2003) und das Aktionsprogramm 2020 für Donau- und Maingebiet zum nachhaltigen Hochwasserschutz in Bayern hingewiesen (StMLU 2001).

In diesem Konzept stellt der Klimawandel eine externe dynamische Störgröße dar. Daher ist es zunächst von elementarem Interesse, was auf die wasserwirtschaftlichen Systeme zukommt und in welchem Ausmaß mit einer Zunahme der Vulnerabilität zu rechnen ist. Diese Fragestellung steht vor allen weiteren Überlegungen, wie man der wachsenden Gefährdung begegnen will. Betrachtet man in diesem Zusammenhang nochmals Abbildung 1, so ist zu erkennen, dass auf Klimaänderung bezogene Vulnerabilitätsanalysen zunächst einen zentralen Bestandteil der Problemerkennung ausmachen, auf dem das handlungsorientierte Planungsgeschehen beruht. Hier geht es dann um die Auswahl der Maßnahmen, die eine optimale Anpassung an die Veränderungen darstellen.

Vulnerabilitätsanalysen sind also im Kontext mit den Fragen des Klimawandels in zweifacher Sicht einzusetzen. Einmal werden sie zur Problemerkennung benötigt. Der Vergleich der Schadensausmaße im Fall mit Klimaänderungen und demjenigen ohne solche Änderungen liefert eine Aussage über die Zunahme der Vulnerabilität. Zum anderen werden sie benötigt, um die Effizienz alternativer Anpassungsmaßnahmen beurteilen zu können, indem man hier ebenfalls das Mit-und-Ohne-Prinzip anwendet. In diesem zweiten Einsatzbereich stellen sie die Information über den Nutzen von Handlungsoptionen bereit und sind damit neben den Kostenbetrachtungen unverzichtbarer Bestandteil der notwendigen Entscheidungsgrundlagen zum Lösen des Auswahlproblems.

Eine Optimierung des Hochwasserschutzes auf der Basis der 3-Säulen-Strategie ist nur über wirksame Lernprozesse aller Beteiligten und Betroffenen möglich. Risikokommunikation und Bewusstseinsbildung sind Voraussetzung zur Verhaltensanpassung. Der Informationsbedarf



beschränkt sich dabei nicht auf die physische Hochwasserbetroffenheit, vielmehr umfasst er alle Komponenten gesellschaftspolitischer Wertediskussion und –bildung, wie sie mit der sozio-ökonomischen, ökologischen und sozio-kulturellen Dimension im Nachhaltigkeitsprinzip verankert sind. Letztendlich wird über die In-Wert-Setzung die Steuerungsfunktion wahrgenommen. Der Einsatz adäquater Bewertungsinstrumente schafft damit die benötigte Informations- und Entscheidungsplattform für zielführende Anpassungsreaktionen. Im Konfliktmanagement kommt ihnen zudem eine Mediationsfunktion zu (Schmidtke 2004).

Schließlich ist darauf hinzuweisen, dass auch bei Hochwasserschutzplanungen der Vollzug der haushaltsrechtlichen Bestimmungen in transparenter und nachvollziehbarer Form zu gewährleisten ist. Die hinlänglich bekannte gesetzliche Forderung lautet: „Für alle finanzwirksamen Maßnahmen sind angemessene Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen durchzuführen.“ Wenn aber solche Untersuchungen ohnehin Bestandteil rationaler Planungen und Informationsbereitstellungen sind, ergibt sich aus der notwendigen Befriedigung der haushaltsrechtlichen Kontrollfunktion kein zusätzlicher Aufwand.

3. Vulnerabilitätsaspekte bei der bautechnischen Infrastruktur

Im Vordergrund der derzeitigen Überlegungen zur Schadensanfälligkeit stehen die mit der bautechnischen Hochwasserinfrastruktur verknüpften Fragen. Zum einen geht es dabei um die Anlagensicherheit bei höherer hydrologisch-hydraulischer Beaufschlagung, zum anderen um den durch diese Anlagen zu gewährleistenden angemessenen Schutzgrad.

3.1 Anlagensicherheit

Für Talsperren jedweder Nutzung und für Hochwasserrückhaltebecken steht außer Debatte, die heutigen Sicherheitsstandards nach DIN 19700 zu verlassen, was sich als Folge einer Do-nothing-Strategie ergäbe. Diese Standards bestimmen das strategische Konzept im Umgang mit klimabedingten Hochwasserverschärfungen. Hier ist es mithin geboten, durch bauliche und/oder betriebliche Anpassungsmaßnahmen Abflussverschärfungen im erforderlichen Umfang zu kompensieren bzw. bei Neubauplanungen entsprechende Vorsorge zu treffen. Inwieweit dies bei bestehenden Anlagen aus technischen und ökonomischen Gründen zu Lasten des Schutzgrades geht, ist im Einzelfall zu prüfen. Maßgebend sind nicht die Hochwasserscheitelwerte, da sich die für die Anlagensicherheit zugrunde zu legenden sehr seltenen Abflussgrößen nach dem heutigen Erkenntnisstand infolge des Klimawandels kaum verschärfen werden. Die Probleme erwachsen vielmehr aus den zunehmenden Hochwasserfüllen.

Bei den Flussdeichen und artverwandten Anlagen (Hochwasserschutzmauern, mobile Schutzeinrichtungen) ist in den letzten Jahren Bewegung in die Sicherheitsphilosophie gekommen. Es findet ein dynamischer Anpassungsprozess statt. Dazu haben nicht unwesentlich die Erfahrungen aus den großen Hochwassern der jüngeren Vergangenheit aber auch die fachlichen Auseinandersetzungen mit den klimabedingten Abflussverschärfungen beigetragen.

Will man aus nachfolgend erläuterten grundsätzlichen Erwägungen heraus technisches Versagen als Folge hydrologisch-hydraulischer Überlastung vermeiden, so muss man entweder die Standsicherheit bei Überströmen gewährleisten, oder durch entsprechende Entlastungseinrichtungen einen solchen Lastfall ausschließen. Nicht nur die anerkannten Regeln der Technik nach DIN 19712 sondern auch die Umsetzung des Nachhaltigkeitsprinzips sind als Triebfedern sich verändernder Verhaltensweisen anzusehen. Wie der Vergleich von Schadenspotenzialuntersuchungen mit gezielter Flutung von gepolderten Siedlungsgebieten und demgegenüber mit Dammbuchszszenarien zeigt, lassen sich die Schäden im ersteren Fall wesentlich reduzieren.

3.2 Schutzgrad

Was den durch bautechnische Hochwasserinfrastruktur in effizienter Weise gewährbaren Schutzgrad betrifft bringen die zunehmend geforderten Schadenspotenzialbetrachtungen und darauf aufbauenden Nutzen-Kosten-Untersuchungen die situationsspezifische Abwägung und Optimierung in die grundlegenden Erörterungen zur „best practice“ ein. Das integrierte Hochwassermanagement sieht ja – wie bereits erwähnt – die drei Teilstrategien des Hochwasser-Flächenmanagements, des technisch-infrastrukturellen Hochwasserschutzes und der weitergehenden Hochwasservorsorge vor. Wo ist im konkreten Einzelfall die Grenze zwischen den beiden letzteren zu ziehen? Allgemein gültige normative Vorgaben für ein Bemessungshochwasser bestimmter Jährlichkeit sind angesichts der klimabedingten Dynamik einer solchen Größe wenig hilfreich, abgesehen davon, dass ein derartiges Vorgehen zu einem Beweisnotstand in bezug auf die ökonomische Effizienz führen kann. Welche verbleibende Gefährdung muss also durch die verschiedenen optionalen Maßnahmen der weitergehenden Hochwasservorsorge angegangen werden? In diesem Zusammenhang wird häufig vom sogenannten Restrisiko gesprochen, einer Rechengröße, die für die Bewusstseinsbildung der Betroffenen und Beteiligten wenig hilfreich ist. Es handelt sich doch um die sehr seltenen, aber katastrophalen Ereignisse. Dass sie sehr selten sind, mag beruhigen, dass aber in Kürze solch eine Katastrophe hereinbrechen kann, ist die beunruhigende Kehrseite der Medaille.

4. Durchführung von Vulnerabilitätsanalysen

Geht man davon aus, dass Hochwasserverschärfungen keine neuartigen Schadensarten verursachen, dann stellt sich allein die Frage nach dem zunehmenden Ausmaß der direkten und indirekten negativen Effekte aufgrund der steigenden physischen Betroffenheit. Anders würde es sich darstellen, wenn die Hochwasserverschärfungen Verursacher grundlegender Verhaltensänderungen wären. Hierüber liegen bisher keine Erkenntnisse vor. Es dürfte auch schwierig sein, solche Wirkungen nachzuweisen, da sich die klimabedingten Veränderungen den normalen stochastischen Prozessen des Hochwassergeschehens überlagern und daher die Kausalität im Einzelfall kaum zu detektieren ist.

Wie strukturieren sich nun die Untersuchungen über die Status-quo-Entwicklung unter dem Einfluss von Klimaveränderungen? Zu vergleichen sind der Ohne-Fall und der Mit-Fall, d. h., die auf Szenarien basierenden Veränderungen durch den Klimawandel stellen sich als der Unterschied zwischen diesen beiden Fällen dar. Die durchzuführenden Arbeitsschritte sind schematisch in Abbildung 2 dargestellt.

Der Vulnerabilitätsanalyse geht die Ermittlung der hydrologisch-hydraulischen Hochwasserbelastung voraus. In einem ersten Schritt sind die hydrologischen Daten zu ermitteln. Für den Ohne-Fall entspricht dies der gängigen Routine. Im Mit-Fall steht am Anfang die Entwicklung bzw. die Auswertung regionaler Klimamodellierungen. Benutzt man aus Gründen einer breiteren Informationsgewinnung mehrere Verfahren zum Downscaling aus einem gewählten globalen Klimamodell, dem ein bestimmtes Szenario der klimaverändernden Eingangsgrößen zugrunde liegt, so erhält man entsprechend viele Inputsätze für die anschließende Simulation des Gebietswasserhaushalts. Für die Arbeiten in KLIWA stehen die Ergebnisse eines dynamischen und zweier statistischer Verfahren zur Verfügung.

Bei entsprechenden Voraussetzungen liefert die Modellierung des Wasserhaushalts u.a. brauchbare lange Zeitreihen für die Hochwasserabflüsse, die wiederum mit den bekannten Methoden statistisch auszuwerten sind. In anderen Fällen kommt man durch den Einsatz von Niederschlag-Abfluss-Modellen bzw. von detaillierten Flussgebietsmodellen zu den gewünschten Aussagen. Ein Vergleich des Ohne- mit dem Mit-Fall (oder den Mit-Fällen) zeigt die Veränderungen im hydrologischen Hochwassergeschehen auf, die sich auf der Grundlage des gewählten Klimaszenarios und der verwendeten Modelle ergeben.



Im zweiten Schritt ist das Überflutungsgeschehen des Untersuchungsraumes zu analysieren. Mittels hydraulischer Berechnungen erhält man die physische Betroffenheit in teilräumlicher Auflösung. Die wichtigsten Belastungsparameter sind die Überflutungstiefe, die Fließgeschwindigkeit und die Dauer der Belastung. Diese Informationen sind wesentliche Inputs in die sich anschließende Vulnerabilitätsanalyse.

Auf dem heutigen methodischen und empirischen Erkenntnisstand haben sich sowohl ein meso- als auch ein mikroskaliges verfahrenstechnisches Vorgehen zur Ermittlung von Hochwasserschadenspotenzialen entwickelt. Unter den genannten Prämissen können diese Verfahren in den für sie jeweils geeigneten Einsatzbereichen auch für die Analyse der zunehmenden Vulnerabilität in Folge klimabedingter Hochwasserverschärfungen herangezogen werden (Schmidtke 2001).

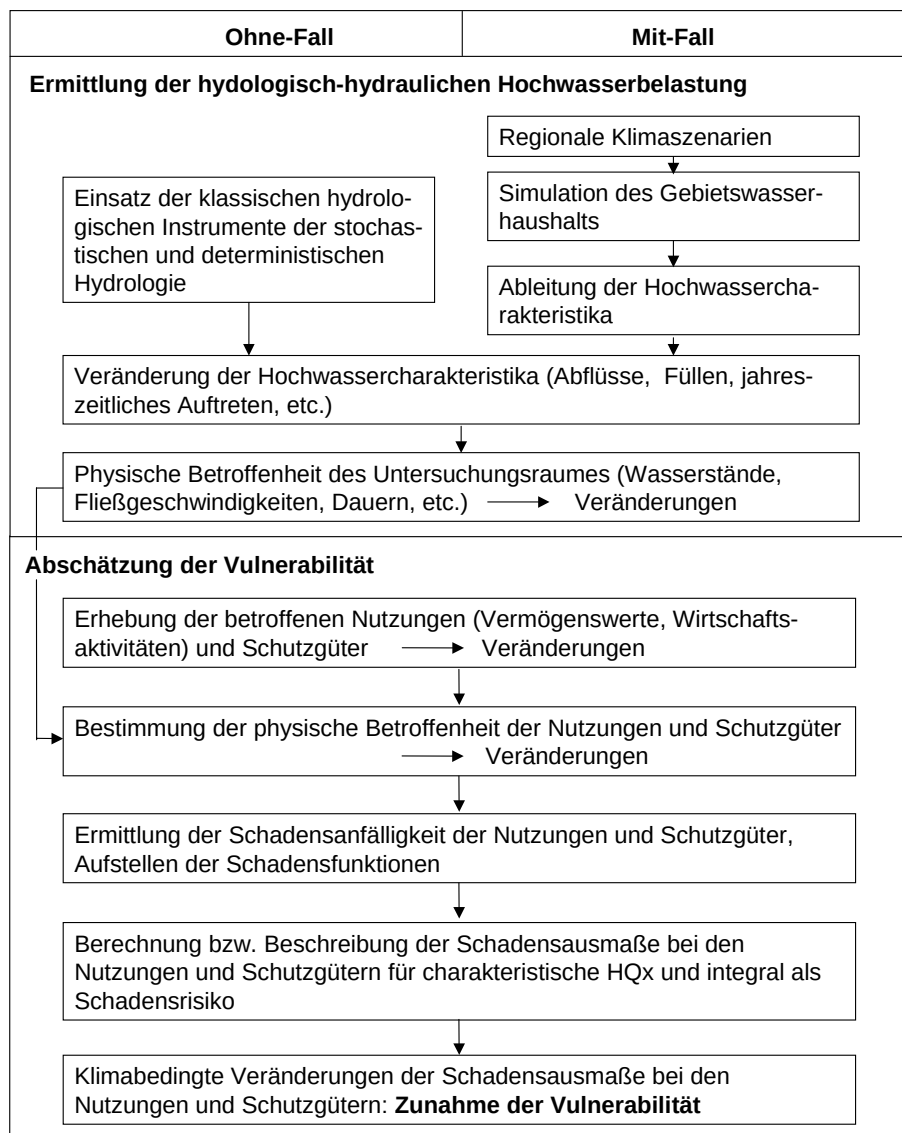


Abb. 2: Arbeitsschritte zur Ermittlung der Vulnerabilitätszunahme durch klimabedingte Abflussverschärfungen

Die Vulnerabilitätsanalyse beginnt mit der Erhebung der betroffenen Nutzungen und Schutzgüter im überschwemmungsgefährdeten Untersuchungsraum. Durch Verschneidung mit dem Layer der physischen Raumbelastung erhält man deren physische Betroffenheit. Der nächs-

te Arbeitsschritt ist der anspruchsvolle: die Ermittlung der Schadensanfälligkeit der Nutzungen und der Schutzgüter in Abhängigkeit von der Ausprägung der Belastungsparameter, d.h. die Aufstellung der den jeweiligen Gegebenheiten entsprechenden Schadensfunktionen. Damit lassen sich nun physische Betroffenheit und Schadensanfälligkeit miteinander verschneiden. Diese Berechnungen ergeben die Schadensausmaße, wie sie mit einem Hochwasserereignisse bestimmter Eintrittswahrscheinlichkeit verbunden sind, bzw. wie sie sich als Funktion über das gesamte Spektrum der Schaden erzeugenden Hochwasser darstellen. Die multiplikative Verknüpfung von Schadensausmaß und Eintrittswahrscheinlichkeit liefert schließlich eine Aussage über das Risiko. Die Kenntnis des Risikos und der Auswirkungen von Katastrophenereignissen sind die maßgeblichen Informationen für konkretes Handeln im integrierten Hochwassermanagement. Die Vulnerabilitätsanalysen im Rahmen der Beurteilung von Handlungsoptionen laufen analog ab.

Dieses in sich schlüssige verfahrenstechnische Vorgehen darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich in der praktischen Durchführung eine Reihe von methodischen und empirischen Schwierigkeiten auftun, zu denen sich auf der operativen Seite Qualifikationsdefizite und auf den verschiedenen strategischen Lenkungsebenen eine mitunter zu geringe Schubkraft hinzugesellen. Im Interesse der Sache müssen daher immer wieder mit allem Nachdruck die Herausforderungen dargelegt werden, denen sich die Fachwelt und die deren Handeln beeinflussenden oder bestimmenden Akteure im gebotenen Umfang stellen sollten. Wo dies geschieht, sind auf dem heutigen Erkenntnisstand beachtliche Ergebnisse im Sinne von „best practice“ zu erzielen. Erwähnt seien in diesem Zusammenhang die Hochwasserschutzplanungen an der baden-württembergischen Donau im Rahmen des Integrierten Donau-Programms (Kugele 2002).

Im Rahmen eines EU-Projektes, an dem sich die bayerische Wasserwirtschaftsverwaltung beteiligt, sollen in zwei Teileinzugsgebieten des Mains Fallstudien durchgeführt werden, die sich der Thematik der Hochwasserschutzplanung unter Berücksichtigung des Klimawandels annehmen. Eine Studie behandelt die Verbesserung des Hochwasserschutzes für die Stadt Bayreuth, die andere bezieht sich auf das Einzugsgebiet der Fränkischen Saale. In beiden Untersuchungen sollen die neuen Fragestellungen in die bereits laufenden Planungen eingebracht werden. Sie sind damit Pilotprojekte für die Entwicklung der best practice“ auf dem heute gebotenen Niveau. Grundsätzliches Ziel des EU-Projektes ist, die im wasserwirtschaftlichen Handeln zu betrachtenden Nutz- und Schutzfunktionen auf ihre Anfälligkeit gegenüber Veränderungen des Wasserhaushalts zu analysieren und das Bewusstsein für eine rationale Anpassung weiter zu stärken.

5. Herausforderungen

In der praktischen Umsetzung des integrierten Hochwassermanagement ist zu beobachten, dass die vorhandene Erkenntnisse, die zur Verfügung stehenden Methoden und die verfügbaren empirischen Grundlagen nicht in voller Konsequenz zum Einsatz gelangen. Es ist mehr Wissen vorhanden, als in vielen Fällen angewendet wird. Die Wahrnehmung dieser Aufgaben – insbesondere auch unter dem Aspekt der Einbeziehung des „Lastfalls Klima“ – stellt an die Qualifikation der auf diesem Gebiet tätigen Fachleute erheblich gestiegene Anforderungen. Es ist daher eine prioritäre Aufgabe, der Qualitätssicherung besondere Aufmerksamkeit zu widmen. Das heute vorhandene Wissen muss in seiner Breite und Tiefe zur Anwendung gelangen. Dies gilt vor allem auch für Vorhaben an mittleren und kleineren Gewässern, wo die Planungsaufträge häufig einen geringeren Umfang besitzen, die Problemstellungen, ihre instrumentelle Bearbeitung und die Datenlage aber fachlich nicht unerhebliche Schwierigkeiten bereiten können. Die Analyse der derzeitigen Situation macht deutlich, dass Aktivitäten zur Förderung von „best practice“ dringend angezeigt sind.

Weiterhin ist dafür zu werben, die bewährte praktische Vorgehensweise, die methodischen Instrumente und die standardisierbaren empirischen Erkenntnisse als Arbeitsmaterialien etwa



in Form eines Leitfadens im Sinne von „best practice“ zusammenzufassen. Wünschenswert wäre es auch, darin repräsentative Fallbeispiele insbesondere für die Hochwasserschutzproblematik in kleineren Einzugsgebieten vorzustellen, die sich aus Pilotuntersuchungen mit teilweise innovativen Ansätzen und abgesicherter empirischer Datenbasis rekrutieren sollten. Generell ist festzustellen, dass ein viel zu geringer Aufwand zur Erhebung von Schadensdaten getrieben wird. Der alleinige Rückgriff auf das Vorhandene und mangelnde Erfahrung über Schadensanfälligkeit und –ausmaß sind Quellen für wenig belastbare Ergebnisse.

Eine weitere Herausforderung der Praxis stellt die Kommunikation des Restrisikos dar. Die Analysen von Katastrophenszenarien und die Erfahrungen mit seltenen Hochwasserereignissen selbst zeigen, dass diese durch technische Infrastruktur nicht abgedeckten Gefahren zu außerordentlich hohen Schadensausmaßen führen können. In jedem Einzelfall ist daher der Vergleich zwischen verhinderter und verbleibender Schadenserwartung von Interesse, da er dokumentiert, welche Bedeutung der weitergehenden Hochwasservorsorge zukommt.

Vor allem in Gebieten, in denen sich das „Restrisiko“ als das Hauptrisiko erweist (Abbildung 3 zeigt ein Extrembeispiel), d.h., die verbleibende Schadenserwartung die durch technische Infrastruktur vermiedene übersteigt, sind im Rahmen von Hochwasseraktionsplänen entsprechende Schwerpunkte zu setzen. Dabei gilt es, auf eine Reduzierung der vorhandenen Schadenspotenziale hinzuwirken und vor allem auch, deren weiteres Anwachsen zu verhindern. Gerade in Siedlungsgebieten mit hohem Schutzgrad ist die „Halbwertszeit des Vergessens“ auf wenige Jahre begrenzt (Abbildung 4), so dass sich dort ohne Maßnahmen der weitergehenden Vorsorge die Schadenspotenziale stetig erhöhen. Auf diese Weise kann in wenigen Jahrzehnten durchaus eine Verdoppelung eintreten. Nur wenn die weitergehende Hochwasservorsorge Erfolg hat, lassen sich die Auswirkungen künftiger Katastrophenhochwasser jenseits des durch die bautechnische Infrastruktur gewährten Schutzgrades eindämmen.

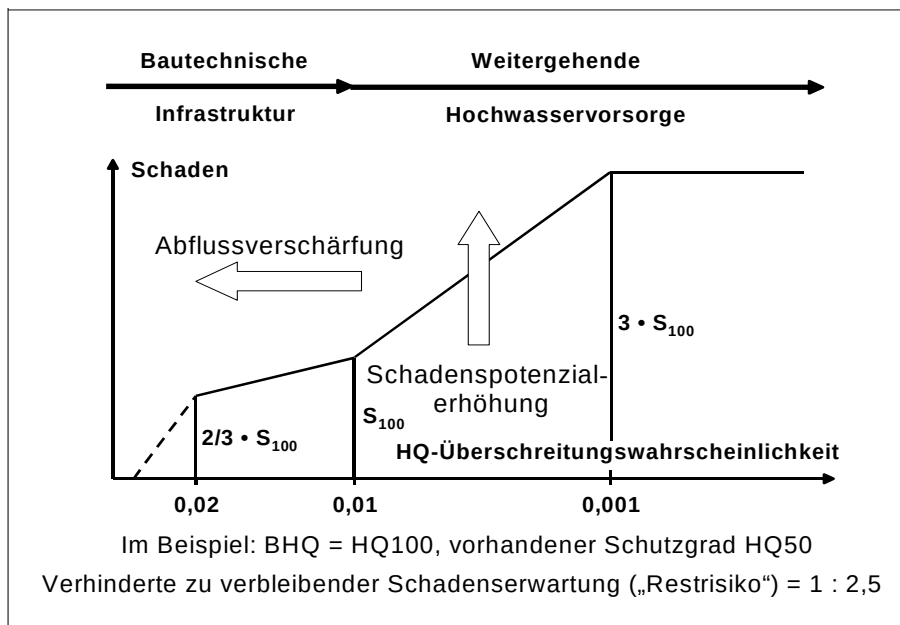


Abb.3: Relation der Risikobeeinflussung durch bautechnische Infrastruktur und weitergehende Hochwasservorsorge, dargestellt an einem Extrembeispiel

Klimabedingte Abflussverschärfungen führen bei der in Abbildung 3 dargestellten Schadensfunktion zu Linksverschiebungen. Sie sind nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen in KLIWA bei den häufigen Hochwasserereignissen am größten und verkleinern sich mit zunehmender Seltenheit der Ereignisse. Für Extreme mit Überschreitungswahrscheinlichkeiten kleiner als 1 ‰ werden derzeit für Süddeutschland keine Verschärfungen angenommen. Bei

vorhandenem infrastrukturellen Basisschutz ist zu erwarten, dass ein ungebremselter weiterer Wertezuwachs in den überschwemmungsgefährdeten Gebieten eine stärkere Zunahme der Vulnerabilität hervorruft als die prognostizierten Abflussverschärfungen.

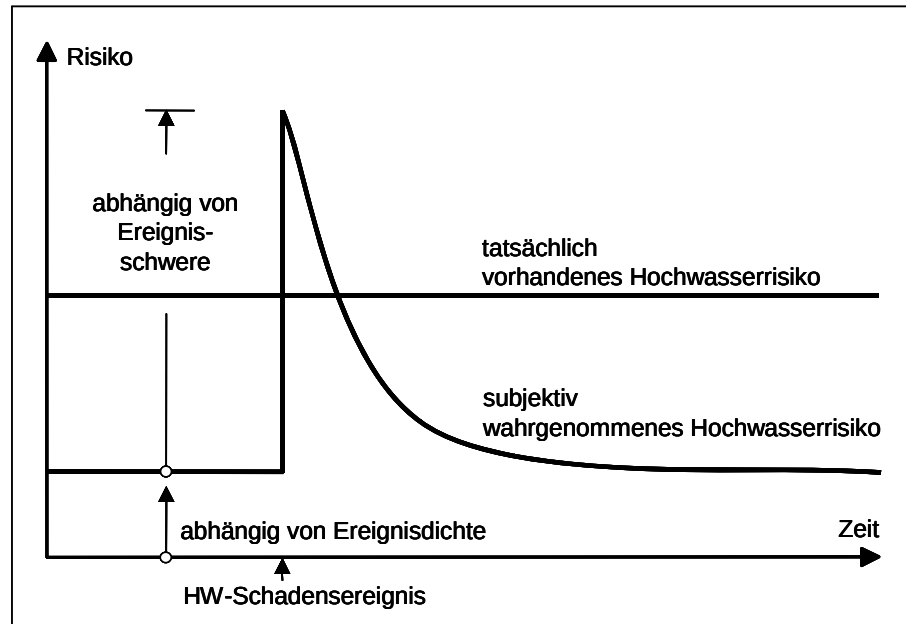


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf von subjektiv wahrgenommenem und tatsächlichem Hochwasserrisiko

Einen besonders hohen Stellenwert besitzt die Entwicklung eines multikriteriellen Entscheidungsmodells zur Bestimmung projektspezifischer Bemessungshochwasser für die schutztechnische Infrastruktur. Auf Grund der zunehmenden Zahl von Schadenspotenzialbetrachtungen bestehen immer mehr Zweifel an der Sinnhaftigkeit einer normativen Vorgabe von Bemessungswerten, zumal wenn sie zu einem Normenkonflikt mit dem Haushaltsrecht führen können. Es scheint die Erkenntnis an Boden zu gewinnen, dass solche Bemessungsgrößen das Ergebnis eines fallspezifischen Abwägungsprozesses sein sollten, was sich auch in der Zunahme konkreter Umsetzungen dieses Gedankens dokumentiert. Dies trifft ganz besonders im Umgang mit den klimabedingten Abflussverschärfungen zu. Die Berücksichtigung eines „Lastfalls Klima“ bedeutet ja nicht automatisch das traditionell gesetzte Bemessungshochwasser um einen „Klimafaktor“ zu erhöhen. Vielmehr wird in jedem Einzelfall zu beurteilen sein, wie die optimale Lösung eines integrierten Hochwassermanagements aussieht.

