

Sozio-Hydrologie

von Marcus Nüsser, Susanne Schmidt und Juliane Dame

Dieser Text ist die herausgeberisch und redaktionell bearbeitete, aber noch nicht abschließend lektorierte und ungesetzte Vorabveröffentlichung eines Kapitels, das im Band

**Umwelt interdisziplinär
Grundlagen – Konzepte – Handlungsfelder**

**herausgegeben von Thomas Meier, Frank Keppler, Ute Mager,
Ulrich Platt und Friederike Reents**

bei Heidelberg University Publishing (heiUP) Open Access und in gedruckter Form erscheinen wird.

Text © die Autoren 2024



Dieser Text ist unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY-SA 4.0 veröffentlicht.

DOI: <https://doi.org/10.11588/heidok.00033351>

Sozio-Hydrologie

Marcus Nüsser^{1,2}, Susanne Schmidt¹ und Juliane Dame^{1,2,3}

¹Abteilung Geographie, Südasiens-Institut (SAI), Universität Heidelberg

²Heidelberg Center for the Environment (HCE), Universität Heidelberg

³Geographisches Institut, Universität Bonn

Zusammenfassung: Multiple und zunehmende Wasserkrisen der Gegenwart erfordern integrative Forschungskonzepte, um die komplexen Wirkungszusammenhänge zwischen Wasserverfügbarkeit, Wasserzugängen und hydrologischen Risiken zu verstehen. Seit 2012 hat sich für Untersuchungen an der Schnittstelle zwischen Umweltdynamik und sozialen Prozessen das Konzept der Sozio-Hydrologie etabliert. Unter diesem Begriff lässt sich eine große Bandbreite theoretisch-konzeptioneller, empirischer und angewandter Studien zusammenfassen, die primär auf einem naturwissenschaftlich geprägten Systemverständnis basieren. Häufig werden dabei quantitative Ansätze und Modellierungen genutzt, um Interaktionen und Rückkopplungen zwischen hydrologischen Prozessen und sozialen Entwicklungen zu analysieren. Im vorliegenden Beitrag wird das Forschungsgebiet der Sozio-Hydrologie in den breiteren Kontext einer integrativen Wasserforschung eingebunden, womit auch sozioökonomische und politische Entwicklungen in den Fokus rücken. Ein kennzeichnendes Merkmal sozio-hydrologischer Forschung liegt im Potential zum Wissenstransfer, womit die Ergebnisse von Studien in politische Entscheidungsprozesse eingebunden und als Planungsgrundlagen verwendet werden können. Neben dem Konzept der Sozio-Hydrologie werden unterschiedliche Indikatoren und Konzepte vorgestellt, mit denen Wasserverfügbarkeit, Wasserknappheit und Wasserverbrauch beschrieben werden können. Diese werden jeweils in einen disziplinhistorischen Zusammenhang eingebunden. Abschließend werden die Zukunftsaussichten integrativer Wasserforschung aufgezeigt.

Schlüsselbegriffe: Integrative Wasserforschung; Mensch-Wasser-Systeme; Wasserkrisen; Wasserverfügbarkeit; Wasserzugang

Wasser als Schnittstellenthema

Die Sicherstellung eines nachhaltigen Umgangs mit der Schlüsselressource Wasser gilt als eine der entscheidenden Herausforderungen (*grand challenges*) der Menschheit. Etwa 4 Mrd. Menschen sind für mindestens einen Monat im Jahresverlauf von Wasserknappheit betroffen (Mekonnen und Hoekstra 2016). Dabei ist das Auftreten von Wasserknappheit nicht nur von den jeweils vorherrschenden klimatischen und hydrologischen Bedingungen abhängig, sondern wird auch entscheidend durch politische, demographische und sozioökonomische Entwicklungen beeinflusst (Liu et al. 2017). Darüber hinaus werden viele humanitäre Katastrophen durch klimatische und hydrologische Extremereignisse wie Dürren und Hochwasser verursacht, die sich im Zuge des Globalen Wandels weiter verschärfen und häufiger auftreten werden (Van Loon et al. 2016; UN Water 2020). Im Jahr 2022 sind große

Teile Europas und Ostafrikas langanhaltenden Dürreperioden ausgesetzt gewesen. Dagegen ist beispielsweise Pakistan innerhalb von zwölf Jahren von zwei verheerenden Hochwasserereignissen heimgesucht worden. Im Sommer 2022 wurden infolge monsunaler Starkniederschläge ca. 75 000 km² und damit ein Viertel der Landesfläche überschwemmt, wodurch nach Aussagen der Koordinationsstelle für humanitäre Hilfe der Vereinten Nationen insgesamt 8 Mio. Menschen zeitweise vertrieben wurden und mehr als 1700 Todesopfer zu beklagen waren. Wie bereits bei der vorhergehenden Flut im Jahr 2010, bei der eine Fläche von 69 000 km² überschwemmt wurde, kann angenommen werden, dass ein unzureichendes Wassermanagement am Indus und seinen Nebenflüssen die Auswirkungen der Flut verstärkt haben (Wescoat, Halvorson und Mustafa 2000; Gaurav, Sinha und Panda 2011; Mustafa und Wrathall 2011). Die Zunahme künstlicher Eingriffe in den globalen Wasserkreislauf in Form von Staudämmen, Deichen, Flussbegradigungen und Grundwasserentnahmen stellt generell ein kennzeichnendes Merkmal des → Anthropozäns dar (Vörösmarty et al. 2004; Savenije, Hoekstra und van der Zaag 2014; Nüsser und Baghel 2017).

Das Zusammenwirken von hydrologischen Prozessen, wasserbaulichen Maßnahmen und gesellschaftlichen Entwicklungen wurde bereits in zahlreichen Studien untersucht. Doch erfordern die multiplen und zunehmenden Wasserkrisen der Gegenwart in Form unzureichender Wasserverfügbarkeit, ungleicher Wasserzugänge sowie die vielfältigen Risiken durch Fluten, Dürren und (Grund-)Wasserkontaminationen integrative Sichtweisen, um die komplexen Wirkungszusammenhänge besser zu verstehen. Integrative Zugänge sind sowohl in der Forschung als auch bei der Umsetzung angepasster Lösungsstrategien zwingend erforderlich. Völlig unabhängig voneinander und nahezu zeitgleich wurde der Begriff „Sozio-Hydrologie“ vor einem Jahrzehnt in zwei Artikeln (Nüsser, Schmidt und Dame 2012; Sivapalan, Savenije und Blöschl 2012) in die wissenschaftliche Debatte eingeführt. In dem einen Beitrag konzentrieren sich die Autoren auf die Grundlagen und den generellen Kontext des Forschungsfeldes und skizzieren die Perspektive einer integrativen neuen Wissenschaft jenseits disziplinärer Schranken und betonen die Koevolution von Gesellschaft und Wasser (Sivapalan, Savenije und Blöschl 2012). Dagegen wird das Konzept der sozio-hydrologischen Interaktionen von den Autorinnen und Autoren des anderen Beitrags am Beispiel einer regionalen Fallstudie aus dem indischen Trans-Himalaya entwickelt. Dabei wird nachgewiesen, dass die Wasserverfügbarkeit für die gletschergespeiste Bewässerungslandwirtschaft durch ein spezifisches Zusammenwirken von klimatisch-hydrologischen Faktoren, sozioökonomischen und politischen Entwicklungsprozessen geprägt wird (Nüsser, Schmidt und Dame 2012).

Nach einem Jahrzehnt hat sich die Sozio-Hydrologie zu einem facettenreichen Forschungsfeld mit internationaler Sichtbarkeit und einer großen Zahl theoretisch-konzeptioneller, empirischer und angewandter Studien aus nahezu allen Regionen der Erde etabliert (Di Baldassarre et al. 2015; Van Loon, Stahl et al. 2016; Pande et al. 2022). Die vorwiegend in der

Hydrologie und in den angewandten Ingenieurwissenschaften verankerte Sozio-Hydrologie basiert auf einem naturwissenschaftlich geprägten Systemverständnis, nach dem Interaktionen und Rückkopplungen zwischen hydrologischen Prozessen und gesellschaftlichen Entwicklungen quantitativ beschrieben, mathematisch analysiert und modelliert werden können. Das Forschungsinteresse besteht daher an größtmöglicher Berücksichtigung und Einbindung ökonomischer und sozialer Faktoren über Indikatoren, Kenngrößen und Schwellenwerte (Sivapalan, Savenije und Blöschl 2012). Dem positivistischen Anspruch auf Objektivität in der Beschreibung und Analyse von Rahmenbedingungen, Strukturen, Prozessen und Mechanismen folgend, stehen dabei oftmals Modellierungen gekoppelter Systeme und die Entwicklung von Zukunftsszenarien im Vordergrund. Unter dem Titel *Panta Rhei* (Alles fließt) hat die *International Association of Hydrological Sciences* (IAHS) die Schnittstellenforschung zum Schwerpunkt der Forschungsdekade 2013–2022 erklärt (Montanari et al. 2013). In einer Reihe von Überblicksarbeiten (Blair und Buytaert 2016; Ross und Chang 2020; Xia, Dong und Zou 2022; Yu et al. 2022) werden die Entwicklung dieser interdisziplinär angelegten Forschungsrichtung nachgezeichnet und Anknüpfungspunkte zur produktiven Integration natur- und sozialwissenschaftlicher Sichtweisen und Methoden aufgezeigt.

