

# Wassersysteme im Wandel

Herausforderungen und Forschungsbedarfe  
für die deutsche Wasserforschung

Water Research Perspectives Commission

Juni 2021

## **Wassersysteme im Wandel**

Herausforderungen und Forschungsbedarfe für die deutsche Wasserforschung

### **Water Research Perspectives Commission**

Christian Bernhofer, Jürgen Geist, Mark O. Gessner, Thomas Himmelsbach,  
Florian Leese (Vorsitz), Oliver Olsson, Stefan Peiffer, Ursula Schließmann,  
Georg Teutsch, Markus Weiler, Christian Zwiener

### **Herausgeber**

Water Science Alliance e.V.  
[www.watersciencealliance.org](http://www.watersciencealliance.org)

### **Redaktion & Urheberschaft**

Florian Leese, Christian Bernhofer, Dietrich Borchardt, Axel Bronstert, Martina Flörke,  
Jürgen Geist, Mark O. Gessner, Thomas Himmelsbach, Peter Krebs, Oliver Olsson,  
Stefan Peiffer, Jochen Schanze, Ursula Schließmann, Jörg Seegert, Dörthe Tetzlaff,  
Georg Teutsch, Markus Weiler, Christian Zwiener

### **Lektorat**

Johannes Graupner

### **Gestaltung & Layout**

Jörg Strackbein  
ZWU - Zentrum für Wasser und Umweltforschung  
Universität Duisburg-Essen

### **Kontakt**

Florian Leese  
e: [florian.leese@uni-due.de](mailto:florian.leese@uni-due.de)  
t: +49.201.1834053  
Jörg Seegert  
e: [joerg.seegert@tu-dresden.de](mailto:joerg.seegert@tu-dresden.de)  
t: +49.351.463.35477

### **Bilder**

Titelbild von Johannes Plenio, [pexels.com](https://pexels.com)  
Die Urheberrechte der Abbildungen und Fotos liegen bei den Autorinnen und Autoren  
und/oder deren Institutionen oder sind mit den entsprechenden Rechten von  
[istockphoto.com](https://istockphoto.com) erworben.

1. Auflage  
Juni 2021  
© Water Science Alliance e.V.

DOI: [10.5281/zenodo.4923068](https://doi.org/10.5281/zenodo.4923068)

## Inhalt

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>1</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>1. Hintergrund und Zielstellung</b> .....	<b>5</b>
Die <i>Water Science Alliance</i> – Wasserforschungsallianz .....	5
Ein Rahmenpapier zu den Herausforderungen und Forschungsbedarfen der deutschen Wasserforschung .....	5
<b>2. Bedeutung von Wassersystemen – Wandel und gesellschaftliche Anforderungen</b> .....	<b>6</b>
Wassersysteme im Wandel .....	6
Gesellschaftliche Anforderungen .....	7
<b>3. Wasserforschung – Herausforderungen und Forschungsbedarfe</b> .....	<b>8</b>
3.1 Thematische Herausforderungen der Wasserforschung .....	10
i. Hydrologische Extreme – Gefahren abschätzen und resiliente Bewältigungsstrategien entwickeln .....	10
ii. Wasserqualität – Langfristig sicherstellen .....	12
iii. Biodiversität – Strukturen und Funktionalität erfassen, erhalten und wiederherstellen .....	15
iv. Wasserinfrastrukturen – Zukunftssicher gestalten und bewirtschaften .....	17
3.2 Herausforderungen für Wassersysteme der Zukunft .....	20
3.3 Methodische Herausforderungen der Wasserforschung .....	23
<b>4. Rahmenbedingungen der Wasserforschung</b> .....	<b>25</b>
<b>5. Ausblick</b> .....	<b>26</b>
<b>Danksagung</b> .....	<b>27</b>



## Zusammenfassung

Wasser und Gewässer sind unverzichtbare Lebensgrundlagen für Mensch und Natur. Sie liefern wichtige Ressourcen und stellen zugleich wertvolle Lebensräume dar. Schutz und Nutzung der Wassersysteme müssen deshalb im Sinne der Ziele einer nachhaltigen Entwicklung bestmöglich in Einklang gebracht werden.

Der Druck auf Wasserressourcen und aquatische Ökosysteme steigt kontinuierlich, in Deutschland ebenso wie weltweit. Dazu tragen die Landwirtschaft, die Industrie, Energie- und Wasserwirtschaft, Siedlung und Verkehr sowie Freizeit und Erholung bei. Der Klimawandel einschließlich häufiger auftretenden und intensiveren Extremereignissen wie Dürren und Starkniederschläge verschärft die Situation. Wasser wird für Menschen und Ökosysteme knapp oder gerät bei extremem Niederschlag außer Kontrolle. Vermehrte Schäden an Infrastrukturen, erhöhte Wasserverschmutzung und degradierte Ökosysteme mit eingeschränkter Funktionalität sind die Folge.

In der Wasser- und Gewässerpolitik ergeben sich daraus schwerwiegende und komplexe Zielkonflikte zwischen Schutz und Nutzung, die sich im praktischen Wasser- und Gewässermanagement fortsetzen. Diese Situation erfordert neue Erkenntnisse und Lösungsansätze. Für tragfähige Vorsorge- und Anpassungsstrategien ist angesichts der vielschichtigen Aufgabe und der sich rasch ändernden Rahmenbedingungen ein umfassendes Verständnis der Wassersysteme unabdingbar. Von den einzelnen hydrologischen, ökologischen und technischen Prozessen müssen sich die Themen über die Zusammenhänge und Dynamik ganzer Systeme bis zu den ökonomischen, sozialen und politischen Belangen erstrecken. Diese Breite stellt die Wasserforschung vor eine zusätzliche Herausforderung.

Die *Water Science Alliance* (Wasserforschungsallianz) hat sich deshalb zum Ziel gesetzt, durch die Verknüpfung grundlegender wissenschaftlicher Erkenntnisse mit konkreten Lösungsansätzen maßgeblich zu einer evidenzbasierten Wasser- und Gewässerpolitik sowie zu einem nachhaltigen Wasser- und Gewässermanagement beizutragen – in Deutschland, Europa und weltweit. Das vorliegende Rahmenpapier benennt dazu vier zentrale thematische Herausforderungen:

1. Hydrologische Extreme – nachhaltige Anpassungsoptionen zur Bewältigung immer häufiger und intensiver werdender Hitze-, Dürre- und Starkregenereignisse entwickeln
2. Wasserqualität – die Qualität von Wasserressourcen und Gewässern unter zunehmenden Nutzungsansprüchen dauerhaft sicherstellen
3. Biodiversität – die für eine multifunktionale Gewässerbiodiversität nötigen ökologischen Strukturen und Prozesse erhalten und wiederherstellen
4. Wasserinfrastrukturen – Wasserinfrastruktur anpassen und ihre vernetzte Bewirtschaftung optimieren, um ihre langfristige Leistungsfähigkeit sicherzustellen

Diese thematischen Herausforderungen werden darüber hinaus in einem Systemzusammenhang betrachtet, um den Forschungs- und Handlungsbedarf abzuleiten, der sich aus einer ganzheitlichen Perspektive ergibt. Neben einem verbesserten wissenschaftlichen Verständnis der komplexen Wirkungsbeziehungen und emergenten Systemeigenschaften geht es dabei insbesondere um das grundlegende Verständnis der Anforderungen an eine integrierte Bewirtschaftung von Wassersystemen.

Eine häufige Herausforderung stellt vor allem die Erhebung, Mobilisierung, Bereitstellung und integrative Nutzung umfassender wasser- und gewässerrelevanter Daten sowie die Entwicklung von Simulationsmodellen für Veränderungsprozesse und ihre gesellschaftlichen Auswirkungen dar. Multi-, inter- und transdisziplinäre Kooperationen in Forschung und Wasserwirtschaft sind dabei unverzichtbar. Dies schließt die Bündelung natur-, ingenieur- und sozialwissenschaftlicher Erkenntnisse und Methoden ein. Vernetzung zwischen universitärer und außeruniversitärer Forschung ist ebenso erforderlich wie der systematische Dialog zwischen Wissenschaft, Fachbehörden, Verbänden und weiterer gesellschaftlicher Akteursgruppen einschließlich der Politik. Auf die methodischen Herausforderungen und Forschungsbedarfe, welche die an integrativen Untersuchungen von Wassersystemen beteiligten Disziplinen teilen, wird in einem besonderen Abschnitt eingegangen, ebenso wie auf die Herausforderungen der inter- und transdisziplinären Zusammenarbeit und des Wissenstransfers zu verschiedenen gesellschaftlichen Zielgruppen.

Das vorliegende Rahmenpapier bietet einen Überblick über die aktuellen und zukünftigen Herausforderungen und Forschungsbedarfe. Der Schwerpunkt liegt dabei auf Deutschland, mit Vorschlägen, wie die Rahmenbedingungen für die Wasserforschung verbessert werden können.

Aufbauend auf diesem Rahmen werden in Zukunft sogenannte „Wasserstandpunkte“ ausgewählte Themen vertiefen. Dabei handelt es sich um Positionspapiere aus der Wissenschaft zu aktuellen Forschungs- und Praxisfragen, die Grundlagen für vertiefte Diskussionen liefern. Hierzu lädt die *Water Science Alliance* die gesamte Gemeinschaft der deutschen Wasserforschung ein, ihre Kompetenzen zu bündeln, um gemeinsam Antworten auf die drängendsten Wasserfragen zu finden, die sich auf nationaler, aber auch auf europäischer und globaler Ebene stellen.

## Summary

Water and water bodies are vital for people and nature. They provide both important resources and valuable habitats for life. The conservation and use of water systems must hence be reconciled to ensure the best possible path to sustainable development.

Pressure on water resources and aquatic ecosystems increases continuously both in Germany and worldwide. Agriculture, industries, the energy and water economy, settlements and traffic, as well as recreation contribute to this development. Climate change, including increases in the frequency and severity of extreme events such as droughts and intense precipitation, exacerbates the situation. Water is becoming scarce for people and ecosystems or is getting out of control during extreme rainfall. Increased damage to infrastructure, water pollution and degraded ecosystems limited in their functionality ensue.

Water policy must cope with conflicting goals of water resource use and conservation. The resulting conflicts are serious and complex, and have evident repercussions for practical water management, calling for new approaches to solve the pressing issues. In view of the complex task and rapidly changing framework conditions, a comprehensive understanding of water systems is imperative to implementing viable prevention and adaptation strategies. The topics to consider must range from individual hydrological, ecological and technical processes to system interrelationships and dynamics, and to economic, social and political issues. This breadth is a challenge for water research.

Accordingly, the German *Water Science Alliance* aspires to link fundamental scientific insights across disciplines to practical solutions of water issues with a view to promote evidence-based water policy supporting sustainable water resource and ecosystem management – in Germany, Europe and worldwide. The present framework paper identifies four central thematic challenges along these lines:

1. Hydrological extremes - developing sustainable adaptation options to cope with increasingly frequent and intense heat, drought and heavy rainfall events
2. Water quality - ensuring a lasting high quality of water resources and aquatic ecosystems that are subject to increasing user demands
3. Biodiversity - preserving and restoring ecological structures and processes to maintain and restore a multifunctional aquatic biodiversity
4. Water infrastructures - adapting water infrastructures and optimizing management networks to ensure the long-term performance of water systems.

These four thematic challenges are embedded in a whole-systems context to derive insights into water research and management needs that go beyond the individual themes. In addition to the goal of fostering scientific understanding of the complex interrelationships and emergent system properties, this framework paper focuses on the requirements of integrated water resource and aquatic ecosystem management.

There is a particular need for investigations into the collation, mobilization, provision and integrative use of comprehensive data on water systems, as well as for developing simulation models capturing changes in water systems and their societal repercussions. This critically involves multi-, inter- and transdisciplinary cooperation in research and water management, and the blending of knowledge and methods from science, engineering and social science. Networking between university and non-university research institutions is necessary, just as a systematic dialogue between the scientific community, authorities, associations, and other stakeholders, including policy makers. The methodological challenges shared by the complementary disciplines contributing to integrative water systems research are addressed in a separate section, as are the challenges of inter- and transdisciplinary cooperation and the transfer of knowledge to diverse target groups in society.