6. Zusammenfassung

In den Planungs- und Entscheidungsprozessen des integrierten Hochwassermanagements spielt die Kenntnis der Schadensanfälligkeit eine zentrale Rolle. Der Beitrag zeigt die Stellung und Bedeutung der Vulnerabilitätsanalysen auf und strukturiert die in diesen Untersuchungen durchzuführenden Arbeitsschritte. Er macht deutlich, dass der Wissensfortschritt auf dem Gebiet der klimabedingten Abflussverschärfungen ein wertvoller Impulsgeber für das praktische Handeln nach dem Grundsatz der „best practice“ ist. Neben der Qualitätssicherung auf dem heutigen methodischen und empirischen Erkenntnisniveau sowie dem derzeit verfügbaren Instrumentarium sind beachtliche weitere Anstrengungen erforderlich, um die hochwasserbedingten gesellschaftlichen Herausforderungen unter Einschluss der durch den Klimawandel ausgelösten Dynamik zu meistern.



7. Literatur

- Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) (1981): Grundzüge der Nutzen-Kosten-Untersuchungen, Bremen.
- Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (UVM BW) (Hrsg.) (2003): Hochwassergefahr und Strategien zur Schadensminderung in Baden-Württemberg; eine Leitlinie des Ministeriums für Umwelt und Verkehr, des Innenministeriums und des Wirtschaftsministeriums Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU) (2001): Nachhaltiger Hochwasserschutz in Bayern.
- Schmidtke, Reinhard F. (2004): Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen in Hochwasserschutzplanungen. Wasserwirtschaft 94, H. 9, S. 16-20
- Schmidtke, Reinhard F. (2001): Klimaänderung – sozio-ökonomische Konsequenzen. KLIWA-Berichte, Heft 1, S. 269-276, Karlsruhe.
- Kugele, Horst (2002): Hochwasserrisikoanalyse im Integrierten Donau-Programm des Landes Baden-Württemberg. In: Tagungsunterlagen zum Internationalen Symposium „Flussgebietsmanagement – eine neue Herausforderung für die Wasserwirtschaft“, 30.-31-01.2002, Europäisches Patentamt München.

Bisherige Erkenntnisse aus KLIWA - Handlungsempfehlungen

Bernd Katzenberger

Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe

1. Einleitung

Das Kooperationsvorhaben KLIWA wird von den Ländern Baden-Württemberg und Bayern gemeinsam mit dem Deutschen Wetterdienst durchgeführt (Bartels et al., 2004). Dabei sollen die möglichen Folgen einer Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt in den einzelnen Flussgebieten beider Bundesländer abgeschätzt, die Konsequenzen aufgezeigt und Handlungsempfehlungen im Sinne einer vorsorgenden Wasserwirtschaftspolitik entwickelt werden. Bei dem Vorhaben KLIWA handelt es sich um eine regionale Betrachtung und Bewertung des weltweit erkannten Problems der Klimaveränderung. Bei den bisherigen Betrachtungen stand die Frage einer möglichen Hochwasserverschärfung im Vordergrund.

2. Bisherige Veränderungen des Klimas und des Wasserhaushalts

Die Untersuchung der vorhandenen langen Messreihen hydrometeorologischer und hydrologischer Größen gibt Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und evtl. erkennbaren Veränderungen. Solche Untersuchungen sind auf der Grundlage einer großen Datenbasis systematisch für Baden-Württemberg und Bayern durchgeführt worden. Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden (KLIWA, 2003):

- Deutliche Zunahme der Lufttemperatur:
Die Jahresmitteltemperatur hat je nach Region zwischen 0,5 und 1,2°C zugenommen. Die größten Anstiege der Monatsmitteltemperatur sind im Winterhalbjahr im Dezember mit Werten zwischen 1,9 und 2,7°C und im Sommerhalbjahr im August mit Werten zwischen 0,7 und 1,7°C aufgetreten.
- Mildere, schneeärmere Winter:
Die mittlere Schneedeckendauer (Anzahl der Schneedeckentage im Winter) ist in den tiefer liegenden Regionen (< ca. 400 m ü NN) um 30 bis 40%, in den mittleren Höhenlagen um 20 bis 30% zurückgegangen. In den Hochlagen (> ca. 700 m ü NN) sind nur geringe Abnahmen (<10%), in den Kamm- und Gipfelbereichen keine signifikanten Änderungen festzustellen.
- Winterhalbjahr feuchter, Sommerhalbjahr trockener:
Die innerjährliche Niederschlagsverteilung hat sich verändert, es wurde trockener im Sommer- und niederschlagsreicher im Winterhalbjahr.
- Zunahme der Starkniederschläge im Winter:
Die Starkniederschläge (Dauerstufen ≥ 24 h) weisen im Winterhalbjahr regional signifikante Zunahmen auf, vor allem im Schwarzwald und dem Nordosten von Baden-Württemberg sowie in Franken und in Teilen des Bayerischen Waldes. Im Sommerhalbjahr sind kaum signifikante Änderungen aufgetreten.
- Zunahme der Westwetterlagen:
Im Winter haben die gerade für die Hochwasserbildung an zahlreichen größeren Flussgebieten Baden-Württembergs bedeutsamen Westwetterlagen zugenommen.
- Keine signifikante Zunahme der Jahreshöchstabflüsse:
Die jährlichen Höchstabflüsse an den Pegeln zeigen bei einer langfristigen Betrachtung (Zeitreihen länger als ca. 70 Jahre) bis auf wenige Ausnahmen keine signifikanten flächendeckenden Trends.
- Zunehmende Trends bei den Höchstabflüssen seit den 70er Jahren:



In den letzten ca. 30 Jahren wurden bei den hydrologischen Zeitreihen der jährlichen Höchstabflüsse Zunahmen festgestellt, insbesondere im Winterhalbjahr. Bei den monatlichen Höchstabflüssen hat sich der Jahresgang geändert, mit höheren Werten vor allem im Winterhalbjahr.

➤ Seit den 70er Jahren häufiger Hochwasser:

Die Häufigkeit von Hochwasserereignissen hat insbesondere im Winterhalbjahr in den letzten ca. 30 Jahren zugenommen.

Fazit

Die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland mit Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt haben sich im vergangenen Jahrhundert - insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte – erkennbar verändert. Die gefundenen Trends überschreiten regionalspezifisch die bisher aus langen Messzeitreihen bekannte natürliche Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen. Sie legen daher den Einfluss des Menschen auf das globale und regionale Klima nahe, was in der internationalen Klimaforschung grundsätzlich nicht mehr in Frage gestellt wird. Vieles spricht dafür, dass die Veränderungen als Auswirkungen eines bereits begonnenen Klimawandels angesehen werden können.

3. Untersuchungen zur zukünftigen Klimaentwicklung

Um Aussagen über mögliche Veränderungen der hydrometeorologischen Größen in Süddeutschland für die nächsten Jahrzehnte zu erhalten, mussten **regionale Klimaszenarien** entwickelt werden. Eine Grundsatzstudie der ETH Zürich (Schär et al., 2000) ergab, dass alle bis heute in Betracht kommenden regionalen Klimamodelle und statistischen Verfahren Unsicherheiten aufweisen und unterschiedliche Vor- und Nachteile haben.

Um eine Bandbreite von Ergebnissen zu erhalten, wurden verschiedene Institutionen mit der Erstellung von regionalen Klimaszenarien beauftragt. Zum Einsatz kamen dabei unterschiedliche Verfahren. Die vorgegebenen Randbedingungen waren weitgehend identisch: Messdaten 1951-2000, Verifikationszeitraum 1971-2000, globales Klimamodell ECHAM 4, IPCC-Emissionsszenario B2, Szenariozeitraum 2021-2050.

Insgesamt ist bei kritischer Würdigung der Ergebnisse für das Zieljahr 2050 festzuhalten:

- Die Erwärmung geht weiter. Die Lufttemperatur wird insb. auch im Winter weiter zunehmen.
- Von diesen Veränderungen ist auch der Wasserkreislauf betroffen.
- Die Niederschläge werden im Winterhalbjahr zunehmen.
- Auch bei der Dauer und Häufigkeit von Westwetterlagen ist im Winter mit einer Zunahme zu rechnen.

Quantitative Aussagen zur künftigen Entwicklung von konvektiven Kurzzeit – Niederschlägen, die für die Siedlungsentwässerung und für Hochwasser in kleinen Einzugsgebieten von Bedeutung sind, lassen sich aus den derzeit entwickelten regionalen Klimamodellen nicht ableiten.

4. Auswirkungen auf Hochwasserabflüsse

4.1 Wasserhaushaltsmodelle

Um Aussagen über mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf den Wasserhaushalt, insbesondere auf die Hochwasserabflüsse, zu erhalten, sind Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen unter Verwendung der regionalen Klimaszenarien als Input erforderlich.

Wasserhaushaltsmodelle (WHM) können für vielfältige Aufgaben und Fragestellungen eingesetzt werden (KLIWA, 2002). Sie beschreiben und quantifizieren die räumliche und zeitliche Verteilung der Wasserhaushaltskomponenten wie z.B. Abfluss, Verdunstung, Versickerung. Um den Wasserhaushalt sowohl für den heutigen Zustand als auch für künftige Zustände als Folge der Klimaveränderung simulieren zu können, wurden Wasserhaushaltsmodelle (Raster 1 km²) aufgestellt. In Bayern kommt das Modellsystem ASGi, in Baden-Württemberg das System LARSIM zum Einsatz.

Als Input sind für die Wasserhaushaltsmodelle Tages- oder Stundenwerte u.a. des Niederschlags, der Temperatur und der Globalstrahlung erforderlich.

Auf der Basis der regionalen Klimaszenarien wurden für zwei Pilotgebiete (Einzugsgebiet Neckar und Oberer Main) Simulationsrechnungen mit Tageswerten durchgeführt und ausgewertet.

4.2 Statistische Auswertungen

Zur Auswertung der Berechnungsergebnisse der Wasserhaushaltsmodelle sowohl für den Ist-Zustand als auch für den Szenario-Zeitraum werden statistische Auswertungen durchgeführt. Für die Beurteilung der Hochwasserabflüsse werden die Extremwerte ausgewertet (Extremwertstatistik).

4.3 Ergebnisse Pilotgebiet Neckar (ca. 14.000 km²), Zieljahr 2050

- Die Auswertung der Monatshöchstwerte des Abflusses zeigt eine Zunahme der mittleren Jahreswerte um ca. 50% für nahezu alle betrachteten Pegel.
- Das Winterhalbjahr ist bei der Abflusszunahme (Gebiete mit $A_E > 500 \text{ km}^2$) stärker betroffen als das Sommerhalbjahr.
- Die kleinen und mittleren Hochwasserabflüsse nehmen um ca. 40-50% zu.
- Der 100-jährliche Hochwasserabfluss (HQ_{100}) nimmt um ca. 15% zu.
- Eine regionale Differenzierung innerhalb des Neckargebietes ist auf Grund der bisherigen Untersuchungsergebnisse für die betrachteten Pegelinzugsgebiete nicht zwingend erforderlich.

Aus den Ergebnissen des WHM Neckar und den daran anschließenden extremwertstatistischen Auswertungen kann ein Vorschlag für die Berücksichtigung des Klimawandels (Zieljahr 2050) im Neckargebiet bei den Hochwasserbemessungswerten $HQ_{T,K}$ beim „Lastfall Klimaveränderung“ wie folgt formuliert werden:

$$\begin{aligned} HQ_{2,K} &= 1.50 \times HQ_2 \\ HQ_{10,K} &= 1.40 \times HQ_{10} \\ HQ_{100,K} &= 1.15 \times HQ_{100} \\ HQ_{1000,K} &= 1.00 \times HQ_{1000} \end{aligned}$$

Zwischenwerte werden sinnvoll interpoliert.

4.4 Ergebnisse Pilotgebiet Oberer Main (ca. 4.400 km²), Zieljahr 2050

- Hochwasserabflussauswertungen sind an drei Pegeln erfolgt.
- Erste Ergebnisse zeigen eine vergleichbare Zunahme der Hochwasserabflüsse wie im Neckargebiet.
- Weitere Auswertungen sind vorgesehen.



4.5 Fazit der bisherigen Untersuchungen in den Pilotgebieten

Die Unsicherheiten bei den Ergebnissen aus der Modellkette globale Klimamodelle-regionale Klimamodelle-Wasserhaushaltsmodelle und der anschließenden Extremwertstatistik sind zwar noch groß. Dennoch lassen die Ergebnisse der Simulationsrechnungen in den Pilotgebieten eine Zunahme der mittleren Hochwasser, aber auch der extremen Abflüsse erwarten. Eine Hochwasserverschärfung durch die Klimaveränderung erscheint in den beiden Pilotgebieten für das Zieljahr 2050 somit wahrscheinlich.

5. Handlungsempfehlungen

Ende 2003 wurde von KLIWA ein Workshop zum Thema „Extreme Hochwasser und Klimaveränderung“ durchgeführt, um bis dahin vorliegende erste Ergebnisse über Auswirkungen der Klimaveränderung mit Fachleuten diskutieren, eine erste Zwischenbilanz ziehen sowie evtl. Anregungen und Vorschläge Externer in die Arbeit mit einfließen lassen zu können (KLIWA, 2003). Wesentliche Punkte des Workshops können wie folgt zusammengefasst werden:

- Es ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt davon auszugehen, dass eine Klimaveränderung eintritt, die zu einer örtlich unterschiedlichen Erhöhung von Hochwasser führen kann.
- Um eine für die Zukunft maßgebliche Veränderung der Hochwasserabflüsse zu erfassen, sind regionale Klimamodelle und Wasserhaushaltsmodelle einzusetzen und deren Ergebnisse kritisch zu werten. Das KLIWA-Projekt ist daher auf dem richtigen Weg.
- Die Hochwasserschutzstrategie mit den drei Bausteinen "Hochwasser-Flächenmanagement", "Technischer Hochwasserschutz" und "Hochwasservorsorge" ist unter dem Eindruck der möglichen Klimaänderung noch vordringlicher umzusetzen.
- Wenn neue Hochwasserschutzanlagen konzipiert werden, sind sie entsprechend den derzeitigen Erkenntnissen auszulegen, wobei eventuell ein Zuschlag entsprechend zu erwartender Veränderungen zu berücksichtigen ist. Die Anlagen sollten an neue Erkenntnisse anpassbar sein und darauf vorbereitet sein, eventuelle Nachrüstungen zu ermöglichen.
- Der KOSTRA-Atlas (Bartels et al., 1997), der auf Auswertungen der Jahre 1951-1980 beruht, ist zu aktualisieren.
- Es ist notwendig, dass bereits in naher Zukunft Ergebnisse und konkrete Vorschläge bereit gestellt werden.

5.1 Anpassungsstrategie

Die Kernfrage lautet: Wie geht man sinnvoll mit einer Situation um, die erst in einigen Jahrzehnten in vollem Umfang auftritt bzw. auftreten kann und die zudem noch mit großen Unsicherheiten behaftet ist.

Es gilt eine geeignete Strategie zu entwickeln, wie trotz dieser Unsicherheiten Schritte in die richtige Richtung gemacht werden können. Dabei ist eine Folge kleinerer Schritte in überschaubaren Zeithorizonten und der Option der zwischenzeitlichen Nachjustierung, wenn sich aus der Klimaforschung neue Erkenntnisse ergeben, sinnvoller als große Langfristpläne.

Festlegungen sollten daher als Kernpunkt enthalten, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf anpassbar sind („flexible and no regret“-Strategie).

Daraus im Einzelfall resultierende derzeitige Mehrkosten sollten jedoch auf lange Sicht zu einer Kostenminderung eventuell notwendiger „klimabedingter“ Anpassungen führen. Grundsätzliche Zielsetzung ist dabei die Abwägung, zwar einerseits die Gegenwart nicht mit Kos-

ten für die Zukunft zu überlasten, jedoch andererseits vorerst Kosten zu übernehmen, die folgenden Generationen die Anpassung von Maßnahmen erheblich erleichtern.

Zusammenfassend können folgende Feststellungen getroffen werden:

- In der Wasserwirtschaft gilt das Vorsorgeprinzip. Nichts tun wäre sicherlich falsch.
- Die Wasserwirtschaft hat sich schon immer an Veränderungen anpassen müssen (Klimaschwankungen, geänderte Nutzungsansprüche, Anpassung an neue gesellschaftliche Randbedingungen). Insofern entsteht keine grundsätzlich neue Situation.
- Pragmatisches Vorgehen, solange die Prognosen nicht ausreichend wissenschaftlich fundiert sind.
- Nur das machen, was derzeit unbedingt nötig ist.
- Investitionen nur dort, wo bereits jetzt sinnvoll.
- Keine schwer umkehrbaren Fakten schaffen.
- Möglichkeiten zum Nachjustieren offen lassen, um evtl. neue Erkenntnisse in den nächsten Jahren und Jahrzehnten berücksichtigen zu können.
- Generelle Strategie unschädlicher und anpassbarer Maßnahmen.

5.2 Empfehlungen für Bereich Hochwasserschutz

Für den Bereich des Hochwasserschutzes zeichnet sich folgende Vorgehensweise als sinnvoller und gangbarer Weg ab:

- Festlegung der HQ_T -Werte anhand der aktuellen Datengrundlage für den heutigen Zustand. In Baden-Württemberg ist dies die Regionalisierung der Hochwasserabflüsse (LfU, 2001).
- An diesen aktuellen Werten orientiert sich die Realisierung der anstehenden neuen Hochwasserschutzmaßnahmen auch künftig.
- Einen Lastfall Klimaveränderung in Planungen für Neuanlagen zusätzlich planerisch berücksichtigen.
- Festlegung von Klimafaktoren $f_{T,K}$ zur Berücksichtigung der Klimaveränderung entsprechend dem aktuellen Kenntnisstand für den Lastfall Klimaveränderung.
- Ermittlung des Bemessungswerts $HQ_{T,K}$ für den Lastfall Klimaveränderung aus HQ_T -Wert und Klimafaktor: $HQ_{T,K} = f_{T,K} \times HQ_T$.
- Investitionen aus dem Lastfall Klimaveränderung im Einzelfall nur dann sofort tätigen, wenn sie wirtschaftlicher sind als spätere Anpassungsmaßnahmen. Ansonsten: Anpassungen planerisch berücksichtigen und später bei Bedarf ausführen.

In Flüssen mit großen Einzugsgebieten sind extreme Hochwasserereignisse mit Wetterlagen verbunden, die lang andauernde Niederschläge mit sich bringen und das gesamte Einzugsgebiet überregnen. Für kleine Einzugsgebiete bilden Sommergewitter die größte Gefahr. Der Einfluss der Klimaveränderung auf konvektive Niederschläge ist aber derzeit aus den regionalen Klimaszenarien noch nicht abschätzbar. Solange hierzu keine Erkenntnisse vorliegen, wird vorgeschlagen, pragmatisch die Ergebnisse aus den großen Einzugsgebieten zu übertragen.

5.3 Beispiele zum Lastfall Klimaveränderung

In verschiedenen Bereichen der Wasserwirtschaft ist es bisher schon üblich, bereits bei der Planung mögliche künftige Erweiterungen mit zu berücksichtigen und ggf. Teile davon gleich



mit zu bauen, um die künftigen Ausbaustufen später technisch sinnvoll und wirtschaftlich realisieren zu können (z.B. beim Kläranlagenbau).

Die nachfolgend aufgeführten Beispiele sollen für den Bereich des Hochwasserschutzes beispielhaft verdeutlichen, wie unter dem Aspekt erhöhter Bemessungswerte infolge einer künftigen Klimaveränderung z.B. im Zieljahr 2050 (Lastfall Klimaveränderung) flexibel und unschädlich vorgegangen werden kann:

- Planung eines Hochwasserdammes, wobei das Bemessungshochwasser in Zukunft wegen der Klimaveränderung unsicher ist und ggf. höher anzusetzen ist: 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 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 (Erhöhung durch feste oder mobile Elemente) wenig Probleme bereitet.

5.4 Weiteres Vorgehen

In Baden-Württemberg werden die WHM – Berechnungen in den restlichen Flussgebieten (Donau, Tauber, Bodenseezuflüsse, Hoch- und Oberrheinzuflüsse) durchgeführt. Für diese Gebiete sollen darauf aufbauend mit pragmatischen Ansätzen ebenfalls Auswertungen zu den Klimafaktoren erfolgen.

Im Rahmen eines für 2005 vorgesehenen Leitfadens zur Festlegung von Bemessungsabflüssen soll in einem gesonderten Kapitel die Vorgehensweise beim „Lastfall Klimaveränderung“ erläutert werden. Zusätzlich soll mit einer Beispielsammlung eine Entscheidungshilfe gegeben werden, wo es sinnvoll sein kann, bei neuen Planungen gegen geringe Mehrkosten eine Anpassung sofort zu realisieren oder bei höheren Mehrkosten nur eine spätere Anpassungsmöglichkeit vorzusehen. Ebenfalls mit aufgenommen werden soll eine Empfehlung zur Verwendung und Anpassung aktualisierter KOSTRA-Werte. Die Vorgehensweise wird zwischen den Kooperationspartnern KLIWA abgestimmt.

In Bayern werden die Untersuchungen in ähnlicher Weise fortgeführt. Auch hier wird die Festlegung eines räumlich differenzierten Klimafaktors verfolgt, um den Einfluss der Klimaveränderung bei der Planung von Hochwasserschutzmaßnahmen mit berücksichtigen zu können.

6. Zusammenfassung

Die Untersuchung der vorhandenen langen Messzeitreihen gibt Aufschluss über die bisher beobachteten natürlichen Schwankungsbreiten und mögliche Veränderungen. Solche Untersuchungen sind für verschiedene Messgrößen auf einer breiten Datenbasis für Baden-Württemberg und Bayern erfolgt.

Entsprechend dem allgemeinen Trend für Mitteleuropa zeigen die vorliegenden Messungen auch in Süddeutschland eine flächendeckende Zunahme der Lufttemperatur. Die Tempera-

turzunahme im Winter bedingt eine Abnahme der Schneedeckendauer und eine Änderung im Schneeschmelzverhalten. Gleichzeitig nimmt der Niederschlag sowohl im Gebietsmittel als auch in den stationsbezogenen Starkniederschlägen regionalspezifisch im Winter und Frühjahr zu, so dass häufigere und intensivere Niederschläge auftreten. Im Sommer sind die Veränderungen weniger deutlich ausgeprägt: Tendenziell zeigen sich trockenere Sommer mit einer nur geringeren Zunahme der Lufttemperaturen (Ausnahme: August).

Die Änderungen der hydrometeorologischen Größen haben Auswirkungen auf das mittlere Verhalten des Gebietswasserhaushalts. Das Langzeitverhalten der Hochwasserabflüsse zeigt jedoch bisher bei der überwiegenden Anzahl der Pegel keine signifikante Änderung der Jahreshöchstabflüsse. Lediglich die Häufigkeit kleinerer Hochwasser hat insbesondere im Winterhalbjahr zugenommen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die klimatischen Bedingungen in Süddeutschland im 20. Jahrhundert - insbesondere während der letzten drei Jahrzehnte - erkennbar verändert haben. Die gefundenen Trends überschreiten regionalspezifisch und interannuell die bisher aus langen Messzeitreihen bekannte natürliche Schwankungsbreite bei einigen Untersuchungsgrößen.

Aus den Klimaszenarien für die nächsten Jahrzehnte ergeben sich Hinweise auf einen weiteren Temperaturanstieg und eine weitere Zunahme der Niederschläge. Auf der Basis dieser regionalen Klimaszenarien (Zieljahr 2050) wurden für zwei Pilotgebiete (Neckar und Oberer Main) Simulationsrechnungen mit Wasserhaushaltsmodellen und erste Auswertungen durchgeführt. Die Ergebnisse lassen eine deutliche Zunahme der mittleren Hochwasser (MHQ), aber auch der extremen Abflüsse in den Pilotgebieten erwarten. Eine Hochwasserverschärfung in diesen Gebieten infolge einer Klimaveränderung erscheint somit wahrscheinlich, auch wenn die Ergebnisse aus der Modellkette (Globalmodell-regionale Klimamodelle-Wasserhaushaltsmodelle) noch mit erheblichen Unsicherheiten behaftet sind.

Vor diesem Hintergrund gilt 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. Kernpunkt sollte sein, dass sie einerseits langfristig unschädlich und gleichzeitig bei Bedarf anpassbar ist.

Eine nachträgliche Anpassung bestehender Hochwasserschutzanlagen an neue Situationen ist immer sehr viel kostenintensiver als wenn dies bereits im Planungsstadium berücksichtigt wurde. Wenn neue Hochwasserschutzanlagen konzipiert werden, sollten sie entsprechend den derzeitigen Erkenntnissen ausgelegt werden, wobei eventuell ein Zuschlag entsprechend zu erwartender Veränderungen zu berücksichtigen ist (Lastfall Klimaveränderung). Die Anlagen sollten an neue Erkenntnisse anpassbar und darauf vorbereitet sein, eventuelle Nachrüstungen zu ermöglichen.

Die Hochwasserschutzstrategie mit den drei Bausteinen „Hochwasser-Flächenmanagement“, „Technischer Hochwasserschutz“ und „Hochwasservorsorge“ ist unter dem Eindruck der möglichen Klimaveränderung noch vordringlicher umzusetzen.



7. Literatur

- Bartels, H., Katzenberger, B., Weber, H. (2004): Klimaveränderung und Wasserwirtschaft in Süddeutschland, Zeitschrift Wasserwirtschaft, April 2004.
- KLIWA (2003): Ergebnisbericht 2003 ([http:// www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)).
- Schär, Chr. et al (2000): Grenzen und Möglichkeiten der globalen und regionalen Klimamodellierung für die Quantifizierung des Wasserhaushalts. Studie der ETH Zürich. (<http://www.kliwa.de>).
- KLIWA (2002): Wasserhaushaltsmodelle. ([http:// www.kliwa.de](http://www.kliwa.de)).
- KLIWA (2003): Workshop „Extreme Hochwasser und Klimaveränderung“. (<http://www.kliwa.de>).
- Bartels, H. et al (1997): Starkniederschlagshöhen für Deutschland - KOSTRA-Atlas, Deutscher Wetterdienst, Offenbach
- LfU (2001): Hochwasserabfluss-Wahrscheinlichkeiten in Baden-Württemberg. CD-ROM, Karlsruhe.

Hochwasserschutz in der Schweiz unter Berücksichtigung des Klimawandels

Bruno Schädler

Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern, Schweiz

1. Hochwasser in Vergangenheit und Zukunft

Die Hochwasserereignisse der letzten Jahrzehnte in Europa haben aufgezeigt, dass es die absolute Sicherheit gegen Hochwasser nicht gibt. In den letzten 30 Jahren sind alleine in der Schweiz Milliarden Schäden entstanden, die sich in der zweiten Hälfte der Periode von 3 Milliarden Franken auf 6 Milliarden verdoppelt haben. Eine Häufung extremer Ereignisse in den letzten Jahren ist festzustellen. Dabei ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Häufigkeit des Auftretens von Hochwassern im Verlaufe der Zeit sehr starken (natürlichen) Schwankungen unterworfen ist. So haben Analysen des Hochwassergeschehens in den Zentralalpen von Pfister (1999) gezeigt, dass neben Perioden hoher Überschwemmungshäufigkeiten (Jahre 1550-1580 und 1827-1875) solche mit niedriger Häufigkeit (1641-1706 und 1927-1975) identifiziert werden können. Das heißt, dass vor der scheinbar neuen Häufung von Hochwassern in den letzten 30 Jahren ein außergewöhnlich „ruhiger“ Zeitabschnitt erlebt wurde, und dass es sich damit nur um einen vermeintlichen Anstieg über langfristige Erfahrungswerte hinaus gehandelt haben mag.

Das „Beratende Organ für Klimafragen OcCC“ der Schweizer Regierung hat allerdings in einem jüngst erschienen Bericht (OcCC, 2003) festgehalten, dass aufgrund der vom Menschen mit beeinflussten Klimaänderung schon in den nächsten 50 Jahren mit bedeutenden Konsequenzen für die Hochwassersituation in der Schweiz zu rechnen ist. Neueste Forschungsergebnisse (Schär et al., 2004) zeigen, dass in Folge der wahrscheinlich weiter anhaltenden Veränderungen nicht nur einfach die mittlere Temperatur oder die mittleren Winterniederschläge ansteigen, sondern dass auch die Wahrscheinlichkeit von Extremjahren (sehr heiß und trocken wie 2003 oder sehr nass und kühl wie 2002) zunehmen könnte. Die Folgen der weiter schreitenden Klimaveränderung können dazu führen, dass die Elemente des Wasserkreislaufs Werte annehmen, welche die heute gültigen Erfahrungswerte überschreiten.

