

WHITE PAPER

# Water Science Alliance

PRIORITÄRE FORSCHUNGSBEREICHE





***Water Science Alliance***

# **White Paper**

## **Prioritäre Forschungsbereiche**

**Redaktion:**

**Prof. Dr. Georg Teutsch und Elisabeth Helen Krüger**



**Herausgeber:**  
**Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ**  
**Permoserstr. 15**  
**04318 Leipzig**

Kontakt: [elisabeth.krueger@ufz.de](mailto:elisabeth.krueger@ufz.de)

Telefon: +49 341 235 1671

Fax: +49 341 235 1388

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

Umschlaggestaltung: Stephan Boehme

Datum: 30.05.2011

Englische Originalfassung vom: 30. November 2010

Übersetzung: Elisabeth Helen Krüger

**Inhalt**

<b>Vorwort: Ziele des White Paper .....</b>	<b>5</b>
<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>Forschungsbereich 1</b>	
<b>Herausforderungen im Globalen und klimatischen Wandel: Ernährung und Wasser, Mega-Urbanisierung, Risiko und Vulnerabilität.....</b>	<b>11</b>
<b>Forschungsbereich 2</b>	
<b>Wassermanagement jenseits des klassischen IWRM-Ansatzes: Zielsetzung, Instrumente und Governance .....</b>	<b>18</b>
<b>Forschungsbereich 3</b>	
<b>Wasser- und Stoffflüsse im regionalen Kreislauf: Schutz von Umwelt und Gesundheit.....</b>	<b>24</b>
<b>Forschungsbereich 4</b>	
<b>Neue Konzepte für Monitoring, Erkundung und Datenassimilation in der Wasserforschung.....</b>	<b>28</b>
<b>Forschungsbereich 5</b>	
<b>Entwicklung komplexer Systemmodelle und Datenintegration in der Wasserforschung.....</b>	<b>33</b>
<b>Forschungsbereich 6</b>	
<b>Wasserknappheit: Perspektiven einer neuen circum-mediterranen Forschungsinitiative .....</b>	<b>38</b>
<b>Anhang</b>	
<b>Vorbereitungskomitee und beitragende Autoren .....</b>	<b>44</b>



## **Vorwort: Ziele des White Paper**

In diesem Dokument werden einige große thematische Herausforderungen, denen die Wasserwissenschaft heute gegenübersteht, in Form von sechs Forschungsbereichen beschrieben. Sie wurden von einer Reihe von Vertretern der deutschen Wasserforschungs-Community (siehe Anhang) als prioritär identifiziert und inhaltlich erarbeitet.

Das White Paper wird den Fördereinrichtungen und Entscheidungsträgern der Wissenschaftspolitik als Stellungnahme der Forschungs-Community zu den Forschungsbereichen präsentiert, denen in den kommenden Jahren besondere Beachtung geschenkt werden sollte. Indem es wichtigen aktuellen Forschungsbedarf aufzeigt, kann es als Orientierungshilfe für die Forschung sowie für die Entwicklung neuer Förderprogramme und Ausschreibungen dienen.

Das White Paper bestätigt den Bedarf der Integration verschiedener Disziplinen in der Wasserforschung. Diese ist notwendig, um die Wasserwissenschaft in die Lage zu versetzen adäquate Lösungen zu den komplexen Wasser- und Umweltproblemen entwickeln zu können, die sich aus der zunehmenden Dynamik unserer Umwelt ergeben. Das Ziel ist daher, die vorhandenen Kompetenzen in Deutschland zu bündeln, die nationale Wasserforschungs-Community zu stärken, Synergien zwischen den Disziplinen zu schaffen und gemeinsam mit der internationalen Wasserforschungs-Community starke und sichtbare Partnerschaften aufzubauen.

Gemeinsame Forschungsinitiativen, die sich zur Bearbeitung der im White Paper beschriebenen wissenschaftlichen Herausforderungen entwickeln, sollen zudem die Grundlage für die Förderung integrierter hydrologischer Wissenschaften durch die Aus- und Fortbildung junger Wissenschaftler bilden.

## Einleitung

Ein Blick auf die Forschungslandschaft in Deutschland zeigt, dass diese in vielen Bereichen der Wasserforschung zahlreiche gute Kompetenzen entwickelt hat. Dazu gehören die Untersuchung der Wasserqualität und –quantität, die Entwicklung innovativer Technologien, Umweltbeobachtungs- und Frühwarnsysteme, hydrologische Modellierung sowie ein umfassendes Know-How im Bereich der Wasserbewirtschaftung.

Für die zukünftige Wasserforschung ergeben sich allerdings die großen Herausforderungen aus den globalen, immer dynamischer werdenden Wandelprozessen und dem zunehmenden Bedarf an praktikablen Lösungen, die den entstehenden Problemen entgegen gesetzt werden können. Vor diesem Hintergrund muss sich die Forschungs-Community der Frage stellen, welchen Beitrag sie zur Lösung der drängenden Herausforderungen um die Ressource Wasser leisten kann.

Die Schlüsselfragen lauten:

- 1) Welches sind die wissenschaftlichen Herausforderungen, die sich aus den drängenden Wasserproblemen weltweit ergeben?
- 2) Ist die Wasserforschungs-Community adäquat positioniert und vernetzt, um den großen gesellschaftlichen Herausforderungen heute und in der Zukunft begegnen zu können?

### Die Wasserforschungslandschaft in Deutschland

Die Kompetenzen der Wasserforschung in Deutschland verteilen sich auf eine große Zahl von Einrichtungen mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Bei einer Analyse der Wasserforschungslandschaft (siehe unten) wurden 150 Einrichtungen und ca. 500

Institute/ Abteilungen mit einem Schwerpunkt im Bereich Wasserforschung identifiziert. Die Disziplinen reichen von der Hydrologie im weiteren Sinne (dazu zählen Hydrogeologie, Pedologie, Wasserchemie, Hydrometeorologie, Küstenhydrologie etc.), Ökologie (aquatische Ökologie, Ökotoxikologie, Limnologie etc.), Ingenieurwissenschaften (Siedlungswasserwirtschaft, Wasserbau, Hydraulik, Regional- und Raumplanung), numerische Modellierung, Monitoring, Datenmanagement bis hin zur Sozio-Ökonomie, Wasserrecht, Wasser-Ethik und Wassermanagement (IWRM).

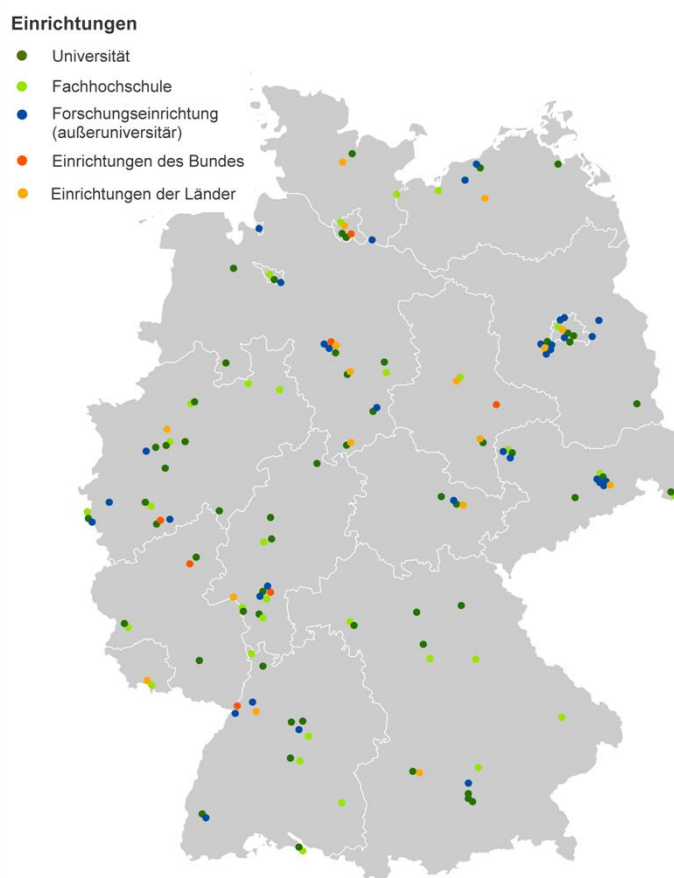


Abb. 1: Einrichtungen mit einem Schwerpunkt „Wasserforschung“



Ein Grund für das Entstehen einer solch fragmentierten Forschungsstruktur ist das heterogene Fördersystem in Deutschland: Universitäten sind Länder finanziert, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen sind von Bund und Ländern gemischt finanziert. Zudem gibt es ein vielschichtiges Gefüge von Drittmittel-finanzierten Projekten, dem es zum Teil an langfristiger Perspektive und Abstimmung fehlt. Dadurch sind die verfolgten Forschungsansätze häufig auf einen Sektor fokussiert, der allein dem Schwerpunkt des jeweiligen Instituts entspricht. Die Lösungsperspektiven sowie die gewählten methodischen und technologischen Ansätze sind daher in Ihrer Problemlösungskapazität begrenzt. Generell gilt, dass eine einzelne Gruppe oder Institution nicht in der Lage ist, komplexe wasserbezogene Probleme in ihrer Gesamtheit zu analysieren, zu bewerten und adäquate Lösungen zu entwickeln. Bisher wurden diverse Verbundprojekte initiiert, die oft zu guten Ergebnissen geführt haben. Allerdings sind aufgrund der meist kurzfristigen Finanzierung daraus keine stabilen Netzwerke der Kooperation entstanden. Diese Problematik wird schon seit einigen Jahren innerhalb der Senatskommission Wasser der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG-KOWA) thematisiert. In einer Denkschrift vom Jahr 2003 fasst sie ihre Analysen der deutschen Wasserforschungslandschaft zusammen und konstatiert, dass die deutsche Wasserforschungs-Community hinsichtlich ihrer individuellen Expertise gut entwickelt, allerdings sehr fragmentiert und nicht angemessen strukturiert ist, um als international wettbewerbsfähiger Wissenschaftsakteur zu agieren und den Herausforderungen der Zukunft mit entsprechenden Lösungskonzepten zu begegnen.

Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ untersucht in diesem Zusammenhang in einer empirischen Analyse die aktuelle Struktur der Wasserforschungskompetenzen in Deutschland. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Die Ergebnisse sollen ab Mitte des Jahres 2011 unter dem Link [www.watersciencealliance.org/online-portal](http://www.watersciencealliance.org/online-portal) präsentiert werden.

### **Die Water Science Alliance**

Vor dem beschriebenen Hintergrund hat das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ im Jahr 2009 damit begonnen, ein Konzept zur Stärkung und besseren Positionierung der Wasserforschung auch im internationalen Raum zu entwickeln, die sogenannte „Water Science Alliance“. Dazu erhielt das UFZ das Mandat des Senats der Helmholtz-Gemeinschaft. Ziel der Water Science Alliance ist die Schaffung eines langfristig angelegten, verlässlichen Rahmens, in dem einige wichtige und komplexe Themen der Wasserforschung integriert bearbeitet werden können.

Diesem Ziel liegt die Überlegung zugrunde, dass eine verlässliche Bündelung der Kompetenzen mit sichtbaren Ergebnissen nur dann erzielt werden kann, wenn die beteiligten Partner gemeinsame Forschungsziele und –strategien entwickeln. Die Water Science Alliance soll diese Möglichkeit bieten und als Instrument dienen, um die führenden Forschergruppen und Institutionen in sogenannten „Themen-Clustern“ auf komplementäre Weise miteinander zu verknüpfen. Die Themen-Cluster sollen als Netzwerke sowohl Grundlagen orientierter als auch angewandter Forschung zur Entwicklung konkreter Lösungen für drängende Wasserprobleme auf nationaler wie globaler Ebene dienen. Daher sollen die Themen-Cluster nicht nur aus universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen bestehen, sondern auch Partner aus Behörden, Ressortforschungseinrichtungen und der Wirtschaft mit einbeziehen.

Die Finanzierung, die für die Bearbeitung der Themen der Water Science Alliance verwendet wird, soll spezifisch die Forschungsaktivitäten fördern, die verschiedene

Disziplinen und Forschungskonzepte miteinander verknüpfen und Synergien zwischen unterschiedlichen Kompetenzen in verschiedenen Forschergruppen schaffen. Dadurch wird die Wasserforschungs-Community in die Lage versetzt, sichtbare Ergebnisse auf der nationalen wie internationalen Ebene zu produzieren. Der Mehrwert für die einzelnen Forschungsbereiche entsteht durch die gezielte Schaffung von Synergien und Erkenntnisgewinnen durch die Integration der Disziplinen im Rahmen klar definierter, jedoch sich dynamisch entwickelnder Forschungsbereiche. In Form der Themen-Cluster sollen die Kompetenzen gebündelt werden, damit die in den folgenden Kapiteln beschriebenen priorisierten Forschungsbereiche integriert bearbeitet werden können. Die Water Science Alliance stärkt die Wasserforschungs-Community durch koordinierte Aktivitäten und die Vernetzung der Themen-Cluster. Die Vernetzung erfolgt durch gemeinsame Methoden (z.B. gemeinsame Modellierungskonzepte), gemeinsame Untersuchungsgebiete, ein abgestimmtes Datenmanagement und Monitoring, die gemeinsame Bearbeitung übergreifender sozialwissenschaftlicher Fragestellungen und die Entwicklung gemeinsamer Konzepte des Managements und der Implementierung sowie gemeinsamer Kommunikationsstrategien und Nachwuchsförderung.

Ein spezifisches Ziel der Water Science Alliance ist die Förderung junger Wissenschaftler und integrierter Studiengänge, die die Fähigkeiten der nächsten Generation von Wasserwissenschaftlern stärken. Solche Förderprogramme sollen den jungen Wissenschaftlern die Werkzeuge und Methoden in die Hand geben, mit denen sie die für das Wasser relevanten, hoch komplexen Umweltsysteme, inklusive der Interaktion mit dem Menschen, verstehen und steuern können. Mit Hilfe des neu generierten Wissens werden sie in die Lage versetzt, neue Methoden für die heutigen und die kommenden Generationen zu entwickeln und neue Entwicklungspfade aufzuzeigen. Eine Schlüsselrolle spielt hierbei die Vernetzung mit international führenden Forschergruppen. Daher baut die Water Science Alliance strategische Kooperationen mit führenden Einrichtungen in Europa und weltweit auf und lädt international führende Wissenschaftler ein, zur Entwicklung gemeinsamer Projekte beizutragen.

Weitere Informationen: [www.watersciencealliance.de](http://www.watersciencealliance.de).

### **Priorisierung von Forschungsbereichen**

Im Dezember 2009 wurde ein Vorbereitungskomitee gegründet, um die großen Herausforderungen des Wasserbereichs zu identifizieren. Hier wurden Vertreter einer großen Bandbreite an Forschungseinrichtungen, Wissensgesellschaften, dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), dem Bundesministerium für Umwelt, Reaktorsicherheit und Naturschutz (BMU), der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und den Bundesbehörden mit Verantwortlichkeiten im Wasserbereich (UBA, BGR, BfG) eingebunden. Im Laufe einiger Treffen dieses Komitees, wurde der Bedarf für eine gemeinsame Initiative der Wasserforschungs-Community im Rahmen abgestimmter Forschungsfragen konkretisiert. Erste Ideen zur Formulierung der „großen Herausforderungen“ wurden entwickelt und unter Einbeziehung weiterer Experten der jeweiligen Bereiche ausgearbeitet. Das Ergebnis dieser vorbereitenden Arbeit war ein erster Entwurf des White Papers. Dieses beschrieb diejenigen Themen, die nach Ansicht des Vorbereitungskomitees national und international prioritär bearbeitet werden sollten.