The present framework paper provides an overview of the challenges and current and future research needs relating to water. Emphasis is on Germany, including suggestions on how the framework conditions for water research can be improved.

Future so-called „*Water Views*“ will build on this framework to elaborate on selected topics. These position papers written by members of the water science community will address topical water research and management issues to serve as a basis for in-depth discussions. To this end, the *Water Science Alliance* invites all representatives of the German water research community to join competencies in order to provide answers to the most urgent water issues emerging at the national level, but also at the European and global scale.



## 1. Hintergrund und Zielstellung

### Die Water Science Alliance – Wasserforschungsallianz

Die Wasserforschung in Deutschland ist kleinteilig strukturiert. In mehr als zehn Fachdisziplinen wird an 150 Einrichtungen in über 450 Arbeitsgruppen zum Thema Wasser geforscht. Darüber hinaus vertreten ein Dutzend Fachgesellschaften ihre spezifischen Interessen. Die primäre Aufgabe der *Water Science Alliance*\* ist es, Synergien zwischen Universitäten und außeruniversitären Forschungsinstituten einschließlich Ressortforschungseinrichtungen, Behörden des Bundes und der Länder sowie Fachgesellschaften und Verbänden zu identifizieren und zu fördern sowie die Potenziale für Interaktionen zu erschließen, um gemeinsame Ziele zu erreichen. Somit versteht sich die *Water Science Alliance* als eine Initiative zur Stärkung und Integration der Wasserforschung in Deutschland. Der Fokus liegt auf der Verbesserung ihrer Leistungsfähigkeit durch Vernetzung und Erhöhung ihrer nationalen und internationalen Sichtbarkeit. Ihr Anspruch ist dabei, Disziplinen übergreifende Themen gemeinsam mit allen relevanten Akteur:innen zu entwickeln, ohne zu den Fachgesellschaften in Konkurrenz zu treten, um als gemeinsames Sprachrohr und Ansprechpartner gleichermaßen für politische Entscheidungsträger:innen und Forschungsförderinstitutionen zu fungieren.

Die *Water Science Alliance* ist seit 2013 als gemeinnütziger Verein organisiert. In der Tradition der DFG-Senatskommission für Wasserforschung (KoWa) hat sie die *Water Research Perspectives Commission* (WRPC) als fachliches Beratungsorgan gegründet. Die von den Mitgliedern des Vereins gewählte Kommission soll als offenes Forum drängende gesellschaftliche und aktuelle wissenschaftliche Herausforderungen über disziplinäre Grenzen hinweg identifizieren und mit den relevanten Beteiligten gemeinsame Forschungsbedarfe und Umsetzungsstrategien ableiten und kommunizieren.

### Ein Rahmenpapier zu den Herausforderungen der deutschen Wasserforschung

Ausgehend von der DFG-Denkschrift zur Wasserforschung\*<sup>1</sup>, in der explizit grundlagen- und anwendungsbezogene Forschungsfragen ausgearbeitet wurden, sowie dem *White Paper* der *Water Science Alliance*\*<sup>2</sup> mit seinen über 100 drängenden Forschungsfragen, werden im vorliegenden Rahmenpapier die aktuell dringendsten wissenschaftlichen Herausforderungen für die deutsche Wasserforschungsgemeinschaft sowie deren politische Entscheidungsträger und Forschungsförderer präsentiert. Die Auswahl der Herausforderungen erfolgte auf der Grundlage der gesellschaftlichen Relevanz sowie des Forschungs- und Innovationsbedarfs.

Der Fokus des Rahmenpapiers liegt auf nationaler und europäischer Ebene, während der globale Kontext stets mitberücksichtigt wird (z.B. *UN Sustainable Development Goals*, *Sendai Framework*\*<sup>3,4</sup>, *World Water Development Report*\*<sup>5</sup>). Dementsprechend sind maßgebliche nationale und europäische Strategiepaper einbezogen worden, wie bspw. die deutsche und europäische Klimaanpassungsstrategien\*<sup>6,7</sup>, der europäische *Green Deal*\*<sup>8</sup>, die Chemikalienstrategie\*<sup>9</sup>, die deutsche\*<sup>10</sup> und europäische Biodiversitätsstrategie\*<sup>11</sup>, die europäische Partnerschaft „*WATER4ALL*“\*<sup>12</sup> und die zugehörige strategische Forschungs- und Innovationsagenda (SRIA), die *Destination Earth Initiative*\*<sup>13</sup> usw.

[www.watersciencealliance.org](http://www.watersciencealliance.org)



<sup>1</sup> DFG (2003): Wasserforschung im Spannungsfeld zwischen Gegenwartsbewältigung und Zukunftssicherung, Denkschrift Senatskommission für Wasserforschung. WILEY-VCH Verlag, Weinheim 175 S.

<sup>2</sup> Water Science Alliance (2011): White Paper – Prioritäre Forschungsbereiche (Redaktion Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ), Leipzig, 44 S.

<sup>3</sup> UN (2015): Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development

<sup>4</sup> UN (2015): Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030

<sup>5</sup> United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change

<sup>6</sup> Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel. Vom Bundeskabinett am 17.12.2008 beschlossen

<sup>7</sup> Ein Klimaresilientes Europa aufbauen – die neue EU-Strategie für die Anpassung an den Klimawandel. COM(2021) 82 final

<sup>8</sup> Der europäische Green Deal. COM(2019) 640 final

<sup>9</sup> Chemikalienstrategie für Nachhaltigkeit für eine schadstofffreie Umwelt. COM(2020) 667 final

<sup>10</sup> Der Nationale Wasserdiallog <https://www.bmu.de/wasserdiallog/>

<sup>11</sup> EU-Biodiversitätsstrategie für 2030. COM(2020) 380 final

<sup>12</sup> European Partnership under Horizon Europe (2020): Water4All - Water Security for the Planet. 78 S.

<sup>13</sup> Shaping Europe's digital future: <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/destination-earth>



## 2. Bedeutung von Wassersystemen – Wandel und gesellschaftliche Anforderungen

### Wassersysteme im Wandel

Der Kreislauf des Wassers ist der bei weitem größte Stoffkreislauf in unserer Umwelt. Er ist über die marinen und atmosphärischen Zirkulationssysteme unverzichtbarer Verteiler von Energie und Stoffen im globalen Klimasystem. Wasserdampf sorgt seit Jahrmilliarden für annähernd gleichbleibende Temperaturen bzw. dafür, dass die Erde kein „kosmischer Schneeball“ ist, sondern der größte Teil des Wassers in flüssiger Form vorliegt – als nahezu universelles Lösungs- und Transportmittel. Damit ist Wasser essenzielle Voraussetzung für Leben und Zivilisation.

Als Trinkwasser ist Wasser für den Menschen das wichtigste Lebensmittel. Zudem wird es intensiv zur Nahrungsmittelproduktion genutzt. Heute werden zwischen ca. 20 % (in Europa) und über 90 % (in Südostasien) des Wassers, das dem natürlichen Kreislauf entnommen wird, für die Bewässerung in der Landwirtschaft eingesetzt\*. Darüber hinaus dient Wasser als Transportmedium – sei es für die Entsorgung von Abwässern aus Haushalten, Städten und Industrie, als Prozessmittel in der industriellen Produktion, zur Umwandlung von Energie, als Kühlmittel oder für den Transport von Gütern. Seine Bedeutung erschöpft sich indes nicht in seiner Rolle als Ressource. Wasser schafft die Grundlage für vielfältige Ökosysteme, die Voraussetzung für weitere Funktionen und Leistungen von Gewässern sind – wie Selbstreinigung, Recycling von Nährstoffen oder auch für den Tourismus und die Erholung.

Neben dem projizierten Anstieg des Meeresspiegels wird der Klimawandel zudem Auswirkungen auf die regionale Wasserverfügbarkeit und die Gewässergüte haben, auch in Europa. Bei generell steigenden Temperaturen mit einem wahrscheinlich katastrophalen Ausmaß in der Arktis werden die jährlichen Niederschläge im Mittel in Nordeuropa zu- und in Südeuropa abnehmen. Jahreszeitlich werden insbesondere für den Winter steigende Niederschläge für Mittel- und Nordeuropa projiziert, während in vielen Teilen Europas trockenere Sommer erwartet werden\*. Allgemein wird von häufigerem Starkregen ausgegangen. Im Winter nehmen Eis- und Frosttage weiter ab. Hitzewellen werden häufiger, intensiver und länger. Vor allem der Süden Europas wird durch häufigere und anhaltende Dürreperioden betroffen sein, in deren Folge besonders in mediterranen Regionen Wüstenbildung, Wasserknappheit und Waldbrände zunehmen werden.

Auch für landwirtschaftliche Regionen Deutschlands wird davon ausgegangen, dass durch die zunehmende Häufigkeit langanhaltender Trockenperioden eine Umstellung auf eine Bewässerungslandwirtschaft erforderlich sein wird. In manchen Gebieten wird dadurch eine nie dagewesene Nutzungskonkurrenz zur Trinkwasserversorgung erwachsen. Andererseits werden Starkregen, intensive Sturzfluten, Erosion und Muren häufiger auftreten. In urbanen Entwässerungssystemen können Starkregen lokale Überflutungen verursachen, die kurzzeitig Leben und Sachwerte bedrohen, sowie Spülstöße induzieren, die zu ausgeprägten Konzentrationsspitzen von Schadstoffen im Gewässer führen und dadurch Ökosysteme sowie deren Leistungen (Ökosystemleistungen) beeinträchtigen.

AQUASTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) Global Information System on Water and Agriculture. <http://www.fao.org/aquastat/en/>



European Environment Agency Report No 1/2017. Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report, 419 S.



Der teilweise drastische Wandel der Landnutzung, u.a. durch den großflächigen Anbau von Energiepflanzen, und die anhaltende Urbanisierung sind weitere Veränderungen, die unmittelbare Folgen für die Wasserquantität und -qualität sowie aquatische Ökosysteme haben und verschiedene gesellschaftliche Bereiche bzw. Sektoren wie Energie, Ernährung und Gesundheit betreffen. Jahrzehntelange (Über-)Düngung in der Landwirtschaft führt in Deutschland und anderswo in Europa stellenweise zu hohen Nitratkonzentrationen im Grundwasser. Gleichzeitig nimmt weltweit die Vielfalt an Produkten und der Einsatz neuartiger Chemikalien zu, die in die Umwelt freigesetzt oder dort erst gebildet werden – mit häufig unbekanntem und potenziell schädlichen Auswirkungen. Die veränderte Wasserverfügbarkeit wirkt sich auch auf unsere Waldökosysteme massiv aus. In Trocken- und Hitzezeiten werden Wälder von CO<sub>2</sub>-Senken zu CO<sub>2</sub>-Quellen und beeinflussen so die globale Erwärmung. Global ist diese Senkenfunktion der Wälder vor allem durch Umwandlung in landwirtschaftliche Nutzflächen, aber auch durch geringere Resilienz gegenüber Wetterextremen und eine damit verbundene Zunahme von Störungen im Zusammenhang mit zunehmender Trockenheit und Grundwasserabsenkungen bedroht. Bestrebungen der großflächigen Aufforstung zur Erhöhung der Absorption von CO<sub>2</sub> aus der Luft werden vielerorts von der Wasserverfügbarkeit und -bewirtschaftung abhängen und können terrestrische und aquatische Ökosysteme zusätzlich beeinflussen.

### Gesellschaftliche Anforderungen

Durch seine vielfältigen Funktionen führt die Nutzung von Wasser zu Konflikten zwischen konkurrierenden Anforderungen\* durch Landwirtschaft, Industrie, Energiewirtschaft, Wasserver- und Abwasserentsorgung, Siedlungen, gebiets- und ebenübergreifenden Interessen sowie der Einhaltung nationaler und internationaler rechtlicher Regelungen und Abkommen. Gleichzeitig führen die sich verschärfenden Randbedingungen zu weiter steigendem Nutzungsdruck. Durch den Klimawandel, das Bevölkerungswachstum, die spezifischen Bedarfe von Haushalten und Industrie, die intensive Bewässerung in der Landwirtschaft sowie die zunehmende Verschmutzung und Eutrophierung der Gewässer wächst zugleich der Druck auf die Süßwasservorräte (Abb. 1 links). Dadurch verschärft sich das inhärente Konfliktpotenzial. 2050 werden voraussichtlich mindestens neun Milliarden Menschen auf der Erde leben und der Bedarf an Nahrungsmitteln wird im Vergleich zu den 2010er Jahren um 70 % steigen\*. Entsprechend sind letztlich alle Menschen von den Nutzungskonflikten betroffen.