Ein kennzeichnendes Merkmal sozio-hydrologischer Forschung liegt im offensichtlichen Potential zum Wissenstransfer, womit die Ergebnisse von Forschungsarbeiten in politische Entscheidungsprozesse eingebunden und als Planungsgrundlagen verwendet werden können. Dabei müssen Wasserverfügbarkeit und Wassernutzung generell im Kontext globaler Nachhaltigkeitsziele (*Sustainable Development Goals*) (→ Nachhaltigkeit) betrachtet werden (Di Baldassarre et al. 2019). Spätestens mit diesen 2015 von der Generalversammlung der Vereinten Nationen verabschiedeten Entwicklungszielen stehen Wasserthemen verstärkt auf der politischen Agenda. Dabei werden Fragen nach gerechter Wasserverteilung und ungleicher Risikoexposition sowohl im Rahmen nationaler Entwicklungspfade als auch auf globaler Ebene diskutiert. In den angerissenen Problemfeldern zeigt sich, dass die sozio-hydrologische Grundannahme einer grundsätzlichen Kopplung sozialer, ökologischer und hydrologischer Systeme relevant für anwendungsorientierte Studien ist. Umgekehrt erfordern angemessene politische Steuerungsmaßnahmen die Berücksichtigung lösungsorientierter Forschung und ganzheitlicher Betrachtungen. Damit steigt der Bedarf an praxisrelevanten Studien und verbindenden Forschungskonzepten, die auf methodischer Ebene interdisziplinär ausgerichtet sein müssen. Der Beitrag skizziert die Bandbreite an konzeptionellen und methodischen Zugängen, diskutiert aktuelle wissenschaftliche Bezüge und zeigt zukünftige Perspektiven integrativer Wasserforschung auf.

Entwicklung integrativer Wasserforschung

Die vielfältigen Beziehungen an der Schnittstelle zwischen Wasser und Gesellschaft stellen seit den frühen Zivilisationen an Nil, Euphrat, Indus und Jangtsekiang einen bedeutenden Gegenstand historisch ausgerichteter Forschungsarbeiten dar. Das Zusammenspiel von Bewässerungsfeldbau, hydraulischen Produktionsweisen und dem Ausbau bürokratischer Funktionärseliten interpretierte bereits Karl S. Wittfogel (1957) als miteinander verwobene Merkmale, die für die Entstehung und Sicherung despotischer Herrschaft kennzeichnend seien. Nach seinem vorwiegend auf großregionaler Maßstabsebene angelegten Konzept der hydraulischen Gesellschaften konstituieren sich staatliche Macht und autoritäre Herrschaftsformen durch technologische Überlegenheit in Gebieten, die zur Produktionsform weitflächiger Bewässerungslandwirtschaft geeignet sind. Durch Ausbau der Infrastruktur mit Kanälen, Dämmen und Überflutungsregulierungen und mit dem Aufbau hierarchisch organisierter bürokratischer Apparate zur Kontrolle der Wasserressourcen, entwickelten und verfestigten sich Machtverhältnisse und soziale Stratifizierungen. Kritisiert wurde das in der Hochphase des Kalten Krieges publizierte Hauptwerk des deutsch-amerikanischen Soziologen und Sinologen aufgrund einer Pauschalisierung von Kulturen, linearen Kausalitäten und geodeterministischen Argumentationsmustern mit unverhohlenen ideologischer Zielsetzung (Davies 2009; Banister 2014). Dagegen sind die wirkmächtigen und als *Hydrocracies* bezeichneten bürokratischen Strukturen zur Wasserkontrolle und -verteilung (Molle, Mollinga und Wester 2009; Conker und Hussein 2019) auch für aktuelle Analysen bedeutend und lassen sich in vielen Ländern nachweisen. Als mächtige staatliche Akteure können exemplarisch die pakistanische *Water and Power Development Authority* (WAPDA) und die *Lesotho Highlands Development Authority* (LHDA) angeführt werden, die die Bereiche Staudammbau, Bewässerung und Energieerzeugung auf staatlicher Ebene steuern. Diese Akteure prägen die wirtschaftlichen und politischen Entwicklungspfade in den jeweiligen Ländern maßgeblich.

Seit Beginn der 1990er-Jahre sind wegweisende Arbeiten zur kleinräumigen Nutzung von Wasserressourcen aus institutionenökonomischer Perspektive vorgelegt worden. Darin wird gezeigt, dass gemeinschaftlich genutzte Ressourcen auf lokaler Maßstabsebene durch institutionelle Arrangements kooperativ und nachhaltig bewirtschaftet werden können (Ostrom 1990; 2000). Neben Beispielen aus dem Bereich der pastoralen Weidenutzung bezieht sich die US-amerikanische Politikwissenschaftlerin und Nobelpreisträgerin Elinor Ostrom in ihren Arbeiten insbesondere auf die Rolle informeller Institutionen im Bewässerungsfeldbau. An zahlreichen lokalen Fallstudien aus dem Schweizer Wallis, aus Nepal und weiteren Regionen weist sie nach, wie lokale Gemeinschaften allgemein akzeptierte Wasserverteilungsregeln miteinander vereinbaren, um das Funktionieren von Bewässerungssystemen langfristig sicherzustellen. Hierzu gehören Aushandlungen zwischen Nutzergruppen und Haushalten zur Bereitstellung von Arbeitskräften für Bau- und

Wartungsarbeiten an den Zuleitungskanälen und in anderen Bereichen der Bewässerungsinfrastruktur (Ostrom 2014).

In der Human-→geographie und anderen Sozialwissenschaften werden ebenfalls bereits seit den 1990er-Jahren verstärkt krisenhafte Beziehungen im gesellschaftlichen Umgang mit der Ressource Wasser auf unterschiedlichen räumlichen Skalen untersucht. Dabei stehen vor allem kritische und neomarxistische Forschungszugänge und -perspektiven im Mittelpunkt. Gegenüber dem in den Natur- und Ingenieurwissenschaften verbreiteten positivistischen Denken sind Forschungsansätze und Perspektiven in den Sozialwissenschaften generell stärker von konstruktivistischen Vorstellungen geprägt, wobei deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Disziplinen und individuellen Forschungsausrichtungen bestehen. Die Interaktionen zwischen gesellschaftlichen Prozessen und Wasserressourcen werden als hydro-soziale Kreisläufe aufgefasst (Swyngedouw 2009; Budds, Linton und McDonnell 2014; Linton und Budds 2014). Dabei stellt das Wasser als „*socionature*“ eine hybride Kategorie dar, in dem materielle und diskursive Prozesse untrennbar miteinander verwoben sind (Swyngedouw 2004) (→ Natur-Kultur-Dualismus und Hybridisierung).

„Water is constantly fetishized in media and officialdom alike either as crystalline, liquid, pure, flowing from some snowy wonderland, or contaminated, fetid, and polluted. But what makes it such a powerful lens onto larger processes (and also so hard to focus) is an indeterminacy that drives far beyond such categorizations. It moves into and out of different states, changes shape and densities, dissolves and deposits solids, flows over and under landscapes and through bodies, and it resists compression” (Banister 2014, 207).

Ungleiche Machtbeziehungen zwischen Akteurinnen und Akteuren und konfliktträchtige Aushandlungen bilden zentrale Themen in kritischen Analysen zur Wasser-Governance, in denen enge Bezüge zur Politischen Ökologie und ihrem Paradigma der „politisierten Umwelt“ erkennbar sind. Beispiele bieten Studien zur unzureichenden Wasserqualität infolge von Tagebauminen im Rahmen extraktiver Wassernutzung durch Bergbaukonzerne (Sosa, Boelens und Zwarteven 2017) oder der Bau von großen Staudämmen und wasserscheidenüberschreitenden Wassertransfersystemen mit weitreichenden sozialen und ökologischen Auswirkungen (McCully 2001; Nüsser 2003; Kirchherr, Pohlner und Charles 2016; Nüsser und Baghel 2017), die sich nahezu weltweit finden lassen. Auch die zentrale Bedeutung gender-spezifischer Aspekte im Rahmen gesellschaftlicher Machtbeziehungen, haushaltsinterner Arbeitsteilung und ungleicher Zugangsmöglichkeiten zu Wasser rückt zunehmend in den Fokus (Alda-Vidal et al. 2017; Zwarteven 2017; Sultana 2018). Da Landbesitz und Wasserrechte häufig an männliche Haushaltmitglieder vergeben und vererbt werden, bleiben Handlungsspielräume für Frauen eingeschränkt. Zugleich sind sie in vielen regionalen Kontexten einer größeren Arbeitsbelastung in der Bewässerungslandwirtschaft ausgesetzt, wobei sie hierfür oftmals geringe Wertschätzung erfahren. Auch in informellen und formellen Organisationen des Wassermanagements haben sie seltener eine Stimme. Darüber hinaus sind typische Berufsfelder (ingenieurstechnische Tätigkeiten, Zuständigkeiten

im Wassermanagement) meist männlich dominiert. Letztlich sind auch Wissensgenerierung und Wissensprozesse einem gender-bias ausgesetzt (Zwarteveen 2017). Ein weiteres Themenfeld hydro-sozialer Arbeiten bilden urbane Wasserkrise, bei denen ungleiche Zugänge zur Trink- und Abwasserversorgung im Forschungsinteresse stehen (Swyngedouw 2004; McFarlane 2019; Sultana 2020; Müller 2022). Auch in der Bewässerungslandwirtschaft spielen Ressourcenzugänge und Verfügungsrechte, die sich in Abhängigkeit von den Machtpositionen der beteiligten Akteurinnen und Akteure differenziert darstellen, eine wichtige Rolle (Boelens 2014; Prieto 2015; Usón, Henríquez und Dame 2017).