Die 1. Water Research Horizon Conference zum Thema „New Initiatives in Water Research 2010“ am 13. und 14. Juli 2010 in Berlin, diente als offenes Forum für die

Wasser-Community, um die vorgeschlagenen Forschungsbereiche im Entwurf des White Paper zu diskutieren und fehlende Aspekte zu identifizieren. Über 200 Teilnehmer aus allen Bereichen der deutschen Wasserforschung sowie führende internationale Experten nahmen an den Diskussionen teil und brachten ihre Ideen für die Überarbeitung des White Paper ein. Im Anschluss an die Konferenz wurde das White Paper zur Kommentierung öffentlich verfügbar gemacht. Das Papier wurde daraufhin überarbeitet bzw. ergänzt. Das Ergebnis der gemeinsamen Arbeit eines wesentlichen Teils der deutschen Wasser-Community ist das hier vorliegende White Paper.

Das White Paper mit der Darstellung der sechs prioritären Forschungsbereiche richtet sich an die forschungsfördernden Institutionen sowie die allgemeine Wasser-Community. Es präsentiert das, was die Wasserforschungs-Community als die drängendsten Herausforderungen in ihrem Gebiet erachtet und zu deren Lösung gemeinsame, interdisziplinäre Anstrengungen notwendig sind. Als Stellungnahme der Wasserforschungs-Community richtet sich das White Paper insbesondere an die Förderinstitutionen BMBF, BMU und DFG. Das White Paper soll als Grundlage zur Formulierung detaillierter Forschungsprogramme in den verschiedenen Forschungsbereichen dienen. Darüber hinaus sollen die hier präsentierten Themen zur Förderung durch das 8. Rahmenprogramm der EU sowie weitere europäische und internationale Förderprogramme vorgeschlagen werden.

### **Notwendigkeit der wissenschaftlichen Koordination**

Da die Water Science Alliance insbesondere die Förderung der Integration der verschiedenen wasserbezogenen Disziplinen und Forschungseinrichtungen zum Ziel hat, sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zur Erzielung integrierter, nachhaltiger Ergebnisse eine fokussierte wissenschaftliche Koordination notwendig ist. Diese muss sich ad personam von der eigentlichen Wissenschaft als auch von der administrativen Koordination unterscheiden und sollte nicht „nebenher“ durch einen oder mehrere in das Projekt involvierte Wissenschaftler erfolgen. Daher sei darauf hingewiesen, dass grundsätzlich größere, interdisziplinäre Forschungsverbünde, wie die angestrebten Themen-Cluster, mindestens einen administrativen und einen wissenschaftlichen Manager oder Koordinator benötigen. Letzterer ist für die wissenschaftliche Koordination des jeweiligen Themenbereichs zuständig, um die angestrebten Synergien zu erzielen.

### **Struktur des White Papers**

Die sechs Forschungsbereiche, die in diesem White Paper präsentiert werden, haben eine unterschiedliche Struktur und einen unterschiedlichen Grad der Bearbeitung und Spezifizierung. Obwohl jeder Themenbereich separat vorgestellt wird, sind alle sechs Themenbereiche miteinander verknüpft und einige Aspekte innerhalb der Forschungsbereiche können auch als Querschnittsthemen betrachtet werden. Durch die Komplexität wasserbezogener Fragestellungen und die Berührungspunkte mit fast allen Teilbereichen und Prozessen der Umwelt, bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten das White Paper zu strukturieren.

Eine für die Bearbeitung aller sechs Themenbereiche wichtige Herausforderung ist die Entwicklung einer fundierten wissenschaftlichen Grundlage zur „nachhaltigen Nutzung von Landschaften und Ressourcen“ als Antwort auf die Auswirkungen des Globalen und des klimatischen Wandels.

Die sechs Forschungsbereiche können in drei Kategorien gruppiert werden:

**A) Generische Wasserprobleme globaler Dimension:**

1. "Herausforderungen des Globalen und klimatischen Wandels: Ernährung und Wasser, Mega-Urbanisierung, Risiko und Vulnerabilität"
2. "Wassermanagement jenseits des klassischen IWRM-Ansatzes: Zielsetzung, Instrumente und Governance"

**B) Stärkung methodischer Schlüsselkompetenzen:**

3. "Wasser- und Stoffflüsse im regionalen Kreislauf: Schutz von Umwelt und Gesundheit"
4. "Neue Konzepte für Monitoring, Erkundung und Datenassimilation in der Wasserforschung"
5. "Entwicklung komplexer Systemmodelle in der Wasserforschung"

**C) Komplexes Wassermanagement in einer Prioritätsregion:**

6. "Wasserknappheit: Perspektiven einer neuen circum-mediterranen Forschungsinitiative"

Mit der Wahl einer geografischen Region zur Bearbeitung des Themenbereichs 6 sollen existierende und geplante Aktivitäten gebündelt werden, um die Anwendbarkeit der durchgeführten Forschungsarbeiten zu testen und sichtbare Ergebnisse zu erzielen (siehe Beschreibung Forschungsbereich 6).

Es sei nochmals betont, dass dieses White Paper kein Forschungsprogramm darstellt, sondern eine Beschreibung der Herausforderungen und prioritären Forschungsbereiche. Durch die Einbindung von Vertretern der Förderorganisationen, Entscheidungsträger sowie der Wasserforschung bei der Entwicklung seiner Inhalte, wurden sowohl die Wissenschafts- als auch die Anwenderperspektive in die Formulierung der Herausforderungen einbezogen. Somit ist das White Paper als Grundlage für die Entwicklung detaillierter Forschungsprogramme geeignet.

## **Forschungsbereich 1**

### **Herausforderungen im Globalen und klimatischen Wandel: Ernährung und Wasser, Mega-Urbanisierung, Risiko und Vulnerabilität**

Der globale Wandel ist ein komplexes Phänomen, das von einer Vielzahl interagierender Faktoren gesteuert wird. Bevölkerungswachstum und technologischer Fortschritt führen zu verstärkter wirtschaftlicher Aktivität, globalem Handel und gesellschaftlichem Wohlstand. Der Landnutzungswandel hat einen starken Einfluss auf Böden und Wasserressourcen sowie auf die Biodiversität. Die zunehmende Nutzung der natürlichen Ressourcen stellt die Gesellschaft vor signifikante Herausforderungen, bietet aber auch neue Möglichkeiten. Die primären sozio-ökonomischen Konsequenzen des Globalen Wandels sind wachsende urbane Agglomerationen, eine zunehmende Arbeitsteilung sowie die Globalisierung der Märkte. Die Globalisierung der ökonomischen Aktivitäten hat viele Wirtschaftssysteme in die Lage versetzt, vermehrt auf importierte Ressourcen zurückzugreifen. Dabei hat die zunehmende Vernetzung der wirtschaftlichen Aktivitäten auch zu einer Übernutzung natürlicher Ressourcen geführt. Diese Entwicklungen haben in vielen Regionen der Welt signifikante Auswirkungen auf die Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung. Während der Einfluss des Klimawandels diese Auswirkungen noch verstärken wird, ist nicht abzusehen, ab welchem Punkt die Kapazitäten von Mensch und Ökosystemen überschritten werden, sich den negativen Auswirkungen des Globalen Wandels anzupassen. Somit wird in vielen Regionen der Welt die Vulnerabilität von Teilen der Gesellschaft zunehmen.

#### **Wasser und Landwirtschaft, „blaues“ und „grünes“ Wasser, „virtuelles“ Wasser**

Um dem erwarteten Bevölkerungswachstum auf etwa 9 Milliarden Menschen bis 2050 und der einhergehenden zunehmenden Nachfrage nach Lebensmitteln und tierischen Produkten standzuhalten, wird die Futter- und Lebensmittelproduktion gegenüber dem heutigen Stand um etwa 70 % anwachsen müssen. Wasser wird einer der wichtigsten limitierenden Faktoren auf dem Weg zu diesem Ziel sein. Auch heute noch werden Lebensmittel aufgrund inadäquaten Wassermanagements auf nicht-nachhaltige Weise produziert. Obwohl adäquate Technologien und Strategien existieren, sind ineffiziente Wassersysteme in der landwirtschaftlichen Produktion eher die Regel als die Ausnahme, was zu einer Übernutzung der Oberflächen- und Grundwasserressourcen sowie zu einer Degradation der Böden führt. Nicht zuletzt durch den Klimawandel werden sich diese Trends in vielen Regionen der Welt verstärken. Gleichzeitig kann eine zunehmende Nachfrage nach Bioenergie, die von vielen Regierungen durch die Unterstützung der Biokraftstoffproduktion gefördert wird, zu einer zusätzlichen Nachfrage nach Wasser und Bodenflächen führen. Ist die zunehmende Konkurrenz um Bodenflächen und um Wasser für die zukünftige Versorgungssicherheit signifikant? Inwiefern verstärkt die Rolle des intensiver werdenden internationalen Handels diese Entwicklungen?

In den letzten Jahren wurde eine Vielzahl an Analysen zu den globalen Zusammenhängen zwischen Wasser und Lebensmitteln durchgeführt. Was bisher fehlt ist ein fundiertes Verständnis der globalen und regionalen Auswirkungen der Entwicklungen in diesem Bereich. Um die Beziehungen zwischen menschlicher Aktivität und natürlicher Umwelt zu verstehen, muss eine Reihe von Disziplinen wie Hydrologie, Ökologie, Ökonomie, Agrarwissenschaften, Sozialwissenschaften und

Anderen in die Analysen einbezogen werden. Es müssen insbesondere die Auswirkungen globaler Treiber der Wassernachfrage auf die lokalen Wasserressourcen sowie auf den wirtschaftlichen Wohlstand untersucht werden. Die Einbeziehung der Konzepte von „grünem Wasser“ (in Pflanzen und Böden gespeichertes Wasser) und „virtuellem Wasser“ (Wasser, das zur Produktion von Produkten aufgewendet wird) kann zu einem verbesserten Verständnis der zugrunde liegenden Wasserflüsse und Allokationsmechanismen führen, wodurch wiederum die Treiber und Auswirkungen wasserbezogener Wandelprozesse besser identifiziert werden können. Die verschiedenen physikalischen Eigenschaften und die ökologische Relevanz von „blauem Wasser“ (in Seen, Flüssen und Grundwasser gespeichertes Wasser) und grünem Wasser wurden bisher nicht in ökonomischen Analysen und Planungen berücksichtigt. Konzepte, die grünes, blaues und virtuelles Wasser angemessen berücksichtigen, sind dringend notwendig. Lücken auf der analytischen Ebene müssen geschlossen werden. Durch die Anwendung dieser Konzepte können ineffiziente Wassernutzungen aufgedeckt und verzerrte Allokationsmechanismen heutiger Wassermärkte identifiziert werden.

Der Prozess der Globalisierung der Wirtschaft hat neben dem starken Anstieg des internationalen Handels auch dazu geführt, dass Produkte importiert werden können, die lokal nicht verfügbar sind. Der virtuelle Wasserhandel ist wichtiger Bestandteil der internationalen Arbeitsteilung. Leider verzerren ineffiziente oder inexistenten Wasserpreise die Anreize, wasserintensive Aktivitäten dorthin zu verlagern, wo Wasser reichlich vorhanden ist und virtuelles Wasser in Form von Produkten dort zu importieren, wo Wasserknappheit herrscht. Stattdessen exportieren Länder mit knappen Wasserressourcen häufig wasserintensive Waren. Daher sind Instrumente und Institutionen notwendig, die einen rationellen Umgang mit Wasser regulieren, um einen förderlichen virtuellen Wasserhandel zu ermöglichen. Um die Produktivität der eingesetzten Wasserressourcen in der Landwirtschaft zu verbessern und ein nachhaltiges Wassermanagement mit Fokus auf die landwirtschaftliche Wassernutzung und den Schutz der Ökosysteme zu ermöglichen, ist ein gezieltes Management von grünem Wasser notwendig.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Welche Instrumente sind zur Integration der relevanten Disziplinen, wie Hydrologie, Ökologie, Ökonomie, Agrarwissenschaften und Sozialwissenschaften erforderlich, um die Auswirkungen des globalen Wandels auf die Wasserressourcen auf globaler, regionaler und lokaler Ebene umfassend zu verstehen?
- Welche ökonomischen Analysen sind nötig, um die verschiedenen „Typen“ des Wassers („blaues“ und „grünes“ Wasser) zu erfassen und wie können diese mit dem Wert des virtuellen Wassers verknüpft werden, insbesondere unter den Bedingungen zunehmender Wasserknappheit?
- Welche Chancen und Einschränkungen bestehen für eine verbesserte Wasser-Governance unter Einbeziehung des virtuellen Wassers in internationale Handelssysteme?
- Welche neuen Technologien können, bei gleichzeitiger Minimierung des Landflächen- und Wasserverbrauchs, die landwirtschaftliche Produktivität steigern?
- Wie ist eine adäquate Wassereffizienz zu erreichen und welche Management-Instrumente sind für eine erfolgreiche Eindämmung der

Wasserverschwendung und eine Förderung der Wasserwiederverwertung auf globaler Ebene erforderlich?

- Wie hoch ist der Wasserbedarf der Natur, um Biodiversität, Ökosysteme und Ökosystemdienstleistungen aufrecht zu erhalten?
- Wie sieht ein adäquates "Management des Wandels" aus, das im Übergang vom aktuellen Wassermanagement zu einem nachhaltigen Wassermanagement alle Skalen des Managements berücksichtigt: lokale Management-Herausforderungen (Wissensaufbau, Implementierung von Technologien), regionale (Rechte, Märkte), globale (Handelsregulativen)?
- Wie kann eine "gute Governance" der Wasserverteilung und des virtuellen Wasserhandels erreicht werden, ohne die arme Bevölkerung zu benachteiligen? Welche Institutionen und Instrumente können die entsprechenden Anreize dafür schaffen?
- Welche Alternativen für eine effiziente Wasserverteilung bestehen zu den aktuellen Wasserzugangsrechten (Institutionen, Eigentumsrechte, Preise)?

### **Megacities, Wasser und urbaner Metabolismus**

Der urbane Wandel und die Mega-Urbanisierung, die den sichtbarsten Trend des 21. Jahrhunderts darstellt, wird die Wasserflüsse in Städten und zwischen Städten und ihrem Umland stark beeinflussen. Die rasant wachsende Zahl von Megastädten ist das Phänomen des 21. Jahrhunderts. Während die Zahl der Städte mit einer Einwohnerzahl größer 10 Millionen um 1950 bei 3 lag und heute bei 20 liegt, wird sie bis 2050 auf 60 anwachsen. Die Abhängigkeit dieser Agglomerationen von Wasserressourcen als auch die Produktion erheblicher Mengen an Abwasser haben nicht nur Auswirkungen auf die Stadtgebiete selbst, sondern auch auf deren Umland. Entscheidende Faktoren für die weitere Entwicklung und das Funktionieren von Megastädten sind die Wasserver- und Wasserentsorgung. Mittelgroße Städte (500.000-5 Millionen Einwohner) können bei ähnlichen Wachstumsraten den gleichen Problemen gegenüberstehen wie Megacities mit über 10 Millionen Einwohnern. Daher gilt der Begriff „Mega“ in diesem Fall für die Größe der Stadt, die Geschwindigkeit der Wandelprozesse oder für die charakteristischen Probleme, die mit den Wachstumsraten der rasant anwachsenden Städte der Schwellenländer einhergehen.

Charakteristisch für diese Städte sind eine unzureichende Sanitärversorgung mit den einhergehenden Gesundheitsrisiken, unzureichende Infrastrukturen, nicht-nachhaltiges Abfall- und Abwassermanagement, unkontrollierte „informelle“ Besiedlung sowie eine Übernutzung der Oberflächen- und Grundwasserressourcen, die die Sicherheit und Zuverlässigkeit der Wasserversorgung gefährden. Zuwanderung aus ländlichen Gebieten und eine Übernutzung der Wasser-, Agrar- und anderen Ressourcen in der Umgebung der Städte kann zu regionalen Wasserkrise und Wassermangel führen. Da sich die Mehrheit der Megastädte in Küstennähe befindet, wo sie Meeresspiegelschwankungen und extremen Wetterereignissen ausgesetzt sind, sind Küsten-Stadt-Interaktionen in diesem Kontext besonders zu berücksichtigen.

