

WBGU

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Zusammenfassung

Wasser in einer aufgeheizten Welt



Mitglieder des WBGU

Prof. Dr. Karen Pittel (Co-Vorsitzende)

Direktorin des Zentrums für Energie, Klima und Ressourcen des ifo Instituts, Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung und Professorin an der Ludwig-Maximilians-Universität München.

Prof. Dr. Sabine Schlacke (Co-Vorsitzende)

Professorin für Öffentliches Recht, insb. Verwaltungs- und Umweltrecht an der Universität Greifswald und geschäftsführende Direktorin des Instituts für Energie-, Umwelt- und Seerecht (IfEUS).

Prof. Dr. Alexander Bassen

Professor für Kapitalmärkte und Unternehmensführung an der Universität Hamburg, Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften.

Prof. Dr.-Ing. Jörg E. Drewes

Leiter des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Siedlungswasserwirtschaft an der Technischen Universität München.

Prof. Dr. Markus Fischer

Professor für Pflanzenökologie am Institut für Pflanzenwissenschaften und Direktor des Botanischen Gartens der Universität Bern.

Prof. Dr. Anna-Katharina Hornidge

Direktorin des German Institute of Development and Sustainability (IDOS) und Professorin für Globale Nachhaltige Entwicklung an der Universität Bonn.

Prof. Dr. Dr. h.c. Hans-Otto Pörtner

Leiter der Sektion Integrative Ökophysiologie am Alfred-Wegener-Institut, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung.

Prof. Dr. Claudia Traidl-Hoffmann

Professorin für Umweltmedizin an der Universität Augsburg und Direktorin des Instituts für Umweltmedizin bei Helmholtz Munich.

Prof. Dr. Anke Weidenkaff

Professorin an der TU Darmstadt für das Fachgebiet Werkstofftechnik und Ressourcenmanagement und Leiterin der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS.

Wissenschaftlicher Stab der Geschäftsstelle: Dr. Mareike Blum; Tallulah Gundelach, M.Sc.; Dr. Rüdiger Haum; Oskar Masztalerz, Arzt, B.Sc.; Dr. Benno Pilardeaux; Dr. Marion Schulte zu Berge (Generalsekretärin); Dr. Astrid Schulz (stellvertretende Generalsekretärin); Dr. Jan Siegmeier; Studentischer Mitarbeiter: Tom Puhlmann, M. Sc.

Wissenschaftliche Mitarbeiter:innen der Beiratsmitglieder: Dr. Kerstin Burghaus; Jonas Geschke, M.Sc.; Dr. Matti Gurreck; Sarah Löpelt, M. Sc.; Dr. Katharina Michael; Alexander Mitranescu, M.Sc.; Katharina Molitor, M.Sc.; Dr. Jürgen Orasche; Dr. Dominique Schüpfer; Finn Arnd Wendland, M. Sc.

Assistenz, Systemadministration, Layout: Daniela Donadei, Dipl.-Designerin (FH); Viola Märtin, Dipl.-Kulturarbeiterin (FH); Mario Rinn, B.Sc.



Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen

Wasser in einer aufgeheizten Welt

Zusammenfassung

**Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung
Globale Umweltveränderungen (WBGU)**

Geschäftsstelle
Luisenstraße 46
10117 Berlin
Tel: 030 26 39480
E-Mail: wbg@wbg.de
www.wbg.de

Redaktionsschluss: 19.07.2024

Zur sprachlichen Gleichbehandlung: Als Mittel der sprachlichen Darstellung aller sozialen Geschlechter und Geschlechtsidentitäten wird in diesem Gutachten bei allen Bezeichnungen, die auf Personen bezogen sind, der Genderdoppelpunkt (z. B. Leser:innen) verwendet.

Zitierweise für diese Publikation: WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2024): Wasser in einer aufgeheizten Welt. Zusammenfassung. Berlin: WBGU.

Leitautor:innen: Alexander Bassen, Jörg E. Drewes, Markus Fischer, Anna-Katharina Hornidge, Karen Pittel, Hans-Otto Pörtner, Sabine Schlacke, Claudia Traidl-Hoffmann, Anke Weidenkaff

Mitautor:innen: Mareike Blum, Kerstin Burghaus, Jonas Geschke, Tallulah Gundelach, Matti Gurreck, Rüdiger Haum, Sarah Löpelt, Oskar Masztalerz, Katharina Michael, Alexander Mitranescu, Katharina Molitor, Jürgen Orasche, Benno Pilardeaux, Marion Schulte zu Berge, Astrid Schulz, Dominique Schüpfer, Jan Siegmeier, Finn Arnd Wendland

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet abrufbar.

ISBN 978-3-946830-46-7
WBGU Berlin 2024

Das diesem Bericht zu Grunde liegende F&E-Vorhaben wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz unter dem Förderkennzeichen 13N0708A5 durchgeführt. Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autor:innen.

Gestaltung: WERNERWERKE GbR, Berlin
Titelbild: Rosmarie Wirz/Kollektion: Moment Open/via Getty Images
Die graphischen Elemente auf den Seiten 2, 3, 5, 9, 14 und 15 zeigen Ausschnitte hochauflöser Karten von Gewässerstrukturen in verschiedenen Weltregionen. Quelle: Pekel et al. (2016) und <https://global-surface-water.appspot.com>

Herstellung: WBGU
Satz: WBGU
Druck und Bindung: PIEREG Druckcenter Berlin

Zusammenfassung

In einer klimatisch und geopolitisch aufgeheizten Welt verschärfen sich die Herausforderungen um Wasser substanziell. Unsicherheit wird Normalität, Grenzen der Beherrschbarkeit könnten überschritten werden. Notwendig ist ein klimaresilientes Wassermanagement mit langfristigem Blick, das blaues und grünes Wasser zusammendenkt und flexibel auf Veränderungen reagieren kann. Es muss vorhandene selbstorganisierte Strukturen einbeziehen und benötigt eine begleitende Wissenschaft. Eine Internationale Wasserstrategie mit regionalen Plattformen sollte entwickelt werden.

Wo Wasser ist, ist Leben. Wasser ist mächtig und fragil – Konfliktgegenstand und einendes Medium zugleich. In Zukunft ist mit fortschreitenden, beschleunigten Änderungen des globalen Wasserkreislaufs zu rechnen. Auswirkungen des Klimawandels, die Übernutzung der Wasserressourcen, die ungleiche Verteilung von Wasser, der Verlust von Ökosystemleistungen sowie Gefährdungen durch wasserbezogene Gesundheitsrisiken werden sich weiter verschärfen. Die Annahme von Stationarität, also die Vorstellung, dass natürliche Systeme auf der Grundlage empirischer Beobachtungen innerhalb eines definierten Zeitfensters eine vorhersagbare Variabilität aufweisen, ist angesichts des Klimawandels nicht mehr tragfähig. Dies wird zunehmend in Bedrohungslagen münden, die jenseits des menschlichen Erfahrungsspektrums liegen und sich zu regionalen Wassernotlagen zuspitzen können. Im Extremfall ergeben sich Situationen, in denen Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten, gesellschaftliche Strukturen und Ökosysteme substanziell destabilisiert werden und Handlungsspielräume nicht mehr existieren. Dies sind bedrohliche Muster mit planetarer Dimension.

Um krisenhafte Entwicklungen frühzeitig zu erkennen und regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension abzuwenden, sollte international eine Water Mapping Initiative initiiert werden, bestehend aus einer Wissenschaftsplattform und einem Expert:innengremium. Zudem sollte ein systematischer internationaler Austausch

über wirkungsvolle Anpassungs- und Resilienzstrategien erfolgen. Anzustreben ist eine Internationale Wasserstrategie, um diesen Herausforderungen, vor denen alle Staaten stehen, als Weltgemeinschaft zu begegnen.

Von zentraler Bedeutung ist ein klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement weltweit, bei dem sich Infrastrukturen und Managementansätze den Veränderungen der lokalen Wasserhaushalte und zunehmenden Extremereignissen anpassen. Dies umfasst auch den Schutz der Wasserqualität durch eine konsequente Umsetzung des Zero-Pollution-Ansatzes und des Leitbilds einer Kreislaufwasserwirtschaft, unter Einbeziehung der Ökosysteme und einer aktiven Bewirtschaftung des im Boden gebundenen grünen Wassers.

Nachhaltige Wasserpolitik kann zudem nur gelingen, wenn auch in anderen Politikfeldern Fortschritte erzielt werden. Eine stringente Klimaschutzpolitik, Raumplanung für die Erhaltung und Renaturierung von Ökosystemen sowie die Umsetzung der internationalen Biodiversitätsziele sind unbedingte Voraussetzung, um Handlungsspielräume zu bewahren. Sie müssen eng verbunden sein mit globaler Sozial-, Wirtschafts- und Handelspolitik, um eine friedliche „WasserZukunft“ zu ermöglichen. Um die Anpassung an ein verändertes Wasserdargebot und zunehmende Extremereignisse finanzieren zu können, müssen private Investitionen mobilisiert und öffentliche Einnahmen stabilisiert werden. Der Zugang zu Finanzierung sollte auch für lokale Akteure verbessert werden.

Eine wichtige Ressource, um klimaresilientes Wassermanagement zu ermöglichen, ist die Wissenschaft. Sie ist gefordert, Erfahrungswissen durch Projektionen zukünftiger Veränderungen und ihrer Unsicherheiten zu ergänzen. Gleichzeitig müssen innovative Ansätze für den Umgang mit großskaligen und disruptiven Änderungen der Wasserverfügbarkeit und zunehmenden Extremereignissen entwickelt und wissenschaftlich begleitet werden. Entscheidungsabläufe können dafür durch die Bereitstellung von Echtzeitdaten und Prognosen beschleunigt werden.

Eine nachhaltige WasserZukunft setzt voraus, dass Ziele und Verantwortung nicht allein vom Staat getragen werden, sondern ebenso von Wirtschaft und Gesellschaft. Der Staat muss dafür die Voraussetzungen schaffen und einen politischen und regulierenden Rahmen setzen, der selbstorganisierte Strukturen fördert und eine Bildungsoffensive für einen verantwortlichen Umgang mit Wasser unterstützt. Wasser als wertvolle Ressource sollte konsequent und sozial ausgewogen bepreist werden, um weltweit eine effiziente und nachhaltige Nutzung zu fördern.

Es ist daher von höchster Dringlichkeit, das Thema Wasser höher auf der internationalen Agenda zu verankern. Das derzeitige starke Momentum durch die UN-Wasserkonferenzen 2023, 2026 und 2028 sollte von den Regierungen genutzt werden, um weltweit durch umfassende Vorsorge einen ausreichenden Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit einzuhalten. Kurzfristig sollten effektive Strategien für ein resilientes Wassermanagement entwickelt werden, die mittelfristig die weltweite Kooperation stärken und langfristig in ein von der Staatengemeinschaft getragenes Wasserabkommen münden.

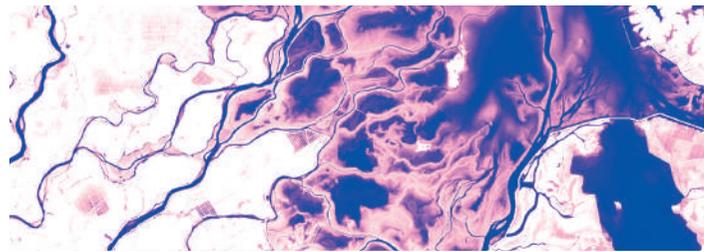
Die internationale Wasserpolitik muss sich auf die fortschreitenden und beschleunigten Änderungen im globalen Wasserkreislauf einstellen. Dazu sollte Wasser als Querschnittsthema in vielen Foren mit bedacht werden, braucht aber auch einen eigenen Prozess und politische Aufmerksamkeit. Der WBGU empfiehlt, bis 2030 eine Internationale Wasserstrategie zu erarbeiten. Ziele und Maßnahmen der Strategie sollten auch in zwischenstaatliche Wirtschafts- und Handelsbeziehungen einfließen, um Synergien zwischen dem Schutz der Wasserressourcen sowie der Unterstützung von klimaneutraler Entwicklung und Ernährungssicherheit zu ermöglichen. Die Strategie sollte langfristig zu einem eigenen internationalen Abkommen für Wasser – vergleichbar den Rio-Konventionen – weiterentwickelt werden.

Kasten 1 zeigt die Kernbotschaften des WBGU im Überblick.

Kasten 1

Kernbotschaften

- › Abstand zu den Grenzen der Beherrschbarkeit wahren
- › Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension antizipieren und abwenden
- › Klimaresilientes Wassermanagement umsetzen und naturnahe Wasserqualität erhalten
- › Integrierte Klima- und Biodiversitäts- und Sozialpolitik sind effektive Wasserpolitik
- › Transformatives WasserWissen: Vorausschauende und begleitende Wissenschaft praktizieren
- › Mit der Gesellschaft, nicht gegen sie: der gestaltende Staat und die selbstorganisierte Gesellschaft in der Verantwortung
- › International Verantwortung übernehmen – Internationale Wasserstrategie entwickeln
- › Nationale Wasserstrategie in den internationalen Diskurs zu Wasser einbringen



Heutiger Umgang mit Wasser

Wasser durchläuft auf der Erde einen kontinuierlichen, globalen Kreislauf, der in Form von Niederschlägen über Land immer wieder neu Süßwasser zur Verfügung stellt. Dieses steht in der Folge als blaues oder grünes Wasser zur Verfügung: Blaues Wasser umfasst alle Wasserressourcen in Flüssen, Seen, Talsperren und Grundwasser. Grünes Wasser bezeichnet das im Boden gebundene Wasser; es kann durch Pflanzen produktiv die Bildung von Biomasse befördern (Rockström et al., 2023). Ökosysteme mit ihrer Biodiversität sind ein wichtiger Teil des globalen Wasserkreislaufs. Der Mensch beeinflusst den natürlichen Wasserkreislauf durch Wasserentnahmen, -nutzungen und -ableitungen regional und global mittlerweile in einem großen Ausmaß, wodurch sich Verdunstung, Niederschläge, Grundwasserneubildung, Abflussverhalten, Wasserqualität usw. verändert haben und weiter verändern. Zudem

ist bereits heute ein massiver Einfluss von Klimawandel und Ökosystemdegradation spürbar.

Global entfallen 72 % aller Süßwasserentnahmen auf die Landwirtschaft, 15 % auf die Industrie und 13 % auf Kommunen und Haushalte (AQUASTAT, 2024). Der Anteil der Wasserentnahme für die Landwirtschaft an der Gesamtentnahme variiert jedoch regional und nach Einkommensniveau erheblich. In Hocheinkommensländern sind es im Durchschnitt nur 41 % der gesamten Entnahmen, in Ländern mit mittleren und niedrigen Einkommen dagegen 80–90 % (Ritchie und Roser, 2017). Die Ausweitung der Bewässerungslandwirtschaft, deren Fläche sich von 1961–2018 mehr als verdoppelt hat (UNESCO, 2024), und der Wasserbedarf einer wachsenden Stadtbevölkerung haben in vielen Regionen und Städten der Welt zur einer Übernutzung von nicht erneuerbarem Grundwasser (Tiefengrundwasser) und einer zunehmenden Absenkung des Grundwasserspiegels geführt. Besonders betroffen sind der Nahe und Mittlere Osten, Nordafrika, Indien, Nordchina sowie der Südwesten der USA. In den meisten dieser Regionen machte der Wasserverbrauch für Bewässerung der Landwirtschaft von 1960–2010 durchschnittlich über 90 % des gesamten Wasserkonsums aus. Mindestens etwa die Hälfte davon stammte aus nicht erneuerbarem Grundwasser (Wada und Bierkens, 2014).

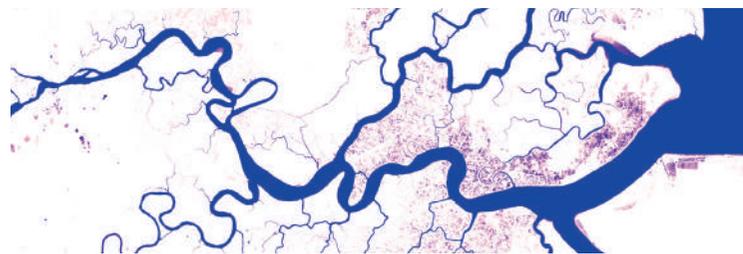
Rund 2,2 Mrd. Menschen haben keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser – vor allem Länder niedrigen und mittleren Einkommens sind betroffen (UNESCO, 2024). Dabei ist vor allem in ländlichen Gebieten die Versorgungslage schwierig: Dort haben vier von fünf Menschen keinen sicheren Zugang zu sauberem Trinkwasser. Rund 3,5 Mrd. Menschen haben keinen Zugang zu angemessener sanitärer Versorgung. Mittel der öffentlichen Entwicklungsleistungen (ODA) für den Wassersektor lagen im Jahr 2022 mit 9,1 Mrd. US-\$ mehr als 4 % unter ihrem Maximum von 2018 (UN Water, 2024).