Auf globaler Ebene finden sich in vielen von den 17 durch die Vereinten Nationen definierten Nachhaltigkeitszielen (*Sustainable Development Goals* – SDGs) solche, die explizit die Ressource Wasser adressieren. Vorrangig zu nennen ist hier SDG 6 (sauberes Wasser und sanitäre Einrichtungen), aber auch Ziele, die nur mit entsprechender Wassermenge und -qualität zu erreichen sind, wie beispielsweise die Ernährungssicherheit (SDG 2), nachhaltige und resiliente Städte (SDG 11) oder der Erhalt der Biodiversität (SDGs 14-15).

Die SDGs sind als gesellschaftliche Zielvorstellungen (kein Hunger; sauberes Wasser und sanitäre Einrichtungen; keine Armut u.w.) Ausdruck einer Vision, wie die Weltgemeinschaft mit Blick auf das Jahr 2030 und darüber hinaus leben will (Abb. 1 rechts). Diese Vision setzt allerdings eine umfassende gesellschaftliche Transformation voraus.



World Economic Forum:  
The Global Risks Report 2021.  
Geneva, 96 S.



World Resources Institute (2018):  
How to Sustainably Feed 10  
Billion People by 2050? [https://  
www.wri.org/insights/how-sus-  
tainably-feed-10-billion-people-  
2050-21-charts](https://www.wri.org/insights/how-sustainably-feed-10-billion-people-2050-21-charts)





Positionspapier des GRoW-Projekts zu SDG6: Strengthening the evidence base for the SDG process, June 2018.

Wie die Nachhaltigkeitsziele tatsächlich erreicht werden können und welche Anpassungen natürlicher und technischer Systeme dafür notwendig sind, ist wesentlich schwerer zu beantworten\* – zumal der relative Einfluss der dargestellten Triebkräfte und Nutzungen sowie die Charakterisierung der sich daraus ergebenden Wandelprozesse erhebliche Unsicherheiten aufweisen. Dieses Spannungsfeld bildet den Rahmen für die zentralen Herausforderungen der Wasserforschung.

### 3. Wasserforschung – Herausforderungen und Forschungsbedarfe

Angesichts der sozialen, ökonomischen und ökologischen Bedeutung von Wasser und Gewässern sowie den komplexen Abhängigkeiten, Rückkopplungen und Nutzungskonflikten ist die Wissenschaft in ihrer interdisziplinären Vielfalt mit ihren entsprechenden Kompetenzen gefordert, einen Beitrag zur Zukunftssicherung von Wasser- und Gewässersystemen zu leisten („WATER4ALL“). Hierzu sind inter- und transdisziplinäre Ansätze notwendig, die auf einem detaillierten Prozess- und Systemverständnis beruhen müssen. Diese Herangehensweise hat das höchste Potenzial, um die Prozesse des Wasserkreislaufs in unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen und in den Wechselwirkungen mit der Atmo-, Bio- und Pedosphäre hinreichend zu verstehen, damit daraus konkrete Handlungs- und Lösungsoptionen für ein nachhaltiges Management abgeleitet werden können. Da hierzu nicht nur kurzfristige Veränderungen betrachtet, sondern auch langfristige Entwicklungen einbezogen werden müssen, sind das Erkennen, die Analyse und die Berücksichtigung von Dynamiken und komplexen Rückkopplungen in den Wirkungszusammenhängen essenziell.

Dieses Rahmenpapier empfiehlt dabei anstelle der bisher verbreiteten mono- und multikausalen Untersuchungen, wie beispielsweise bei der Abschätzung einzelner Klimawandelfolgen, stärker die Belastbarkeiten von Wassersystemen aus einer ganzheitlichen Perspektive zu adressieren („Stresstests“). Demzufolge besteht der Bedarf, die kurz-, mittel- und langfristigen Dynamiken mit geeigneten Konzepten und Methoden multiperspektivisch und damit realistischer abzubilden sowie die Unsicherheiten in Daten und Modellen zu bestimmen. Durch das integrierende Vorgehen unter einer adäquaten Einbeziehung der zeitlichen Dynamiken sollen irreversible negative Entwicklungen („Kippunkte“) frühzeitig erkannt und Lösungen für die Vermeidung deren Überschreitung entwickelt werden. Dabei soll explizit nicht zwischen Grundlagen- und angewandter Forschung unterschieden werden, da beide komplementäre Beiträge leisten, um gesellschaftlich relevante Ergebnisse zu erzielen. Vor diesem Hintergrund werden in diesem Rahmenpapier die folgenden vier zentralen thematischen Herausforderungen und die damit verbundenen Forschungsbedarfe diskutiert (siehe Abschnitt 3.1):



- i. Hydrologische Extreme – nachhaltige Anpassungsoptionen zur Bewältigung immer häufiger und intensiver werdender Hitze-, Dürre- und Starkregenereignisse entwickeln
- ii. Wasserqualität – die Qualität von Wasserressourcen und Gewässern unter zunehmenden Nutzungsansprüchen dauerhaft sicherstellen
- iii. Biodiversität – die für eine multifunktionale Gewässerbiodiversität nötigen ökologischen Strukturen und Prozesse erhalten und wiederherstellen
- iv. Wasserinfrastrukturen – Wasserinfrastruktur anpassen und ihre vernetzte Bewirtschaftung optimieren, um ihre langfristige Leistungsfähigkeit sicherzustellen

Diese thematischen Herausforderungen werden anschließend in einen Systemzusammenhang gestellt und daraus der Forschungs- und Handlungsbedarf abgeleitet, der sich aus einer ganzheitlichen Perspektive ergänzend ergibt. Neben einem verbesserten wissenschaftlichen Verständnis der komplexen Wirkungsbeziehungen und emergenten Systemeigenschaften geht es dabei insbesondere auch um die Anforderungen einer integrierten, nachhaltigen Bewirtschaftung von Wassersystemen (siehe Abschnitt 3.2). Des Weiteren werden methodische Herausforderungen identifiziert, welche die alle beteiligten Disziplinen sowie die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei integrativen Untersuchungen von Wassersystemen mit deren Dynamiken in ähnlicher Weise betreffen (siehe Abschnitt 3.3).

Vor dem Hintergrund der Triebkräfte des Wandels von Wassersystemen einerseits und den gesellschaftlichen Zielvorstellungen (u.a. „WATER4ALL“) andererseits adressiert das vorliegende Rahmenpapier thematische, systemische sowie methodische Herausforderungen und Forschungsbedarfe der deutschen Wasserforschung bis zu den Ergebnissen und Produkten für den Wissenstransfer (Abb. 1). Angesichts der komplexen Abhängigkeiten, Rückkopplungen und Nutzungskonflikte ist die Wissenschaft in ihrer interdisziplinären Vielfalt mit ihren entsprechenden Kompetenzen gefordert, einen Beitrag zur Zukunftssicherung von Wassersystemen zu leisten. Dies gilt sowohl für die erforderliche Forschung zur Umsetzung gesellschaftlicher Zielvorstellungen als auch für die Entwicklung konkreter Lösungsstrategien unter den sich verändernden Randbedingungen.



**Abb. 1:** Übersicht der thematischen, systemischen und methodischen Herausforderungen für die deutsche Wasserforschung im Hinblick auf den Wandel von Wassersystemen und die Erreichung der gesellschaftlichen Ziele mit den diesbezüglichen Forschungsbedarfen bis zum Wissenstransfer.



### 3.1 Thematische Herausforderungen der Wasserforschung

#### i. Hydrologische Extreme – Gefahren abschätzen und resiliente Bewältigungsstrategien entwickeln

Vor dem Hintergrund der oben beschriebenen Wandelprozesse ist die generelle Verfügbarkeit von Oberflächen- und Grundwasser in vielen Regionen der Welt gefährdet. Auch in Deutschland und Mitteleuropa ist sie keineswegs garantiert. Aufgrund des Klimawandels nehmen in vielen Regionen die hydrologischen Extreme wie Hoch- oder Niedrigwasser, Starkregen oder Dürren zu und ihre Eigenschaften verändern sich (z.B. Intensität, Dauer). Auch können Veränderungen in der allgemeinen Zirkulation der Atmosphäre und Rückkopplungen mit der Landoberfläche dazu führen, dass es immer wieder Perioden geben wird, in denen hydrologische Extreme häufiger auftreten werden.

Viele Klimaprojektionen für Mitteleuropa erwarten für die nächsten Jahrzehnte eine Zunahme von Trockenperioden, v.a. für die Sommermonate. Solche Extremereignisse stellen Land- und Forstwirtschaft, Wasserversorgung, Energie- und Transportsektor, sowie Siedlungen vor große Herausforderungen. Die Trockenheit in den Jahren 2018 bis 2020 hat dies besonders eindrücklich gezeigt, mit großen wirtschaftlichen Folgen für viele Sektoren in Europa (z.B. massive Verluste der Industrie durch geringere Transportkapazität auf den Flüssen, verringerte Kühlwasserentnahme und -zufuhr für den Energiesektor, Ertragsausfälle in der Landwirtschaft und Schadholz in den Wäldern).

Aber auch die zu erwartende Zunahme von Starkregen wird die heutigen Gefährdungen durch Sturzfluten, Erosion, Massenbewegungen oder urbane Spülstöße verschärfen\*. Die Kosten für die Beseitigung von Schäden, die durch Starkregen und Sturzfluten verursacht wurden, sind besonders in den letzten Jahren deutlich gestiegen. Gleichzeitig haben sich das Verständnis und die Risikovorsorge bezogen auf die regionale Gefährdung durch Flusshochwasser u.a. durch die Koordination der Hochwasservorhersage verbessert; trotzdem besteht in vielen Bereichen noch Forschungsbedarf insbesondere in der Optimierung von Maßnahmen zur Risikoreduktion.

Die in den letzten Jahren in ganz Europa geherrschte Hitze- und Dürrewelle und die gleichzeitig lokal aufgetretenen Sturzfluten und ihre ökologischen und ökonomischen Auswirkungen zeigten die Notwendigkeit eines systemischen, integrierten Ansatzes in der Wasserforschung. Es ist notwendig, die integrierte Modellierung von Klima, Land und Wasserhaushalt in ihrer räumlichen und zeitlichen Auflösung zu verbessern, um bessere kurzfristige Prognosen und langfristige Projektionen von Dürren und Starkregen zu erhalten. Besonders die Interaktion verschiedener Räume und Systeme mit sehr unterschiedlicher hydrologischer Charakteristik und unterschiedlichen Nutzungsmustern (urbane vs. ländliche Gebiete, Flachland vs. Gebirge, Oberflächengewässer vs. Grundwasser) muss besser verstanden und in Modellierungen integriert werden. Das gilt für urbane Räume, die aufgrund der komplexen Strukturen und Veränderungen der Stadtentwässerung erheblich gefährdet sind, wie für ländliche Gebiete, wo unter anderem Sedimentfrachten zunehmende Probleme verursachen und der Bewässerungsbedarf für die landwirtschaftliche Nutzung zunimmt.

Gebirge sind einerseits von den projizierten Klimaveränderungen sehr stark betroffen, andererseits können sie bei Hoch- und Niedrigwasser eine wirkungsverstärkende oder -lindernde Rolle übernehmen und stellen Ausweichgebiete für



United Nations World Water  
Development Report 2020:  
Water and Climate Change



zahlreiche klimasensitive Sektoren dar\*. In diesen Regionen können durch hydrologische Extreme häufig weitere Naturgefahren wie Bergstürze, Erosionen, Lawinen oder Muren ausgelöst werden. Auch langsame, über Jahrzehnte stattfindende Veränderungen der Gletscher und des Permafrostes und deren direkte und indirekte Auswirkungen können zurzeit entweder nur ungenau oder kaum abgeschätzt werden.