Die Herausforderungen für das Wassermanagement sind in diesen Gebieten weitreichend: von der Entwicklung und Implementierung adäquater Infrastruktursysteme (mit entsprechenden Governance-, Management- und Finanzierungsstrukturen), die die Verfügbarkeit und den Zugang zu ausreichenden

Wasserressourcen sicherstellen bis hin zur Implementierung adäquater Technologien zur Wasseraufbereitung und zur Wiederverwendung behandelten Abwassers.

Die anstehenden Probleme im Wassermanagement können nicht durch eine isolierte Wasserver- und Wasserentsorgungsperspektive gelöst werden. Stattdessen müssen Lösungsansätze den gesamten Metabolismus der urbanen Agglomerationen und ihrer Umgebungen betrachten, die die direkten Verbindungen zwischen Wasser-, Abwasser- und Energiekreisläufen und die entsprechenden Handelsflüsse berücksichtigen. Diese Konzepte sollten zudem um sozio-ökonomische Aspekte wie z.B. Arbeitsteilung, erweitert werden.

Einige Schlüsselfragen hinsichtlich Wasser und Mega-Urbanisierung sind:

- Wie kann eine verlässliche Wasserver- und Wasserentsorgungsstruktur erreicht werden, um das Funktionieren der wachsenden, durch informelle Siedlungen gekennzeichneten Städte zu erhalten/zu erreichen? Welche Alternativen zu den bestehenden Infrastruktursystemen sind denkbar?
- Wie können neue Infrastrukturstrategien in eine nachhaltige Stadtplanung integriert werden und wie kann der Übergang von Alt zu Neu gemanagt werden (unter Berücksichtigung des damit verbundenen institutionellen Wandels)?
- Wie können die Wasser-, Kohlenstoff- und Energieströme in geschlossene Kreisläufe überführt werden?
- Wie können die Risiken in Megastädten für alle sozialen Schichten minimiert werden, die sich aus unzureichenden Wasserinfrastrukturen, Sanitär- und Wasserversorgung ergeben?
- Wie können die Kreisläufe der Wasserver- und Wasserentsorgung in den "urbanen Metabolismus" integriert werden, der sich aus Wasser- (inkl. virtuelles Wasser/Lebensmittel), Abfall-, Kohlenstoff- und Energie-Strömen sowie den Handelströmen zusammensetzt?
- Wie sehen adäquate Governance-, Management- und Finanzierungsstrukturen für ein integriertes Wassermanagement in Mega-Agglomerationen? Was sind die Treiber des institutionellen Wandels in Megastädten?
- Welche Verbindungen bestehen zwischen der Wasserverfügbarkeit und der Migration aus dem ländlichen in den urbanen Raum?

### **Globaler Klimawandel, Vulnerabilität und Risiko**

Der vierte Bericht des IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) zeigt, dass der Klimawandel bereits heute stattfindet und sich auch in der Zukunft fortsetzen wird. Mit einer hohen Wahrscheinlichkeit wird die globale mittlere Lufttemperatur bis zum Jahr 2100 um 2 bis 6 Grad Celsius ansteigen. Die Änderungen der mittleren Temperatur werden starke Auswirkungen auf den Wasserkreislauf haben. Nicht nur die Änderungen der Niederschlagsmuster, sondern auch das Ausmaß von Extremereignissen werden Menschen, deren Besitz und ganze Landschaften gefährden. Während einige Regionen von Überschwemmungen betroffen sein werden, werden andere Regionen – meist die, die schon heute unter Wasserknappheit leiden – noch größeren Wassermangel erleiden. Neben den direkten Effekten des Klimawandels auf Wasserquantität und -qualität (z.B. Einfluss der Änderungen der Niederschlagstemperatur auf den Stoffeintrag aus den



Einzugsgebieten in die Gewässer), werden indirekte Effekte die Wasserqualität beeinflussen: so wird z.B. ein erhöhter Einsatz von Pestiziden die Wasserqualität und die Ökosystemfunktionen beeinflussen. Während die Klimaforschung imstande ist, globale Mittelwerte zu projizieren, bleibt die Ableitung von regional aufgelösten Mustern und die Bestimmung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Extremereignissen eine größere Herausforderung. Hier ist in Verknüpfung mit einem gezielten Langzeit-Monitoring (Themenbereich 4) die Frage der verbesserten Anpassung an zunehmende Extremereignisse zu untersuchen.

Es besteht ein dringender Bedarf, die Auswirkungen des globalen Klimawandels in die Wasserforschung einzubeziehen und die Potenziale einer Anpassung an die neuen Herausforderungen zu bestimmen. Neue Indikatoren sind erforderlich, durch die die räumlichen Muster sozio-ökonomischer und ökologischer Vulnerabilität bestimmt werden können, um Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln oder die Anpassungskapazität von Ökosystemen und Gesellschaften zu bestimmen. Im Zusammenhang mit Überflutungsrisiken ist eine mögliche Herangehensweise, die Effektivität von Renaturierungsmaßnahmen von Auengebieten und Überflutungsbecken zu untersuchen. Im Zusammenhang mit Dürreerisiken müssen ökologisch sinnvolle Speicherreservoirs und Transportmechanismen entwickelt werden, um Wasser für Trockenperioden zu speichern bzw. bereitzustellen.

Adaptive Infrastrukturen und angepasste technische Lösungen sind ein Schlüssel für eine sichere Entwicklung und eine reduzierte Vulnerabilität wachsender urbaner Agglomerationen gegenüber Dürren und Überschwemmungen. Die wasserbezogenen Risiken der ökonomischen und gesellschaftlichen Globalisierung sowie des Klimawandels sind wesentliche Faktoren, die den Wohlstand und das Wohlergehen der Menschen beeinflussen und dabei insbesondere die Vulnerabilität sozial benachteiligter Menschen bestimmen. Dies gilt auch für die globalen Auswirkungen des Globalen und klimatischen Wandels auf wasserübertragene Krankheiten und deren zukünftige Ausbreitung und Entwicklung.

Risiken, die sich aus dem Globalen Wandel ergeben, treten nicht nur in Form von plötzlichen Katastrophen wie z.B. durch Extremwetterereignisse auf. Auch politische Entscheidungen und ökonomische Entwicklungen können zu einem Langzeit-Risiko und einer erhöhten Vulnerabilität von Mensch, Gesellschaft und Ökosystemen führen. Eine solche Entscheidung oder Entwicklung kann beispielsweise ein Übergang von der Nutzung fossiler Energie, hin zur Produktion von Biomasse für eine erhöhte Bioenergienutzung sein, der zu einer erhöhten Konkurrenz um Landflächen, Wasser und Agrarprodukten führen und dabei zu einer Gefahr für Ökosysteme werden kann. Ein nicht-nachhaltiges Wassermanagement kann den Zugang zu sicheren Wasserressourcen, als auch die Funktionen der Ökosysteme gefährden.

Daher ist es notwendig, sowohl die relevanten Risikofaktoren für Mensch und Gesellschaft, die sich aus dem Globalen und klimatischen Wandel ergeben, zu analysieren als auch die Anpassungskapazitäten an die negativen Auswirkungen zu bestimmen. Die Anpassungskapazität an eine zunehmende Wasserknappheit und zunehmende Überflutungsgefahren wird eine große humanitäre Aufgabe sein und mehr erfordern als die Einführung effizienter Technologien.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich lauten:

- Wie können die Risiken und Auswirkungen politischer Entscheidungen, des Klimawandels und der wirtschaftlichen Entwicklungen unter Berücksichtigung der dynamischen Interaktionen und Rückkopplungen der verschiedenen Faktoren besser vorhergesagt werden?

- Welche Strategien und Anpassungsmaßnahmen werden durch die genannten Risiken erforderlich? Wie können wir aus Erfahrungen mit Extremereignissen lernen und wie kann das daraus entstehende Wissen übertragen werden?
- Welche Konsequenzen ergeben sich aus den plötzlichen Umwälzungen und explosiven Wandelprozessen im Vergleich zu graduelleren Veränderungen (Vergleich von Trend- und Ereignisanalysen)?
- Welche Auswirkungen sind durch eine wachsende Zahl auftretender Extremereignisse, insbesondere auf urbane Infrastrukturen zu erwarten? Wie können Stadtplaner hierauf reagieren?
- Welches sind adäquate institutionelle Voraussetzungen und Governance-Mechanismen, um mit den erwarteten Risiken und Vulnerabilitäten umzugehen? Wie kann ein risikobasiertes Management-Instrument in der Praxis aussehen?

Die genannten Herausforderungen sind alle miteinander verbunden: der Klimawandel mit unterschiedlichen und oft negativen Auswirkungen (Dürren, Überschwemmungen etc.), demografischer Wandel (Migration, regional schrumpfende oder wachsenden Bevölkerung) und sich ändernde Konsummuster (erhöhte Wassernachfrage aufgrund von Wachstum, verringerte Nachfrage aufgrund effizienter Technologien) führen zu besonderen Herausforderungen für die Langzeitplanung von infrastruktur-basierten Wasserdienstleistungen, insbesondere für urbane Agglomerationen. Neben den technischen und ingenieurwissenschaftlichen Aspekten, kann davon ausgegangen werden, dass die sozialen Aspekte, wie z.B. die Frage einer fairen Wasserallokation für alle sozialen Gruppen oder solche Aktivitäten, die eine geringere ökonomische Wertschöpfung haben, zunehmend an Relevanz gewinnen werden, wenn die verfügbaren Ressourcen knapper werden. Bei der Behandlung dieser Themen müssen Wege gefunden werden, wie Arbeitsdopplung vermieden und Synergien mit anderen wasserrelevanten Forschungs- und politischen Initiativen entwickelt werden können. Da Wasser ein limitierender Faktor in den Bereichen Lebensmittelproduktion, Urbanisierung und Klima ist, muss das Thema „Wasser“ im Fokus landwirtschaftlicher und urbaner Planungen sowie von Klimaanpassungsstrategien stehen – Wasser muss „out of the water box“ betrachtet werden!

### **Wasser – Energie – Nexus**

Energie und Wasser sind in unseren aktuellen Energieproduktionsschemata und Wasserversorgungssystemen eng miteinander verbunden, z.B. durch die Produktion von Wasserkraft, die Nutzung von Wasser für die Kühlung von thermischen Kraftwerken sowie durch den Einsatz von Energie zur Aufbereitung von Trinkwasser und zur Reinigung von Abwasser. Die Nachfrage sowohl nach Wasser als auch nach Energie werden in den kommenden Jahren mit ähnlichen Raten anwachsen. Es ist daher erforderlich, ein fundiertes Verständnis der Verknüpfungen von Wasser und Energie zu erlangen, um zu Lösungen für ein besseres Management des „Wasser – Energie – Nexus“ zu gelangen. Ein verbessertes Verständnis der relevanten Wechselwirkungen, eine adäquate Bewertung und die Entwicklung innovativer Lösungen für ein verbessertes Management der beiden Ressourcen ist erforderlich.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Welche Rolle spielt das Wasser in der Energieproduktion und welche Rolle wird es in Zukunft spielen?

- Wie kann der energetische Fußabdruck des Wassermanagements reduziert werden?
- Auf welche Weise beeinflusst der Klimawandel den Wasser-Energie-Nexus?
  - durch Vermeidung (z.B. Bioenergie, Wasserkraft)?
  - durch Anpassung (z.B. Kühlung von Kraftwerken, Produktion von Solarenergie, Alternativen im Transportwesen)?

## **Forschungsbereich 2**

### **Wassermanagement jenseits des klassischen IWRM-Ansatzes: Zielsetzung, Instrumente und Governance**

Aufgrund des Globalen und klimatischen Wandels und der einhergehenden steigenden Wassernachfrage, ist ein nachhaltiges Management der Wasserressourcen für die zukünftige gesellschaftliche Entwicklung weltweit eine zentrale Herausforderung. Ziel ist es, die ökonomische und gesellschaftliche Entwicklung durch den Ausgleich diverser Nutzerinteressen zu fördern und gleichzeitig die Wasserressourcen und wasserabhängigen Ökosysteme zu schützen. Allerdings verfehlen aktuelle Wassermanagementpraktiken diese Ziele aus unterschiedlichen Gründen. In manchen Fällen fehlen adäquate Managementstrukturen und –methoden, in anderen scheitert das bestehende Management an einer fehlenden Auseinandersetzung mit den Schlüsselproblemen, da, insbesondere im Falle aufkommender Nutzungskonflikte, eine integrierte wissenschaftliche Basis zur Unterstützung nachhaltiger Entscheidungen nicht vorhanden ist. In den vergangenen Jahren ist durch die Einführung des Konzepts des Integrierten Wasserressourcen-Managements (IWRM) ein deutlicher Fortschritt im Bereich des Wassermanagements erzielt worden. Dieses Konzept das innerhalb des Wassersektors inzwischen weithin akzeptiert ist, verbindet gesellschaftliche, ökonomische und ökologische Aspekte und bezieht öffentliche wie private Akteure in den Entscheidungsprozess mit ein. Allerdings führten bisherige IWRM-Projekte meist nur zu sektoralen, kaum übertragbaren bzw. vergleichbaren, einzelfallbezogenen Managementlösungen. Um ein IWRM unter komplexen und dynamischen Rahmenbedingungen erfolgreich implementieren zu können, ist ein allgemeines Verständnis des IWRM-Konzepts notwendig. Dazu muss ein tiefgreifendes Verständnis der Zielsetzung und der entsprechenden Erfolgsindikatoren erarbeitet werden, die an die unterschiedlichen Erwartungen von Industrie-, Schwellen- und Entwicklungsländern angepasst sind und sich unter den Bedingungen des Globalen Wandels dynamisch weiterentwickeln. Methoden und Instrumente sind erforderlich, die es erlauben, mit den Komplexitäten und Unsicherheiten der relevanten Prozesse umzugehen, die zu nachhaltigen Lösungen führen. Unverzichtbar ist eine entsprechende Governance, die die erfolgreiche und effektive Implementierung dieser Lösungsstrategien erlaubt. Um mit den durch den Globalen Wandel hervorgerufenen dynamischen Änderungen der Umweltbedingungen angemessen umgehen zu können, muss das Wassermanagement ein Management von Wandelprozessen werden. Drei Bereiche sind dabei von besonderer Relevanz:

#### **Zielsetzung – vom Konzept der Nachhaltigkeit zur Zielsetzung im IWRM**

Eine integrierte Systemanalyse und Bewertung, die alle involvierten Teilsysteme berücksichtigt (Ökonomie, Gesellschaft, Politik, Ökosysteme etc.) ist eine wichtige Voraussetzung für die Entwicklung von Wassermanagement-Maßnahmen. Insbesondere die Funktionen und Dienstleistungen der Ökosysteme wurden in diesem Zusammenhang bislang nur unzureichend berücksichtigt. Dabei ist ein fundiertes Verständnis der Strukturen, Funktionen und Dienstleistungen von Oberflächen- und Grundwasserökosystemen sowie der multiplen Stressoren, die sie beeinflussen, für die Entwicklung eines adäquaten IWRM-Konzepts essentiell. Ein Beispiel eines Implementierungsansatzes des IWRM-Konzepts ist die europäische Wasserrahmenrichtlinie (WRRL). Obwohl zur wissenschaftlichen Untersetzung des Konzepts des „guten Zustands“ der aquatischen Systeme, wie er in der WRRL gefordert wird, ein erheblicher Fortschritt erzielt wurde, bestehen nach wie vor

signifikante Lücken. Erforderlich ist eine fundierte Kenntnis der aquatischen Ökosysteme und ihrer Dienstleistungen, die sich in Balance mit den angestrebten oder erwarteten sozio-ökonomischen Entwicklungen befindet. Multiple Stressoren (z.B. Habitatdegradation, Eutrophierung, toxische Chemikalien, invasive Arten und die Übernutzung der Wasserressourcen) wirken sich gleichzeitig auf den ökologischen Zustand aus, während Werkzeuge zur Identifizierung und Priorisierung relevanter Stressoren und Interaktionen fehlen. Der Wissenschaft fehlen bisher mechanistische Modelle zur Vorhersage und Bewertung von Wandelprozessen in Ökosystemen unter sich (rapide) ändernden Bedingungen sowie Modelle, die in der Lage sind die Reaktionen des hydrologischen und des ökologischen Systems auf Managementmaßnahmen vorherzusagen. Obwohl adäquate Indikatorkonzepte zur Bestimmung des ökologischen Zustands von Grundwasser vorhersagekräftige Modellansätze unterstützen würden, fehlen diese bisher gänzlich. Aktuelle IWRM-Konzepte gehen entweder von linearen Ursache-Wirkungs-Beziehungen aus, die in realen Systemen kaum anzutreffen sind oder sie sind als Kreislauf mit Rückkopplungsmechanismen beschrieben, allerdings fehlen die entsprechenden Werkzeuge, diese Rückkopplungseffekte in der Prozesskette zu berücksichtigen. In realen Systemen sind Verzögerungs- und Hysterese-Effekte, Rückkopplungsprozesse und nicht-lineare Reaktionen des Ökosystems auf Änderungen im Wassersystem zu beobachten. Diese komplexen Zusammenspiele gelten auch für sozio-ökonomische Änderungsprozesse und die entsprechenden sozio-politischen Reaktionen, die in die Analysen und Prognosen einbezogen werden müssen.