Betrachtet man nun die von Hochwassern verursachten Schäden, dann darf der Einfluss der Klimaänderung nicht isoliert betrachtet werden. Das Schadenpotential ist in der Vergangenheit im Einklang mit dem Bevölkerungswachstum, der Zunahme des Lebensstandards, der wirtschaftlichen Entwicklung und der damit einhergehenden Entwicklung der Infrastrukturanlagen exponentiell gewachsen. Abb. 1 stellt diesen Zusammenhang exemplarisch für die Schweiz dar.

Aufgrund dieser Entwicklungen wird von der Gesellschaft ein sicherer Schutz vor eher häufigen Hochwassern erwartet (Petrascheck, 2003), was sich aus den bislang üblichen Bemessungshochwassern, dem HQ100, auch ableiten lässt. Und da unser Erfahrungszeitraum, nämlich die Zeit 1920 – 1975, eine eher ruhige Hochwasserzeit war, hat sich dieser Ansatz selbst bei relativ extremen Ereignissen auch bewährt. Jedoch ist nun die ruhige Zeit seit 1975 vorbei und die extremen Ereignisse sind jetzt auch wieder wirklich extrem geworden, und die Klimaexperten sagen uns voraus, dass die ruhigeren Zeiten bis auf weiteres der Vergangenheit angehören.

Extremereignisse sind schon heute sehr schwer bestimmbar. Das Bemessungskonzept HQ100 geht von Wahrscheinlichkeiten aus, Wahrscheinlichkeiten, die immer auf der Voraussetzung beruhen, dass keine Trends, Inhomogenitäten oder auch Messfehler in den Datenreihen auftreten und diese über einen ausreichend langen Zeitraum vorliegen. Das bedeutet, Wahrscheinlichkeiten aus der Vergangenheit zu bestimmen, ist heute schon sehr unsicher.



Wahrscheinlichkeiten für die Zukunft zu bestimmen, von der wir nicht genau wissen, welchen Trends und Inhomogenitäten sie unterliegt, sind noch viel ungenauer. Und selbst wenn es einigermaßen möglich wäre, es wäre nicht klar, wann und wo das Extremereignis auftritt.

Festzuhalten bleibt:

- Die Unsicherheit in der Dimensionierung steigt mit der Klimaänderung
- Das nächste Hochwasser kommt bestimmt
- Ein noch größeres Hochwasser ist immer möglich.

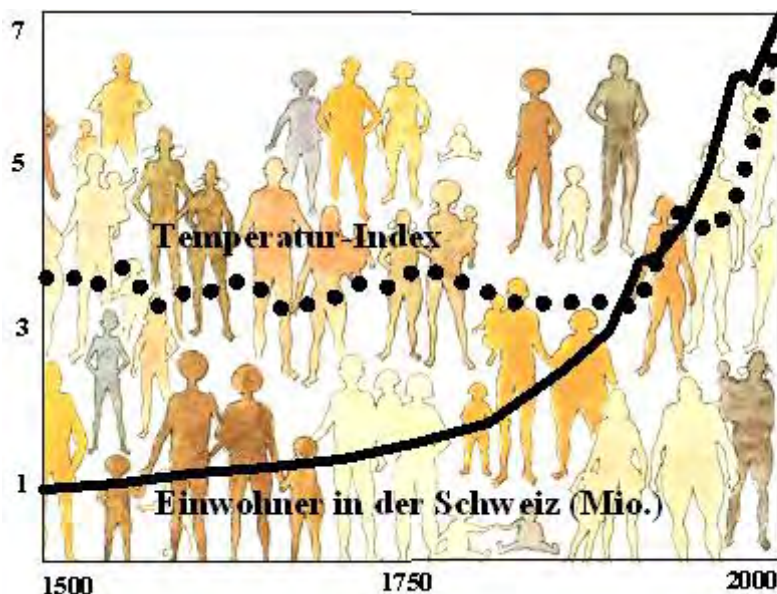


Abb. 1: Entwicklung der Bevölkerung in der Schweiz und der Lufttemperatur in den letzten 500 Jahren

2. Was also tun?

Betrachtet man den Prozess, welcher schließlich zum Entstehen von Schäden führt (Abb. 2), wird klar, dass eine ganze Reihe von Faktoren mitspielen. Und es wird ebenso klar, dass bei jedem dieser Einflussfaktoren Maßnahmen zur Verhinderung oder zur Abminderung ergriffen werden können. Eine differenzierte und integrale Betrachtung dieser Maßnahmen kann dazu führen, dass letztlich die Schäden minimiert werden können.

Auf dem Weg vom Niederschlag bis zum Schaden wirken viele dynamische Einflussgrößen, so dass nicht direkt vom Schaden auf das Naturereignis geschlossen werden darf. Die Klimaänderung beeinflusst die hydrologischen Gefahren, also vor allem den meteorologischen Input und den Zustand des Einzugsgebietes. Eingriffe im Einzugsgebiet (Rückhalt) oder im Flussbett (Steigerung der Abflussleistung) können die Gefahr des Ausuferns mindern, aber auch durch Hindernisse (Brücken) vergrößern, wie viel Beispiele immer wieder zeigen. Von klassischen Wasserschutzbauten wird erwartet, dass sie Überschwemmungen verhindern. Sie können aber keinen vollständigen Schutz bieten, wie die Hochwasser von 1987, 1993, 1999, 2000 und 2002 gezeigt haben. Im Vertrauen auf die Wirkung der Schutzmassnahmen wurden während Jahrzehnten Infrastrukturwerte in potentiell gefährdete Gebiete gebracht, wodurch die Schadenpotentiale anstiegen.

Eine Verringerung des Schadenpotentials ist auch ohne Änderung der Nutzung möglich. Die Städte Köln, Regensburg oder Passau sind Beispiele dafür, dass wirtschaftliches Wachstum auch in häufig überschwemmten Gebieten möglich ist, sofern Nutzung und Bauweise ange-

passt an das Überschwemmungsrisiko erfolgen. Wenn ein Ereignis eintritt, kann durch Notfallmaßnahmen Schaden verhütet oder begrenzt werden.

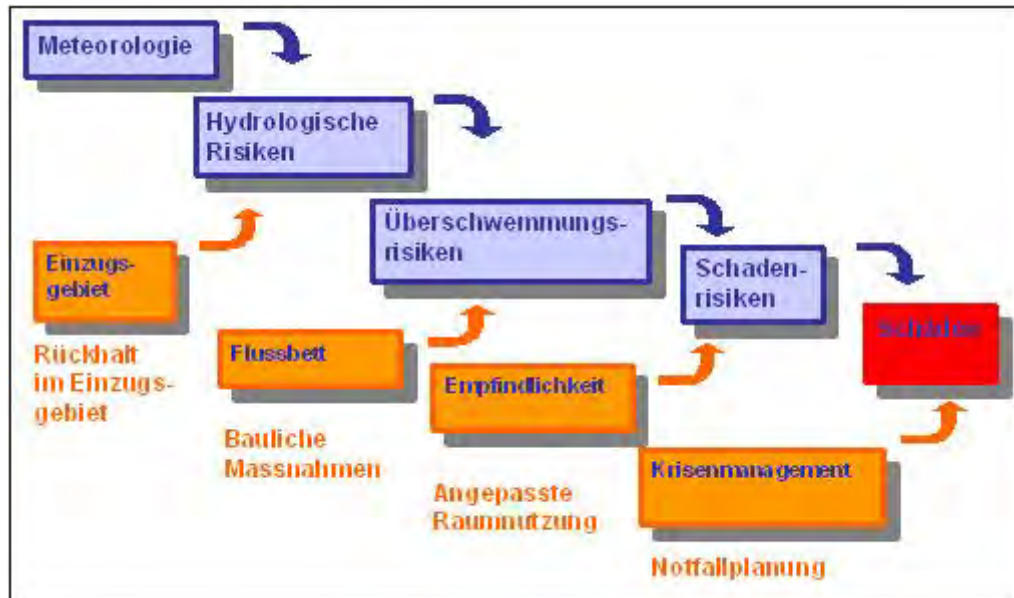


Abb. 2: Wirkungskette bei Hochwasserschäden und Möglichkeiten für Maßnahmen. Viele dynamische Einflussgrößen beeinflussen die Entwicklung vom Niederschlag zum Schaden (aus BWG, 2001).

3. Eine moderne Hochwasserschutzstrategie

Es ist also notwendig, dass eine moderne Hochwasserschutzstrategie die zunehmende Unsicherheit in der Hochwasserbemessung mit berücksichtigt. Den absoluten Schutz vor Hochwasser gibt es nicht. Bereits präventiv müssen Fragen zur Begrenzung von Schäden im Überlastfall behandelt werden. Nur eine integrale Betrachtung führt zu einem bewussten Umgang mit den möglichen Gefahren im Sinne einer umfassenden Risikokultur.

Im Bereich Hochwasserschutz wurde deshalb in der Schweiz durch Gesetzesänderungen in den letzten Jahren eine Neuorientierung vorgenommen. Die Hochwasserschutzstrategie baut auf vier Eckpfeilern auf: (1) Gefahrenanalyse; (2) Differenzierung der Schutzziele; (3) ganzheitliche, nachhaltige Maßnahmenplanung sowie (4) Begrenzung der verbleibenden Risiken (BWG, 2001).

3.1 Gefahrenanalyse

Was kann wo passieren? Wie oft und wie stark treten Ereignisse auf? Ohne Kenntnis der bestehenden Gefahrensituation sowohl in häufigen als auch in extremen Fällen (Gefahrenbeurteilung), können kaum sinnvolle Maßnahmen geplant werden. Gefahrenkarten dienen zur Kommunikation der bestehenden Gefährdung (BWW, 1997) und sind daher eine Voraussetzung für koordiniertes Handeln der verschiedenen Akteure.

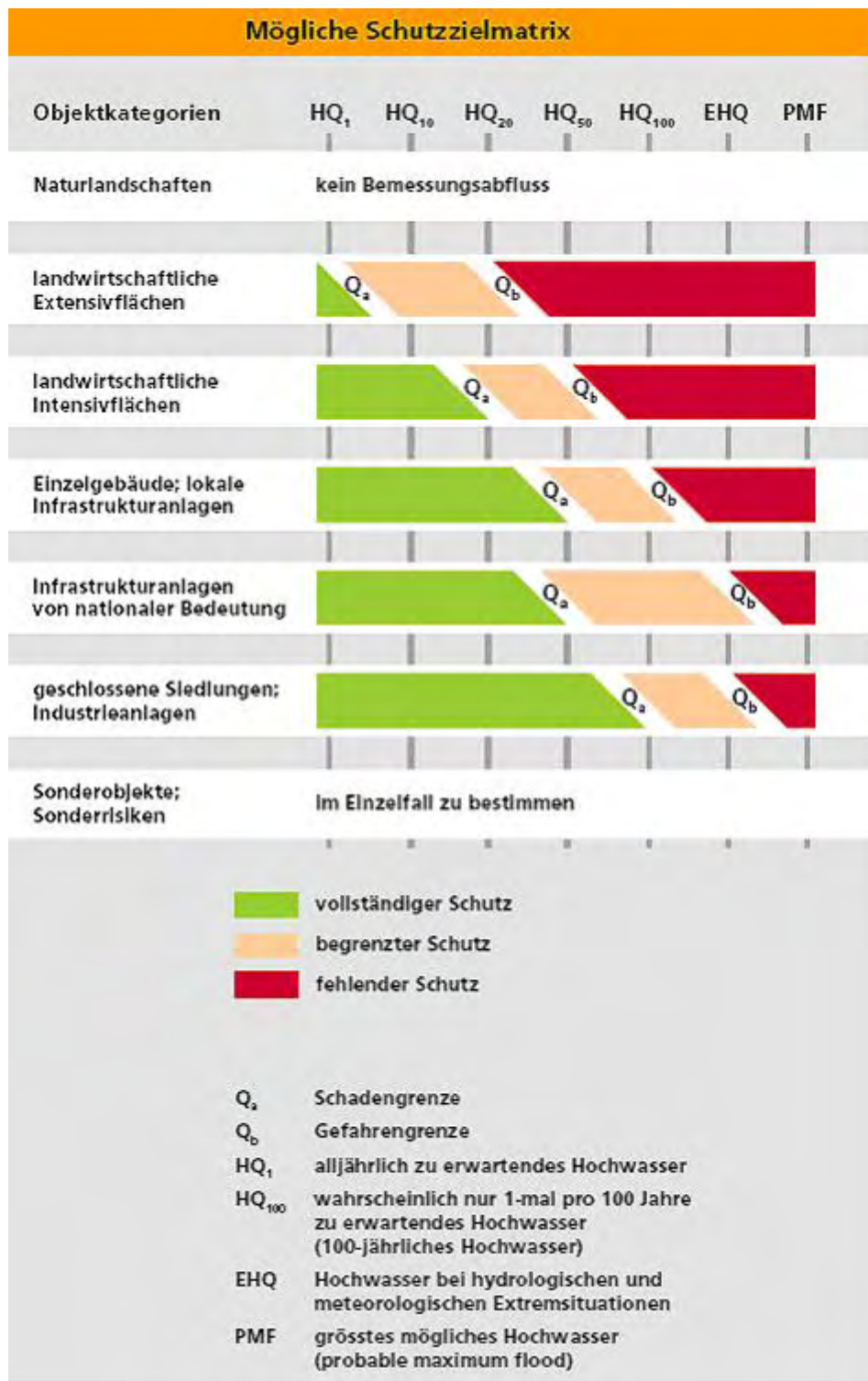


Abb. 3: Mögliche Schutzzielmatrix zum differenzierten Hochwasserschutz (aus BWG, 2001).

3.2 Differenzierung der Schutzziele

Mit der Differenzierung der Schutzziele kann angemessen und je nach lokaler Gefährdung auf die Bedrohung durch Hochwasser reagiert werden (BWG, 2001). Je nach dem, welche Gefahren an einem bestimmten Ort auftreten können, und je nach dem, welche Schutzbedürfnisse bestehen, werden die Schutzziele unterschiedlich festgelegt: Dort, wo Menschen oder hohe Sachwerte betroffen sein können, wird das Schutzziel höher angesetzt als etwa in land- und forstwirtschaftlichen genutzten Gebieten. Einige Objekte dürfen also oft, andere selten, wieder andere möglichst nie überflutet werden (vgl. Abb. 3). Damit kann der Handlungsmaßnahme „Rückhalten wo möglich, durchleiten wo nötig“ am besten entsprochen werden.

3.3 Ganzheitliche und nachhaltige Maßnahmenplanung

Raum für die Gewässer

Ohne ausreichenden Raum können Hochwasser weder zurückgehalten noch schadlos abgeleitet werden. Ohne Raum kann das Gewässer seine ökologischen Funktionen nicht erfüllen. Bei der Forderung nach Raum treffen sich die Anliegen der Ökologie und des Hochwasserschutzes (BUWAL/BWG, 2003). Die Abflusskorridore der Gewässer werden zu ökologischen Vernetzungskorridoren.

Unterhalt der Gewässer und Schutzbauten

Unterhalt ist notwendig um bestehende Sicherheiten zu bewahren.

Raumplanerische Maßnahmen

- Die Raumplanung soll den erforderlichen Fliessgewässerraum sichern und bestehende Retentionsflächen erhalten.
- Die Raumplanung soll auf Grundlage der Gefahrenkarten für eine standortgerechte Nutzung sorgen und durch entsprechende Flächenzuweisung die Entstehung neuer Schadenpotentiale verhindern.
- In bestehenden Siedlungen soll durch die kommunalen Bauordnungen bei Um- und Neubauten eine angepasste Bauweise sicher gestellt werden.

Wasserbauliche Schutzmassnahmen

Sie sind zu erwägen, wenn erhebliche Schutzdefizite bestehen und diese nicht oder nur mit erheblichen Mehrkosten durch Maßnahmen des Objektschutzes beseitigt werden können. Wasserbauten sind so naturnah wie möglich durchzuführen und sollen sowohl zu einer Erhöhung der Hochwassersicherheit als auch zur Verbesserung des ökologischen Zustandes der Gewässer beitragen.

3.4 Begrenzung der verbleibenden Risiken

Notfallplanung

Notfallplanung schließt die Vorbereitung auf das Unvorhergesehene ein. Dazu gehört auch die Organisation der Vorhersage und Alarmierung. Es ist ein EHQ in die Planung einzubeziehen und mögliche Szenarien sind auszuarbeiten. Bei großen ausufernden Wassermengen sind durch vorbereitete mobile oder feste Anlagen die Wassermassen in wenig Schaden empfindliche Gebiet umzuleiten. Den Rettungskräften müssen genügend Mittel zur Verfügung stehen, um auf Abweichungen von den geplanten Szenarien reagieren zu können. Ziel ist es, bei extremen Ereignissen Existenz gefährdende Schäden zu vermeiden.

Obligatorische Versicherungen

Sie stellen das Kapital für einen Neuaufbau nach einem Schadenfall bereit. Sie sind daher ein wichtiger Faktor für die Regeneration nach einer Hochwasserkatastrophe. Die Versiche-



rungsbedingungen sind so zu gestalten, dass eine möglichst große Risikogemeinschaft gebildet wird und die Solidarität innerhalb dieser Gemeinschaft erhalten bleibt.

4. Schlusswort

Der frühere Glaube, dass durch Schutzbauten allein der Hochwasserschutz gewährleistet werden kann, erwies sich als Irrglaube. Ein Umdenken von der ausschließlichen Gefahrenabwehr (Verhütung der Überschwemmung) zum Leben mit dem Hochwasser (die Schäden auf ein erträgliches Maß begrenzen) ist notwendig. Dies erfordert ein zweistufiges Sicherheitskonzept. Erstens soll mit Rückhalt im Einzugsgebiet und durch Schutzbauten die Überschwemmung intensiv genutzter Räume so weit wie möglich vermieden werden. Zweitens müssen Existenz bedrohende Schäden verhindert werden, falls das Hochwasser doch größer ist, als wir dachten. Dies erfordert einen Verbund aller aufgezeigten Maßnahmenkategorien.

Die mit den Strategien zum Hochwasserschutz in der Schweiz betrauten Stellen sind davon überzeugt, dass mit diesem Bündel von Maßnahmen und dem Paradigmenwechsel im Umgang mit Naturgefahren „von der Gefahrenabwehr zur Risikokultur“ (PLANAT, 2002) den Unsicherheiten bei der Bemessung von Hochwasser am besten begegnet werden kann. Und dass die Unsicherheiten, welche mit Klimaveränderungen verbunden sind, mit denselben Maßnahmen aufgefangen werden können.

5. Literatur

- BWG (2001): Hochwasserschutz an Fliessgewässern, Wegleitungen, 72 S., Bern.
- BUWAL/BWG (2003): Leitbild Fliessgewässer Schweiz. für eine nachhaltige Gewässerpolitik, 12 S., BBL, Bern.
- BWW, BRP, BUWAL (1997): Empfehlungen zur Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Biel.
- OcCC (2003): Extremereignisse und Klimaänderung. Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung OcCC, 88 S., Bern.
- Petrascheck A. (2003): Die Flut – Konsequenzen für den Hochwasserschutz. In: Aquavisionen, Dokument zum Auftaktsymposium zum Internationalen Jahr des Wassers, text.um 1/03, S. 60-64, Umweltfachverband, Wien.
- Pfister C. (1999): Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen 1496-1995. 304 S., Haupt Verlag, Bern.
- PLANAT (2002): Sicherheit vor Naturgefahren, Visionen und Strategie, 42 S. BWG, Bern
- Schär Ch. et al. (2004): The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. Nature, Vol. 427, 22, pp.332-336.

Weiter führende Informationen

- | | |
|-------------------------------------|--|
| zu Hochwasserschutz in der Schweiz: | www.bwg.admin.ch |
| zu Strategie Naturgefahren | www.planat.ch |
| zu Klimaänderung | www.occc.ch |

Berücksichtigung des Klimawandels bei der Hochwasserschutzplanung der Maas in den Niederlanden

Jens Reuber, Aldo Janssen

Ministerium für Verkehr und Wasserwirtschaft, Rijkswaterstaat, Niederlande

1. Einleitung

Die Niederlande ist das Land mit der höchsten Bevölkerungsdichte innerhalb der EU. Der Druck auf die noch freien Flächen in den Niederlanden nimmt dabei stetig zu. Gleichzeitig drohen durch mögliche Klimaveränderungen für die Zukunft größere Abflüsse und deren häufigeres Auftreten, die den entsprechenden Raum für den Fluss fordern. Das Konzept Raum für den Fluss ist bereits seit 1998 in der 4. Nota Waterhuishouding festgelegt und wird seit dem in den Niederlanden intensiv umgesetzt.

2. Die Maas

Die Gesamtlänge der Maas von der Quelle bis zur Mündung beträgt 930 km. Das Einzugsgebiet hat eine Fläche von 33.000 km² und liegt in 5 Ländern: Niederlande, Belgien, Frankreich, Deutschland und Luxemburg (siehe Abb. 1). Die Maas ist ein typischer Niederschlagsfluss. Dabei ist das Stromgebiet teilweise hügelig mit schlecht durchlässigem Untergrund und geringen Speichermöglichkeiten, wodurch der Niederschlag sehr schnell in der Maas selber zum Abfluss kommen kann. Die Maas ist international betrachtet eine wichtige Transportachse und bietet ferner Trinkwasser für mehr als 6 Mio. Menschen.

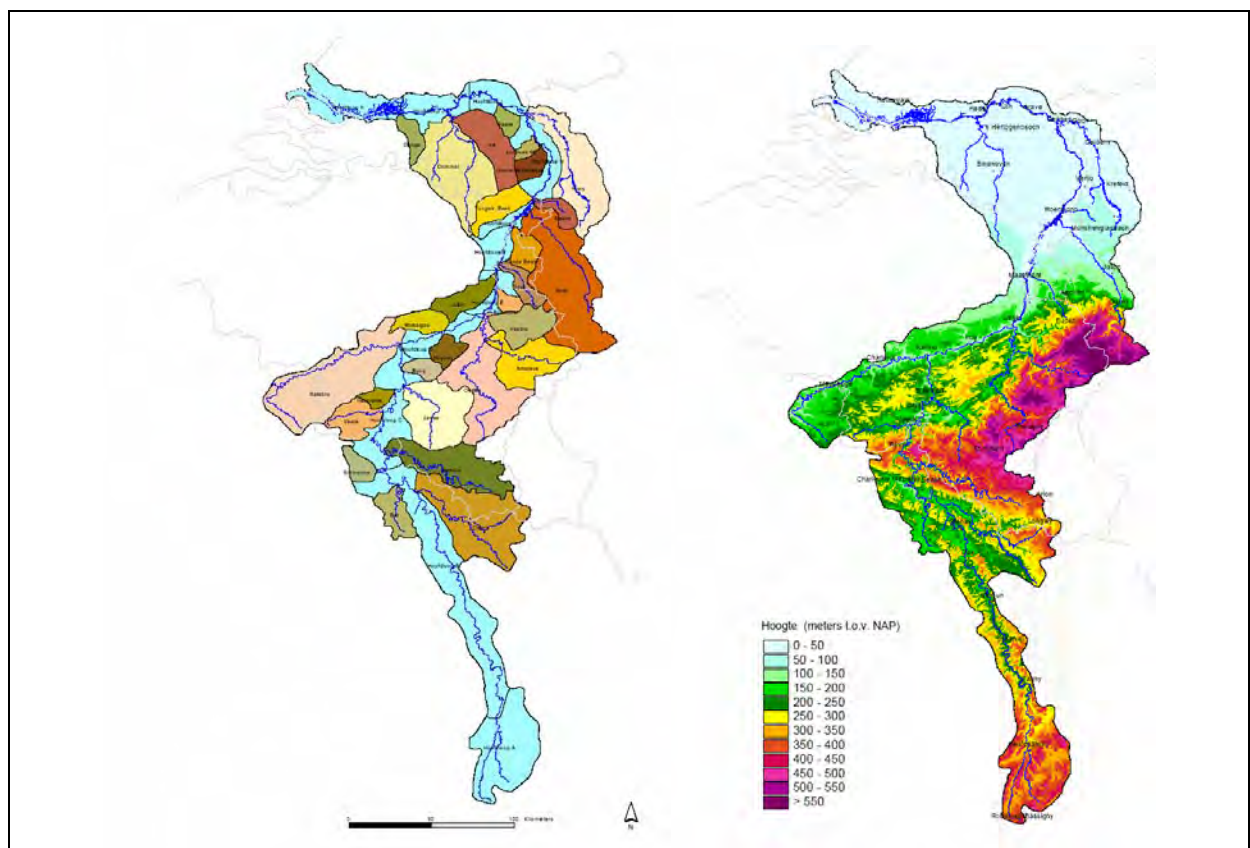


Abbildung 1: Einzugsgebiet der Maas mit Zuflüssen (links) und Topografie (rechts).



In Frankreich und Belgien / Wallonien sind die Deiche derart bemessen, dass sie einen Hochwasserschutz mit einer Überströmungsfrequenz von 1/100 pro Jahr garantieren. In den Niederlanden wird die Maas bezüglich Ihrer Hochwassersicherheit in 2 Abschnitte unterteilt: Im südlichen Abschnitt bieten die Deiche einen Hochwasserschutz mit einer Überströmungsfrequenz von 1/250 pro Jahr (HQ250 = 3120 m³/s am Pegel Borgharen). Im Abschnitt der Maas bis zum Meer bieten die Deiche einen Hochwasserschutz mit einer Überströmungsfrequenz von 1/1250 pro Jahr (HQ1250 = 3800 m³/s am Pegel Borgharen). Basis für diese unterschiedlichen Sicherheitsniveaus ist die geografische Lage der Maas wie in Abb. 2 dargestellt.

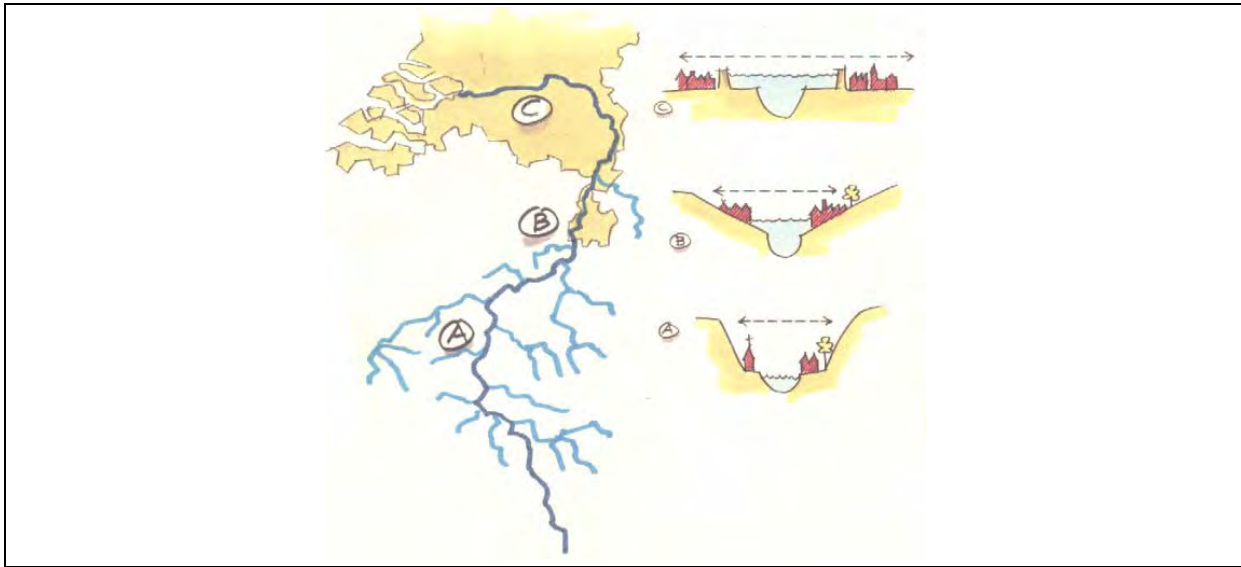


Abbildung 2: Querschnitte der Maas in ihrem Einzugsgebiet .

3. Motivation

Die weltweit prognostizierte Klimaveränderung für das kommende Jahrhundert hat in den Niederlanden einen Denkprozess in Gang gesetzt, der sich mit den möglichen Konsequenzen auf die Wasserwirtschaft beschäftigt.

Hierzu ist im Auftrag der Regierung eine Kommission eingerichtet worden. Diese hat in Jahre 2000 ein Gutachten präsentiert, das als Leitfaden im Umgang mit dem Wassersystem in den Niederlanden im kommenden Jahrhundert dient.

