

Bruno Merz, Thomas Maurer und Knut Kaiser

# Wie gut können wir vergangene und zukünftige Veränderungen des Wasserhaushalts quantifizieren?

**How well can we quantify past and future changes of the water cycle?**

Es herrscht weitgehend Konsens, dass sich der Wasserhaushalt in Mitteleuropa und darüber hinaus ändert. In diesem Beitrag werden die Möglichkeiten und Grenzen der Quantifizierung von Veränderungen des Wasserhaushalts mit einem Schwerpunkt auf dem Klimawandel schlaglichtartig beleuchtet. Weiterhin sollen Denkanstöße für den Umgang mit solchen Veränderungen gegeben werden.

**Schlagwörter:** Klimawandel, Quantifizierung, Umgang mit hydrologischen Veränderungen, Veränderungen Vergangenheit, Veränderungen zukünftig, Wasserhaushalt

There seems to be broad consensus that the water cycle in Central Europe and beyond is changing. We discuss the current possibilities and limitations of the quantification of hydrological changes with a focus on climate change. Based on these discussions, we try to compile ideas for handling hydrological change.

**Keywords:** Climate change, future changes, handling hydrological change, past changes, quantification, water cycle

## 1 Einleitung

Der Wasserhaushalt ist vielfältigen Einflüssen ausgesetzt, die auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen wirken. Neben der natürlichen Klimavariabilität und dem anthropogen verursachten Klimawandel werden der Wasserkreislauf und damit die Einzugsgebiete und Flusssysteme durch weitere, anthropogen bedingte Eingriffe und Faktoren beeinflusst, wie z.B. Bau von Speichern, Entnahmen und Überleitungen im Einzugsgebiet, Flussausbau, Veränderung der Landnutzung und landwirtschaftlichen Praktiken. Aufgrund dieser vielfältigen Treiber wird die Annahme einer Stationarität der statistischen Eigenschaften von Zustandsvariablen der Flussgebiete, die in der Wasserwirtschaft traditionell häufig vorausgesetzt wird, zunehmend infrage gestellt (MILLY et al. 2008). Im vorliegenden Aufsatz werden die Möglichkeiten und Grenzen der Quantifizierung von Veränderungen des Wasserhaushalts mit einem Schwerpunkt auf dem Klimawandel schlaglichtartig beleuchtet. Dabei zeigt sich, dass die Möglichkeiten zur zuverlässigen Quantifizierung von Veränderungen auch heute noch in vielfältiger Weise begrenzt sind.

Dieser Aufsatz ist ein Ergebnis der Diskussionen im Projekt „Georesource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“ von acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften (MERZ et al. 2012a).

## 2 Wie gut können wir Veränderungen der Vergangenheit detektieren und attributieren?

Die Analyse von Veränderungen der Vergangenheit kann in die beiden Schritte Detektion und Attribution (oder Attributierung) eingeteilt werden (z.B. IPCC 2007). Unter Detektion wird in der Hydrologie und angrenzenden Disziplinen der Nachweis bezeichnet, dass eine beobachtete Änderung signifikant (im statistischen Sinn) unterschiedlich ist von Änderungen, die durch die natürliche Variabilität erklärt werden können. Attribution ist die anschließende Zuschreibung von Ursachen der Veränderung. Dies sollte den Nachweis einschließen, dass die detektierte Änderung konsistent mit den zugeschriebenen Ursachen ist, aber auch die Demonstration, dass andere plausible Ursachen nicht in

Übereinstimmung mit der beobachteten Änderung zu bringen sind.

Wasserhaushaltsgrößen können erheblich in Raum und Zeit variieren. Zu Analysezielen werden Zeitreihen hydrologischer Zustandsvariablen als Realisationen von stochastischen Prozessen aufgefasst. Deshalb basiert die Detektion typischerweise auf einem statistischen Argument: Es wird berechnet, ob die beobachtete Veränderung signifikant von der Nullhypothese „keine Veränderung“ abweicht. Solche Tests können jedoch keine sicheren Aussagen liefern, denn es sind zwei Arten von Fehlern möglich: Entweder wird fälschlicherweise eine Veränderung bestimmt, obwohl sie in Wahrheit durch die stochastischen Variationen in den Beobachtungen zu erklären ist (Fehler Typ-1), oder eine tatsächlich existierende Veränderung wird aufgrund der Überlagerung mit stochastischen Variabilitäten nicht identifiziert (Fehler Typ-2).

Die Ergebnisse der statistischen Analysen von Wasserhaushaltsgrößen sind daher mit Vorsicht zu interpretieren. Neben den immer vorhandenen, im Rahmen dieses Aufsatzes jedoch nicht weiter erörterten grundsätzlichen Problemen mit Messfehlern und Inhomogenitäten in Beobachtungsdaten, in langen Reihen insbesondere auch der Instationarität der Mess- und Auswerteinrichtungen, sind folgende Aspekte besonders hervorhebenswert:

- Es können unterschiedliche Typen von Änderungen wirksam sein: So zeigten beispielsweise DELGADO et al. (2010), dass mittlere Hochwasser im Verlauf einer 80-jährigen Beobachtungsreihe am Mekong abnahmen, während gleichzeitig die Variationen zwischen den Hochwasserscheitelwerten aufeinanderfolgender Jahre zunahm. Dieses gegenläufige Verhalten von Mittelwert und Varianz in dieser Zeitreihe kann dazu führen, dass eine abnehmende Hochwassergefahr von den üblicherweise eingesetzten Trendtests identifiziert wird, während die Wahrscheinlichkeit für das Eintreten eines großen Hochwassers tatsächlich steigt.
- Zeitreihen von Klima- und Wasserhaushaltsgrößen weisen häufig Fluktuationen auf unterschiedlichen, auch nieder-

frequenten Zeitskalen auf: Dieser sogenannte *Hurst-Effekt* (z.B. KOUTSOYIANNIS 2003, KOUTSOYIANNIS 2011) führt dazu, dass Abweichungen vom mittleren Verhalten für längere Zeiträume auftreten können. Sind diese Fluktuationen länger als die zur Verfügung stehende Beobachtungsperiode, so kann eine Fluktuation als Trend missinterpretiert werden.

- Die Fähigkeit der Detektion von tatsächlichen Veränderungen hängt vom Signal-Rausch-Verhältnis, von der Struktur und von der Länge der Zeitreihe ab: Die formelle Akzeptanz der Null-Hypothese bedeutet nicht notwendigerweise, dass keine Veränderung vorliegt. Eventuell ist nur die Zeitreihe zu kurz, um das Signal im hohen Rauschen zu erkennen. Diese Fehlerquelle (Fehler Typ-2) ist schwierig zu quantifizieren (FREI & SCHÄR 2001). Es existieren unterschiedliche Typen von statistischen Tests, die zu verschiedenen Ergebnissen führen können, da sie auf diversen Annahmen beruhen, z.B. über die Art der vermuteten Veränderung als Bruchpunkt oder als graduelle Änderung. Analyseergebnisse, insbesondere deren statistische Signifikanz, sind stark von den Annahmen und damit vom gewählten Test abhängig. Besondere Aufmerksamkeit erfordern in diesem Zusammenhang Autokorrelationen und niederfrequente Variabilitäten. LINS & COHN (2011) zeigen anhand der Zeitreihe 1856–2004 für die Jahresmittelwerte der Temperatur auf der Nordhalbkugel, dass die Signifikanz verschiedener Tests über viele Größenordnungen variieren kann. Wird angenommen, dass die Zeitreihe eine Realisation eines Prozesses mit langfristiger Persistenz und kurzfristiger Autokorrelation ist, so ergibt sich ein Signifikanzwert (0,07), der oberhalb der häufig gewählten Grenze von 5 % liegt. Wird dagegen ein Test gewählt, der von der iid-Annahme (unabhängig, identisch verteilt) ausgeht, ergibt sich ein hoch-signifikanter Wert von  $1,8 \times 10^{-27}$ . Es ist deshalb wichtig, dass ein Test ausgewählt wird, dessen Annahmen mit den Charakteristika des analysierten Prozesses konsistent sind, bzw. dass mehrere Tests angewendet werden, die auf unterschiedlichen Annahmen beruhen.

Aufgrund der Komplexität hydrologischer Zeitreihen als nicht-lineare Kombination einer Vielzahl von Prozessen, der häufig begrenzten Verfügbarkeit von verlässlichen Daten zum Wasserhaushalt sowie der oben genannten Aspekte können statistische Tests in den meisten Fällen nur als Hinweise auf Veränderungen des Wasserhaushalts gewertet werden. Wichtig erscheint die Attribution, also die Prüfung solcher Ergebnisse durch die Analyse der hinter der Veränderung vermuteten Mechanismen. Hier ergibt sich im Allgemeinen das Problem, dass sich die verschiedenen Einflüsse auf eine Wasserhaushaltsvariable, etwa den Abfluss, nicht ohne Weiteres separieren lassen.

Ein verbreitetes Vorgehen zur Attribution ist es, Vergleiche und Korrelationsanalysen zwischen der interessierenden Zustandsgröße des betrachteten Systems und den möglichen Verursachern der Veränderung durchzuführen. So verzeichnen die Niedrigwasserabflüsse (NM7Q) am Pegel Neu Darchau an der Elbe zwischen 1930 und 2000 einen zunehmenden Trend, während sowohl der mittlere Niederschlag als auch der mittlere Abfluss im Wesentlichen konstant bleiben. Dieser Vergleich lässt vermuten, dass die Zunahme der Niedrigwasserabflüsse aus einer veränderten Bewirtschaftung resultiert; in diesem Fall aufgrund der Erhöhung von Niedrigwasserabflüssen in Tschechien durch die

Moldaukaskade und die Talsperre Nechanice/Ohre (KOCH et al. 2010, MAURER et al. 2011). Die Summe der Stauräume an Moldau und Elbe in Tschechien beträgt dabei ca. 2,5 Mrd. m<sup>3</sup> (SIMON et al. 2005).

Solche Betrachtungen liefern jedoch häufig keine eindeutigen Antworten. MAURER et al. (2011) diskutieren beispielsweise auf Basis der Ergebnisse von BELZ et al. (2007) die Veränderungen des Abflussregimes des Rheins in den alpinen Regionen. Die Abflussmengen im Sommer sind während der letzten 100 Jahre zurückgegangen, im Winter dagegen angestiegen. Ein wichtiger Grund sind die milderen Winter. Es fällt mehr Niederschlag und dieser öfter als Regen anstatt als Schnee. Zusätzlich schmilzt aufgrund häufigerer und früher einsetzender Tauwetterperioden mehr Schnee bereits im Winter ab. Insgesamt wird weniger Schnee im Gebirge akkumuliert, und entsprechend weniger Schmelzwasser kann im Sommer abfließen. Dies stellt sich im Jahresgang des Abflusses als saisonaler Umverteilungseffekt vom Sommer zum Winter dar. Diese beobachtete Tendenz könnte ein Anzeichen für zukünftige Änderungen des Abflussregimes sein. Eine Tendenz zu höheren Winterabflüssen und geringeren Sommerabflüssen passt zur Überlegung, dass zukünftig infolge der globalen Erwärmung im Alpenraum und in den höheren Mittelgebirgslagen im Winter eine geringere Wassermenge in der Schneedecke gespeichert wird und damit deren puffernde Wirkung abnehmen könnte. Jedoch ist bei solchen Überlegungen zu berücksichtigen, dass die Talsperrenbewirtschaftung für die Wasserkraftnutzung im Alpenraum (nach WILDENHAHN & KLAHOLZ (1996) beträgt das Speichervolumen im Einzugsgebiet bis Basel ca. 1,9 Mrd. m<sup>3</sup>, nach WEINGARTNER & PFISTER (2007) 1,6 Mrd. m<sup>3</sup>) einen ähnlichen Umverteilungseffekt in vergleichbarer Größenordnung hat (MAURER et al. 2011). Damit ist die Frage offen, welcher Anteil der detektierten Veränderung auf Klimaeinflüsse zurückgeht.