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass neue Ansätze zur Analyse hydrologischer und ökologischer Systeme, die multiplen Stressoren ausgesetzt sind, erforderlich sind. Diese müssen in der Lage sein, die konkurrierenden/synergetischen Nutzungen der Wasserressourcen und der Ökosystemfunktionen zu quantifizieren, z.B. durch die gezielte Entwicklung analytischer Werkzeuge und Experimente zur Analyse multipler Effekte verbunden mit modellgetriebener Analyse. Moderne Langzeit-Observatorien und Monitoring-Ansätze sind notwendig, um räumlich differenzierte ökologische Schwellenwerte und Regime-Änderungen sowie wesentliche Verzögerungs- und Rückkopplungs- und kombinierte Effekte multipler Stressoren zu identifizieren. Es sind Ansätze notwendig, die die Ökosystemdienstleistungen in regionale IWRM-Konzepte integrieren und die es erlauben, die Rolle räumlicher Heterogenität für den Schutz der Biodiversität und der Migration von Arten zu bestimmen. Der klassische Konzentrations-basierte Ansatz zum Schutz der Ökosysteme muss in einen integrierten Management-Ansatz überführt werden, der externe (z.B. Reduktion von Emissionen in die Gewässer) und interne Maßnahmen innerhalb der Grund- und Oberflächengewässer integriert. Natürliche und künstliche Systeme müssen gemeinsam betrachtet und ihr Beitrag zur Erreichung eines kombinierten Optimums muss identifiziert werden. Aquatische Ökosysteme müssen mit den terrestrischen Ökosystemen konzeptionell stärker in Verbindung gebracht werden (z.B. Bodenfunktionen) und mit der gesellschaftlichen Entwicklung integriert betrachtet werden. Der ökonomische Wert der Ökosystemfunktionen, die unser Leben wesentlich beeinflussen muss quantifiziert werden. Schließlich muss das sektorale Wassermanagement sich hin zu einem koordinierten Management von Landschaften und natürlichen und anthropogenen Ressourcen (z.B. Wasser, Abwasser, Energie) entwickeln, das auch die Konzepte des „grünen“, „blauen“ und „virtuellen“ Wassers (siehe Themenbereich 1) einschließt.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Wie sind Standards hinsichtlich Wasserqualität und –quantität festzulegen, die den Status und die Funktionen aquatischer Systeme sowie die sozio-ökonomische Entwicklung berücksichtigen? Wie können diese Standards erreicht werden?
- Wie kann das sektoral vorhandene Wissen für verbesserte Strategien des adaptiven Managements auf effiziente und effektive Weise integriert werden?
- Wie sieht eine neue Generation von Daten-, Informations- und Entscheidungsunterstützungssystemen aus, die an die neu entwickelten Standards angepasst sind?
- Mit welchen öko-hydrologischen Konzepten können die ökologischen und nutzerspezifischen Ziele erreicht werden? Wie können die verschiedenen Nutzungen in Balance gebracht werden?
- Wie können die synergetischen, antagonistischen und additiven Effekte multipler Stressoren (inkl. Klimawandel) auf die Biodiversität, die Ökosystemprozesse und die Ökosystemfunktionen bewertet werden?
- Wie kann der Ökosystemansatz genutzt werden, um spezifische Ziele des IWRM auf der großen Skala zu definieren, insbesondere bei auftretenden Nutzerkonflikten?
- Welche Konzepte, Instrumente und Maßnahmen sowie institutionelle Voraussetzungen sind notwendig, um ein koordiniertes und integriertes Management von Landschaften und Ressourcen (natürliche wie anthropogene) zu erreichen?

### **Definition von Maßnahmen und Wahl adäquater Instrumente: von der Theorie zur Praxis**

Um die gesetzten Ziele erreichen zu können, müssen effektive Maßnahmen identifiziert und implementiert werden. Oberflächen- und Grundwasserkörper stehen einer Vielzahl technischer und sozio-ökonomischer Nutzungen zu Verfügung, wie z.B. Schifffahrt, Wasserkraft und Wasserentnahmen für verschiedene Nutzungen, Abwassereinleitung, Tourismus und die Gewinnung von Baumaterialien. Diese Nutzungen haben direkte oder indirekte Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft, die im Planungsprozess häufig vernachlässigt werden. Als Konsequenz werden Sanierungs- und Wiederherstellungsmaßnahmen erforderlich, deren Kosten den sozio-ökonomischen Nutzen der Gewässernutzung überschreiten können. Daher müssen alle Auswirkungen, die durch geplante Maßnahmen hervorgerufen werden können in Kosten-Nutzen-Analysen integriert werden. Auch eine potentielle Langzeit-Degradierung der Gewässerfunktionen muss dabei berücksichtigt werden. Diese Vorgehensweise erfordert neue Kriterien für die Planung und Auswahl von Maßnahmen und eine umfassendere Kosten-Nutzen-Analyse, die den Wert der Ökosysteme miteinschließt. Die Optimierung von Entscheidungsprozessen erhält dadurch eine höhere Flexibilität, wird komplexer und führt gleichzeitig potenziell zu effektiveren Lösungen. Daher sind Entscheidungsunterstützungssysteme erforderlich, die den klassischen Kosten-Nutzen-Ansatz mit partizipativen Multi-Kriterien-Analysen kombiniert und die mit den vorgeschlagenen Maßnahmen verbundenen Unsicherheiten berücksichtigt, um zu kosteneffizienten Maßnahmenkombinationen zu gelangen.

Für eine effektive Implementierung von Maßnahmen, die auf eine ausbalancierte Allokation und den Schutz der Wasserressourcen abzielt, müssen die angewendeten Instrumente mit Bedacht entwickelt und ausgewählt werden. Zu solchen wasserbezogenen Instrumenten gehören Regulationsinstrumente (technische Standards, Erfolgsstandards, etc.), Quoten, Zugangsrechte und Allokationsmechanismen sowie ökonomische Instrumente (insbesondere Preise und Zahlungen für die Nutzung von Ökosystemdienstleistungen). Diese Instrumente müssen auf den Prinzipien der Kostendeckung, der Vorsorge- und dem Verursacherprinzip basieren.

Als Beispiel für die Wahl von Instrumenten wird in der akademischen ökonomischen Fachliteratur das Problem der Zielerreichung häufig durch Preise gelöst. In der Praxis dienen Preise verschiedenen, teilweise konkurrierenden Zwecken: sie müssen die Kosten der Infrastrukturdienstleistungen decken, Anreize für eine effiziente Nutzung knapper Wasserressourcen schaffen und sie müssen Aspekte der Fairness und der Verteilungsgerechtigkeit berücksichtigen. Wasserpreise für Wasserdienstleistungen haben in der Regel also mehrere Ziele: ökologische Nachhaltigkeit, ökonomische Effizienz, finanzielle Nachhaltigkeit und soziale Gerechtigkeit. Zu den verschiedenen institutionellen Typen von Wasserpreisen gehören Gebühren, Steuern und Entgelte, aber auch handelbare Rechte für verschiedene wasserbezogene Dienstleistungen. Die akademische Literatur fokussiert sich bis heute auf singuläre Ansätze, während in der Praxis Regulationskombinationen und überlappende Instrumente zu beobachten sind. Diese Realität muss in der Forschung aufgegriffen werden und die Lücke zwischen Theorie und der Lösung realer Probleme in der Praxis muss geschlossen werden.

Für ein nachhaltiges Wassermanagement, das in der Lage ist, sich an die dynamischen Entwicklungen der Gesellschaft und der Umwelt anzupassen, spielen technische und logistische Innovationen entlang der Wasserwertschöpfungskette eine Schlüsselrolle für die Optimierung von IWRM-Strategien. Wichtige Gebiete für technologische Innovationen sind Energieeffizienz, Abwasserbehandlung, Konzepte und Technologien für einen geschlossenen Wassernutzungskreislauf, Innovationen im Bereich der Wasserinfrastrukturen (Ver- und Entsorgung/Behandlung), adaptive Speicherlösungen in Wasserknappheitsregionen, Technologien für eine gesteigerte landwirtschaftliche Produktivität und Bewässerungseffizienz (siehe auch Themenbereiche 1 und 6).

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Welche rechtlichen und ökonomischen Instrumente sind verfügbar und unter welchen Bedingungen können sie erfolgreich umgesetzt werden?
- Sind Wasserpreise ein erfolgversprechendes Instrument für die effiziente Verteilung von Wasser und Wasserzugangsrechten? Wie können Bepreisungsmechanismen an die jeweiligen kulturellen und sozialen Gegebenheiten angepasst werden?
- Wie können die aquatischen Ökosysteme effektiv und handhabbar in Preisstrategien eingebunden werden?
- Wie können technische Maßnahmen sowie ökonomische und rechtliche Instrumente im jeweiligen Kontext kosteneffektiv implementiert werden?
- Welche Ansätze der Wasserallokation sind notwendig, wenn verschiedene Skalen auf nationaler oder Einzugsgebietsebene zum Tragen kommen (z.B. hinsichtlich globaler virtueller Wasserströme)?

- Welche Instrumente und Technologien sind für eine erfolgreiche Implementierung des IWRM erforderlich?

### **Governance: Adäquate Strukturen und Prozesse für eine nachhaltige Entscheidungsunterstützung und Management**

Ein effektives und effizientes Wassermanagement kann ohne angemessene Governance-Strukturen nicht erreicht werden. Wasser-Governance ist die Art und Weise, wie Wasserressourcen bewirtschaftet werden, d.h. wie die Entscheidungen des Wassermanagements entstehen, wer sie trifft und anhand welcher Regeln.

In der Analyse und der Entwicklung von Wasser-Governance-Strukturen, müssen die Ebenen und Probleme des „fit“ (Passfähigkeit), „Interplay“ (Wechselspiel) und „Scale“ (Skala) adressiert werden. Um das Konzept des Wassermanagements auf Einzugsgebietsebene zu implementieren, müssen hydrologische und politische Systeme eine bessere Passfähigkeit erreichen (Probleme räumlicher Passfähigkeit/ „problems of spatial fit“). Politikfelder, die einen engen Bezug zum Wassermanagement haben (z.B. Landwirtschaft, Chemikalienregulation, Biodiversität) müssen auf verschiedenen Ebenen in den Entscheidungsprozess einbezogen werden (Probleme des horizontalen institutionellen Wechselspiels/„Interplay“). Zudem sind Mechanismen erforderlich, die die Entscheidungskompetenzen und Management-Praktiken zwischen den verschiedenen administrativen Ebenen koordinieren (Probleme der Skala und des vertikalen institutionellen Wechselspiels). So besteht in Europa bis heute eine Diskrepanz zwischen der fortschrittlichen EU-Wasserrahmenrichtlinie und den institutionellen Bedingungen auf nationaler und sub-nationaler Ebene, die für die Implementierung der Richtlinie nicht adäquat strukturiert sind (z.B. föderale Strukturen mit mehreren Ebenen, die die Effektivität des integrierten Flussgebietsmanagement einschränken).

Zudem nimmt die Interaktion zwischen vielen politischen und ökonomischen Gebieten auf der nationalen wie auf der internationalen Ebene zu. Governance-Strukturen, die dem Management von Allmende-Ressourcen, wie z.B. dem Wasser dienen, müssen sich entsprechend anpassen. Besondere Relevanz hat diese Anpassung der Governance-Strukturen in Gesellschaften, die sich derzeit in einem sozio-ökonomischen Transformationsprozess befinden. In Industrieländern bezieht sich dieser Transformationsprozess beispielsweise auf die Entwicklung von einer öffentlichen hin zu einer privatisierten Wasserversorgung. In ehemaligen sozialistischen Regimen bezieht sich diese Transformation auf Institutionen und Governance-Strukturen und die Implementierung neuer Regulativen. In einigen Ländern müssen bisher fehlende adäquate Governance-Strukturen zunächst aufgebaut werden, was sich in Ländern mit schwach ausgeprägten Staatsstrukturen und finanziellen Ressourcen schwierig umsetzen lässt. Ein Beispiel sind die in vielen Ländern notwendigen Investitionen in Wasserinfrastrukturen, deren Implementierung aufgrund fehlender adäquater Governance-Strukturen und mangelnde Mobilisierung von Investitionsmitteln häufig scheitert.

Um angemessene Governance-Systeme zu entwickeln, ist eine fundierte Kenntnis der Funktionsweisen und Strukturen notwendig. Die Konzepte des öffentlichen Guts und der Allmende-Ressourcen müssen berücksichtigt und die verschiedenen Akteure und Interessengemeinschaften durch partizipative Prozesse einbezogen werden. Es müssen angemessene Bedingungen für eine nachhaltige Entscheidungsfindung und adäquate rechtliche und institutionelle Rahmenbedingungen auf den verschiedenen Governance-Ebenen geschaffen werden (z.B. global/europäisch, national, regional,



sub-regional etc.). Verschiedene Probleme der Skala, der Passfähigkeit und des Wechselspiels von Governance-Strukturen müssen berücksichtigt werden. Auch adäquate Governance-Lösungen für grenzüberschreitendes Wassermanagement und Konfliktlösungskonzepte müssen entwickelt werden. Bei der Entwicklung adäquater Governance-Strukturen und –Prozesse muss bedacht werden, wie eine Entwicklung vom aktuellen Status hin zum angestrebten Governance-System erreicht werden kann (Transformationsmanagement). Es werden Methoden benötigt, die ermöglichen, dass die entwickelten Konzepte und Strategien, basierend auf sensitiven Kontext-Analysen und empirisch fundierten Empfehlungen, von einem Einzugsgebiet auf ein anderes transferiert werden können. Schließlich müssen adäquate Konzepte des Capacity Developments entwickelt und implementiert werden, um die existierenden Governance-Strukturen zu verbessern.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Wie sehen effektive bzw. alternative Governance-Strukturen für eine erfolgreiche Implementierung des IWRM aus und wie können die existierenden Strukturen transformiert werden?
- Unter welchen Bedingungen funktioniert IWRM als effektive Strategie zum Erreichen nachhaltiger Lösungen? Bietet IWRM eine Perspektive zur Lösung grenzüberschreitender Wasserkonflikte?
- Welches sind die steuernden Faktoren des Wassermanagements außerhalb des Wassersektors (“out of the water box”)?
- (Wie) Kann der inter- und transdisziplinäre Ansatz, der dem IWRM-Konzept zugrunde liegt, umgesetzt werden – gibt es einen optimalen Grad der Inter-/ Transdisziplinarität? Ist ein integriertes und koordiniertes Management von Landschaften und Ressourcen zielführend? Welche Governance-Strukturen wären hierfür erforderlich?
- Was sind adäquate Methoden, um die entwickelten Strukturen, Strategien und Konzepte von einem System auf ein anderes zu übertragen?