Für die großen Flüsse (Rhein, Maas, IJssel, Waal) wird ein 20% höheres maßgebendes Bemessungshochwasser als Ausgangswert festgelegt. (worst case im Jahre 2050). Für die Maas bedeutet dies eine Zunahme von HQ1250 = 3800 m³/s (im Jahre 2000) nach HQ1250 = 4600 m³/s (im Jahre 2050).

Die nachstehende Tabelle stellt die Eckdaten der Kommission für die Maas dar.

	2000	2050	2050	2050	2100
Temperatur [C]		+0,5	+1,0	+2,0	+4,0
Niederschlag Winter [mm]	350-425	+3%	+6%	+12%	+24%
Meeresspiegelanstieg [cm]		+10	+25	+45	+110
Maßgebender Maas-abfluss [m ³ /s]	3800	4000	4200	4600	5300

4. Das Projekt

Aus oben beschriebenem Hintergrund hat das Niederländische Ministerium für Verkehr und Wasserwirtschaft (V & W) von Januar 2001 bis März 2003 die Studie IVM (Abkürzung für nl.: *Integrale Verkenning Maas*, dt.: *Integrale Maasuntersuchung*) für die Maas in Auftrag gegeben. Ziel dabei war es, den *Einfluss des Klimas auf das Abflussregime der Maas* zu untersuchen, die Konsequenzen für die Gebiete entlang der Maas aufzuzeigen und ein Maßnahmenpaket zur Kompensierung der ansteigenden Pegel zu entwickeln. Dabei sollte das Prinzip „Raum für den Fluss“ maßgebend sein.

Neben dem Aspekt der Hochwassersicherheit ist als Zielsetzung die Verbesserung der Wohn- und Lebensqualität sowie der wirtschaftlichen Situation entlang der Maas – im weiteren Qualität des Raumes genannt - gleichwertig in die Studie einbezogen worden. Hintergrund hiervon ist, dass sich beide Aspekte gegenseitig verstärken können und nur hierdurch eine Akzeptanz in der Gesellschaft erreicht werden kann.

5. Die Partner

Unter der Federführung und mit Mitteln des Ministeriums für V & W haben das Ministerium für Landwirtschaft, das Ministerium für Raumordnung sowie die an die Maas angrenzenden drei Provinzverwaltungen (vergleichbar mit den Bundesländern) vier Wasserverbände und die angrenzenden Gemeinden diese Studie auf höchster politischer Ebene begleitet und ausgeführt. Die fachliche Begleitung erfolgte durch das RIZA (vergleichbar mit der BFG und der BAW) und zahlreichen Ingenieurbüros. Insgesamt waren circa 150 Personen an der Studie beteiligt.

6. Die Fragestellung

Die Studie richtet sich schwerpunktmäßig auf folgende Fragen:

- Welchen Effekt haben die erhöhten Abflüsse auf die Hochwasserstände?
- Welche Maßnahmen können in den Niederlanden realisiert werden?
- Welche Möglichkeiten bieten sich, um Hochwasserschutz und Verbesserung der Wohn- und Lebensqualität zu kombinieren?
- Welche Möglichkeiten bieten sich in Frankreich und Belgien / Wallonien, um Wasser während eines Hochwassers zurück zu halten?
- Wie sollen die Studienergebnisse konkret umgesetzt werden?

Zur Berücksichtigung der gebietsspezifischen Merkmale wird die Maas in 8 Abschnitte eingeteilt (siehe Abb. 3).

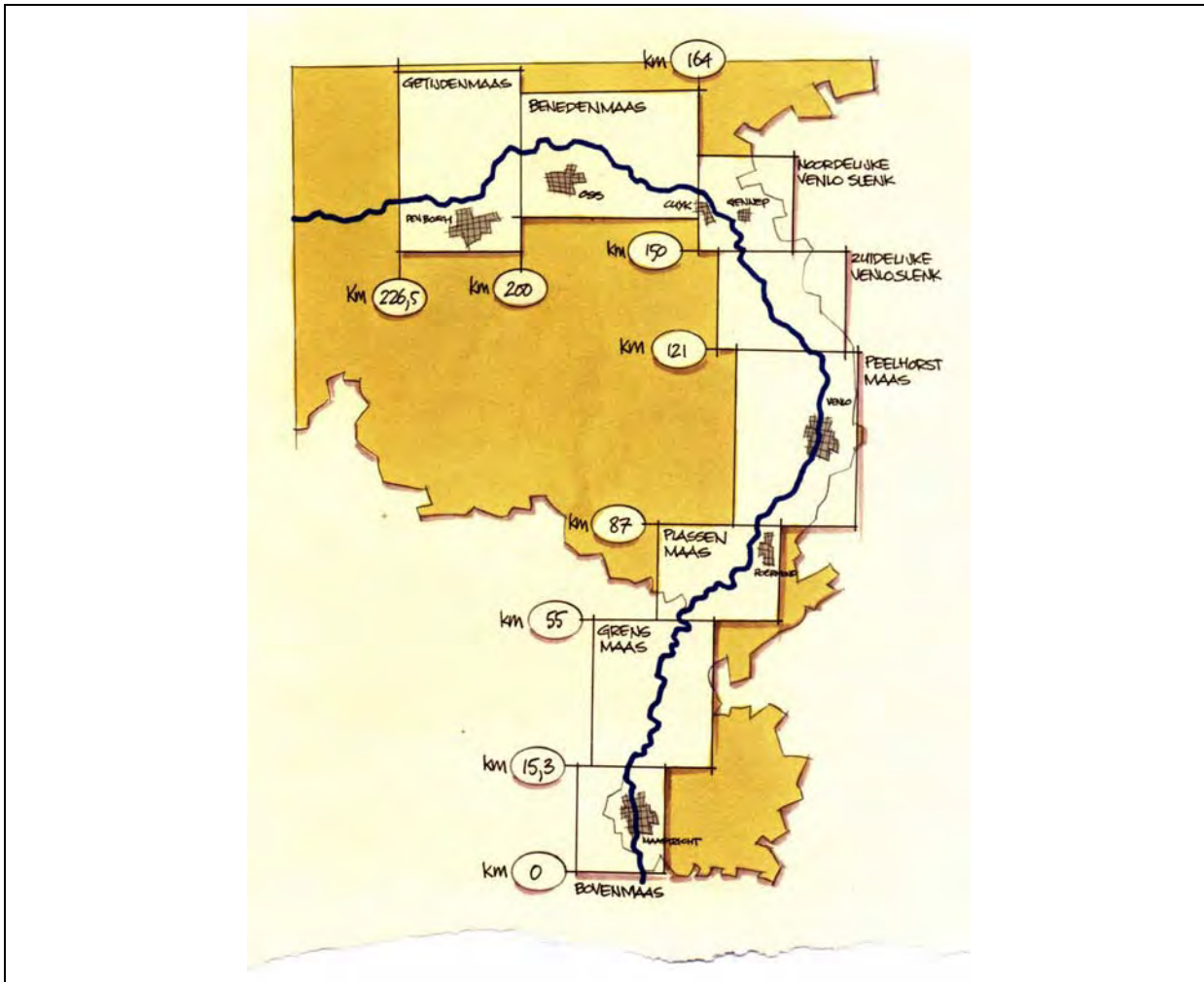


Abbildung 3: Die Maasabschnitte in den Niederlanden.

7. Der Anstieg der Hochwasserstände in der Zukunft

Mit Hilfe mathematisch- numerischer Strömungsmodelle wird der Anstieg der Hochwasserpegel entlang der Maas in der Zukunft berechnet. Die folgende Abbildung 4 zeigt das Ergebnis der Berechnungen. Auf der x- Achse sind die Maaskilometer von der belgisch- niederländischen Grenze bis zum Meer dargestellt, die y-Achse zeigt die Zunahme im Vergleich zur heutigen Situation (HQ1250).

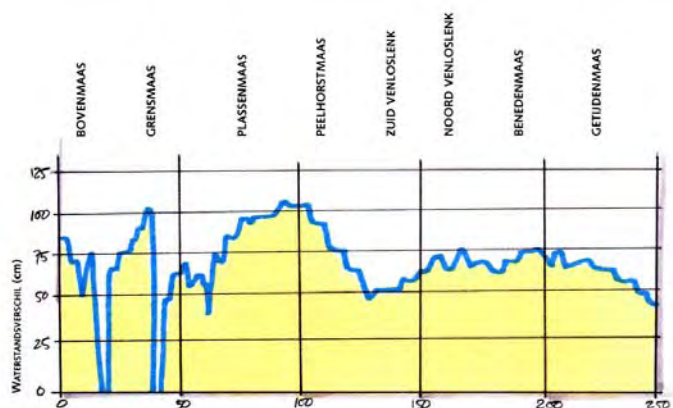


Abbildung 4: Berechnete relative Zunahme der Hochwasserstände der Maas im Jahre 2050.

Der erhöhte Abfluss hat im Mittel einen Anstieg des Bemessungswasserstandes von circa 75 cm zur Folge.

8. Die Maßnahmen

Zur Kompensation des zu erwartenden Pegelanstiegs werden in einem interaktiven partizipativen Prozess unter allen Beteiligten mögliche Flussbaumaßnahmen entlang der Maas in den Niederlanden inventarisiert und ausgearbeitet. Der Maßnahmenkatalog (insgesamt circa 160 Maßnahmen) umfasst dabei u.a. neben dem klassischen Vertiefen und Verbreiten des Flussbettes das Schaffen von Retentionsräumen, (grünen) Nebenflüssen, das Entfernen von Hindernissen im Flussbett oder das Verlegen von Deichen.

Diese 160 Maßnahmen bilden die Basis, um ein zusammenhängendes Konzept für die Zukunft zu entwickeln.

9. Die Qualität des Raumes

Ausgehend von den oben genannten 8 Maasabschnitten werden die charakteristischen Eigenschaften der Landschaft entlang der Maas beschrieben definiert. Hierzu werden verschiedene Unterscheidungskriterien verwendet, wie beispielsweise großmaßstäblich – kleinmaßstäblich, Stadt – Land oder Natur – Kultur. Hieraus ergeben sich potentielle raumordnerische Qualitäten, die richtungsweisend für die oben beschriebenen Hochwasserschutzmaßnahmen sind. Abbildung 5 zeigt das Ergebnis diese Teilstudie.

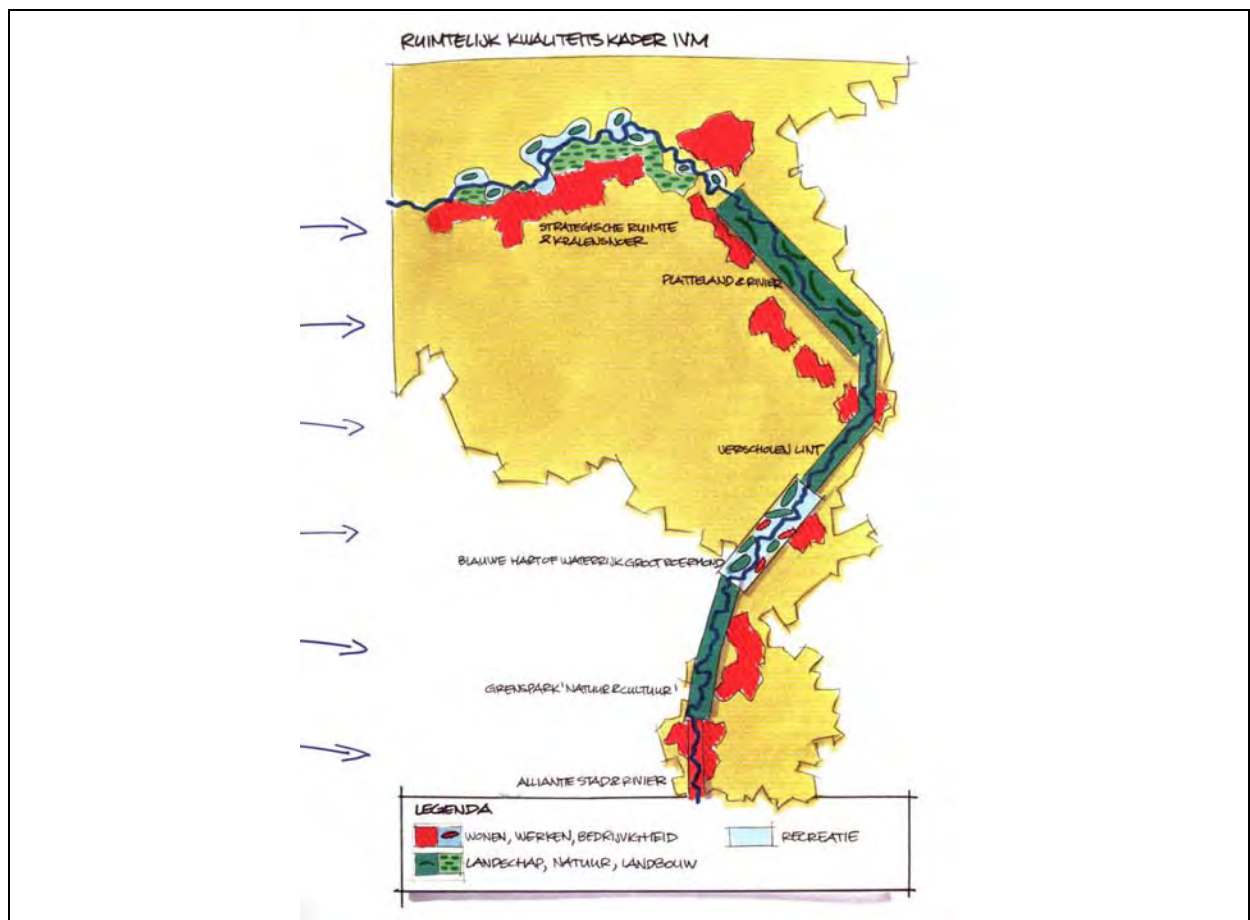


Abbildung 5: Die Qualität des Raumes entlang der Maas in den Niederlanden.

10. Die Strategien

In interaktiven Sitzungen wird ein Zukunftsbild der Maas als Richtschnur für den weiteren Studienprozess entwickelt. Das besondere Merkmal dieser Zukunftsvision ist es, dass der Hochwasserschutz nur einen Teilaspekt darstellt und viele andere Nutzungen miteinbezogen werden müssen. Besonders erwähnt seien dabei die Landwirtschaft, der Tourismus, die Maas als Verkehrsachse oder als attraktives Landschaftselement zur Wertsteigerung des Wohnungsbaues, kurz die Verbesserung der räumlichen Qualität.

Anhand dieser Vision können wasserbauliche Maßnahmen entsprechend kombiniert werden, so dass sowohl der für die Maas geforderte Hochwasserschutz erfüllt als auch die Bedürfnisse eines großen Teiles der Maasnutzer befriedigt werden können.

Für die Maas werden 3 Strategien entwickelt, die mit unterschiedlichen teils extremen Standpunkten das Spielfeld der Möglichkeiten und Grenzen abdecken. Diese Strategien, *Konzentration*, *Mosaik* und *Netzwerk* genannt, verbinden in besonderer Weise diverse räumliche Szenarien mit den Ansprüchen an einen modernen Hochwasserschutz.

Als Beispiel für eine der drei Strategien sei das Prinzip „Konzentration“ dargestellt (vgl. Abb. 6). Dieses Prinzip geht von großen, intensiv genutzten räumlichen Einheiten mit scharfen Grenzen aus. Dabei wird intensive Landwirtschaft in Stadtnähe betrieben, wirtschaftliche Kerngebiete liegen nahe der strategischen Transportachsen. Die Landschaft der Maas manifestiert sich als ein aneinander verbundenes Naturgebiet, und vitale, kompakte Städte mit Naherholungsgebieten sowie intensive Wassererholung in der Nähe der großen Seen realisiert wird.

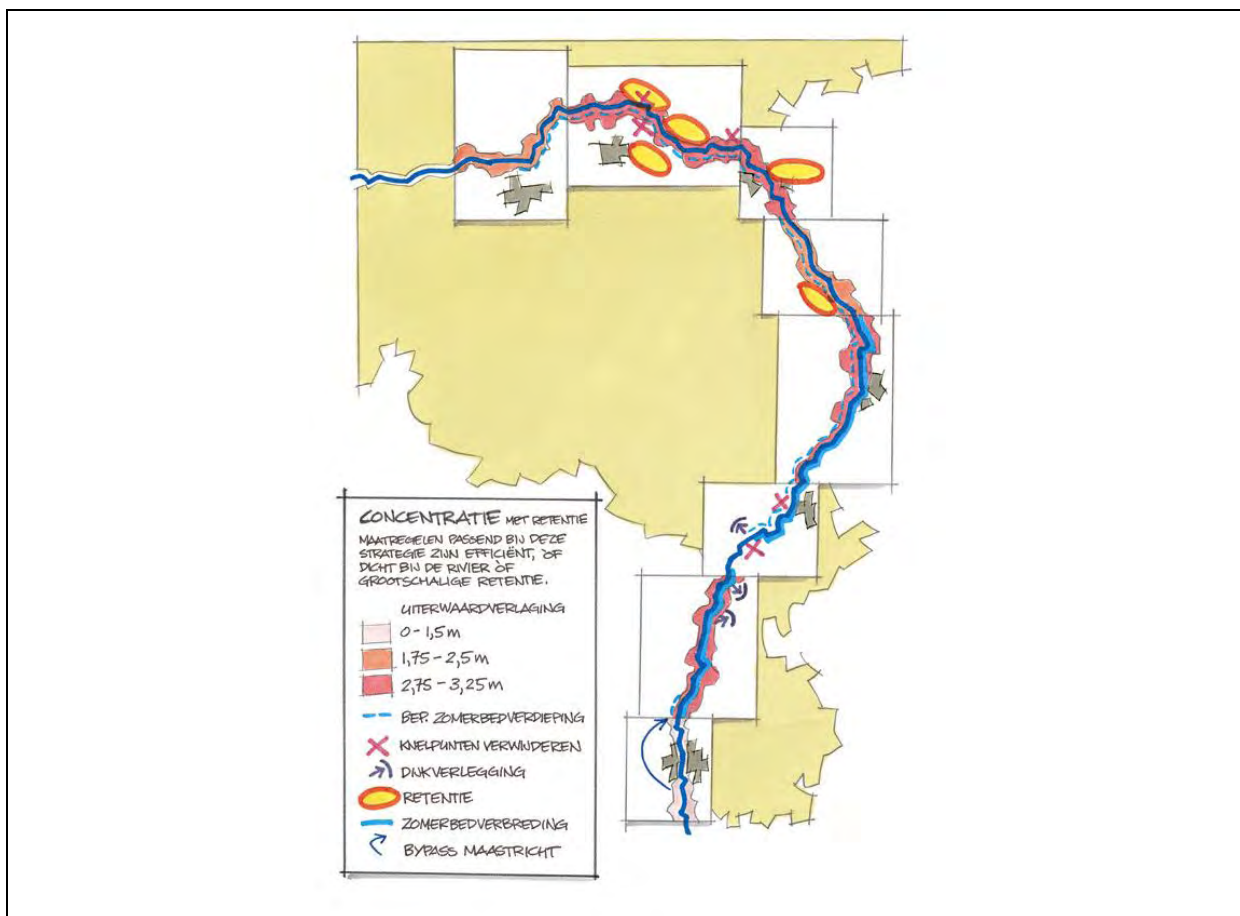


Abbildung 6: Strategie „Konzentration“.

Zum Vergleich werden die Strategien anhand diverser Kriterien bewertet. Basis ist, dass jede Strategie den Hochwasserschutz in der Zukunft gewährleisten muss. Kriterien sind Bau- und Unterhaltskosten, Verbesserung der Qualität des Raumes, Gebrauchsfunktionen wie z.B. Landwirtschaft, Natur, Erholung, Ökonomische Aspekte etc.

11. Die Möglichkeiten in Belgien und Frankreich

Parallel zur nationalen Analyse werden die Möglichkeiten der Oberlieger Belgien / Wallonien und Frankreich untersucht und als Basismaterial mit einbezogen. Ergebnis ist, dass kleinere Maßnahmen wie beispielsweise Flussrückbau oder kleine Retentionsgebiete keinen Effekt auf die Hochwasserabflüsse in den Niederlanden haben. Ursache hierfür sind die extremen Wassermassen und die damit verbundenen lang anhaltenden Niederschläge, die bereits für eine Sättigung des Einzugsgebietes gesorgt haben. Demgegenüber stehen großmaßstäbliche Maßnahmen wie beispielsweise Staudämme, die einen großen Teil der Problematik lösen könnten. Aller Voraussicht nach würden diese jedoch auf starken Widerstand in diesen Ländern stoßen. Zudem können die unterschiedlichen regionalen Sicherheitsstandards die Kombination von Flussbaumaßnahmen in der Praxis problematisch machen.

12. Das Ergebnis

Die entwickelten Strategien werden anhand verschiedenen Kriterien in einer Kosten-Nutzen Analyse miteinander verglichen. Neben den Kosten, die zwischen 3 und 13 Mrd. € variieren, werden die Effekte auf die Landwirtschaft, die Natur, den Tourismus und die Landschaft bewertet. Daneben wird die Robustheit der Strategien gegenüber verschiedenen Zukunftsszenarien zu möglichen gesellschaftlichen Entwicklungen dargestellt.

Es hat sich gezeigt, dass durch Maßnahmen nach dem Prinzip *Raum für den Fluss* die Problemstellung in den Niederlanden bei gleichzeitiger Verbesserung der räumlichen Qualität prinzipiell zu lösen ist. Dabei sei gesagt, dass die Thematik auf Grund hydraulischer und räumlicher Abhängigkeiten äußerst komplex ist und immer im Zusammenhang zu betrachten ist. Dies bedeutet vielfach eine Abwägung verschiedener Interessen, so dass großen Wert auf ein gutes Zusammenspiel zwischen Behörden und der Bevölkerung zu legen ist.

Seit Januar 2004 wird die Studie fortgesetzt, wobei der Schwerpunkt auf einer stärkeren Beteiligung der Gemeinden und regionalen Interessengruppen liegen wird. Ziel ist es, die Maßnahmen stärker mit den örtlichen politischen und planerischen Zielsetzungen abzustimmen und parallel dazu der Bevölkerung die Problematik Klimaveränderung mit ihren möglichen Konsequenzen ins Bewusstsein zu rufen.

Nach Beendigung dieser Studie im Jahre 2005 ist eine raumordnerische Reservierung der erforderlichen Gebiete geplant, die für den zukünftigen Hochwasserschutz frei gehalten werden müssen. Die Frage, ob wasserbauliche Maßnahmen in der Zukunft realisiert werden müssen, wird sich an Hand der tatsächlichen Entwicklung des Klimas und den damit verbundenen Konsequenzen für die Maas zeigen.



Nachhaltigkeit im Spannungsfeld von Globalisierung und Klimawandel¹

Franz J. Radermacher

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW), Ulm

1. Einleitung

Die Welt sieht sich spätestens seit der Weltkonferenz von Rio vor zehn Jahren vor der Herausforderung, eine nachhaltige Entwicklung bewusst zu gestalten. Das bedeutet insbesondere eine große Designaufgabe bzgl. der Wirtschaft, nämlich die Gestaltung eines nachhaltigkeitskonformen Wachstums bei gleichzeitiger Herbeiführung eines (welt-)sozialen Ausgleichs und den Erhalt der ökologischen Systeme, nicht zuletzt angesichts der immer deutlicher werdenden Klimaproblematik. Das ist ein komplexes Thema, und die Dramatik der Konstellation hat nach dem 11.9.2001 und jetzt nach dem weitgehenden Scheitern der Weltkonferenz Rio+10 in Johannesburg und jetzt nach den Ereignissen im Irak weiter zugenommen. Eine faire Wechselwirkung zwischen den Kulturen dieser Welt wird dabei zu einer Schlüsselfrage, wenn die Überwindung der Armut bei gleichzeitiger Beachtung vom Umweltschutzanliegen und einem vorsichtigen Umgang mit knappen Ressourcen gelingen soll. Technische und gesellschaftliche Innovationen sind dabei unverzichtbarer Teil jeder Lösung, reichen aber allein nicht aus.

2. Die Herausforderung eines adäquaten weltweiten Ordnungsrahmens

Nachhaltigkeit ist die große weltpolitische Herausforderung beim Übergang in ein neues Jahrtausend. Es ist dabei ein internationaler Konsens, dass Nachhaltigkeit zwei Dimensionen zusammen bringen muss: einerseits den Schutz der Umwelt, vor allem in einer globalen Perspektive, dann aber auch die Entwicklung der ärmeren Länder, insbesondere mit dem Ziel der Überwindung der Armut und der Herbeiführung weiterer Gerechtigkeitsanliegen.

Die Kernfrage, vor der die Welt seit dem Fall der Mauer steht, ist dabei, ob man dieses Ziel am besten dadurch erreicht, dass man Märkte immer weiter dereguliert und dann ausschließlich auf die Kraft dieser Märkte setzt, oder ob dieses Thema auch einen geeigneten gesellschaftlich-politischen Rahmen der Weltwirtschaft erfordert, so wie er typisch ist z. B. für die europäischen Marktwirtschaften, nämlich einen ökosozialen ökonomischen Rahmen im Sinne eines ordoliberalen Modells, das Modell des sogenannten Rheinischen Kapitalismus. Jedenfalls erscheint es als offensichtlich, dass heute die Entwicklungserfolge, die in Globalisierungsprozessen stattfinden, zu teuer erkaufte werden, nämlich zum einen mit einer massiven Zerstörung der Umwelt weltweit, vor allem auch im Bereich der Klimaproblematik, und zum anderen mit einer zunehmenden sozialen Spaltung sowohl im Norden, als auch im Süden dieses Globus. Das ist nicht friedensfähig. Das ist keine zukunftsfähige Entwicklung. Hier steht die Welt vor einer schwierigen Situation, und diese materialisiert sich beispielsweise in einem Ereignis wie dem 11.09.2001 und auch in der Frage, wie man damit umgehen soll.

¹ Beitrag zum 2. Symposium „Klimaveränderung und Konsequenzen für die Wasserwirtschaft“, Würzburg, 03./04. Mai 2004

Der Text beruht auf einem Beitrag zu der Tagung des Universitäts.Clubs Klagenfurt „Der Preis des Profits – Gesunde Wirtschaft auf Kosten von sozialer Sicherheit, Umwelt und Lebensqualität?!\“, Abbazia di Rosazzo, Friaul / Italien, 2003

Überarbeitung des Beitrags „Mit- und Gegeneinander der Kulturen in der globalen Informationsgesellschaft - Ein "Balanced Way" als Zukunftsentwurf“, erschienen in *TECHNIK WELT KULTUR*, Int. Kolloquium des Forums "Technik und Gesellschaft", Aachen, 01. Oktober 2002



3. Plünderung statt Zukunftsorientierung

Studiert man die Herausforderung einer nachhaltigen Entwicklung, dann ist man insbesondere mit dem Problem konfrontiert, dass heute in einer globalisierten Ökonomie mit inadäquaten weltweiten Ordnungsbedingungen das "Nachhaltigkeits"-Kapital, also die sozialen, kulturellen und ökologischen Bestände, von denen unsere Zukunft abhängt, massiv angegriffen werden. Wir organisieren heute einen internationalen Transport um den Globus fast zum Nulltarif mit enormen negativen Konsequenzen für das Weltklima, und wir haben in Form der Green Card Plünderungsmechanismen des Sozialkapitals ärmerer Länder durch reichere Länder etabliert. In der Summe führt das zu Instabilitäten, die die zukünftigen Lebenschancen bedrohen.

Große Teile der Menschheit, im Moment etwa drei Milliarden Menschen, sind extrem arm, müssen mit weniger als zwei EURO pro Tag auskommen, und wir merken, dass wir trotz der enormen wissenschaftlich-ökonomisch-organisatorischen Potenz der Menschheit offenbar nicht in der Lage sind, so elementare Anforderungen wie eine adäquate Wasserversorgung aller Menschen sicher zu stellen. Eine tiefere Ursache scheint dabei die Freihandelslogik der WTO in Verbindung mit den Wirkungsmechanismen der Weltfinanzsysteme zu sein. Dies ist ein Ordnungsrahmen, der soziale, kulturelle und ökologische Fragen eher nachrangig thematisiert bzw. zurück verweist auf die Ebene der Nationalstaaten. In der heutigen Globalisierung kämpfen dann aber die Nationalstaaten gegeneinander, z. B. um investives Kapital und befinden sich damit in einem gewissen Sinne in einer Gefangenen-Dilemma-Situation, die alle eher zwingt, Standards abzubauen als Standards international abgestimmt durchzusetzen.