Für eine überzeugende Attribution von detektierten Veränderungen von Wasserhaushaltsgrößen mittels Korrelationsanalysen und vergleichender Betrachtung verschiedener Zeitreihen müssen günstige Bedingungen vorliegen oder/und intelligente Attributionsanalysen durchgeführt werden. So kann der Abfluss eines Pegels durch eine Vielzahl von lokalen Veränderungen im Einzugsgebiet „kontaminiert“ sein, so dass es bei Betrachtung dieser einen Abflusszeitreihe u.U. schwer möglich ist zu entscheiden, ob und inwieweit z.B. eine klimatische Ursache hinter Abflussveränderungen steht. Möglicherweise lässt sich diese Frage durch regionale Trendstudien beantworten. Dabei werden möglichst viele Abflusszeitreihen von verschiedenen Einzugsgebieten einer Region auf Trends analysiert. Ergeben sich räumlich konsistente Trendergebnisse, so kann ein großräumig wirksamer Treiber angenommen werden. Es ist dann zu prüfen, ob außer klimatischen Ursachen andere Treiber vorstellbar sind, die ein regional konsistentes Veränderungssignal hervorrufen können. Basierend auf dieser Idee haben PETROW & MERZ (2009) Veränderungen der Hochwassergefahr in ca. 150 Einzugsgebieten in Deutschland für die Periode 1951–2002 untersucht. Ihre räumlich und saisonal konsistenten Ergebnisse weisen auf eine klimatische Ursache der Veränderung der Hochwassermagnitude in Deutschland hin.

Für eine detaillierte und quantitative Attribution von Veränderungen im Wasserhaushalt werden in den meisten Fällen Simulationsmodelle einzusetzen sein. KOCH et al. (2010) liefern ein Beispiel für die Abflüsse der tschechischen Elbe, die stark durch den Betrieb der Speicher an der Moldau beeinflusst sind. HUNDECHA

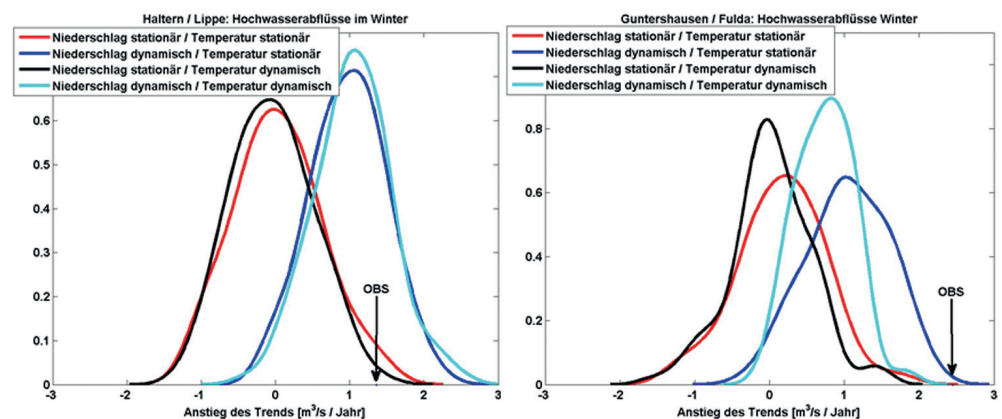
& MERZ (2012) versuchen, den klimatischen Anteil an beobachteten Trends von Hochwasserabflüssen mittels eines Simulationsansatzes zu quantifizieren. Ein Wettergenerator erzeugt viele Realisationen von räumlich konsistenten Feldern des Niederschlags und anderen klimatischen Parametern. Diese Felder dienen als Eingabe für ein räumlich detailliertes hydrologisches Modell, das kontinuierlich den Wasserhaushalt im Gebiet berechnet. Damit werden viele Realisationen von langen Abflusszeitreihen erzeugt, die auf Hochwassertrends ausgewertet werden. Durch unterschiedliche Parametrisierung des Wettergenerators können gezielt Simulationsexperimente durchgeführt werden, um so festzustellen, ob und bei welcher Parametrisierung des Wettergenerators die Trends der beobachteten Hochwasserabflüsse mit den entsprechenden simulierten Trends konsistent sind.

Abbildung 1 zeigt ein Ergebnis der Studie von HUNDECHA & MERZ (2012) für die Pegel Haltern/Lippe und Gunterhausen/Fulda. Es sind verschiedene Simulationsexperimente dargestellt, die sich in der Charakteristik der meteorologischen Eingabedaten unterscheiden. Im Fall „stationär“ werden die Beobachtungsdaten der gesamten Periode (1951–2003) verwendet, um den Wettergenerator auf monatlicher Basis zu parametrisieren. So ergeben sich die Parameter für den Monat Januar aus allen Werten, die in den 53 Januarmonaten der gesamten Periode beobachtet wurden. Trends bzw. zeitliche Veränderungen in den meteorologischen Beobachtungsdaten werden somit aufgehoben, und die generierten Zeitreihen sind Realisationen des Klimas im Einzugsgebiet unter stationären Bedingungen. Im Fall „instationär“ werden ebenfalls die Beobachtungen für die Parametrisierung des Wettergenerators genutzt. Allerdings werden für einen bestimmten Monat nur die Daten verwendet, die in einem 5-Jahres-Fenster um den interessierenden Zeitpunkt gemessen wurden. So basiert z.B. die Parametrisierung des Wettergenerators für den Januar 1970 auf den Beobachtungen des Januars der Jahre 1968–1972. Damit ist der Wettergenerator in der Lage, Realisationen von Temperatur- und Niederschlagszeitreihen zu generieren, die zeitliche Veränderungen in den Beobachtungsdaten berücksichtigen. Wird das hydrologische Modell nun mit den unterschiedlich generierten meteorologischen Zeitreihen angetrieben, lässt sich bewerten, inwieweit die Variationen der meteorologischen Größen im Einzugsgebiet die an den Pegeln tatsächlich beobachteten Hochwassertrends erklären können. Im Fall des Pegels Haltern/Lippe (Abb. 1 links) lässt sich der in der Periode 1951–2003 beobachtete Hochwassertrend (OBS) fast vollständig durch die Veränderungen des Niederschlags erklären. Im Fall des Pegels Gunterhausen/Fulda können die klimatischen Veränderungen während der Beobachtungsperiode den beobachteten Trend nur zu einem kleinen Teil erklären. Dies deutet darauf hin, dass es im Einzugsgebiet weitere Hochwasser-verschärfende Einflüsse gegeben hat. Eine

detaillierte Beschreibung des Ansatzes sowie seiner Möglichkeiten und Grenzen findet sich in HUNDECHA & MERZ (2012).

Diese Betrachtungen lassen sich wie folgt zusammenfassen und ergänzen:

- Die Analyse von Veränderungen des Wasserhaushalts ist – häufig motiviert durch die Frage nach dem Einfluss von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt – mittlerweile weit verbreitet. Viele Trendstudien liegen vor (z.B. IKSR 2009, 2011), deren Ergebnisse allerdings maßgeblich vom gewählten Test abhängen.
- Während die Frage der Detektion von Veränderungen in hydrologischen Zeitreihen häufig untersucht wird, scheint auf die schwierigere Frage der Attribution, also der Gründe der identifizierten Veränderungen, weniger Gewicht gelegt zu werden. MERZ et al. (2012b) diskutieren die Güte von Attributionsaussagen im Hinblick auf die Veränderung der Hochwassergefährdung. Sie kommen zu dem Schluss, dass sich die Attribution von als signifikant identifizierten Änderungen auf qualitative Analysen und teilweise sogar auf Spekulation beschränkt. Es scheinen größere Anstrengungen notwendig, um den Beitrag der verschiedenen Einflüsse (klimatische, anthropogene etc.) auf Veränderungen des Wasserhaushalts überzeugend zu quantifizieren.
- In Anbetracht der Komplexität vieler Wasserhaushaltskomponenten (Vielzahl anthropogener Eingriffe in Flusssysteme und Einzugsgebiete, Variabilitäten auf unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen, Interaktionen des Wasserhaushalts mit anderen Komponenten des Systems Erde-Mensch) sind die Möglichkeiten der Detektion und Attribution mittels statistischer Verfahren sehr beschränkt. Notwendig ist ein Verständnis der dominanten Mechanismen und Ursache-Wirkungs-Beziehungen (BLÖSCHL & MONTANARI 2010, RESZLER et al. 2008). Hiermit ist letztlich das Wesen des wissenschaftlichen Erkenntnisprozesses identifiziert, nämlich der iterative Prozess von Beobachtung, Hypothesenbildung zu dominanten Prozessen, Hypothesentests mithilfe von Modellen und Beobachtungen, veränderten Beobachtungsstrategien, verfeinerten Mo-



**Abbildung 1** Bedeutung von Veränderungen von meteorologischen Größen auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung von Winterhochwassertrends (verändert nach HUNDECHA & MERZ 2012). Links: Pegel Haltern/Lippe; rechts: Pegel Gunterhausen/Fulda (OBS: Hochwassertrend abgeleitet aus Abflussmessungen).  
*Relevance of changes in meteorological variables for the probability density distribution of winter flood trends (modified from HUNDECHA & MERZ 2012). Left: gauge Haltern/Lippe; right: Gunterhausen/Fulda (OBS: flood trend derived from streamflow measurements).*

dellansätzen usw. bei immer unbefriedigender Datenlage. In jedem Fall aber ist die statistische Analyse von Beobachtungsdaten zur Prozessaufklärung ein unumgängliches Werkzeug.

- Wissenschaftliche Arbeit erfordert es, sich ein möglichst genaues Bild von der Güte und Genauigkeit der Ergebnisse zu machen. Dazu ist es gute Praxis, (1) sich zu vergewissern, inwieweit getroffene Annahmen tatsächlich zutreffen, und (2) danach zu streben, Ergebnisse auf verschiedenen Wegen zu erarbeiten (Ensembles von Analysemethoden und Modellkonzepten).