## **Forschungsbereich 3**

### **Wasser- und Stoffflüsse im regionalen Kreislauf: Schutz von Umwelt und Gesundheit**

Mit einer wachsenden Weltbevölkerung nimmt auch der Ausstoß einer Vielzahl von Stoffen in die Umwelt zu, deren Verbleib im Wasserkreislauf weitgehend unbekannt ist. Einer der wichtigsten Einflüsse, der die Qualität der Gewässer beeinträchtigt, ist der Einsatz von Agrarchemikalien auf landwirtschaftlich bewirtschafteten Böden, die in die ungesättigte Zone, das Grundwasser und die Oberflächengewässer transportiert werden. Die erwarteten Landnutzungsänderungen sowie die Zunahme der Lebensmittel- und Energieproduktion werden zu einem verstärkten Einsatz von Chemikalien und damit zu einem erhöhten Druck auf die Schutzzonen führen. Die vorwiegend außerhalb Europas stattfindende, global zunehmende Urbanisierung führt zu zusätzlichen Stressoren, die sich auf den Wasserkreislauf auswirken. Durch den atmosphärischen Transport und die Deposition von Schadstoffen werden diese ubiquitär in Wasser und Böden verteilt. Aufgrund der Größe der Wasserkörper, der langen Aufenthaltszeiten im System (z.B. Grundwasser) und der großen Speicherkapazitäten der Kompartimente (z.B. Böden, Sedimente, Organismen), sind Änderungen der Wasserqualität meist langfristig und nur schwer umkehrbar. Um zwischen Problemen auf der lokalen und der regionalen Skala unterscheiden zu können, ist eine konzeptionelle Betrachtung über die Punktskala hinaus notwendig, die die dynamischen Massenflüsse räumlich integriert erfasst. Dadurch kann den regulativen Zielen (z.B. EU-Wasserrahmenrichtlinie) besser Rechnung getragen werden. Um ein vorausschauendes Wassermanagement erreichen zu können, muss ein besseres Verständnis der langfristigen Entwicklungen der relevanten Stoffflüsse auf der Einzugsgebietsskala erreicht werden, das die erwarteten Änderungen einschließt. Denn bisher stellen Wasserbilanzen auf der Einzugsgebietsskala nur mehr grobe Schätzungen dar, die auf einfachen Input- Output-Konzepten basieren und daher als Treiber für Stoffflüsse innerhalb der Kompartimente und der reaktiven Zonen nicht geeignet sind.

Bisher sind die Methoden zur quantitativen Beobachtung, Messung oder gar Änderung der Stoffflüsse auf der großen Skala sehr begrenzt. Vor diesem Hintergrund werden die unten genannten Forschungsfragen priorisiert (insbesondere nach ihrer aktuellen Relevanz für Europa).

#### **Wasserflüsse auf der Einzugsgebietsskala: Grundlage für das Verständnis von Stoffflüssen im Wasserkreislauf**

Um die hydrologischen Prozesse innerhalb eines Einzugsgebietes zu verstehen, müssen die relevanten Wasserflüsse analysiert werden. Dazu gehören Niederschlag, Evapotranspiration, Oberflächenabfluss und Infiltration, die Bewegung des Wassers im Boden, Grundwasser- und Flusssynamiken bis hin zur Mündung in die Oberflächengewässer und das Meer. Der Einfluss des Globalen und des klimatischen Wandels auf den Wasserkreislauf und die Rückkopplungen und Interaktionen zwischen den verschiedenen hydrologischen Prozessen müssen in die Untersuchungen integriert werden. Auf Grundlage dieses Wissens kann die Analyse der Prozesse erfolgen, die durch die Wasserflüsse angetrieben werden. Dazu gehören der Transport und die Akkumulation sowie die Transformation der Chemikalien und Nährstoffe in der Umwelt.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Welche Rolle spielen die Grenzbereiche Boden-Pflanze-Atmosphäre und die hyporheische Zone im hydrologischen Kreislauf und wie können die relevanten Prozesse auf größeren Skalen (z.B. Teileinzugsgebiet/Einzugsgebiet) adäquat untersucht und modelliert werden?
- Wie können Klima- und Landnutzungsänderungen die hydrologischen Flüsse beeinflussen und wie wirken sich diese Änderungen umgekehrt auf das regionale Klima aus?
- Wie können die Unsicherheiten bei der Bestimmung der Wasserflüsse basierend auf Messungen und Modellierungen quantifiziert werden?

### **Bodenfunktionen als Schlüsselfaktor im hydrologischen Kreislauf und der Einfluss von Landnutzungs- und Klimawandel**

Das Funktionieren der Bodenprozesse und die Vulnerabilität von Grund- und Oberflächengewässern sind eng miteinander gekoppelt. Beispielsweise führt eine inadäquate Landnutzung in Verbindung mit den Auswirkungen des Klimawandels zu einem erhöhten Schadenspotenzial durch Oberflächenabfluss, Erosion, Bodenversalzung und Auswaschung. Die einhergehenden Stoffflüsse beeinflussen die Qualität von Grund- und Oberflächenwasser. Bisher existiert nur ein geringes Verständnis der Quantität und Qualität von Stoffflüssen entlang der reaktiven Zonen zwischen dem Boden-Pflanze-System und den verschiedenen Wasserkompartimenten (vadose Zone, Kapillarsaum, hyporheische Zone, Küstenzone) auf der Landschaftsskala. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Quantifizierung der Stoffflüsse und -raten innerhalb und entlang der reaktiven Grenzzonen („critical zones“) essentiell für das Verständnis und die Bestimmung der Massenbilanzen von Stoffflüssen in Einzugsgebieten ist. Eine besondere Relevanz hat dies in Regionen, in denen das Grundwasser als wesentliche Trinkwasserquelle dient.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Welche Rolle spielen die verschiedenen reaktiven Zonen an den „hydrologischen Schnittstellen“ für die Wasserqualität?
- Welches sind die wichtigsten Risiken und Dynamiken im Wasser- und Boden-Kontext, die sich aus einer erhöhten Landnutzungsintensität und einem sich verändernden Klima ergeben (insbesondere hinsichtlich der Verlässlichkeit der Filterfunktion von Böden)?
- Welches sind adäquate Management-Maßnahmen zum Schutz der Bodenfunktionen unter multiplen Stresseinwirkungen?
- Risikominderung über verschiedene Skalen hinweg: Welche Ansätze können von der lokalen bis zu Landschaftsskala angewendet werden?
- Welche Rolle spielt der Küstenbereich hinsichtlich der Stoffströme im Wasserkreislauf?
- Wie können Landnutzungs-Management und innovative Agrar- und Ökotechnologien den zu erwartenden negativen Effekten auf Grund- und Oberflächenwasser entgegenwirken?

### **Management des Einflusses urbaner Systeme auf die Gewässerqualität**

Wasser- und Stoffflüsse sind in urbanen Gebieten eng miteinander gekoppelt. Die Dynamik der Nährstoffe ist hier stärker ausgeprägt als bei diffusen Quellen. Obwohl die Landwirtschaft die durchschnittlichen Nährstofffrachten dominiert, tragen urbane Abwässer durch ihre ausgeprägte Dynamik mit kurzen, hoch konzentrierten Schadstoffwellen wesentlich zur Verschmutzung der Gewässer bei. In Wasserknappeitsregionen können urbane Abwässer den größten Teil des Flusswassers ausmachen. Zu den aus urbanen Räumen ausgestoßenen Schadstoffen gehören u.a. Mikroschadstoffe, Nanopartikel, antibiotikaresistente Pathogene und endokrin wirksame Stoffe, die eine potentielle Gefahr für die Rohwasserqualität darstellen. Leckagen in den urbanen Infrastruktursystemen können zudem die Qualität des Grundwassers unterhalb des Stadtgebiets und flussabwärts beeinträchtigen.

In diesem Zusammenhang sind die folgenden Forschungsfragen von besonderer Relevanz:

- Welches Wissen muss für die Entwicklung von Modellen des urbanen Wassersystems generiert werden, die deren dynamische Interaktion mit dem Grundwasser und Oberflächengewässern widerspiegeln?
- Welche Kriterien können für eine fundierte Entscheidungsfindung im urbanen Wassermanagement angewendet werden, die die spezifischen ökologischen, ökonomischen und sozialen Bedingungen mit einbeziehen?
- Welche Technologien sind vorhanden, um die Stoffflüsse im und aus dem urbanen System in den Wasserkreislauf zu kontrollieren? Gibt es Alternativen zu den bestehenden Systemen?
- Welche potentiellen Risiken für den Menschen entstehen bezüglich der Hygiene/ Eintrag und Wirkung von Pathogenen unter dem Einfluss des Klimawandels?

### **Wasserqualität – Management gefährdender Stoffe für Mensch und Ökosysteme**

Schadstoff belastetes Wasser kann sowohl die direkte Nutzung durch den Menschen als auch die Funktionen der Ökosysteme beeinträchtigen. Während die akute Toxizität von Oberflächenwasser in Europa selten geworden ist, sind sublethale und Langzeiteffekte, die die Lebens- und Wettbewerbsfähigkeit sensibler Spezies beeinträchtigen, zunehmend ein Grund zur Besorgnis. Aufgrund einer zunehmenden Vielfalt an Substanzen, die potenziell oder auch bekanntermaßen Schäden hervorrufen sowie durch das zusätzliche Risiko durch die Mischung von Schadstoffen, muss das Wissen in diesem Gebiet erweitert und vertieft werden, um praktikable Managementwerkzeuge zum Schutz der Wasserqualität entwickeln zu können.

Einige Schlüsselfragen in diesem Forschungsbereich sind:

- Wie können die primären und neuen Schadstoffe sowie deren relevante Metabolite, die ein signifikantes Risiko für den menschlichen Gebrauch und die Ökosystemfunktionen darstellen, im Wasserkreislauf identifiziert werden?
- Wie können relevante sublethale Effekte auf Organismen-Ebene sowie auf der Ebene von Lebensgemeinschaften diagnostiziert werden?
- Welche Eigenschaften des Systems und seiner Bestandteile bestimmen die Bioverfügbarkeit, Persistenz und Absorption von prioritären Substanzen?

- Wie können die identifizierten Schadstoffe, unter Berücksichtigung ihrer Bioverfügbarkeit und Persistenz, in der Regulierung und bei Management-Maßnahmen priorisiert werden?
- Welches Wissen, welche Methoden und welche Instrumente sind erforderlich, um die Langzeitriskiken für Mensch und Umwelt sowie die Effektivität von Management-Maßnahmen unter den Bedingungen multipler Stressoren und sich ändernden Randbedingungen vorausszusagen?
- Welche Anreize und effektiven Management-Instrumente müssen geschaffen werden, um die Emission von Schadstoffen in die Umwelt zu reduzieren?

## Forschungsbereich 4

### Neue Konzepte für Monitoring, Erkundung und Datenassimilation in der Wasserforschung

Für den Schutz der aquatischen Ökosysteme und die Entwicklung nachhaltiger Wassermanagement-Strategien sind langfristig angelegte, systemorientierte Forschungs- und Monitoring-Programme elementar. Die Langzeitperspektive ist notwendig, um Verzögerungsprozesse und Rückkopplungsmechanismen berücksichtigen zu können. Nur mit einem interdisziplinären Ansatz, der alle räumlichen Skalen berücksichtigt, können Lösungen entwickelt werden, die dem komplexen Gesamtsystem gerecht werden. In Verbindung mit flexibel einsetzbaren Mess- und Monitoringsystemen, die mit kurzem zeitlichem Aufwand an mehreren Orten eingesetzt werden können, z.B. während fokussierter Messkampagnen, können relevante Informationen über das hydrologische System und dessen Reaktionen auf verschiedene Ereignisse und langfristige Veränderungen der Rahmenbedingungen erfasst werden. Ergänzt durch ein neuartiges Datenmanagement kann die Kombination von flexibel und auf großen Flächen einsetzbaren Mess- und Monitoringsystemen und langfristigen, Standort spezifischen Observatorien die Basis liefern, um zuverlässige Prognosen zukünftiger Systemzustände zu treffen.

#### Monitoring und Erkundung

Bisher existieren nur wenige Langzeit-Observatorien, die zudem in der Regel auf nur eine spezifische Forschungsdisziplin bzw. ein Umweltkompartiment fokussieren. Beispiele sind nationale Oberflächengewässer- und Grundwasserbeobachtungsprogramme oder das globale FLUXNET-Netzwerk, welches sich auf den Kohlenstoff- und Wasserdampfaustausch zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre konzentriert.

Um den Einfluss des Globalen Wandels auf die Quantität und Qualität der Wasserressourcen abschätzen zu können sind moderne, kompartiment- und skalenübergreifende Observatorien notwendig. Solche Observatorien können auch als Frühwarnsysteme für Ökosysteme dienen, die einen kritischen Zustand erreicht haben. Diese Langzeit-Observatorien sollten einen klaren wissenschaftlichen Fokus haben und robust und flexibel aufgebaut sein, um immer neu entwickelte Mess- und Sensorsysteme integrieren zu können.

*Entwicklung eines fundierten Systemverständnisses:* Monitoring- und Erkundungskonzepte sind erforderlich, die eine Verknüpfung des Systemverständnisses der verschiedenen Umweltkompartimente ermöglichen. Ein gesamtheitlicher Ansatz ist notwendig, wie beispielsweise im „Critical Zone (CZ)“ Konzept des NRC (2001) vorgestellt oder wie er im TERENO-Netzwerk implementiert wird, der über das Monitoring individueller Systemparameter und Massenströme, Änderungen des Klimas, biotischer oder anthropogener Treiber hinausgeht. Die komplexe Interaktion hydrologischer, biogeochemischer, physikalischer und ökologischer Prozesse, die vorwiegend an den Systemgrenzen stattfinden, kontrollieren Wasser-, Energie-, Stoff- und Gasströme sowie die Bewegung von Organismen im Raum und haben daher einen großen Einfluss auf die Qualität und Quantität des Wassers. Die Randbedingungen setzen den Rahmen für das analysierte System und bestimmen das Ergebnis der Analyse maßgeblich. Daher ist es erforderlich vom Konzept der Messung statischer Variablen und lokaler Systemzustände weg und hin zur Beobachtung von Flüssen und deren räumlicher

Variabilität und zeitlichen Dynamik zu kommen. Damit wird ermöglicht eine Vielzahl komplexer Prozess-Struktur-Interaktionen zu analysieren und daraus die dominierenden Kontrollfaktoren von Prozessen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen zu extrahieren.

*Überwindung von Skalensprüngen und Daten-Modell-Inkompatibilitäten:* Die Komplexität des hydrologischen Systems ergibt sich aus den Interaktionen der verschiedenen Prozesse und Umweltkompartimente, die sich über eine große Bandbreite räumlicher und zeitlicher Skalen erstrecken. „Nested Monitoring“- Ansätze sind ein vielversprechendes Konzept, um Informationen über die relevanten Skalen hinweg zu erhalten und um Wissenslücken hinsichtlich der Kompartiment-Interaktionen und Skalenzusammenhänge zu schließen.

Die Integration von Daten und Modellen unterschiedlicher wissenschaftlicher Disziplinen und die Nutzung des Wissens, das auf detaillierten Prozessstudien aufbaut, erfordert neue Strategien der Datenerhebung, der Prozessierung von Informationen sowie der Kommunikation erarbeiteten Wissens, um zu verbesserten Wassermanagementkonzepten auf der Einzugsgebietsebene zu gelangen. System- und Datenunsicherheiten müssen quantifiziert und Datenqualitätsuntersuchungen durchgeführt werden, um Monitoring-Strategien zu optimieren. Neue, modellgestützte Messkonzepte und Sensortechnologien müssen in Monitoring-Strategien integriert werden, um die maximal mögliche Information bei minimalen Kosten zu erhalten.

*Integrierte Observatorien:* Obwohl in den vergangenen Jahrzehnten mit kleinskaligen Labor- und Feldexperimenten signifikante Fortschritte erzielt wurden, besteht bis heute eine deutliche Wissenslücke zwischen dem Prozessverständnis, das im Labor erzielt wurde und der Systembeschreibung in Felduntersuchungen. Daher ist eine neue Generation moderner Exploratorien und Observatorien notwendig, die es erlauben, interdisziplinäre Konzepte zu verifizieren und zu validieren, komplexe Systemantworten zu beobachten und zu analysieren und um Beobachtungen in verschiedenen Kompartimenten miteinander zu verknüpfen.