Der hybride Charakter der Beziehungen zwischen Wasser und Gesellschaft mit konvergierenden Wasser-, Macht- und Kapitalströmen über unterschiedliche räumliche und zeitliche Skalen wird mit dem Konzept der *waterscapes* herausgestellt. Damit werden ebenfalls ungleiche Machtbeziehungen und Arrangements zwischen Akteurinnen und Akteuren in den Blick genommen und räumliche, materielle und diskursive Facetten hydro-sozialer Beziehungen thematisiert (Swyngedouw 2004; Budds und Hinojosa 2012; Karpouzoglou und Vij 2017; Müller, Dame und Nüsser 2020). Vor diesem Hintergrund haben Boelens und seine Koautoren (2016) das Konzept der hydrosozialen Territorien entwickelt, die sich durch Wechselwirkungen zwischen sozialen Praktiken, hydraulischen Technologien, naturräumlich-ökologischen Bedingungen, ökonomischen Strukturen und kulturell-politischen Institutionen konstituieren und (neu) geschaffen werden. Dieser Ansatz umfasst auch einen sogenannten „hydrokosmologischen Zyklus“, in dem auch lokale und indigene Sichtweisen auf Wasser und entsprechende symbolische Bedeutungen einbezogen werden. In diesem Zusammenhang kann auch der am Beispiel der Niederlande entwickelte Begriff der *amphibious culture* (Van Dam 2016) erwähnt werden. Hierunter wird eine Reihe unterschiedlicher historisch-kultureller Anpassungsstrategien an Flutereignisse bei gleichzeitiger zentraler Rolle der Wasserwege als Verkehrsinfrastruktur verstanden. Diese Wasserwege liegen unter- oder knapp oberhalb des Meeresspiegels in einer von Deichen durchzogenen Landschaft.

Trotz dieser vielfältigen Arbeiten an der Mensch-Wasser-Schnittstelle hat es bis 2012 gedauert, ehe der Begriff Sozio-Hydrologie erstmalig in der wissenschaftlichen Literatur verwendet wurde, wobei bereits seit 2004 vereinzelt Studien mit hydro-sozialer Ausrichtung durchgeführt wurden (Abb. 1). Unmittelbar nach der Einführung des Begriffs Sozio-Hydrologie wurde der sich entwickelnden Forschungsrichtung der innovative Charakter abgesprochen (Sivakumar 2012). Weitere Kritik entzündete sich an mangelnder theoretischer Fundierung und unzureichender Berücksichtigung sozialer und politischer Machtbeziehungen. Auch wird die Vernachlässigung der Pluralität menschlicher Handlungen, Wahrnehmungen und Werte bemängelt. Dementsprechend beziehen sich kritische Kommentare auf die normative Auswahl und fehlende Reflexion der eingespeisten Variablen sowie auf die Wahl der verwendeten Modelle (Wesselink, Kooy und Warner 2017). Da das Handeln von

Akteurinnen und Akteure immer auch auf subjektiven Wahrnehmungen und Präferenzen basiert, die wiederum wesentlich von gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen abhängen, sind Handlungen generell nur eingeschränkt in Modellen abbildbar (Di Baldassarre et al. 2013; 2014). Darüber hinaus werden auch mangelnde Berücksichtigung von lokalem oder indigenem Wissen (Troy, Pavao-Zuckerman und Evans 2015) und fehlende Einbeziehung nicht-wissenschaftlicher Bedeutungen von Wasser (Krueger et al. 2016) kritisiert. Auch wurde ein weitgehendes Fehlen interdisziplinärer Studien in der konkreten Forschungspraxis bemängelt, obwohl gerade dies als ein Anspruch und Kernanliegen der Sozio-Hydrologie postuliert werde (Rusca und Di Baldassarre 2019; Di Baldassarre et al. 2021; Yu et al. 2022). Nichtsdestotrotz hat sich das Forschungsfeld im Verlauf der zweiten Dekade dieses Jahrhunderts mit einer Vielzahl von Beiträgen rasant entwickelt (Abb. 1).

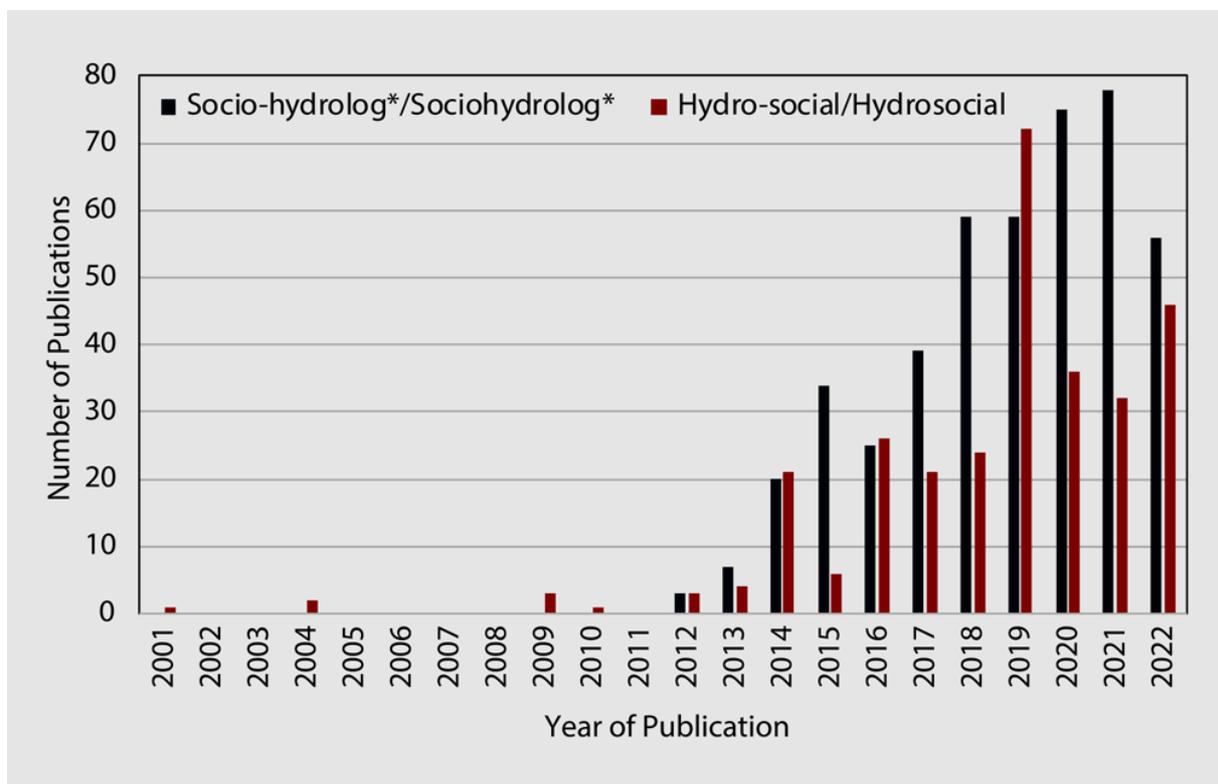


Abb. 1: Web of Science-Analyse zur Häufigkeit von Publikationen zu sozio-hydrologischen oder hydrosozialen Studien (Suchbegriffe socio-hydrolog* oder sociohydrolog* bzw. hydro-social oder hydrosocial im Titel, in den Keywords und/oder im Abstract; Stand: 31. Dezember 2022)

Eine eigenständige Richtung sozio-hydrologischer Studien hat die Abteilung Geographie des Südasien-Instituts der Universität Heidelberg nach dem ersten Beitrag (Nüsser, Schmidt und Dame 2012) in unterschiedlichen Hochgebirgsräumen etabliert (Abb. 2). Ausgehend von der Überlegung, dass die Wasserverfügbarkeit nicht nur vom Abfluss und weiteren hydrologischen Parametern, sondern auch von Zugangsrechten und wasserbaulichen Infrastrukturmaßnahmen abhängt, sind vergleichende integrative Studien in ariden und semiariden Abschnitten des Himalaya-Bogens durchgeführt worden. Basierend auf diesen

Arbeiten zum schmelzwasserabhängigen Bewässerungsfeldbau konnten Gemeinsamkeiten und lokalspezifische Unterschiede zwischen den einzelnen Fallstudien herausgearbeitet werden (Nüsser, Dame, Parveen et al. 2019). Die Forschungsarbeiten am Nanga Parbat (Nüsser und Schmidt 2017), im Trans-Himalaya von Ladakh (Nüsser und Baghel 2016; Nüsser, Dame, Kraus et al. 2019) und im Hunza-Karakorum (Parveen et al. 2015) fokussieren jeweils auf klimatisch-hydrologische Veränderungen der Kryosphäre (alle Formen von Wasser in gefrorener Form: Gletscher, saisonale Schneedecken, Permafrost; → Geowissenschaften), lokale Klimaanpassungsstrategien (→ Klimawandel), Landnutzung, Wasserverteilung und sozioökonomische Entwicklungsprozesse. Auch die Gefährdung durch Überschwemmungen nach Gletscherseeausbrüchen (GLOFs) und damit verbundene hochgebirgsspezifische Risiken wird an empirischen Studien detailliert nachgezeichnet und in einen größeren konzeptionellen Zusammenhang eingebunden (Schmidt et al. 2020). Weitere Arbeiten zur Wasserverfügbarkeit und -qualität sind in den nordchilenischen Anden durchgeführt worden. Neben dem Rückgang der hochgelegenen Gletscher wird hier die Wasserverfügbarkeit zusätzlich durch den Gold- und Kupferbergbau limitiert. Zudem hat sich der Wasserbedarf durch den Ausbau der exportorientierten Landwirtschaft in den letzten Jahren deutlich erhöht (Zang, Dame und Nüsser 2018; Hess et al. 2020; Dame et al. 2023). Die untersuchten Hochgebirgsräume werden durch dynamische und spezifische sozio-hydrologische Interaktionen geprägt, deren detaillierte Kenntnis für die Planung zukünftiger wasserbaulicher Maßnahmen und für die Sicherstellung lokaler Partizipation an Entscheidungsprozessen relevant sind.