Bei Dürren wird häufig auf Grundwasser als Puffer oder Speichermedium hingewiesen. Diese Pufferwirkung durch Grundwassersysteme ist mittelfristig jedoch auch von den Extremereignissen betroffen und ihre mittel- bis langfristige Resilienz gegen erhöhte bzw. überhöhte Jahresnutzungen ist hinsichtlich regional und lokal verfügbarer Grundwassermenge und -qualität nicht ausreichend untersucht.

Aufgrund des Zusammenwirkens all dieser Faktoren ist noch nicht hinreichend verstanden, warum unterschiedliche Einzugsgebiete oder Regionen unterschiedlich sensitiv auf Extreme reagieren, welche Faktoren den größten Einfluss haben und wo mögliche „Kippunkte“ liegen. Kippen Systeme durch die veränderten klimatischen Bedingungen, die veränderten Landnutzungen, die Urbanisierung aber auch durch veränderte Wassernutzung in den Einzugsgebieten, ist ein Zurückkehren zur Ausgangslage nicht mehr möglich. Gleichzeitig müssen hydrologische Bemessungsansätze (z.B. HQ 100), die auf der statistischen Analyse historischer Daten basieren, für die Zukunft neu entworfen werden. Dabei muss auch die Flexibilisierung heutiger Regelungen überprüft werden (z.B. Mindestwasserabgaben bei Talsperren).

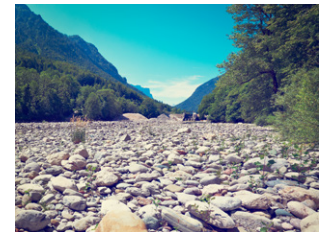
Neben der bereits beschriebenen Herausforderung hydrologische Extreme (Starkregen, Hochwasser oder Dürren) vorherzusagen, sind die Verbesserung heutiger Prognosewerkzeuge durch die Kombination verbesserter Prozessforschung, die Quantifizierung und die Reduzierung der Vorhersage-Unsicherheiten, die Kopplung mit Modellen aus Nachbardisziplinen (z.B. Meteorologie, Ökologie) und die Entwicklung innovativer Analyse- und Planungswerkzeuge für das integrierte Management wichtige Ziele zukünftiger Forschung. Ferner besteht erheblicher Forschungsbedarf zur Erlangung eines besseren Verständnisses für die Wechselwirkungen von extremen Ereignissen im Kontext voranschreitender Erwärmungstrends und Stofftransportprozessen (z.B. *First Flush-Effekte* nach Trockenphasen, Stoffaustrag und Verbleib von Stoffen bei Hochwasser in aquatischen Systemen), Geschiebetransport, Auendynamik sowie deren Auswirkungen auf die hyporheische Zone und das Grundwasser.

Robuste Modellsysteme unter Beteiligung verschiedener Disziplinen in Verbindung mit innovativen *Data-Science*-Methoden zur mehrdimensionalen Datenanalyse aus Sensornetzwerken, Fernerkundungssystemen sowie sozialen Netzwerken werden helfen, zukünftige Krisensituationen besser zu bewältigen. Darüber hinaus, können unter Verwendung sozioökonomischer Analysen und Modelle auch Zukunftsprojektionen sowie gemeinsame Zielvorstellungen entwickelt werden.

Unter Verwendung der bestmöglichen Modellierungs-, Kommunikations- und Visualisierungsmethoden zur Entscheidungsunterstützung können geeignete Risikomanagement- und Adaptionstrategien entwickelt und gemeinsam mit Vertretern aus Politik, Behörden, Wirtschaft und Wissenschaft abgeleitet werden.



United Nations World Water  
Development Report 2020:  
Water and Climate Change



## Besondere Forschungsbedarfe im Bereich „Hydrologische Extreme“ sind:

- Projektionen und Vorhersagen von Extremereignissen durch verbesserte Prozessforschung, Datenanalyse sowie Quantifizierung und Reduzierung der Unsicherheiten verbessern
- kritische Belastungsszenarien und mögliche „Kippunkte“ der Wassersysteme im Kontext der Wandelprozesse in der Risikoabschätzung identifizieren und berücksichtigen
- innovative Planungswerkzeuge für das Risikomanagement bzw. das Management von Extremereignissen entwickeln
- Wechselwirkungen extremer Ereignisse, insbesondere auch von sich über Jahrzehnte entwickelnden und wirkenden Extremen, mit Stofftransportprozessen sowie anderen Umweltfaktoren verstehen

### ii. Wasserqualität – Langfristig sicherstellen

80 % aller weltweiten Abwässer werden ungeklärt in die Umwelt abgeleitet. Zusammen mit kontaminierten Regenwasserabflüssen gelangen sie in Oberflächen- und Grundwasser und bedrohen sowohl die Versorgung ganzer Regionen mit sauberem keimfreiem Trinkwasser als auch die Biodiversität aquatischer Ökosysteme. Auch in Deutschland und Europa gelangen besonders schädliche, sogenannte prioritäre, Stoffe\* mit dem Abwasser in die Umwelt und die Gewässer.

Entsprechend dringend sind Maßnahmen zur Erreichung des Null-Schadstoff-Ziels, das im Rahmen des europäischen *Green Deals* formuliert wurde. Die bis zum Jahr 2050 geforderte nachhaltige und klimaneutrale Kreislaufwirtschaft wird dazu beitragen, die Wasserqualität langfristig sicherzustellen. Die Themen Wasser und Wasserqualität sind entsprechend in vier EU *Horizon Missions* (Anpassung an den Klimawandel, klimaneutrale und smarte Städte, Bodengesundheit und Nahrung, gesunde EU Gewässer) und in der zukünftigen Strategischen Forschungs- und Innovationsagenda „*WATER4ALL*“ fest verankert.

Hauptursache für den Eintrag schädlicher Substanzen in die Oberflächengewässer und das Grundwasser sind punktuelle und diffuse Einträge aus Industrie und Haushalten bzw. von urbanen Flächen durch Abschwemmung mit dem Regenwasser sowie aus der Landwirtschaft, z.B. durch Ausbringung zu hohen Mengen an Düngern, Pestiziden oder Gärresten auf die Böden. Diese Belastungen werden aufgrund der zeitlichen Verzögerung des Stofftransportes im Boden oft erst Jahre bis Jahrzehnte später im Grundwasser sichtbar. Beispiele hierfür sind die aktuelle Problematik der per- und polyfluorierten Chemikalien und die regional zu hohen Nitratbelastungen von Grundwasser und Oberflächengewässern. Die Vielzahl der chemischen Substanzen erschwert die Überwachung: Weltweit sind mehr als 100 Millionen chemische Substanzen erfasst. In der Europäischen Union werden davon etwa 140.000 produziert oder importiert (lt. *REACH*\*), wovon ca. 30.000 bis 70.000 Substanzen als Bestandteile von Reinigungs- und Arzneimitteln, Kosmetika, Textilien, sowie Papier-, Kunststoff- und Holzprodukten täglich in Haushalten verwendet werden.

Siehe Wasserrahmenrichtlinie  
(2000/60/EG)



Verordnung der EU zum den  
Schutz der menschlichen  
Gesundheit und der Umwelt vor  
den Risiken, die durch Chemika-  
lien entstehen können. REACH  
schreibt Verfahren zum Sammeln  
und Beurteilen von Informa-  
tionen über die Eigenschaften  
und schädlichen Wirkungen von  
Stoffen fest





Aufgrund dieser Stoffvielfalt kann das gesetzlich geforderte Monitoring von allen chemischen Substanzen tatsächlich lediglich einen sehr kleinen Teil erfassen. Nur für einen Bruchteil der vielen chemischen Substanzen und deren in natürlichen und technischen Prozessen entstehenden Transformationsprodukte ist bisher bekannt, wie sie sich in den aquatischen Systemen verhalten und ob und wie sie sich auf Mensch und Umwelt auswirken.

Neben chemischen Stoffen sind für die Wassernutzung durch Menschen – zum Trinken, für die Körperhygiene, zum Baden oder auch zur Exposition im Rahmen industrieller Prozesse wie bspw. bei Kühlwässern, Kühlschmiermitteln, etc. – Einträge von Krankheitserregern relevant. Für wichtige bakterielle Erreger sind Verfahren zur Überwachung und Verminderung ihres Vorkommens seit Jahrzehnten bekannt und in Deutschland in der Trinkwasseraufbereitung etabliert. Die Erkennung ist jedoch mit den bisher etablierten Verfahren aufwendig (Kultivierung) und erfasst nur einen Bruchteil der potenziellen Erreger. Wie beim Chemikalienmonitoring befindet sich die Sensorentwicklungen zur schnellen Vor-Ort-Erkennung (*online, inline*) noch am Anfang. Zudem werden neuralgische Stellen wie Kläranlagenabläufe üblicherweise nicht überwacht. Die Kenntnis über die Art und Verbreitung von Erregern in Oberflächengewässern, auch von antibiotikaresistenten Stämmen, ist somit nicht grundsätzlich und zuverlässig gegeben. Dazu wären für Trinkwasserentnahme- und Badestellen sowohl Monitoring-Einheiten als auch verbesserte Modelle erforderlich, um abschätzen zu können, inwieweit und unter welchen Bedingungen Erreger aus Kläranlagenabläufen und Mischwassereinleitungen dort auftreten können.

In der Corona-Pandemie 2020/2021 wurde das Potenzial eines solchen modernen Monitorings am Beispiel von Abwasseruntersuchungen deutlich (abwasserbasierte Epidemiologie). In Forschungsprojekten, auch aus Deutschland, konnte gezeigt werden, dass SARS-CoV-2-RNA im Abwasser nachweisbar ist und daraus Hinweise auf den Infektionsstatus einzelner Kommunen oder Stadtteile generiert werden können. Die Daten verdeutlichen, welches große Potenzial neue Indikatoren für die epidemiologische Kontrolle und Steuerung besitzen.

Aus der oben beschriebenen Situationsanalyse resultiert ein großer Forschungsbedarf mit Blick auf die Entwicklung neuer analytischer Ansätze und Monitoring-Strategien, für die Produktion und Bewertung neuer Chemikalien sowie für die Vermeidung und Reduzierung der Emissionen in die Umwelt. Zu erfassen sind zukünftig gleichermaßen Spurenstoffe und deren Transformationsprodukte, Pathogene und Mikroplastik. Eine wichtige Rolle spielen hierbei auch harmonisierte, idealerweise internationale Ansätze in der Gesetzgebung und die Standardisierung von Methoden in Analytik und Bewertung. Da eine umfassende Einzelstoffanalytik nicht möglich sein wird, erscheinen die Nutzung von *Screening-Ansätzen* (*Non-Target-Screening* für Chemikalien, „Umwelt-DNA“ für Erreger) in der Analytik sowie die Entwicklung von Online- bzw. Inline-Sensoren zur Ermittlung kurz- und langfristiger Veränderungen der Stofffrachten und -gemische in Gewässern aussichtsreich. Dabei stellt die Entwicklung und Etablierung neuer analytischer Monitoring-Strategien für die komplexen Systeme des regionalen bzw. globalen Wasserkreislaufs unter Berücksichtigung einer zuverlässigen Datenverfügbarkeit über Disziplinen und Ländergrenzen hinweg eine besondere Herausforderung dar.