### 3 Wie gut können wir zukünftige Änderungen im Wasserhaushalt quantifizieren?

Zukunft ist grundsätzlich durch Ungewissheit und Unsicherheit geprägt. Entwicklungen im System Erde-Mensch stehen in vielschichtigen Wechselwirkungen miteinander und laufen im Allgemeinen zu jedem Zeitpunkt und an allen Orten gleichzeitig und räumlich parallel auf sehr verschiedenen Raum- und Zeitskalen ab, weshalb sie uns teilweise stationär, teilweise kontinuierlich, aber teilweise auch sprunghaft vorkommen. Es sind immer mehrere, unterschiedliche Zukunftspfade denkbar, und durch die Auswahl eines bestimmten Zukunftspfades werden Alternativen ausgeschlossen und gleichzeitig neue mögliche Pfade eröffnet.

Der dominante Ansatz zur Quantifizierung zukünftiger Änderungen des Wasserhaushalts aufgrund des anthropogen verursachten Klimawandels ist die Implementierung von Modellketten (Abb. 2). Ausgangspunkt sind globale Emissionsszenarien, in der Regel Emissionsszenarien des IPCC (SRES 2000), als Randbedingung von globalen Klimamodellen. Seit den 1970er Jahren werden in die globalen Klimamodelle immer mehr Teilprozesse bei immer höherer räumlicher Auflösung integriert. Nach und nach wurden neben der Atmosphäre, Landoberfläche, Ozeane, Seeeis, Aerosole, Kohlenstoffkreislauf, Vegetationsdynamik und Atmosphärenchemie berücksichtigt (IPCC 2007). Die heute allgemein verfügbaren Projektionen globaler Klimamodelle haben eine räumliche Auflösung von etwa 100 km. Da diese Auflösung



**Abbildung 2**

Schema einer exemplarischen Modellkette zur Abschätzung von Klimafolgen innerhalb des Forschungsprogramms „KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt – Entwicklung von Anpassungsoptionen“ (BMVBS 2007).

*Typical model chain for assessing climate-change impacts in the programme „KLIWAS – Impacts of climate change on waterways and navigation – Searching for options of adaptation“ (BMVBS 2007).*

für die meisten hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen zu gering ist, erfolgt ein so genanntes *Downscaling*. Mittels dynamischer regionaler Klimamodelle werden die globalen Ergebnisse auf Skalen von teilweise bis zu ca. 10 km herunter gebrochen. Alternativ werden statistische *Downscaling*-Verfahren eingesetzt. Diese haben gegenüber den regionalen Klimamodellen den Vorteil, dass sie keine systematischen Fehler aufweisen, da ihrem Konstruktionsverfahren die Ableitung von statistischen Beziehungen in der Vergangenheit zugrunde liegt. Andererseits ist offen, wie weit in die Zukunft diese Zusammenhänge extrapoliert werden dürfen. Je nach Fragestellung können dem hydrologischen Modell weitere Modelle, z.B. zur Abschätzung der Feststoffdynamik, nachgeschaltet werden (MAURER et al. 2011).

Während der Implementierung einer solchen Modellkette muss eine Vielzahl von Entscheidungen getroffen werden. Beispiele sind Veränderungen des wasserwirtschaftlichen Systems infolge gesellschaftlicher Entwicklungen, z.B. der Ökonomie, der Technologie, der Energieversorgung, der Demografie, des Konsumverhaltens oder der Landwirtschaft. Zum Teil beeinflussen solche Veränderungen auch direkt das Klimasystem z.B. durch Treibhausgasemissionen. Das Klimasystem und mittelbar auch die wasserwirtschaftlichen Systeme werden darüber hinaus auch durch weitere, nicht vorhersehbare Ereignisse beeinflusst, wie vulkanische Eruptionen oder Variationen der Sonnenaktivität. Werden keine Annahmen über derartige Veränderungen getroffen, so wird implizit entweder davon ausgegangen, dass diesbezüglich alles beim Alten bleibt oder, wenn ein Phänomen überhaupt nicht abgebildet wird, dass es keine Rolle spielt. Beides ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen (MAURER et al. 2011).

Es ist also notwendig sich zu verdeutlichen, dass auf jeder Ebene der Modellkette Szenarien mehr oder weniger explizit in ein Modell „hineingesteckt“ und durch dieses in die Zukunft projiziert werden. Diese Projektionen werden dann auf der nächsten Ebene der Modellkette ggf. mit weiteren Annahmen erneut zu Szenariannahmen. Die Begriffe Szenario und Projektion verdeutlichen, dass es sich nicht um Vorhersagen, sondern um mögliche zukünftige Situationen handelt, in der Regel inklusive der Entwicklungspfade, die zu dieser zukünftigen Situation führen. KOSOW & GAßNER (2008) weisen darauf hin,

- dass Szenariotechniken die Wahrnehmung auf bestimmte Aspekte bzw. Schlüsselfaktoren der Zukunft richten und kein umfassendes Bild der Zukunft darstellen.
- dass die Auswahl und Kombination von Schlüsselfaktoren Konstruktionsarbeit ist. Dabei werden bestimmte Faktoren und Ereignisse als relevant erachtet und diese unter bestimmten Annahmen in Wechselwirkung miteinander gesetzt.
- dass jeder Szenariokonstruktion Annahmen zugrunde liegen, z.B. wie die Zukunft einmal aussehen könnte und wie bestimmte Trends verlaufen könnten.

Szenarien können somit keinen Wahrheitsanspruch haben, sondern sind nur hypothetische Konstruktionen möglicher Zukünfte auf Basis von gegenwärtigem Wissen und Vorstellungsvermögen (KOSOW & GAßNER 2008).

Die bisher genannten Unsicherheiten aus den Szenarioannahmen sind Unsicherheiten in den *Randbedingungen* der Modelle. Daneben gibt es noch eine Reihe weiterer Quellen der Unsicher-



heit entlang von Modellketten (KRAHE et al. 2009), nämlich infolge der gewählten *Modell(ketten)struktur*, der Bestimmung der *Modellparameter* und der Kenntnis der *Anfangsbedingungen* bei Simulationsbeginn:

- **Modellstruktur:** Die Struktur von Modellen und Modellketten definiert sich vor allem durch die Systemabgrenzung sowie durch die Entscheidung, welche Prozesse und Zustandsvariablen darin wie detailliert abgebildet werden. Dies beinhaltet sowohl die räumliche als auch zeitliche Auflösung und damit Kleinteiligkeit der Prozesse, aber auch die vorgesehenen Möglichkeiten der *Kopplungen und Rückkopplungen* zwischen Zustandsgrößen (auch über Skalen hinweg) sowie schließlich auch die Konsistenz bzw. Redundanzfreiheit. Denn insbesondere bei expliziter Kopplung verschiedener Modellsysteme aus unterschiedlichen Fachbereichen werden nicht nur Rückkopplungen zu den oberliegenden großskaligeren Modellen unterbunden, sondern auch Zustandsvariablen unabhängig voneinander sowie u.U. nach verschiedenen Verfahren erneut berechnet. Beispielsweise wird an der Schnittstelle zwischen Klimamodell und Wasserhaushaltsmodell häufig nur Niederschlag und Temperatur übergeben, obwohl in beiden Modellen i.d.R. der gesamte Wasserkreislauf abgebildet ist. Stand der Technik ist es gleichwohl, verkettete Teilmodelle einzusetzen (Abb. 2), die in den meisten Fällen einer Hierarchie folgend ohne Rückkopplung hintereinander abgearbeitet werden. Die Ausgabedaten des jeweils übergeordneten Modells liefern die Randbedingungen für das nachgeordnete Modell. Rückkopplungen und nicht-lineare Interaktionen stellen also ein erhebliches praktisches Problem bei der Entwicklung von dynamischen Modellen dar. Komplexität resultiert aus kombinatorischen und kumulativen Effekten der Interaktion von mehreren Komponenten, wobei die einzelne Komponente selbst das Verhalten nicht zeigt (KUMAR 2011). Einfache Modelle laufen Gefahr, wichtige Elemente und Interaktionen nicht zu enthalten und keine verlässliche Prozessbeschreibung zu liefern, während andererseits möglichst umfassende Modelle dazu tendieren, dass sie – aufgrund der resultierenden hohen Komplexität – schwierig zu parametrisieren, zu kalibrieren und zu interpretieren sowie häufig nicht zu validieren sind.
- **Modellparameter:** Die in Modellketten angelegten Prozesse müssen parametrisiert werden. Parameter sind Größen, die von außen gesetzt werden und das zu modellierende System charakterisieren. Sie beschreiben die von den Zustandsgrößen unabhängigen Eigenschaften der gewählten Modellstruktur des zu modellierenden Systems, d.h. im Kern die geometrischen, physikalischen oder bio-chemischen Eigenschaften, können jedoch je nach Abstraktionsgrad des gewählten Prozessmodells nicht immer direkt damit verknüpft werden. Idealerweise sind Parameter einer Messung zugänglich. Aber selbst dort, wo dies prinzipiell möglich ist, können Parameter oft nicht flächendeckend erhoben werden und müssen interpoliert werden. Oft können Parameter aber nicht direkt bestimmt werden, und es muss versucht werden, sie indirekt abzuleiten.
- **Anfangsbedingungen:** Dynamische Systeme mit nicht-linearen Interaktionen sind im Nahfeld immer und je nach Zustandsgröße und deren interessierender Kenngröße oft auch darüber hinaus sensitiv gegenüber den Anfangsbedingungen. Wenn Rückkopplungen Fehler des initialen

Zustands vergrößern, kann eine kleine Abweichung in den Anfangsbedingungen dazu führen, dass sich Trajektorien über die Zeit unterschiedlich entwickeln (s. z.B. Schmetterlingseffekt). Konkret bedeutet dies, dass ein zweiter Lauf ein und desselben Klimamodells (identische Modellstruktur und Parametrisierung, identische Randbedingungen) eine andere Ausprägung von raum-zeitlichen Feldern von klimatologischen Variablen liefert.

Aufgrund unseres begrenzten Wissens, beschränkter Beobachtungen sowie der Notwendigkeit zu Vereinfachungen in Folge von Ressourcenbeschränkungen, z.B. der Rechenkapazität, aber auch der menschlichen Arbeitskapazität (und der damit verbundenen Notwendigkeit zu arbeitsteiliger Modellentwicklung über Fachbereichsgrenzen hinweg bei gleichzeitig limitierter Organisationsfähigkeit), sind Simulationsmodelle also immer Approximationen des zu beschreibenden Systems. Vielfach wissen wir heute nicht genug, um bestimmte Prozesse einerseits zu modellieren bzw. andererseits zu parametrisieren, z.B. wie sich Wolken formieren (KNUTTI 2008) oder wie bestimmte Formen der Landnutzung die Abflussbildung in Einzugsgebieten beeinflussen (BLÖSCHL & MONTANARI 2009).