Zwischen 2002 und 2021 waren 1,6 Mrd. Menschen von Überflutungen betroffen, und rund 100.000 verloren ihr Leben. Im gleichen Zeitraum litten 1,4 Mrd. Menschen unter Dürren, mit rund 21.000 Toten (UNESCO, 2024). Rund die Hälfte der Weltbevölkerung leidet derzeit zumindest einen Teil des Jahres unter schwerem Wassermangel (IPCC, 2023).

In vielen Regionen der Erde hat sich die Gewährleistung einer sicheren Wasserver- und -entsorgung deutlich verbessert, aber ein substanzieller Anteil der Weltbevölkerung hat weiterhin keinen adäquaten Zugang zu diesen Dienstleistungen: Für mindestens 3 Mrd. Menschen ist die Wasserqualität wegen mangelnder Überwachung ungewiss (UN, 2022). Eine Gefährdung durch pathogene Mikroorganismen im Trinkwasser betrifft immer noch 2 Mrd. Menschen weltweit.

Neben den Wirkungen vor Ort kann es über den Handel mit Gütern, für deren Herstellung Wasser benötigt wird, auch zu Fernwirkungen (Telecoupling) kommen. Das zur Herstellung von Gütern benötigte und das in den Gütern enthaltene Wasser lassen sich als virtuelle Wasserströme über den Globus verfolgen. Etwa 65–90 % der weltweiten Ströme virtuellen Wassers stammen aus dem Handel mit Agrarprodukten, gefolgt mit deutlichem Abstand von der Industrie und dem Energiesektor. Besonders Länder mit hohen Agrarexporten führen somit indirekt das eigene Wasser aus.

Wasser wird vielerorts verschwendet, übernutzt und ungerecht verteilt. Nutzungsmuster sind durch politische Rahmenbedingungen und die existierende Wasserinfrastruktur geprägt – dabei gibt es starke Pfadabhängigkeiten, die Kurskorrekturen und substanzielle Veränderungen erschweren.



Künftige Verschärfungen wasserbezogener Probleme

Menschheit, Ökosysteme und der Planet bewegen sich in eine Zukunft, in der die für Mensch und Natur verfügbaren Wassermengen und Wasserqualitäten einem zunehmenden Wandel unterliegen. Insbesondere durch den Klimawandel ist die Annahme von Stationarität nicht mehr tragfähig.

Klimawandel und Verschmutzung

Der Klimawandel intensiviert den globalen Wasserkreislauf: Die Verdunstung von Wasser aus der Tier- und Pflanzenwelt sowie von Boden- und Wasseroberflächen steigt, wie auch die in der Luft gespeicherte Menge an Wasser – pro 1 °C Erwärmung kann die Luft 7 % mehr Wasser speichern. In der Folge sind mehr und stärkere Niederschlagsereignisse möglich.

Die fortschreitende Erwärmung treibt globale und regionale Veränderungen von Niederschlag und Verdunstung voran, verschiebt das Gleichgewicht von gefrorenem zu flüssigem Wasser, erhöht den Wassergehalt in der Atmosphäre und führt zu einer Zunahme von Extremereignissen wie Überflutungen oder Dürren. Eine Milliarde Menschen leben derzeit küstennah und sind direkt vom zunehmenden Meeresspiegelanstieg und

entsprechend höher auflaufenden Sturmfluten betroffen (IPCC, 2019). Im globalen Mittel nehmen die Niederschläge zu; jede weitere globale Erwärmung um 1 °C erhöht den mittleren Niederschlag weltweit um 1–3 %, wobei sich regional das Ausmaß und die Richtung der Änderungen und damit auch ihre Wirkungen stark unterscheiden. Im Vergleich zum Zeitraum 1995–2014 könnte die Niederschlagsmenge bis Ende des Jahrhunderts um bis zu 13 % ansteigen. Da die Erwärmung zugleich auch zu einer potenziell höheren Verdunstung führt, ergeben sich regional unterschiedliche Auswirkungen auf das insgesamt verfügbare Wasser. Die Bodenfeuchte und damit das grüne Wasser wird in vielen Regionen verstärkt abnehmen – bei einer globalen Erwärmung um 4 °C könnte dies z. B. in Amazonien, dem südlichen Afrika und Westeuropa eine Minderung von bis zu 40 % bedeuten – in anderen Regionen wird sie weiter zunehmen. Als Reaktion auf den Klimawandel werden die Grundwasserentnahmen z. B. für Bewässerung voraussichtlich ansteigen und könnten die nicht erneuerbaren Grundwasseranteile weltweit erschöpfen. Die Kombination aus weiter steigenden Temperaturen, veränderten Niederschlagsmustern, zurückweichenden Gletschern und einer reduzierten Schneedecke führt dazu, dass die mittleren Abflussmengen mit fortschreitender globaler Erwärmung zunehmen, jedoch mit regional unterschiedlichen Ausprägungen. Zunehmende Abflussmengen werden insbesondere für die nördlichen hohen Breitengrade sowie Regionen in Zentral- und Ostafrika vorhergesagt, während Abnahmen im Mittelmeerraum sowie in Teilen Mittel- und Südamerikas insbesondere in den Sommermonaten zu erheblichen Verknappungen blauen Wassers führen werden (Douville et al., 2021).

Auch die Wasserqualität wird zukünftig weiter abnehmen, sofern die Einleitungen unzureichend geklärter Abwässer – aktuell betrifft dies etwa 80 % der weltweiten Abwässer – und damit von Krankheitserregern, schwer abbaubaren Chemikalien, Nährstoffen und festen Abfällen fortgesetzt werden. Dadurch werden Grundwasser, viele Süßgewässer, Küstenzonen und Meere für Tiere und Pflanzen zum Teil durch Sauerstoffmangel und Giftblüten unbewohnbar (dead zones); die Selbstreinigungskraft der Gewässer geht verloren. Durch moderne, neu entwickelte Stoffe sowie durch Stoffgemische und möglicherweise Wechselwirkungen mit z. B. sie umgebenden Mikroorganismen steigt die Komplexität der Verschmutzung (EEA, 2022). Die Langzeitrisiken sind noch unbekannt und Gegenstand der aktuellen Forschung. Mikro- und Nanoplastik beispielsweise können als Vektor für zusätzliche schädliche Kontaminanten mit potenziell schweren Folgen für Umwelt und Gesundheit wirken. In einem Zukunftsszenario ohne Gegenmaßnahmen ist global bis zum Jahr 2060 eine Verdopplung des in die Umwelt eingebrachten Plastiks und somit auch

des Mikro- und Nanoplastiks auf 44 Mio. t pro Jahr zu erwarten (OECD, 2022). Der Klimawandel verschärft die Situation zusätzlich: In Dürreperioden kann z. B. die Konzentration von Schadstoffen in Oberflächengewässern nicht mehr ausreichend verdünnt werden. Durch Überschwemmungen und das Abschmelzen von Schnee und Eis werden Schadstoffe mobilisiert und damit bioverfügbar. Steigende Wassertemperaturen während Hitzewellen beeinflussen die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse in Oberflächengewässern, die sich auf die Konzentration und die chemischen Eigenschaften transportierter Stoffe auswirken können. Insgesamt resultiert daraus zusammen mit dem ungebremsten Klimawandel eine extreme, kaum kontrollierbare Belastungssituation für die globalen Wasserressourcen.

Die Kapazität zur Anpassung nimmt mit fortschreitendem Klimawandel kontinuierlich ab – dies betrifft die Menschen, ihre technologischen und institutionellen Systeme sowie auch die der Natur (IPCC, 2022). Um Anpassungsfähigkeit weitgehend zu erhalten, ist es nach dem Vorsorgeprinzip alternativlos, den Klimawandel bei 1,5 °C globaler Erwärmung zu begrenzen und langfristig – sofern möglich – sogar rückgängig zu machen. Dies erfordert die Beendigung anthropogener CO₂-Emissionen und die starke Minderung der Emissionen anderer Treibhausgase sowie die Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre.

Sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen

Künftig wird ohne wirksame Gegenmaßnahmen je nach Region die Wassernutzung und damit die Gefahr der Übernutzung weiter wachsen. Die UNESCO (2023) schätzt, dass die globale Wassernachfrage jährlich um ca. 1 % steigen und damit bis 2050 um 20–30 % zunehmen wird. Allerdings beträgt die Fehlerspanne für diese Berechnung mehr als 50 %. Ein Großteil des erwarteten Anstiegs der Nachfrage entfällt auf Länder niedrigen und mittleren Einkommens, insbesondere Schwellenländer. Nachfragesteigerungen in den Kommunen und Haushalten sind am stärksten in solchen Regionen, in denen die Wasserver- und -entsorgung ausgeweitet wird. Zunahmen in der industriellen Wassernachfrage gehen in der Regel mit fortschreitender Industrialisierung einher, und können durch Effizienzverbesserungen in der Wassernutzung auch wieder sinken. Die Wassernachfrage in der Landwirtschaft ist vor allem durch die Bewässerung getrieben. Je nach zugrundeliegenden Annahmen über sozioökonomische, technische und klimatische Entwicklungen variieren Projektionen zur Entwicklung des Wasserbedarfs erheblich. Der IPCC schätzt, dass der Wasserbedarf für Bewässerung bis zum Ende des Jahrhunderts auf das Doppelte bis Dreifache zunehmen könnte (Caretta et al., 2022).

Projektionen zeigen, dass steigende Bewässerungsbedarfe neben erhöhter Verdunstung infolge des Klimawandels zur zunehmenden Erschöpfung von Grundwasservorkommen bis zum Ende des Jahrhunderts beitragen.

Globale geopolitische und gesellschaftliche Entwicklungen kommen verschärfend hinzu. Mangelnde Wasserverfügbarkeit und Extremereignisse wie Dürren oder Überschwemmungen können Wachstum, Entwicklung und Armutbekämpfung behindern. Multidimensionale Armut und soziale Ungleichheiten sowie Autokratisierungs- und Polarisierungsprozesse schwächen gesellschaftlichen Zusammenhalt, befördern die Fragmentierung von Governance-Systemen und mindern gesellschaftliche Widerstandsfähigkeit gegenüber wasserbezogenen Krisen wie Dürren und Überschwemmungen. Das Management von Wasser ist häufig eine Aufgabe, die politische Grenzen überschreitet, und wird daher ebenso wie wasserbezogene multilaterale Verhandlungen durch die gegenwärtigen geopolitischen Spannungen erschwert. Wasserkrisen gehen zudem häufig nicht auf fehlende Verfügbarkeit, sondern auf ungleiche Verteilung zurück. Klimatisch und ökologisch bedingte Verfügbarkeiten der Ressource und Verteilungsdefizite verstärken sich gegenseitig.

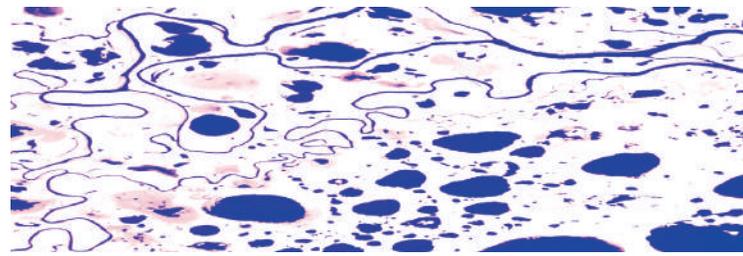
Gesundheitsschäden bei Arten, Ökosystemen und Menschen

Die zunehmende Klimakrise und Verschmutzung und ihre Auswirkungen auf hydrologische Prozesse und nicht zuletzt auf die Biodiversität werden direkte und indirekte Folgen für die menschliche Gesundheit sowie für die Gesundheit anderer Organismen haben. Dies hat Auswirkungen auf die Funktionalität und Artenzusammensetzung der Ökosysteme. Die Verfügbarkeit von Wasser ist grundlegend für Pflanzenwachstum – und damit für das Funktionieren von Ökosystemen wie Wäldern oder Graslandschaften. Umgekehrt sind gesunde Ökosysteme wesentlich für eine lokal stabile Süßwasserverfügbarkeit und -qualität. Wasser hat somit nicht nur eine Bedeutung für Biodiversität, sondern Biodiversität auch für Wasser.

Auch die Lebensbedingungen des Menschen können sich im Zusammenwirken der Klimafaktoren so ungünstig verändern, dass Lebensunterhalt und Ernährung vor Ort nicht mehr gewährleistet sind. Dabei sind Veränderungen der Wasserqualität und -quantität und der damit verbundene Mangel an gesundheitlich unbedenklichem Wasser nur ein Teil der Bedrohungslage. Wasserknappheit, Verschmutzung und Überschwemmungen wirken sowohl direkt als auch indirekt auf den Menschen. Sie können den dauerhaften Verlust der gesundheitlichen Unversehrtheit und einer hohen Anzahl an Menschenleben zur Folge haben. Auch soziale Gefüge und Gesundheitseinrichtungen können verloren gehen. Durch unregelmäßige bzw. unzureichende Wasserversorgung

werden nicht nur die Vitalität des Einzelnen und seine Leistungen in der Gesellschaft beeinträchtigt, sondern schließlich auch die Leistungsfähigkeit der Gesellschaft insgesamt, mit entsprechenden wirtschaftlichen und gesellschaftspolitischen Konsequenzen.

Die sich abzeichnenden globalen Verschärfungen und ihr Zusammenwirken führen dazu, dass Notlagen entstehen können, die kaum noch durch den Menschen beherrschbar sind. Beispiele regionaler Wassernotlagen, die sich so oder ähnlich auch in anderen Weltregionen ereignen können, sind in Kasten 2 illustriert.



Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit sichern

Bei Wassernotlagen können Grenzen der Beherrschbarkeit erreicht werden, jenseits derer sich gesellschaftliche Strukturen und Ökosysteme destabilisieren: Menschen und Ökosystemen der betroffenen Region werden die Lebensgrundlagen entzogen (Kasten 2). Angesichts der prognostizierten klimatischen, ökologischen, sozioökonomischen und geopolitischen Entwicklungen ist zu erwarten, dass derartige Grenz Zustände und regionale Wassernotlagen weltweit immer häufiger erreicht werden.

Um einen sicheren Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit zu halten, sind Maßnahmen auf globaler und lokaler bzw. regionaler Ebene erforderlich (Abb. 2):

Erstens müssen Verschärfungen in Grenzen gehalten werden, die als globale Treiber direkt auf den globalen Wasserhaushalt wirken: Dafür ist eine ambitionierte Klimapolitik einschließlich der Einhaltung der Ziele des Pariser Übereinkommens Voraussetzung, denn nur so können die Änderungen des globalen und lokalen Wasserhaushalts durch den Klimawandel begrenzt werden. Ebenso zentral ist die Umsetzung des Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework, um die elementare Rolle der Natur im globalen Wasserhaushalt zu schützen. Je früher gehandelt wird, desto mehr Handlungsoptionen bestehen.

Zweitens müssen regionale Wassernotlagen möglichst vermieden werden. Gelingt es nicht, die Verschärfungen wasserbezogener Probleme einzuhegen, steigt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens regionaler Wassernotlagen

Kasten 2

Regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension

Dürren und Extremniederschläge werden klimawandelbedingt weltweit zunehmen. Mit dem Abschmelzen von Gletschern wird sich vielerorts das Wasserdargebot massiv verändern. Hinzu kommen die Degradation und Zerstörung von Ökosystemen, die wertvolle Wasserspeicherung unterstützen, z. B. in Form von grünem Wasser. In einigen Weltregionen wird zudem die Wasserverschmutzung deutlich zunehmen. Diese Verschärfungen wasserbezogener Probleme können sich gegenseitig verstärken und mittel- und langfristig zu regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension zuspitzen. Das Ausmaß und die Dynamik dieser Wassernotlagen können bisher beherrschbare Risiken überschreiten. Der WBGU beschreibt hier exemplarisch fünf regionale Wassernotlagen, deren Muster sich auch in anderen Weltregionen wiederfinden.