Zur Bewertung der zum Teil sehr komplexen (öko-)toxikologischen Effekte von Umweltchemikalien und deren Transformationsprodukten sind neue Strategien und Konzepte zur Ermittlung des Einfluss- und Wechselwirkungspotenzials existierender und neuer Chemikalien auf die Umwelt notwendig. Problematisch ist der kontinuierliche Eintrag von Stoffen, der auch bei moderater Persistenz zu einer permanenten Exposition von Ökosystemen und unter Umständen auch des Menschen führt. Neben den klassischen, persistenten organischen Schadstoffen (PBT-Kriterien) sind vermehrt mobile Schadstoffe (PMT-Kriterien) in den Fokus gelangt. Im Vergleich dazu sind dynamische Gewässerbelastungen und die dadurch ausgelösten akuten Effekte noch deutlich weniger intensiv erforscht. Aufgrund dieses komplexen Sachverhalts ist es erforderlich, die Stoffanalytik vermehrt durch ökotoxikologische Bewertungsverfahren zu ergänzen, mit denen unabhängig vom detaillierten Wissen über die Zusammensetzung der Einträge eine Aussage zu deren Wirkung auf Biodiversität, Ökosystemfunktionen und ggf. den Menschen getroffen werden kann\*.



z. B. Effekt-dirigierte Analyseverfahren, bei denen biologische Effekte gemessen und mit chemischer Analytik und physikalisch-chemischen Trennverfahren verbunden werden

Auf der Ebene von Wassereinzugsgebieten sind geeignete Konzepte und Strategien für das Monitoring sowie die Minimierung der Einträge von Pathogenen und Schadstoffen unabdingbar. Dabei ist es notwendig, die Nutzung des Einzugsgebiets, die zu spezifischen Einträgen in die Gewässer führt, sowie die naturräumlichen Bedingungen, die den Rückhalt auf der Strecke zwischen Freisetzung von Pathogenen oder Schadstoffen und der Wassernutzung beeinflussen, zu berücksichtigen. Für das Wassermanagement sind deshalb gut aufbereitete Informationen über den Rückhalt diverser Schadstoffe durch verschiedene natürliche und technische Barrieren unter verschiedenen Randbedingungen einschließlich Extremereignissen erforderlich.

Angesichts der zunehmenden Vielfalt chemischer Stoffe und Produkte, die ins Abwasser und in die Gewässer eingetragen und mit dem Wasserkreislauf weiträumig verteilt werden, müssen reine *End-of-Pipe*-Ansätze durch neue Konzepte und Technologien zur Reduzierung des Stoffeintrags direkt am Ort der Entstehung ergänzt werden. Dies betrifft auch die Einhaltung von Mindestanforderungen für die Wasserwiederverwendung. Darüber hinaus stellt die Reduzierung von Stofffrachten aus diffusen Quellen eine drängende Herausforderung dar. Beispielsweise führen diffuse Einträge von Pestiziden oder Nährstoffen verbreitet dazu, dass in europäischen Gewässern der gute chemische Zustand verfehlt wird.

Es gilt daher, im Einklang mit der europäischen *Chemicals Strategy for Sustainability Towards a Toxic-Free Environment*, eine übergeordnete, langfristige und länderübergreifende Strategie zur Entfrachtung des aquatischen Kreislaufs von verschiedensten Schadstoffen zu entwickeln, zu testen und umzusetzen (Null-Schadstoff-Ziel).

### Besondere Forschungsbedarfe im Bereich „Wasserqualität“ sind:

- neue schnelle Analytik-Methoden unter Einbeziehung neuester molekularbiologischer und messtechnischer Erkenntnisse entwickeln
- existierende Chemikalien unter Berücksichtigung ihres möglichen Einfluss- und Wechselwirkungspotenzials auf die Umwelt bewerten
- adäquate Monitoring-Strategien für Einzelsubstanzen und Ökosysteme unter Berücksichtigung der neuesten Entwicklungen in den Bereichen Digitalisierung („Wasser 4.0“) und Dateninfrastrukturen entwickeln
- nachhaltige länderübergreifende Lösungen zur Entfrachtung des aquatischen Kreislaufs von Schadstoffen entwickeln und umsetzen
- Modelle zur Prognose raum-zeitlicher Dynamik von Schadstofftransport und -belastung in komplexen Landschaften unter Berücksichtigung von Unsicherheiten entwickeln

### iii. Biodiversität – Strukturen und Funktionalität erfassen, erhalten und wiederherstellen

Die Biodiversität der Oberflächengewässer und des Grundwassers erfüllt elementare Funktionen, die direkt oder indirekt zum menschlichen Wohl beitragen. Muschelbestände können beispielsweise enorme Wasservolumina in Seen und Flüssen filtrieren, somit Schweb- und daran adsorbierte Schadstoffe eliminieren. Flussaunen puffern Hochwasserspitzen, wodurch sie Nähr- und Schadstofffrachten in Fließgewässern reduzieren. Für den Klimaschutz spielen große Standgewässer und Auen als Kohlenstoffsenken eine Rolle.

Ungeachtet ihrer Bedeutung verarmt die Gewässerbiodiversität weltweit rasant. Dazu trägt eine Vielzahl menschlicher Einflüsse bei. Der Eintrag von Nähr- und Schadstoffen aus Industrie und Landwirtschaft, Gewässerverbauungen, Wasserentnahmen und -umleitungen, der Klimawandel einschließlich klimatischer und hydrologischer Extreme, Grundwasserabsenkungen sowie die Ausbreitung gebietsfremder Arten zählen dazu. In einigen Gewässern wie dem Rhein und der Donau werden Lebensgemeinschaften heute stellenweise von invasiven Arten dominiert, die über 90 % der Artenzahl und der Gesamtbiomasse der bodenlebenden Wirbellosen ausmachen. Der *Living Planet Report* des WWF aus dem Jahr 2020\* bestätigt für Süßwasserarten erneut den im Vergleich zu terrestrischen und marinen Lebensräumen weltweit stärksten Rückgang von Wirbeltieren: seit 1970 haben die beobachteten Populationen in Binnengewässern inzwischen um 84 % abgenommen. Unabhängige Daten wie die Roten Listen der Weltnaturschutzorganisation IUCN untermauern den Negativtrend auch für Deutschland – trotz erheblicher Anstrengungen im Gewässer-, Natur- und Umweltschutz. Insgesamt belegen die verfügbaren Daten, dass mehr als 90 % der Flüsse und Bäche sowie über 70 % der Seen in Deutschland das in der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie definierte Ziel des guten ökologischen Zustands verfehlen\*. Die Auswirkungen des Biodiversitätsverlusts – und anderer Umweltveränderungen – auf die Funktionalität und Ökosystemleistungen von Flüssen, Bächen und Seen sind dabei nur ansatzweise bekannt.



WWF (2020): Bending the curve of biodiversity loss. Gland, Switzerland



Umweltbundesamt (2017): Gewässer in Deutschland: Zustand und Bewertung. Dessau-Rosslau.





Jähmig et al. (2019): Lebendiges Wasser: Forschungsagenda zur biologischen Vielfalt der Binnen- und Küstengewässer



Am besten beschrieben sind die negativen Folgen der Eutrophierung von Seen durch übermäßige Nährstoffeinträge. Trotz umfassender gesetzgeberischer Maßnahmen (z.B. EU-Düngemittelverordnung) und hohem technischem und finanziellem Aufwand (fast 10.000 Kläranlagen in Deutschland) sind jedoch selbst Eutrophierungsprobleme, insbesondere die Nitratproblematik, bei weitem nicht flächendeckend gelöst. Verschärft werden sie durch Temperaturerhöhung und länger andauernde stabile Schichtung in Seen und verringerte Sommerniederschläge im Zuge des Klimawandels. Als Faktorenbündel führen diese Entwicklungen auch zu Fischsterben durch Sauerstoffschwund und Massenentwicklungen potenziell toxischer Cyanobakterien. Solche Ereignisse und Veränderungen wirken sich direkt auf die Biodiversität der Gewässer und ihre Nutzbarkeit durch Haushalte, Industrie und Landwirtschaft u.a. zur Trinkwasserversorgung, Kühlwasserbereitstellung, Bewässerung und Freizeitnutzung aus.

Wie resilient Gewässerbiodiversität und Ökosystemleistungen auf diese Entwicklungen reagieren, ist bisher unzureichend erforscht. Dies gilt gleichermaßen für nachhaltige Sicherungskonzepte für diese Ressourcen. Die Beantwortung solcher Fragen erfordert ein umfassendes Systemverständnis der Strukturen und Prozesse in Gewässern sowie ihrer Dynamik\*. Dabei müssen die projizierten Änderungen der Steuergrößen ausdrücklich berücksichtigt werden. Dies erfordert Fortschritte in mehreren Bereichen, die im Folgenden näher ausgeführt werden.

Wie und wo sich Gewässerbiodiversität in Deutschland und weltweit verändert, ist räumlich und zeitlich nur lückenhaft für einzelne Organismengruppen dokumentiert. Veränderungen bei invasiven Arten und funktionell wichtigen mikrobiellen Lebensgemeinschaften sind nur in Einzelfällen erfasst. Analog zur Aufnahme meteorologischer Daten in einem weltweit dichten und koordinierten Messstationen-Netz gilt es, im Sinne von „Messstationen der Biodiversität“ Konzepte und methodische Ansätze zur systematischen Erfassung, Mobilisierung, Verwaltung und Analyse von Daten zu Mikroorganismen bis hin zur Megafauna zu entwickeln. Der Anspruch ist dabei, über das etablierte Berichtswesen hinaus Informationen zu generieren, die es erlauben, Hypothesen zu prüfen und Modelle zu validieren. Dies erfordert neben der Nutzung etablierter Methoden die Integration moderner Ansätze wie die Analyse von Umwelt-DNA (eDNA), der molekularbiologischen und biochemischen Bestimmung ökologischer Schlüsselfunktionen, den Einsatz automatisierter Sensoren oder die Verwendung von Fernerkundungsverfahren auf der Basis von Drohnen- bis zu Satellitenaufnahmen.

Für gezielte Managementmaßnahmen sind robuste modellbasierte Vorhersagen über die Folgen veränderter Biodiversität für die Funktionalität und Ökosystemleistungen von Gewässern von der lokalen bis zur globalen Ebene erforderlich. Trotz großer Fortschritte in der Aufklärung der Bedeutung von Biodiversität für die Funktionalität vor allem terrestrischer Ökosysteme bestehen erhebliche Verständnislücken. Dies gilt besonders für Gewässer und ihre Biodiversität im Landschaftskontext, der wegen der engen Verzahnung mit dem Gewässerumland (Uferbereiche, Aue und dem gesamten Einzugsgebiet) von der Quelle bis zur Mündung einbezogen werden muss. Hier bieten molekularbiologische und chemische Ansätze gekoppelt mit der Nutzung umfangreicher Umweltdaten und dem Einsatz Künstlicher Intelligenz herausragende neue Erkenntnismöglichkeiten.



Waren Gewässerprobleme in Deutschland lange Zeit insbesondere durch lokale organische Belastungen und Eutrophierung geprägt, sind es heute zunehmend multifaktorielle Einflüsse nicht nur lokalen, sondern auch regionalen und globalen Ursprungs. Vor dem Hintergrund der aktuellen Umweltziele, insbesondere des europäischen Green Deals ist es erforderlich, die klassischen Ansätze der Bioindikation und des Gewässermanagements deutlich zu erweitern.

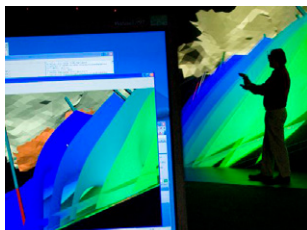
Zeitgemäßes Gewässermanagement verlangt nach sensitiven Bioindikatoren, welche Änderungen über alle Ebenen der Biodiversität vom Gen bis zum Ökosystem integrieren und dabei die Fragmentierung von Flüssen und Landschaften sowie andere Einflüsse über große räumliche und zeitliche Skalen hinweg berücksichtigen. Dabei werden Indikatoren nicht nur zur Bewertung von Belastungen benötigt. Sie sind auch für Erfolgskontrollen von Gewässerrenaturierungen und anderen Managementmaßnahmen unverzichtbar. Wirksamer Schutz und Erhalt von Biodiversität und Ökosystemleistungen kann allerdings nicht allein auf Basis naturwissenschaftlicher Erkenntnisse gewährleistet werden. Vielmehr müssen in sozioökologisch ausgerichteten Untersuchungen explizit auch die Wechselwirkungen des Menschen mit Gewässern einbezogen werden.