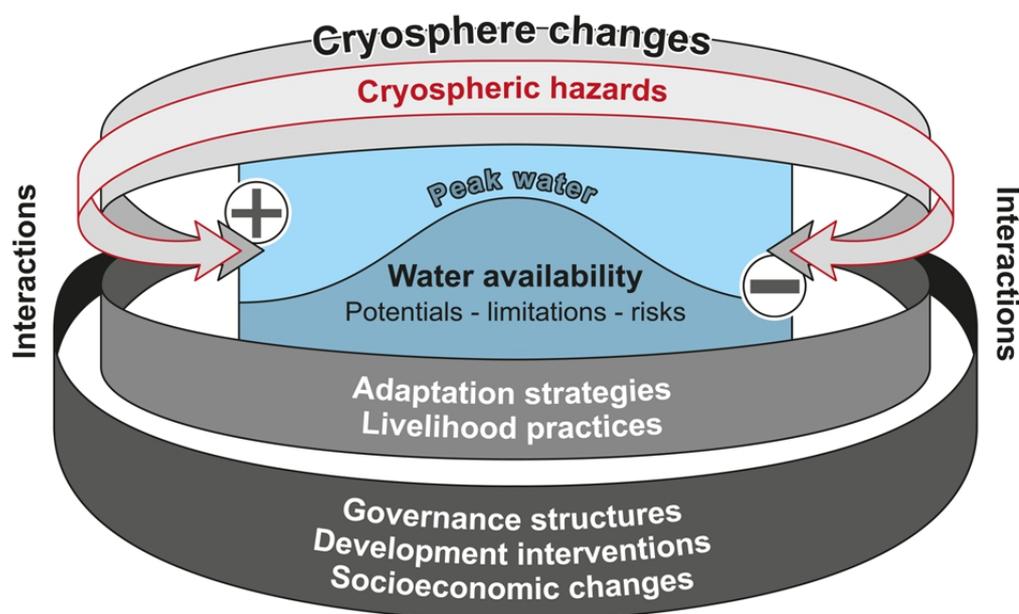


Abb. 2: Sozio-hydrologische Rahmenbedingungen für Hochgebirgsregionen: Die Wasserverfügbarkeit wird durch Veränderungen der Kryosphäre und sozioökonomische Entwicklungsprozesse beeinflusst. Die Symbole + und – zeigen Veränderungen und Wechselwirkungen der Wasserverfügbarkeit. Lokale Anpassungsstrategien müssen dabei sowohl langsam einsetzende Prozesse des Klimawandels (slow-onset processes) als auch einzelne plötzliche Flutereignisse (z. B. Gletscherseeausbrüche) sowie die jeweiligen Governance-Strukturen berücksichtigen

Indikatoren und Konzepte

Die skizzierte Entwicklung sozial-hydrologischer Forschungsarbeiten steht auch mit den auf globaler Ebene stattfindenden Initiativen und Konferenzen in einem deutlich erkennbaren Austauschverhältnis (Abb. 3). Inspiriert durch die UN-Konferenz für Umwelt und Entwicklung 1992 in Rio de Janeiro (→ Nachhaltigkeit) und die bereits zuvor im selben Jahr durchgeführte UNESCO-Konferenz zu Wasser in Dublin setzte eine Reihe an Initiativen zu globalen Wasserproblemen ein, um neue Forschungskonzepte und Lösungen in Bezug auf drängende Fragen der weltweiten Wasserkrise zu entwickeln. Hier sind insbesondere die Arbeiten von Malin Falkenmark am *Stockholm International Water Institute* (SIWI) zu nennen, in denen Balance, Konflikte und Kompromisse zwischen gesellschaftlichen Bedürfnissen und Umwelterfordernissen im Rahmen einer ökohydrologischen Betrachtung (*ecohydrological approach*) erörtert und wasserethische Fragen berücksichtigt werden (Falkenmark und Folke 2002; Falkenmark und Rockström 2004; Rockström, Falkenmark et al. 2009). Für die Bilanzierung von Wasserknappheit und Wasserstress haben Falkenmark, Lundqvist und Widstrand (1989) erstmalig einen Index entwickelt, nach dem absolute Wasserknappheit dann auftritt, wenn weniger als 1700 m³ Wasser pro Person und Jahr zur Verfügung stehen. Entsprechend dieser Überlegungen verschärft sich die Situation beim Auftreten von Wasserstress, wenn weniger als 500 m³ Wasser pro Person und Jahr zur Verfügung stehen. Zur weiteren Differenzierung des Wasserverbrauchs hat Falkenmark Mitte der 1990er-Jahre die Konzepte des Blauen und Grünen Wassers eingeführt. Demnach umfasst Blaues Wasser den Oberflächenabfluss und die in Aquiferen, Seen und aufgestauten Reservoirs gespeicherten Wassermengen, die für die künstliche Bewässerung eingesetzt werden können. Dagegen bezeichnet Grünes Wasser die im Boden gespeicherte Wassermenge, die für das Pflanzenwachstum unmittelbar zur Verfügung steht.

„What is Blue and Green Water? Blue water is the visible water contained in rivers and aquifers. Green water refers to the invisible water in the soil, which comprises a huge but often forgotten portion of water resources. Both sources originate from the rainfall captured within the water divide of the catchment. Climate defines the constraints to human activities in terms of evaporative demand, droughts, dry spells, rainfall seasonality and variability” (Falkenmark 2008, 10).

Eine Weiterentwicklung dieses Konzepts stellt das Virtuelle Wasser dar, das durch den britischen Geographen John Anthony Allan (1998) eingeführt wurde. Als virtuelles Wasser wird die für die Herstellung eines landwirtschaftlichen oder industriell gefertigten Produkts benötigte Wassermenge definiert. In die Berechnung gehen neben dem Verbrauch an Blauem Wasser (künstliche Bewässerung) und Grünem Wasser (Niederschlag und Bodenfeuchte) auch die abhängig von der Klimaregion unterschiedlich hohen Transpirationsverluste und das durch Produktion beeinträchtigte Graue Wasser ein (Hoekstra und Hung 2002).

So werden beispielsweise auf globaler Ebene durchschnittlich 1644 m³ Wasser für die Produktion von 1000 kg Getreide benötigt. Dabei liegt der Durchschnittswert mit 1827 m³ Wasser für die Produktion von Weizen am höchsten, für Gerste hingegen mit 1423 m³ deutlich niedriger (Mekonnen und Hoekstra 2011, 1585). Zudem zeigen sich aufgrund klimatischer Unterschiede und eines regional unterschiedlichen Bewässerungsbedarfs sehr verschiedene Werte. So liegt der durchschnittliche Wasserbedarf für die Produktion von Getreide auf kontinentaler Maßstabsebene in Afrika um ein dreifaches höher als in Europa (Mekonnen und Hoekstra 2011, 1583). Das Konzept basiert auf der Vorstellung einer globalen Dimension des Wassermanagements, wonach die Ressource in Form von Gütern gehandelt wird. Dadurch können einzelne Länder identifiziert werden, die ihren „Wasserfußabdruck“ externalisiert haben (Hoekstra und Hung 2005; Mekonnen und Gerbens-Leenes 2020). Nachhaltige Wassernutzung muss dementsprechend generell die Entwicklungen des Verbrauchs, der Produktion und der Handelsmuster einbeziehen und in einen Zusammenhang mit den begrenzten Süßwasserneubildungsraten stellen (Hoekstra 2017). (→ Nachhaltige Produktpolitik und nachhaltiger Konsum). Mit 70 % des globalen Wasserverbrauchs (Entnahme des Blauen Wassers) stellt die Bewässerungslandwirtschaft den dominierenden Sektor dar, durch den 40 % der globalen Nahrungsmittel erzeugt werden. Zur nachhaltigen Sicherung der Wassernutzung sind effizientere Bewässerungs- und Anbaumethoden notwendig. Dies kann zum einen über die Wassereinsparung durch Abdichtungen von Kanälen, Tröpfchenbewässerung oder Folienanbau oder durch eine erhöhte Anbauintensität erreicht werden (Abdullah 2006).