Der Einfluss der Anfangsbedingung, die Kopplung von Teilmodellen verschiedener Kompartimente und Skalen, die jedes für sich i.d.R. intern wiederum viele weitere Prozesse abbilden, die noch dazu unter Parameterunsicherheit leiden, zusammen mit der Notwendigkeit, Szenarien für verschiedene zukünftige Entwicklungen annehmen zu müssen, führt zu dem, was in der Literatur als „Unsicherheitskaskade“ (SCHNEIDER 1983) und „Unsicherheitsexplosion“ (HENDERSON-SELLERS 1993) bezeichnet wurde. Aussagen werden entlang der Modellkette immer unsicherer (MAURER et al. 2011).

Was aber ist ein angemessener Umgang mit all dieser Unsicherheit? Zunächst einmal, indem man versucht, sie zu quantifizieren. Diese Unsicherheitsquellen kann man erfassen, indem ein Berechnungslauf eines Klimamodells als eine mögliche Realisation eines „stochastischen Prozesses“ betrachtet wird. Somit können Ensembles von vielen Läufen, die sich jeweils in einem oder mehreren der o.g. Hinsichten unterscheiden, zur Beschreibung der Unsicherheit herangezogen werden. Entsprechend wird heute in der Klimafolgenforschung im Wesentlichen ein Ensemble-Ansatz gewählt (Multi-Szenario, Multi-Modell, Multi-Parametersatz, Multi-Anfangsbedingung). Die Idee ist, dass die verschiedenen Mitglieder eines Ensembles plausible Approximationen zur Beschreibung des Klimasystems sind, und dass das gesamte Ensemble eine repräsentative Stichprobe aus der Grundgesamtheit aller möglichen zukünftigen Zustände und damit des Unsicherheitsraums darstellt (z.B. NILSON et al. 2010, NILSON & GÖRGEN 2010).

Bei der Frage nach der Güte der Quantifizierung von zukünftigen Änderungen des Wasserhaushalts steht man vor dem Problem, dass Modellaussagen für die nächsten Jahrzehnte im Sinne eines Vergleichs von Beobachtung und Simulation nicht kurzfristig validiert werden können. Damit sind solche Modellergebnisse grundsätzlich verschieden von Wettervorhersagen oder Hochwasservorhersagen, welche auf täglicher Basis validiert werden können – auch wenn den Modellen die gleichen Annahmen und Gleichungen zugrunde liegen. In dieser Situation gewinnt ein Modell Glaubwürdigkeit, wenn es (1) im Einklang mit dem the-

oretischen Verständnis ist, d.h. prozessorientiert, und (2) konsistent zu den verfügbaren Beobachtungsdaten ist.

Ob die erste Bedingung erfüllt ist, lässt sich für viele Modelle nur schwer bewerten. So wird beispielsweise in hydrologischen Modellen die theoretisch bekannte Komplexität und Heterogenität von Abflussbildungsprozessen (präferentielle Fließwege, Schwellwertverhalten, Interaktion von Prozessen der Abflussbildung mit Vegetation, Fauna etc.) kaum abgebildet. Aber selbst wenn das Detail abgebildet werden könnte, es gäbe immer eine weitere, idealerweise aufzulösende Skala darunter (DOOGE 1997). Außerdem bestünde weiterhin das praktische Problem, dass niemals flächendeckend realistische Parameter in der erforderlichen räumlichen Auflösung ermittelt werden könnten.

Die zweite Bedingung, die Konsistenz zu Beobachtungsdaten, ist erfüllt, wenn gezeigt werden kann, dass die Modellkette im historischen Zeitraum in der Lage ist, die Statistik der jeweils interessierenden Phänomene abzubilden. Nach MAURER et al. (2011) ist das interessierende Phänomen möglichst differenziert zu bewerten nach:

- betrachteter Fluss- bzw. Speichergröße (Festlegung, was betrachtet wird; z.B. Abfluss oder Grundwasserstand),
- betrachteter statistischer Kennzahl der Größe (Festlegung, wie aggregiert wird; z.B. Mittelwert oder NM7Q),
- betrachtetem Ort bzw. betrachteter räumlicher Aggregation der Größe (Festlegung, worüber räumlich aggregiert wird; z.B. Europa, Rheingebiet, Kleineinzugsgebiet, Standort),
- betrachteter zeitlicher Aggregation der Größe (Festlegung, worüber zeitlich aggregiert wird; z.B. 30-Jahres-Zeitraum, Jahr, Monat, Tag, Stunde),
- betrachteter Zeithorizont für die Aussage (Festlegung, wie weit vorausgeschaut wird; z.B. Jahrzehnte, Jahre, Monate, Tage),
- Startzeitpunkt einer Voraussage (Festlegung der vorherrschenden Anfangsbedingungen; z.B. Berücksichtigung saisonaler Einflüsse).

Idealerweise sollte für jede interessierende Kombination dieser Dimensionen (nachfolgend Differenzierungs-Tupel genannt) anhand von zur Modellaufstellung nicht herangezogenen historischen Daten gezeigt werden, welche prognostische Fähigkeit die Modellkette für das Differenzierungs-Tupel besitzt, d.h., inwiefern sie die statistischen Kennzahlen der beobachteten Größen „nachhersagen“ kann. In der Praxis wird dieser Nachweis aus Gründen des Aufwands bzw. der Datenlage häufig nur exemplarisch erbracht, bzw. werden umgekehrt Modelle für andere Differenzierungs-Tupel angewandt, für die ein solcher Nachweis nicht erbracht wurde/werden konnte (MAURER et al. 2011). Ein Beispiel dafür ist die Anwendung eines regionalen Klimamodells zur Erstellung von Tagesniederschlägen für kleinere Einzugsgebiete mit dem Ziel, die Veränderung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten zu ermitteln, für das aber bisher lediglich der Nachweis erbracht wurde, dass es den monatlich gemittelten Niederschlag über Gesamtdeutschland mit einer gewissen Güte im Kontrollzeitraum nachvollziehen kann.

Wenn die Modellkette im historischen Zeitraum befriedigende Ergebnisse erzielt, d.h. also kalibriert und validiert werden konnte, erfolgt die Anwendung des Modells für die Zukunft. Diese Übertragung basiert auf der Hypothese, dass die Annahmen,

Gleichungen und Parametrisierungen des Modells außerhalb des beobachteten Bereichs extrapoliert werden können. Diese Hypothese ist offensichtlich gültig für einzelne Teile von Klimamodellen (z.B. theoretisch-physikalische Prinzipien der Massen- und Energieerhaltung), aber offen für andere Teile, nämlich im Fall von Parametrisierungen, die empirisch aus Beobachtungen abgeleitet wurden (KNUTTI 2008). Zur Frage, inwieweit diese Hypothese für hydrologische Modelle gültig ist, gibt es wenige Untersuchungen (VAZE et al. 2010). Die übliche Annahme, „das hydrologische Modell, kalibriert in historischer Periode, ist gültig für eine zukünftige Periode unter geändertem Klima“ ist durchaus fragwürdig. Naheliegender ist beispielsweise, dass die Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration zu Änderungen der Pflanzenphysiologie und in Konsequenz zu Änderungen der Wasserflüsse führt. Denkbar ist weiterhin, dass sich Treiber (z.B. Klimawandel), Struktur (z.B. Fließpfade, Landnutzung in Einzugsgebieten) und Dynamik (z.B. Abflussregime) von hydrologischen Systemen wechselseitig beeinflussen und verändern (SIVAPALAN 2011).

Eine Übereinstimmung zwischen Modell und Beobachtungen in der Vergangenheit ist somit nicht per se eine Garantie für eine zuverlässige Beschreibung des Systems in der Zukunft. Alle globalen Klimamodelle reproduzieren den beobachteten Anstieg der Temperatur relativ gut, verschiedene Rückkopplungen führen jedoch zu unterschiedlichen Projektionen der zukünftigen Erwärmung (KNUTTI 2008). Obwohl globale Klimamodelle ihre Fähigkeit, Beobachtungen zu simulieren, kontinuierlich verbessert haben, konvergieren sie kaum in ihren Projektionen. Eine Erklärung hierfür ist, dass mehr und mehr Prozesse und Rückkopplungen berücksichtigt werden mit neuen Möglichkeiten für Unsicherheitsquellen und Abweichungen zwischen den Modellen (KNUTTI 2008, TRENBERTH 2010).

Die Projektion des zukünftigen Wasserhaushalts erfolgte in der Vergangenheit häufig nur auf Grundlage der Implementierung einzelner Modellketten. Aufgrund der vielfältigen Unsicherheitsquellen und aufgrund teilweise dramatischer Abweichungen zwischen verschiedenen Modellketten werfen viele der bis heute vorliegenden Untersuchungen lediglich ein Schlaglicht auf denkbare zukünftige Zustände. Die Ergebnisse können bestenfalls als Anhalt gewertet werden, im ungünstigen Fall kommen sie einem Zufallsergebnis nahe (BLÖSCHL & MONTANARI 2009, MAURER et al. 2011). Heute wird zunehmend der bereits beschriebene Ensemble-Ansatz mit dem Ziel gewählt, durch die parallele Berechnung mit verschiedenen Klimamodellen eine Bandbreite für die interessierenden Kenngrößen abzuschätzen. Dieser Ansatz basiert auf der Erkenntnis, dass die Unsicherheiten der meisten Klimawandel-Projektionen durch die Unsicherheiten infolge unvollkommener Klimamodellstruktur und zugehöriger Prozessparameter dominiert werden (KNUTTI 2008).

Der Ensemble-Ansatz erfordert einen hohen Aufwand. Dabei ist offen, wie hoch die Aussagekraft der resultierenden Bandbreite ist – auch wenn die Nutzer von Klimaprojektionen die Abweichung zwischen verschiedenen Modellketten als Maß für die Unsicherheit betrachten. Die heute verfügbaren Klimamodelle sind als Sammlung der besten Modelle, die verschiedene Gruppen über die Jahre entwickelt haben, zu sehen. Allerdings erfolgte die Modellentwicklung nicht mit dem Ziel, die Unsicherheiten zu untersuchen; die Modelle sind nicht unabhängig voneinander und sind gegen die gleichen, möglicherweise fehlerhaften Datensätze kalibriert (KNUTTI 2008). Zusätzliche Modelle müssen

deshalb nicht notwendigerweise das Vertrauen in das Ergebnis erhöhen. Denn es ist offen, ob die Kollektion der bestehenden Klimamodelle eine adäquate Stichprobe der Grundgesamtheit aller möglichen und plausiblen Modelle ist; man spricht auch vom „ensemble of opportunity“. Selbst dort, wo verschiedene Modelle ein ähnliches Ergebnis liefern, besteht die Gefahr, dass das Ergebnis falsch ist, weil möglicherweise all diese Modelle denselben Fehler in ihrer Modellstruktur haben.