#### Besondere Forschungsbedarfe im Bereich „Biodiversität“ sind:

- eine umfassende, verlässliche Datenbasis zum Status Quo der Gewässerbiodiversität und ökologischen Funktionalität in ihrer zeitlichen und räumlichen Veränderung erstellen
- Kausalzusammenhänge zwischen Gewässerbiodiversität und Ökosystemfunktionen ableiten, um die Dynamik von Gewässerökosystemen zu verstehen
- relevante Indikatoren zur Bewertung des ökologischen Gewässerzustands entwickeln, um Beeinträchtigungen zu identifizieren sowie Schutz- und Restaurierungsmaßnahmen zu optimieren
- tragfähige Konzepte zur Optimierung mehrerer Zielparameter im Spannungsfeld zwischen Schutz und Nutzung von Wasser, Gewässern und Gewässerbiodiversität entwickeln

#### iv. Wasserinfrastrukturen – Zukunftssicher gestalten und bewirtschaften

Die Sommermonate 2018 bis 2020 waren außerordentlich warm und trocken, was extreme Niedrigwasserstände in Flüssen, sinkende Grundwasserspiegel, Ernteauffälle und massive Waldschäden zur Folge hatte. Aufgrund des reduzierten Abflusses verursachten die witterungsunabhängigen Einleitungen aus Kläranlagen höhere Stoffkonzentrationen in Fließgewässern. Projektionen besagen, dass der extreme Sommer von 2018 im Jahr 2050 ein durchschnittlicher Sommer sein wird und sich die Häufigkeit lokaler Überflutungen in urbanen Gebieten verdoppelt. Andererseits verursachen häufiger auftretende Starkregen großräumige Überschwemmungen, wenn sie auf der Flussgebietsskala und mit längerer Dauer auftreten, während in Stadtgebieten räumlich konzentrierte, kurzzeitige und extrem intensive Niederschläge sowie örtliche Überlastungen der Kanalisation lokale Überflutungen auslösen.

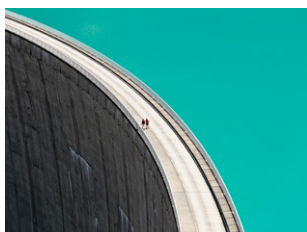


Aus der Überlagerung eines stetigen Bevölkerungswachstums, zunehmender Urbanisierung und des Klimawandels entstehen neue Herausforderungen an den Betrieb, die Erhaltung und die Entwicklung von Infrastrukturen zur Bereitstellung von ausreichend und qualitativ gutem Wasser für die Bereitstellung von Trinkwasser und industriellem Prozesswasser, zur effizienten Regenwasserableitung ohne überflutungsbedingte Schädigung von Bauwerken sowie zur Abwasserentsorgung, die eine zuverlässige Erhaltung aquatischer Ökosysteme ermöglicht. Darüber hinaus sind vernetzte Regenwasserrückhaltmaßnahmen, die Bewässerung in der Landwirtschaft und von Stadtgrün sowie Stauanlagen, die vernetzt betrieben und multifunktional genutzt werden, betroffen. Naturnahe Maßnahmen (*Nature-Based Solutions*) zur Reinigung von Ab- und Regenwasser (*Constructed Wetlands*), zur Anreicherung von Grundwasser (*Managed Aquifer Recharge*) sowie Bewirtschaftungsansätze zur Verbesserung des urbanen Wasserhaushalts und des Stadtklimas, auch im Hinblick auf die Unterstützung der öffentlichen Gesundheitsvorsorge (*Public Health*), können wesentlich dazu beitragen, die Folgen diese neuen Herausforderungen zu entschärfen.

Ziel ist eine hohe Sicherheit dieser Wasserinfrastrukturen, indem sie auch bei extremen Bedingungen leistungsfähig bleiben oder danach schnell wieder zu ihrer ursprünglichen Leistung zurückfinden. Diese Zielstellung geht konform mit der EU-Strategie für die Anpassung an den Klimawandel, um „ein klimaresilientes Europa aufzubauen“. Aus dieser übergeordneten Zielstellung lassen sich notwendige wissenschaftliche Entwicklungen ableiten. Um Folgen zu projizieren, Maßnahmen zu identifizieren, Managementoptionen zu entwickeln und zu bewerten, bedarf es neuer Ansätze und einer neuen Generation von interagierenden Werkzeugen zum Monitoring, zur Informationsgenerierung, Modellierung und Prozesssteuerung von kritischen Infrastrukturen, die für unterschiedliche Szenarien eingesetzt werden können und die Leistungsfähigkeit bei extremen Bedingungen erhöhen.

Zur dynamischen Beobachtung von Ereignisverläufen sind Monitoring-Ansätze zu entwickeln bzw. zu optimieren, die sowohl Abflussprozesse als auch Konzentrationsverläufe in Echtzeit erfassen. Weitere Datenquellen wie z.B. *Crowd Sourcing*, die viele, aber weniger genaue und weniger zuverlässige Daten liefern, müssen mit modernen *Data-Science*-Methoden aufbereitet werden, um verschiedene Daten und Informationen aus vielfältigen Quellen mit unterschiedlicher Qualität zu verschneiden. Die so erarbeiteten Informationen sind eine Basis für Simulationen zur Priorisierung von Maßnahmen und zur prädiktiven Online-Simulation, um kurzfristige Vorhersagen von beispielsweise Überflutungen oder akuten Gewässerbelastungen zu treffen sowie Steuerungsstrategien zu vergleichen und die am besten geeigneten Optionen auszuwählen.

Um dynamische Prozesse abzubilden, muss die Modellierung zeitlich und räumlich hochauflösend sein und Daten- und Modellunsicherheiten berücksichtigen. Dies ist beispielsweise nötig zur Vorhersage von mitlaufenden Simulationen von Niederschlag-Abfluss-Prozessen, speziell mit extremer Ausprägung, um zuverlässige Vorhersagen von räumlich verorteten Systemüberlastungen leisten zu können. Online-Informationen aus unterschiedlichsten Quellen sollten dabei in die Modellierung mit einfließen, um ggf. Anpassungen in der laufenden prädiktiven Simulation vorzunehmen. Für akute Effekte wie Konzentrationsspitzen in Gewässern aufgrund von Entlastungen aus der Kanalisation gilt es zu



berücksichtigen, dass sich Gewässer in und nach Trockenwetterphasen deutlich sensibler verhalten und Spitzenkonzentrationen auch durch Ereignisse induziert werden, die hydrologisch nicht besonders intensiv sind. Die akute Belastung betrifft wegen der Relevanz für den Erhalt von Ökosystemen und Biodiversität in hohem Maß auch den europäischen *Green Deal*, obwohl zurzeit ihrem Einfluss nur eine untergeordnete Bedeutung beigemessen wird.

Die vernetzte Modellierung verknüpft unterschiedliche Ebenen und Systeme mit dem Datenmanagement. Damit lassen sich Fragen zur effektivsten sektorenspezifischen Wasserverwendung aufgrund von aktueller Ressourcenverfügbarkeit und -qualität als Trinkwasser, als Prozesswasser in der Industrie oder als Bewässerungswasser in der Landwirtschaft klären. *WATER4ALL*, als Kandidat für eine europäische *Strategic Research and Innovation Agenda*, wird sich mit der multiplen Nutzung von Wasser beschäftigen. Auch die Fragen zur Wieder-Nutzung von Wasser (*Water Reuse\**) stehen im Kontext zunehmender Dürren auf der politischen Agenda in Europa und bedürfen wissenschaftlich-fundierter Entscheidungsgrundlagen. Weitere Anwendungen sind die Vorhersage von Starkregenereignissen und die effiziente Verbund-Bewirtschaftung von Talsperren, Grundwasserspeichern und dezentralen Rückhaltesystemen zur effektiven Nutzung der gesamten verfügbaren Rückhalte-Kapazität. Solche vernetzten Systemstrukturen haben Vorteile, da sie erstens die Kapazitäten bestmöglich nutzen und zweitens im Falle einer nicht vermeidbaren Überlastung die Schäden deutlich reduzieren können.

In der Landwirtschaft ermöglicht der Ansatz eine detailliertere Abbildung der Bewässerung, so dass als Funktion der meteorologischen Vorgeschichte, der aktuell verfügbaren Wasserressourcen, des Anbaus und der Wachstumsphase der Pflanzen vorgegeben wird, wann und wo mit welcher Intensität bewässert wird. Solche modellbasierten Steuerungs- und Regelungsalgorithmen werden zur Identifikation und Implementation effizienter Defizit-Bewässerungsstrategien unter Berücksichtigung der Wasserverfügbarkeit benötigt, was besonders in länger werdenden Trockenperioden an Bedeutung gewinnen wird.

Für die zukünftige Infrastrukturentwicklung wasserwirtschaftlicher Systeme stehen wichtige Weichenstellungen an. Einerseits sind jährlich zur Werterhaltung bestehender Systeme hohe Investitionen notwendig. Andererseits gilt es, die Systeme in Bezug auf Entwicklungsoptionen flexibler und adaptiver (z.B. an Wachstum oder Schrumpfung, an veränderte Verfügbarkeit und verändertes Nutzungsverhalten als Folge des Wandels von Klima, Landnutzung und Demografie, an neue Zielvorgaben durch die Gesetzgebung) zu gestalten. Dies führt zu einem Dilemma in der Jahrzehnte dauernden Übergangsphase vom aktuellen System, das seine Leistungsfähigkeit in allen Belangen mindestens erhalten muss, zum angestrebten System der Zukunft, das eine bessere Anpassungsfähigkeit an nicht vorhersehbare Veränderungen bereitstellen soll.

Die Aufgabe der Infrastrukturentwicklung reicht weit über die üblichen Themen der Wasserforschung hinaus. Sie betreffen ebenso Methoden der Szenarienbildung, die *Life-Cycle-Bewertung* von Optionen unter unterschiedlichen Szenarien sowie Stakeholder-Analyse und -Diskussionen, um Politik und Entscheidungsträger unterstützen und beraten zu können. In *Water JPI – Water Challenges for a Changing World* – werden diese Aspekte mit „*sustainable and inclusive growth*“ adressiert.



<https://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm>

### Besondere Forschungsbedarfe im Bereich „Wasserinfrastrukturen“ sind:

- Monitoring, Modellierung und Steuerung mittels *Data-Science*-Methoden vernetzen, um Systeme gegen Extremereignisse leistungsfähiger zu gestalten und zu bewirtschaften
- prädiktive Online-Simulationen zur dynamischen Echtzeitsteuerung wasser- und landwirtschaftlicher Systeme nutzen
- vernetzte Systeme unter Berücksichtigung ökonomischer Randbedingungen flexibel und adaptionsfähig entwickeln
- Citizen Science und Schnittstellen zu Politik und Gesellschaft aktiv bespielen, um weitreichende Weichenstellungen zu unterstützen

### 3.2 Herausforderungen für Wassersysteme der Zukunft

Hydrologische Extreme, Wasserqualität, Gewässerbiodiversität, Infrastrukturen sowie weitere wasserrelevante Aspekte stehen in vielschichtigen und skalenübergreifenden Zusammenhängen. Beispielsweise können meteorologisch bedingte Niedrigwasserabflüsse durch Infrastrukturen für Wasserentnahmen verschärft werden und sich auf die Wasserqualität und die Gewässerbiodiversität auswirken. Wasser und Gewässer mit ihren Einzugsgebieten sind deshalb ganzheitlich zu betrachten. Dazu bedarf es wissenschaftlicher Erkenntnisse über die Komplexität der Wirkungsbeziehungen. Ihre Erarbeitung ist deshalb eine Querschnittsaufgabe bezogen auf die vier zentralen thematischen Herausforderungen (siehe Abb. 1).

Die konzeptionellen und methodischen Grundlagen für derart umfassende Zugänge stehen in der Wasserforschung weiterhin am Anfang und bedürfen einer Forcierung. Hierfür kommen insbesondere systemische Ansätze in Betracht. Ihre Aufgabe besteht darin, emergente Eigenschaften von Wassersystemen abzubilden wie Interdependenzen, Rückkopplungen oder Kippunkte. Die beteiligten Disziplinen sind dazu mit ihren spezifischen Daten, Methoden und Modellen anschlussfähig einzubeziehen. Als Ergebnis wird ein vertiefendes Systemverständnis angestrebt. Es soll zugleich die Voraussetzungen für ein integriertes Wassermanagement schaffen, welches in den heutigen multifunktionalen ruralen und urbanen Landschaften unentbehrlich geworden ist.