Darüber hinaus muss ermöglicht werden Prozessuntersuchungen mit teilweise manipulierbaren Variablen durchzuführen, um spezifische Systemantworten und Kausalitäten identifizieren zu können. Observatorien und Experimentierstandorte wie TERENO ([www.tereno.net](http://www.tereno.net)) oder das „Jena Experiment“ ([www2.uni-jena.de/biologie/ecology/biodiv/index.html](http://www2.uni-jena.de/biologie/ecology/biodiv/index.html)) können als Beispiele dienen, wie alle Feldexperimente mit einem spezifisch und intensiv instrumentierten, langfristige angelegten Referenzstandort verknüpft werden können. Observatorien sollten nicht nur als Plattform zum Austausch und zur Verknüpfung von Daten und Informationen zwischen verschiedenen Observatoriennetzwerken dienen, sondern auch, um den Austausch von Ideen, Methoden und Wissenschaftlern zu fördern.

Die beschriebenen Monitoring- und Erkundungsansätze sollen es ermöglichen, Fragen der folgenden Art zu beantworten:

- Können „Basisdaten“ definiert werden, die in integrierten Observatorien erhoben werden und die die Integration der verschiedenen Disziplinen der Wasserforschungs-Community befördern?
- Wie können Erkundungs- und Monitoringstrategien optimiert werden, damit ermöglicht wird, die komplexen Systemantworten und –rückkopplungen zu analysieren und die Konzepte der interagierenden Prozesse über verschiedene Kompartimente hinweg zu validieren?

- Wie viele Freiheitsgrade haben Systeme? Steigt die intrinsische Dimensionalität eines hydrologischen Systems mit der Zunahme anthropogener Stressoren?
- Welches sind die "Hot Spots" des Systemverhaltens und wo sind diese lokalisiert?
- Inwieweit gibt die funktionelle Heterogenität (z.B. Grundwasserstand-Zeitreihen) die strukturelle Heterogenität (z.B. Aquifereigenschaften) eines Systems wider? Wie können die Interaktionen zwischen struktureller und funktioneller Heterogenität identifiziert werden?
- Wie lassen sich die relevanten Zeit- und Raumskalen einzelner Prozesse und deren Rückkopplungen bestimmen?
- Welche Modellstrukturen geben die beobachteten Dynamiken spezifischer Zeit- und Raumskalen adäquat wieder? Können passende Modellstrukturen aus den beobachteten Daten abgeleitet werden?
- Wie kann das Wissen verschiedener Disziplinen aus Sicht der Daten- und Modell-Nutzung integriert werden, um Management-Konzepte auf der Einzugsgebietskala zu verbessern?

### Informations-Infrastrukturen

Durch die Entwicklung hoch aufgelöster Monitoring- und Fernerkundungstechnologien, stehen immer größere Datenmengen für die Charakterisierung von Umweltsystemen zur Verfügung. Um diese Datenmengen für hydrologische Analysen effizient nutzen zu können, ist die Entwicklung neuer Datenmanagement-Konzepte, Datenprozessierungs- und Datenschnittstellenwerkzeuge sowie Datenintegrations- und Datenassimilationsmethoden nötig.

Bei der Forderung nach einem langfristigen Monitoring müssen die bereits vorhandenen großen Datenmengen berücksichtigt werden. Diese stellen eine wertvolle Informationsquelle über Entwicklungen in der Vergangenheit dar und sind essentiell für die Lösung heutiger Wasserprobleme. Die vorhandenen Datensätze befinden sich im Besitz verschiedener Einrichtungen (Universitäten, Behörden, Unternehmen) und ein erheblicher Aufwand wäre notwendig, um diese in einer neuen Datenbank zu sammeln und zu strukturieren (Beispiel: German Runoff Data Center (GRDC)). Die vorhandenen Daten haben zudem eine sehr unterschiedliche Qualität. Ob die Daten auf Fehler untersucht wurden, ist in der Regel nicht bekannt. Daher ist nicht zu bestimmen, ob die Daten für die gewünschte Analyse geeignet sind oder nicht und eine nachträgliche Fehleruntersuchung erfordert einen sehr hohen manuellen Aufwand. Daher müssen Wege gefunden werden, diese Daten zu nutzen und die Methoden der Fehleranalyse und Meta-Informationen zu möglichen Fehlern innerhalb der Wasserforschungs-Community auszutauschen.

*Datenmanagement-Methoden:* Moderne Mess- und Monitoringsysteme liefern kontinuierliche und hoch aufgelöste Datenströme. Datenmanagement-Methoden sind erforderlich, die eine automatisierte Datenspeicherung ermöglichen und gleichzeitig Datenqualitätsnormen einhalten.

*Webdienste:* Um Daten über das Internet verfügbar zu machen müssen entsprechende Webdienste entwickelt werden. Die Datenprozessierung wird zunehmend an Relevanz gewinnen, da die Datenquellen eine große Bandbreite zeitlicher und räumlicher Skalen einschließen. Vorhandene web-basierte



Informationsinfrastrukturen, wie sie beispielsweise von GEOSS (<http://www.earthMonitorings.org/>), INSPIRE (<http://www.inspire-geoportal.eu/>), und GMES (<http://www.gmes.info/>) angestrebt werden, wurden kürzlich von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) als eine der wichtigsten wissenschaftlichen Herausforderungen genannt. Um das wissenschaftliche Datenmanagement, die Datenaufbereitung und Datenerkundung unterstützen zu können, müssen diese Webdienste dringend weiterentwickelt werden. Online-Prozessierung und Entscheidungsunterstützungsdienste sollten den Nutzern einen einfachen Zugang zu wissenschaftlichen Ergebnissen bieten.

„Open source“-Verfügbarmachung von Daten: Öffentlich finanzierte Wissenschaftler sollten dafür verantwortlich gemacht werden, ihre erhobenen Daten der wissenschaftlichen Community frei zu Verfügung zu stellen und einen Verlust von Daten zu verhindern. Große Summen an Steuergeldern gehen verloren, wenn diesem Prinzip nicht gefolgt wird. Daher müssen klare Regeln mit angemessenen Konsequenzen (z.B. Ausschluss aus zukünftiger Förderung) definiert werden, die die Datenbereitstellung in einem spezifischen Format und innerhalb einer vorgegebenen Zeit regeln.

*Datenprozessierung:* Daten aus unterschiedlichen Umweltkompartimenten müssen für unterschiedliche Verwendungen in prozessbasierten, prozessorientierten und regelbasierten Simulatoren verarbeitet werden. Das Datenmanagement soll die Informationen liefern, die zu einem verbesserten Verständnis der Umweltsystemfunktionen führen und die die Basis sind, Modelle mit zuverlässiger Vorhersagekraft zu entwickeln.

*Die Integration diverser Datensätze* und Informationen aus verschiedenen Quellen, wie Modellierung und Monitoring, ist für das Erlangen zusätzlichen Wissens grundlegend. Eine Herausforderung für die Datenassimilierung ist die räumlich-zeitliche Heterogenität der Informationen, der Auflösung und der Unsicherheit. Um die Fusion von Daten aus unterschiedlichen Quellen zu erleichtern, sind spezifische semantische Referenzsysteme (Onthologien) erforderlich. Gute Beispiele für Datenorganisation und semantische Regeln und Onthologien für eine schnelle Datensuche sind wiederum INSPIRE und GEOSS. Diese müssen für die spezifischen Anforderungen von Umweltdaten weiterentwickelt werden. Gemeinsame Datenformate (z.B. WaterML für Hydrologie, GML, NetCDF, HDF, etc.) können als Basis für dieses Forschungsfeld dienen. Angemessene Visualisierungswerkzeuge müssen entwickelt oder angepasst werden, um den Umgang mit den Mengen und Heterogenitäten der Umweltdaten zu ermöglichen.

Integrierte Modelle beziehen sich nicht nur auf die Integration verschiedener naturwissenschaftlicher Disziplinen. Um von der rein wissenschaftlichen Übung weg, hin zu adäquaten Werkzeugen für die Entscheidungsunterstützung zu gelangen, müssen neue Wege beschritten werden zur Integration sozio-ökonomischer Daten und politischer Aspekte in die zu entwickelnden Modelle. Nur auf diese Weise können realistische Szenarien erstellt und zuverlässige Prognosen der Zukunft getroffen werden.

Einige Schlüsselfragen bezüglich des Forschungsbereichs Informations-Infrastrukturen sind die folgenden:

- Auf welche Weise können die enormen Datenmengen verarbeitet und gesichert werden und gleichzeitig ein innovatives wissenschaftliches Datenmanagement und eine gute Datenqualität gewährleistet sowie den

Entscheidungsträgern Zugang zu den wissenschaftlichen Ergebnissen gewährt werden?

- Wie ist "Datenqualität" zu definieren und zu propagieren?
- Wie können die Methoden zur Unterstützung der Datenassimilierung über verschiedene Skalen hinweg verbessert werden?
- Wie sehen gemeinsame "Hydrodaten-Schnittstellen" und "Hydro-Semantiken" aus? Welches sind die relevanten hydrologisch-sozio-ökonomischen Schnittstellen?
- Wie können die Daten für die verschiedenen Nutzer-Bedarfe verarbeitet werden?
- Wie können die Daten genutzt werden, die aus verschiedenen Quellen hervorgehen und daher eine große Heterogenität in Zeit, Raum, Auflösung und Unsicherheit aufweisen?
- Wie können sozio-ökonomische Daten abgerufen und adäquat prozessiert und integriert werden, um sie mit integrierten hydrologischen Modellen kompatibel zu machen?
- Wie ist ein passendes web-basiertes Entscheidungsunterstützungs-Instrument aufgebaut?
- Wie kann ein gemeinsamer organisatorischer Rahmen (Regeln, Lizenzierung etc.) zur Datennutzung gestaltet sein?

## Forschungsbereich 5

### Entwicklung komplexer Systemmodelle und Datenintegration in der Wasserforschung

Die Wasserforschungs-Community entwickelt seit vielen Jahren eine Vielzahl an Modellierungswerkzeugen. Die meisten dieser Modelle wurden für die Darstellung spezifischer Prozesse oder zur Untersuchung bestimmter Systeme auf unterschiedlichen Skalen und verschiedenen Komplexitätsebenen entwickelt. Daher existiert heute eine Vielfalt an Modelltypen, die von Daten getriebenen Input-Output-Modellen, physikalisch basierten Konzeptmodellen bis hin zu PDE-basierten Modellen reichen (PDE: partielle Differentialgleichung). Die Wasserforschungs-Community ist sich einig, dass die Palette wasserbezogener Probleme, die in realen Systemen auftreten, mit einem einzigen Modell nicht adäquat wiedergegeben werden kann. Im Idealfall repräsentiert jedes Modell, je nach untersuchtem Problem, eine spezifische Vereinfachung und Interpretation der Realität, die eine spezifische Zahl an Parametern erfordert. Da dies bisher das allgemeine Verständnis war, wurde bis dato, abgesehen vom ein oder anderen kommerziellen Modellpaket, der Entwicklung eines vielseitiger anwendbaren „Community Modellsystems“ wenig Beachtung geschenkt.

Durch die globalen Veränderungen des Umweltsystems und unserer Gesellschaft der letzten Jahre steht die hydrologische Modellierung vor einer Vielzahl neuer, ungelöster Herausforderungen im Bereich des Wasserqualitäts- und Wasserquantitätsmanagements. Zur Lösung dieser Herausforderungen sind komplexe, aber zuverlässige Modelle notwendig, da die Anforderungen an Szenarien und Vorhersagen die zeitliche und räumliche Reichweite vorhandener Beobachtungen überschreiten. Die Szenarien müssen bisher nicht aufgetretene natürliche oder Menschen gemachte Änderungen der Systemparameter, Randbedingungen und Systemstrukturen einschließen.

Der Wasserforschungs-Community fehlen die notwendigen Werkzeuge und Erfahrungen, um diese Art von Vorhersagen oder Projektionen in die Zukunft mit der entsprechenden Zuverlässigkeit zu produzieren. Neue hydrologische Modelle werden nicht nur den Ansprüchen an verbesserte Vorhersagefähigkeit, hoher räumlicher Auflösung und größerer räumlicher Ausdehnung dienen müssen. Sie werden auch neue Modellkonzepte und Softwarestrukturen benötigen – neue Strukturen, die über die einfache Kompartiment-Kopplung von Modell zu Modell hinausgehen. Eine der größten Herausforderungen in diesem Bereich wird die einheitliche Multi-Skalen-Integration aller hydrologischen und sozio-ökonomischen Prozesse sein, die für ein spezifisches Problem relevant sind. Dazu ist eine umfassende Analyse des hydrologischen Systems notwendig, die Identifikation der relevanten Prozesse und die Entwicklung neuer konzeptioneller Ansätze und Software-Strukturen, die diese Prozesse auf der für die Problemstellung relevanten Skala wiedergeben.

Die Schlüsselfrage lautet: Kann dies durch den bisher angewendeten Ansatz „ein Problem – ein Modell“ erreicht werden? Oder brauchen wir eine gemeinsame Initiative der Community, um die Modellierungswissenschaften jenseits individueller Modellverbesserungen voranzubringen? Im Gegensatz zur Community der Klimamodellierer sind die Wasserwissenschaften bisher nicht nach einem arbeitsteiligen Prinzip organisiert. Die Wasserforschung wird sich in absehbarer Zeit mit der Frage befassen müssen, wie die neuen Herausforderungen des globalen Wandels in einer gemeinsamen „Community-Initiative“ gelöst werden können.

## Hydrologische Modellierung realer Systemen

*Entwicklung hoch flexibler Modellstrukturen:* die meisten Modelle sind für bestimmte Prozesse oder Kompartimente optimiert (z.B. gute Modellierung des Oberflächenabflusses, schwache Wiedergabe der Bodenfeuchte). Für eine integrierte Modellierung der hydrologischen Kompartimente (z.B. Grundwasser, Bodenwasser, Oberflächenwasser) auf der Flusseinzugsgebietsebene, die die relevanten Prozesse an der Landoberfläche (Evapotranspiration), in Atmosphäre und Anthroposphäre einbeziehen, müssen neue, hoch flexible Modellstrukturen entwickelt werden, die Massen- und Energieflüsse (Vernetzung mit der Klima-Community!) sowie biologische Prozesse einschließen, anstatt die verschiedenen Modellkomponenten schlicht zu koppeln. Diese neuen Strukturen sollen die Probleme beheben, denen wir heute gegenüberstehen, wenn es um die Definition der Kopplungsparameter, die Verbindung verschiedener Modellkomplexitäten, die Formulierung einheitlicher Randbedingungen, die Überwindung der Skalensprünge in Zeit und Raum oder um die Identifizierung der Modell-Inkompatibilitäten geht.

Aufgrund der Vielfältigkeit der Wassermanagementprobleme sind für das Modell verschiedene Komplexitätslevel erforderlich, um für die spezifische Fragestellung aussagefähig zu sein. Die nächste Generation hydrologischer Modelle sollte einen Schwerpunkt auf die Anwendbarkeit in realen Systemen legen, um ein gesamtheitliches Systemverständnis auf Basis der Modelle zu fördern (z.B. Repräsentation des instationären Charakters hydrologischer Systeme unter dem Einfluss des globalen Wandels und Kopplung des Klima- Oberflächenwasser – Grundwasser-Kontinuums). Die Anforderungen an die Anwendbarkeit der Modelle für reale Systeme sollte Fragen der Datenverfügbarkeit, Datenqualität und die Quantifizierung der Unsicherheiten beinhalten.

*Berücksichtigung der Mehrskaligkeit hydrologischer Systeme:* Hydrologische Systeme umfassen immer mehrere Skalen – angetrieben durch großskalige Phänomene wie Klima- und Landnutzungswandel, bestimmen kleinskalige Prozesse z.B. am Übergang von Boden- zu Grundwasser oft die Reaktion des Gesamtsystems. Ein Multi-Skalen-Ansatz in der hydrologischen Modellierung muss diese Skalen-Sprünge überwinden, um die Vorhersagefähigkeit des Modells in Bezug auf den Wasserkreislauf, Chemikalien- und Energieflüsse sowie Ökosystem-Reaktionen auf der Einzugsgebietsebene zu verbessern.