Im Zuge des → Klimawandels und der damit verstärkten Schnee- und Gletscherschmelze wird sich die saisonale Wasserverfügbarkeit in den Gebirgsregionen der Erde und ihren vorgelagerten Tiefländern verändern (Carey et al. 2017; Viviroli et al. 2020). Insbesondere in ariden Hochgebirgen wird die Wasserverfügbarkeit maßgeblich von Schmelzwässern aus der Kryosphäre bestimmt. Nach einem kurz- bis mittelfristig erhöhten Abfluss infolge des Gletscherrückgangs und der damit verbundenen Zunahme von Schmelzwasser wird ein Höhepunkt (als *Peak Water* bezeichnet) erreicht, bevor aufgrund abnehmender Größen und Volumen der Gletscher langfristig weniger Schmelzwasser zur Verfügung stehen wird (Huss und Hock 2018). Die prognostizierten Veränderungen des hydrologischen Abflussregimes werden weitreichende Folgen für die Wassernutzung im Hochgebirge und in den angrenzenden Tiefländern (Viviroli et al. 2020; Immerzeel 2021) haben. Für die betroffene Bevölkerung ist dabei die lokale Skala von größerer Bedeutung als die Betrachtung großräumiger Wassereinzugsgebiete.

Da Wasser im Gegensatz zu Erdöl keine endliche Ressource bildet, kann das Konzept *Peak Water* streng genommen nur in Bezug auf die Gletscherschmelze und auf die Extraktion von fossilem Grundwasser, also für Blaues Wasser, angewendet werden (Gleick und Palaniappan 2010; Palaniappan und Gleick 2013). Um auf die Übernutzung der Ressource Wasser in

einem weiter gefassten Umweltkontext hinzuweisen, ist der Begriff *Peak Ecological Water* vorgeschlagen worden (Palaniappan und Gleick 2013), da Wasser neben der Nutzung in Landwirtschaft, Industrie und privaten Haushalten auch eine fundamentale Rolle in allen Ökosystemen spielt. Unter Berücksichtigung des ökosystemaren Gesamtbedarfs verringert sich der Anteil des Blauen Wassers, der für die landwirtschaftliche und industrielle Nutzung entnommen werden darf, auf maximal 20 % des Abflusses, ohne die wasserabhängigen Ökosysteme negativ zu beeinträchtigen (Mekonnen und Hoekstra 2016).

„The urgency of this situation cannot be overstated. Yet, the need to anticipate, prevent, mitigate and adapt to this reality and potential “peak water” remain either poorly understood or greatly underestimated“ (Falkenmark 2008, 11).

In ähnlicher Weise verweist auch das breiter angelegte Konzept der Planetaren Grenzen (Rockström 2009; Rockström, Steffen et al. 2009) (→ Anthropozän) auf die potentielle Übernutzung der Ressource Wasser. Mit neun planetaren Grenzen werden anthropogene Eingriffe in das Öko- und Klimasystem beschrieben, bei denen bestimmte Kippunkte überschritten werden (können), wonach das Überleben der Menschheit gefährdet ist. Eine dieser Grenzen stellt die Nutzung des Blauen Wassers dar, die nach Rockström und seinen Koautorinnen und -autoren (2009) global 4000–6000 km³ pro Jahr nicht überschreiten sollte. Deutlich niedriger wird diese Grenze von Pastor et al. (2019) mit 2800 km³ pro Jahr angegeben. Nach Schätzungen liegt der aktuelle jährliche globale Wasserverbrauch bei

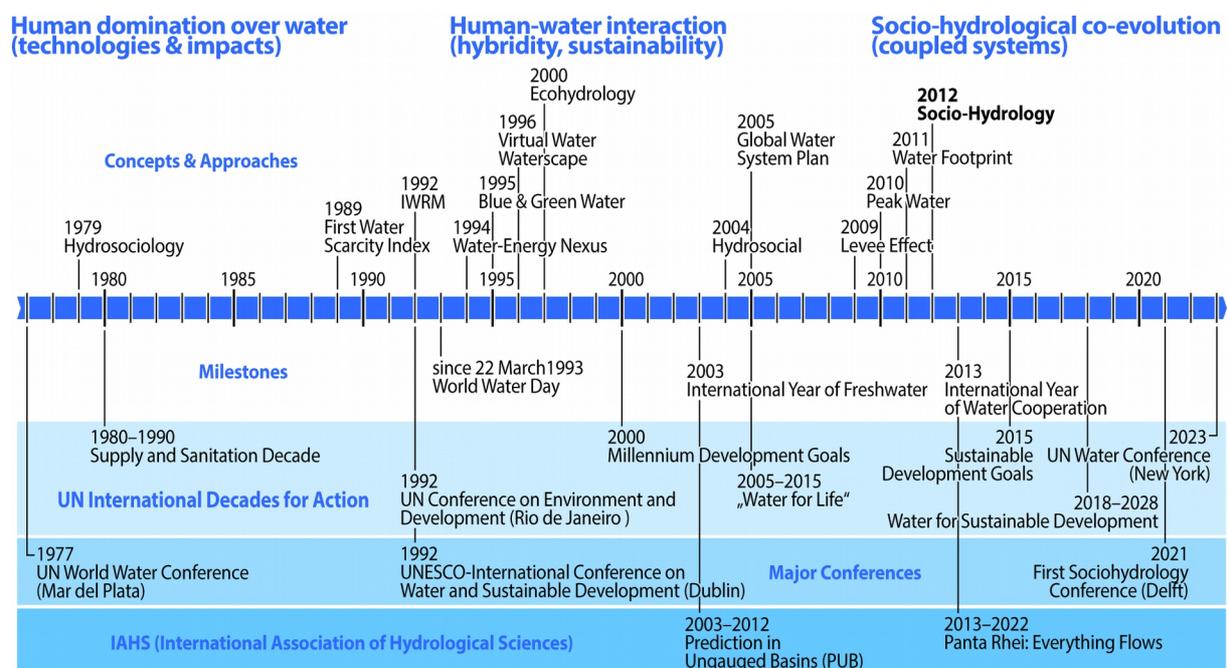


Abb. 3: Chronologie der Entwicklung integrativer Wasserkonzepte, wichtiger Konferenzen und Forschungsphasen

2600 km³ (Wang-Erlandsson et al. 2022). Aufgrund der vielfältigen Funktion von Wasser im Öko- und Klimasystem schlagen Gleeson und seine Koautorinnen und -autoren (2020) Untereinheiten für die Bestimmung planetarer Wassergrenzen vor. Im Gegensatz zu diesen rein quantifizierenden Konzepten stellen die Forschungsrichtungen Ökohydrologie (Rodriguez-Iturbe 2000) und Sozio-Hydrologie die Koevolution und Selbstorganisation von Umwelt beziehungsweise Gesellschaft in Bezug auf die Wasserverfügbarkeit in den Vordergrund (Bertassello, Levy und Müller 2021).

Zukünftige wissenschaftliche Perspektiven

Ausgehend vom zentralen Paradigma sozio-hydrologischer Studien, wonach sich Veränderungen in der Wasserverfügbarkeit koevolutionär mit Veränderungen im Bereich der Landnutzung und sozioökonomischen Prozessen entwickeln, stehen auch weiterhin Interaktionen und bidirektionale Rückkopplungen zwischen Wasser und Gesellschaft im Fokus der Forschungsrichtung. Dabei wird im Kontext der Herausforderung des Globalen → Klimawandels zukünftig auch eine verstärkte Integration lokaler Perspektiven und historischer Trajektorien notwendig sein, um nachhaltige Anpassungsstrategien zu entwickeln und angemessene Maßnahmen zu diskutieren und zu implementieren.

Für ein vertieftes Verständnis des Zusammenspiels sozioökonomischer und klimatisch-hydrologischer Veränderungen und ihrer Interaktionen sind kombinierte Methodenansätze unter Berücksichtigung verschiedener Raum- und Zeitskalen (Extra- und Interpolationen; Übertragbarkeiten) erforderlich. Neben punktuellen Abflussdaten ermöglichen multitemporale Daten und Methoden der Fernerkundung die Detektion und Quantifizierung von Landnutzungs- und Landbedeckungsveränderungen. Mit dem Einsatz räumlich sehr hochauflösender Satellitendaten und Drohnen können wasserbauliche Infrastrukturmaßnahmen und kleinräumige Veränderungen detailliert erfasst werden. Um die dabei relevanten sozioökonomischen und politischen Entwicklungen, Governance-Strukturen und Wahrnehmungen der lokalen Bevölkerung und Entscheidungsträger zu untersuchen, werden empirische Methoden der Sozialforschung auch weiterhin zwingend erforderlich bleiben. Durch Kombination dieser unterschiedlichen Methoden ist generell auch eine Triangulation von Einzelergebnissen möglich. Zukünftig wird ein noch größerer Bedarf an hydrologischen Modellierungen bestehen, die auch verschiedene Akteurinnen und Akteure (*agent based modelling*) einbeziehen (Yu et al. 2022).

Die Potentiale und Limitierungen interdisziplinärer Kooperationen zwischen den Natur- und Sozialwissenschaften müssen vor dem Hintergrund unterschiedlicher konzeptioneller, empirischer oder modellbasierter Vorgehensweisen, disziplinärer Selbstverständnisse und Analysepraktiken diskutiert und bewertet werden (→ Interdisziplinarität). Dies setzt allerdings die Bereitschaft gegenseitigen Verstehens von Begriffsbedeutungen sowie die Anerkennung

unterschiedlicher konzeptioneller und methodischer Zugänge zur Analyse von Mensch-Wasser-Systemen voraus. Ein produktiver Mittelweg mit einem Blick über den engeren Fokus disziplinärer Forschungsperspektiven hinaus bleibt dafür zwingende Voraussetzung.