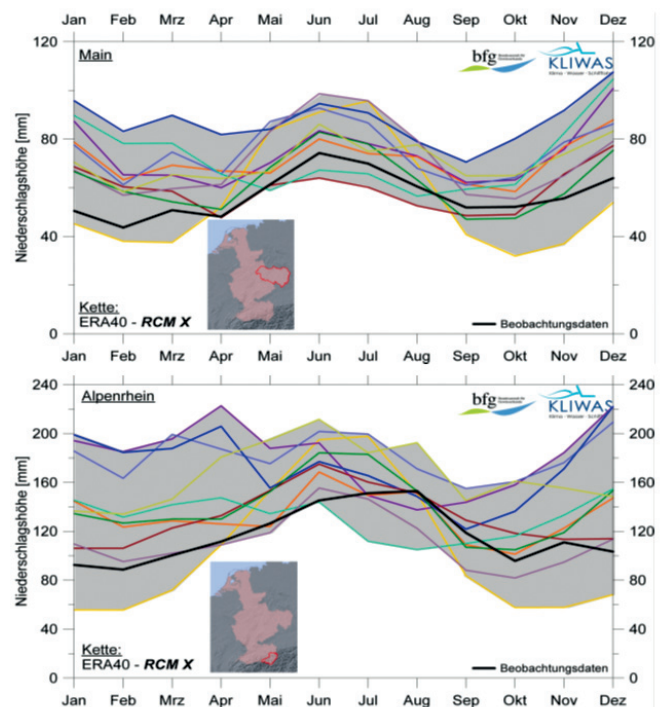
Auch wenn der Ensemble-Ansatz ein erheblicher Fortschritt gegenüber der Implementierung einzelner Modellketten ist, darf die Bandbreite, die sich aus der Untersuchung von Multi-Modell-Ensembles ergibt, nicht überbewertet werden. Es werden nicht alle Unsicherheitsquellen berücksichtigt, und es besteht immer die Möglichkeit, dass die Annahmen und Entscheidungen, die zur Einschränkung der Bandbreite und Unsicherheit gewählt wurden, sich als nicht haltbar herausstellen. KNUTTI (2008) folgert, dass die Bandbreite, die sich aus der Verwendung einiger Klimamodelle und/oder einem Anfangswert-Ensemble ergibt, kein gutes Maß für die tatsächliche Unsicherheit ist. An verbesserten Methoden zur Beschreibung der Unsicherheit (z.B. Bayes'sche Methoden, *Perturbed Physics Ensembles*, *Pattern Scaling Arguments*) wird gearbeitet (ENSEMBLES 2009, FISCHER et al. 2011, TEBALDI & KNUTTI 2007).

Um die Grenzen der heutigen Klimamodelle beispielhaft aufzuzeigen, soll ein Blick auf ihre Fähigkeit zur Beschreibung des Niederschlags geworfen werden. Gerade für diese für den Wasserhaushalt wichtige Größe sind die Fähigkeiten der globalen und regionalen Klimamodelle sehr begrenzt. KRAHE et al. (2009) berichten für das Rheingebiet von der Auswertung eines Multi-Modell-Ensembles regionaler Klimamodelle, die mit Reanalyse-Daten angetrieben wurden. Dabei ergaben sich systematische Fehler 30-jähriger Monatsmittel des Niederschlags auf einer räumlichen Aggregationskala von etwa 10.000 km<sup>2</sup> zwischen -74 % und +376 % für einzelne Modelle und Monate. Derartige systematische Fehler müssen vor einer weiteren Verwendung in Wasserhaushaltsmodellen korrigiert werden (Bias-Korrektur). Abbildung 3 zeigt für das Einzugsgebiet des Mains und des Alpenrheins die erheblichen systematischen Abweichungen simulierter monatlicher Niederschlagsmengen von den beobachteten Niederschlägen sowie, mit welcher Spannweite der simulierten Werte bei verschiedenen Klimamodellen zu rechnen ist. Wichtig hierbei ist, dass sich diese Spannweite allein aufgrund verschiedener regionaler Klimamodelle ergab, da alle Modelle mit den gleichen Reanalyse-Daten angetrieben wurden.

Die heute verwendeten Modellketten – ausgehend von globalen Emissionsszenarien über Klimamodelle bis hin zu hydrologischen Modellen – zur Quantifizierung von zukünftigen Änderungen des Wasserhaushalts sind hypothetische Konstruktionen von möglichen Zukünften aufgrund des gegenwärtigen Wissens. Wie gezeigt wurde, ist dieses Wissen in vielfacher Hinsicht begrenzt. Dementsprechend vorsichtig sind die Ergebnisse zu interpretieren. Wichtig dabei ist, dass die Unsicherheiten sehr unterschiedlich sind und beispielsweise von dem betrachteten hydrologischen Prozess, von der interessierenden statistischen Kennzahl sowie von der räumlichen Skala abhängen. Es ist ungleich problematischer, Aussagen über hydrologische Prozesse zu machen, die durch das Niederschlagsgeschehen dominiert werden, als über Temperatur-dominierte Prozesse. Ebenso ist es schwieriger, Aussagen zu Extremwerten zu machen als zu langjährigen

Mittelwerten. Und die Aussageschärfe nimmt umso mehr ab, je kleiner das betrachtete Gebiet ist.

Damit gehört die Projektion von Veränderungen des Abflussregimes für große Flusseinzugsgebiete zu den vergleichsweise einfacheren Aufgaben, insbesondere dann, wenn ein erheblicher Prozentsatz des Abflusses aus schmelzendem Schnee stammt. Denn ganz grundsätzlich ist bei höheren Temperaturen mit einer Verschiebung der Schneegrenze nach oben zu rechnen, d.h. auch mit kleiner werdenden Schneespeichern, die dann zum Sommer hin früher aufhören, den Abfluss zu stützen. Ungeachtet dessen bestehen aber auch in diesem einfachsten Fall erhebliche Unsicherheiten, vor allem aufgrund der großen Bandbreite der projizierten Niederschlagsmengen, aber auch aufgrund der tatsächlichen Veränderung der aktuellen Evapotranspiration. Zwar erhöht sich mit steigenden Temperaturen die potenzielle Evapotranspiration, jedoch ist im Einzelfall zu prüfen, in welchem Maß bei erhöhten Temperaturen das Boden- und Grundwasser für die Evapotranspiration überhaupt zur Verfügung steht (abhängig vom Flurabstand des Grundwasserspiegels). Ebenso ist z.B. zu untersuchen, inwieweit zusätzliche Wassermengen aus mög-



**Abbildung 3** Gemittelte monatliche Gebietsniederschlagshöhen in Teileinzugsgebieten des Rheins (1971–2000). Gegenüberstellung von Beobachtungsdaten (schwarze Linie) und von Daten, die von verschiedenen regionalen Klimamodellen abgeleitet, aus dem Reanalysen-Datensatz ERA40 (ENSEMBLES 2009) stammen. Main ( $A_{Eo} = 27.200 \text{ km}^2$ ; oben); Alpenrhein ( $A_{Eo} = 6.100 \text{ km}^2$ ; unten). Modelle: ALADIN, DMI\_HIRHAM, CLM, HADRM, REGCM, RACMO, METNO\_HIRHAM, CRCM, REMO, RCA (BÜLOW et al. 2009, KRAHE et al. 2009, aus: MAURER et al. 2011). *Averaged monthly precipitation over area in subcatchment of the River Rhine. Comparison of observation data (black curve) and data that originate from the re-analysis data set ERA40 (ENSEMBLES 2009) and were derived from several regional climate models. River Main ( $A_{Eo} = 27,200 \text{ km}^2$ ; top); Alpine Rhine ( $A_{Eo} = 6,100 \text{ km}^2$ ; bottom). Modes: ALADIN, DMI\_HIRHAM, CLM, HADRM, REGCM, RACMO, METNO\_HIRHAM, CRCM, REMO, RCA (BÜLOW et al. 2009, KRAHE et al. 2009, from: MAURER et al. 2011).*



licherweise vermehrten Winterniederschlägen ggf. im Grundwasserkörper gepuffert werden und damit – ähnlich künstlichen Speichern – u.U. für einen Ausgleich über das Jahr sorgen können (MAURER et al. 2011).

Am anderen Ende des Spektrums liegt die Aufgabe, zukünftige Veränderungen von extremen Sturzfluten zu bestimmen. Für diese Aufgabe werden Modellketten benötigt, die kurzzeitige Starkniederschläge gut beschreiben können. Allerdings sind die auf dieser Skala relevanten konvektiven Gewitterzellen gar nicht Bestandteil der Klimamodelle, sondern müssen – mit großen Unsicherheiten – parametrisiert werden. Aussagen über die Veränderung der Auftretenswahrscheinlichkeit von Sturzfluten während der nächsten Dekaden sind daher heute (noch) Spekulation.

## 4 Diskussionsanstöße

### 4.1 Daten und Beobachtungen

Eine entscheidende Grundlage für die solide Quantifizierung von vergangenen und zukünftigen Änderungen des Wasserhaushalts ist die Gewinnung, Dokumentation und Bereitstellung von langen Beobachtungszeitreihen und räumlichen Datensätzen. Es ist festzustellen, dass weltweit (1) die existierenden Messnetze nur unvollständige und inkompatible Daten bereitstellen, (2) eine Tendenz zur Reduzierung von hydro-meteorologischen Messnetzen besteht, und (3) die Bereitstellung und der Austausch von hydrologischen Daten unzureichend funktionieren (*observational gap*, UNESCO 2009). Es erscheint dringend notwendig, die bestehenden Monitoringsysteme zu erhalten und zu optimieren, die Dokumentation und den Zugang zu verbessern sowie in globale Ansätze zum Austausch von Daten und zur Datenanalyse zu investieren.

Zunehmend eröffnen sich neue technologische Möglichkeiten, den Wasserhaushalt zu erfassen, z.B. mittels Navigationssatellitensystemen (GPS) zur Bestimmung des atmosphärischen Wassergehalts (HEISE et al. 2008) oder durch die Nutzung von Satelliten-, Flugzeug- oder bodengestützten Gravimetriemessungen zur Detektion von zeitlichen Veränderungen der Wasserspeicherung in Landschaften. So leiten RODELL et al. (2009) für Nordwest-Indien für die Periode 2002–2008 aus den Schwerefelddaten der GRACE-Satelliten eine großräumige Abnahme der im Grundwasser gespeicherten Wassermengen ab. Sie folgern, dass die abnehmenden Grundwasserstände eine Konsequenz von nicht-nachhaltigen Grundwasserentnahmen sind. Damit wird erstmals eine Analyse der Grundwasseränderungen für diese Region (ca. 435.000 m<sup>2</sup>) vorgelegt. Auf der Feldskala erlauben Supraleitgravimeter die Bestimmung der Wasserspeicheränderung für größere Flächen und über alle Kompartimente (Schnee, Bodenwasser, Grundwasser etc.). Da Gravimeter die zeitlichen Veränderungen der Wassermenge als integralen Wert erfassen, sind sie ein vielversprechender Messansatz – komplementär zu den üblichen Messungen, die sich zumeist auf eine Größe und auf Punktaussagen beschränken (CREUTZFELDT et al. 2010). Allerdings bedarf es erheblicher Weiterentwicklungen, um Gravimetriemessungen zu einem operationellen Messansatz in der Hydrologie zu machen.