*Funktionen der Datenintegration und Assimilation* werden für die hydrologische Modellierung zunehmend an Bedeutung gewinnen. Diese müssen mit der Einrichtung von Umweltobservatorien zur integrierten Langzeitbeobachtung (z.B. TERENO) Hand in Hand gehen, in denen die benötigte Art und Qualität von Daten produziert werden können, die zum Antrieb der kommenden Generation hydrologischer Modelle benötigt wird. Gleichzeitig muss ein Fokus auf der Kompatibilität der gemessenen Daten und der Modelle liegen, die die Daten verarbeiten. Der Skalensprung zwischen Modellvorhersagen auf der Skala des Modellgitters und den Messdaten, die die lokalen Zustände und Flüsse repräsentieren, erfordert die Berücksichtigung der Mehrskaligkeit hydrologischer Systeme. Zudem liefern Messdaten indirekte Informationen über relevante hydrologische Variablen. Eine Verzahnung zwischen hydrologischen Prozessmodellen und Modellen, mit denen der Messprozess an sich auf Basis physikalischer Prinzipien simuliert wird, ist notwendig um den Informationsgehalt sowie die Kompatibilität zwischen Daten und hydrologischen Prozessmodellen zu steigern. Modellkonzepte, die die erhobenen Daten auf optimale Weise verarbeiten können sind erforderlich und – umgekehrt – Monitoring-Konzepte werden benötigt, die Daten entsprechend den Modellkonzepten produzieren. Dieses

Prinzip gilt für die Skalen der Daten und der Modelle, aber auch für die Datenformate und Modell-Semantik (siehe Themenbereich 4).

*Berücksichtigung von Modell- und Datenunsicherheiten* Modelldaten sind - wie Messdaten auch - mit Unsicherheiten behaftet. Zu nennen ist hier die unvermeidbare Unsicherheit, die durch die hohe Komplexität und die Nichtlinearitäten der am Wasserkreislauf beteiligten Systeme (v.a. Atmosphäre und Hydrosphäre) und ihrer Kopplung verursacht wird. Weitere Unsicherheit wird durch die Unzulänglichkeiten der verwendeten Modelle und Daten eingebracht. Diese kann reduziert, aber nicht eliminiert werden. Bei Projektionen in die Zukunft kommt zusätzlich unsere mangelhafte Kenntnis der künftigen Entwicklung maßgeblicher Einflussfaktoren hinzu. Daher können die Ergebnisse einzelner Modellrechnungen ohne quantitative Angabe ihrer Unsicherheit weder in der Forschung noch in der Praxis zuverlässig angewendet werden.

Bei der Diskussion um eine Initiative der Wasserforschungs-Community für die hydrologische Modellierung ist zu berücksichtigen, dass in der Modellierung verschiedene Typen von Modellen verwendet werden, die aus unterschiedlichen Ansätzen entstanden sind (z.B. stochastische versus PDE-basierte Modelle; Konzeptmodelle versus Input-Output/Blackbox-Modelle; Landoberflächenmodelle versus Einzugsgebietsmodelle). Bei der Kopplung verschiedener Modelle muss zunächst entschieden werden, was das Ziel der Kopplung ist und die Skalensprünge müssen überbrückt werden.

In diesem Zusammenhang haben folgende Forschungsfragen besondere Relevanz:

- Wie können innovative Modellstrukturen aufgebaut sein, die die Komplexität realer Systeme erfüllen und die verschiedenen Kompartimente und Prozesse auf flexible Art integrieren?
- Wie können die unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen der hydrologischen Systeme in diesen Modellen wiedergegeben werden? Wie können diese Modelle, je nach Problemstellung, für verschiedene Komplexitätsgrade adaptierbar gemacht werden?
- Wie können die benötigten Datentypen und -qualitäten zur Verfügung gestellt werden, die mit dieser neuen Generation integrierter hydrologischer Modelle kompatibel sind?

### **Evaluierung hydrologischer Modelle: Benchmarking**

Die Entwicklung einer neuen Generation hydrologischer Modelle erfordert die Bewertung vorhandener Modellsysteme hinsichtlich ihrer Funktionalität, ihrer Stärken und Schwächen. Benchmarking-Tests sind ein adäquates Werkzeug, um verschiedene Modell-Codes miteinander zu vergleichen und können als Basis dienen, um in der Community gemeinsam Modelle zu entwickeln. Ein Benchmarking sollte sowohl vereinfachte als auch reale Szenarien einschließen. Vereinfachte, akademische Testläufe sind z.B. für die Analyse komplexer System-Antworten sinnvoll, die Bewertung einzelner Prozesse hinsichtlich ihrer Relevanz für die Systemantwort sowie für die Untersuchung von Rückkopplungs-Effekten. Modellvergleiche und Modell-Benchmarking sind in der Hydrologie sowie der Meteorologie als „Lernplattformen“ z.B. im Rahmen der DMIP und der PILPS Initiativen durchgeführt worden. Dabei werden Hypothesen getestet und die Leistungsfähigkeit der Modelle unter kontrollierten Bedingungen verbessert. Grundlage solcher Tests ist ein klarer Projektaufbau, der den erwarteten Ergebnistyp und dessen Auflösung spezifiziert, und die präzise Formulierung von

Arbeitshypothesen. Die Entwicklung von Benchmarking-Szenarien für reale Systeme (z.B. in Intensiv-Messstandorten) geht über die numerische Simulation hinaus und schließt Datenassimilation und Datenintegration mit ein. Das Benchmarking hydrologischer Modellsysteme ist ein Schlüsselement innerhalb der vorgeschlagenen Community-Modell-Initiative und sollte auf nationaler sowie internationaler Ebene stattfinden.

Basierend auf der breiten Expertise in der Modellierung des Umweltsystems und der hier stattfindenden Wasser-, Massen- und Energieflüsse sind in Deutschland die Voraussetzungen gegeben, um eine gemeinsame, offene Plattform für die Modellierung und Vorhersage des hydrologischen Systems zu schaffen. Diese Modellierungs- und Software-Plattform kann dazu dienen, das existierende und zukünftige Wissen zu allen relevanten hydrologischen Prozessen zu integrieren. Sie wird ein flexibles Kopplungsschema mit austauschbaren hydrologischen und Hydrologie-bezogenen Modellkomponenten an definierten Schnittstellen bieten. Dazu gehört eine Benchmarking-Plattform zum Testen und zur Evaluierung von Modellsystemen, eine auf Parallelrechnern basierende Entwicklungsumgebung für effiziente numerische Solver und Vorkonditionierer sowie eine Entwicklungsumgebung für neue Strategien der Anwendung vorhandener und neuer Datenquellen für die Parameterbestimmung und Datenassimilation. In diese Plattform wird zudem die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse integriert sein. Diese Initiative muss von Beginn an auf allen Ebenen in die internationale hydrologische Community eingebettet sein und soll eine führende Rolle in einigen der Schlüsselbereiche der Modellierung übernehmen.

Eine Benchmarking-Initiative könnte Fragen der folgenden Art beantworten:

- Welche Art von Modellen eignet sich für die Nutzung welcher Art von Fragen?
- Welches sind die Stärken und Schwächen verschiedener Modellansätze?
- Wie können die Vorteile verschiedener Modellkonzepte für ein verbessertes Gesamtergebnis miteinander kombiniert werden?
- Wie könnte der Rahmen für eine Initiative der Modellierer-Community aussehen, der die oben genannten Kriterien berücksichtigt?

Der Fokus einer solchen Community-Initiative soll auf der Entwicklung einer Plattform liegen, die

- Schnittstellen definiert, um die Modellumgebung für neue Komponenten zu schaffen
- neue Prozessbeschreibungen liefert
- als Basis für das „Benchmarking“ dient (hier werden verschiedene Modelle unterschiedlichen Typs zusammengebracht)
- Zugang zu gemeinsamen Datenreihen bietet und diese Daten auf optimale Weise für die Modellkalibrierung und Datenassimilierung nutzt
- andere Disziplinen integriert (Modellschnittstellen), um zukünftigen Herausforderungen zu begegnen (inbes. bzgl. Vegetation, Atmosphäre, Ökonomie, Sozialwissenschaften)
- externe Daten (als Output anderer Modelle) liefert, die von den hydrologischen Modellentwicklern zur Verbesserung ihrer Modelle benötigt werden

- verhindert, dass Modellentwickler für jede Prozessstudie ein neues Modell von Grund auf neu entwickeln müssen

Für eine offene und einfache Kommunikation und Interaktion der hydrologischen Modellierer-Community soll eine Internetplattform für das Management der verschiedenen Benchmarking-Projekte geschaffen werden, für die gemeinsame Modellentwicklung, den Vergleich der verschiedenen Modell-Codes, Datenaustausch, Dokumentation und Diskussion.

## Forschungsbereich 6

### **Wasserknappheit: Perspektiven einer neuen circum-mediterranen Forschungsinitiative**

Für mehr als ein Drittel der Weltbevölkerung gehören Wasserknappheitsprobleme zu den größten Herausforderungen. In vielen Schwellen- und Entwicklungsländern beschränken knappe Wasserressourcen die landwirtschaftliche Produktion und damit die Lebensmittelversorgung. Wasserknappheit führt zu erheblichen hygienischen Problemen und wirkt einschränkend auf die ökonomische Entwicklung. Mit einer erwarteten Weltbevölkerung von 9 Milliarden bis zum Jahr 2050, wird das weltweite Bevölkerungswachstum sowie die Zunahme des Konsums von Fleisch und anderen tierischen Produkten die Wasserknappheitssituation noch verschärfen.

Hinzu kommt der erwartete Rückgang der Grundwasserneubildung aufgrund des Klimawandels um bis zu 50 % und mehr in bereits heute trockenen Regionen. Die Verschmutzung der Wasserressourcen durch Haushalts- und Industrieabwässer sowie intensive Landwirtschaft und die Versalzung von Böden und Grundwasser durch falsche Bewässerungstechniken und Übernutzung der Grundwasservorkommen beeinträchtigt zusätzlich die Verfügbarkeit nutzbarer Süßwassers. Die zunehmende Wasserverknappung wird auch für die Industrienationen wirtschaftliche Konsequenzen haben. Zu den betroffenen Sektoren zählen die Landwirtschaft, Wasserver- und -entsorgung, Schifffahrt/Transport und Tourismus, bis hin zum Energiesektor. Die weltweite Vernetzung durch einen globalisierten Handel wird dazu führen, dass die zunehmende Wasserknappheit in einigen Regionen zu einer steigenden Nachfrage nach landwirtschaftlichen Produkten aus anderen Regionen führen wird, wodurch der virtuelle Wasserhandel intensiviert wird.

Eine der Weltregionen, die durch eine zunehmende Wasserknappheit am stärksten beeinträchtigt sein wird ist der circum-mediterrane Raum, der die Länder Südeuropas, Nordafrikas und des Nahen und Mittleren Ostens einschließt. Diese Region ist durch ein extremes Bevölkerungswachstum in den Ländern Nordafrikas und des Nahen und Mittleren Ostens gekennzeichnet, das innerhalb der nächsten 50 Jahre zu einer Verdreifachung der Lebensmittelnachfrage führen wird. Durch die in den neuesten Klimaprognosen vorhergesagte verringerte Verfügbarkeit von Wasserressourcen um 50 % im Laufe der nächsten 50-100 Jahre, werden die heute stark von der Landwirtschaft und vom Tourismus abhängigen Länder Südeuropas fundamentalen Veränderungen unterworfen sein. Diese Veränderungen gehen mit der Tatsache einher, dass die Küstenregion des Mittelmeerraums zu den am dichtesten besiedelten Regionen weltweit gehört und eine Erhöhung der Küstenbevölkerung von heute 180 Millionen auf 250 Millionen im Jahr 2025 erwartet wird (inklusive Zuwanderung). Diese Bevölkerungszunahme wird zu einem zunehmenden Wasserbedarf und einer enormen Abwasserproduktion einhergehen. Regional konzentrierte Wasserverschmutzungen in den großen Städten des Mittelmeerraums und die Einleitung unbehandelten Abwassers werden die Ökologie des Mittelmeers stark beeinträchtigen.

Diese Entwicklungen werden zusätzlich dadurch verschärft, dass in vielen der mediterranen Länder bereits heute die erneuerbaren Wasserressourcen übernutzt werden, während der Mittelmeerraum gleichzeitig, global gesehen, ein „Hot Spot“ für die aquatische Biodiversität ist und eine große Anzahl endemischer und bedrohter Arten beherbergt. Daher ist der mediterrane Raum für den Schutz und die



Wiederherstellung aquatischer Ökosysteme eine Prioritätsregion von besonderer Bedeutung.

Gleichzeitig mit den genannten Risiken für das Gleichgewicht der circum-mediterranen Region, hat diese Region große Entwicklungspotenziale. Der östliche und südliche mediterrane Raum beherbergt mehr als 30 % der weltweit vorhandenen Öl- und Gasreserven. Hier entstehen einige der am schnellsten wachsenden urbanen und industriellen Gebiete der Welt. In Südeuropa befindet sich einer der größten Immobilien- und Tourismuskäufmärkte weltweit. In Nordafrika gibt es ehrgeizige Bestrebungen durch komplexe erneuerbare Energieproduktions- und Verteilungsnetze die energetische Selbstversorgung zu erlangen und darüber hinaus 15 % der europäischen Stromnachfrage zu decken.

Alle vorhandenen Aktivitäten und neuen Potenziale gehen dabei von einer ausreichenden Verfügbarkeit von Wasser aus – aus Flüssen, Grundwasser, Entsalzungsanlagen oder aus behandeltem Abwasser. Angesichts der Langzeit-Prognosen der Entwicklungen der Wasserressourcen in dieser Region, ist auf die Verfügbarkeit von Wasser ohne zusätzliche Maßnahmen allerdings kein Verlass. Die zunehmende Wasserverknappung muss daher zu einem Treiber für die Einführung neuer, Wasser effizienter Technologien in allen Sektoren sein, für ein verbessertes Management und eine ökonomisch optimierte Allokation der Wasserressourcen sowie deren Schutz vor Verschmutzung. Eine Studie von Deutsche Bank Research ergab, dass bereits heute 5 der 10 attraktivsten Märkte für Wassertechnologie und Investitionen in den Wassersektor im circum-mediterranen Raum liegen, während sie gleichzeitig anfällig sind für klimabedingte schwere und zunehmende Wasserknappheit.

Die Vielfalt und Komplexität der Wasserprobleme im circum-mediterranen Raum erfordern ein klares und fokussiertes Forschungsprogramm, um den drohenden Herausforderungen zu begegnen und um die weiteren Entwicklungen in Richtung einer sozio-ökonomischen und ökologischen Nachhaltigkeit zu steuern. Um diesen Herausforderungen gerecht zu werden, werden vier Forschungsthemen priorisiert:

### **Wassermanagement-Untersuchungen auf der Einzugsgebietsskala**

Grundlage für die Durchführung von Wassermanagement-Untersuchungen auf der Einzugsgebietsskala ist eine zuverlässige Quantifizierung der Ressourcen und deren aktueller und zukünftiger Verfügbarkeit aus unterschiedlichen Quellen. Um diese zu bestimmen, müssen alle vorhandenen Daten und Informationen integriert werden, Datenlücken bewertet, Unsicherheiten in Regionen mit knappen Daten bestimmt und Feldmesskampagnen und Monitoring, inklusive der hochpräzisen Bestimmung der Wasserbilanzen, die den „safe yield“ eines Einzugsgebietes indizieren, durchgeführt werden. Zur Analyse der verfügbaren Wasserressourcen müssen natürliche wie künstliche Einträge (künstliche Grundwasseranreicherung, „rainwater harvesting“) in das Grundwasser, Wasserreservoirs und entsalztes Meerwasser berücksichtigt werden. In der circum-mediterranen Region existieren nur wenige qualitativ hochwertige Einzugsgebietsuntersuchungen, die als Grundlage zur quantitativen Bewertung der vorhandenen Wasserressourcen dienen können. Bislang hat keine der bisherigen Untersuchungen Prognosen der Wasserverfügbarkeit, unter Berücksichtigung detaillierter Klimaszenarien und der erwarteten zukünftigen Wassernachfrage, mit einem Zeithorizont von 50-100 Jahren erarbeitet. Mit einer Reihe repräsentativer Einzugsgebiete im mediterranen Raum könnte ein neuer, dynamischer Ansatz zur szenarienbasierten Langzeituntersuchung von Wassermanagement entwickelt, getestet und Richtlinien für die praktische

Implementierung entwickelt werden. Um verschiedene Prozesse und Dynamiken miteinander vergleichen zu können, sollten die Beobachtungsstandorte alle Aspekte menschlichen Einflusses aufweisen (z.B. urbane Gebiete, Landwirtschaft, Industrie, Erholungsgebiete). Zudem sollten sie ein Mündungsgebiet (Küste/See) einschließen und eine relevante Größe für den Einfluss des Managements haben (einige hundert m<sup>2</sup>). Es sollten hydrologische Aspekte (Wasserbilanzen, Ökologie/Wasserqualität, Klima etc.) untersucht werden und die Landnutzung, die Vulnerabilität gegenüber Einflüssen des Globalen Wandels sowie ökonomische Aspekte einbezogen werden. Da Karstaquifere im mediterranen Raum eine wichtige Grundwasserquelle darstellen, müsste ein besonderes Augenmerk auf die Untersuchung und Modellierung verkarsteter Grundwasserkörper gelegt werden. Diese sind aufgrund ihrer hohen Durchlässigkeit und geringen Speicherkapazität besonders empfindlich gegenüber Änderungen der Steuerungsfaktoren der Wasserbilanz wie übermäßige Grundwassernutzung und Klimawandel.