Insbesondere ergibt sich dadurch ein vergleichsweise unkoordinierter, teilweise chaotischer Wachstumsprozess mit erheblichen sozialen Verwerfungen, der u.a. dadurch gekennzeichnet ist, dass er einen enormen Druck auf ökonomisch schwächere Kulturen ausübt. Diese Kulturen werden über das dauernde Angebot neuer Möglichkeiten, vor allem in Form von Werbung über die Medien, und angesichts der aus ihrer ökonomischen Schwäche resultierenden Fähigkeit, diese Angebote für die eigene Bevölkerung in Breite nutzbar zu machen, unter einen erheblichen Druck gesetzt, der in der konkreten Umsetzung dann mit sehr vielen materiellen Durchgriffen des reichen Nordens zu Lasten dieser Kulturen verbunden ist. Dies ist ein Zustand, aus dem eine hohe Frustration und letztlich ein enormer Hass resultieren, ein nachvollziehbarer Hass, der für das Miteinander auf diesem Globus eine enorme Belastung darstellt.

Die Religionen sind dabei in der Regel nicht, wie manchmal unterstellt wird, der eigentliche Treiber von Konflikten im Sinne eines „Kampfes der Kulturen“. Eher ist es so, dass tiefliegende Gerechtigkeitsfragen, die nirgendwo geeignet adressiert werden, dann gelegentlich in Religionen ihre kulturelle Separierungslinie finden, über die die eine Seite von der anderen Seite abgegrenzt werden kann, eine Funktion, die manchmal auch die Hautfarbe und manchmal die Sprache übernehmen. Nordirland zeigt uns, dass solche Konflikte im Kern offenbar nicht religiöser Art sind. Katholiken und Protestanten leben in Deutschland sehr harmonisch zusammen. In Nordirland offenbar nicht. Warum? Weil tieferliegende historische Gerechtigkeitsfragen das eigentliche Thema sind. Gerechtigkeitsfragen betreffen auf diesem Globus vor allem auch den sozialen Bereich und die Umweltsituation, die durch die Wirkungsmechanismen des globalen ökonomischen Systems massiv belastet wird. Die großen Themen der Zukunft sind hier: Wasser, Böden, Meere, Wälder, Klima und der Erhalt der genetischen Vielfalt.

4. Die Ökosoziale Marktwirtschaft und das Beispiel Europa

Die Frage ist: Muss der Globalisierungsprozess so zerstörerisch ablaufen, wie das heute der Fall ist? Oder gäbe es einen besseren Weg? Ja, es gibt ihn! Es gibt eine Alternative. Diese ist das europäische Marktmodell, die Ökosoziale Marktwirtschaft, der „Balanced Way“. Es ist dies die Logik, nach der insbesondere auch die Erweiterungsprozesse der Europäischen Union als eine kleine Form der Globalisierung gestaltet werden. Hier steht jetzt der nächste große Schritt der Erweiterung der EU nach Mittel- und Südosteuropa an. Das entscheidende Prinzip, auf das die EU setzt, ist ein fairer Vertrag zwischen den entwickelten und weniger entwickelten Ländern, in dessen Rahmen die weniger entwickelten Länder die hohen Standards der EU (den sogenannten *aquis communautaire*) übernehmen und damit auch einen Teil ihrer Wettbewerbsvorteile aufgeben oder anders ausgedrückt: uns vor dem bewahren, was wir gerne Dumping nennen, was aber aus Sicht dieser Länder ihr komparativer Vorteil ist. Ein solches abgestimmtes Vorgehen ist aber nur deshalb möglich, weil der reichere Teil der EU bereit ist, in Form einer Co-Finanzierung die Entwicklung dieser ökonomisch schwächeren Länder zu fördern. Das entspricht etwa der Idee eines Marshall-Plans, wie ihn die USA nach dem Zweiten Weltkrieg in Europa ebenfalls betrieben hat. Man muss vergleichsweise geringe Mittel einsetzen, größenordnungsmäßig 1 bis 2 % des Bruttosozialprodukts, dann scheint es möglich zu sein, Aufholprozesse ganz wesentlich zu beschleunigen und insbesondere sozial und fair auszugestalten. An dieser Stelle ist insbesondere auf den deutlichen Unterschied zwischen der EU und der nordamerikanischen NAFTA hinzuweisen. Dort muss die Grenze zwischen den Mitgliedsstaaten mit Militär bewacht werden. Innerhalb der EU können die Grenzen irgendwann ganz abgeschafft werden.

5. Ein Global Marshall Plan als politische Strategie

Es wäre heute nötig, diese Idee der Ökosozialen Marktwirtschaft auf den ganzen Globus zu erweitern. Das würde bedeuten, dass internationale Abkommen die Angleichung von Standards, z. B. bzgl. Ausbildung, Rechte der Frauen, Wasserversorgung, Umweltschutz etc. koppeln mit der Co-Finanzierung der Entwicklung der ärmeren Länder durch die reichen Länder. Entsprechende Vorschläge eines Global Marshall Plans liegen auf dem Tisch, vor allem von europäischer Seite. Zentral ist dabei die Co-Finanzierungsfrage. Hier wäre etwa an eine faire Besteuerung von internationaler Mobilität, eine Welt-Kerosin-Steuer, möglicherweise eine Tobin Tax auf Finanztransaktionen etc. zu denken, um die entsprechenden Mittel aufzubringen.

Aber das Problem ist heute, dass in allen weltweiten Prozessen dieses Typs die USA bzw. die jetzige US-Administration blockieren, und das, obwohl der früherer Vize-Präsident Al Gore einer der „Väter“ dieser Idee ist und dazu auch ein bemerkenswertes Buch geschrieben hat. Die USA sind jedenfalls nicht bereit, sich an Co-Finanzierung substantiell zu beteiligen. Das reichste Land der Welt kommt gerade mal auf absolut unzureichende 0,12% (vom Bruttosozialprodukt) Entwicklungshilfe. Allein die Erhöhung des US-Militäretats nach dem 11.09.2001 hat den 4-fachen Umfang, der Militäretat umfasst in 2003 das 32-fache Volumen der Entwicklungshilfe der USA, also etwa 3,8 % des US-Bruttosozialprodukts. Aber die z. Z. amtierende US-Administration argumentiert, dass mehr Entwicklungshilfe oder Co-Finanzierung eben auch der falsche Weg wären. Die Verantwortlichen sind überzeugt davon bzw. versuchen - gegebenenfalls militärisch flankiert, bzw. immer mit einer militärischen Drohung im Hintergrund - durchzusetzen, dass deregulierte freie Märkte das beste Entwicklungsprogramm darstellen, obwohl ganz offensichtlich ist, dass die Armut auf diesem Globus so nicht zügig überwunden und die Umwelt so nicht ausreichend geschützt werden kann. Gerade auch die enormen Probleme der New Economy und der Weltkapitalmärkte in jüngster Zeit und die dort erfolgten betrügerischen Umverteilungsprozesse hin zu Insidern im Zentrum des ökonomisch-finanziellen Systemkerns haben gezeigt, dass eine immer weitergehende Deregulierung nicht einmal zur Organisation klassischer ökonomischer Prozesse das



geeignete Instrument ist, um vom Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung erst gar nicht zu reden.

6. Die Rolle des technischen Fortschritts: Faktor-4- und Faktor-10-Konzepte

Viel geeigneter ist ein ökosozialer Rahmen, der die Möglichkeiten des technischen Fortschritts geeignet koppelt mit der Beachtung von Standards im Umweltbereich und im sozialen Bereich. Von der technischen Seite her ist dabei der entscheidende Ansatzpunkt der sogenannte Faktor-4 bzw. Faktor-10-Ansatz, der auf Wissenschaftler wie von Weizsäcker und Schmidt-Bleek vom Wuppertal Institut zurück geht und letztlich darauf abzielt, dass man versucht, über die nächsten fünfzig bis hundert Jahre das Weltbruttosozialprodukt zu vervielfachen, z. B. zu verzehnfachen, aber nur bei einer simultanen Erhöhung der Ökoeffizienz in einer Weise, dass man diesen vermehrten Umfang an Gütern und Services produzieren kann, ohne die Umwelt mehr zu belasten und ohne kritische Ressourcen in größerem Umfang zu verbrauchen als bisher.

Es geht also darum, mit demselben Volumen an Ressourceneinsatz, mit derselben Umweltbelastung wie heute dank besserer Technik substantiell mehr zu produzieren, mehr Güter und Services verfügbar zu machen. Hier ist das entscheidende Instrument der technische Fortschritt, um für immer mehr Menschen auf diesem Globus menschenwürdige Verhältnisse herbei zu führen.

7. Die Begrenzung kollektiven Tuns als größte Herausforderung: Bewältigung des Bumerang-Effekts

Es ist allerdings an dieser Stelle wichtig zu beachten, dass eine Erhöhung der Ökoeffizienz und eine Dematerialisierung nicht etwas prinzipiell Neues darstellen, sondern etwas, was der technische Fortschritt schon immer leistet. Ob damit letzten Endes eine nachhaltige Entwicklung erreicht wird, ist eine andere Frage, denn hierzu ist neben Technik noch etwas anderes notwendig: Hier sind vor dem Hintergrund ethischer Positionen gesellschaftliche Innovationen, noch genauer Weltverträge notwendig, die dem kollektiven Tun Grenzen setzen, nämlich dieses innerhalb bestimmter ökologisch-sozialer sowie kulturell akzeptabler Grenzen halten. Dabei ist das Durchsetzen solcher Limitationen und die Implementation solcher Grenzen in dem heutigen weltökonomischen System die eigentliche politische Herausforderung für eine nachhaltige Entwicklung.

Betrachtet man etwa die Klimafrage und die Herausforderung einer weltweiten Begrenzung der CO₂-Emissionen, dann geht es darum, dass man die kollektiven Emissionsumfänge limitiert, also zu insgesamt weniger Emissionen als heute kommt, das aber in einer Situation, in der China, Indien, Brasilien massiv aufholen und dadurch sukzessive immer mehr Emissionen erzeugen, weil man dort unserem Lebensstil - völlig nachvollziehbar - nacheifert.

Wie soll man in dieser Situation mit der Knappheit umgehen, mit der notwendigen Limitation? Es gibt hier sehr delikate Diskussionen zwischen Nord und Süd um die Frage, ob das Verteilungsschema "großvaterartig" sein soll, also jeder in etwa auf seinem bisherigen Niveau bleibt, was bedeuten würde, dass die Menschen in den bisher reichen Ländern auf Dauer sehr viel mehr CO₂-Emissionsrechte zugewiesen erhalten als die Menschen in den ärmeren Ländern. Oder ob die Menschen in den ärmeren Länder dasselbe Recht haben wie die Menschen in den reichen Länder, also im Prinzip aufholen dürfen und wir zu einer pro-Kopfgleichen Ausgangsverteilung der Emissionsrechte kommen sollten. Letzteres würde bedeuten, dass jeder Mensch als Ausgangspunkt die gleichen Verschmutzungsrechte erhält - das wäre heute dann etwa ein sechs Milliardstel des als zulässig erachteten Gesamtumfangs – und dann diese Rechte versteigert werden können. Dies würde bedeuten, dass der, der überproportional verschmutzt bzw. verschmutzen will, wie z. B. heute die US-Amerikaner, a-

ber auch die Europäer, sich bei den ärmeren Ländern dann zunächst einmal die dazu erforderlichen Verschmutzungsrechte kaufen müssten, was solche Emissionen erheblich verteuern und die Wirkung einer globalen Ökosteuer haben würde.

Das heißt, es geht im Kern darum, Folgewirkungen des technischen Fortschritts zu beherrschen. Oder anders ausgedrückt: Zu verhindern, dass wir trotz technischem Fortschritt und trotz immer höherer Effizienz dennoch gleichzeitig immer mehr „Natur“ verbrauchen, immer mehr Ressourcen verbrauchen und immer mehr Umweltbelastungen erzeugen, so wie das historisch bisher immer der Fall war. Man kann rückblickend sagen: „Die Geister, die ich rief, die werde ich nicht mehr los“. Die Technik hat immer Chancen für die Entlastung der Natur eröffnet, aber in der Summe haben immer mehr Menschen auf einem immer höheren Konsumniveau die Natur eher immer mehr belastet. Das nennt man den Bumerang-Effekt, den Rebound-Effekt (vgl. hierzu das Buch „Der göttliche Ingenieur“ von J. Neiryneck).

Die Bewältigung dieses Bumerang-Effekts ist das zentrale weltweite Thema zur Erreichung einer nachhaltigen Entwicklung. Und dieser Bumerang Effekt begegnet uns überall. Die Computer werden immer kleiner, aber die Menge an Elektronikschrott nimmt dauernd zu. Das papierlose Büro ist der Ort des größten Papierverbrauchs in der Geschichte der Menschheit. Trotz Telekommunikation reisen wir immer mehr und nicht weniger. Und während wir reisen, nutzen wir die Möglichkeiten der Telekommunikation und organisieren schon die nächste Reise.

Das heißt, die Technik ist immer nur eine Chance. Aber die Chance in eine Lösung umzusetzen erfordert, dass wir gleichzeitig über Weltverträge die notwendigen Limitationen in das weltökonomische System inkorporieren. Die WTO mit ihrer heutigen Freihandelslogik ist dazu nicht in der Lage. Wir müssen den Ordnungsrahmen der WTO inhaltlich fortentwickeln bzw. wir müssen diesen geeignet verknüpfen mit den internationalen Abkommen zum Schutz der Umwelt, mit den internationalen Abkommen zum Schutz der Arbeitnehmer und z. B. den internationalen Vereinbarungen zum Schutz der Kinder im Umfeld Kinderarbeit.

Und noch einmal: Dieses scheitert heute daran, dass gerade die ärmsten Länder Wert darauf legen, solche Standards gegebenenfalls nicht einhalten zu müssen, obwohl sie diese eigentlich zweckdienlich finden, damit sie nämlich auf dem Weltmarkt eine Chance haben. Und nur wenn die reichen Länder ihnen vernünftige Perspektiven und Co-Finanzierung, z. B. im Sinne der Logik der EU-Erweiterungsprozesse bieten, besteht eine Chance, mit ihnen zusammen die notwendigen Verträge auf dem Konsensweg abschließen zu können.

8. Die soziale Frage als Schlüsselthema: Überwindung der globalen Apartheid

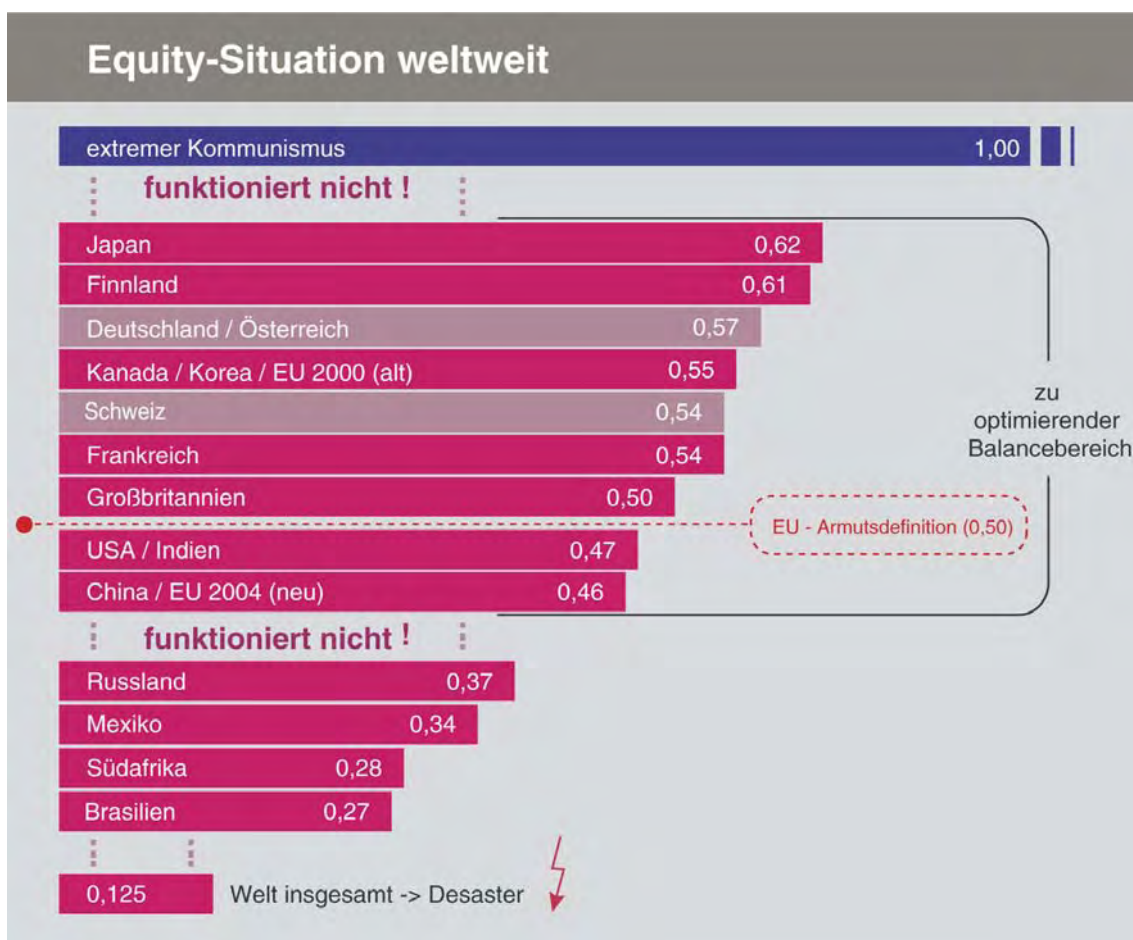
Das heißt, richtig betrachtet ist die Frage der nachhaltigen Entwicklung heute vor allem eine Frage der Einigungserfordernisse zwischen Nord und Süd bzw. zwischen Reich und Arm. Dabei geht es um Umweltstandards und Umweltschutzvorschriften, die man weltweit durchsetzen müsste, verbunden mit der Co-Finanzierung von Entwicklung, die es dann den ärmeren Ländern erlauben würde, in diesem Prozess dennoch wirtschaftlich aufzuholen. Oder wenn man es anders ausdrückt: Es geht um eine Perspektive für einen weltweiten sozialen Ausgleich unter gleichzeitiger Beachtung von Umweltschutzanliegen. Nach Aussagen von Prof. Töpfer, dem aus Deutschland stammenden UN-Verantwortlichen für die globale Umweltthematik, ist die weltweite soziale Frage heute die zentrale Frage überhaupt für das Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung.

Wenn man sich dieser sozialen Frage nähert, dann ist zunächst einmal zu begründen, wie man den Umfang an sozialem Ausgleich in Ländern messen will. Die EU-Logik nimmt hier den Vergleich der niedrigsten Einkommen im Verhältnis zum Durchschnitt zum Maßstab. Nach EU-Logik sollte niemand weniger Einnahmen haben als etwa die Hälfte des Durch-



schnitts (Bruttosozialprodukt pro Kopf) in dem jeweiligen Land, das entspricht einer Equity von 50 %.

Dies wäre zu kontrastieren mit einem extremen Kommunismus, bei dem die Equity bei 100 % liegt. Wir wissen historisch, dass ein zu hoher sozialer Ausgleich nicht gut funktioniert, er ist zu demotivierend, er fördert keine ökonomische Leistungsfähigkeit. Stattdessen braucht man Differenzierungen, man braucht durchaus die Möglichkeit, dass bestimmte Leistungsträger zwanzig Mal das Durchschnittsgehalt verdienen, wenn auch vielleicht nicht zu viele solcher Personen. Und dazu korrespondiert eben unvermeidbar, dass die meisten Menschen sich einkommensmäßig unterhalb des Durchschnitts befinden. Aber wie viele und wie weit? Schaut man sich die erfolgreichen Staaten auf dieser Welt an, dann haben sie alle eine Equity, die oberhalb von 45 % liegt. Die Deutschen liegen bei etwa 57 %, die Nordeuropäer und die Japaner oberhalb von 60 %. Das einzige erfolgreiche Land mit einer Equity unterhalb von 50 % sind die USA mit etwa 47 %. Und nicht viel darunter befinden sich Indien und China.



Es ist also empirisch so, dass alle erfolgreichen, d. h. alle pro Kopf reichen Länder dieser Welt in Bezug auf den sozialen Ausgleich einen Equityfaktor zwischen 45 und 65 % haben. Man kann auch inhaltlich begründen, warum unterhalb von 45 % Equity Länder nicht erfolgreich sein können, warum bei zu geringem sozialen Ausgleich ein Land in Bezug auf das Bruttosozialprodukt pro Kopf arm sein muss. Der tiefere Grund ist, dass in solchen Ländern nicht genügend in die Ausbildung und Gesundheit aller Bürger investiert werden kann. Man bekommt dann koloniale oder Apartheid-Strukturen mit sehr viel Dienstpersonal auf niedrigstem Ausbildungs- und sehr niedrigem Einkommensniveau - und das muss ein Land in einer Pro-Kopf-Perspektive arm machen. An dieser Stelle bricht das neoliberale Argument zusammen. Es ist zwar wahr, dass ausgehend von sozialistischen oder kommunistischen Gesellschaften die Erhöhung der Ungleichheit ein Land reicher macht und letztlich für (fast) alle

Menschen Vorteile bringt, aber etwa ab einer Equity von 65 % ist diese Aussage nicht mehr generell richtig, und spätestens unterhalb einer Equity von 45 % ist sie falsch. Die Unmöglichkeit, unter so niedrigen Equity-Bedingungen genügend viele qualifizierte Lehrer, Ärzte, usw. aufzubringen, um die gesamte Bevölkerung gut auszubilden, gesund zu halten etc. bedeutet, dass zum Schluss zu viele Menschen nicht mehr ausreichend wertschöpfungsfähig sind, zumindest nicht auf internationalem Niveau. Und die anderen, die dies sind, können für ihre Dienstboten in einer Pro-Kopf-Betrachtung das Geld nicht gleich noch mitverdienen. Insofern finden wir die niedrigsten Equity-Faktoren unter den großen Staaten auf diesem Globus heute in Ländern, die ein vergleichsweise niedriges Bruttosozialprodukt pro Kopf haben und in denen heute noch Zustände bestehen, die an frühere Kolonial- und Apartheidregime erinnern, wie z. B. in Lateinamerika (u. a. Brasilien) oder Afrika (inklusive Südafrika) mit Equity-Faktoren von nur etwa 27 – 30 %. Und natürlich ist diese Ungleichheit auch auf Dauer eine Wachstumsbremse. Ein Wachstum hin zu einem hohen Bruttosozialprodukt pro Kopf ist auf Dauer nur zu erreichen, wenn die Equity parallel zur Erweiterung der wirtschaftlichen Aktivitäten hin zu einem Niveau von mindestens 45 % entwickelt wird. Indien und China haben deshalb bessere Chancen als Lateinamerika und Afrika, einmal ein reiches Land zu werden.

Das größte Problem auf dieser Erde sind aber heute nicht die ungünstigen Verhältnisse in den meisten Ländern. Noch schlimmer ist heute vielmehr der Ungleichzustand des ganzen Globus, wenn man diesen als eine ökonomische Einheit sieht, was in Zeiten der Globalisierung zunehmend die richtige Betrachtungsweise ist. Der gesamte Globus befindet sich heute auf einem Equityniveau von unter 12,5 %. Das ist globale Apartheid, aber in einer deutlichen Verschärfung gegenüber den früheren Verhältnissen in Südafrika. Das ist ein absolut unerträglicher Zustand. Er signalisiert, dass die Ungleichheiten heute auf diesem Globus primär zwischen Ländern und nicht innerhalb der Länder liegen. Das Weltbruttosozialprodukt pro Kopf liegt heute bei etwa 5.000 €. Nach europäischer Armutsdefinition, angewandt auf den Globus, sollte kein Mensch unter einer Finanzausstattung von 2.500 Euro/Jahr liegen, also sicher nicht unterhalb von 6 Euro/Tag. De facto liegen heute 3 Milliarden Menschen unterhalb von 2 und 1 Milliarde innerhalb dieser 3 Milliarden sogar unterhalb von 1 Euro/Tag. Das ist ein Zustand, der absolut nicht friedensfähig ist, der auch mit Hass und Gegnerschaft verbunden ist. Die Ereignisse am 11.09.2001 sind sehr gut in diesem Kontext interpretierbar. Das entspricht dem Muster bei allen vorherigen Revolutionen der Weltgeschichte.

Damit soll nicht gesagt werden, dass die Ärmsten selber Revolutionen anzetteln oder effektiven Widerstand leisten. Dafür sind diese viel zu müde, abgearbeitet und zu schwach. Aber Armut und Ungerechtigkeit führen zu Konstellationen, in denen andere Personen im Zentrum des Systems sich berechtigt sehen, als - selbsternannte - Vertreter der Armen bzw. ihrer Interessen entsprechend zu agieren. In diesem Kontext sei daran erinnert, dass am 11.09. 4000 Menschen gestorben sind. Aus Sicht der USA rechtfertigt das heute Angriffskriege der stärksten Macht der Welt gegen vergleichsweise schwache Staaten, die als Gefahr empfunden bzw. dargestellt werden, und sei es nur, weil sie über Waffen verfügen und diese in den Händen von Terroristen ein Problem werden könnten. Aber es sei daran erinnert, dass auf diesem Globus jeden Tag 24.000 Menschen verhungern. Seit dem 11.09.2001 sind jeden Tag 24.000 Personen verhungert. Und wenn auch die meisten Menschen und vor allem Machtpromotoren im Norden nichts davon wissen wollen, dass sie irgend einen Anteil an diesem Verhungern haben, so wissen doch die meisten Menschen auf diesem Globus, dass das anders ist, und das ist auch die Position des Autors. Aber das sind im wesentlichen doch schwache Menschen und schwache Staaten, die sich nicht wehren können. Sie müssen hin nehmen, was ökonomisch und militärisch stärkere Länder ihnen aufoktroyieren. Wobei diese dann auch noch versuchen, mit verlogenen Argumenten wie „gleiche Chancen für alle“ (und das bei vollkommen ungleicher Ausgangssituation), das als gerecht zu "verkaufen", was unerträglich und ungerecht ist – eine doppelte Entwürdigung.



Aber diese Akteure im Zentrum des Systems sollten nicht glauben, dass das jemals so akzeptiert werden wird. Da baut sich ein Hass auf und dieser sucht sich Ventile, und wir müssen uns nicht wundern über das, was dann zum Schluss herauskommt und die Situation, wie sie dann ist, gerade auch im Bereich der Terror- und Selbstmordanschläge.

Hier liegt für eine nachhaltige Entwicklung sicher die größte Herausforderung. Die immer weitergehende Deregulierung der Märkte bringt alleine nicht die Antwort. Wer in einer globalisierten Ökonomie Sicherheit will, kann die sozialen Folgen der Globalisierung nicht den armen Nationalstaaten im Süden dieses Globus zuschieben. Was wir stattdessen brauchen, ist der Übergang zu einer Weltinnenpolitik, orientiert an der Art, wie wir in der EU Erweiterungsprozesse organisieren. Dabei würden wir alle miteinander für soziale Entwicklung und Armutsüberwindung verantwortlich sein und gemeinsam daran arbeiten, dass weltweit leistungsfähige Infrastrukturen aufgebaut werden, dass die Rolle der Frauen gestärkt wird, dass Ausbildungssysteme, Rentensysteme usw. etabliert werden, so dass wir dann insgesamt auch in einen Zustand kommen, bei dem die Bevölkerung weltweit nicht mehr wächst, die Zahl der Menschen irgendwann sogar wieder abschnilzt von absehbar neun bis zehn Milliarden Menschen im Jahr 2050, statt immer nur weiter zu wachsen wie bisher.

9. Frieden zwischen den Kulturen: Eckpfeiler jeder nachhaltigen Entwicklung

Die Frage der Wechselwirkung der Kulturen miteinander und der kulturelle Kontext als solcher ist wesentlicher Teil der angesprochenen (welt-)sozialen Thematik, denn das Soziale entfaltet sich im Rahmen der Kultur und die Kultur reflektiert die Tradition. Diese ist z. B. dadurch (mit-)bestimmt, dass und wie Großmütter und Großväter bestimmte Ansichten über die Welt und das Leben an ihre Enkelkinder weitergeben. Kulturelle Prägungen sind deshalb sehr tiefgehend und nicht rasch zu ändern und beinhalten zudem ein erhebliches seelisches Verletzungspotential, weil tiefste Gefühle der Zugehörigkeit und Tradition und Erwartungen aus Kindheit und Jugend unmittelbar berührt werden.