Literaturverzeichnis

- Abdullah, Keizrul bin 2006. „Use of Water and Land for Food Security and Environmental Sustainability.” In *Irrigation and Drainage* 55 (3), 219–222. <https://doi.org/10.1002/ird.254>.
- Alda-Vidal, Cecilia, Maria Rusca, Margreet Zwarteveen, Klaas Schwartz und Nicky Pouw 2017. „Occupational Genders and Gendered Occupations: The Case of Water Provisioning in Maputo, Mozambique.” In *Gender, Place & Culture* 24 (7), 974–990. <https://doi.org/10.1080/0966369X.2017.1339019>.
- Allan, John Anthony 1998. „Virtual Water: A Strategic Resource Global Solutions to Regional Deficits.” In *Ground Water* 36 (4), 545–546. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1998.tb02825.x>.
- Banister, Jeffrey M. 2014. „Are You Wittfogel or against Him? Geophilosophy, Hydro-Sociality, and the State.” In *Geoforum* 57, 205–214. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.03.004>.
- Bertassello, Leonardo, Morgan C. Levy und Marc F. Müller 2021. „Sociohydrology, Ecohydrology, and the Space-Time Dynamics of Human-Altered Catchments.” In *Hydrological Sciences Journal* 66 (9), 1393–1408. <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1948550>.
- Blair, Peter und Wouter Buytaert 2016. „Socio-Hydrological Modelling: A Review Asking “Why, What and How?”” In *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (1), 443–478. <https://doi.org/10.5194/hess-20-443-2016>.
- Boelens, Rutgerd 2014. „Cultural Politics and the Hydrosocial Cycle: Water, Power and Identity in the Andean Highlands.” In *Geoforum* 57, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.02.008>.
- Boelens, Rutgerd, Jaime Hoogesteger, Erik Swyngedouw, Jeroen Vos und Philippus Wester 2016. „Hydrosocial Territories: A Political Ecology Perspective.” In *Water International* 41 (1), 1–14. <https://doi.org/10.1080/02508060.2016.1134898>.
- Budds, Jessica und Leonith Hinojosa 2012. „Restructuring and Rescaling Water Governance in Mining Contexts: The Co-Production of Waterscapes in Peru.” In *Water Alternatives* 5 (1), 119–137.
- Budds, Jessica, Jamie Linton und Rachael McDonnell 2014. „The Hydrosocial Cycle.” In *Geoforum* 57 (November), 167–169. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2014.08.003>.
- Carey, Mark, Olivia C. Molden, Mattias Borg Rasmussen, M. Jackson, Anne W. Nolin und

- Bryan G. Mark 2017. „Impacts of Glacier Recession and Declining Meltwater on Mountain Societies.” In *Annals of the American Association of Geographers* 107 (2), 350–359. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1243039>.
- Conker, Ahmet und Hussam Hussein 2019. „Hydraulic Mission at Home, Hydraulic Mission Abroad? Examining Turkey’s Regional “Pax-Aquarum” and Its Limits.” In *Sustainability* 11 (1), 228. <https://doi.org/10.3390/su11010228>.
- Dame, Juliane, Susanne Schmidt, Marcus Nüsser und Carina Zang 2023. "Socio-hydrological dynamics and water conflicts in the upper Huasco valley, Chile." In *Frontiers in Water* 5:1100977. <https://doi.org/10.3389/frwa.2023.1100977>.
- Davies, Matthew I. J. 2009. „Wittfogel’s Dilemma: Heterarchy and Ethnographic Approaches to Irrigation Management in Eastern Africa and Mesopotamia.” In *World Archaeology* 41 (1), 16–35. <https://doi.org/10.1080/00438240802666465>.
- Di Baldassarre, Giuliano, Hannah Cloke, Sara Lindersson, Maurizio Mazzoleni, Elena Mondino, Johanna Mård, Vincent Odongo, Elena Raffetti, Elena Ridoli, Maria Rusca, Elisa Savelli und Faranak Tootoonchi 2021. „Integrating Multiple Research Methods to Unravel the Complexity of Human-Water Systems.” In *AGU Advances* 2 (3). <https://doi.org/10.1029/2021AV000473>.
- Di Baldassarre, Giuliano, Jeltsje S. Kemerink, Michelle Kooy und Luigia Brandimarte 2014. „Floods and Societies: The Spatial Distribution of Water-related Disaster Risk and Its Dynamics.” In *WIREs Water* 1 (2), 133–139. <https://doi.org/10.1002/wat2.1015>.
- Di Baldassarre, Giuliano, Murugesu Sivapalan, Maria Rusca, Christophe Cudennec, Margaret Garcia, Heidi Kreibich, Megan Konar, Elena Mondino, Johanna Mård, Saket Pande, Matthew R. Sanderson, Fuqiang Tian, Alberto Viglione, Jing Wei, Yongping Wei, David J. Yu, Veena Srinivasan und Günter Blöschl 2019. „Sociohydrology: Scientific Challenges in Addressing the Sustainable Development Goals.” In *Water Resources Research* 55 (8), 6327–6355. <https://doi.org/10.1029/2018WR023901>.
- Di Baldassarre, Giuliano, Alberto Viglione, Gemma Carr, Linda Kuil, José Luis Salinas und Günter Blöschl 2013. „Socio-Hydrology: Conceptualising Human-Flood Interactions.” In *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (8), 3295–3303. <https://doi.org/10.5194/hess-17-3295-2013>.
- Di Baldassarre, Giuliano, Alberto Viglione, Gemma Carr, Linda Kuil, Kun Yan, Luigia Brandimarte und Günter Blöschl 2015. „Debates-Perspectives on Socio-Hydrology: Capturing Feedbacks between Physical and Social Processes: A Socio-Hydrological Approach to Explore Flood Risk Changes.” In *Water Resources Research* 51 (6), 4770–4781. <https://doi.org/10.1002/2014WR016416>.

- Falkenmark, Malin 2008. „Peak Water: Entering an Era of Sharpening Water Shortages.” In *Stockholm Water Front*, 10–11.
- Falkenmark, Malin und Carl Folke 2002. „The Ethics of Socio-Ecohydrological Catchment Management: Towards Hydrosolidarity.” In *Hydrology and Earth System Sciences* 6 (1), 1–10. <https://doi.org/10.5194/hess-6-1-2002>.
- Falkenmark, Malin, Jan Lundqvist und Carl Widstrand 1989. „Macro-Scale Water Scarcity Requires Micro-Scale Approaches.” In *Natural Resources Forum* 13 (4), 258–267. <https://doi.org/10.1111/j.1477-8947.1989.tb00348.x>.
- Falkenmark, Malin und Johan Rockström 2004. *Balancing Water for Humans and Nature: The New Approach in Ecohydrology*. London: Sterling, VA: Earthscan.
- Gaurav, Kumar, Rajiv Sinha und P. K. Panda 2011. „The Indus Flood of 2010 in Pakistan: A Perspective Analysis Using Remote Sensing Data.” In *Natural Hazards* 59, 1815–1826. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9869-6>.
- Gleeson, Tom, Lan Wang-Erlandsson, Miina Porkka, Samuel C. Zipper, Fernando Jaramillo, Dieter Gerten, Ingo Fetzer, Sarah E. Cornell, Luigi Piemontese, Line J. Gordon, Johan Rockström, Taikan Oki, Murugesu Sivapalan, Yoshihide Wada, Kate A. Brauman, Martina Flörke, Marc F. P. Bierkens, Bernhard Lehner, Patrick Keys, Matti Kummu, Thorsten Wagener, Simon Dadson, Tara J. Troy, Will Steffen, Malin Falkenmark und James S. Famiglietti 2020. „Illuminating Water Cycle Modifications and Earth System Resilience in the Anthropocene.” In *Water Resources Research* 56 (4). <https://doi.org/10.1029/2019WR024957>.
- Gleick, Peter H. und Meena Palaniappan 2010. „Peak Water Limits to Freshwater Withdrawal and Use.” In *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107 (25), 11155–11162. <https://doi.org/10.1073/pnas.1004812107>.
- Hess, Katharina, Susanne Schmidt, Marcus Nüsser, Carina Zang und Juliane Dame 2020. „Glacier Changes in the Semi-Arid Huasco Valley, Chile, between 1986 and 2016.” In *Geosciences* 10 (11), 429. <https://doi.org/10.3390/geosciences10110429>.
- Hoekstra, Arjen Y. 2017. ‘Water Footprint Assessment: Evolvement of a New Research Field’. *Water Resources Management* 31 (10): 3061–81. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1618-5>.
- Hoekstra, Arjen Y. und P. Q. Hung 2002. *Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows between Nations in Relation to International Crop Trade*. Value of Water: Research Reports Series 11. Delft: IHE Delft.
- Hoekstra, Arjen Y. und P. Q. Hung 2005. „Globalisation of Water Resources: International