Neue Generationen von kostengünstigen, kleinen, ggf. redundanten und kabellosen, selbst-organisierenden Sensornetzwerken lassen umfassende und in Echtzeit verfügbare Daten-

sätze erwarten (*ubiquitous sensor networks, ubiquitous sensing*; MASINDE & BAGULA 2010). Selbst-organisierende Netzwerke besitzen keine festgelegte Richtung der Kommunikation innerhalb des Netzwerks, so dass der Informationsfluss auch dann funktioniert, wenn ein Netzwerkknoten ausfällt. RICE & BALES (2010) zeigen, wie operationelle Schneemessungen durch Sensornetzwerke angereichert werden können, und wie es dadurch möglich wird, räumliche Mittelwerte und die Variabilität der Schneehöhe sehr viel besser zu erfassen. Es ist denkbar, dass die rapide wachsenden Möglichkeiten, multi-dimensionale Datensätze in Echtzeit zu erfassen, dazu führen, dass hydrologische Phänomene durch Daten-getriebene Ansätze zuverlässiger beschrieben und quantifiziert werden können als durch Ansätze, die auf Prozess-nachbildenden Simulationsmodellen beruhen und mit Daten kalibriert wurden (KUMAR 2011). Ein denkbare Beispiel ist, dass im Falle einer möglichen Überflutung mobile Messstationen installiert und Fernerkundungsplattformen auf die Zielregion ausgerichtet werden und diese Daten mit über das Internet verfügbaren Informationen, z.B. zu vergleichbaren historischen Ereignissen, verknüpft werden. So stehen während des Ereignisses große, laufend aktualisierte Datenmengen bereit. Mit *Data Mining*-Ansätzen, also Ansätzen an der Schnittstelle von Künstlicher Intelligenz, Maschinellern und Statistik, werden diese Datenmengen nach Mustern, Zusammenhängen und Anomalien durchsucht, um schließlich lokale Vorhersagen von Überflutungsvorgängen und damit verbundenen Auswirkungen zu formulieren. Der größte Nutzen ist aus solchen Entwicklungen zu erwarten, wenn in gemeinsamen Anstrengungen global abgestimmte Observatorien und Messkonzepte entwickelt werden, einschließlich – und das kann nicht genug betont werden – Planung und Finanzierung des gesamten Lebenszyklus' der erhobenen Daten, ganz gleich, ob sie aus Forschungsdatennetzen oder operationellen Datennetzen stammen (MAURER 2004). Denn ohne professionelle Datendokumentation (u.a. inkl. der räumlichen und zeitlichen Repräsentativität, z.B. mittels des „Skalentriplett“ (BLÖSCHL 1996), bestehend aus Ausdehnung, Abstand, Stützung einer Messung) sowie Datenarchivierung ist es nur eine Frage der Zeit, dass Daten wieder verloren gehen. Eine ähnlich umfassende Lösung für Messdaten aller Art ist gefragt, wie sie für Schriftgut durch das System internationaler Bibliotheken bereits seit Jahrzehnten existiert. Das *Global Earth Observation System of Systems* (GEOSS) ist dabei ein grundsätzlich vielversprechender Ansatz, der genau danach strebt, nämlich die Vielfalt der heterogenen Systeme und Ansätze zusammenzuführen. GEOSS muss jedoch auf regionaler, nationaler und lokaler Skala durch einen radikalen Umbau von Datenhaltungsinfrastrukturen nach internationalen Standards vielfach erst noch zum Leben erweckt werden. Darüber hinaus sind Strategien zu entwickeln, um gezielt unsere Fähigkeit zu verbessern und zu testen, Veränderungen im Wasserhaushalt zu beobachten; beispielsweise in Regionen, die besonders sensibel auf bestimmte Treiber reagieren, oder in Einzugsgebieten mit einer engen Kopplung verschiedener Treiber (SIVAPALAN 2011).

### 4.2 Prozessverständnis und Modellketten

Es ist offensichtlich, dass unser heutiges Verständnis von Prozessen und Rückkopplungen entlang der gesamten Modellkette nicht ausreicht, um viele der Fragen nach der Zukunft des Wasserhaushalts zu beantworten. Bei der Weiterentwicklung und beim Einsatz von Modellen sollte zwischen verschiedenen Zielsetzungen unterschieden werden. Szenarien und Projektionen können genutzt werden, um eine bestimmte Managementstrategie auf



ihre Zukunftsfähigkeit zu testen bzw. um eine Strategie aus der Vielzahl der möglichen Strategien auszuwählen. Ziel kann es aber auch sein, möglichst unterschiedliche hypothetische Zukünfte zu entwerfen, um das Mögliche zu erfassen und nicht nur das Wahrscheinliche. Im letzten Fall sollten Szenarien und Modellannahmen durchaus freier gewählt werden, um die Möglichkeit von Überraschungen nicht zu sehr zu beschränken. Die Weiterentwicklung und der Einsatz von Modellen stehen deshalb in Beziehung zu der Frage, die beantwortet werden soll. Diese Beziehungen werden generell zu wenig diskutiert. Beispielsweise werden momentan viele Ressourcen in die Abschätzung der Veränderung des Hochwasserrisikos aufgrund des Klimawandels investiert. Dabei wird häufig vergessen, dass andere Treiber (z.B. wasserwirtschaftliche Infrastruktur; Landnutzungsänderungen; politische, gesellschaftliche und ökonomische Entwicklungen) eine weitaus bedeutendere Rolle spielen können.

Der heute dominierende Ansatz zur Quantifizierung von Wasserhaushaltsveränderungen nutzt aufwändige und komplexe Modellketten und unterliegt bis auf Weiteres vielfältigen Limitierungen. Wichtigste Erkenntnis aus bisherigen Ergebnissen ist, dass es nicht eine mögliche Zukunft gibt, sondern Bandbreiten möglicher Zukünfte, wobei fraglich ist, wie gut diese Bandbreiten die tatsächliche Unsicherheit beschreiben. Neben systematischen Untersuchungen über dominierende Ursache-Wirkungs-Beziehungen auf der „Belastungsseite“ sollte man sich der Problematik gleichzeitig verstärkt von der „Widerstandsseite“ nähern. Dazu gehören die Beantwortung der Frage, wie hydrologische und wasserwirtschaftliche Systeme auf Veränderungen reagieren, sowie die Entwicklung von Ansätzen zur Klassifizierung von hydrologischen und wasserwirtschaftlichen Systemen hinsichtlich ihrer Vulnerabilität auf Veränderungen.

Sollen Interaktionen analysiert und der mögliche zukünftige Zustandsraum durchleuchtet werden, dann sollte auch versucht werden, die „Ko-Evolution“ zwischen klimatischen, hydrologischen, geomorphologischen, ökologischen und humanen Sub-Systemen zu erfassen (SIVAPALAN 2011). Fragen nach dem Zusammenhang zwischen Treiber (z.B. Klima), Struktur (z.B. Fließpfade, Konnektivität) und Dynamik (z.B. Abflussbildungsprozess) können dann von Bedeutung sein und neue Simulationsansätze erfordern. Zu häufig orientieren sich Analysen und Strategien bislang an dem, was bereits aufgetreten ist. Vor dem Hintergrund immer schnellerer Veränderungen, zunehmend engerer Wechselwirkungen zwischen Mensch und Natur sowie wachsender Schadenspotenziale aufgrund eines höheren Nutzungsgrads ist es notwendig, nicht nur nach dem Wahrscheinlichen, sondern auch nach dem Möglichen zu suchen. Dies erfordert neue Modellansätze, die Interaktionen zwischen Systemen sowie die Möglichkeit von Schwellwertverhalten und Regimewechseln berücksichtigen.

### 4.3 Grenzen des Wissens und Unsicherheiten

Die Darlegungen zeigen, dass wir bisher vergleichsweise wenig über die möglichen Änderungen des Wasserhaushalts während der nächsten Dekaden wissen können. Unsere Werkzeuge, d.h. im Wesentlichen also Modellketten, sind mit großen Unsicherheiten verbunden. Wenn wir heute Entscheidungen fällen müssen, die Auswirkungen während der nächsten Dekaden haben, ist es angebracht, unser begrenztes Wissen und unsere Abschätzungen zu akzeptieren. Einige Unsicherheiten sind intrinsisch und nicht reduzierbar (z.B. Zeitpunkt und Auswirkungen von Vulkanausbrüchen in der Zukunft).

Wichtig ist es, sich die ursprüngliche Funktion von Szenarien bewusst zu machen, nämlich mögliche Zukünfte zu konstruieren, mit dem Ziel, Hypothesen und Problemkonstellationen zu durchdenken. Die Quantifizierung von Projektionen in numerischen Modellen beinhaltet die Gefahr, dass ein Grad von Zuverlässigkeit wahrgenommen wird, der nicht wirklich gegeben ist (BUNN & SALO 1993). Die zahlreichen Belege über die Schwierigkeit in die Zukunft zu sehen und über nicht-eingetretene Vorhersagen (SCHNAARS 1987, TALEB 2010) sollten Anlass zu Bescheidenheit sein.

In dieser Situation ist es hilfreich, die Grenzen des bestehenden Wissens stärker auszuloten und offen zu kommunizieren, ein „ehrlicher Makler“ des begrenzten Wissens und der impliziten Unsicherheit sowie möglicher Handlungsoptionen zu sein (PIELKE 2007, VON STORCH 2009). Welche (bedingten) Veränderungen können mit einer vernünftigen Zuverlässigkeit prognostiziert werden? Für welche Fragen liefern die heutigen Modellketten zwar Antworten, aber ohne dass diesen Antworten eine befriedigende Sicherheit zugewiesen werden kann? BLÖSCHL & MONTANARI (2009) unterscheiden zwischen *hard facts*, Folgen des Klimawandels, die vernünftig abschätzbar sind, und *soft facts*, solchen Folgen, die sehr große Unsicherheiten bergen bzw. spekulativ sind. Diese Grenzen des Wissens dürften enger sein als häufig gedacht. Es erscheint sinnvoll, Problemstellungen in ähnlicher Weise zu kategorisieren und Fragen, die heute schon mit einer vernünftigen Aussageschärfe beantwortet werden können, von solchen Fragen zu trennen, die im Bereich der Spekulation sind.