Wesentliche kulturelle Themen betreffen u. a. den Umgang der Generationen miteinander, ebenso das Verhältnis von Mann und Frau und den öffentlichen Umgang mit dem Thema der Sexualität. Diese Lebensbereiche haben höchste humane Signifikanz und sind teilweise in vielen Kulturen tabuisiert. Das kulturelle Gedächtnis reicht leicht über 50 bis 200 und mehr Jahre. Gesellschaftliche Veränderungen kultureller Muster gelingen in diesen Bereichen auf friedlichem Wege allenfalls über große Zeiträume. Die Globalisierung erlaubt wegen der engen ökonomischen Verknüpfung aller Länder und der weltweiten Verfügbarkeit von Informationen solche Anpassungszeiträume nicht mehr. Das Neue bricht wie eine Flutwelle nach einem Dammbruch über Menschen herein, die darauf nicht vorbereitet sind. Dabei wird erst gar nicht mehr die Frage gestellt, ob etwas an der westlichen Kultur falsch sein könnte. Und das, obwohl auf diesem Globus die Frage, wer recht hat, längst nicht zweifelsfrei und abschließend entschieden ist. Sind auf Dauer diejenigen konservativen (rückständigen?) Kulturen, die vieles verbieten, die nachhaltigsten, oder ist es der Westen mit seiner fast grenzenlosen Freiheit, eine Welt, in der (fast) alles erlaubt ist? Was sind die Resultate dieser Grenzenlosigkeit im Westen für den sozialen Zusammenhalt oder für Nachhaltigkeit?

In jedem Fall sollten, wenn Friedensfähigkeit das Ziel ist, Globalisierungsprozesse so ausgestaltet werden, dass sie den Frieden und den Ausgleich der Kulturen untereinander fördern, nicht die Konflikte verschärfen. Im Vordergrund steht insofern die Frage des kulturellen Ausgleichs, des würdevollen Umgangs miteinander, und zwar unabhängig von der Frage, wer ökonomisch, technisch oder militärisch im Moment stärker oder schwächer ist. Insbesondere darf Geld und Macht nicht immer wieder allein entscheiden, wer als Person oder Organisation oder welche Kultur sich im Konfliktfall durchsetzt und sei es nur in dem Sinne, dass die Kinder der "Verlierer" mit Informationen bzw. Angeboten eines Typs überschwemmt werden, die in dem jeweiligen anderen kulturellen Kontext nicht zulässig sind. Dabei geht es

auch um subtile Verführungen bzw. auch um ökonomische Zwänge, die in ihren Wirkungen mit den Lebensmustern der jeweils unterlegenen Kultur nicht verträglich sind.

Um es noch deutlicher auszudrücken: Das, was mit der weitgehenden Ausrottung der Indianer und ihrer Kultur in Amerika oder der Versklavung und kulturellen Vergewaltigung substantieller Teile der afrikanischen Bevölkerung während der Zeit der Kolonialisierung aufgrund ökonomisch, technischer und waffenmäßiger Überlegenheit der westlichen Kultur stattgefunden hat, sollte so nie wieder stattfinden und dies auch nicht in subtil verborgener Weise unter dem Deckmantel freier, formal auf Chancengleichheit hin ausgerichteter ökonomischer Prozesse bei absolut asymmetrischer Ausgangssituation, die inhärent nie fair sein können, weil wirkliche Chancengleichheit a priori nicht besteht.

Das heißt andererseits auch, dass ein vernünftiger weltweiter sozialer Ausgleich, also eine (Welt-) Equity à la EU-Armutsdefinition eine ganz wichtige Voraussetzung dafür wäre, dass wir zwischen den Kulturen zu besser balancierten Verhältnissen kommen würden, als das heute der Fall ist. Alle Investitionen in einen höheren weltsozialen Ausgleich sind insofern auch Investitionen in einen höheren kulturellen Ausgleich. Und zwar einfach deshalb, weil sich in der Folge dieses höheren Ausgleichs andere Kulturen ökonomisch besser als bisher gegen das heute dominierende westliche Modell behaupten könnten. Diese Beobachtung fällt in den Bereich einer weiteren sozialen Ausgleichsforderung (über eine hohe Equity insgesamt hinaus), dass nämlich klar separierbare Gruppen von Menschen nach Kategorien wie Hautfarbe, Religion, Geschlecht etc. alle in einer relativ ausgeglichenen Weise mit materiellen Gütern ausgestattet sein sollten. Es ist wenig friedensfähig, wenn sich die Armen dieser Welt offensichtlich unter einzelnen dieser Kategorien häufen, also die Zugehörigkeit zu einer dieser Gruppen zu einem Armutsrisiko wird. Es sei an dieser Stelle zum Vergleich daran erinnert, welcher unglaubliche Aufwand z. B. in einem deutschen Bundesland wie Baden-Württemberg betrieben wird, um zwischen zwei kulturell separierbaren Gruppen - "Baden" und "Württemberg" - Ausgleich zu schaffen, und das bei materiell und kulturell vergleichsweise kleinen Unterschieden. Und dann überlege man, wie wenig auf diesem Globus z. B. zwischen einer reichen westlichen Kultur und einer sich zurückgesetzt fühlenden islamischen Welt an Ausgleichsanstrengungen unternommen wird und wie viel Öl hier der Westen regelmäßig in aufreizender und selbstzufriedener Manier ins Feuer gießt.

Das bedeutet in der Konsequenz dann auch, dass rein individualistisch ausgerichtete Menschenrechtspositionen, wie sie insbesondere im angelsächsischen Raum vertreten werden, für eine Balance der Kulturen nicht adäquat sind. Menschenrechte sollten vielmehr mit Menschenpflichten verknüpft gesehen werden, wie das auch in einem sehr schönen Buch, das Helmut Schmidt herausgegeben hat, dargestellt wird. So würde man auch eine Brücke von den westlichen Denkansätzen hin nach Asien und den sehr viel stärker auf den Zusammenhalt von Gruppen ausgerichteten dortigen Philosophien schlagen. Die heutige Überbetonung von Individualrechten (z. B. freie Ortswahl) und deren Einforderung in ärmsten Ländern, die sich um Entwicklung bemühen, kann durchaus auch als öko- bzw. ressourcendiktatorische Aggression gewertet werden, nämlich als ein sehr subtiler Mechanismus, mit dessen Hilfe reichere Länder ärmere Länder an einer zügigen Entwicklung hindern, indem sie diesen "Unmöglichen" abverlangen, nämlich Verhältnisse, die wir auch bei uns nicht realisieren bzw. nicht bezahlen konnten, als wir uns auf einem ähnlich niedrigen Entwicklungsstand befanden wie diese Länder heute.

10. Weltethos und fairer Weltvertrag²

Letztlich geht es, wie oben dargestellt, um einen fairen Weltvertrag, den wir miteinander schließen müssen, wenn Nachhaltigkeit und Friedensfähigkeit erreicht werden sollen. Ein

²Dies ist das besondere Anliegen der **Stiftung Weltvertrag** (www.weltvertrag.org), deren Kuratoriumsvorsitzender der Autor ist.



solcher Vertrag muss fair zu allen Seiten sein. Er muss zustimmungsfähig sein. Ist das das Ziel, dann spielen Gespräche zwischen den Kulturen eine große Rolle. Hier sind die Beiträge des Weltparlaments der Religionen, aber auch die Anstrengungen zur Herausarbeitung eines Weltethos (Prof. Küng) als beispielgebend zu nennen. In solchen Diskussionsprozessen werden die gemeinsamen universellen ethischen Prinzipien herausgearbeitet, auf die sich alle große Kulturen und Religionen dieser Welt verständigen können. Wenn man dieses Ziel ehrlich verfolgt, dann erweisen sich die Intaktheit der Natur und die Unversehrtheit des einzelnen Menschen, seine Würde und die Gleichheit der Menschen untereinander als große Themen und dann muss insbesondere verhindert werden, dass de facto Double-Standards etabliert werden, so wie das heute oft passiert, wenn die USA z. B. einerseits den Irak angreifen, weil dort angeblich UN-Sicherheitsratsbeschlüsse boykottiert werden, Israel genau dieses aber permanent vorexerziert und das offenbar nicht einmal eine Erwähnung wert ist, vor allem auf Seiten der USA, die sich nichtsdestotrotz immer als Garant für Fairness und Gerechtigkeit zu präsentieren versuchen.

Ein weltethischer Entwurf ist kein einfaches Thema. Sicher wird man mit extremen Positionen konfrontiert werden, die wohl unter keinen Umständen - auch nicht temporär - duldbar sind, beispielsweise Beschneidungen von Frauen oder Steinigung von Verurteilten im Rahmen der Scharia in einigen islamischen Ländern. Allerdings sollte der Westen auch hier auf sich selber schauen. Das Justizsystem der USA setzt nicht nur nach wie vor die Todesstrafe ein, sondern sogar die Todesstrafe für Kinder. Die USA sind neben Somalia das einzige Land auf der Welt, das die Weltkinderkonvention nicht unterschrieben hat. Wir finden in den USA zudem auch heute noch einen religiösen Fundamentalismus, der nicht nur alle bevölkerungspolitischen Maßnahmen der UN aktiv bekämpft, sondern auch in einigen US-Bundesstaaten den "Kreationismus" als offizielle Alternative zur biologischen Evolution im Schulunterricht durchgesetzt hat. Dies gilt in derselben Weise für eine religiös begründete Landnahme Israels an palästinensischem Land, die sich immer wieder auf vermeintliche jahrtausendalte Rechte beruft und dabei dem Völkerrecht diametral zuwider läuft.

Eine Diskussion über ethische Standards, die versucht, zustimmungsfähig auf diesem Globus zu sein, muss also neben dem einen Fundamentalismus auch die anderen benennen und auch dort zu Änderungen kommen. Zumindest dann, wenn es das Ziel ist, dass eine solche Ordnung im Herzen aller Menschen, auch im Herzen der Bevölkerung der großen arabischen Staaten, angenommen werden kann.

Jedenfalls zeigt das gute Zusammenleben von Katholiken und Protestanten z. B. in Deutschland, dass ein Konflikt wie derjenige in Nordirland vernünftigerweise nicht als im wesentlichen religiös begründet und als in seinem Kern nicht überwindbar verstanden werden sollte. Es handelt sich nicht primär um einen Konflikt zwischen Kulturen (im Sinne eines Kampf der Kulturen) oder um einen Konflikt zwischen zwei Formen des Christentums. Es geht eher darum, bestimmte ungerechte Konstellationen zu überwinden, die sich rein lebenspraktisch manchmal über Religionen, manchmal über Sprache, manchmal über Hautfarbe voneinander differenzieren, wie das oben bereits beschrieben wurde. Und auch der Islam ist nicht per se eine Religion, die Modernisierungs- und Säkularisierungsprozesse von vorne herein ausschließen würde. So gibt es mit der "Anhörungsdimension" im Islam eine Brücke hin zur Demokratie, die ausgebaut werden kann. Die Toleranz islamischer Staaten gegenüber anderen Religionen im Mittelalter war vorbildlich. Die Förderung von Frauen im Bereich der Wissenschaft ist in manchen islamischen Ländern sehr viel früher erfolgt als im Westen. Das heißt, dass es offensichtlich eine Chance der Weiterentwicklung des Islam und der islamischen Staaten hin zu einem vernünftigen globalen Kontrakt gibt. Hieran, wie an einem Weltethos, ist zu arbeiten. Das ist mühseliger als rasches militärisches Zuschlagen. Und es erfordert sicher mehr Intelligenz, nämlich Empathie, also die Fähigkeit, von der eigenen Position zu abstrahieren und zu versuchen, den anderen zu verstehen und auch von ihm zu lernen: Nicht überheblich und immer alles besser wissend, sondern eher bescheiden.

11. Was jetzt Not tut; die 10~>4:34 Formel für einen Balanced Way

Entscheidend für die Bewältigung der beschriebenen Probleme und Herausforderungen ist, was nun auf Weltordnungsebene passiert. Entscheidend ist, was wir tun, um z. B. die WTO geeignet mit anderen Regimen, mit anderen globalen Ordnungssystemen zu verknüpfen. Und das ist dann die Frage eines ökosozialen Konsenses, der anzustreben wäre. Wenn man das Ganze richtig angeht, dann haben wir durchaus für die Welt eine vernünftige Perspektive, eine ökosoziale Perspektive. Es wäre denkbar, einen Faktor 10 an Wachstum über die nächsten 50 bis 100 Jahre in eine Vervierfachung des Reichtums im Norden dieses Globus und eine dazu korrespondierende mögliche Vervierunddreißigfachung des Wohlstands im Süden dieses Globus zu überführen.

Der Norden würde sich dabei von heute 80 % des "Kuchens" in Richtung auf 32 % des verzehnfachten Volumens der Weltökonomie bewegen. Der Süden könnte sich als Folge dieser Entwicklung von heute nur 20 % des "Kuchens" hin zu 68 % des dann zehnmal größeren Weltbruttosozialprodukts bewegen. Das wäre eine Vervierunddreißigfachung des dortigen Bruttosozialproduktes. In Wachstumsraten entspricht das im Norden in etwa einer mittleren Wachstumsrate von 2,8 %, im Süden einer mittleren Wachstumsrate von etwa 8 % über 50 Jahre. Dies ist besser als die heutige Rate in Indien, schlechter als die Rate in China und insgesamt nicht unrealistisch. Länder, die aufholen, müssen primär nur kopieren, können deshalb hohe Wachstumsraten erzielen. Länder an der Spitze, reiche Länder, müssen Innovationen erfinden. Tatsächlich lässt sich auf Grund prinzipieller Überlegungen zeigen, dass in entwickelten reichen Ländern Wachstumsraten über 1 – 2 % kaum möglich sind. Die immer wieder überraschenderweise höheren Werte der USA sind – neben indirekten Effekten von rein spekulativen Finanzmarkt-Blase - vor allem eine Folge einer anderen Buchführungsmethode, bei der der technische Fortschritt weit über die Marktpreise hinaus als Wachstum gewertet wird (sogenanntes Hedonic Accounting). Das mag aus systematischen Gründen durchaus berechtigt sein, so lange aber andere Länder das nicht tun, sind Vergleiche irreführend. Die hier besprochene Limitation auf 1 - 2 % Wachstum reicher Länder bezieht sich darauf, dass man kein Hedonic Accounting betreibt, also das Wachstum zu Marktpreisen wertet.

Wenn wir allerdings weltweit beides vernünftig miteinander kombinieren, also die hohen Wachstumsraten aufholender und die niedrigeren (aber im absoluten Zuwachs ähnlich hohen) Wachstumsraten reicher Länder, könnten wir uns im Jahr 2050 in einer Situation befinden, in der die Menschen im Norden pro Kopf durchschnittlich nicht mehr sechzehn mal so reich sind wie die Menschen im Süden, so, wie das heute als Ausdruck einer „Globalen Apartheid“ der Fall ist, sondern nur noch etwa doppelt so reich, wobei sie zugleich im Schnitt viermal so reich wären wie heute. Das wäre dann ein Ausgleichsniveau à la Europäische Union und würde durchaus auch eine Perspektive für eine Weltdemokratie eröffnen. Nicht viel anders als jetzt im Prozess der Ausgestaltung der EU die Chance, die der Europäische Konvent für Europa bietet.

Das ökosoziale Modell eröffnet insofern eine hoffnungsvolle Zukunftsperspektive. Es ist dieses ein Ansatz, der Menschenwürde und Schutz der Umwelt gleich ernst nimmt, und von einfachen Lösungsphilosophien Abschied nimmt. In dieser Sicht wird eine immer weitergehende Deregulierung und immer mehr soziale Ungleichheit die vor uns liegenden Probleme nicht lösen, hoffentlich aber die Aktivierung der Kräfte der Märkte unter vernünftigen Rahmenbedingungen sozial-kulturell-ökologischer Art. Der Autor gibt diesem hoffnungsvollen nachhaltigen Programm allerdings nur 35 % Wahrscheinlichkeit. Was wären dann die Alternativen? Diese Frage wird weiter unten nach Vorüberlegungen zu Wohlstand, Wachstum und sozialem Ausgleich behandelt.



12. Wohlstand, Wachstum, sozialer Ausgleich: Einige neuere Ergebnisse

Der Autor hat sich in den letzten Jahren vor allem im Kontext des EU-Projekts TERRA3 vertieft mit dem Zusammenhang von Wohlstand, Wachstum und sozialem Ausgleich beschäftigt. Einiges hierzu wurde bereits an anderer Stelle in diesem Text erwähnt. Versteht man unter Wohlstand ein hohes Bruttosozialprodukt pro Kopf, so ist zunächst zwischen reichen und armen Ländern zu unterscheiden. Alle reichen Länder auf dieser Welt haben einen hohen sozialen Ausgleich, genauer eine Equity zwischen 45 und 65 % und sind Demokratien. Es gibt dabei systemimmanente Begründungen, warum bei Staaten mit hohem Wohlstand die Equity einerseits nicht oberhalb von 65 %, aber andererseits auch nicht unter 45 % liegen kann. Es geht dabei zum einen um eine ausreichende Honorierung von Spitzenleistungen und Risikoübernahme und damit um eine ausreichende Differenzierung (deshalb keine Equity über 65 %), zum anderen aber um die Möglichkeit, eine exzellente Ausbildung und medizinische Versorgung für die gesamte Bevölkerung sicherzustellen. Letzteres verlangt entsprechend viele gut bezahlte Spezialisten. Daraus resultiert ein soziales Ausgleichsniveau von mindestens 45 %.

Wachstum in reichen Ländern geschieht im wesentlichen nur noch durch Innovation. Hier muss Forschung gefördert werden, hier müssen Innovationen erfolgen und in Märkten umgesetzt werden. Demokratien mit einer massiven Förderung von Forschung und Technologie bieten hierfür die besten Voraussetzungen. Die Wachstumsraten selber sind dabei, wenn man kein Hedonic Accounting zulässt, auf gut 1 - 2 % beschränkt. Das ist angesichts des Reichtums dieser Länder dann auch schon eine ganze Menge.

Ganz anders ist die Situation bei Ländern, die aufholen. Diese Länder sind vergleichsweise arm, sie haben teilweise keinen hohen sozialen Ausgleich, und sie können in jedem Fall, weil sie so weit zurückliegen, hohe Wachstumsraten erzielen, einfach schon dadurch, dass sie Lösungen kopieren und zugleich immer mehr Menschen in eine formalisierte Ökonomie einbeziehen. Wachstumsraten bis zu 10 % sind denkbar (Leapfrogging), wenn auch nicht selbstverständlich. Eine Demokratie ist für die Organisation solcher Aufholprozesse nicht unbedingt die vorteilhafteste Struktur. Autoritäre Systeme wie in Singapur oder heute in China können von Vorteil sein, obwohl andererseits Japan gezeigt hat, dass zumindest unter den japan-spezifischen Demokratiebedingungen ebenfalls ein hohes Wachstum möglich war. Auf Dauer reich werden können die Menschen allerdings nur, wenn eine hohe Equity besteht, so, wie das in Japan und Korea und auch in Singapur der Fall war und ist, und sich in China und Indien andeutet, und zumindest am Ende des Aufholprozesses scheinen demokratische Strukturen notwendig zu sein. Länder wie Brasilien und Südafrika haben aus dieser Sicht im Gegensatz zu China und selbst Indien wenig Chance, auf Dauer wirklich reich zu werden, es sei denn, dass irgendwann das Problem des sozialen Ausgleichs gelöst wird. In Brasilien ist dazu u. a. endlich eine andere Verteilung des Bodens (Bodenreform) durchzusetzen. Bis heute wirken in diesen Ländern frühere koloniale Muster des "Oben" und "Unten" weiter, ebenso wie in Südafrika, wo im ökonomischen Bereich und im Bereich der Ausbildung die alten Apartheidstrukturen bis heute nicht wirklich überwunden werden konnten, obwohl doch immerhin Fortschritte erkennbar sind.

Ein gewisses moralisches Dilemma liegt darin, dass die Reichen entsprechender Länder nicht unbedingt ein Interesse daran haben, den Wohlstand pro Kopf zu erhöhen. Aufgrund der sehr viel niedrigeren Equity-Rate gibt es z. B. in einem Land mit einer Equity von etwa 30 % mehr Menschen eines bestimmten absoluten Reichtumsniveaus als in einem pro Kopf doppelt so reichen Land mit einer Equity-Rate von 60 %. D. h., es gibt dort mehr Reiche mit mehr als dem Zehnfachen des Durchschnittseinkommens als in den reichen Land Reiche mit dem fünffachen Durchschnittseinkommen. Es gibt also mehr Reiche in einem absoluten Sinne, in einem relativen ohnehin, zudem profitieren diese ein weiteres Mal von den sehr preis-

³ TERRA (www.terra-2000.org)

werten personennahen Dienstleistungen, die in reichen Ländern mit hohem Equity-Faktor praktisch gar nicht finanziert werden können.

Bei einer entsprechenden Ungleichheit haben die Eliten zudem extrem viele Möglichkeiten, ihre eigene Position politisch und intellektuell durch Einsatz von Geldmitteln zu stabilisieren, während die sozial schwache Seite, also die große Mehrheit der Bevölkerung, gar nicht in der Lage ist, einen entsprechenden intellektuellen Gegenprozess zu organisieren und das auch unter formal demokratischen Bedingungen. Man sieht dies in Teilen heute auch bereits in den USA, wo es mittlerweile der "Spitze der Pyramide" gelingt, den intellektuell-politischen Betrieb auf die Abschaffung der Erbschaftssteuer hin zu formieren. Die hier von der „Spitze“ eingesetzten substantiellen Geldmittel zur politischen Beeinflussung über Think Tanks und Universitäten wären extrem „wertschöpfend“ investiert und würden mit extrem hohen Renditen an die reichen Geldgeber zurückfließen, wenn es auf diese Weise gelänge, in den USA die Abschaffung oder substantielle Absenkung der Erbschaftssteuer durchzusetzen.

13. Wege ins Desaster: Plünderung bis zum Zusammenbruch oder ökodiktatorische Sicherheitsregime

Oben wurde einem ökosozialen, zukunftsfähigen Weltordnungsrahmen im Sinne einer ökosozialen Marktwirtschaft nur 35 % Erfolgswahrscheinlichkeit eingeräumt und es wurde die Frage nach den Alternativen gestellt. In Zukunft drohen zwei Alternativen: Die eine ist, dass wir weiter so wie bisher tun, als könnten wir die ökologischen und sozialen Systeme weltweit weiter überstrapazieren, soviel wir wollen. Wir werden dann irgendwann die Basis unterminieren, von der unsere Zukunft und die Zukunft unserer Kinder abhängt. Wir werden in extreme Knappheiten hinein laufen, z. B. in den Bereichen Wasser, Ernährung und Energie oder in Form zu hoher CO₂-Emissionen und wir werden Mord und Totschlag erleben bei dem Versuch, sich im Kampf gegeneinander knappe und zu knappe Ressourcen bzw. Verschmutzungsrechte zu sichern in einem Rennen, das langfristig so oder so für niemanden mehr eine Perspektive eröffnet. Dieser Fall bedeutet, dass wir "ökologisch gegen die Wand fahren" und in nicht mehr versicherbare Zustände hinsichtlich der Umweltproblematik kommen. Dies ist das AngstszENARIO aller Grünen und umweltbewegten Menschen auf diesem Globus. Der Autor hält dieses Szenario allerdings für sehr unwahrscheinlich.

Aus seiner Sicht wird die Menschheit, vor allem die reiche Welt, nicht so dumm sein, dass sie letztlich diesen desaströsen heutigen Weg auf Dauer weiter verfolgen wird, denn sie würde ihre eigene Basis zerstören. Die Wahrscheinlichkeit für diesen Desaster-Weg liegt aus Sicht des Autors bei vielleicht 10-15 %. Um es noch deutlicher zu sagen, die Spitze der Pyramide in Eigentumsfragen ist normalerweise eigentums-obsessiv und geht hart und brutal gegen jede Entwicklung vor, die ihre als legitim empfundenen Eigentumsinteressen bedroht. Von Rechtsanwälten und Polizei bis hin zum Militär sind hier in der Historie immer wieder alle Mittel zum Schutz des Eigentums eingesetzt worden, koste es, was es wolle. Der Autor geht deshalb davon aus, dass dies auf diesem Globus nicht anders sein würde, wenn es je zu ernststen Ressourcenkonflikten käme oder auch zu Konflikten, die aus Umweltverschmutzungsproblemen resultieren (z. B. bezüglich der CO₂-Problematik). Insofern ist es die Position dieses Textes, dass wir ökologisch wahrscheinlich nicht gegen die Wand fahren werden, was aber noch nicht notwendigerweise bedeutet, dass wir eine vernünftige zukunftsfähige Lösung bekommen. Zunächst bedeutet es aber, dass wir aus Sicht des Autors mit etwa 85 % Wahrscheinlichkeit auf Dauer in der Weltökonomie mit dem Problem der physikalischen Grenzen vernünftiger umgehen werden, als wir das heute tun, dass wir also zu Lösungen kommen werden, die letzten Knappheiten, also physikalische Notwendigkeiten, irgendwie in das weltökonomische System integrieren. Die Problematik der Vermeidung einer ökologischen Katastrophe verschiebt sich dann aber auf die Frage, wie dieses Ziel erreicht werden wird.



Es bleiben dann zwei Möglichkeiten. Die eine Möglichkeit ist der ökosoziale Weg, ein fairer Vertrag. Das ist das, was oben ausführlich beschrieben und mit der Wahrscheinlichkeit 35 % eingeschätzt wurde. Aber es gibt eine Alternative, eine zunächst undenkbare, aber beim längeren Nachdenken dann doch naheliegende, verführerische Perspektive, nämlich eine Öko- bzw. Ressourcendiktatur, verbunden mit einem Sicherheitsregime. Dieser 3. Fall ist aus Sicht des Autors der wahrscheinlichste (50 %). Hier würde irgendwann der reiche Norden dem armen Süden die Entwicklung verwehren, so wie die Reichen den Armen gerne die Entwicklung verwehren, einfach deshalb, weil es in einem "Business as usual"-Ansatz ökologisch nicht auszuhalten wäre, wenn die Armen täten, was die Reichen schon immer tun. Hier müssten dann insbesondere die Reichen die Entwicklung der ärmeren Länder (z. B. schon relativ bald Chinas) behindern oder diese Länder sogar destabilisieren. Und da die reichen Länder allesamt Demokratien sind, stehen wir vor der Frage, ob so etwas denkbar ist.

Sieht man sich die Politik der letzten Jahre an, insbesondere die Politik der USA seit dem 11.09.2001 und die Politik in Israel seit der Regierungsübernahme von Premierminister Scharon, dann sieht man bereits ganz offensichtlich Elemente einer solchen öko- oder ressourcendiktatorischen sicherheitsorientierten Strategie. In Israel ist dies in besonderer Weise zu verfolgen in der dauernden Zerstörung der Infrastruktur der Palästinenser durch das israelische Militär und beispielsweise in der Vorenthaltung medizinischer Hilfe für schwer kranke Palästinenser. Konkret durchgesetzt wird dies beispielsweise durch die Verhängung von Ausgangssperren und durch die Verweigerung des Durchlasses von Krankenwagen in Richtung Krankenhäuser an Kontrollpunkten. Dies wird beispielsweise von Seiten medizinischer Hilfsorganisationen, die in den Palästinensergebieten tätig sind, dauernd als skandalös beklagt. Es ist nach Aussage dieser Nichtregierungsorganisationen geradezu eine Ungeheuerlichkeit, was da täglich vor den Augen der Welt ohne vernehmbare Proteste der demokratischen Staaten stattfindet.