Wasserknappheit in Städten



> 933 Mio.
Menschen sind heute in Städten von Wasserknappheit betroffen

30–50%
der Weltbevölkerung werden es 2050 sein

um **80%**
wächst die urbane Wassernachfrage bis 2050

In den letzten 20 Jahren waren weltweit über 80 Metropolen bzw. Metropolregionen von schwerem Wassermangel betroffen (Rusca et al., 2023). Die Zahl der Berichte über Städte, denen das Wasser auszugehen droht, steigt. 2016 haben über 30% der urbanen Bevölkerung in Gebieten mit Wasserknappheit gelebt. Mangel an Oberflächenwasser, Bodenversiegelung, Grundwasserübernutzung sowie der Anstieg des Wasserbedarfs durch (rasche) Verstädterung und steigenden Pro-Kopf-Bedarf sind

die Haupttreiber für urbanen Wassermangel. Leckagen in der Wasserinfrastruktur und Missmanagement verstärken die Wasserknappheit. Die Zahl der Menschen, die weltweit in Städten mit Wasserknappheit leben, könnte von mehr als 933 Mio. im Jahr 2016 auf 1,6–2,3 Mrd. Menschen im Jahr 2050 ansteigen; das wäre ein Drittel bis fast die Hälfte der globalen Stadtbevölkerung (He et al., 2021). Die Megacity São Paulo (Brasilien) erlebte 2014–2016 eine gravierende Wasserknappheit, Chennai (Indien) war 2019 als eine der niederschlagreichsten Megastädte der Welt von der massivsten Wasserknappheit seit 30 Jahren betroffen. Barcelona, Kapstadt, Bogotá, Montevideo und Mexiko-Stadt sind weitere Beispiele für Städte, in denen in jüngster Vergangenheit der Wassernotstand ausgerufen werden musste.

Zunahme von Dürren und Sturzfluten in der MENA-Region



6%
der Weltbevölkerung leben in der MENA-Region

nur **1%**
der globalen Süßwasservorräte ist dort verfügbar

um **24%**
sank die Pro-Kopf-Verfügbarkeit von erneuerbarem Süßwasser 2007–2018

Die MENA-Region (Mittlerer Osten, Nordafrika) wird im globalen Vergleich mit am stärksten von den negativen Auswirkungen des Klimawandels betroffen sein (Hajat et al., 2023). Im Zeitraum von 2007–2018 ist die Verfügbarkeit von erneuerbarem Süßwasser pro Kopf in der Region um etwa 24% gesunken (SIWI und UNICEF, 2023). Veränderte Niederschlagsmuster, zunehmende Trockenheit und Dürren, Starkregenereignisse und Sturzfluten sowie vor allem Übernutzung, begleitet von großen Governanceherausforderungen bei der gerechten Verteilung der wenigen verfügbaren Süßwasserressourcen, führen in der Region bereits heute zu Wasserknappheit und ungleicher Wasserverfügbarkeit für Mensch und Umwelt. Projektionen deuten darauf hin, dass in der MENA-Region zukünftig



Abbildung 1

Geographische Lage der im Gutachten behandelten regionalen Wassernotlagen mit planetarer Dimension. Quelle: WBGU, Weltkarte: www.freepik.com



ein deutlich extremeres Klima zu erwarten ist. Hitzeextreme, mehr Trockenheit, länger anhaltende Dürren und mehr Starkregenereignisse werden gemeinsam mit dem zunehmenden Nutzungsdruck die Wasserknappheit in der Region zukünftig weiter ansteigen lassen, mit negativen Auswirkungen für Mensch und Natur. Dieser Trend ist auch ein globales Muster: In den Jahren 2022 und 2023 wurde in 22 Ländern weltweit der Dürrenotstand ausgerufen (UNCCD, 2023).

Gletscherschmelze in der Gebirgskette Hindukusch-Karakorum-Himalaya: Verlust natürlicher Wasserspeicher



2 Mrd.

Menschen beziehen Wasser aus den Flussbecken der Region

200 Mio.

Menschen leiden bereits unter erhöhtem Wasserstress

20% bis 65%

Gletscherverlust je nach Klimaszenario

Neben den Polen sind die Gletscher der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Gebirgskette die größten gefrorenen Süßwasserspeicher der Erde. Die Flussbecken der Region versorgen fast 2 Mrd. Menschen mit Wasser, also ein Viertel der Weltbevölkerung. Bis 2100 wird auch ohne eine weitere Erwärmung ein Verlust von mehr als 20% der Eismasse und vergletscherten Fläche in der Gebirgskette projiziert, je nach Klimaszenario steigt dieser Anteil auf bis zu 65%. Bereits heute leiden fast 200 Mio. Menschen in der Region an Wasserstress (Nie et al., 2021) und es ist damit zu rechnen, dass sich die Lage bis Ende des Jahrhunderts weiter zuspitzen wird. Ein vermindertes Wasserangebot, insbesondere in Flussbecken wie dem Indus, die zu hohen Anteilen von Schmelzwasser gespeist sind, trifft auf einen steigenden Wasserbedarf. Diese Entwicklung birgt ein erhebliches Destabilisierungspotenzial: z. B. kann erhöhter Wasserstress für Menschen und Ökosysteme zu gesellschaftlichen und geopolitischen Konflikten führen, zunehmende Naturgefahren eine Bedrohung für Menschenleben und Infrastruktur darstellen und verminderte Abflüsse in den Sommermonaten nicht nur die regionale, sondern auch die globale Lebensmittelproduktion beeinträchtigen. Aus der Region stammen 61% der globalen Reisernte, 41% der globalen Kartoffelproduktion und 24% der globalen Maisernte (Hu und Tan, 2018). Abschmelzende Gletscher bergen auch in anderen Regionen der Welt wasserbezogene Gefahren; besonders betroffen sind z. B. die südlichen Anden, Westkanada und die westlichen USA (insbesondere Alaska) oder die Alpen.

Wasserverschmutzung in Subsahara-Afrika



2,7 Mrd.

Menschen sind heute von organischer Wasserverschmutzung betroffen

auf 4,2 Mrd.

könnte ihre Zahl bis 2100 ansteigen

38%

der von organischer Wasserverschmutzung betroffenen Weltbevölkerung wird 2100 in Subsahara-Afrika leben

Global könnte sich die Zahl der Menschen, die von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffenen sind, von heute 2,7 Mrd. auf bis zu 4,2 Mrd. Menschen zum Ende des Jahrhunderts erhöhen. Für die Belastung durch pathogene Mikroorganismen, Salze und Nährstoffe werden ähnliche Muster prognostiziert (Jones et al., 2023). Dies betrifft besonders Subsahara-Afrika: Bis Ende des Jahrhunderts werden voraussichtlich 25% aller Menschen in Afrika leben, aber 38% der weltweit von Wasserverschmutzung durch organische Verbindungen betroffenen Menschen. Pathogene Mikroorganismen stellen eine direkte Gefahr für die menschliche Gesundheit dar, organische Kohlenstoffverbindungen fördern in Oberflächengewässern mikrobielles Wachstum und Sauerstoffzehrung, die zu Fischsterben führen. Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor verursachen Eutrophierung, Algenblüten und den Verlust von Habitaten und Biodiversität. Neben Subsahara-Afrika zeichnen sich auch in Zentral- und Nordwestmexiko, in Nordindien sowie in Ostchina globale Schwerpunkte der Wasserverschmutzung ab.

Übernutzung des Grundwassers und Klimawandel im Central Valley (USA)



25%

der Obst- und Nussproduktion der USA stammen aus dem Central Valley

10%

sind die erwarteten Wasserverluste in der Region bis 2030

75%

der Brunnen erlitten eine Grundwasserabsenkung um 1,5 m (2018–2023)

Das Risiko lokaler Wasserengpässe hat sich in den letzten Jahrzehnten im Central Valley durch eine steigende Nachfrage und den Klimawandel deutlich zugespitzt. Im mehrjährigen Mittel überstieg der Grundwasserverlust die Rate der Neubildung. In der Folge erlitten 2018–2023 mehr als 75% der Brunnen eine Grundwasserspiegelabsenkung um mehr als 1,5 m (CNRA, 2023). Die Aufrechterhaltung der Trinkwasserversorgung gestaltet sich angesichts hoher Verbräuche und häufigerer Trockenperioden als immer herausfordernder. Eine Entspannung der Lage ist nicht abzusehen. Das Central Valley ist als grundwasserabhängige und semiaride Region weltweit jedoch nicht die einzige, in der sich lokal eine Erschöpfung der erneuerbaren Grundwasserressourcen mit weitreichenden Folgen für Mensch und Natur abzeichnet. Auch der Nordosten Chinas (Hai-He-Becken und Aquifer der Nordchinesischen Ebene), der Norden Indiens (Ganges-Brahmaputra-Aquifer), der Nordosten Südamerikas (São-Francisco-Becken), der Südwesten und Süden der USA (Central und South High Plains), Osteuropa (Don- und Dnepr-Becken) oder der Nahe Osten (Arabische Halbinsel, Iran) geraten durch jahrelange intensive Bewirtschaftung und die Folgen der Erderwärmung an die Grenzen ihrer natürlichen Belastbarkeit.

Zusammenfassung

mit planetarer Dimension. Zu ihrer Abwehr bedarf es transformativer Anpassungsmaßnahmen und eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements mit transformativer Eingriffstiefe, da bisherige (inkrementelle) Anpassungsmaßnahmen nicht mehr ausreichen werden. Konkret bedeutet dies die Bereitschaft zu radikaler Umsteuerung, insbesondere durch die Gestaltung eines Strukturwandels, etwa in der Landnutzungs-, Industrie-, Siedlungs- und Infrastrukturpolitik – national wie im Rahmen internationaler Zusammenarbeit.

Da ein sicherer Abstand zu Grenzen der Beherrschbarkeit nicht immer eingehalten werden kann, müssen gefährdete Regionen frühzeitig einen Plan B vorbereiten. Helfen auch transformative Maßnahmen nicht mehr weiter, ist gegebenenfalls ein geordneter rechtzeitiger Rückzug die letzte Gestaltungsoption. Dort, wo Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden, reduzieren sich Handlungsmöglichkeiten akut auf ein reaktives Krisen- und Katastrophenmanagement, das den Rückzug

begleitet. Welche Risiken als intolerabel eingeschätzt werden und welche Anpassungspfade im Einzelnen beschränkt werden sollten, ist dabei auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

Handlungsprinzipien etablieren

Der WBGU empfiehlt ein klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement mit den folgenden Handlungsprinzipien.

- › *Wasser als Gemeinschaftsgut für Mensch und Natur sicherstellen:* Wasser muss als globales, Leben spendendes Gemeinschaftsgut nach den Bedürfnissen aller Menschen und der Natur verteilt und gespeichert werden. Naturbasierte, technische und institutionelle Lösungen für die Sicherstellung einer resilienten Wasserversorgung bei einwandfreier Wasserqualität müssen die Multifunktionalität für Mensch und Ökosysteme berücksichtigen und diese ausbalancieren.

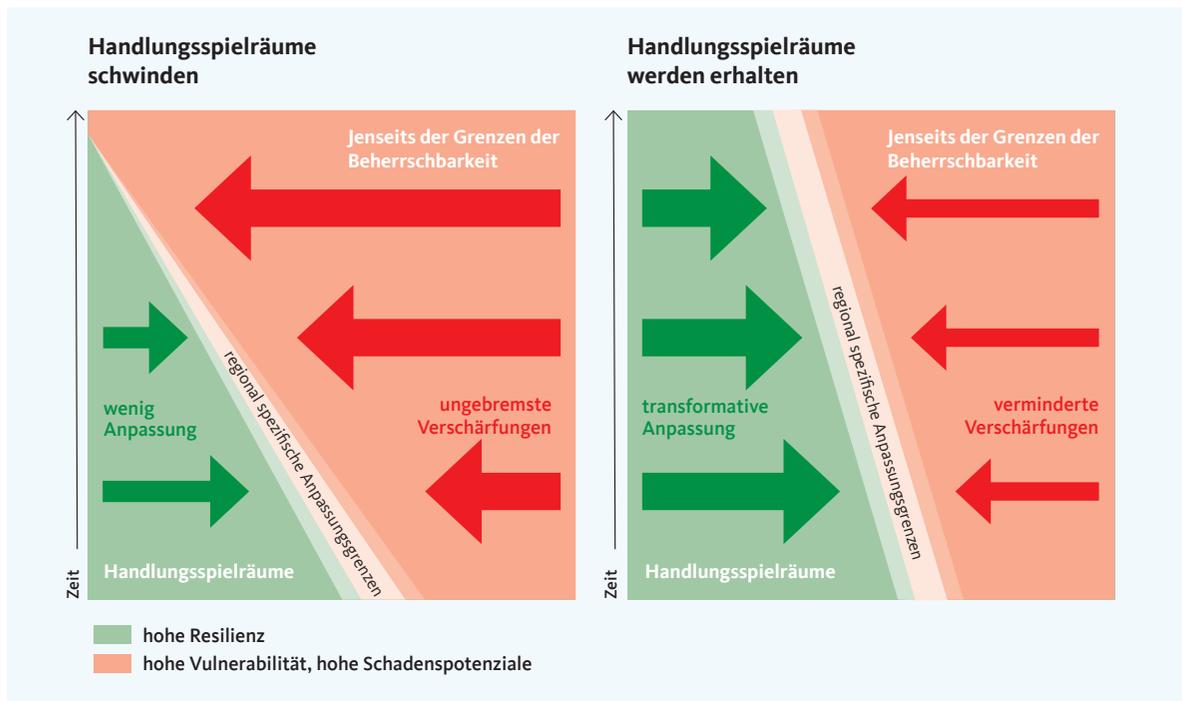


Abbildung 2

WBGU-Konzept zu Grenzen der Beherrschbarkeit. Durch ungebremste Verschärfungen bei Wasserdargebot, -verteilung und Extremereignissen sowie zu geringe Anpassung besteht die Gefahr, dass regionale Wassernotlagen entstehen und Grenzen der Beherrschbarkeit überschritten werden. Jenseits dieser Grenzen, die sich regional unterscheiden können, sind die Risiken intolerabel hoch (roter Bereich). Welche Risiken als intolerabel eingeschätzt werden und welche Anpassungspfade im Einzelnen beschränkt werden sollten, ist dabei auch Gegenstand gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse.

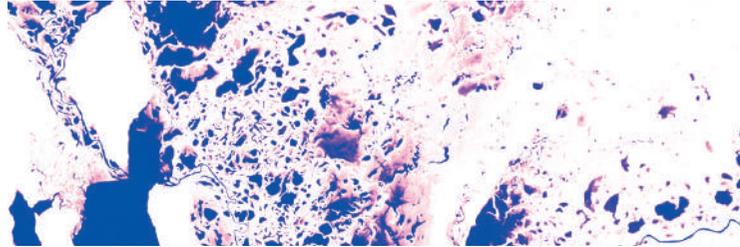
Links: Werden nur geringe Anpassungsmaßnahmen vorgenommen, schwinden Handlungsspielräume (grüner Bereich). Wasserbezogene Verschärfungen durch zunehmenden Klimawandel, Ökosystemdegradation und Verschmutzung sowie sozioökonomische und geopolitische Entwicklungen können ihre ganze Wucht entfalten. Vulnerabilität und Schadenpotenziale nehmen zu, im Zeitverlauf steigt die Gefahr, Grenzen der Beherrschbarkeit zu überschreiten.

Rechts: Transformative Vorsorge steigert die Resilienz und vermindert die Auswirkungen wasserbezogener Verschärfungen, gleichzeitig werden die Verschärfungen selbst in Grenzen gehalten. Handlungsspielräume (grüner Bereich) werden auch längerfristig erhalten.