Eng damit verbunden sind die Aspekte der Kommunikation von Unsicherheiten. Idealerweise sollten die Annahmen, Modell-/Parameterentscheidungen sowie die Unsicherheiten den Entscheidungsträgern und Nutzern von Modellergebnissen kommuniziert werden. Denn verlässliche Informationen über den Grad der Zuverlässigkeit eines Ergebnisses sind wesentliche Voraussetzung für gute Entscheidungen. Dies bedeutet, dass verständlich dargestellt werden sollte, was diese Unsicherheit bedeutet bzw. wie sie zustande gekommen ist und was sie vermutlich enthält. Die Darstellung von Annahmen, Entscheidungen und Unsicherheiten ist jedoch häufig zu komplex, zu schwierig oder zu zeitaufwändig (KNUTTI 2008). Dann muss der Modellierer die Modellergebnisse und Unsicherheiten für den Nutzer interpretieren, jedoch angesichts der „postnormalen Situation“ – nämlich große Schadenspotenziale bei sehr unsicheren Eintretenswahrscheinlichkeiten (VON STORCH 2009) – in der Rolle als der bereits o.g. „ehrliche Makler“ (PIELKE 2007). Zu verstärken ist die Diskussion darüber, welche Rolle Unsicherheiten bei Entscheidungen spielen und welche Strategien und Entscheidungskriterien in Situationen mit großer Unsicherheit vorteilhaft sind (z.B. Flexibilität; s. die Diskussion hierzu im Rahmen des Hochwasserrisikomanagements in MERZ et al. 2010).

### 4.4 Projektionen und Entscheidungsfindung

Bei der Diskussion über zukünftige Änderungen des Wasserhaushalts und die Auswirkungen auf die Wasserwirtschaft steht der Szenario-getriebene Ansatz der Modellketten im Zentrum. PRUDHOMME et al. (2010) weisen darauf hin, dass sich zwar viele Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt finden, dass dem aber nur wenige Beispiele für Anpassungsentscheidungen als Folge solcher Studien gegenüber stehen. Ein Grund könnte sein, dass die Entscheidungsträ-

ger aufgrund sich widersprechender Aussagen bzw. aufgrund großer Ergebnisbandbreiten keine vernünftigen Folgerungen für ihr Handeln ableiten können. Unter solchen Umständen ist die bewusste Wahl, zunächst keine großen Investitionen (und somit potenziell auch Fehlinvestitionen) zu tätigen, auch eine ernstzunehmende Alternative. Problematisch ist auch, dass die Auswahl einer optimalen Managementstrategie stark vom gewählten Szenario sowie von wissenschaftlichen und sozio-ökonomischen Unsicherheiten abhängt. Außerdem sind bei jedem neuen Szenario die Managementstrategien neu zu prüfen, falls es sich nicht um Einmalentscheidungen ohne Möglichkeiten der Korrektur handelt.

Neben diesen *Top-Down*-Strategien, die vom Emissionsszenario entlang der Modellkette bis zur Managementstrategie führen, werden auch *Bottom-Up*-Strategien verfolgt. Ein Beispiel ist das Konzept der Anpassungs-Kipppunkte (*adapation tipping points*; KWADIJK et al. 2010). Dieses Konzept setzt gewissermaßen am Ende der Modellkette an und analysiert die Frage, ob und für wie lange die jetzigen Managementstrategien unter verschiedenen Klimawandel-Projektionen ausreichend wirksam sind. Ein Anpassungs-Kipppunkt wird dann erreicht, wenn die durch den Klimawandel hervorgerufene Magnitude der Änderung so groß ist, dass die jetzige Bewirtschaftungsmethode nicht mehr ausreicht und eine alternative Managementstrategie notwendig wird. Das heißt, es wird nicht versucht, möglichst genau den möglichen Klimawandel abzuschätzen und dann die Managementstrategie darauf auszurichten, sondern die Frage lautet umgekehrt: Mit welchem Klimawandel können wir umgehen? Was sind die ersten Probleme, mit denen wir als Folge des Klimawandels konfrontiert werden, und wann ist das zu erwarten? Es geht also um eine Sensitivitätsanalyse des bestehenden Managementsystems. Basis dieses Ansatzes ist, dass der Klimawandel nur dann von Relevanz für einen bestimmten Entscheider ist, sofern er zu anderen Entscheidungen führt. Die Sensitivität bzw. die Anpassungsfähigkeit des zu bewirtschaftenden Systems stehen im Fokus und nicht der Klimawandel per se. In ähnlicher Weise analysieren PRUDHOMME et al. (2010) die Robustheit von Sicherheitszuschlägen für Hochwasser. Zentraler Ansatz ist eine Sensitivitätsanalyse verschiedener Einzugsgebiete für einen plausiblen Bereich von Klimawandel-Projektionen. Damit ist die Analyse sozusagen Szenario-neutral. Die Analyse baut nicht auf einer möglichst guten Abschätzung des Klimawandels und seiner Folgen auf, sondern bestimmt, wie vulnerabel ein Einzugsgebiet hinsichtlich plausibler Klimawandel-Szenarien ist. So lassen sich Einzugsgebiete schnell nach ihrem Grad der Vulnerabilität hinsichtlich Klimawandel klassifizieren. Allerdings muss zumindest für die vulnerablen Systeme zu irgendeinem Zeitpunkt bestimmt werden, wann der Kipppunkt erreicht sein wird, und dafür ist eine Quantifizierung der Belastungsseite bzw. eine Wahl aus deren Bandbreite erforderlich.

Der anthropogen verursachte Klimawandel ist ein Treiber für Veränderungen des Wasserhaushalts – neben vielen anderen Treibern (Wasserentnahmen, Wasserrückhalt durch Talsperren etc.), deren Einflüsse die Wirkung des Klimawandels teilweise um ein Vielfaches übersteigen dürften (s. z.B. FALKENMARK & LANNERSTAD 2005, GRAF 1999, KLEMEŠ 1991). Klimawandel ist „nur“ eine Erweiterung des seit jeher auf der Tagesordnung stehenden Themas des Umgangs mit Schwankungen, Extremen und Veränderungen. Allerdings ist er eine zusätzliche Quelle der

Veränderung und Unsicherheit und damit ein weiterer Grund für Bescheidenheit und umsichtiges Agieren. Letztendlich erfordert er keine grundsätzlich neuen Strategien, sondern macht Strategien des Risikomanagements und der Erhaltung bzw. Schaffung von Flexibilität notwendiger denn je.

Die Wasserwirtschaft hat traditionell auf der Grundlage der Stationaritätsannahme gearbeitet, d.h. letztlich unter der Annahme, dass die Vergangenheit als Richtschnur für die Zukunft dienen kann. Heute wird diese Annahme zunehmend als nicht mehr gültig betrachtet. Die Stationaritätsannahme hat der Wasserwirtschaft in der Vergangenheit allerdings gut gedient und sollte nicht verworfen werden, solange nicht gezeigt wird, dass die angenommenen Veränderungen genügend genau erfasst werden können (MATALAS 1998). Reichen die Hinweise, dass die Größe der erwarteten Änderungen für die nächsten Dekaden sich signifikant von der Variabilität der vergangenen Dekaden unterscheidet? Welche Anpassungsmaßnahmen sind also angemessen? Tatsächlich ist die wasserwirtschaftliche Infrastruktur vielerorts durch einen hohen Grad an Robustheit gekennzeichnet (KLEMEŠ 1991). Aufgrund von bestehenden Redundanzen und Überkapazitäten kann daher vermutet werden, dass sie auch weiterhin fähig ist, sich durch technologische und institutionelle Veränderungen an „Stress“ infolge des Globalen Wandels anzupassen. Bevor also die Stationaritätsannahme verworfen wird, sollte zunächst Klarheit gewonnen werden, wie zuverlässig wir vergangene und zukünftige Veränderungen quantifizieren können.

## 5 Zusammenfassung

Die Diskussion der heutigen Möglichkeiten zur Quantifizierung von (1) Veränderung des Wasserhaushalts in der Vergangenheit sowie von (2) möglichen zukünftigen Entwicklungen zeigt vielfältige Begrenzungen auf. In Anbetracht der Vielzahl anthropogener Eingriffe in Flusssysteme und Einzugsgebiete, der Interaktionen des Wasserhaushalts mit anderen Komponenten des Systems Erde-Mensch und aufgrund hoher Variabilität auf unterschiedlichen Zeit- und Raumskalen können vergangene Veränderungen nur sehr beschränkt detektiert und attribuiert, also einer oder mehreren Ursachen zugeordnet werden. Projektionen der zukünftigen hydrologischen Verhältnisse sind in höher auflösenden Raum- und Zeitskalen sehr unsicher, und viele der heutigen Modellketten zu den Folgen des Klimawandels werfen lediglich ein Schlaglicht auf denkbare zukünftige Zustände. Dementsprechend ist es wichtig, die Grenzen und Unsicherheiten solcher Analysen zu erfassen und zu kommunizieren und in der Entscheidungsfindung zu berücksichtigen.

## Summary

The discussion of today's possibilities for quantifying (1) changes in the water cycle in the past and (2) possible future developments illustrates many limitations. As a consequence of the large variety of human interventions in catchments and rivers, of interactions between the water cycle and other components of the system earth-man, and of the high variability on different space and time scales, we are very limited in detecting and attributing (i.e. linking changes to causes) past changes. Projections of the future hydrological cycle on regional scales and short-time scales are very uncertain. Hence, it is important to determine and communicate the limits and uncertainties of such analyses, and to consider them in the decision-making process.

**Danksagung**

Wir danken acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften – für die Möglichkeit der Bearbeitung und Diskussion des vorgestellten Themas im Rahmen des Projekts „Geoessource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel“ (Leitung R. F. Hüttl/ Potsdam).