- Virtual Water Flows in Relation to Crop Trade.” In *Global Environmental Change* 15 (1), 45–56.
- Huss, Matthias und Regine Hock 2018. „Global-Scale Hydrological Response to Future Glacier Mass Loss.” In *Nature Climate Change* 8 (2), 135–140.
- Immerzeel, Walter Willem 2021. „Peak Water.” In *Scientific American*, 55–61.
- Karpouzoglou, Timothy und Sumit Vij 2017. „Waterscape: A Perspective for Understanding the Contested Geography of Water.” In *WIREs Water* 4 (3), e1210. <https://doi.org/10.1002/wat2.1210>.
- Kirchherr, Julian, Huw Pohlner und Katrina J. Charles. 2016. „Cleaning up the Big Muddy: A Meta-Synthesis of the Research on the Social Impact of Dams” In *Environmental Impact Assessment Review* 60, 115–125. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.02.007>.
- Krueger, Tobias, Carly Maynard, Gemma Carr, Antje Bruns, Eva Nora Mueller und Stuart Lane 2016. „A Transdisciplinary Account of Water Research.” In *WIREs Water* 3 (3), 369–389. <https://doi.org/10.1002/wat2.1132>.
- Linton, Jamie und Jessica Budds 2014. „The Hydrosocial Cycle: Defining and Mobilizing a Relational-Dialectical Approach to Water.” In *Geoforum* 57, 170–180. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2013.10.008>.
- Liu, Junguo, Hong Yang, Simon N. Gosling, Matti Kummu, Martina Flörke, Stephan Pfister, Naota Hanasaki, Yoshihide Wada, Xinxin Zhang, Chunmiao Zheng, Joseph Alcamo und Taikan Oki 2017. „Water Scarcity Assessments in the Past, Present, and Future.” In *Earth’s Future* 5 (6), 545–559. <https://doi.org/10.1002/2016EF000518>.
- McCully, Patrick 2001. *Silenced Rivers*. London, New York: Zed Books.
- McFarlane, Colin 2019. „The Urbanization of the Sanitation Crisis: Placing Waste in the City.” In *Development and Change* 50(5), 1239–1262.
- Mekonnen, Mesfin M. und Winnie Gerbens-Leenes 2020. „The Water Footprint of Global Food Production.” In *Water* 12(10), 2696. <https://doi.org/10.3390/w12102696>.
- Mekonnen, Mesfin M. und Arjen Y. Hoekstra 2011. „The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products.” In *Hydrology and Earth System Sciences* 15, 1577–1600. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1577-2011>.
- Mekonnen, Mesfin M. und Arjen Y. Hoekstra 2016. „Four Billion People Facing Severe Water Scarcity.” In *Science Advances* 2 (2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.

- Molle, François, Peter P. Mollinga und Phillipus Wester 2009. „Hydraulic Bureaucracies and the Hydraulic Mission: Flows of Water, Flows of Power.” In *Water Alternatives* 2 (3), 328–349.
- Montanari, Alberto, Gordon J. Young, Hubert H. G. Savenije, Denis Hughes, Thorsten Wagener, Liliang L. Ren, Demetris Koutsoyiannis, Christophe Cudennec, Elena Toth, Stefiani Grimaldi, Günter Blöschl, Murugesu Sivapalan, Keith Beven, Hoshin Gupta, Matthew R. Hipsey, Bettina Schaeffli, Berit Arheimer, Eva Boegh, Stanislaus J. Schymanski, Giuliano Di Baldassarre, Bingsong Yu, Peter Hubert, Yichao Huang, Andreas H. Schumann, David A. Post, Veena Srinivasan, Christopher Harman, Stephen A. Thompson, Magdalena Rogger, Alberto Viglione, Hilary McMillan, Gregory W. Characklis, Zhonghe Pang und Vladimir Belyaev 2013. „Panta Rhei—Everything Flows”: Change in Hydrology and Society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022.” In *Hydrological Sciences Journal* 58 (6), 1256–1275. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.809088>.
- Müller, Judith 2022. *Urban Mountain Waterscapes in Leh, Indian Trans-Himalaya: The Transformation of Hydro-Social Relations*. Advances in Asian Human-Environmental Research. Cham: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-18249-5>.
- Müller, Judith, Juliane Dame und Marcus Nüsser 2020. „Urban Mountain Waterscapes: The Transformation of Hydro-Social Relations in the Trans-Himalayan Town Leh, Ladakh, India.” In *Water* 12 (6), 1698.
- Mustafa, Daanish und David Wrathall 2011. „Indus Basin Floods of 2010: Souring of a Faustian Bargain?” In *Water Alternatives* 4 (1), 72–85.
- Nüsser, Marcus 2003. „Political Ecology of Large Dams: A Critical Review.” In *Petermanns Geographische Mitteilungen* 147 (1), 20–27.
- Nüsser, Marcus und Ravi Baghel 2016. „Local Knowledge and Global Concerns: Artificial Glaciers as a Focus of Environmental Knowledge and Development Interventions.” In Peter Meusbürger, Tim Freytag und Laura Suarsana (Hrsg.), *Ethnic and Cultural Dimensions of Knowledge*, 191–209. Cham: Springer. http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-21900-4_9.
- Nüsser, Marcus und Ravi Baghel 2017. „The Emergence of Technological Hydrosapes in the Anthropocene: Socio-Hydrology and Development Paradigms of Large Dams.” In Barney Warf (Hrsg.), *Handbook on Geographies of Technology*, 287–301. Cheltenham: Edward Elgar.
- Nüsser, Marcus, Juliane Dame, Benjamin Kraus, Ravi Baghel und Susanne Schmidt 2019. „Socio-Hydrology of “Artificial Glaciers” in Ladakh, India: Assessing Adaptive

- Strategies in a Changing Cryosphere.” In *Regional Environmental Change* 19 (5), 1327–1337. <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1372-0>.
- Nüsser, Marcus, Juliane Dame, Sitara Parveen, Benjamin Kraus, Ravi Baghel und Susanne Schmidt 2019. „Cryosphere-Fed Irrigation Networks in the Northwestern Himalaya: Precarious Livelihoods and Adaptation Strategies Under the Impact of Climate Change.” In *Mountain Research and Development* 39 (2), R1–R11. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-18-00072.1>.
- Nüsser, Marcus und Susanne Schmidt 2017. „Nanga Parbat Revisited: Evolution and Dynamics of Sociohydrological Interactions in the Northwestern Himalaya.” In *Annals of the American Association of Geographers* 107 (2), 403–415. <https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1235495>.
- Nüsser, Marcus, Susanne Schmidt und Juliane Dame 2012. „Irrigation and Development in the Upper Indus Basin: Characteristics and Recent Changes of a Socio-Hydrological System in Central Ladakh, India.” In *Mountain Research and Development* 32 (1), 51–61. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00091.1>.
- Ostrom, Elinor 1990. *Governing the Commons: The Evolution of Institutions for Collective Action*. 1st ed. Cambridge: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807763>.
- Ostrom, Elinor 2000. „Reformulating the Commons.” In *Swiss Political Science Review* 6 (1), 29–52. <https://doi.org/10.1002/j.1662-6370.2000.tb00285.x>.
- Ostrom, Elinor 2014. „Do Institutions for Collective Action Evolve?” In *Journal of Bioeconomics* 16 (1), 3–30. <https://doi.org/10.1007/s10818-013-9154-8>.
- Palaniappan, Meena und Peter H. Gleick 2013. „Peak Water.” In Peter H. Gleick (Hrsg.), *The World's Water* 7, 1–16. <http://worldwater.org/wp-content/uploads/2013/07/ch01.pdf> (Datum des letzten Zugriffs: 21.12.2022).
- Pande, Saket, Melissa Haeffner, Günter Blöschl, Mohammad Faiz Alam, Cyndi Castro, Giuliano Di Baldassarre, Fanny Frick-Trzebitzky, Rock Hogeboom, Heidi Kreibich, Jenia Mukherjee, Aditi Muherji, Fernando Nardi, Marcus Nüsser, Fuqiang Tian, Pieter van Oel und Murugesu Sivapalan 2022. „Never Ask for a Lighter Rain but a Stronger Umbrella.” In *Frontiers in Water* 3 (1), 822334. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.822334>.
- Parveen, Sitara, Matthias Winiger, Susanne Schmidt und Marcus Nüsser 2015. „Irrigation in Upper Hunza: Evolution of Socio-Hydrological Interactions in the Karakoram, Northern Pakistan.” In *Erdkunde* 69 (1), 69–85.

<https://doi.org/10.3112/erdkunde.2015.01.05>.