Quelle: WBGU

- › *Anpassungsfähigkeit angesichts fortlaufender Veränderungen steigern:* Systeme zur Bereitstellung und Nutzung von Wasser sollten angesichts bisher unbekannter Schwankungen und nicht genau prognostizierbarer, fortlaufender Veränderungen resilient erhalten und wissenschaftsbasiert neu aufeinander abgestimmt werden. Verwaltungen, Betreiber und Nutzer müssen sich auf eine hohe Dynamik einstellen. Dafür müssen Strukturen sowie Planungs- und Entscheidungsprozesse akteursübergreifend, anpassungsfähig und korrigierbar gestaltet sein.
- › *Resilienz und Risikovorsorge statt Gefahrenabwehr:* Für die Sicherung einer klimaresilienten Wasserinfrastruktur und Wasserqualität muss das Vorsorgeprinzip konsequent angewendet werden. Risikovorsorge und Risikominimierung statt Gefahrenabwehr sollten Grundlage von Planungsprozessen und Entscheidungen im gesamten Wassersektor und davon beeinflussten Sektoren sein.
- › *Blaues und grünes Wasser sektorübergreifend bewirtschaften:* Blaues und grünes Wasser müssen bei regionalen und lokalen Lösungsansätzen gemeinsam und sektorübergreifend berücksichtigt und bewirtschaftet werden. Beide besitzen strategische, geopolitische Relevanz: Neben Flusseinzugsgebieten müssen auch grenzüberschreitende Verdunstungs- und Niederschlagsmuster berücksichtigt werden. Kohärenz zwischen Politikebenen und -feldern ist hierfür Voraussetzung.
- › *Wissenschaftsbasierten Diskurs über Probleme und Handlungsoptionen ermöglichen:* Der WBGU empfiehlt, einen wissenschaftsbasierten Diskurs über Strategieentwicklung und Handlungsoptionen bei Unsicherheiten zu initiieren und Bedenken von Bürger:innen und Stakeholdern zu berücksichtigen. Dazu müssen Ausmaß und Dynamiken von Verschärfungen wasserbezogener Probleme und daraus resultierende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, verstanden und Handlungsoptionen erforscht werden. Wissenschaft sollte die Politik kontinuierlich informieren und eine beratende Rolle einnehmen, z. B. durch ein wissenschaftliches Monitoring eingesetzter Instrumente. Politische und gesellschaftliche Teilhabe, Bildung und Kooperation sollten gefördert werden.
- › *Wasser wertschätzen und Wasserwert schätzen:* Die Politik, öffentliche Institutionen, Unternehmen und Finanzmärkte sollten den Wert von Wasser und den systemischen Charakter von Wasserrisiken in ihren Entscheidungen erfassen und integrieren. Wirtschaftliche Entscheidungen müssen mit den langfristigen Zielen eines nachhaltigen Wassermanagements kompatibel sein.
- › *Umsetzung beschleunigen – Selbstorganisation fördern und fördern:* Der regulatorische Rahmen und

alle Instrumente des Wassermanagements müssen eine beschleunigte Umsetzung ermöglichen und informelle, dezentrale Governancestrukturen einbinden, wo dies sinnvoll ist. Insbesondere bedarf es der Einbindung und Ertüchtigung nichtstaatlicher, selbstorganisierter Akteure.



Klimaresilientes Wassermanagement

Übernutzung von Wasserressourcen, ungleiche Verteilung, Verlust von Ökosystemleistungen sowie wasserbedingte Gesundheitsrisiken sind vielerorts durch ein fehlgeleitetes und ineffektives Wassermanagement mitverursacht. Managementansätze, die auf eine Überwindung von Missständen und Fehlstellen abzielen, wie der etablierte Integrated-Water-Resources-Management-Ansatz (IWRM), werden den Anforderungen durch den Klimawandel bisher nicht hinreichend gerecht. Die im folgenden skizzierten Grundzüge eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements, das auf den oben ausgeführten Handlungsprinzipien basiert, sollen Impulse für die Weiterentwicklung bestehender Managementansätze (IWRM, Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus, adaptives Wassermanagement) und für die stärkere Umsetzung transformativer Anpassung im Wassersektor setzen.

Wassermanagement anpassungsfähig und resilient gestalten

Der WBGU empfiehlt, eine neue Herangehensweise im Wassermanagement zu etablieren, die darauf abzielt, mit Unsicherheit zu leben, aber auch, Unsicherheit zu mindern. Ein flächendeckend etabliertes klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement sollte lokale, regionale und globale Wasserkreisläufe vorausschauend bewirtschaften und die verschiedenen Funktionen von Wasser für Menschen und Ökosysteme langfristig erhalten. Um ein Handeln unter Unsicherheit zu ermöglichen, bedarf es transdisziplinärer und kollaborativer Lern- und Entscheidungsprozesse über Sektoren und räumliche Skalen hinweg. Grundlage sind empirische Daten, Echtzeitinformationen und Zukunftsprojektionen unter verschiedenen Klimaszenarien zu Wasserangeboten und -bedarfen, wobei auch zunehmender Wasserbedarf im

Zuge der Energiewende berücksichtigt werden muss. Dies erfordert eine Digitalisierungsoffensive. Bewirtschaftungsmethoden müssen auf dieser Grundlage konstant überwacht und gegebenenfalls kurzfristig angepasst werden. Dafür müssen Planungs- und Entscheidungsprozesse im Wassermanagement korrigierbar und Infrastrukturmaßnahmen dezentraler und adaptiver gestaltet werden.

Das Wassermanagement sollte zudem auf die Bewahrung, Stärkung und Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts ausgerichtet sein. Da entsprechende Maßnahmen teilweise erst zeitverzögert wirken, ist es erforderlich, sie mit kurzfristig wirksamen Maßnahmen zu kombinieren, ohne unerwünschte Pfadabhängigkeiten zu erzeugen. In Anlehnung an den vom WBGU vorgeschlagenen integrierten Landschaftsansatz (WBGU, 2020) sollte ein integrierter Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz verfolgt werden, der den Schutz von Klima und Biodiversität, den Flächenbedarf zur Ernährungssicherung und die Stärkung natürlicher Puffer im Wasserhaushalt auf Flächen aller Nutzungsarten zusammendenkt. Das in Böden gespeicherte grüne Wasser muss unter Berücksichtigung der Auswirkungen des Klimawandels stärker in das Wassermanagement einbezogen werden.

Klimaanpassung, Wassermanagement und Ökosystemschutz sollten besser verzahnt werden. Um eine stärkere Nutzung regulierender Ökosystemleistungen zur Stabilisierung des Wasserdargebots zu ermöglichen, sollte die Sicherstellung der Funktionen von Wasser für Ökosysteme eine zentrale Rolle im Wassermanagement spielen.

Um die lokale Trinkwasserversorgung resilienter aufzustellen, ist die Nutzung verschiedener unabhängiger blauer Wasserressourcen erforderlich, die redundant sind und sich gegenseitig ergänzen. Wo erforderlich und

technisch möglich, empfiehlt sich auch die stärkere Nutzung alternativer Wasserressourcen wie entsalztes Meerwasser oder kommunale Kläranlagenabläufe, sofern nachteilige Konsequenzen, etwa für Ökosysteme und menschliche Gesundheit, vermieden werden können. Mehrfachnutzungen von Wasser verschiedener Qualitätsstufen sollten beim Bau von Wasserinfrastruktur und Gebäuden antizipiert werden. Flächendeckend sollten digitale Wasserinformationssysteme etabliert werden, die Entnahmen von Privathaushalten, öffentlichen Einrichtungen und der Industrie erfassen, damit die Bereitstellung durch den Versorger angepasst werden kann. Dabei sollte künftig auch künstliche Intelligenz zum Einsatz kommen, hierzu besteht jedoch noch Forschungsbedarf. Bei Großverbrauchern können dezentrale Wasserspeicher und Wasserwiederverwendung etabliert werden, die zu einer flexibleren Wasserentnahme beitragen.

Um kurzfristig mit zunehmenden Extremereignissen umzugehen, sollte – kombiniert mit langfristig wirksamen Maßnahmen zur Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts – ein breites Spektrum adaptiver, schnell wirksamer und ressourceneffizienter Maßnahmen zum Einsatz kommen, von rein technischen bis hin zu stärker naturbasierten Maßnahmen. Die Auswahl und Kombination der Maßnahmen sollten sich an den in Kasten 3 dargestellten Anforderungen orientieren.

Zudem sollten Ansätze für Abwägungsprozesse unter Unsicherheit weiterentwickelt und in die Anwendung gebracht werden. In besonders durch Wassernotlagen gefährdeten Gebieten sollten transdisziplinäre Foren geschaffen werden, um die anstehenden Herausforderungen zu thematisieren und kollaborativ Anpassungsoptionen zu entwickeln. Um agile Anpassung von Politik

Kasten 3

Anforderungen an Maßnahmen eines klimaresilienten Wassermanagements

Der WBGU schlägt vier Anforderungen vor, die bei der Auswahl, Umsetzung und Entwicklung von Maßnahmen eines klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagements zu beachten sind:

Beurteilung der wasserbezogenen Wirksamkeit auf verschiedenen Zeitskalen: Die Wirksamkeit von Maßnahmen sollte zum einen im Hinblick auf spezifische wasserbezogene Ziele und zum anderen in jedem Fall bezüglich ihres Beitrags für die Wiederherstellung eines klimaresilienten Landschaftswasserhaushalts beurteilt werden. Vor dem Hintergrund der wasserbezogenen Verschärfungen müssen verschiedene Zeithorizonte, Unsicherheiten und Wirkungsverzögerungen sowie Anpassungsgrenzen beachtet werden.

Analyse der Machbarkeit im jeweiligen Kontext: Die Machbarkeit von Maßnahmen sollte kontextspezifisch unter Berücksichtigung der Verfügbarkeit von Technologien, finanziellen Mitteln, institutionellen Kapazitäten, ihrer Akzeptanz sowie ihres Flächen- und Ressourcenbedarfs beurteilt werden – auch im Hinblick auf ihren langfristigen Betrieb und ihre möglicherweise im Zeitverlauf nötige Anpassung.

Stärkerer Fokus auf mögliche Mehrgewinne: Mögliche Mehrgewinne für Klima- und Biodiversitätsschutz sowie Gesundheit, soziale und wirtschaftliche Vorteile von Maßnahmen sowie Effekte auf die Verringerung von Ungleichheiten sollten antizipiert, evaluiert und bei der Beurteilung von Maßnahmen berücksichtigt werden.

Vermeidung nicht intendierter Konsequenzen: Um Fehlanspassung und weitere nicht intendierte wasserbezogene, ökologische, gesundheitliche, soziale und wirtschaftliche Konsequenzen zu vermeiden, sollten möglichst alle Auswirkungen von Maßnahmen durch einen systemischen und transdisziplinären Ansatz identifiziert, evaluiert und berücksichtigt werden.

zu fördern, sollten mehr Forschungsvorhaben finanziert werden, die zeitnahe technische Anpassungsmaßnahmen und Politikmaßnahmen sowie deren (Wasser-)Wirksamkeit überprüfen. Technische Anpassungsmaßnahmen, z. B. Planungsgrundlagen für Infrastrukturmaßnahmen wie das Auftreten eines 100-jährlichen Hochwasserereignisses (HQ₁₀₀), müssen angepasst werden.

Lösungsraum Ökosysteme

Für ein klimaresilientes Wassermanagement spielt die Renaturierung von Feuchtgebieten wie Sümpfen und Marschen, Fluss- und Auenlandschaften oder Mooren sowie weiterer wasserrelevanter Ökosysteme wie Wälder eine wichtige Rolle. Seit der vorindustriellen Ära sind schätzungsweise mehr als 80 % der weltweiten Feuchtgebiete durch Landnutzungsänderungen und Entwässerung verloren gegangen und die verbleibenden Feuchtgebiete sind größtenteils degradiert (UNEP, 2021). Renaturierungsmaßnahmen in Feuchtgebieten können den Rückhalt von Wasser in der Landschaft verbessern und damit die lokale Wasserverfügbarkeit für Mensch und Natur erhöhen, die Trinkwasserversorgung stabilisieren, zum Hochwasserschutz beitragen sowie Wasserqualität und Nährstoffspeicherung verbessern. Mehrgewinne umfassen z. B. die Bereitstellung von Lebensraum für eine diverse Flora und Fauna, die Verbesserung der Bodenqualität sowie Beiträge zum Lebensunterhalt und der Kultur lokaler Gemeinschaften. Die Wiedervernässung von Mooren ist außerdem für den Klimaschutz von großer Bedeutung. Ob die Renaturierung eines Feuchtgebiets machbar ist, hängt auch von der regionalen Verfügbarkeit von Wasser mit entsprechender Wasserqualität ab. Unbeabsichtigte Konsequenzen wie die Verbreitung invasiver Arten oder eine Veränderung des lokalen Wasserkreislaufs, die z. B. die Landwirtschaft beeinträchtigt, sollten einkalkuliert und vermieden werden.

Der WBGU empfiehlt, die Renaturierung von Ökosystemen mit großer Bedeutung für den Wasserhaushalt auf allen politischen Ebenen voranzutreiben. Dies umfasst explizit wasserbezogene Aktivitäten innerhalb der UN-Dekade für die Wiederherstellung von Ökosystemen, der UN-Wasserdekade, der Agenda 2030 für Nachhaltigkeit, der Ramsar-Konvention, der EU-Wasserrahmenrichtlinie, der EU-Verordnung zur Wiederherstellung der Natur sowie der relevanten nationalen Strategien. Außerdem sollte das Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz sowie verwandte relevante Strategien wie die Nationale Moorschutzstrategie langfristig gefördert und enthaltene Maßnahmen auch im Interesse eines klimaresilienten Wassermanagements zeitnah umgesetzt werden.

Im Sinne eines integrierten Landschaftsansatzes (WBGU, 2020) ist es empfehlenswert, frühzeitig mit Landnutzer:innen, Anrainern zu renaturierender Flächen

und weiteren Stakeholdern in Dialog zu treten. Dadurch können Konflikte vermieden, Mehrgewinne gesteigert und die gesellschaftliche Akzeptanz für die Renaturierung erhöht werden. Die Umsetzung der Maßnahmen sollte mit Blick auf die Multifunktionalität des gesamten Ökosystems (z. B. einer Fluss- und Auenlandschaft) erfolgen und den Mosaikansatz in der Raumplanung berücksichtigen (WBGU, 2024). So können vielfältige Fluss- und Auenlandschaften mit hoher Biodiversität entstehen, die diverse Funktionen wie Stabilisierung der Wasserpegel, Wasseraufbereitung, Grundwasserbildung und -regenerierung, CO₂-Bindung, Bereitstellung von Lebensräumen oder Erholung erfüllen. Entlang des gesamten Flusssystems kann eine nachhaltige Nutzung u. a. für Schifffahrt, Fischerei, Tourismus und Trinkwasserversorgung ermöglicht und ein naturnahes, harmonisches Erscheinungsbild wiederhergestellt werden.

Der Rückbau von Barrieren in Flussläufen sollte vorangetrieben werden, um die Konnektivität von Flussläufen wiederherzustellen und weitreichende ökologische und wasserbezogene Mehrgewinne zu ermöglichen. Es wird empfohlen, bei Renaturierungsmaßnahmen und Raumplanung die Möglichkeit der Entstehung neuer Ökosysteme einzubeziehen. Dies sollte zu einer Reflexion des gesetzlich geregelten „guten ökologischen Zustands“ (EU-Wasserrahmenrichtlinie) führen. Unter Umständen kann dies sogar eine Ergänzung unter Berücksichtigung von Renaturierung zur Steigerung der Resilienz von Ökosystemen bedeuten. Adaptives Management, das regelmäßiges Monitoring mit Hilfe wissenschaftlich erprobter Methoden und robuster Modellierungen mit einbezieht, kann helfen, die Prozesse der Renaturierung eines Ökosystems zu antizipieren und bei Bedarf rechtzeitig Folgemaßnahmen zu ergreifen.

In der Forschung sollten die Perspektive der Wasserversorgung sowie der Schutz und die Wiederherstellung von Ökosystemen, insbesondere Süßwasserökosysteme, integriert bzw. stärker berücksichtigt werden, etwa in der Forschungsstrategie Zukunft und Innovation. Die Forschung zu Sumpf- und Flusslandschaften sollte ausgebaut werden: Um unterschiedlichen Nutzungsansprüchen an Flussläufe und -landschaften gerecht zu werden, braucht es verstärkt auch Forschung, die ihre vielfältigen Ökosystemleistungen abhängig von Renaturierungsmaßnahmen analysiert. Die Erkenntnisse sollten in eine multifunktionale Raumplanung einfließen.

Langzeitstudien, Forschungs- und Monitoringprojekte nehmen einen wichtigen Stellenwert ein und sollten gefördert werden: Beispiele sind Studien zu den vielfältigen Auswirkungen des Rückbaus von Dämmen sowie zum Vergleich zwischen dem Ausgangszustand, dem ökologischen Zustand nach Dammbau und nach Entfernung, oder zum Wassereintrag in Hochmooren. Forschungsbedarf besteht bei der Typisierung und Kartierung

von Mooren, um Moore und ihren Beitrag zum Klimaschutz und zur Erhaltung spezifischer Biodiversität effektiv überwachen, schützen und renaturieren zu können. Auch sozial-ökologische Forschung sollte gestärkt werden: Zum Beispiel sollten die Leistungen von Ökosystemen sowie die Einflüsse von Management und Renaturierung umfassend untersucht und Methoden zur wirksamen Umsetzung des Integrierten Landschaftsansatzes für Ökosysteme mit großer Bedeutung für den Wasserhaushalt erforscht und bereitgestellt werden.