**Anschriften der Verfasser:**

Prof. Dr. B. Merz

Dr. K. Kaiser

Helmholtz-Zentrum Potsdam

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ

Telegrafenberg, 14473 Potsdam

bmerz@gfz-potsdam.de

Dr. T. Maurer

Bundesanstalt für Gewässerkunde

Am Mainzer Tor 1, 56068 Koblenz

**Literaturverzeichnis**

- BELZ, J.U., G. BRAHMER, H. BUIITEVELD, H. ENGEL, R. GRABHER, H. HODEL, P. KRAHE, R. LAMMERSEN, M. LARINA, H.-G. MENDEL, A. MEUSER, G. MÜLLER, B. PLONKA, L. PFISTER & W. VAN VUUREN (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends. – Schriftenreihe der KHR, Bd. I-22, Koblenz und Lelystad
- BLÖSCHL, G. (1996): Scale and Scaling in Hydrology (Habilitationsschrift). – Wiener Mitteilungen, Wasser-Abwasser-Gewässer 132. – Technische Universität Wien, 346pp.
- BLÖSCHL, G. & A. MONTANARI (2010): Climate change impacts – throwing the dice? – *Hydrological Processes* 24, 374–381
- BMVBS (2007): Schiffahrt und Wasserstraßen in Deutschland – Zukunft gestalten im Zeichen des Klimawandels – Bestandsaufnahme. – Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Berlin
- BÜLOW, K., D. JACOB & L. TOMASSINI (2009): Vergleichende Analysen regionaler Klimamodelle für das heutige und zukünftige Klima. – In: BMVBS (Hrsg.): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schiffahrt in Deutschland. Tagungsband der ersten KLIWAS-Statuskonferenz, 96–105
- BUNN, D.W. & A.A. SALO (1993): Forecasting with scenarios. – *European Journal of Operational Research* 68, 291–303
- CREUTZFELDT, B., A. GÜNTNER, S. VOROGUSHYN & B. MERZ (2010): The benefits of gravimeter observations for modeling water storage changes at the field scale. – *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 1715–1730
- DELGADO, J.M., H. APEL & B. MERZ (2010): Flood trends and variability in the Mekong River. – *Hydrology and Earth System Sciences* 14, 407–418
- DOOGE, J.C.I. (1997): Searching for Simplicity in Hydrology. – *Surveys in Geophysics* 18 (5), 511–534
- ENSEMBLES (2009): Climate change and its impacts at seasonal, decadal and centennial timescales. – Abschlussbericht ENSEMBLES. – Met Office, Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, England. 164 S.
- FALKENMARK, M. & M. LANNERSTAD (2005): Consumptive water use to feed humanity – curing a blind spot. – *Hydrology and Earth System Sciences* 9,15–28
- FISCHER, A.M., A.P. WEIGEL, C.M. BUSER, R. KNUTTI, H.R. KÜNSCH, M.A. LINIGER, C. SCHÄR & C. APPENZELLER (2011): Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi model approach. – *International Journal of Climatology*, published online; doi:10.1002/joc.3396
- FREI, C. & C. SCHÄR (2001): Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the alpine region. – *Journal of Climate* 14, 1568–1584
- GRAF, W.L. (1999): Dam nation: A geographic census of American dams and their large-scale hydrologic impacts. – *Water Resources Research* 35, 1305–1311
- HEISE, S., J. WICKERT, G. BEYERLE, T. SCHMIDT, H. SMIT, J.-P. CAMMAS & M. ROTHACHER (2008): Comparison of water vapor and temperature results from GPS radio occultation aboard CHAMP with MOZAIC aircraft measurements. – *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46 (11), 3406–3411
- HENDERSON-SELLERS, A. (1993): An antipodean climate of uncertainty. – *Climatic Change* 25, 203–224
- HUNDECHA, Y. & B. MERZ (2012): Exploring the relationship between changes in climate and floods using a model-based analysis. – *Water Resources Research* 48, W04512; doi:10.1029/2011WR010527
- IKSR (2009): Analyse des Kenntnisstands zu den bisherigen Veränderungen des Klimas und zu den Auswirkungen der Klimaänderung auf den Wasserhaushalt im Rhein-Einzugsgebiet – Literaturlauswertung. – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Bericht Nr. 174, 67 S.
- IKSR (2011): Szenarienstudie für das Abflussregime des Rheins – Stand April 2011. – Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Bericht Nr. 188, 28 S.
- IPCC (2007): Fourth Assessment – Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I of the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge und New York
- KHALIQ, M.N., T.B.M.J. OUARDA, P. GACHON, L. SUSHAMA & A. ST-HILAIRE (2009): Identification of hydrological trends in the presence of serial and cross correlations: A review of selected methods and their application to annual flow regimes in Canada. – *Journal of Hydrology* 368, 117–130
- KLEMEŠ, V. (1991): Design implications of climate change. – In: Ballentine, T., Stakhiv, E.Z. (Hrsg.): Proceedings of the 1<sup>st</sup> National Conference on Climate Change and Water Resources, Vol. 3, 9–19. – Washington D.C.
- KNUTTI, R. (2008): Should we believe model predictions of future climate change? – *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 366, 4647–4664
- KOCH, H., F. WECHSUNG & U. GRÜNEWALD (2010): Analyse jüngerer Niedrigwasserabflüsse im tschechischen Elbeeinzugsgebiet. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 54 (3), 169–178

- KOSOW, H. & R. GAßNER (2008): Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse. Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien. – Werkstattbericht Nr. 103. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung (IZT), Berlin
- KOUTSOYIANNIS, D. (2003): Climate change, the Hurst phenomenon, and hydrological statistics. – *Hydrological Sciences Journal* 48 (1), 3–24
- KOUTSOYIANNIS, D. (2011): Hurst-Kolmogorov Dynamics and Uncertainty. – In: *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 47 (3), 481–495
- KRAHE, P., E. NILSON, M. CARAMBIA, T. MAURER, L. TOMASSINI, K. BÜLOW, D. JACOB & H. MOSER (2009): Wirkungsabschätzung von Unsicherheiten der Klimamodellierung in Abflussprojektionen – Auswertung eines Multimodell-Ensembles im Rheingebiet. – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 53 (5), 316–331
- KUMAR, P. (2011): Typology of hydrologic predictability. – *Water Resources Research* 47, W00H05
- KWADIJK, J.C.J., M. HAASNOOT, J.P.M. MULDER, M.M.C. HOOGVLIET, A.B.M. JEUKEN, R.A.A. VAN DER KROGT, N.G.C. VAN OOSTROM, H.A. SCHELFHOUT, E.H. VAN VELZEN, H. VAN WAVEREN & M.J.M. DE WIT (2010): Using adaptation tipping points to prepare for climate change and sea level rise: a case study in the Netherlands. – *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1, 729–740
- LINS, H.F. & T.A. COHN (2011): Stationarity: wanted dead or alive? – *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 47, 475–480
- MASINDE, M. & A. BAGULA (2010): A framework for predicting droughts in developing countries using sensor networks and mobile phones. – *Proceedings of the SAICSIT '10 Conference*, October 11–13, 2010, Bela Bela, South Africa, 390–393
- MATALAS, N.C. (1998): Note on the assumption of hydrologic stationarity. – In: *Global change and water resources management*, *Water Resources Update* No 112, Universities Council on Water Resources, Carbondale, 64–72
- MAURER, T. (2004): Globally agreed standards for metadata and data on variables describing geophysical processes. A fundamental prerequisite to improve the management of the Earth System for our all future. – Bericht 31 des Global Runoff Data Centre (GRDC), Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG), Koblenz
- MAURER, T., E. NILSON & P. KRAHE (2011): Entwicklung von Szenarien möglicher Auswirkungen des Klimawandels auf Abfluss- und Wasserhaushaltskenngrößen in Deutschland. – *acatech Materialien* Nr. 11, München
- MERZ, B., J. HALL, M. DISSE & A. SCHUMANN (2010): Fluvial flood risk management in a changing world. – *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 10 (3), 509–527
- MERZ, B., K. KAISER, O. BENS, R. EMMERMANN, H. FLÜHLER, U. GRÜNEWALD & J.F.W. NEGENDANK (2012a): Klimawandel und Wasserhaushalt. – In: Hüttl, R. F., Bens, O. (Hrsg.): *Georssource Wasser – Herausforderung Globaler Wandel. Beiträge zu einer nachhaltigen Wasserressourcenbewirtschaftung in Deutschland*. – *acatech STUDIE*, 24–90. – *acatech/Springer*, München/Berlin
- MERZ, B., S. VOROGUSHYN, S. UHLEMANN, J. DELGADO & Y. HUNDECHA (2012b): HESS Opinions: More efforts and scientific rigour are needed to attribute trends in flood time series. – *Hydrology and Earth System Sciences – Papers in Open Discussion* 9, 1–21
- MILLY, P.C.D., J. BETANCOURT, M. FALKENMARK, R.M. HIRSCH, Z.W. KUNDZEWICZ, D.P. LETTENMAIER & R.J. STOUFFER (2008): Stationarity is dead: Whither water management? – *Science* 319, 573–574
- NILSON, E. & K. GÖRGEN (2010): Meteorological Changes in the Rhine River Basin. – In: Görgen, K., Beersma J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E. (Hrsg.): *Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D.: Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project*. – *Schriftenreihe der KHR*, Bd. I-23, 99–108
- NILSON, E., M. CARAMBIA & P. KRAHE (2010): Low Flow Changes in the Rhine River Basin. – In: Görgen, K., Beersma J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D. (Hrsg.): *Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 project*. – *Schriftenreihe der KHR*, Bd. I-23, 109–119
- PETROW, T. & B. MERZ (2009): Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951–2002. – *Journal of Hydrology* 371, 129–141
- PIELKE, R.A. jr. (2007): *The honest broker*. – Cambridge University Press, Cambridge
- PRUDHOMME, C., R.L. WILBY, S. CROOKS, A.L. KAY & N.S. REYNARD (2010): Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. – *Journal of Hydrology* 390, 198–209
- RESZLER, C., J. KOMMA, G. BLÖSCHL & D. GUTKNECHT (2008): Dominante Prozesse und Ereignistypen zur Plausibilisierung flächendetaillierter Niederschlag-Abflussmodelle – *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 52 (3), 120–131
- RICE, R. & R.C. BALES (2010): Embedded-sensor network design for snow cover measurements around snow pillow and snow course sites in the Sierra Nevada of California. – *Water Resources Research* 46, W03537; doi:10.1029/2008WR007318
- RODELL, M., I. VELICOGNA & J.S. FAMIGLIETTI (2009): Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. – *Nature* 460, 999–1002
- SCHNAARS, S.P. (1987): How to develop and use scenarios. – *Long Range Planning* 20 (1), 105–114
- SCHNEIDER, S.H. (1983): CO<sub>2</sub>, climate and society: A brief overview. – In: Chen, R. S., Boulding, E., Schneider S. H. (Hrsg.): *Social Science Research and Climate Change: An Interdisciplinary Appraisal*. – Reidel, Boston. 9–15
- SIMON, M., V. BEKELE, V. KULASOVA, C. MAUL, R. OPPERMANN & P. REHAK (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet. Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick. – *Internationale Kommission zum Schutz der Elbe*, Magdeburg



- SIVAPALAN, M. (Hrsg.) (2011): Predictions under Change (PUC): Water, Earth and Biota in the Anthropocene. – Report Draft 1: May 15, 2011. University of Illinois
- SRES (2000): IPCC Special Report Emissions Scenarios. – Intergovernmental Panel on Climate Change, Genf
- TALEB, N.N. (2010): The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable. 2<sup>nd</sup> edition. – Penguin, London
- TEBALDI, C. & R. KNUTTI (2007): The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. – Philosophical Transactions of the Royal Society A, 365, 2053–2075
- TRENBERTH, K. (2010): More knowledge, less certainty. – Nature Reports Climate Change. Online-Veröffentlichung <http://www.nature.com/climate/2010/1002/full/climate.2010.06.html>
- UNESCO (2009): Water in a changing world. The United Nations World Water Development Report 3. – UNESCO Publishing, Paris
- VAZE, J., D.A. POST, F.H.S. CHIEW, J.-M. PERRAUD, N.R. VINEY & J. TENG (2010): Climate non-stationarity – Validity of calibrated rainfall-runoff models for use in climate change studies. – Journal of Hydrology 394, 447–457
- VON STORCH, H. (2009): Klimaforschung und Politikberatung – zwischen Bringschuld und Postnormalität. – Leviathan 37, 305–317
- WEINGARTNER, R. & C. PFISTER (2007): Wie außerordentlich war das Niedrigwasser im Winter 2005/06? – Eine hydrologisch-historische Betrachtung des Rheinabflusses in Basel. – Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 51 (1), 22–26
- WILDENHAHN, E. & U. KLAHOLZ (1996): Große Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins. – Bericht-Nr. II-10 der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad und Koblenz, 57 S., ISBN 90 70980 21 5