- Pastor, Amandine Valérie, Amanda Palazzo, Petr Havlik, Hester Biemans, Yoshihide Wada, Michael H. Obersteiner, Pavel Kabat und Fulco Ludwig 2019. „The Global Nexus of Food–Trade–Water Sustaining Environmental Flows by 2050.” In *Nature Sustainability* 2, 499–507. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0287-1>.
- Prieto, Manuel 2015. „Privatizing Water in the Chilean Andes: The Case of Las Vegas de Chiu-Chiu.” In *Mountain Research and Development* 35 (3), 220–229. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-14-00033.1>.
- Rockström, Johan 2009. „A Safe Operating Space for Humanity.” In *Nature* 461, 472–475.
- Rockström, Johan, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Holger Hoff, Stefanie Rost und Dieter Gerten 2009. „Future Water Availability for Global Food Production: The Potential of Green Water for Increasing Resilience to Global Change: Water Availability for Food Production.” In *Water Resources Research* 45 (7), W00A12. <https://doi.org/10.1029/2007WR006767>.
- Rockström, Johan, Will Steffen, Kevin Noone, Åsa Persson, F. Stuart Chapin, Eric F. Lambin, Timothy M. Lenton, Marten Scheffer, Carl Folke, Hans Joachim Schellnhuber, Björn Nykvist, Cynthia A. de Wit, Terry Hughes, Sander van der Leeuw, Henning Rodhe, Sverker Sörlin, Peter K. Snyder, Robert Costanza, Uno Svedin, Malin Falkenmark, Louise Karlberg, Robert W. Corell, Victoria J. Fabry, James Hansen, Brian Walker, Diana Liverman, Katherine Richardson, Paul Crutzen und Jonathan Foley 2009. „Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity.” In *Ecology and Society* 14 (2), 32.
- Rodriguez-Iturbe, Ignacio 2000. „Ecohydrology: A Hydrologic Perspective of Climate-Soil-Vegetation Dynamics.” In *Water Resources Research* 36 (1), 3–9. <https://doi.org/10.1029/1999WR900210>.
- Ross, Alexander und Heejun Chang 2020. „Socio-Hydrology with Hydrosocial Theory: Two Sides of the Same Coin?” In *Hydrological Sciences Journal* 65 (9), 1443–1457. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1761023>.
- Rusca, Maria und Giuliano Di Baldassarre 2019. „Interdisciplinary Critical Geographies of Water: Capturing the Mutual Shaping of Society and Hydrological Flows.” In *Water* 11 (10), 1973. <https://doi.org/10.3390/w11101973>.
- Savenije, Hubert H. G., Arjen Y. Hoekstra und Pieter van der Zaag 2014. „Evolving Water Science in the Anthropocene.” In *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (1), 319–332. <https://doi.org/10.5194/hess-18-319-2014>.

- Schmidt, Susanne, Marcus Nüsser, Ravi Baghel und Juliane Dame 2020. „Cryosphere Hazards in Ladakh: The 2014 Gya Glacial Lake Outburst Flood and Its Implications for Risk Assessment.” In *Natural Hazards* 104 (3), 2071–2095. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04262-8>.
- Sivakumar, Bellie 2012. „Socio-Hydrology: Not a New Science, but a Recycled and Reworded Hydrosociology.” In *Hydrological Processes* 26 (24), 3788–3790. <https://doi.org/10.1002/hyp.9511>.
- Sivapalan, Murugesu, Hubert H. G. Savenije und Günter Blöschl 2012. „Socio-Hydrology: A New Science of People and Water.” In *Hydrological Processes* 26 (8), 1270–1276. <https://doi.org/10.1002/hyp.8426>.
- Sosa, Milagros, Rutgerd Boelens und Margreet Zwarteveen 2017. „The Influence of Large Mining: Restructuring Water Rights among Rural Communities in Apurimac, Peru.” In *Human Organization* 76 (3):,215–226. <https://doi.org/10.17730/0018-7259.76.3.215>.
- Sultana, Farhana 2018. „Gender and Water in a Changing Climate: Challenges and Prospects.” In Christiane Fröhlich, Giovanna Gioli, Roger Cremades und Henri Myrntinen (Hrsg.), *Water Security Across the Gender Divide*, 17–33. Cham: Springer.
- Sultana, Farhana 2020. „Embodied Intersectionalities of Urban Citizenship: Water, Infrastructure, and Gender in the Global South.” In *Annals of the American Association of Geographers* 110 (5), 1407–1424.
- Swyngedouw, Erik 2004. *Social Power and the Urbanization of Water: Flows of Power*. Oxford: Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198233916.001.0001>.
- Swyngedouw, Erik 2009. „The Political Economy and Political Ecology of the Hydro-Social Cycle.” In *Journal of Contemporary Water Research & Education* 142 (1), 56–60.
- Troy, Tara J., Mitchell Pavao-Zuckerman und Tom P. Evans 2015. „Debates—Perspectives on Socio-Hydrology: Socio-Hydrologic Modeling: Tradeoffs, Hypothesis Testing, and Validation.” In *Water Resources Research* 51 (6), 4806–4814. <https://doi.org/doi:10.1002/2015WR017046>.
- UN Water 2020. *Water and Climate Change*. The United Nations World Water Development Report 2020. Paris: UNESCO.
- Usón, Tomás J., Cristián Henríquez und Juliane Dame 2017. „Disputed Water: Competing Knowledge and Power Asymmetries in the Yali Alto Basin, Chile.” In *Geoforum* 85, 247–258. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2017.07.029>.

- Van Dam, Petra J. E. M. 2016. „An Amphibious Culture. Coping with Floods in the Netherlands.” In Peter Coates, David Moon und Paul Warde (Hrsg.), *Local Places, Global Processes. Histories of Environmental Change in Britain and Beyond*, 78–93. Oxford: Oxbow.
- Van Loon, Anne F., Tom Gleeson, Julian Clark, Albert I. J. M. Van Dijk, Kerstin Stahl, Jamie Hannaford, Giuliano Di Baldassarre, Adriaan J. Teuling, Lena M. Tallaksen, Remko Uijlenhoet, David M. Hannah, Justin Sheffield, Mark Svoboda, Boud Verbeiren, Thorsten Wagener, Sally Rangelcroft, Niko Wanders und Henny A. J. Van Lanen 2016. „Drought in the Anthropocene.” In *Nature Geoscience* 9 (2), 89–91. <https://doi.org/10.1038/ngeo2646>.
- Van Loon, Anne F., Kerstin Stahl, Giuliano Di Baldassarre, Julian Clark, Sally Rangelcroft, Niko Wanders, Tom Gleeson, Albert I. J. M. Van Dijk, Lena M. Tallaksen, Jamie Hannaford, Remko Uijlenhoet, Adriaan J. Teuling, David M. Hannah, Justin Sheffield, Mark Svoboda, Boud Verbeiren, Thorsten Wagener und Henry A. J. Van Lanen 2016. „Drought in a Human-Modified World: Reframing Drought Definitions, Understanding, and Analysis Approaches.” In *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (9), 3631–3650. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3631-2016>.
- Viviroli, Daniel, Matti Kummu, Michel Meybeck, Marko Kallio und Yoshihide Wada 2020. „Increasing Dependence of Lowland Populations on Mountain Water Resources.” *Nature Sustainability* 3, 917–928. <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0559-9>.
- Vörösmarty, Charles, Dennis Lettenmaier, Christian Leveque, Michel Meybeck, Claudia Pahl-Wostl, Josph Alcamo, William J. Cosgrove, Hartmut Grassl, Holger Hoff, Pavel Kabat, Felino P. Lansigan und Robert J. Naiman 2004. „Humans Transforming the Global Water System.” In *Eos, Transactions American Geophysical Union* 85 (48), 509–514. <https://doi.org/10.1029/2004EO480001>.
- Wang-Erlandsson, Lan, Arne Tobian, Ruud J. van der Ent, Ingo Fetzer, Sofie te Wierik, Miina Porkka, Arie Staal, Fernando Jaramillo, Heindriken Dahlmann, Chandrakant Singh, Peter Greve, Dieter Gerten, Patrick W. Keys, Tom Gleeson, Sarah E. Cornell, Will Steffen, Xuemei Bai und Johan Rockström 2022. „A planetary boundary for green water.” In *Nature Reviews Earth & Environment* 3, 380–392. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00287-8>.
- Wescoat, James L., Sarah J. Halvorson und Daanish Mustafa 2000. „Water Management in the Indus Basin of Pakistan: A Half-Century Perspective.” In *International Journal of Water Resources Development* 16 (3), 391–406. <https://doi.org/10.1080/713672507>.
- Wesselink, Anna, Michelle Kooy und Jeroen Warner 2017. „Socio-Hydrology and

- Hydrosocial Analysis: Toward Dialogues across Disciplines.” In *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 4 (2), e1196-n/a. <https://doi.org/10.1002/wat2.1196>.
- Wittfogel, Karl A. 1957. *Oriental Despotism: A Comparative Study of Total Power*. New Haven: Yale University Press.
- Xia, Jun, Yi Dong und Lei Zou 2022. „Developing Socio-Hydrology: Research Progress, Opportunities and Challenges.” In *Journal of Geographical Sciences* 32 (11), 2131–2146. <https://doi.org/10.1007/s11442-022-2040-3>.
- Yu, David J., Melissa Haeffner, Hanseok Jeong, Saket Pande, Juliane Dame, Giuliano Di Baldassarre, Glenda Garcia-Santos, Leon Hermans, Rachata Muneeppeerakul, Fernando Nardi, Matthew R. Sanderson, Fuqiang Tian, Yongping Wei, Josepha Wessels und Murugesu Sivapalan 2022. „On Capturing Human Agency and Methodological Interdisciplinarity in Socio-Hydrology Research.” In *Hydrological Sciences Journal* 67 (13), 1905–1916. <https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2114836>.
- Zang, Carina, Juliane Dame und Marcus Nüsser 2018. „Hydrochemical and Environmental Isotope Analysis of Groundwater and Surface Water in a Dry Mountain Region in Northern Chile.” In *Environmental Monitoring and Assessment* 190 (6), 334. <https://doi.org/10.1007/s10661-018-6664-9>.
- Zwarteveen, Margreet 2017. „Hydrocracies, Engineers and Power: Questioning Masculinities in Water.” In *Engineering Studies* 9 (2), 78–94. <https://doi.org/10.1080/19378629.2017.1358730>.

Abbildungsnachweis

Abb. 1: Eigene Darstellung; Datengrundlage Web of Science 31.12.2022

Abb. 2: Eigene Darstellung

Abb. 3: Eigene Darstellung