Die Untersuchungen sollten zudem mit langfristigen öffentlichen und privaten Infrastrukturplanungen gekoppelt werden, um aufzuzeigen, wie große Investitionsentscheidungen in diesen Gebieten optimiert werden können. Berücksichtigt werden müssen nicht nur die Süßwasserressourcen des circum-mediterranen Raums, sondern auch die Ökosystemdienstleistungen sowie die sozio-ökonomischen und klimatischen Entwicklungen, die großen Einfluss auf den ökonomischen Wohlstand in dieser Region haben (z.B. Fischerei und Tourismus). In Verbindung mit den Entwicklungen im Forschungsbereich 5 zur Modellentwicklung, könnten Testszenarien für reale Systeme in der vorgeschlagenen Benchmarking-Initiative an einem mediterranen Untersuchungsstandort durchgeführt werden. Dadurch könnte die Leistungsfähigkeit der Modelle hinsichtlich der realistischen Darstellung arider Bedingungen geprüft und gleichzeitig die Prognosen der Wasserverfügbarkeit im mediterranen Raum verbessert werden, um eine verlässliche Basis für die Entscheidungsunterstützung und das Management zu liefern.

Einige Schlüsselfragen, die in diesem Forschungsbereich bearbeitet werden sollen sind:

- Wie können die verfügbaren Wasserressourcen in semi-ariden und ariden Gebieten der circum-mediterranen Region präzise bestimmt werden (z.B. Techniken der Aquifer-Charakterisierung, Fernerkundung etc.) und wie kann deren Entwicklung in den kommenden 50-100 Jahren unter Verwendung innovativer Technologien und Managementstrategien vorhergesagt werden?
- Wie kann die Vorhersage der Entwicklung der verfügbaren Wasserressourcen zuverlässig getroffen werden unter Berücksichtigung der großen Unsicherheiten und der Unterschiedlichkeit der Vorhersagen der Klimamodelle für die mediterrane Region sowie der bestehenden Probleme hinsichtlich der Regionalisierung der Extremniederschlagsereignisse, die signifikant zum Gesamtniederschlag beitragen?
- Wie kann mit der bestehenden Datenknappheit umgegangen werden?
- Welche Konzepte eignen sich zum Umgang mit den bestehenden großskaligen Wasserquantitäts- und -qualitätsproblemen im mediterranen Raum (an Land) und im Mittelmeerbecken? Existieren kritische Schwellenwerte hinsichtlich der raumzeitlichen Ausdehnung temporärer Gewässer? Wie können Managementstrategien für die circum-mediterrane Region priorisiert werden?

- Wie kann ein nachhaltiger Wassermanagement-Ansatz in die Regionalplanung vor Ort integriert werden, die auf einer unendlichen Verfügbarkeit von Solarenergie basiert? Kann in dieser Region ein Ansatz jenseits des klassischen IWRM-Ansatzes angewendet werden, der das Management von Landschaften und Ressourcen integriert (siehe Forschungsbereich 2)?
- Ist die Entsalzung im großen Maßstab eine nachhaltige Alternative?
- Wie kann eine verlässliche Infrastrukturplanung und ein nachhaltiges Management von Wasserressourcen im mediterranen Raum als Ganzes, d.h. über nationale Grenzen hinweg, sichergestellt werden?
- Kann diese nordafrikanisch-südeuropäische Initiative zu einem Modell für ein kombiniertes, nachhaltiges Wasser- und Energiemanagement entwickelt werden?

### **Entwicklung innovativer Technologien zur Steigerung der Wassereffizienz**

Im Zusammenspiel mit Wassermanagement-Untersuchungen auf der Einzugsgebietsskala, muss die Wassernachfrage und seiner prognostizierten zukünftigen Entwicklung in den verschiedenen Wasser nutzenden Sektoren und das Potenzial für innovative Technologien spezifisch analysiert werden. Zu den Technologien zur Steigerung der Wassereffizienz gehören Technologien in den Bereichen Abwasserwiederverwertung, Grundwasseranreicherung, Rainwater Harvesting, Membrantechnologien für eine effiziente Wasserreinigung und/oder Entsalzung sowie effiziente Bewässerungstechnologien. Im Kontext der Abwasserwiederverwertung sollte der Fokus auf Wasserqualitätsaspekten liegen. Lösungen für Verluste im Wassernetz mit besonderer Berücksichtigung der ariden Bedingungen sollten untersucht werden. Hierbei sollten Verbesserungen für den landwirtschaftlichen Sektor erste Priorität haben, aber auch der industrielle und private Sektor berücksichtigt werden. In Zusammenarbeit mit Technologieentwicklern sollten regionenspezifische „Fahrpläne“ für den Einsatz der Technologien entwickelt werden. Letztere können anschließend als Grundlage für private und öffentliche Investitionsmaßnahmen im Bereich Forschung und Entwicklung dienen.

Folgende Forschungsfragen sind für die Nachfrage-Seite von besonderer Relevanz:

- Wie sieht die erwartete Entwicklung der Wassernachfrage basierend auf der ökonomischen und demografischen Entwicklung in einigen repräsentativen circum-mediterranen Einzugsgebieten aus?
- Wie kann die Zusammenarbeit von Wissenschaft, Wirtschaft und Entscheidungsträgern zu einer verlässlichen Lösung der Probleme der Wassereffizienz sowie der Wasserqualität in diesen Einzugsgebieten beitragen?

### **Regionenspezifische Instrumente für eine optimale Ressourcen-Allokation und -Verteilung**

In Zusammenhang mit den Untersuchungen zum Thema „Governance“, „Global Change“ und „IWRM“ (Themenbereiche 1 und 2) müssen für eine optimale Ressourcen-Allokation regionenspezifische Instrumente und Mechanismen entwickelt werden. Dazu gehören politische Instrumente, Konzepte für faire Wasserpreise sowie Capacity Development. Für den circum-mediterranen Raum ist die besondere Herausforderung die Implementierung eines IWRM-Ansatzes, der an die speziellen

Anforderungen (semi-) arider Gebiete angepasst ist und einen Fokus auf Grundwasserressourcen, Wassereinsparung und eine Auswahl effizienter und realistischer Empfehlungen für eine verbesserte Governance legt. Mit Blick auf die abnehmende Grundwasserneubildung müssen neue Wasserspeicherkonzepte und der Transport von virtuellem oder realem Wasser zwischen Einzugsgebieten in den Fokus rücken. Da die circum-mediterrane Region kulturell sehr divers ist, sind spezifische soziale und politische/institutionelle Untersuchungen notwendig, um eine Grundlage zu schaffen für die Auswahl adäquater Maßnahmen und Strategien für die Implementierung der Wassermanagementkonzepte. Dabei ist die Frage der Übertragbarkeit von Konzepten von einem mediterranen Gebiet auf ein anderes und die regionenspezifischen Hindernisse für die Implementierung nachhaltiger Wassermanagementpläne zu untersuchen.

Hinsichtlich des Wassermanagements und der Governance im circum-mediterranen Raum sind folgende Aspekte von besonderer Relevanz:

- Welche Voraussetzungen und regionenspezifischen Instrumente müssen vorhanden sein, um eine nachhaltige Wasserallokation im circum-mediterranen Raum zu gewährleisten?
- Welche realistischen Optionen existieren für das Management physischer Wasserknappheit in dieser Region?
- Welches sind die wesentlichen Hindernisse (z.B. divergierende Interessen) für die Anpassung und Überwindung der Wasserknappheit?

### **“Smart-Grid”- Vernetzung von Wasserversorgung und erneuerbarer Energieproduktion**

Aride Gebiete sind in der Regel sowohl durch reichliche Solareinstrahlung als auch limitierte Wasserressourcen gekennzeichnet. Vor allem die nordafrikanischen Länder haben die Chance, im Bereich der Energieversorgung durch die Produktion von Solarenergie Unabhängigkeit zu erreichen. Mehrere Projekte untersuchen derzeit die Potenziale für die MENA-Staaten (MENA: Middle East and North Africa) solar erzeugten Strom an die europäischen Nachbarn zu liefern (z.B. „Solar Ring“, „Desertec“, „TransGreen“). Die Einführung eines solchen Prozesses würde die Wirtschaft dieser Länder drastisch verändern und zu neuen Einkommensquellen führen sowie signifikante strukturelle Veränderungen hervorrufen. Um die Potenziale einer Vernetzung von Wasserversorgung und der Produktion erneuerbarer Energien zu untersuchen, sind Forschungsaktivitäten notwendig, die auch die zu erwartenden Langzeiteffekte prognostizieren können. Die erwartete langfristige Wasserverknappung sowie die steigenden Löhne durch wirtschaftliches Wachstum werden einen Umstieg von der wasserintensiven landwirtschaftlichen Massenproduktion auf eine Produktion der sogenannten „Cash Crops“ ermöglichen und erforderlich machen.

Eine erfolgreiche Umsetzung der solaren Energieproduktion in großem Umfang würde neue Möglichkeiten der an die Energieproduktion gekoppelten Nutzbarmachung sauberen Wassers durch Entsalzung und/oder Abwasserbehandlung eröffnen. Daher ist es erforderlich, Forschung zu den Möglichkeiten und Hindernissen der Umsetzung des Wasser-Energie-Nexus auf der großen Skala innerhalb eines integrierten mediterranen Wasser-Energie-Netzwerks mit einem Szenario für eine dezentrale Energieproduktion und Wasseraufbereitung zu ergänzen. Ein Vergleich zwischen einem gekoppelten „Smart Grid“ mit einer zentralen Energieproduktion und einer dezentralen Option wird die Vor- und Nachteile

beider Ansätze beleuchten. Auf dieser Basis kann ein kohärentes Konzept für ein gekoppeltes Wasser- und Energiemanagement für die circum-mediterrane Region entwickelt werden.

Hinsichtlich der Entwicklungsmöglichkeiten in diesem Bereich sollten folgende Forschungsfragen bearbeitet werden:

- Welches sind die notwendigen technischen, ökonomischen und institutionellen Voraussetzungen, um Kooperation und Handel sowie grenzüberschreitende Wasser- und Energieversorgung im gesamten mediterranen Raum zu ermöglichen?
- Welches sind die Vor- und Nachteile eines zentralisierten und eines dezentralen Ansatzes?
- Welche Schritte sind notwendig, um den beschriebenen Prozess zu initiieren und um das kritische Moment zu schaffen, um Vertreter der gesamten Region für die Umsetzung der Initiative zu gewinnen?
- Welche Schritte und welche praxistauglichen Konzepte müssen in Wissenschaft, Wirtschaft und öffentlichen Entscheidungsträgern verfolgt werden, um im circum-mediterranen Raum und den benachbarten Regionen eine nachhaltige Zukunft durch ein integriertes Wassermanagement, technischen Fortschritt und regionale Kooperation zu ermöglichen?

## Anhang

### Vorbereitungskomitee und beitragende Autoren des White Paper

#### Vorbereitungskomitee (beitragende Organisationen)

BfG:	Bundesanstalt für Gewässerkunde
BGR:	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
BMBF:	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU:	Bundesministerium für Umwelt, Reaktorsicherheit und Naturschutz
DFG-KOWA:	Deutsche Forschungsgemeinschaft – Senatskommission Wasser
FgHW:	Fachgemeinschaft Hydrologischer Wissenschaften
FH-DGG:	Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften
GWP:	German Water Partnership
IAH:	International Association of Hydrologists
IAHS:	International Association of Hydrological Sciences
IfW:	Institut für Weltwirtschaft
IGB:	Leibniz-Institut für Gewässerökologie und Binnenfischerei
IHP:	International Hydrological Programme
IWRM-Vernetzungsprojekt	
GWSP:	Global Water Systems Project
LMU:	Ludwigs-Maximilian-Universität München
NKGCF:	Nationalkomitee Global Change Forschung
UBA:	Umweltbundesamt
UFZ:	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung - UFZ
Universität Bonn	
Universität Tübingen	
UNU EHS:	United Nations University
TERENO:	Terrestrial Environmental Observatories
TU Dresden:	Technische Universität Dresden
ZWF:	Zentrum für Wasserforschung Freiburg

#### Beitragende Autoren (Entwurf und Überarbeitung des White Paper):

S. Altfelder (BGR), S. Attinger (UFZ), J. Barth (Universität Erlangen), A. Baum (DWA), L. Bernard (Technische Universität Dresden), D. Bley (DLR), J. Bogardi (GWSP/UNU-EHS), D. Borchardt (UFZ), W. Brack (UFZ), A. Bronstert (Universität Potsdam), J. Cullmann (IHP/IAHS), I. Dombrowsky (UFZ/DIE), R. Eggen (EAWAG), R. Enzenhöfer (DFG-KOWA), K.-H. Feger (TU Dresden), P. Grathwohl (Tübingen University), B. Hansjürgens (UFZ), M. Jekel (TU Berlin), M. Hein (UFZ), P. Heininger (BfG), T. Himmelsbach (BGR), C.v. Hirschhausen (TU Berlin), F. Holzwarth (BMU), Hutalle-Schmelzer, U. Irmer (UBA), T. Kalbacher (UFZ), B. Klauer (UFZ), G. Klein (DLR), G. Klepper (IfW), F. Kohmann (BfG), O. Kolditz (UFZ), W. Kraus (BMBF), P. Krebs (TU Dresden, GWP), E. Krüger (UFZ, Edt.), Ch. Leibundgut (ZWF, IAHS), M. Leidel (TU Dresden), G. Lischeid (ZALF), H. Löwe (BMBF), T. Lüders (HMGU), F. Makeschin (TU Dresden), W. Mauser (LMU München/GLOWA Danube Koordinator), R. Meckenstock (HMGU), R. Merz (TU Wien), S. Niemann (UFZ), G. Nützmann (IGB), c. Pahl-Wostl (Universität Osnabrück), S. Peiffer (Universität Bayreuth), G. Röstel (Stadtentwässerung Dresden, GWP), B. Rudolf (DWD), M. Sauter (Universität Göttingen), T. Schlurmann (Universität Hannover), F. Schmidt (IHDP), K. Schulz (LMU München), C. Schüth (TU Darmstadt), A. Schumann (RUB), C. Simmer (Universität Bonn), T. Stratenwerth (BMU), G. Teutsch (UFZ, Edt.), K. Tockner (IGB), H. Vereecken (FZJ), U. Weber (DFG-KOWA), M. Weiler (Universität Freiburg), U. Wollschläger (UFZ), S. Zacharias (UFZ)





Mit Unterstützung von::



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**DFG**