Auf der US-Seite ist die Verweigerung, sich fair in den Kyoto-Vertrag einzubringen, entlarvend. Nimmt man den Cheney Report über den zukünftigen Energiebedarf der USA und die Pentagonstudie zur Folge einer möglichen Klimakatastrophe hinzu, wird die ganze Problematik für jeden offensichtlich. Noch deutlicher gilt dies für den fast obsessiven Kampf der USA gegen einen Internationalen Strafgerichtshof. Symptomatisch ist die regelmäßige Weigerung der USA, sich im Rahmen fairer globaler Verträge zu bewegen, und ebenso eine dauernde Einforderung spezieller, stark individuell-orientierter Menschenrechte in armen Ländern, die dies alles nicht bezahlen können. In eine ähnliche Richtung zielen Bemühungen auf OECD-Ebene, Kredite für Investitionen in ärmeren Ländern nur noch dann staatlicherseits über Bürgschaften abzusichern, wenn Produkte höchsten technischen Standards gekauft werden. Dies nimmt, wenn keine Co-Finanzierung erfolgt, armen Ländern große Teile ihrer Wettbewerbsfähigkeit. Besonders gravierend ist desweiteren die Bekämpfung bevölkerungspolitischer Maßnahmen der Vereinten Nationen durch die USA. All das erschwert natürlich Entwicklung. Am wenigsten akzeptabel ist aber das dauernde Beharren der USA auf dem Recht, alleine entscheiden zu dürfen, ob eine Aggression vorliegt, gegen die sie präventiv operieren dürfen, so wie dies der neuen militär-strategischen Doktrinen der USA entspricht. Dies führt zu Willkürentscheidungen aus Sicht der Betroffenen. Der durch nichts zu rechtfertigende Angriffskrieg gegen den Irak zeigt dieses Muster, vor allem wenn man den Vergleich mit Israel hinsichtlich der Nichtbeachtung von UN-Sicherheitsratsbeschlüssen und daraus abgeleiteten Konsequenzen betrachtet.

Mit dem Irak-Krieg haben die USA hier klar Stellung bezogen. Es ist dies kein durch die UN-Charta oder durch die UN legitimer Krieg. Es ist dies vielmehr ein klassischer Angriffskrieg einer Nation zur Durchsetzung und Wahrung ihrer Interessen, und seien es die offiziell genannten Interessen, also der Versuch, sich vor einer befürchteten Gefahr zu schützen, wobei angesichts der niedrigen Wahrscheinlichkeit dieser Gefahren und angesichts der vergleichsweise immer noch kleinen Schäden, die im schlimmsten Fall zu erwarten wären, die Schädigungen einer gedemütigten arabischen Bevölkerung im Irak um Größenordnungen

darüber liegen. Es wird nur versucht, dies als einen Befreiungsakt darstellend bzw. moralisch-ethisch zu legitimieren, wofür angesichts eines menschenverachtenden Despoten wie Saddam Hussein ja auch gute Ansatzpunkte bestehen. Wäre es aber das Anliegen der USA, Menschenrechten weltweit zum Durchbruch zu helfen, dann böte ein Global Marshall Plan vielfache Chancen, dieses auf friedlichem Wege zu tun. Aber das würde ja bedeuten, dass man vom eigenen Geld etwas einsetzen müsste für andere, etwa in Form von 1 – 2 % Co-Finanzierung von Entwicklung. Davon ist aber keine Rede. Da steckt man das Geld doch lieber in das eigene Militär und versucht, mit Gewalt die eigene Position selbst da abzusichern, wo sie indirekt massivste Probleme und massenhafte Tötungen für andere nach sich zieht.

Vergleicht man etwa die Verhältnisse von Toten und Verletzten auf beiden Seiten des jüngsten Irak-Krieges, dann sind die Risiken der Angreifer bei dieser Art von Krieg mit dem Risiko vergleichbar, das Jäger bei Großwildjagden immer wieder freiwillig auf sich nehmen. Mit einer klassischen Vorstellung von Krieg hat das nichts mehr zu tun, wenn man etwa selber Nachtsichtgeräte hat und der Gegner keine, ist es fast so, als würde man gegen Blinde kämpfen, und wenn die eigenen Waffen sehr viel weiter reichen als die des Gegners, besteht das Risiko primär in Zufallstreffern bzw. „Friendly Fire“.

Ein Zugriff à la Irak-Krieg ist richtig verstanden ressourcendiktatorisch und massiv asymmetrisch. Er setzt voll umfänglich auf die Absicherung eigener Eigentumsinteressen, egal welchen Preis die Betroffenen dafür zahlen müssen. Man muss sich nicht wundern, dass die arme Seite, die der Willkür des Stärkeren ausgesetzte Seite, die schwache Seite, dieses nicht als gerecht empfindet und sich irgendwie zur Wehr setzt. Und wie kann „David“ sich gegen „Goliath“ zur Wehr setzen? Das führt dann zu Terror und noch mehr Terror, der dann auf Dauer in seinen Folgen auch nicht mehr beherrscht werden kann. Man wird den Terror dann mit noch mehr staatlichem „Gegenterror“ beantworteten, gegen den neuer Terror folgen wird, z. B. in Form von Selbstmordattentaten. Dies ist eine Form der Gegenwehr, die sehr schwer zu bekämpfen ist, und uns nebenbei die bürgerlichen Freiheitsrechte im Abwehrkampf gegen den Terror kosten kann. Ein Prozess, der in den USA schon ein gutes Stück vorangeschritten ist. Selbstmordattentate setzen voraus, dass Menschen – sich selbst als Freiheitskämpfer empfindend - ihr Leben für eine Überzeugung hinzugeben bereit sind. Wie falsch muss eine Welt organisiert sein, zu wieviel Hass muss eine Weltordnung Anlass bieten, wenn sie solche Reaktionen hervorruft? Und gibt es daraus nicht etwas zu lernen, z. B. über Verletzungen, die man anderen - vielleicht unbewusst und unbeabsichtigt - zugefügt hat?

Der reiche Norden muss sich jedenfalls überlegen, ob er den momentanen Weg der Entfesselung weiter gehen will, oder ob nicht das europäische Modell des Ausgleichs in Form einer weltweiten Ökosozialen Marktwirtschaft die bessere Alternative ist. Diese kostet 1 bis 2 % des Weltbruttosozialprodukts als Co-Finanzierung von Entwicklung in Form eines Welt-Marshall-Plans, wie ihn z. B. – darauf wurde oben schon hingewiesen - der frühere US-Vizepräsident Al Gore vorgeschlagen hatte. Im Grunde genommen ist es erstaunlich, wie preiswert bei intelligenter statt rechthaberischer Vorgehensweise eine Chance auf Frieden und nachhaltige Entwicklung eröffnet werden kann. Noch erstaunlicher ist es allerdings, welcher intellektuelle Aufwand von Seiten der größten Gewinner der heutigen deregulierten Strukturen der Weltökonomie betrieben wird, diesen Preis nicht zu zahlen, und welche Bereitschaft da ist, die entsprechenden Mittel lieber in immer noch mehr Aufrüstung zu stecken statt in humane Entwicklung rund um den Globus.

14. Ökosoziale Marktwirtschaft als wohl einzige realistische Chance

Offensichtlich ist, dass heute die Hoffnung für eine bessere Zukunft und eine nachhaltige Entwicklung primär bei Europa und den entwickelten asiatischen Volkswirtschaften liegt. Wir müssen miteinander die USA für eine andere Sicht der Dinge gewinnen. Deshalb müssen wir



insbesondere bereit sein, darüber zu reden, dass bestimmte Dinge richtig und bestimmte Dinge falsch sind, damit wir nicht durch dauerndes Schweigen den Eindruck erwecken, als würden wir implizit zustimmen an Stellen, an denen wir gar nicht zustimmen können. In diesem Sinne war die prinzipielle Ablehnung des Irak- Krieges durch den größten Teil der Welt die einzig richtige Position. In diesem Kontext hat auch die Weltzivilgesellschaft, hier haben NGOs wie Amnesty International, Ärzte ohne Grenzen, BUND, Greenpeace, Stiftung Weltbevölkerung, Terre des Hommes etc. oder auch die Rotarier, Lions und andere Servicebewegungen einen großen Einfluss auf die Entwicklung der Weltmeinung und für die Ermöglichung von Verständnis und Aufklärung im besten Sinne dieser philosophischen Position. Eine große Hoffnung bilden in diesem Kontext auch die neuen informationstechnischen Vernetzungsmöglichkeiten der Weltzivilgesellschaft, die immer effizienter genutzt werden. Wenn es hierbei in dem Ringen um eine bessere Weltordnung auch nur gelingt, in einem Schneeballsystem pro Jahr immer wieder eine weitere Person zu gewinnen, die für eine neue, bessere Weltordnung eintritt und zugleich pro Jahr immer wieder eine weitere Person mit derselben Art zu denken dazu gewinnt und so weiter, hat man in dreiunddreißig Jahren in einem Schneeballsystem jeden Menschen erreicht, da 233 gleich acht Milliarden ist. – Und die Überzeugung einer Person pro Kopf und Jahr, das sollte doch bei einem so wichtigen Thema zu schaffen sein.

Politisch lastet in dieser Lage heute auf Europa eine besondere Verantwortung. Deshalb war die Einführung des EURO so wichtig. Deshalb ist der weitere Ausbau der EU wichtig. Deshalb ist die Stärkung der EU wichtig. Und das müsste in dieser schwierigen Welt auch den Ausbau der militärischen Stärke der EU beinhalten, um in diesen zentralen Fragen der Weltordnung eigenständig agieren und auf gleicher Augenhöhe mit den USA sprechen zu können.

Ist die Ökosoziale Marktwirtschaft eine Chance oder eine Utopie? Für eine friedliche nachhaltige Zukunft ist sie wahrscheinlich die einzige Chance, die wir haben und die vielleicht beste je gemachte Innovation im politischen Bereich, nämlich die Kopplung vernünftiger Ausgleichsmechanismen und strikter Umweltschutzmaßnahmen mit der Kraft der Märkte und dem Potential von Innovationen. Man kann nur hoffen, dass Europa, ein Kontinent mit einer schwierigen Historie und noch nicht abgeschlossener Selbstfindung, in dieser schwierigen Phase der Weltpolitik in der Lage ist, trotz der Spaltung in der Irak Frage die Verantwortung zu übernehmen, die in diesem Moment auf diesem Teil der Welt lastet.

15. Ergänzende Literatur

- Affemann, N., B.F. Pelz und F.J. Radermacher: Globale Herausforderungen und Bevölkerungsentwicklung: Die Menschheit ist bedroht. Beitrag für den Beirat der Deutschen Stiftung Weltbevölkerung e. V., Landesstelle Baden-Württemberg, 1997.
- Brown, G.: Tackling Poverty: A Global New Deal. A Modern Marshall Plan for The Developing World. Pamphlet based on the speeches to the New York Federal Reserve, 16 November 2001, and the Press Club, Washington D.C., 17 December 2001. HM Treasury, February 2002.
- Club of Rome (ed.): No Limits to Knowledge, but Limits to Poverty: Towards a Sustainable Knowledge Society. Statement of the Club of Rome to the World Summit on Sustainable Development (WSSD), 2002.
- Gore, A.: Wege zum Gleichgewicht - Ein Marshallplan für die Erde. S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt, 1992.
- Information Society Forum (ed.): The European Way for the Information Society. European Commission, Brussels, 2000.
- Kämpke, T., F.J. Radermacher, R. Pestel: A computational concept for normative equity. European J. of Law and Economics 15, 129-163, 2002.
- Küng, H.: Projekt Weltethos, 2. Aufl., Piper, 1993.

- Küng, H. (ed.): Globale Unternehmen – globales Ethos. Frankfurter Allgemeine Buch, Frankfurt, 2001.
- Möller, U., Radermacher, F.J., Riegler, J., Soekadar, S. R., Spiegel, P.: You can change the world – Global Marshall Plan Initiative: Überwindung der globalen Armut und Umweltzerstörung durch eine globale Ökosoziale Marktwirtschaft. Mehr Informationen unter www.globalmarshallplan.org; erscheint als Taschenbuch, 2004.
- Mesarovic, M. D., Pestel, R., Radermacher, F.J. : Which Future? Manuscript to the EU Project TERRA 2000, FAW, Ulm, 2003.
- Nachhaltigkeitsbeirat Baden-Württemberg (NBBW): Nachhaltiger Klimaschutz durch Initiativen und Innovationen aus Baden-Württemberg. Sondergutachten, Stuttgart, 2003.
- Neiryneck, J.: Der göttliche Ingenieur. expert-Verlag, Renningen, 1994.
- Pestel, R., Radermacher, F.J.: Equity, Wealth and Growth: Why Market Fundamentalism Makes Countries Poor. Manuscript to the EU Project TERRA 2000, FAW, Ulm, 2003.
- Pestel, R., Radermacher, F.J.: ICT and Sustainability: Is there a Chance? Manuscript to the EU Project TERRA 2000, FAW, Ulm, 2003.
- Radermacher, F.J.: Globalisierung und Informationstechnologie. In: Weltinnenpolitik. Intern. Tagung anlässlich des 85. Geburtstages von Carl-Friedrich von Weizsäcker, Evangelische Akademie Tutzing, 1997. In (U. Bartosch und J. Wagner, eds.) S. 105-117, LIT Verlag, Münster, 1998.
- Radermacher, F.J.: Die neue Zukunftsformel. bild der wissenschaft 4, S. 78ff., 2002.
- Radermacher, F.J.: Balance oder Zerstörung: Ökosoziale Marktwirtschaft als Schlüssel zu einer weltweiten nachhaltigen Entwicklung. Ökosoziales Forum Europa (ed.), Wien, August 2002, ISBN: 3-7040-1950-X.
- Radermacher, F.J.: Global Marshall Plan/planetary contract – ein ökosoziales Programm für eine bessere Welt. Erscheint als Taschenbuch im Ökosozialen Forum Europa, 2004.
- Report of the National Energy Policy Development Group: Reliable, Affordable, and Environmentally Sound - Energy for America's Future, Washington, May 16th, 2001, U.S Government Printing Office, <http://www.bookstore.gpo.gov>, ISBN 0-16-050814-2 .
- Schauer, T., F.J. Radermacher (eds.): The Challenge of the Digital Divide: Promoting a Global Society Dialogue. Universitäts-Verlag, Ulm, 2001.
- Schmidt, H.(Hg.): Allgemeine Erklärung der Menschenpflichten – Ein Vorschlag. Piper Verlag GmbH, München, 1997.
- Schmidt, H.: Die Selbstbehauptung Europas. Perspektiven für das 21. Jahrhundert. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart, 2000.
- Schmidt-Bleek, F.: Wieviel Umwelt braucht der Mensch? MIPS - Das Maß für ökologisches Wirtschaften, Birkhäuser Verlag, 1993.
- Schwarz, P., Randall D.: An Abrupt Climate Change Scenario and its Implications for United States National Security, October 2003, [http://www.ems.org/climate/pentagon climate change.pdf](http://www.ems.org/climate/pentagon%20climate%20change.pdf). and www.stopesso.com/campaign/00000143.php.
- Töpfer, K.: Kapitalismus und ökologisch vertretbares Wachstum – Chancen und Risiken. in: Kapitalismus im 21. Jahrhundert, S. 175-185, 1999.
- Töpfer, K.: Ökologische Krisen und politische Konflikte. in: Krisen, Kriege, Konflikte (A. Volle und W. Weidenfeld, ed.), Bonn, 1999.
- Töpfer, K.: Environmental Security, Stable Social Order, and Culture. in: Environmental Change and Security Project Report, Woodrow Wilson Centre, No. 6, 2000.
- Töpfer, K.: Globale Umweltpolitik im 21. Jahrhundert, eine Herausforderung für die Vereinten Nationen. in: Erfurter Dialog (Thüringer Staatskanzlei, ed.), 2001.
- von Weizsäcker, C. F.: Bedingungen des Friedens. Vandenhoeck und Ruprecht, Göttingen, 1964 .
- von Weizsäcker, E.U., A. B. Lovins, L. H. Lovins: Faktor Vier: doppelter Wohlstand, halbiertes Naturverbrauch. Droemer-Knauer, 1995.
- Wicke, L., Knebel, J.: Nachhaltige Klimaschutzpolitik durch weltweite ökonomische Anreize zum Klimaschutz, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg, Berlin/Stuttgart, September 2003.



Wicke, L., Knebel, J.: GCCS: Nachhaltige Klimaschutzpolitik durch ein markt- und anreizorientiertes Globales Klima-Zertifikats-System, Studie im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Verkehr des Landes Baden-Württemberg, Berlin/Stuttgart, Dezember 2003.

Die Ökosoziale Marktwirtschaft ist keine Utopie, sondern eine große Chance.

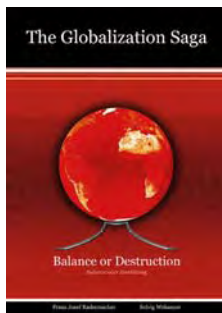
Bezug

Der Text basiert auf dem nachfolgend angegebenen Buch, das im August 2002 kurz vor dem World Summit on Sustainable Development/WSSD (Rio+10) erschienen ist.



Franz-Josef Radermacher, Balance oder Zerstörung – Ökosoziale Marktwirtschaft als Schlüssel zu einer weltweiten nachhaltigen Entwicklung. Ökosoziales Forum Europa, Wien/Österreich, August 2002
316 Seiten, Broschur, ISBN: 3-7040-1950-X, Preis: 15 Euro

Ebenfalls vom selben Autor erschienen:



Radermacher, F. J.: The Globalization Saga – Balance or Destruction. Musical Storybook, CD und VHS-Video. Ulm, 2003/2004
Einzelpreis: 15 Euro, zwei Teile 25 Euro, drei Teile für 35 Euro. Bestellbar über www.faw.uni-ulm.de
(in Deutsch und Englisch)

Buch und Musical bestellbar über:

Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung (FAW)
Helmholtzstr. 16
D-89081 Ulm

Tel. 0731 501-0, Fax 0731 501-111, E-Mail: info@faw.uni-ulm.de; <http://www.faw.uni-ulm.de>

Klimawandel und öffentliche Wahrnehmung

Hartmut Graßl

Meteorologisches Institut, Universität Hamburg, Max-Planck-Institut für Meteorologie

Mitschrift der gehaltenen Rede:

"Dankeschön für die Einführung. Sie wissen jetzt alle, dass wir mit Herrn Radermacher kämpfen müssen, dass aus 35 % mehr wird. Und dass die Mehrheit vielleicht in einigen Jahren auch in seinem Kopf für sein Modell in seiner Wahrscheinlichkeitsrechnung existiert. Heute Vormittag haben wir diskutiert - eigentlich auf der Basis gegenüber dem Klimawandel scheint man beinahe machtlos, den nehmen wir hin, der kommt sowieso und es hat überhaupt niemand darüber gesprochen - ob das, was bei worst case angenommen wird, überhaupt noch zu verhindern ist. Das war die Ausgangsbasis. Ich nehme das Klimathema, das ja ein sehr eingegrenzter Bereich gegenüber dem ist, was Herr Radermacher erzählt hat, um an diesem Beispiel darzustellen, wie schwer es ist, diese 35 % zu erhöhen. Und das fängt damit an, dass, wenn Sie etwas ändern wollen, Sie ja zunächst die geballte Macht des etablierten Systems spüren. Im Falle des Klimawandels heißt das, dass die Dinosaurier-Industrien, also diejenigen, die schon seit über hundert Jahren da sind, die Stahlkocher, diejenigen, die Kraftwerke bauen, die auch Eisen für Schiffe brauchen, so festgefügt sind, dass sie, weil sie merken, dass das System sich ändern wird, so verfahren, wie es etwa drei bis vier Jahrzehnte lang die Zigaretten-Industrie geschafft hat. Es war wissenschaftlich eindeutig erwiesen vor Jahrzehnten, dass Zigarettenrauchen und Lungenkrebs hoch miteinander korreliert sind. Genau wusste man nicht, wieso, aber das ist inzwischen im wesentlichen auch aufgeklärt und trotzdem ist es der Industrie, die Zigaretten verkaufen wollte, gelungen, einige Jahrzehnte lang den Bürger in Wechselbäder zu tauchen. Er hatte immer die Ausrede, da ist nichts daran. Das ist wissenschaftlich windig. Und heute Vormittag habe ich mit Erstaunen festgestellt, dass, obwohl Klimaänderungen ein Faktum sind und viele Diagramme gezeigt worden sind dafür, dass dies ein Faktum ist, die Vertreter von Ämtern gerne noch hinschreiben, mögliche Klimaänderungen. Das ist sozusagen sehr zögerlich und vielleicht auch für den Minister gemeint.

In Wirklichkeit ist ja die Debatte an einer völlig anderen Stelle. Die Debatte ist an der Stelle, wo befindet sich bzgl. Klimawandel durch den Menschen die richtige Kombination aus Abwehr und Anpassung. Dabei aufnehmen, was Herr Radermacher gesagt hat. Denn die Welt wird, wenn das Energiesystem nicht andere Strukturen bekommt, mindestens das Doppelte an Kohlendioxid pro Zeiteinheit aufnehmen müssen, wenn die Sonntagsreden über die Entwicklung der Menschheit Wahrheit werden soll. Und es gibt zwei Nationen, die in diesem Zusammenhang wahrscheinlich das Heft mit in die Hand nehmen können und Herrn Radermacher's 35 % zunehmen lassen. China und Indien, denn das sind 2,3 Mrd. Menschen und deren Entwicklung läuft zur Zeit mit 6, 7, 8, 9 % Wirtschaftswachstum pro Jahr ab. Und die brauchen für ihre Entwicklung Energie. Deswegen hat der wissenschaftliche Beirat "Globale Umweltveränderungen der Bundesregierung", dem ich angehöre, gesagt, wir haben zwei Herausforderungen auf dieser Erde. Das eine, die größere Herausforderung ist die Entwicklung und ohne Zugang zu modernen Energieformen gibt es keine wirkliche Entwicklung in den Ländern, die dies wollen. Also braucht jeder die Steckdose. Auf der anderen Seite wollen wir alle, dass nicht immer wieder Steuerreduktionen wegen eines Hochwassers verschoben werden müssen. Also wir wollen Klimaschutz betreiben, so dass vielleicht in drei, fünf, sieben Jahrzehnten die anthropogene Klima-Änderungsrate nicht mehr zunimmt, sondern beginnt gedämpft zu werden. Die beiden Herausforderungen haben wir.

Und jetzt frage ich mal einen Normalbürger, ob ihm das klar ist. Dann wird er mich immer konfrontieren mit der Äußerung, das ist doch noch gar nicht sicher, dass es den anthropogenen Klimawandel gibt. Warum? Weil er Zeitung liest. Und nicht Fachzeitschriften. Und in den Zeitungen haben diejenigen häufig das Sagen, die dagegen sein wollen. Nehmen wir mal ein



Beispiel: mich persönlich. Vor 15 Jahren, als das, was ich damals erzählt habe, noch etwas Außergewöhnliches war und die meisten meiner Fachkollegen sehr skeptisch gegenüber den Äußerungen der Klimatologen waren, es sei bereits ein anthropogener Klimawandel in Gang gekommen, war ich für SPIEGEL und andere Wochenzeitschriften ein begehrter Interviewpartner. Ich bin weiterhin Interviewpartner für viele, aber inzwischen macht der SPIEGEL genau das, was er damals gemacht hat, er holt sich die Meinung einer Minderheit und bläht sie zu einer Titelgeschichte auf. Das ist Standard in den Medien und deswegen haben wir erstaunliche Schwierigkeiten beim Normalbürger die Stützung für politische Entscheidungen zu bekommen.

Glücklicherweise hat die Europäische Union auf dem Sektor Klimawandel durch den Menschen mindestens die moralische Meinungsführerschaft. Aber sie ist ihr geschenkt worden durch das Verhalten des amerikanischen Präsidenten. Sie hat sie sich nicht erobert durch Fakten, nämlich durch Handeln. Sie wird es erst im nächsten Jahr versuchen und Herr Radermacher hat ja schon darauf hingewiesen, eigentlich ist die Europäische Union in sich ein Gebilde, das Entwicklung ermöglicht. Blicken Sie nach Portugal, blicken Sie nach Irland, blicken Sie nach Griechenland. Diese Nationen waren die ärmsten im bisherigen europäischen Unionsbereich und sie haben weitaus höheres Wirtschaftswachstum gehabt in den letzten Jahren als die zentralen Teile der Europäischen Union und sie rücken uns damit im Entwicklungszustand näher. Und genau das ist die Politik der Europäischen Union. Das wollen wir alle. Aber zu mindestens den Sonntagssegen für die gesamte Welt. Und wir werden von außen betrachtet als die Region, die es geschafft hat, aus ehemaligen fünf Diktaturen starke demokratische Länder zu machen. Und jetzt werden alle ein bisschen nachrechnen, was sind denn diese fünf Diktaturen in der Europäischen Union. Ich meine jetzt nicht die neuen Mitglieder, die auch Diktaturen waren zum Teil. Ich meine Deutschland, Italien, Spanien, Portugal und Griechenland. Das waren im 20. Jahrhundert stramme Diktaturen, eine sogar – die unsere – eine besonders abscheuliche. Und die sind nun moralische Meinungsführer bei der Entwicklung auf dieser Erde geworden. Und, da stimme ich Herrn Radermacher zu, wahrscheinlich wohnen wir momentan im sichersten Teil unserer Welt. Durch kluge Außenpolitik kann man das noch massiv verbessern. Denn wir treten an, zu mindestens unsere Außenminister in der Europäischen Union, unter der Devise: Abbau der Gradienten auf dieser Erde. Und genau das war ja das zentrale, das Leitthema von Herrn Radermacher.

Als Physiker weiß ich, wo starke Gradienten sind, gibt es nicht-lineare Strukturänderungen. Das fängt beim Tiefdruckgebiet an. Das ist der Ausdruck einer starken Abweichung von einem Gleichgewicht. Und das können Sie in alle Facetten der Biologie hinein wiedersehen. Und unsere Europäische Union ist in dem Sinne viel mehr wert als die meisten meinen, nämlich nicht nur eine Freihandelszone, sondern ein Ort, wo ab Januar kommenden Jahres etwas gemacht wird, was die Menschheit noch nie getan hat. und wenn Sie die Zusammenfassung von Herrn Radermacher gelesen haben, er hat es selbst in seinem Vortrag heute nicht erwähnt, dann sehen Sie dort den internationalen Zertifikatehandel. Wir werden ab 1. Januar 2005 innerhalb der Europäischen Union zur Erreichung der Kyoto-Ziele, die wir als Gesetz in Europa anerkannt haben, zum ersten Mal die Übernutzung eines globalen Gemeinschaftsgutes, nämlich der Luft, bezahlen müssen. Und Sie haben wieder gemerkt, wie der Kohlestaub in manchen Hirnen diese Art des Emissionshandels zu unterlaufen sucht. Das haben wir im eigenen Land gesehen. Und ich bin gefragt worden heute bei der Mittagspause, was ich denn davon halte, dann sage ich, das sind die kleinen Schwierigkeiten am Beginn. Die würde ich nicht allzu groß einschätzen. Aber wenn wir es geschickt anpacken innerhalb der Europäischen Union, und da ist jetzt die Politik der öffentlichen Wahrnehmung weit voraus, denn der Bürger hat das gar nicht mitbekommen, welcher drastischen Einschnitt dieses Gesetz ab Januar haben wird. Wenn ich Emissionshandel im internationalen Maßstab einführe, stimulare ich Innovationen in ganz bestimmte Bereiche hin. Da komme ich jetzt auf etwas zu sprechen, was ich viel positiver sehe als es zunächst in Herrn Radermachers Äußerungen klang.

Wir müssen den Kohlendioxid-Ausstoß ja nicht verdoppeln. Wir haben ja völlig andere Optionen.