Lösungsraum Landwirtschaft

Klimaresilientes Wassermanagement in der Landwirtschaft bedeutet zum einen, Anbaukulturen und -methoden anzupassen (und gegebenenfalls zu bewässern), um mit Schwankungen des Wasserdargebots und dem Klimawandel insgesamt umzugehen. Zum anderen beeinflussen landwirtschaftliche Praktiken ihrerseits auch den Wasserhaushalt bzw. das Wasserdargebot; die Landwirtschaft muss also zu einem klimaresilienten Landschaftswasserhaushalt beitragen. Ansätze zur Reduktion wasserbezogener Risiken sind vielfältig und lokalspezifisch, ihre Wirksamkeit nimmt mit zunehmendem Klimawandel ab und ist mit Unsicherheiten behaftet. Unter den in Betracht kommenden Ansätzen sind Maßnahmen zur Erhaltung der Bodenfeuchte sowie Agroforstwirtschaft auch noch bei stärkerer Erwärmung relativ wirksam. Oft werden einzelne Maßnahmen aber nicht mehr ausreichen, sondern Kombinationen nötig sein (Caretta et al., 2022). Der WBGU hat in seinem Gutachten „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“ umfangreiche Empfehlungen für eine ökologisch-nachhaltige Landwirtschaft und deren Einbettung in einen integrierten Landschaftsansatz gegeben (WBGU, 2020). Darüber hinaus werden die folgenden Empfehlungen zum klimaresilienten, sozial ausgewogenen Wassermanagement in der Landwirtschaft präsentiert:

Erstens sollten Daten und Projektionen zu Wassernutzung und -dargebot verbessert sowie mehr Wissen zu wasserbezogenen Anpassungsmaßnahmen in der Landwirtschaft bereitgestellt werden. Viele Maßnahmen liegen im Eigeninteresse und grundsätzlich auch im Einflussbereich des einzelnen landwirtschaftlichen Betriebs. Beratungs- und Schulungsangebote oder regionale Unterstützungsteams sollten Landwirt:innen daher Wissen und Fähigkeiten für ein klimaresilientes Wassermanagement vermitteln und sie in dessen praxistaugliche Weiterentwicklung einbeziehen. Für die übergreifende Planung und Regulierung sollten Entnahme- und Verbrauchsdaten möglichst in Echtzeit erhoben, Daten zum Wasserdargebot, Grundwasserkörpern usw. verbessert und gemeinsam mit entsprechenden Projektionen zur Verfügung gestellt werden. Dies sollte Teil einer breiteren Digitalisierungsoffensive für die Landwirtschaft sein. Es

sollten Kapazitäten für die Verbesserung öffentlich verfügbarer, lokaler Projektionen und wissenschaftliche Begleitung von Anpassungsmaßnahmen aufgebaut werden. Erfahrungen sollten in internationalen Netzwerken ausgetauscht werden, auch mit Ländern niedrigen Einkommens. In diesen Ländern, etwa in Subsahara-Afrika, sollte das Potenzial lokaler Wissenssysteme in lokalen Anpassungs- und Transformationsstrategien der Landwirtschaft noch besser genutzt werden. Entsprechende Beratungsangebote und Vernetzungsaktivitäten könnten international z. B. durch die GIZ und in Deutschland durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung weiter ausgebaut werden.

Zweitens sollte Landwirtschaft auch als „Grünwasserwirtschaft“ wertgeschätzt und in integrierte Landschafts- und Wassermanagementansätze eingebunden werden: Von Anpassungsmaßnahmen, die den Wasserhaushalt und die Wasserqualität beeinflussen – z. B. durch Schaffung von Puffern, höhere Grundwasserneubildung oder Erhaltung von Ökosystemleistungen – profitieren auch andere Wassernutzer oder die Allgemeinheit. Landnutzer sollten daher stärker als Wasserakteure verstanden und Landwirt:innen in ihrer Rolle als „Grünwasserwirt:innen“ stärker unterstützt werden. Dies sollte sich im politischen und gesellschaftlichen Umgang mit der Landwirtschaft, ihrer Wertschätzung, in der Aus- und Fortbildung sowie in ihrer Einbindung in Wassermanagementprozesse – etwa einem integrierten Landschafts- und Wasserhaushaltsansatz und Klimaanpassungsstrategien – und in finanziellen Anreizen widerspiegeln.

Drittens sind finanzielle Anreize für Landwirt:innen und eine Absicherung von Transformationsanstrengungen erforderlich; in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens muss z. T. überhaupt erst ausreichender Zugang zu Ressourcen und Kapital geschaffen werden. Es sollten Ausgleichsmechanismen zwischen Landnutzern und Wassernutzern für wasserwirksame Maßnahmen etabliert werden, etwa Wasserfonds. Wasserbezogene landwirtschaftliche Subventionen können in diese Mechanismen eingebunden werden. In der EU betrifft dies den nächsten Zyklus der gemeinsamen Agrarpolitik, die zu einer „gemeinsamen Ökosystempolitik“ umgestaltet werden sollte (WBGU, 2020). Da bei Wasserrisiken die Kooperation zwischen Landwirt:innen und öffentlicher Hand unabdingbar ist, könnten hier neue Verhandlungsspielräume entstehen. Flankierend sollten existenzsichernde Angebote für den Übergang geschaffen werden, die die Risiken der Transformation für die Landwirtschaft mindern, z. B. durch temporäre Einkommensunterstützungen oder eine teilweise Absicherung möglicher Mindererträge bei der Erprobung neuer Anbaumethoden. Eine mögliche Regulierung oder Besteuerung tatsächlicher Wasserentnahmen und -verbräuche (auf Basis verbesserter Daten) sollte durch die

genannten unterstützenden Maßnahmen auch mit Blick auf die soziale Ausgewogenheit unterstützt werden.

Die Forschung sollte neue Leitbilder für die Landwirtschaft entwickeln. Lernen aus der praktischen Erfahrung mit Anpassungsstrategien steht im Vordergrund. Auch Werkzeuge und Metriken zur Bewertung von Anpassungsmaßnahmen sollten weiterentwickelt werden. Optionen wie Verhaltensänderungen oder kapazitätsbildende Maßnahmen können in aktuellen Klima- und Wirkungsmodellen bisher oft nicht erfasst werden. Geeignet skalierte Modelle sind nötig, die ökonomische, soziale, kulturelle und Managementaspekte für verschiedene Anpassungsoptionen berücksichtigen sowie Mehrgewinne und Zielkonflikte für nachhaltige Entwicklung einbeziehen. Bei der potenziellen Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen zur Reduktion wasserbezogener Risiken bestehen vor allem für Klimaszenarien mit Erwärmungen von 2 °C und mehr noch Wissenslücken. Speziell die Potenziale und Grenzen von Bewässerung als Anpassungsoption sollten besser erforscht werden, da globale Modellierungen die lokale Verfügbarkeit von Wasser häufig nicht hinreichend berücksichtigen. Auch um Wechselbeziehungen im Water-Energy-Food-Ecosystem Nexus besser zu verstehen und veränderte sektorale Ansprüche im Klimawandel zu projizieren, müssen Werkzeuge entwickelt werden.

Lösungsraum Städte

Bis zum Jahr 2050 wird die globale Stadtbevölkerung auf schätzungsweise 6,6 Mrd. Menschen anwachsen, zwei Drittel der Menschheit werden dann in Städten leben (UN, 2019). Zugleich sind die Auswirkungen des Klimawandels in vielen Städten weltweit immer deutlicher zu spüren. Neben steigendem Nutzungsdruck führen häufigere und längere Dürreperioden zu zunehmender Wasserknappheit, und weltweit steigt die Zahl der Städte, in denen bereits ein Wassernotstand ausgerufen werden musste. Häufigere und stärkere Extremniederschläge verursachen, verstärkt durch urbane Flächenversiegelung und überforderte Abwassersysteme, immer mehr Flut Schäden. Zunehmender Hitzestress, der durch den urbanen Hitzeinseleffekt noch verstärkt wird, führt zu einer steigenden Zahl hitzebedingter Todesfälle.

Der WBGU empfiehlt, ein klimaresilientes urbanes Wassermanagement gemäß des Leitbilds der wasser-sensiblen Stadtentwicklung flächendeckend zu etablieren. Es ist, gemeinsam mit dem Zugang zu erschwinglichem, klimaangepasstem Wohnraum, zentral für eine nachhaltige und gerechte Stadtgestaltung der Zukunft. Dabei muss die städtische Infrastruktur so gestaltet werden, dass sie den Auswirkungen von Extremereignissen resilienter begegnen kann und den lokalen Wasserkreislauf darin stärkt, zunehmende Wasserextreme effizient abzapuffern. Städtische Infrastruktur sollte sich in den

natürlichen Landschaftswasserhaushalt einfügen. Es ist essenziell, hierbei mittel- und langfristige Klimaprojektionen zu berücksichtigen. Synergien zwischen wasser-sensibler Stadtentwicklung und der Abfederung des städtischen Wärmeinseleffekts sollten gezielt angestrebt werden. Zudem sollten stets die Gewährleistung urbaner Lebensqualität und der Abbau sozialer Ungleichheiten als wesentliche Beiträge zu einer verbesserten urbanen Klimaresilienz mitgedacht und antizipiert werden.

Angesichts der vielerorts zunehmenden Verschärfungen im Wassersektor ist in Städten weltweit eine Beschleunigung der Anpassung an den Klimawandel dringend notwendig. Neben der Etablierung eines klimaresilienten Wassermanagements gehört hierzu insbesondere der Auf- und Ausbau klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur. Er muss insbesondere in schnell wachsenden Städten deutlich beschleunigt werden, um mit dem raschen, oftmals informellen Wachstum (vor allem in Afrika und Asien) Schritt zu halten. Dabei sollten informelle Stadtquartiere besondere Berücksichtigung finden, wobei z. B. auf dezentrale und nicht leitungs-gebundene Abwassersysteme zurückgegriffen werden kann. Bei deren Planung und Umsetzung sollte die lokale Bevölkerung einbezogen, über gesundheitliche Vorteile informiert und Kapazitäten vormals informeller Dienstleister gestärkt werden. Die Finanzierung des Auf- und Ausbaus klimaresilienter urbaner Wasserinfrastruktur in Ländern niedrigen und mittleren Einkommens sollte verstärkt in der bi- und multilateralen Entwicklungszusammenarbeit vorangetrieben werden.

Um Fehlanpassung und eine Verstärkung von Vulnerabilität und bestehenden Ungleichheiten zu verhindern, ist beim Auf- und Ausbau blau-grüner Infrastruktur in Städten darauf zu achten, negative soziale, gesundheitliche und ökologische Konsequenzen zu vermeiden. Verdrängungseffekten sollte vorgebeugt werden. Die Vegetation sollte für zu erwartende Klimaänderungen geeignet sein und ein geringes allergenes Potenzial aufweisen. Urbane Grünräume sollten gut erreichbar, zugänglich und auf die Bedürfnisse der lokalen Bevölkerung zugeschnitten sein.

Der WBGU empfiehlt weiterhin, Notfallpläne für urbanen Wassermangel zu entwickeln. Die Zahl der Städte, die aufgrund von Wassermangel den Notstand ausgerufen haben, steigt weltweit an. Dieses wachsende globale Problem hat ungelöst ein erhebliches Destabilisierungspotenzial und verdient daher in der internationalen Nachhaltigkeitspolitik höhere Aufmerksamkeit.

Darüber hinaus gilt es, wasserbedingte Grenzen des Städtewachstums in den Blick zu nehmen. Der Klimawandel wird viele Städte mit existenziellen Herausforderungen im Zusammenhang mit Wasser konfrontieren, die heute vielfach noch kaum thematisiert werden. Insbesondere Städte, die mittel- und langfristig das Problem

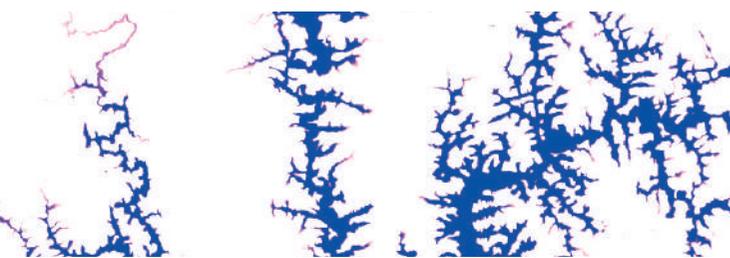
Zusammenfassung

der Wasserknappheit allein mit Infrastrukturmaßnahmen nicht wirksam werden lösen können, sollten nach Ausschöpfung aller Mittel rechtzeitig Optionen zur Begrenzung des Städtewachstums bzw. im Extremfall Optionen für einen geordneten Rückzug prüfen.

Im Zeitalter der Urbanisierung sehen sich immer mehr städtische Kommunen mit saisonaler oder dauerhafter Wasserknappheit konfrontiert. Zur effektiven Umsetzung bekannter Anpassungsmaßnahmen, aber auch zum Umgang mit den genannten hydrologischen Grenzbedingungen besteht Forschungsbedarf.

Bei existierender urbaner Infrastruktur sind innovative Ansätze für die Integration Resilienzsteigernder Lösungen im Bestand erforderlich, um transformative Anpassungsmaßnahmen umzusetzen. Dabei stellt sich die Frage, wie neue Wasserbereitstellungskonzepte möglichst wenig invasiv und kostengünstig im Bestand realisiert werden können.

Gerade in Regionen mit angespanntem Wasserangebot ist eine bessere zeitliche und räumliche Erfassung privater und gewerblicher Bedarfe notwendig, idealerweise in Echtzeit. Forschungsbedarf besteht zur Erfassungsdichte von Verbrauchsstellen, ethischer Aspekte der Datenerhebung, Datenverarbeitung, Datensicherheit und Bereitstellung sowie Möglichkeiten des Einsatzes künstlicher Intelligenz.



Schutz der Wasserqualität

Die Qualität von Wasserressourcen ist durch die Freisetzung von Schadstoffen und Pathogenen weltweit stark beeinträchtigt. Die Nutzung von Wasser als Transportmedium führt in vielen Fällen zu erheblichen Aufkonzentrierungen von Schadstoffen im Wasser. Dies überfordert regelmäßig die Selbstreinigungskraft der Natur. Der Schutz der Wasserqualität ist daher unabdingbar, um der Verknappung der Wasserressourcen durch die beschriebenen Verschärfungen entgegen zu wirken. Im Europäischen Green Deal ist bereits das Ziel „Zero Pollution“ bis zum Jahr 2050 verankert (Europäische Kommission, 2021). Zero Pollution bedeutet, dass die Verschmutzung auf ein Niveau gesenkt wird, welches für die menschliche Gesundheit und die Gesundheit von Ökosystemen nicht mehr schädlich ist. Das Leitbild Zero

Pollution ist von hoher Bedeutung und erfordert die Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft.

Zentrale Bausteine zur Umsetzung beider Leitbilder sind (1) eine zügige Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie, (2) moderne Testverfahren und Methoden zur Stoffbewertung, die persistente und (wasser-) mobile Schadstoffe besser erfassen können und präventiv stärker in behördlichen Zulassungsverfahren zu berücksichtigen sind, (3) integrierte Ansätze zur Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwässern sowie (4) der flexible Einsatz zentraler und dezentraler Abwasserentsorgungssysteme beim Ausbau sanitärer Infrastruktur in Ländern mit mittleren und niedrigen Einkommen.

Herstellerverantwortung in der EU ausweiten

Die EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist eine bedeutende Richtungsentscheidung zur Bewahrung der Wasserqualität und sollte nach Erlass zügig in den EU-Mitgliedstaaten umgesetzt werden. Der WBGU begrüßt insbesondere die integrierte erweiterte Herstellerverantwortung, wonach Produzenten von Arzneimitteln und Kosmetika mindestens 80 % der Kosten von Bau und Betrieb der zur Entfernung organischer Spurenstoffe notwendigen vierten Reinigungsstufe in Klärwerken tragen sollen. Es sollte geprüft werden, inwieweit eine Ausweitung der erweiterten Herstellerverantwortung für weitere Schadstoffgruppen (z. B. toxische und persistente Haushaltschemikalien und Pestizide) und Stoffeigenschaften (neben Toxizität auch Persistenz in der aquatischen Umwelt) möglich ist. Bei der Umsetzung der EU-Kommunalabwasserrichtlinie ist entscheidend, Anreize zur Reduktion der Emission umweltgefährdender Stoffe zu setzen, z. B. durch eine Staffelung der Beteiligung von Unternehmen nach Umweltgefährdung der in Verkehr gebrachten bzw. produzierten Stoffe oder Ausnahmen für rasch abbaubare Produkte.

Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abwasser ausweiten

Abwasser ist eine wertvolle Ressource und sollte in dreierlei Hinsicht zur Schließung von Lücken in der Kreislaufwirtschaft genutzt werden. Abwasser sollte erstens neben der Rückführung in die Gewässer je nach Bedarf und entsprechend seiner Qualität z. B. zur Bewässerung in der Landwirtschaft aufbereitet und wiederverwendet werden. Zweitens sollten Potenziale zur Rückgewinnung von Energie aus den Prozessen der Abwasserbehandlung stärker genutzt werden. Dies kann auch helfen, die in der EU-Kommunalabwasserrichtlinie angestrebte Energieutralität kommunaler Kläranlagen zu erreichen. Abwasser ist drittens ein Träger für Stoffe, die teilweise als schädlich gelten, aber als wertvolle Sekundärrohstoffe genutzt werden können, z. B. Biopolymere und Metallionen wie Lithium und Kupfer. Vorbild für den Umgang

mit ihnen könnte die in der deutschen Klärschlammverordnung festgeschriebene Rückgewinnung von Phosphor sein. Bei erfolgreicher Wiedergewinnung könnten der Bedarf an Primärabbau sowie die damit verbundenen negativen Umweltfolgen möglicherweise sinken. Allerdings sind nicht alle Abwässer hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und der technischen Machbarkeit gleichermaßen zur Rückgewinnung geeignet.

Der WBGU sieht in den Technologien zur Rohstoffrückgewinnung ein großes Potenzial. Materialrückgewinnung gewinnt an Bedeutung. Die Energiewende ist auch eine Materialwende, die sehr relevant für Wasser ist. Forschungsbedarf besteht zu den Risiken, die mit den für die Energiewende wichtigen Materialien (z. B. Lithium) verbunden sind, etwa ihr Verhalten in der Umwelt und für die Gesundheit.

Eintrag schädlicher Chemikalien vermeiden

Beeinträchtigungen der Wasserqualität durch Industriechemikalien, die sich entlang von Wasserpfaden ausbreiten und sich nicht rückgewinnen lassen, sind vermeidbar, wenn Stoffe vor der Registrierung und Inverkehrbringung auf Gesundheits- und Umwelteigenschaften getestet werden. Innovative biologische Hochdurchsatz-Testverfahren und Simulationen bei der Stoffentwicklung mittels künstlicher Intelligenz ermöglichen der herstellenden Industrie eine deutlich schnellere und umfassendere Risikobewertung und Kennzeichnung. Neue Stoffe lassen sich so kostengünstiger und trotzdem sicherer auf den Markt bringen; bereits auf dem Markt befindliche Stoffe lassen sich nachträglich besser charakterisieren. Dies kann substantiell zur Umsetzung des Zero-Pollution-Leitbilds beitragen und präventiv Wasser, Ökosysteme und die menschliche Gesundheit schützen.

Zentrale und dezentrale Abwassersysteme flexibel einsetzen

Die unzureichende Behandlung häuslicher Abwässer ist in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen eine Hauptursache für die Verschmutzung von Grundwässern und Oberflächengewässern mit pathogenen Mikroorganismen, organischen Kohlenstoffverbindungen, Nährstoffen und Makro- und Mikroplastik. Um dieser Form der Verschmutzung zu begegnen, wurde historisch der kostenintensive Aufbau einer zentralen Abwasserbehandlung mit ausgedehnten Kanalnetzen nach Vorbild der Hocheinkommensländer favorisiert. Für viele formelle und insbesondere informelle Siedlungen in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen ist eine zentrale Abwasserbehandlung jedoch keine geeignete, standortgerechte Lösung.

Vielversprechend ist dagegen der flexible Einsatz zentraler und dezentraler Abwassersysteme wie das Konzept der Citywide Inclusive Sanitation (CWIS) mit Fokus auf

einem sozial ausgewogenen Zugang aller Bevölkerungsgruppen und aller Stadtteile zu Wasser, Sanitär und Hygiene (WASH). CWIS versteht Abwasserentsorgung und -behandlung als Servicekonzept und nicht als reine Infrastrukturversorgung; verschiedene technische Lösungen können gleichberechtigt betrachtet und flexibel eingesetzt werden. Dazu gehören die zentrale Kanalisation, aber auch dezentrale, nicht an ein Abwassernetz angeschlossene Sanitäranlagen (non-sewered sanitation) mit Fäkalschlammmanagement. Internationale Geldgeber (Weltbank, Asian Development Bank) und Branchenverbände (International Water Association) haben das CWIS-Konzept bereits aufgegriffen. Der WBGU empfiehlt die Förderung der Bereitstellung von Zugang zu sicherem Wasser und Hygiene anhand des CWIS-Konzepts statt einer Fokussierung auf ausschließlich zentrale Abwasserbehandlungskonzepte. Dies erfordert ein Umdenken bei Entscheidungsträgern, Geldgebern, Planungsbüros und Universitäten, um hygienische, dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme als echte Alternative zu zentralen Abwassersystemen zu sehen. Voraussetzung ist auch die Verbesserung und Formalisierung informeller, bestehender (unsicherer, unhygienischer) dezentraler, nicht leitungsgebundener Abwassersysteme, die Priorisierung von WASH in politischen Agenden sowie Übernahme von Leadership durch nationale Regierungen. Im Rahmen von Forschung müssen Finanzierungs- und Geschäftsmodelle für dezentrale, nicht leitungsgebundene Abwassersysteme entwickelt sowie deren technische Weiterentwicklung vorangetrieben werden.



Entwicklung einer klimaresilienten Wassergovernance

Um Schäden an Menschen und Natur zu vermeiden und Verteilungskonflikten vorzubeugen, bedarf es einer vorausschauenden, lern- und anpassungsfähigen Wassergovernance.

International Verantwortung übernehmen – Internationale Wasserstrategie entwickeln

Der WBGU empfiehlt die Entwicklung einer Internationalen Wasserstrategie als neuen Impuls für die Wasserdiplomatie (Abb. 3). Diese soll dazu beitragen, die



Abbildung 3

Vorschlag für eine Internationale Wasserstrategie. Die Internationale Wasserstrategie und nationale Wasserstrategien wirken mit dem lokalen Wassermanagement zusammen. Das lokale Wassermanagement umfasst neben Kommunen alle relevanten Akteure, inklusive selbstorganisierter Strukturen. Nationale Wasserstrategien sollten kohärent mit der Internationalen Wasserstrategie formuliert werden. Sie sollten lokal Maßnahmen des klimaresilienten Managements anstoßen sowie Nothilfe und Krisenmanagement beinhalten.

Quelle: WBGU

bisherigen Prozesse zu Wasser institutionell als Austausch- und Koordinierungsplattform zu verstetigen. Da zahlreiche Schnittstellen zu anderen Politikbereichen bestehen, z. B. zur Klima- und Biodiversitätsgovernance und nachhaltigen Landnutzung sowie zu regionalen (z. B. der EU) und nationalen Wasserstrategien, sollten die Kapazitäten an den Schnittstellen erhöht werden. Dadurch können Akteure, die bereits jetzt an den relevanten Schnittstellen arbeiten und über wasserspezifische Netzwerke und Erfahrungswissen verfügen, zukünftig eine aktive Rolle in der Aushandlung und Entwicklung einer Internationalen Wasserstrategie einnehmen.

Die Internationale Wasserstrategie sollte den Schutz der Ressource Wasser als gemeinsames Anliegen der Menschheit (common concern of humankind) anerkennen und dabei auch den Umgang mit grünem Wasser und dessen mögliche völkerrechtliche Regulierung adressieren. Sie sollte eine bessere Verzahnung der bestehenden Wasserkonventionen mit weiteren wasserrelevanten völkerrechtlichen Verträgen anstreben. In der Gestaltung des Prozesses sollte darauf geachtet werden, zunächst die weniger kontroversen Themen zu behandeln. Diese umfassen Trinkwasser, Integration, Bildung und Forschung sowie Kooperation. Zur Steigerung der Konsensfähigkeit sollte die Strategie zunächst auf unverbindliche Instrumente setzen. Langfristig

sollte die Internationale Wasserstrategie in ein völkerrechtliches Abkommen – vergleichbar den Rio-Konventionen – münden.

Die Internationale Wasserstrategie könnte Staaten motivieren und animieren, den bestehenden völkerrechtlichen Wasserkonventionen – der UN-Gewässerkonvention und der UNECE-Wasserkonvention – beizutreten. Was diesen Wasserabkommen fehlt, ist ein Fokus neben blauem auch auf grünem Wasser. Perspektivisch sollte daher ihr Anwendungsbereich erweitert werden, um einen klimaresilienten Umgang auch mit grünem Wasser zu erreichen. Die komplexen internationalen Wirkungszusammenhänge von grünem und atmosphärischem Wasser, z. B. Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf Verdunstungsströme und Niederschläge anderer Länder, müssen dringend erforscht werden. Für entsprechende wissenschaftliche Kooperation mit Blick auf eine nachfolgende angemessene Wassergovernance kann die Internationale Wasserstrategie als Plattform für regelmäßigem Austausch dienen. Eine Governance blauen und grünen Wassers könnte etwa Informations-, Konsultations- und Zustimmungspflichten bei Vorhaben und bei umfangreichen Landnutzungsänderungen umfassen, die signifikanten Einfluss auf den grenzüberschreitenden atmosphärischen Wassertransport haben.

Der WBGU befürwortet weiterhin die staatliche Anerkennung und Kodifizierung eines allgemeinen Menschenrechts auf Wasser, das nicht lediglich den Zugang zu sauberem Trinkwasser umfasst, sondern auch die Beteiligung der Zivilgesellschaft an wasserrelevanten Entscheidungsprozessen sowie den Zugang zu Umweltinformationen und Rechtsschutz. Die Anerkennung sollte zudem klarstellen, dass es sich bei dem Menschenrecht auf Wasser um eine Ausprägung des Menschenrechts auf eine gesunde Umwelt handelt, das ebenfalls noch nicht kodifiziert ist (WBGU, 2023).

Um den Transfer wissenschaftlicher Erkenntnisse zu Wasser in die Politik zu verbessern, spricht sich der WBGU für die Gründung und international geteilte Planung und Umsetzung einer Water Mapping Initiative aus. Sie sollte aus zwei Einheiten bestehen: einer Wissenschaftsplattform und einem Expert:innengremium. Die Wissenschaftsplattform soll bestehende wissenschaftliche Expertise zusammenführen, um drohende regionale Wassernotlagen zu identifizieren. Das Expert:innengremium steuert die Plattform und speist ihre Arbeitsergebnisse in politische Prozesse ein (Abb. 4).

Damit Wassernotlagen frühzeitig erkannt und eingrenzt werden bzw. Pläne zum Umgang mit ihnen entwickelt werden können, bedarf es der Zusammenführung globaler Daten und Monitoringkapazitäten. Dies umfasst die Prognosen von IPCC und IPBES, Langzeitdatenreihen, Monitoring- und Beobachtungsdaten aus nationalen

Monitoringeinrichtungen sowie die Ergebnisse aus regionalen und nationalen Forschungsvorhaben. Weiterhin müsste die Plattform Daten und Erfahrungen zu vergangenen Notlagen, Ergebnisse nationaler und überregionaler Wasserforschung sowie lokale Daten und Erfahrungen zu Notlagen integrieren. Hinzu kommen hoch aufgelöste räumliche und zeitliche Daten aus Beobachtungen und Prognosemodellen auf lokaler (Flusseinzugsgebiete), regionaler, nationaler bzw. internationaler sowie globaler Ebene. Sobald das von der UN-Umweltversammlung beschlossene, in Verhandlung befindliche Science-Policy Panel zu Chemikalien, Abfall und Vermeidung von Verschmutzung seine Arbeit aufgenommen hat, sollen seine Ergebnisse ebenfalls berücksichtigt werden.

Zur Aufsicht und Steuerung der Plattform soll ein Expert:innengremium eingerichtet werden. Sind drohende regionale Wassernotlagen mit planetarer Dimension identifiziert, soll das Gremium Prognosen für gefährdete Regionen erstellen. Parallel könnte es den Informationsaustausch zwischen Wissenschaft, Politik und Stakeholdern befördern. Auf internationaler Ebene soll das Expert:innengremium die UN-Wasserkonferenzen informieren. Zudem sollte das Gremium wasserbezogene Dialogplattformen in unterschiedlichen Weltregionen und in unterschiedlichen Länderverbänden sowie Politikdialoge für die Ausgestaltung einer Internationalen Wasserstrategie sowie die UN-Wasserkonferenzen 2026 und 2028 informieren. Lokal soll das Gremium bei drohenden

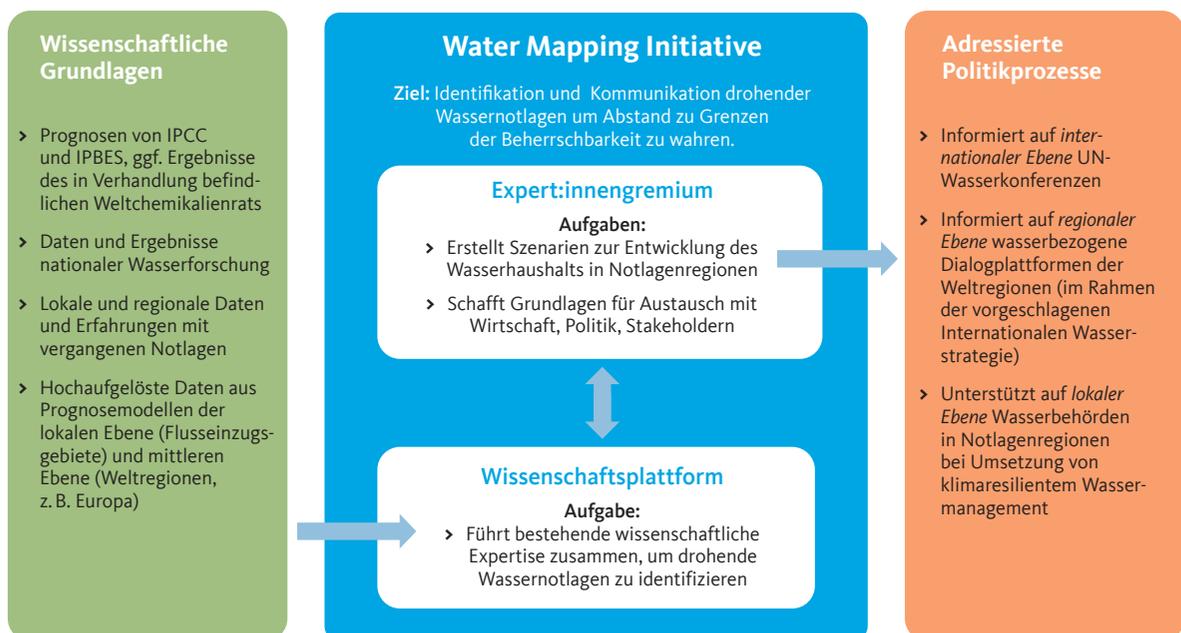


Abbildung 4

WBGU-Vorschlag für eine Water Mapping Initiative zur Vermeidung drohender regionaler Wassernotlagen. Die Wissenschaftsplattform soll drohende Wassernotlagen durch die Integration wissenschaftlicher Grundlagen möglichst frühzeitig erkennen. Das Expert:innengremium soll auf dieser Basis internationale, regionale und lokale Politikprozesse informieren und unterstützen.

Quelle: WBGU

Notlagen auch Wasserbehörden bei der Umsetzung von klimaresilientem Wassermanagement unterstützen.

Als Voraussetzung für die Arbeit der Water Mapping Initiative und für den grundsätzlichen Umgang mit wasserbezogenen Verschärfungen im Rahmen globaler Governance ist weitere Forschung erforderlich. Zentral ist, Erfahrungswissen in allen Regionen der Welt durch Daten aus Szenarien zu ergänzen, da der Klimawandel den Wasserkreislauf bereits stark verändert. Daher sollten Daten nicht nur auf lokaler, sondern auch auf Ebene der Weltregionen generiert werden. Es bedarf also dringend mehr klimasensibler Wasserforschung auf mittlerer Ebene. Die Auswirkungen und Wechselwirkungen globaler Änderungen und lokaler Maßnahmen müssen zudem für Entscheidungsprozesse als Informationsquelle zur Verfügung stehen. Nur wenn Kapazitäten für Datenerhebung und Modellierung in den Ländern mit niedrigem Einkommen vor Ort aufgebaut werden, kann klimaresiliente Planung auch umgesetzt werden.