Neben der Ganzheitlichkeit hat die zeitliche Dynamik des Wassers und der Gewässer an Bedeutung gewonnen. Die Variabilität des Wasserhaushalts durch Wetter und Nutzungsschwankungen kann durch Sensoren mittlerweile mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung erfasst werden. Demgegenüber stellen die mittel- und langfristigen zukünftigen Veränderungen durch den Klimawandel und den gesellschaftlichen Wandel wie Flächeninanspruchnahme, Agrar- und Energiewende nach wie vor erhebliche Herausforderungen für Wissenschaft und Praxis dar. Ihrem Einbezug kommt jedoch im Hinblick auf die Zukunftsfähigkeit von Entscheidungen des Wassermanagements eine wichtige Rolle zu. Dies gilt umso mehr, als der Wandel der naturräumlichen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen häufig gleichzeitig mehrere Prozesse in Wassersystemen betrifft. Ein Beispiel ist die Überlagerung von zunehmenden Grundwasserentnahmen in Küstengebieten mit dem klimatisch bedingten Meeresspiegelanstieg,





die zu einer beschleunigten Versalzung des Grundwassers führt. Vor diesem Hintergrund sind weitergehende Untersuchungen über die Folgen der sich verändernden Rahmenbedingungen von Wassersystemen notwendig, bei denen die Auswirkungen der Dynamiken mit ihren Unsicherheiten bestimmt werden. Dazu bedarf es methodischer Weiterentwicklungen wie zum Beispiel Szenarios und Ensembles, die sowohl den Klimawandel als auch den gesellschaftlichen Wandel repräsentieren.

Das umfassende und dynamische Verständnis eröffnet neue Perspektiven für das Management von Wassersystemen. Es erlaubt das simultane Einbeziehen der Ziele aller Bereiche des Wasserrechts sowie der Nachhaltigkeitsziele weiterer Sektoren, die mit Wasser und Gewässern im Zusammenhang stehen (z.B. SDGs 1–3, 7, 11–17). Dadurch lassen sich Zielkonflikte identifizieren sowie Zieloptimierungen im Sinne von Interessensausgleich vornehmen. Die Handhabung derartiger Mehrzielprobleme bleibt bisher weitgehend der Praxis überlassen. Nachdem sich die in der Vergangenheit konzipierten wissensgetriebenen Bewertungs- und Entscheidungsunterstützungswerkzeuge nicht bewährt haben, sind neue handlungsleitende Werkzeuge partizipatorisch zu entwickeln. Sie sollten in der Praxis zur Bewältigung der Komplexität beitragen und sich mit Monitoringdaten aktualisieren lassen.

In Bezug auf Vorsorge- und Anpassungsmaßnahmen bieten integrierte und vorausschauende Ansätze erweiterte Möglichkeiten, um Maßnahmen bzw. Maßnahmenbündel nach ihrer Multifunktionalität auszuwählen. Damit können mehrere hydrologisch-ökologische Funktionen sowie die sozialen Mehrwerte und die ökonomische Effizienz gleichzeitig gesteigert werden. „Naturbasierte Lösungen“ (*Nature-Based Solutions*) zeigen bereits in ihrer konzeptionellen Anlage multiple Wirkungen. Die Standardisierung, Skalierbarkeit und Wirksamkeit dieser Lösungen, aber auch deren Akzeptanz und technische Unterhaltung sind weiter zu erforschen. Unter dem Gesichtspunkt der Systemdynamik ist zudem die Robustheit von Bewirtschaftungsmaßnahmen unter alternativen zukünftigen Entwicklungen *ex ante* abzuschätzen.

Die Dynamiken von Wassersystemen stellen auch an die planerischen Strategien des Managements neue Anforderungen. Vor allem kommt es darauf an, neben der etablierten antizipativen Vorgehensweise eine Flexibilität im Sinne von Resilienz zu erreichen, mit der auf geänderte Rahmenbedingungen reagiert werden kann. Neben dem allmählichen Wandel von Klima und Gesellschaft sind es unerwartet und abrupt auftretende Ereignisse (z.B. Krankheitserreger), technologische und wirtschaftliche Entwicklungen sowie neue Politiken und gesellschaftliche Bewegungen, die es zu bewältigen gilt.

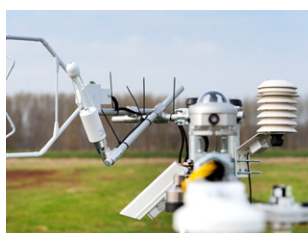
Den Rahmen für das Management von Wassersystemen bestimmen institutionelle Arrangements, die von rechtlichen Regelungen über ökonomische Marktmechanismen bis zu formellen und informellen Formen der Zusammenarbeit und Planung reichen. In Bezug auf die rechtlichen Regelungen besteht der Bedarf, rechtswissenschaftlich fundierte Optionen zu entwickeln, welche die Dynamiken und Unsicherheiten berücksichtigen. Aus ökonomischer Sicht sind die Einsatzmöglichkeiten von Instrumenten einer *Circular Economy*\* weiter zu untersuchen. Planerisch geht es um systematische Analysen von hemmenden und fördernden Faktoren für eine integrative und damit sektor-, gebiets- und ebenenübergreifende Bewirtschaftung von Wassersystemen.

European Commission (2020).  
A new Circular Economy Action  
Plan. For a cleaner and more  
competitive Europe  
COM(2020) 98 final





European Partnership  
WATER4ALL “Water Security  
for the Planet” (2021): Strategic  
Research and Innovation Agenda  
(2. Entwurf, 08.02.2021)



Solche Faktoren können das Vertrauen gesellschaftlicher Gruppen in die wasserfachliche Expertise, die faktische oder wahrgenommene Gerechtigkeit bei der Verteilung von wassergebundenen Ökosystemleistungen oder Vorsorgemaßnahmen sowie die unterschiedliche Macht von einzelnen Akteur:innen und Organisationen bei der Durchsetzung oder Verhinderung von gesellschaftlichen Zielen sein. Aus der Kenntnis dieser Faktoren gilt es Ansatzpunkte für institutionelle Innovationen im Hinblick auf eine *Good Governance* abzuleiten.

An den Schnittstellen zwischen Wissenschaft und Gesellschaft bedarf es des Einsatzes von kooperativen Forschungsansätzen, vom Co-Design über die Co-Implementierung bis zur Co-Bewertung. Ausgangspunkt für die Einbeziehung von Praxispartnern sollten Netzwerk- und *Stakeholder*-Analysen sein. Für diese Akteur:innen und die interessierte Öffentlichkeit ist eine Teilhabe durch einen offenen und verständlichen Zugang zu dem Wissen über Wasser und die Gewässer zu gewährleisten (*Open Science and Responsible Research and Innovation*\*). Hierfür bieten sich „smarte Werkzeuge“ und *Social Media* an. Neben dem zu erweiternden Problembewusstsein geht es bei der Zusammenarbeit auch um die Vermittlung von Visionen über die örtlichen und regionalen Potenziale von Wasser und Gewässern sowie eines erfolgsversprechenden Verhaltens für deren Verwirklichung (Ziel- und Transformationswissen). Zur Erprobung der konkreten Ausgestaltung der Schnittstellen zwischen Wissenschaft und anderen gesellschaftlichen Akteur:innen sollten – basierend auf den Prinzipien von „Real-Laboren“ – wissenschaftlich begleitete Praxistests in die Wasserforschung aufgenommen werden.

Diese Art systemischer Analyse ist bis heute in der Wasserforschung, sowohl national als auch international, noch wenig entwickelt, da sie nur in großen und langfristig angelegten Verbänden aus Wissenschaft und Praxis realisierbar ist. Sie wird jedoch in Zukunft unweigerlich das zentrale Element werden in der allseits geforderten Forschung zur Zukunftssicherung der Wassersysteme. Die Verantwortlichen sollten auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene wesentliche Entscheidungen zu Allokationsfragen nur in einem Systemzusammenhang, unter Betrachtung aller technisch-naturwissenschaftlichen und sozio-ökonomischen Optionen treffen. Dafür muss die Wissenschaft die richtigen Instrumente liefern. Diese sind insbesondere robuste Multi-Prozess-Modellsysteme (von global, über regional nach lokal), kohärente Datenräume mit Echtzeitcharakteristik, funktionale Digitale Zwillinge (*Functional Digital Twins*) ganzer Wassersysteme zur Ableitung von Impact-Szenarien und Handlungsoptionen sowie immersive Visualisierungswerkzeuge zur Entscheidungsunterstützung unter sich verändernden Randbedingungen (siehe Abschnitt 3.3 zu den methodischen Herausforderungen).

## Besondere Forschungsbedarfe im Bereich „Wassersysteme der Zukunft“ sind:

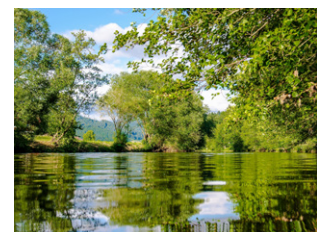
- Konzepte entwickeln, um die Komplexität des Wassersystems für Fragestellungen der Wassersystem-Bewirtschaftung adäquat abzubilden
- Veränderungen durch den Klimawandel und den gesellschaftlichen Wandel zusammenhängend projizieren und in ihren Folgen mit Unsicherheiten integrativ abschätzen
- Multifunktionalität von Wassersystemen für Bewertungen durch (modell-)evidenzbasierte Entscheidungsräume und Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung operationalisieren
- Hemmende und fördernde Faktoren der Bewirtschaftung identifizieren und institutionelle Innovationen transdisziplinär erproben

### 3.3 Methodische Herausforderungen der Wasserforschung

Über die thematischen Fragenkomplexe hinweg bestehen für die Wasserforschung etliche gemeinsame methodische Herausforderungen (Abb. 1 oben). Sie betreffen die beteiligten Disziplinen wie auch die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei integrativen Untersuchungen von Wassersystemen mit deren Dynamiken in ähnlicher Weise. Von Daten über Modelle bis zu qualitativen Ansätzen werden im Folgenden solche Herausforderungen und der sich daraus ergebende Forschungsbedarf skizziert.

Aufgrund technologischer Entwicklungen steht der Wasserforschung eine ständig steigende Zahl an Daten zur Verfügung. Durch neue Fernerkundungs- und Gelände-Sensoren, Umwelt-DNA, die Einbeziehung von interessierten Laien (*Citizen Science*, *Crowd Sourcing*) sowie Methoden zur Internetrecherche (*Web Crawling*) kann nicht nur eine größere Vielfalt an Prozessen beobachtet, sondern dies auch inhaltlich, räumlich und zeitlich höher aufgelöst werden. Die Potenziale dieser Datenquellen gilt es sukzessive zu erschließen und dabei in Bezug auf ihre Qualität, auf die Datenharmonisierung und auf die Metadaten-dokumentation zu reflektieren. Hierfür sollten vermehrt vorhandene *Big-Data*-Ansätze einbezogen und für die Wasserforschung weiterentwickelt werden. Mittels Techniken der künstlichen Intelligenz wie maschinelles Lernen, visuelle Analyse, etc. können Zusammenhänge inzwischen besser identifiziert und quantifiziert werden.

Zur Stärkung des Forschungsdatenmanagements und der Erhöhung der Datenverfügbarkeit sind zudem methodische Entwicklungen sowie forschungsstrategische Initiativen erforderlich. Dadurch sollten projektbezogene Daten über adäquate Infrastrukturen mit effizienten Architekturen und geeigneten Lebenszyklen für die Wissenschaft und die Gesellschaft zugänglich gemacht werden – wie es derzeit auch im Rahmen der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur (NFDI)\* umgesetzt wird. Die NFDI soll die Datenbestände von Wissenschaft und Forschung systematisch erschließen, nachhaltig sichern, zugänglich machen sowie (inter-)national vernetzen. Sie wird in einem aus der Wissenschaft getriebenen Prozess als vernetzte Struktur eigeninitiativ agierender Konsortien verschiedenster Fachdisziplinen aufgebaut.