Und da nehme ich jetzt mal aus dem Fundus als Physiker ein paar Zahlen. Wenn wir alle Energiesysteme, die die Menschheit aufgezogen hat einschließlich des Heizens von Gebäuden und des Herum-Jettens pro Flächeneinheit global mit einer Leistung belegen, dann kommen wir auf 0,025 Watt pro m^2 . Und das vergleichen wir jetzt mal, also das ist schäbig, im Endeffekt gegenüber natürlichen Energieflussdichten. Das vergleichen wir mit dem, was die Sonne an der Oberfläche anbietet, 170 Watt pro m^2 versus 0,025 Watt pro m^2 , oder anders formuliert, was wir eigentlich lernen müssten in einem halben Jahrhundert ist, bei gegenwärtiger Anzahl der Menschen ein Achttausendstel und wenn wir auf 9 Mrd. gewachsen sind, ein Fünftausendstel der Energieflussdichte der Sonne zu ernten. Das ist die eigentliche Aufgabe beim Umbau des Energiesystems und der Clou, ob das gelingt oder nicht, liegt an etwas, was so ähnlich ist, wie der Emissionshandel oder so ähnlich ist wie die Öko-Steuer oder so ähnlich ist wie das Verursacherprinzip oder meistens genannt wird Internalisierung externer Effekte. Oder in anderen Worten, um ein Beispiel aus dem eigenen Land zu nehmen, warum muss Diesel billiger sein als Benzin? Das ist energetisch und umweltpolitisch Unsinn. Energetisch deswegen, weil Diesel mehr Energie enthält als Benzin, also ein Liter Diesel versus ein Liter Benzin. Da ist der Diesel im Vorteil. Und umweltpolitisch Unsinn, weil die Emissionen aus dem Dieselauto momentan, nachdem wir beim Benzinauto den geregelten Katalysator als Norm haben, auf jeden Fall gefährlicher ist. Für unsere Gesundheit, aber auch für das Klima, denn die Russemissionen, die da rauskommen, das ist eine kräftige Zutat zum zusätzlichen Treibhauseffekt der Erdatmosphäre. Warum ist das so? Und wenn jetzt einer von BMW hier drinnen säße oder von Daimler-Chrysler, dann wären die ziemlich böse auf mich, und das habe ich ja schon ein paar mal gespürt. Denn wenn der Diesel-Preis etwas höher wäre als der Benzinpreis wie in der Schweiz, wo man eine Automobilindustrie nicht schützen muss, dann würde auf einmal ein Viertel oder ein Drittel aller unserer Autos kein Diesel-Auto mehr sein, weil es dann ein finanzieller Nachteil wäre, ein Diesel-Auto zu kaufen. Das meine ich mit Internalisierung externer Effekte. Und dann würde aber nicht nur auf das Benzin etwas zukommen, was ja schon länger der Fall ist, sondern auf das Kerosin, auf das Heizöl, auf die Verwendung von Brennstoffen an anderen Stellen. Warum ist es kostenlos, ein Kilogramm Kohle in einem Kraftwerk zu verbrennen. Da zahlt man keine Umweltabgaben. Das gibt es nicht. Es wird sogar pro Kumpel im Bergbau noch 82.000 € pro Jahr hinzugelegt in Deutschland. Also pro Beschäftigten im Steinkohlebergbau zahlen wir 82.000 € Subventionen pro Jahr. Ein Schweizer Kollege hat mal zu mir gesagt, eure Kumpel sind unsere Älpler. Oder in anderen Worten, ihr subventioniert die Steinkohlekumpel genau so wie wir unsere Älpler, das gehört sozusagen zum nationalen Kulturgut.

Zurück zur öffentlichen Wahrnehmung. Warum haben wir heute hier debattiert? Ämter, Staatsregierungen waren gestern da. Wissenschaftler haben gesprochen; der Deutsche Wetterdienst ist anwesend - die einzige Bundesbehörde in diesem Zusammenhang, denn Wasser ist ja Ländersache im allgemeinen. Warum haben wir diskutiert über globale Klimaänderungen durch den Menschen und über Maßnahmen bezüglich Hochwasserschutz. Die Antwort ist einfach. Es gab eine solide saubere Bewertung der Fakten. Durch das Intergovernmental Panel on Climate Change und ich erzähle Ihnen mal, wie das zusammengekommen ist, dieses Gremium und wie Deutschland daran beteiligt war. Der damalige Präsident des Deutschen Wetterdienstes bekam ein Schreiben von der Weltorganisation für Meteorologie, es würde im November 1988 ein Gremium aus der Taufe gehoben, genannt "Intergovernmental Panel on Climate Change". Federführend an den Präsidenten des Deutschen Wetterdienstes gesandt, denn er vertritt die Bundesrepublik bei den Meteorologen bei der WMO. Und daraufhin hat man einen Wissenschaftler gesucht, und der war ich. Und ich saß dann im November 1988 vereinsamt in einem riesigen Saal des Genfer Kongresszentrums, vor mir das Schild Federal Republic of Germany. Ich fühlte mich total verunsichert und habe dann die Botschaft, also die Ständige Vertretung bei den Vereinten Nationen in Genf, zu Hilfe gerufen, dass wenigstens noch einer da saß und bin, nachdem ich zurückgefahren



bin, nach Bonn gegangen und habe gesagt, Leute, hier habt ihr wirklich etwas ganz Großes versäumt. Die Amerikaner, die Japaner, alle waren mit Staatssekretären, Senatoren und leitenden Wissenschaftlern angereist.

Daraufhin hat die Bundesrepublik Deutschland allerdings Fuß gefasst und ist inzwischen ein wesentlicher Beitragender in diesem Gremium. Hätten wir dieses Gremium nicht, bin ich sicher, hätten wir heute diese Tagung nicht gehabt. Denn die Regierungen bekommen seit 1990 im fünfjährigen Rhythmus den Sachstand in der Klimaforschung geliefert und das Kyoto-Protokoll ist daraus entstanden, natürlich haben wir Herrn Putin oder Herrn Iljanow nicht überzeugen können in diesem Zusammenhang. Aber trotzdem würde ich dieses Gremium als eines feiern wollen, das einmalig den Wissensstand zusammenträgt, genau so wie ein ähnliches Gremium für die Ozonverdünnung. Herr Radermacher hat es angedeutet, das Montrealer Protokoll ist ein Parade-Beispiel für eine globale Aktion. Allerdings war es einfach, denn die Amerikaner meinten, sie würden alle Hautkrebs bekommen, wenn FCKW weiterhin so benutzt würden wie zu diesem Zeitpunkt. Und das war der eigentliche Anlass, warum es da so schnell ging, während wir jetzt bei globalen Klimaänderungen durch den Menschen sehen, dass ein Prinzip der Vereinten Nationen von den reichen Emittenten USA nicht akzeptiert wird. Das Prinzip heißt, ganz einfach, es ist ein Menschenrecht, jeder Mensch auf dieser Erde hat das gleiche Recht zur Emission. Und wenn Sie dieses Prinzip verwenden und im Jahr 2050 über Contraction and Convergence erreichen wollen, dass gleiche Emissionen pro Kopf die Norm sind, dann heißt das, dass Sie relativ früh auch die Chinesen dazu bitten werden müssen, von massiven Erhöhungen im CO₂-Gehalt, in der CO₂-Emission pro Kopf Abstand zu nehmen. Da kann der chinesische Präsident oder der Ministerpräsident, der ja jetzt in unserem Lande weilt, immerhin sagen, wir entkoppeln Wirtschaftswachstum und Energieeinsatz viel stärker als ihr. Man kann den Chinesen gar keinen Vorwurf machen. Sie haben eine Entkopplung von etwa 4 %, das heißt, wenn sie 8 % Wirtschaftswachstum haben, setzen sie 4 % mehr Energie pro Jahr ein. Wie groß ist die Entkopplung in der Bundesrepublik? 2 %. Wie groß ist sie in den Vereinigten Staaten von Amerika? 1,5 Prozent.

Veranstaltungen wie diese und andere sind die Grundvoraussetzung für eine öffentliche Wahrnehmung. Wer die Bevölkerung nicht schafft, dass sie ihn unterstützt, der kann gar nicht erwarten, dass politische Entscheidungen fallen. Ich habe mit Herrn Schnappauf in Mailand und in Johannesburg diskutiert und ich habe ihm damals in Johannesburg einen Vorschlag gemacht und ich sehe, dass das KLIWA sowieso schon gemacht hat, also ich war sozusagen ein Nachläufer, aber Herr Schnappauf wusste das damals noch nicht. Er hat das als Neuigkeit aufgefasst und ich möchte zum Schluss wiederholen, was ich heute in einer Diskussionsbemerkung anklingen habe lassen. Ich möchte, dass, wenn man über Hochwasserschutz, was ein wichtiger Teilaspekt beim globalen Klimawandel ist, spricht, dass man die Daten, die man hat, die in Mitteleuropa besser sind als in allen anderen Teilen der Welt, so solide und statistisch raffiniert auswertet, dass man auf die noch schwachbrüstigen Modelle gar nicht angewiesen ist, für die Maßnahme in den nächsten zwei oder drei oder vier Jahrzehnten. Die Modelle werden uns in einigen Jahren Korrekturen liefern, aber momentan ist allein die empirische Datenlage ausreichend, um in die richtige Richtung zu marschieren und wenn man das mal verkündet hat, ist es auch einfacher, in der Bevölkerung die Maßnahmen zu rechtfertigen, denn auf Modellrechnungen allein stützt sich kein Politiker gern. Wir haben das erlebt. Das Kyoto-Protokoll ist erst gekommen, nachdem wir sagen konnten, in den Daten sehen wir schon die anthropogene Klimaänderung als wir 1990 gesagt haben mit Modellhochrechnungen, es ist sehr wahrscheinlich, dass wir im Jahr 2000 oder 2005 das entdecken werden, hat uns zunächst keiner geglaubt. Danke für das Zuhören.“

Kurzstatement zur Podiumsdiskussion
Klimaveränderung und Folgen für Gesellschaft und Umwelt

Wolfgang Kron
Fachbereich GeoRisikoForschung, Münchener Rück, München

Überschwemmungen sind neben Stürmen die häufigsten Ursachen für Schäden aus Naturereignissen. Rund ein Drittel aller Schadenereignisse und ein Drittel der volkswirtschaftlichen Schäden sind weltweit auf die Folgen von Hochwasser zurückzuführen, sogar mehr als die Hälfte aller durch Naturkatastrophen getöteten Menschen starb in den letzten Jahrzehnten bei Hochwasser. Die Gründe für die dramatische Zunahme der Folgen liegen im rasanten Wachstum der Weltbevölkerung, der vermehrten Besiedlung exponierter Gebiete, der Ansammlung von empfindlichen Werten in ihnen, aber vermutlich auch an der voranschreitenden Klimaänderung. Zudem mag ein geändertes – d.h. nachlassendes – Risikobewusstsein eine Rolle spielen.

Einzelne Extremereignisse hat es immer schon gegeben. Daher lässt sich selbst mit einer Überschwemmung wie der im Sommer 2002 oder einer Hitze- und Trockenperiode wie der im darauf folgenden Jahr eine Klimaänderung nicht beweisen. Andererseits sind die Indizien, die auf ein bereits geändertes Wettergeschehen hindeuten, so stark und eindeutig, dass kein vernünftiger Wissenschaftler sie leugnen kann. Extreme haben in ihrer Häufigkeit und ihrer Intensität zugenommen und treten vermehrt in für sie untypischen Jahreszeiten auf. Diese Entwicklung, für die zumindest eine vom Menschen mitverursachte Klimabeeinflussung verantwortlich gemacht werden muss, wird sich in Zukunft weiter fortsetzen. Da sie nicht von heute auf morgen zu stoppen sein wird, müssen sowohl Planer bei ihren Bemessungsannahmen berücksichtigen, dass sich z.B. ein 100-jährlicher Abfluss in Zukunft höher ergeben wird, als auch Staat, Katastrophenschutz, Bevölkerung und Versicherungswirtschaft sich darauf einstellen, dass es zu häufigeren und katastrophaleren Ereignissen kommt und dass damit häufigere und höhere Schäden auf sie zukommen werden. Dieser Entwicklung müssen vor allem Versicherer und Rückversicherer bei der Ermittlung einer risikoadäquaten Prämie Rechnung tragen.

Die Münchener Rück sammelt seit fast 30 Jahren intensiv Schadenmeldungen im Zusammenhang mit Naturereignissen in der ganzen Welt; allein in den Jahren 2002 und 2003 waren es jeweils etwa 700 (MÜNCHENER RÜCK 2003). Außerdem werden die größeren Katastrophen vor 1975 recherchiert. Darauf beruht die inzwischen weltweit größte Datenbank dieser Art, die MRNatCat-Datenbank, die für eine Vielzahl von Analysen herangezogen werden kann. Wenn man sich z.B. die teuersten Überschwemmungsereignisse seit 1990 ansieht (Tab. 1 und 2), wird klar, welche immensen Schadenssummen Überschwemmungen zur Folge haben können. Allein aus "großen" Überschwemmungskatastrophen fielen in den neunziger Jahren weltweit Schäden von über 200 Mrd. US-Dollar an (Tab. 3). Aber es sind nicht nur die großen, spektakulären Ereignisse, die Schäden verursachen; man kann vielmehr davon ausgehen, daß die vielen kleinen und mittleren lokalen Überschwemmungen, die sich täglich irgendwo auf der Erde ereignen, in ihrer Summe noch einmal mindestens denselben Schadenbetrag beisteuern. Dazu kommen die enormen Beträge, die in Schutzvorkehrungen (baulicher und nicht-baulicher Art) gesteckt wurden und werden, deren Größenordnung sich kaum abschätzen lässt. Tab. 3 zeigt auch überzeugend die Zunahme der Schäden in den letzten Jahrzehnten, sowohl im Hinblick auf die Anzahl der Ereignisse als auch auf Ihre Auswirkungen.

Überschwemmungen treffen in erster Linie die Volkswirtschaften insgesamt, weniger die Versicherungen, denn im Gegensatz zur Sturm- und Erdbebengefahr ist die Versicherungsdichte für die Überschwemmungsgefahr in der Regel eher gering. Im Durchschnitt betrugen die versicherten Hochwasserschäden weltweit gerade einmal 10 % aller im Zeitraum 1980-



2003 angefallenen versicherten Schäden, wohingegen die volkswirtschaftlichen Überschwemmungsschäden einen Anteil von 30 % hatten.

Das größte Schadenpotential hierzulande ist zweifellos im Einzugsgebiet und entlang des Rheins zu finden. Studien für die Strecke von Iffezheim bis Bingen (IKSR 1997) und für den nordrhein-westfälischen Abschnitt haben ergeben, dass hier Sachschadenpotentiale von über 6 Mrd. Euro bzw. 13 Mrd. Euro für ein 200-jährliches Ereignis existieren. Allein für die Stadt Köln wird mit 3,5 Mrd. Euro gerechnet (Stadt Köln 1996). Die Ereignisse im Elbeeinzugsgebiet haben aber gezeigt, dass diese Größenordnung durchaus auch woanders erreicht werden kann (Münchener Rück 2003).

Die zunehmende Nachfrage nach Deckungen für Hochwasserschäden hat die Versicherungswirtschaft veranlasst, geeignete Konzepte zu erarbeiten. Ein solches Konzept stellt das deutschlandweite Zonierungssystem für Überschwemmungsrisiken (ZÜRS) dar, mit dessen Hilfe die Überschwemmungsgefährdung für jedes beliebige Grundstück angegeben werden kann. Neben der rein finanziellen Entschädigung leisten die Versicherer allerdings auch einen wichtigen Beitrag bei der Information und Bewusstseinsbildung von Bevölkerung und Entscheidungsträgern, bieten Anreize zur Mitwirkung bei der Schadenreduktion und beziehen damit alle Betroffenen mit ein (Kron 2001) .

Vorsorge gegen Naturereignisse ist nur wirkungsvoll, wenn Staat, Betroffene und Versicherungswirtschaft zu einer Risikopartnerschaft zusammenfinden und integriert handeln. Da Katastrophen nur dort auftreten können, wo sich auch Menschen und ihre Werte befinden - ansonsten bleibt es ein extremes Naturereignis - kommt einer adäquaten Landnutzung sowie angepassten Bau- und Verhaltensweisen die größte Bedeutung zu. Dennoch wird immer ein Restrisiko bleiben, das durch Maßnahmen der Risikovorsorge abgedeckt werden muss, z.B. durch eine Versicherung. Es aber wäre auf jeden Fall falsch zu meinen, man könne zukünftige Hochwasserkatastrophen vollständig verhindern. Wir müssen lernen, (wieder) mit dem Hochwasser zu leben, uns aber gleichzeitig eine Risikokultur schaffen, die mit dem daraus resultierenden Risiko umzugehen weiß.

Literatur

- IKSR (1997): Hochwasserschutz am Rhein – Bestandsaufnahme. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins, 62 S., Koblenz
- Kron, W. (2001): Versicherung von Hochwasserschäden. In H. Patt (Hrsg.) Hochwasser-Handbuch. Springer-Verlag 2001, 461-503
- MURL (2000): Potentielle Hochwasserschäden am Rhein in NRW. Ministerium für Umwelt, Raumordnung und Landwirtschaft des Landes Nordrhein-Westfalen, 32 S., Düsseldorf
- Münchener Rück (2003): Topics Naturkatastrophen-Rückblick 2002, Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, 48 S., München
- Stadt Köln (1996): Hochwasserschutzkonzept Köln. Ermittlung der Hochwasserschadenspotentiale in den überflutungsgefährdeten Gebieten der Stadt Köln. Hochwasserschutzzentrale, Amt für Stadtentwässerung der Stadt Köln (unveröffentlicht)

Tab. 1. Die teuersten Überschwemmungskatastrophen seit 1990 weltweit

Rang	Jahr	hauptsächlich betr. Gebiet(e)	Schäden (in Mio. US-\$)	
			volkswirtsch.	versichert
1	1998	China (Yangtze, Songhua)	30 700	1 000
2	1996	China (Yangtze, Yellow, Huai)	24 000	445
3	2002	Süd-, Mittel-, Osteuropa (Elbe, Donau)	21 200	3 400
4	1993	USA (Mississippi)	21 000	1 270
5	1995	Korea	15 000	≈ 0
6	1991	China (Huai, Taihu-See)	13 600	410
7	1993	China	11 000	≈ 0
8	1994	Italien (Südalpen)	9 300	65
9	2000	Italien, Schweiz (Südalpen)	8 500	470
	1993	Indien, Bangladesh, Nepal	8 500	≈ 0
11	2002	China	8 200	≈ 0
12	1999	China	8 000	≈ 0
...				
18	1997	Osteuropa (Oder)	5 900	795

Tab. 2. Die teuersten Überschwemmungskatastrophen seit 1990 in Deutschland

Rang	Jahr	hauptsächlich betr. Gebiet(e)	Schäden (in Mio. US-\$)	
			volkswirtsch.	versichert
2	1993	Rhein	600	180
6	1994	ganz Deutschland	180	60
5	1995	Rhein	320	130
4	1997	Oder	360	35
7	1998	ganz Deutschland	150	90
3	1999	Donau (Rhein)	430	75
8	2002	westliches Bayern [im Juni]	100	50
1	2002	Elbe, Donau	11 800	1 800

Tab. 3. "Große Überschwemmungskatastrophen" seit 1950, (Schäden in Mrd. US-\$ in Werten von 2003, Stand 1.1.2004)

Dekade	1950 -1959	1960 -1969	1970 -1979	1980 -1989	1990 -1999	letzte 10 J. 1994-2003	Faktor letzte 10:60er
Anzahl	6	6	8	18	26	16	2,7
Volkswirtschaftliche Schaden	31	22	20	28	234	163	7,4
Versicherte Schäden	---	0,2	0,4	1,5	8,4	8,0	40

Anmerkung: Als "Große Überschwemmungskatastrophen" werden diejenigen eingestuft, welche die Selbsthilfefähigkeit der betroffenen Regionen deutlich übersteigen und überregionale oder internationale Hilfe erforderlich machen. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn die Zahl der Todesopfer in die Tausende geht, die Zahl der Obdachlosen in die Hunderttausende oder substantielle volkswirtschaftliche Schäden – je nach den wirtschaftlichen Verhältnissen des betroffenen Landes – verursacht werden.



Kurzstatement zur Podiumsdiskussion
Klimaveränderung und ihre Folgen für die Gesundheit

Gerd Jendritzky, Christina Koppe
Deutscher Wetterdienst, Medizin-Meteorologie, Freiburg i. Brsg.

Die Auswirkungen einer Klimaänderung auf die Gesundheit können direkter und indirekter Natur sein. Mögliche direkte Auswirkungen ergeben sich durch Hitzewellen und wärmere Winter, Dürren, Überschwemmungen, Stürme und andere Wetterkatastrophen. Vielfach wirken sich Änderungen des Klimas jedoch auf indirektem Weg aus, indem z.B. die Ökologie von Krankheitserregern und ihrer Überträgerorganismen, die Nahrungsproduktion oder die Frischwasserversorgung gestört wird. Weitere Gesundheitsrisiken resultieren aus der möglichen Zunahme der Luftverschmutzung und der Luftallergene, der Zunahme der UV-Strahlung durch die stratosphärische Ozonabnahme und durch sozio-ökonomischen Verwerfungen. Auswirkungen auf das öffentliche Gesundheitswesen in Mitteleuropa könnten auch von Vertreibung bzw. Wanderungen von Bevölkerungen aufgrund von Konflikten, z.B. bei einem Meeresspiegelanstieg oder durch Nahrungsmittelmangel bei Dürre, ausgehen.

Sehr wahrscheinlich wird uns der prognostizierte Klimawandel auch in Mitteleuropa mit vielfältigen Gesundheitsrisiken völlig neuer Größenordnung und Qualität konfrontieren. Gefahren für die menschliche Gesundheit resultieren vor allem aus dem Anstieg der Häufigkeit und/oder Intensität von extremen Wetterereignissen (Hitzewellen, Überschwemmungen etc.) sowie aus Änderungen in der Verbreitung und den Aktivitätsmustern von Krankheitserregern und deren Zwischenwirten.

Auch wenn die potentiellen gesundheitlichen Auswirkungen des Klimawandels aufgrund zahlreicher Unsicherheiten noch schwer abzuschätzen sind, müssen dringend Anpassungsstrategien entwickelt werden, um die Gesundheitsrisiken zu minimieren. Adaptation ist der Schlüsselbegriff sowohl im Verständnis der Klimafolgen im Gesundheitsbereich wie auch in der Vorsorgeplanung. Grundsätzlich ist im Sinne einer radikalen Vorsorge eine nachhaltige Entwicklung zu fordern, mit der die gegenwärtigen Bedürfnisse der Gesellschaften gegen zukünftige Risiken ausgeglichen werden müssen.



Zusammenfassung der Ergebnisse des 2. KLIWA-Symposiums mit Schlussfolgerungen für das Vorhaben KLIWA

Hansjörg Strähle
Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg, Stuttgart

1. Dank

Herr Strähle bedankt sich zunächst für die hervorragende Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst und den Kollegen aus Bayern im Rahmen des seitherigen 5-jährigen KLIWA-Projektes. Darüber hinaus dankt er den bayerischen Kollegen für die hervorragende Organisation des Symposiums, er bedankt sich bei den Referenten stellvertretend bei Frau Bartels vom DWD und den Kollegen aus der Schweiz und den Niederlanden Herrn Dr. Schädler und Herrn Dr. Reuber.

2. Globaler und Regionaler Klimawandel

Das Symposium hat bestätigt, dass wir von einem globalen Klimawandel auszugehen haben. Die regionalen Klimamodelle waren notwendig, um hieraus auch ein regionales Handeln ableiten zu können. Dieses Handeln wurde im Symposium schwerpunktmäßig dem Thema Hochwasser gewidmet.

2.1 Müssen wir jetzt handeln?

- Unstrittig sind vordringlich Maßnahmen im Bereich des Klimaschutzes zur CO₂-Reduktion.
- Bisherige Auswertungen im Rahmen von KLIWA haben mit örtlichen Unterschieden folgende Erkenntnisse im Bereich der Hydrometeorologie bzw. Hydrologie gebracht:
 - Temperaturzunahme vor allem im Winter
 - Winter feuchter/ Sommer trockener
 - Schneedeckenproblematik vor allem unterhalb 800 m
 - Zunahme Westwetterlagen
- Örtlich unterschiedliche Zunahme der Winterhochwässer mit „signifikantem Bruch“ in den 70er Jahren.
- Erste Ergebnisse der Klimamodellierung zeigen, dass stärkste Erwärmungen zwischen November und April um bis zu 2 °C auftreten. Dies bedeutet, dass wir mit einer „Fortsetzung“ der Zeitreihen der Niederschlagszunahme im Winter zu rechnen haben.
- Die seitherigen Berechnungen der Wasserhaushaltsmodelle zeigen, dass sie bestens geeignet sind, die Ergebnisse aus den Klimamodellen zu integrieren. Die im Rahmen von KLIWA angestrebte Zusammenarbeit zwischen Klimamodellierern und Wasserhaushaltsmodellierern hat sich bestens bewährt.

**Fazit:**

Es ist eine Hochwasserverschärfung mit örtlichen Unterschieden festzustellen. Es besteht derzeit keine Panik überstürzt zu handeln, aber vorsorglich sollte jetzt begonnen werden, Konsequenzen aus den Ergebnissen zu ziehen. Die Ergebnisse aus den historischen Zeitreihen und die ersten Ergebnisse aus den Klimamodellen und Wasserhaushaltsmodellen reichen aus, um pragmatische, flexible fachliche Vorschläge zum Hochwasserschutz und zur Hochwasservorsorge zu treffen, auch wenn noch nicht alle Fragen abschließend behandelt sind.

2.2 Was ist zu tun ?**2.2.1** Unstrittig sind Maßnahmen zum Klimaschutz selbst.**2.2.2** Bemessung technischer Hochwasserschutzanlagen

- Es muss von örtlich unterschiedlichen Zunahmen der Hochwasser-Situation ausgegangen werden. In einem Pilotvorhaben der Universität Karlsruhe wird der Vorschlag gemacht, dass vor allem im unteren Bereich der Jährlichkeiten ein Klimafaktor eingeführt werden sollte. Aber auch im Bereich des HQ_{100} wird für das Pilotvorhaben Neckar noch von einem Klimafaktor von 15% ausgegangen. Weniger groß ist er bei extremen Jährlichkeiten.
- Vorgehen Baden-Württemberg/Bayern ähnlich

Es ist vorgesehen, örtlich unterschiedliche getrennte Klimafaktoren bis Ende 2004 zu erarbeiten. Diese Faktoren finden Eingang in Baden-Württemberg in einen „Leitfaden Bemessungshochwasser“. Es ist vorgesehen, die Kollegen aus Bayern und Rheinland-Pfalz hierbei zu beteiligen.

Die Einführung von einzugsgebietsweisen, unterschiedlichen Klimafaktoren bedeutet, dass diese zunächst mit Priorität für Neuanlagen für Hochwasserschutzanlagen anzuwenden sind in der Weise, dass ein Klimastandfall zu rechnen ist. Im Einzelfall ist dann zu entscheiden, ob die Hochwasserschutzanlage sofort auf einen höheren Bemessungsabfluss ausgelegt wird, ob planerisch eine Erweiterung vorgesehen und ggfs. später erweitert wird oder ob derzeit nichts zu veranlassen ist. Inwieweit bestehende Anlagen überrechnet werden sollen, hängt vom Einzelfall (Schadenspotential, Freibord noch vorhanden, neue Erkenntnisse, Begrenztheit der Finanzmittel) ab.

2.2.3 Die Hochwasservorsorge hat zunächst nichts mit der Klimaänderung zu tun, ihre Umsetzung ist aber um so dringlicher.**2.2.4** Bewusstseinsbildung

Sowohl die Klimaänderung als auch das Restrisiko hinter Dämmen ist in der breiten Öffentlichkeit ohne Emotionen darzustellen. Als Instrument hat sich in Baden-Württemberg bereits seit einem Jahr die Einrichtung von Hochwasserschutzpartnerschaften als nachhaltiges Instrument bewährt. Darüber hinaus werden landesweit in den nächsten 8 Jahren in Baden-Württemberg sogenannte Gefahrenflächen als Grundlage für die Bewusstseinsbildung erarbeitet.

2.2.5 Insbesondere auch im Zusammenhang mit der Klimaänderung ist die Zusammenarbeit zwischen Wasserwirtschaft und DWD weiter zu pflegen. Aber auch die Zusammenarbeit zwischen Wasserwirtschaft, Raumordnung/Bauleitplanung, Katastrophenschutz aber auch Versicherungswirtschaft ist weiter voranzubringen.

2.2.6 Der DWD wird gebeten, so schnell wie möglich den KOSTRA-Atlas aus dem Jahre 1997 fortzuschreiben. Seither sind nur Zeitreihen von 1951 bis 1980 enthalten, während in der laufenden Überarbeitung nunmehr die Zeitreihen bis zum Jahr 2000 verlängert wurden. Es ist nicht auszuschließen, dass daraus, insbesondere wegen dem veränderten Niederschlagsverhalten ab dem Jahre 1970, „Überraschungen“ zu erwarten sind.

3. Weiteres Vorgehen beim KLIWA-Projekt

- Der Teil Hochwasser ist abzuschließen. Es ist beabsichtigt, auch weitere Klimamodellierungen zu begleiten, jedoch keine weiteren regionalen Klimamodelle im Rahmen von KLIWA anzustoßen.
- Als weitere Themen in KLIWA ist beabsichtigt, das Thema Niedrigwasser und den Komplex Siedlungsentwässerung, insbesondere im Zusammenhang mit konvektiven Niederschlägen, anzugehen; später soll das Thema Grundwasser bearbeitet werden.
- Es ist vorgesehen, ein repräsentatives KLIWA-Messnetz für die Evaluierung in den Ländern Bayern und Baden-Württemberg einzurichten.