Für die Verstärkung der UN-Wasserkonferenzen bedarf es der Einrichtung eines UN-Wassersekretariats, das zukünftig durch den Sondergesandten für Wasser (special envoy) geleitet werden könnte. Eine Internationale Wasserstrategie sollte zudem regelmäßige Treffen sowohl auf UN-Ebene als auch auf Ebene der unterschiedlichen Weltregionen beinhalten. Neue regionale Forschungsallianzen könnten diese regionalen Plattformen informieren. Hierfür werden die oben beschriebenen Szenarien auf mittlerer Ebene sehr relevant sein.

Vergleichbare Governanceansätze haben gezeigt, dass es die Motivation der Länder erhöht, sich mit globalen Risiken auseinanderzusetzen, wenn sich ihre Vertreter:innen regelmäßig auf regionaler Ebene über Ziele und Zielerreichung und bevorstehende Gefahren und Risiken in ihrer Weltregion austauschen können. Dies kann im Rahmen einer Internationalen Wasserstrategie durch die Stärkung regionaler Organisationen, wie z. B. der EU, erfolgen. Die gestärkten Regionalorganisationen könnten regionale Wassergovernanceplattformen koordinieren und so die Länder befähigen, globale und regionale Wasserziele möglichst effektiv umzusetzen. Schutzmaßnahmen auf regionaler Ebene könnten zudem durch internationale Finanzierung oder internationale Kooperation gefördert werden. In Europa könnte eine Wasserstrategie („EU Blue Deal“) auf den Europäischen Green Deal aufsetzen und auf die Europäische Biodiversitätsstrategie Bezug nehmen.

Politikkohärenz nach innen wie außen herstellen

Deutschland und die EU sollten in ihrem internationalen politischen Handeln Politikkohärenz zwischen den verschiedenen externen sowie zwischen den externen und internen Politikfeldern mit Wasserbezug herstellen. Im Rahmen ihrer internationalen Beziehungen verfolgen

sie eine Vielzahl von Zielen, die zum einen aus internationalen klima- und umweltpolitischen Vereinbarungen resultieren, zum anderen z. B. aus Wirtschaftsinteressen oder geopolitisch strategischen Interessen und Werten. Politische Maßnahmen zur Förderung dieser Ziele müssen auf Kompatibilität und Kohärenz geprüft werden. Dies kann verschiedenste Bereiche mit Wasserbezug betreffen, z. B. die Deckung der deutschen Energienachfrage, Agrarsubventionen oder Investitionsabkommen. Gerade vor dem Hintergrund geopolitischer Machtverschiebungen rückt die Bedeutung vertrauensvoller Partnerschaften und die Sicherstellung der Glaubwürdigkeit Deutschlands in seinem eigenen politischen Handeln zunehmend ins Zentrum politischer Abwägung. Auch in Vorbereitung der anstehenden Prozesse zur Neuverhandlung einer Post-2030-Agenda auf multilateraler Ebene ist die Förderung der europäischen und deutschen Glaubwürdigkeit in den Augen strategischer Partnerländer weltweit von zentraler Bedeutung.

Handels- und Wirtschaftsbeziehungen gestalten, privaten Sektor in die Verantwortung nehmen

Internationale Wirtschaftsbeziehungen und Handelspolitik sollten nachhaltige Wassernutzung fördern und Wasserknappheit in Regionen unter Wasserstress keinesfalls verschlimmern. Dies erfordert eine bessere Integration wasserbezogener Auswirkungen und Risiken im Rahmen internationaler Handelspolitik, beispielsweise im Rahmen der World Trade Organization (WTO), von regionalen Handelsabkommen oder auch von Investitionsschutzabkommen.

Handelsbeziehungen der EU sollten gezielt auf Effekte in anderen Ländern im Wasserbereich untersucht werden (Spillover-Effekte). Fehlanreize, die negative Spillover-Effekte begünstigen, z. B. aus Regelungen in Handelsabkommen oder durch Fernwirkungen europäischer Regulierung, sollten abgebaut werden. Zudem sollten Handelsbeziehungen dazu genutzt werden, die Umstellung auf wassersparende Produktions- und Anbaumethoden bzw. alternative Einkommensquellen zu fördern.

Der WBGU empfiehlt, den Schutz von Wasserressourcen in bestehenden Handelsabkommen stärker zu verankern. Dies sollte möglichst unter WTO-Recht geschehen, um kohärente Regelungen für eine möglichst große Gruppe von Ländern zu erreichen, jedoch auch in bi- und multilateralen Abkommen, da eine Reform des WTO-Rechts kurz- und mittelfristig schwierig sein dürfte (Zengerling, 2020).

Unternehmen und Investoren sollten zudem international stärker in die Verantwortung genommen werden. Basierend auf der Berichterstattung über Wassernutzung und Wasserrisiken sollten Unternehmen und Investoren dazu angehalten werden, Maßnahmen zu

ergreifen, um negative Auswirkungen ihrer Aktivitäten auf Wasserressourcen zu vermeiden. Länder niedrigen und mittleren Einkommens sollten bei der Einführung von Berichtspflichten unterstützt werden, z. B. durch kapazitätsbildende Maßnahmen. Deutschland sollte darüber hinaus prüfen, inwieweit der Schutz von Wasserressourcen und die Erfassung von Wasserrisiken stärker in das deutsche Lieferkettengesetz integriert werden können.

Gestaltender Staat

Der Staat sollte eine aktive, gestaltende Rolle im Bereich der Wassergovernance einnehmen. Um dem Vorsorge- und Verursacherprinzip gerecht zu werden, bedarf es demokratischer Prozesse, um Strategien und Instrumenten für Wasserpolitik auszuhandeln, zu konzipieren und umzusetzen. Die Zusammenarbeit mit verschiedenen Akteuren ist wichtig („mit und nicht gegen die Gesellschaft“); dies darf aber nicht bedeuten, dass sich der Staat zurückzieht und sich passiv gegenüber den Herausforderungen der Wassergovernance verhält. Der WBGU empfiehlt eine Erhöhung administrativer Kapazitäten und Ressourcen, so dass Staaten ihre Rolle und Verantwortung angemessen wahrnehmen können.

Ein zukünftiges klimaresilientes, sozial ausgewogenes Wassermanagement bedarf des gesteuerten und geplanten Zusammenspiels des gestaltenden Staats mit all seiner rahmengebenden Verantwortung (top down) sowie der in Teilen schon praktizierten und historisch gewachsenen Selbstorganisation (bottom up) im Wassermanagement, die nicht aus der Notwendigkeit heraus entsteht, sondern aus der Chance einer verbesserten Wassergovernance, die die Ziele eines klimaresilienten Wassermanagements beschleunigt umsetzen kann.

Selbstorganisation auf regionaler und lokaler Ebene fördern

Insbesondere in stark von wasserbezogenen Verschärfungen betroffenen Weltregionen spricht sich der WBGU für die gezielte Förderung von Strukturen aus, die (1) Selbstorganisation auf regionaler und lokaler Ebene ermöglichen (bottom-up), (2) Schwachstellen der formellen und häufig von staatlicher Hand gestalteten Wassergovernance ausgleichen sowie (3) auch Defizite informeller Systeme anerkennen und adressieren. Die Förderung von Selbstorganisation, gerade auch entlang der IWRM-Prinzipien, hat sich in der Vergangenheit bewährt, um partizipative und inklusive Formen der Entscheidungsfindung auszubauen. Gerade in Zeiten zunehmender Autokratisierungsprozesse auf politischer Ebene in der Mehrheit aller Staaten ist diese Förderung inklusiver Governanceansätze auf lokalen Ebenen und im Bereich des Wassermanagements wichtig.

Internationale Allianzen für klimaresilientes Wassermanagement

Beim Aufsetzen von Förderlinien im Bereich des Wassermanagements und der Wasserforschung sollte gezielt darauf geachtet werden, kooperative Forschungsprojekte mit Ländern zu fördern, die zunehmende Herausforderungen im Wassermanagement haben (z. B. Dürren, Überschwemmungen), die von sozialer Polarisierung und politischen Autokratisierungsprozessen betroffen sind bzw. die auf Ebene geopolitischer Aushandlungsprozesse von hoher strategischer Relevanz als Partner und Allianzen für Deutschland und Europa sind. Die empfohlene Wissenschaftskooperation sollte alle wissenschaftlichen Akteure umfassen, einschließlich Universitäten, beratende Institute und Think Tanks.

Bei der Unterstützung vertrauensbildender Maßnahmen, insbesondere in Konfliktgebieten, ist es wichtig, auf institutionelle Kapazitäten und einen auf gemeinsame Ziele fokussierten Dialog zu achten, und sich nicht vornehmlich auf technologische Lösungen und Datenverfügbarkeit zu fokussieren. Allzu oft wird Infrastrukturprojekten Vorrang eingeräumt, ohne die Bedürfnisse vor Ort für die langfristige Pflege dieser Infrastrukturen und Einbettung in formale und gesellschaftliche gelebte, informelle Steuerungssysteme mit zu bedenken. Schwieriger ist es, Normen, Denkmuster und Gewohnheiten zu ändern. Notwendig sind daher vertrauensfördernden Maßnahmen in Institutionen (über u. a. Politikkohärenz, Transparenz, Rechenschaftsablegung), langfristige Partnerschaften und ein echter Dialog mit den Partnern – auch bei der Finanzierung von Forschungsprojekten. Zu häufig sind (Forschungs-)Projekte kurzfristig angelegt und es findet kein echter Dialog zwischen Gebern und Empfängern statt.

Die deutsche und europäische Wissenschaftsförderlandschaft sollte gezielt inter- und transdisziplinäre Projekte im Bereich nachhaltigen Wassermanagements in unterschiedlichen Weltregionen und bezüglich verschiedener Managementherausforderungen fördern. Dies umfasst die wissenschaftliche Erarbeitung und lokal angepasste Innovationsentwicklung im Bereich der Bewässerungslandwirtschaft genauso wie städtische Wasserver- und -entsorgung, Behandlung von Abwasser sowie die Energieerzeugung durch Wasserkraft. Wichtig ist hierbei, auf transdisziplinäre Forschungsdesigns zu achten, in denen die transformative Co-Produktion von Wassermanagement-Wissen in enger Zusammenarbeit von Wissenschaftler:innen und Praktiker:innen gefördert wird.

Als Instrument einer nachhaltigen klimaresilienten Governance sollten Dialogforen mit deliberativen Elementen institutionell aufgebaut und miteinander verknüpft werden. Beteiligung wirkt präventiv und hilft, das Konfliktpotenzial zwischen verschiedenen Akteuren zu verringern. Dies fördert zudem eine demokratisch gelebte

Praxis und kann innerhalb von Ländern und international zur Friedenssicherung beitragen. Dialogforen bieten zudem die Chance, diverse Wissensformen und Akteure (z. B. Städte, Verbände, religiöse Gemeinschaften und Unternehmen) in die Lösungssuche einzubinden.

Finanzierung auch für lokale Ansätze mobilisieren und vermitteln

Weltweit wurde der in den UN-Nachhaltigkeitszielen (SDG 6) vereinbarte sichere Zugang zu Trinkwasser und Sanitäreinrichtungen verbessert, aber auch heute müssen noch 2,2 bzw. 3,5 Mrd. Menschen darauf verzichten. In 140 Ländern müssten die Investitionen auf insgesamt über 100 Mrd. US-\$ pro Jahr verdreifacht werden, um die SDGs 6.1 und 6.2 bis 2030 zu erreichen (Hutton und Varughese, 2016); hinzu kommen Aufwände für den Wasserressourcenschutz und die Reduktion wasserbezogener Risiken (auch durch den Klimawandel). Der jeweilige Nutzen wird allerdings auf das Zweieinhalb- bis Siebenfache der Kosten geschätzt (UNESCO, 2024; GCA, 2019).

Zur Finanzierung werden öffentliche wie private Investitionen benötigt. Daher muss gerade auch privates Kapital stärker mobilisiert werden, insbesondere in Niedrigeinkommensländern, in denen z. B. nur 1,4 % der privaten Finanzmittel, die 2012–2017 mit Mitteln der Entwicklungszusammenarbeit gehebelt wurden, auf den Bereich Wasser und Abwasser entfielen (OECD, 2019). Bereits heute zielen viele Strategien (z. B. der Weltbank, des BMZ sowie die deutsche Wasserstrategie) auf die Erhöhung der Attraktivität von Investitionen im Wassersektor und der Kreditwürdigkeit von Wasserversorgern ab. Fähigkeiten und Kapazitäten müssen vor allem bei öffentlichen Unternehmen und Institutionen für effiziente Planung, Investitionsabwicklung und Betrieb bzw. für Aufsicht und Regulierung aufgebaut werden. Aufgrund der beschriebenen wasserbezogenen Verschärfungen müssen aber auch die folgenden drei Handlungsfelder mehr Aufmerksamkeit erfahren.

Erstens sollten wasserbezogene Risiken transparent gemacht werden, um private und öffentliche Investitionen zu mobilisieren. Nur wenn Unternehmen, Investoren und Kommunen wasserbezogene Risiken und Auswirkungen ihrer Aktivitäten stärker berücksichtigen, werden sie vermehrt in deren Minderung investieren oder sich an Anstrengungen wie dem internationalen Klimaanpassungsfonds beteiligen. Die Bundesregierung sollte sich für eine Harmonisierung der nicht finanziellen Berichterstattung zu SDG 6 einsetzen, beispielsweise durch Unterstützung der International Platform on Sustainable Finance und eigene Aktivitäten. Aufbauend auf Erfahrungen mit der EU-Taxonomie und der Ausgestaltung „blauer“ Finanzinstrumente kann Deutschland dabei eine Vorreiterrolle einnehmen. Zum anderen sollten Informations- und Unterstützungsangebote zur Bewertung von

Wasserrisiken verbessert werden. Bessere Daten und langfristige Projektionen zu Wasseraufkommen, Wassernutzungen sowie regionalen und sektoralen Kopplungen sollten bedarfsorientiert erhoben, bereitgestellt, Kompetenzen zu deren Nutzung vermittelt und auch andere Länder dabei unterstützt werden. Klimatologische, meteorologische und hydrologische öffentliche Dienste und Forschungseinrichtungen müssen dafür gestärkt und vernetzt werden. Die Einrichtung eines digitalen und kostenfreien europäischen Zugangsportals (European Access Point, ESAP) sollte unterstützt werden. Öffentliche Unterstützungsangebote wie der Deutsche Nachhaltigkeitskodex sollten gestärkt und Erfahrungen dazu mit anderen Ländern ausgetauscht werden.

Zweitens sollte der Wassersektor durch stabile Einnahmekquellen attraktiver gemacht werden. Die Nutzer von Wasser oder spezifischer Infrastrukturen (z. B. Hochwasserschutz) sollten ebenso wie die Verursacher von Schäden stärker an Kosten beteiligt werden. Dafür sollte zum einen die Bepreisung von Wasser umfassend, aber sozial ausgewogen sein und umweltbezogene Kosten mit abdecken. Ausnahmen bei Entnahmeentgelten sollten abgebaut werden. Zum anderen sollten Inverkehrbringer und Nutzer gewässerbelastender Stoffe stärker am Gewässerschutz beteiligt werden. In Deutschland und der EU gibt es hierfür im Rahmen einer erweiterten Herstellerverantwortung bereits Ansätze, die auf weitere Stoff- und Produktgruppen und -eigenschaften erweitert werden sollten. Deutschland sollte sich auch für eine EU-weite Pestizidabgabe einsetzen, die Umwelt- und Gesundheitsrisiken einbezieht und Stoffe mit höheren Risiken stärker belastet. Die Einnahmen können für Gewässerschutz, zur Abmilderung außergewöhnlicher Belastungen, z. B. für Landwirte, sowie für Beratung zu alternativen Pflanzenschutztechniken verwendet werden. Die Bundesregierung sollte in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen den Aufbau von Kapazitäten zur Planung und Umsetzung von Preisreformen ebenso wie zur Einführung von Herstellerverantwortung und wasserbezogenen Umweltabgaben unterstützen.