<https://www.nfdi.de/>



Bauer, Stevens und Wilco Hazel-  
eiger (2021): A digital twin of Earth  
for the green transition. Nature  
Climate Change 11, 80–83



Die erweiterte Datenverfügbarkeit erlaubt eine Weiterentwicklung von Computermodellen für die Abbildung und Simulation von Wasser und Gewässern. Dies betrifft insbesondere die verbesserte Validität der Modelle durch automatische Multikriterien-Kalibrierung, die Ausweitung, Automatisierung und Vernetzung der Kopplung von verschiedenen Modellen (z.B. durch Standardisierung) sowie die Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Modellen durch den Einsatz von Hochleistungsrechnern. Auf dieser Basis sollen auch Technologien für die Virtualisierung von Wirkungsbeziehungen forciert werden, um gesellschaftliche Entscheidungen auch visuell unterstützen zu können.

Im Hinblick auf ein ganzheitliches und dynamisches Verständnis von Wassersystemen und dessen Nutzbarkeit für ein integriertes Wassermanagement bedarf es geeigneter Systemansätze. Während für einzelne aquatische Ökosysteme bereits Erkenntnisse und Methoden zu systemischen Zusammenhängen vorliegen (Systembiologie), steht die Entwicklung von Systemansätzen für größere räumliche und zeitliche Skalen, wie z.B. Flusseinzugsgebiete mit den gesellschaftlichen Nutzungen, noch am Anfang. Der Forschungsbedarf erstreckt sich von der disziplinenübergreifenden Konzeptionalisierung der Abbildung von Wassersystemen über die Ableitung von Ansätzen für eine Datenerhebung für diese Systeme bis zu gekoppelten Modellierungen mit einer intermediären Komplexität (z.B. *Digital Twins*\*). Hierbei ergeben sich Bezüge zur integrativen Erdsystemforschung. Die systemische Abbildung der Wassersysteme erfordert auch eine verstärkte Abbildung kurz-, mittel- und langfristiger Dynamiken durch geeignete methodische Ansätze. Zwar werden insbesondere Szenarien und Ensembles weit verbreitet eingesetzt, methodische Standards dazu fehlen bisher jedoch weitgehend, wodurch die Potenziale nur bedingt ausgeschöpft werden.

Die Ermittlung von Unsicherheiten ist in der Wasserforschung nicht nur bei Messungen, sondern auch bei der Simulation von Wassersystemen etabliert. Darauf aufbauend sollten vertiefende Untersuchungen durchgeführt werden vor allem zu den Unsicherheiten von Messverfahren (z.B. Erfassung der Wasserqualität), von Modellen (Modellwahl und Lösungsverfahren) bzw. deren Kopplung zu Modellketten und -netzen (Fortpflanzung von Unsicherheiten) sowie von ensemblebasierten Simulationen (Separierung von Dynamiken und verschiedenen Arten von Unsicherheit).

Im Hinblick auf die technische und nicht-technische Bewertungs- und Entscheidungsunterstützung für das Wassermanagement ist die Entwicklung von adressatenorientierten und praktisch nutzbaren Werkzeugen erforderlich. Dies erfordert beispielsweise eine angemessene Reduktion der inhaltlichen Komplexität bei gleichzeitiger Veranschaulichung von Dynamiken und Unsicherheiten durch neue Visualisierungstechniken sowie die interaktive Nutzbarkeit durch Editier- und Analysefunktionen.

Methodische Entwicklungen sind auch für die wirtschafts- und sozialwissenschaftlichen Untersuchungen der gesellschaftlichen Ursachen des Wandels von Wassersystemen sowie des darauf aufbauenden Managements und der Wasser-Governance dringlich. Nur dadurch können die wachsenden Erkenntnisse über Wassersysteme in gesellschaftliches Handeln für Nachhaltigkeitstransformationen überführt werden. Das Spektrum des Forschungsbedarfs reicht von der Weiterentwicklung quantitativer Ansätze, wie beispielsweise für wirtschaftliche Analysen der Effizienz von Investitionen in Wassersysteme (z.B. regionale



Gleichgewichtsmodelle) und die Analyse von Akteursnetzwerken (z.B. *Agent-Based Modelling*), bis zu methodischen Innovationen für die qualitative *Governance*- und Transformationsforschung. Zu letzteren gehören unter anderem „Real-Labore“ für die Wasserforschung.

#### Wesentliche methodische Forschungsbedarfe sind:

- Potenziale neuer Datenquellen und *Data-Science*-Methoden (maschinelles Lernen, visuelle Analysetechniken etc.) sowie technische Instrumente erschließen
- methodische Entwicklungen und forschungsstrategische Initiativen zur Erhöhung der Datenverfügbarkeit sowie eines effektiven Datenmanagements forcieren
- systembasierte Ansätze konzipieren und durch gekoppelte Modelle implementieren
- methodische Standards für den Einsatz von Szenarien und Ensembles entwickeln
- wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Methoden für Wasser-Governance anpassen und einsetzen

## 4. Rahmenbedingungen der Wasserforschung

Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargestellt, sind für die Vielzahl drängender Herausforderungen fundierte und systemische wissenschaftliche Erkenntnisse zu erarbeiten und daraus effiziente, intelligente und nachhaltige Lösungen zu entwickeln. Um dies zu fördern, ist es notwendig, die strukturellen Rahmenbedingungen für die Wasserforschung zu verbessern. Die nachfolgenden Punkte stellen diesbezüglich Anregungen dar, die mit allen Akteur:innen weiter abzustimmen und zu konkretisieren sind

- Entwicklung disziplinen-, sektoren- bzw. ressortübergreifender Förderinstrumente und -programme für Projekte mit einer ganzheitlichen Betrachtung des Wasserkreislaufs, in denen u. a. die Schnittstellen der Wasserforschung zur Atmosphären- und Klimaforschung sowie zur Küsten- und Meeresforschung adressiert werden
- stärkere Berücksichtigung bzw. Einbeziehung von sozial- und wirtschaftswissenschaftlichen Disziplinen in die Wasserforschung
- Entwicklung integrierter Förderformate im transparenten Dialog mit allen Akteur:innen der Wasserforschung und -förderung, in den sich die *Water Science Alliance* als Plattform für Diskurse und Abstimmungen einbringt
- Aufbau einer den interdisziplinären Forschungsfragen gerecht werdenden, korrespondierenden „interdisziplinären Gutachterkultur“, um Anträge für inter- und transdisziplinäre Verbundprojekte adäquat bewerten zu können
- Konzipierung gesondert geförderter Forschungsvorhaben zur integrierenden Begleitung, aber vor allem zur Nachbereitung aller relevanten Erkenntnisse im Rahmen größerer Förderbekanntmachungen oder bei Förderung parallel laufender Projekte zu ähnlichen Themen

- Förderung nicht ausschließlich über Förderbekanntmachungen und/oder -maßnahmen; ein gewisser Anteil des jährlich zur Verfügung stehenden Fördervolumens sollte für freie Inhalte und Themen bzw. für Einzelanträge vorgesehen werden
- weiterreichende „Verzahnung“ von außeruniversitärer bzw. Großforschung und universitärer Forschung, insbesondere bei der Entwicklung neuer Forschungsinitiativen und (Neu-)Auflage von Infrastruktur-Programmen
- organisatorische Verstärkung des Austauschs bzw. der Kommunikation zwischen Wissenschaft, Forschungsförderung und Fachbehörden, um beispielsweise die Aufgaben eines eng verzahnten dauerhaften Monitorings zu entwickeln
- Entwicklung von Strukturen, um das fragmentierte Wissen in den verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen und darüber hinaus zusammenzubringen – beispielsweise durch interorganisatorische Wissensnetzwerke

## 5. Ausblick

In diesem Rahmenpapier wird der Blick – mit Bezug zu Wasser, Gewässern und Wassersystemen insgesamt – auf die übergeordneten thematischen und methodischen Herausforderungen für die deutsche Wasserforschung gelenkt, für deren Bewältigung interdisziplinäre, systemische wissenschaftliche Ansätze und transdisziplinäre Kooperationen notwendig sind.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Rahmenpapier durch die deutsche Wasserforschungs-Community entwickelt wurde und deshalb zwar seinen Fokus auf Deutschland richtet, aber dabei explizit die Brücke zu europäischen Forschungs- und Innovationsagenden wie europäischen *Green Deal*, *WATER4ALL*, *Destination Earth* und weiteren schlägt. Dies ist wichtig, da die Skala vieler Herausforderungen nicht an Ländergrenzen festzumachen ist, sondern von lokalen bis zu globalen Dimensionen variiert. Die deutsche Wasserforschung kann in diesem Sinne mit ihrer Expertise wesentliche Beiträge zur Gewährleistung der weltweiten Wassersicherheit beitragen.

Auf der Grundlage dieses Rahmenpapiers, in dem wesentliche Herausforderungen skizziert werden, bauen die für die Zukunft geplanten sogenannten Wasserstandpunkte auf, in denen die deutsche Wasserforschungs-Community eine fachliche Vertiefung verschiedener Aspekte der Herausforderungen sowie der daraus abgeleiteten Forschungsbedarfe konkretisiert und zielgruppenspezifisch aufbereitet. Dies kann zu einzelnen Forschungsthemen oder auch in Form von wissenschaftsorientierten *Policy Briefs* erfolgen. Sowohl Grundlagen- als auch angewandte Aspekte der Wasserforschung können und sollen adressiert werden.

In diesem Kontext sind alle Akteur:innen der Wasserforschung eingeladen, die *Water Science Alliance* als offene, inter- und transdisziplinäre Plattform zu nutzen und sich mit Beiträgen in zukünftigen Wasserstandpunkten aktiv in die kontinuierlichen Diskussions- und Meinungsbildungsprozesse einzubringen. Hierzu bietet die *Water Science Alliance* im Zuge der jährlichen *Water Research Horizon Conference* und anderer Veranstaltungen Formate zur Intensivierung des interdisziplinären Austausches unter den Akteur:innen der deutschen Wasserforschung zum Thema „Wassersysteme im Wandel“.

Ziel dieses Austausches ist es, gemeinsam an Themenfindung und Forschungsdesign zu arbeiten, um Lösungsansätze zur Bewältigung der für Wassersysteme im Wandel anstehenden Herausforderungen zu entwickeln.

## Danksagung

Das Rahmenpapier ist das Ergebnis eines intensiven Gedankenaustauschs zwischen der WRPC und der wissenschaftlichen Community. Es beruht auf dem Input aller Mitglieder und Gäste der Kommission, den Ideen aus verschiedenen Workshops, einer breiten Kommentierung durch Fachkolleg:innen aus der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft, der Deutschen Hydrologischen Gesellschaft, der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, der Deutschen Gesellschaft für Limnologie, der Wasserchemischen Gesellschaft, der Fachsektion Hydrogeologie in der Deutschen Geologischen Gesellschaft – Geologische Vereinigung e.V., der *International Association of Hydrogeologists* – Sektion Deutschland, der Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften in der DWA, der Arbeitsgemeinschaft der Ressortforschungseinrichtungen (des Bundes) u.w.

Unser ausdrücklicher Dank für die konstruktiven Anmerkungen und Beiträge gilt folgenden Kolleg:innen:

*Rita Adrian, Ilona Bärlund, Arne Beermann, Thomas U. Berendonk, Viktoria Berger, Felix Bilek, Mareike Braechevelt, Christoph Czichy, Michael Eisinger, Jörg Freyhof, Claudia Freimuth, Nadine Gerner, Georg Guggenberger, Daniel Hering, Sonja Jähnig, Ralf Klingbeil, Klaus Kümmerer, Marius Mohr, Insa Neuweiler, André Niemann, Torsten C. Schmidt, Ulrike Scherer, Ralf Schüle, Thomas Sommer, Kerstin Stahl, Stefan Stolte, Bernd Sures, Katja Tielbörger, Jale Tosun, Rita Triebkorn, Hans-Jürgen Ulonska, Barbara Waelkens und Markus Weitere.*