Darüber hinaus sollten Maßnahmen mit Mehrgewinnen für die Allgemeinheit besser entlohnt werden. Öffentliche Kofinanzierung, Steuererleichterungen oder Subventionen können dabei Anreize für private Investoren erhöhen. Die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der EU sollte ab 2028 so reformiert werden, dass sie die Erhaltung von Wasserressourcen und naturbasierte Maßnahmen mit Mehrgewinnen stärker fördert und Fehlanreize vermeidet. Die in der ersten Säule der GAP vorgesehenen Öko-Regelungen sollten auf Kosten der bisherigen flächengebundenen Direktzahlungen ausgebaut werden. Auch indirekt wasserwirksame Subventionen sollten wasserbezogene Mindeststandards erfüllen und könnten z. B. auf Basis der Do-No-Significant-Harm-Prinzipien

der EU-Taxonomie geprüft werden. Länder mit niedrigen und mittleren Einkommen können, sofern sie die notwendigen institutionellen Voraussetzungen erfüllen, durch wasserbezogene Debt Swaps (Schuldenerlass unter Auflagen) bei der Einführung eines klimaresilienten Wassermanagements unterstützt werden.

Schließlich sollte die Einnahmengenerierung und -verwendung auf lokaler Ebene gestärkt werden. Aber auch Einnahmen aus zentral erhobenen Abgaben, z. B. auf wassergefährdende Produkte, sollten Kommunen und Städten anteilig zufließen, um daraus resultierende Aufgaben zu erfüllen (z. B. Wasseraufbereitung). Dies kann durch horizontale Ausgleichsmechanismen ergänzt werden, wenn Kosten und Nutzen lokaler Maßnahmen in unterschiedlichen Kommunen anfallen. In Mittel- und Niedrigeinkommensländern erfordert eine effizientere Erhebung und Verwendung von Einnahmen oftmals institutionelle und strukturelle Reformen, Korruptionsbekämpfung sowie mehr Transparenz und Rechenschaftspflicht.

Drittens sollten vermittelnde Institutionen (Intermediäre) und lokale Kooperationsplattformen strategisch gestärkt bzw. aufgebaut werden: Spezialisierte Banken, revolving Wasserfonds, NGOs oder Forschungseinrichtungen können kleinere Projekte bzw. Wasser- und Landakteure sowie öffentliche und private Investoren „poolen“, zwischen ihnen vermitteln und geeignete Finanzierungen strukturieren. Mit Hilfe dieser Intermediäre sollten die EU, nationale und subnationale Regierungen lokale Austausch- und Kooperationsformate zwischen Stakeholdern und Geldgebern flächendeckend institutionalisieren. In diesen können eine gemeinsame Wissensbasis hergestellt, Strategien und Maßnahmen abgestimmt sowie Finanzierungen organisiert werden. Begleitend sollten öffentliche Kapazitäten und Best-Practice-Netzwerke für die Umsetzung ergebnisorientierter Blended-Finance-Ansätze aufgebaut und Vergütungsmodelle für Projekte mit ökologischen und sozialen Mehrgewinnen geplant, überprüft und skaliert werden.

Forschungsbedarf besteht u. a. zu (1) Projektionen potenzieller wasserbezogener Schäden, Anpassungskosten und Mehrgewinnen sowie der Modellierung von Unsicherheiten; (2) Auswirkungen möglicher wasserbezogener Schäden auf Volkswirtschaften und den Finanzsektor; (3) Möglichkeiten zur stärkeren Beteiligung institutioneller Investoren bei der Finanzierung wasserbezogener Ziele; (4) hybriden Finanzierungsinstrumenten und neuen Geschäftsmodellen für naturbasierte Ansätze; (5) der effizienten Bewertung lokaler Mehrgewinne naturbasierter Ansätze und ihrer systematischen Nutzung; (6) Wirkungen einer erweiterten Abgabenreform inklusive z. B. nicht beabsichtigten Belastungen Dritter oder Verlagerungen verschmutzungsintensiver Wirtschaftsaktivitäten.

Wissenschaft und Bildung für eine nachhaltige WasserZukunft

Dem Wissenschaftssystem kommt beim Umgang mit Herausforderungen und Verschärfungen eine zentrale Rolle zu. Besonders die durch den anthropogenen Klimawandel bedingte Nichtstationarität hydrologischer Regime erfordert die kontinuierliche Produktion von Wissen und Daten, die bei Innovationen zur Sicherung der Wasserbedarfe für Mensch und Ökosysteme berücksichtigt werden müssen. Nichtstationarität bedeutet, dass die Annahme, ein System weise eine vorhersagbare, aus empirischen Beobachtungen ableitbare Variabilität auf, nicht mehr haltbar ist. Wissenschaft kommt weiterhin verstärkt eine beratende und begleitende Rolle im Politikprozess zu. Die Komplexität und Veränderungsgeschwindigkeit der sozial-ökologischen Prozesse, verschärft durch den Klimawandel, verlangen gleichzeitig eine vorausschauende, lern- und anpassungsfähige lokale und globale Wassergovernance. Hierfür ist unabhängige, kritische Wissenschaft als Grundlage unerlässlich.

Die wissenschaftlichen Kapazitäten in Ländern mit niedrigen und mittleren Einkommen sollten gestärkt werden. Internationale Forschungsk Kooperationen können zu deren Aufbau beitragen. Bislang sieht der rechtliche Rahmen in internationalen Wissenschaftskooperationen vor, dass sämtliche Personal-, Sach- und Reise Mittel in den Wissenschaftseinrichtungen der Geberländer verwaltet werden. Als Mittel zur Stärkung der Wissenschaftskapazitäten empfiehlt der WBGU, die rechtlichen Voraussetzungen zur direkten Mittelverwaltung inklusive Abrechnung und Prüfung in Partnerländern zu schaffen. Dies stärkt die Rolle der dort forschenden Wissenschaftler:innen und schafft Kapazitäten in der Mittelverwaltung. Eine weitere Maßnahme wäre, die rechtlichen Voraussetzungen zur Weiterleitung von Mitteln zu schaffen, mit geteilter Haftung zwischen den involvierten Partnerinstituten und dem Geber.

In Citizen Labs können Bürger:innen aktiv an wissenschaftlichen Forschungsprojekten teilnehmen. Durch die Einbindung der Bürger:innen in den Entscheidungsprozess können Citizen Labs, ähnlich wie deliberative Partizipationsprozesse, zu resilienteren Strukturen in Kommunen beitragen. Sie können maßgeschneiderte und durch transparente Entscheidungen akzeptierte Lösungen für lokale Herausforderungen wie Wasserknappheit finden und Wasserressourcen besser schützen. Der WBGU hält diese Form der Bürgerbeteiligung zum Schutz von Wasser und Biodiversität für sehr wichtig und plädiert für ihren weiteren Ausbau.

Bildung ist für den Übergang zu einer nachhaltigen Gesellschaft im Allgemeinen sowie für die Vermeidung von Wasserkrisen im Speziellen essenziell. Maßnahmen wie Information, Aufklärung, die Aneignung von Wissen durch praktische Erfahrung oder öffentlicher Dialog

Zusammenfassung

stärken das Bewusstsein für die Bedeutung der Ressource Wasser. Selbstbestimmtes Handeln und eine aktive Beteiligung an Politikprozessen werden durch ein besseres Verständnis der Zusammenhänge von Lebensweise, Wirtschaft und Wasserqualität ebenso gefördert wie durch Kenntnisse über die neuen, klimawandelbedingten Herausforderungen im Wassermanagement und die komplexen Zusammenhänge globaler Governance. Der WBGU empfiehlt, verstärkt Bildungsprogramme national und länderübergreifend zu initiieren sowie eine internationale Diskussion über neue Formen des Wirtschaftens und der Wertschätzung von Ökosystemleistungen anzuregen. Weiterhin sollten Beratungs- und Schulungsprogramme – auch auf Basis der Ergebnisse des Wissensaustauschs – auf regionaler Ebene durchgeführt und auf die Begebenheiten vor Ort zugeschnitten werden, um so das Bewusstsein für lokale Wasserprobleme zu schärfen und Akteure zum Umdenken sowie zu gezieltem Handeln zu befähigen. Das Thema Wasser ermöglicht Kindern und Jugendlichen durch lebensnahe Lerneinheiten unter anderem mehr zu Wasserkreisläufen, der Wasserversorgung, der Bedeutung von Wasser für Mensch und Natur sowie den Folgen des Klimawandels zu erfahren. Es gibt bereits eine große Zahl an Lehrmaterialien für alle Altersstufen und Schularten. Der WBGU empfiehlt auf Grund der überragenden Bedeutung des Themas Wasser, dass Lehrpläne über das gesamte Schulspektrum hinweg sich des Themas fächerübergreifend verpflichtend annehmen.

Ausblick

Mit der UN-Wasserkonferenz 2023 und der Gründung der G7-Wasserkoalition im Jahr 2024 hat das Thema „Wasser in einer aufgeheizten Welt“ international neuen Aufwind bekommen. Dieses Momentum gilt es nun zu nutzen. Insbesondere sollten die für 2026 und 2028 anberaumten UN-Wasserkonferenzen helfen, die globale Bedeutung von Wasser politisch höher auf die Agenda zu setzen und Beschlüsse zu einer robusten Verankerung des Themas in der internationalen Nachhaltigkeitspolitik fassen. Dieses Gutachten will hierzu ein Beitrag leisten.

Literatur

- AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture (2024): Water use: Pressure on water resources (worldwide). Rom: FAO. <https://data.apps.fao.org/aquastat/?lang=en&share=f-8fd8d517-0a8f-4c8b-87c0-caf57a495585>, abgerufen am 15.07.2024.
- Caretta, M. A. et al. (2022): Water. In: Pörtner, H.-O. et al. (Hrsg.): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 551–712. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844.006>.
- CNRA – California Natural Resources Agency (2023): California's Groundwater Conditions: Semi-Annual Update October 2023 Fall Bulletin. Sacramento, Kalifornien: CNRA.
- Douville, H. et al. (2021): Water Cycle Changes. In: Masson-Delmotte, V. et al. (Hrsg.): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 1055–1210. <https://www.doi.org/10.1017/9781009157896.010>.
- EEA – European Environment Agency (2022): Beyond water quality: Sewage treatment in a circular economy. Kopenhagen: EEA. <https://www.doi.org/10.2800/897113>.
- Europäische Kommission (2021): Bericht der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament über die Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG), der Richtlinie über Umweltqualitätsnormen (2008/105/EG, geändert durch die Richtlinie 2013/39/EU) und der Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG). COM(2021) 970 final. Brüssel: EU. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52021DC0970>.
- GCA – Global Commission on Adaptation (2019): Adapt Now: A Global Call for Leadership on Climate Resilience. Rotterdam, Washington, D.C.: Global Center on Adaptation, World Resources Institute (WRI).
- Hajat, S. et al. (2023): Current and future trends in heat-related mortality in the MENA region: a health impact assessment with bias-adjusted statistically downscaled CMIP6 (SSP-based) data and Bayesian inference. *Lancet Planet Health* 7 (4), e282–e290. [https://www.doi.org/10.1016/s2542-5196\(23\)00045-1](https://www.doi.org/10.1016/s2542-5196(23)00045-1).
- He, C. et al. (2021): Future global urban water scarcity and potential solutions. *Nature Communications* 12, 4667. <https://www.doi.org/10.1038/s41467-021-25026-3>.
- Hu, F. und Tan, D. (2018): No Water, No Growth – Does Asia have enough water to develop? Hong Kong: China Water Risk (CWR).
- Hutton, G. und Varughese, M. C. (2016): The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water Sanitation, and Hygiene. Water and Sanitation Program: Technical Paper 103171. Washington, D.C.: World Bank Group. <http://documents.worldbank.org/curated/en/415441467988938343/The-costs-of-meeting-the-2030-sustainable-development-goal-targets-on-drinking-water-sanitation-and-hygiene>.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O. et al. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157964>.
- IPCC (2022): Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Pörtner, H.-O. et al. (eds.)]. Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press. <https://www.doi.org/10.1017/9781009325844>.
- IPCC (2023): Summary for Policymakers. In: Lee, H. und Romero, J. (Hrsg.): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Genf: IPCC, 1–34. <https://www.doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001>.
- Jones, E. R. et al. (2023): Sub-Saharan Africa will increasingly become the dominant hotspot of surface water pollution. *Nature Water* 1, 602–613. <https://doi.org/10.1038/s44221-023-00105-5>.
- Nie, Y. et al. (2021): Glacial change and hydrological implications in the Himalaya and Karakoram. *Nature Reviews Earth & Environment* 2 (2), 91–106. <https://www.doi.org/10.1038/s43017-020-00124-w>.
- OECD – Organisation for Economic Co-operation and Development (2019): Making Blended Finance Work for Water and Sanitation: Unlocking Commercial Finance for SDG 6 – Policy Highlights. Paris: OECD.
- OECD (2022): Global Plastics Outlook: Policy Scenarios to 2060. Paris: OECD. <https://www.doi.org/10.1787/aa1edf33-en>.
- Pekel, J.-F. et al. (2016): High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540 (7633), 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>.
- Ritchie, H. und Roser, M. (2017): Water Use and Stress. Oxford: Our World in Data, University of Oxford. <https://ourworldindata.org/water-use-stress>, erschienen am 1.07.2018.
- Rockström, J. et al. (2023): Why we need a new economics of water as a common good. *Nature* 615, 794–797. <https://doi.org/10.1038/d41586-023-00800-z>.
- Rusca, M. et al. (2023): Unprecedented droughts are expected to exacerbate urban inequalities in Southern Africa. *Nature Climate Change* 13 (1), 98–105. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01546-8>.
- SIWI – Stockholm International Water Institute und UNICEF – United Nations Children's Fund (2023): Water Scarcity and Climate Change Enabling Environment Analysis for WASH: Middle East and North Africa. Stockholm, New York: SIWI, UNICEF.
- UN – United Nations (2019): World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420). New York: UN.
- UN (2022): The Sustainable Development Goals Report 2022. New York: UN. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2022/goal-06/>.
- UNCCD – United Nations Convention to Combat Desertification (2023): Global Drought Snapshot 2023: The Need For Proactive Action. Bonn, New York: UNCCD.
- UNEP – United Nations Environment Programme (2021): Progress on Freshwater Ecosystems: Tracking SDG 6 Series – Global Indicator 6.6.1 Updates and Acceleration Needs. Nairobi: UNEP. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/36691>.
- UNESCO – United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation et al. (2024): The United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace. Paris: UNESCO.
- UNESCO et al. (2023): The United Nations World Water Development Report 2023: Partnerships and Cooperation for Water. Paris: UNESCO.
- Wada, Y. und Bierkens, M. F. (2014): Sustainability of global water use: past reconstruction and future projections. *Environmental Research Letters* 9 (10), 104003. <https://www.doi.org/10.1088/1748-9326/9/10/104003>.
- WBGU (2023): Gesund leben auf einer gesunden Erde. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- WBGU (2024): Biodiversität: Jetzt dringend handeln für Natur und Mensch. Politikpapier 13. Berlin: WBGU.
- WBGU (2020): Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration. Hauptgutachten. Berlin: WBGU.
- Zengerling, C. (2020): Stärkung von Klimaschutz und Entwicklung durch internationales Handelsrecht. Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“. Berlin: WBGU.

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU)

Der WBGU wurde 1992 im Vorfeld des Erdgipfels von Rio de Janeiro von der Bundesregierung als unabhängiges, wissenschaftliches Beratergremium eingerichtet. Der Beirat hat neun Mitglieder, die vom Bundeskabinett für eine Dauer von vier Jahren berufen werden. Der WBGU wird federführend gemeinsam durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung betreut. Er wird durch einen Interministeriellen Ausschuss der Bundesregierung begleitet, in dem alle Ministerien und das Bundeskanzleramt vertreten sind. Die Hauptaufgaben des WBGU sind:

- › globale Umwelt- und Entwicklungsprobleme zu analysieren und darüber in Gutachten zu berichten,
- › nationale und internationale Forschung auf dem Gebiet des Globalen Wandels auszuwerten,
- › im Sinne von Frühwarnung auf neue Problemfelder hinzuweisen,
- › Forschungsdefizite aufzuzeigen und Impulse für die Wissenschaft zu geben,
- › nationale und internationale Politiken zur Umsetzung einer nachhaltigen Entwicklung zu beobachten und zu bewerten,
- › Handlungs- und Forschungsempfehlungen zu erarbeiten und
- › durch Presse- und Öffentlichkeitsarbeit das Bewusstsein für die Probleme des Globalen Wandels zu fördern.