

4.3 Sozio-Hydrologie des Trans-Himalaya – Schmelzwasserverfügbarkeit und Bewässerungslandwirtschaft

MARCUS NÜSSER, JULIANE DAME & SUSANNE SCHMIDT

Im trockenen Hochgebirge des Trans-Himalaya wird die Bewässerungslandwirtschaft durch Schmelzwasser aus Gletschern, Schneedecken und Permafrost gespeist. Da sich der Schmelzwasserabfluss aus den einzelnen Komponenten der Kryosphäre im Zuge des Klimawandels hinsichtlich der Menge und saisonalen Variabilität verändert, sind in den Hochgebirgsregionen entsprechende Anpassungsmaßnahmen im Bereich der Landnutzung erforderlich. Mit dem integrativen Analyserahmen der Sozio-Hydrologie lassen sich sowohl die hydrologischen Prozesse in diesem Raum als auch die sozioökonomischen Entwicklungen und Veränderungen in der Landnutzung untersuchen. An zwei regionalen Fallbeispielen aus dem Trans-Himalaya in Indien und Nepal werden generelle Zusammenhänge und spezifische Aspekte aufgezeigt und mit aktuellen Satellitenbildern illustriert.

Socio-Hydrology of the Trans-Himalaya – Meltwater availability and irrigated agriculture: Meltwater from glaciers, snow cover and permafrost are crucial for irrigated agriculture in the semi-arid mountain regions of the Trans-Himalaya. As quantity of meltwater runoff from the different cryosphere components is expected to decrease in the context of climate change, adaptation measures in land use systems are necessary in these high mountain regions. The integrated approach of socio-hydrology allows to analyze hydrological processes together with socio-economic developments and land use dynamics. Two regional case studies from the Trans-Himalaya in India and Nepal are presented to illustrate the general context and specific characteristics using recent satellite imagery.

In der wissenschaftlichen Debatte um die Auswirkungen des globalen Klimawandels auf die Gebirgsregionen des Himalaya, Karakorum und Hindukusch (HKH) stehen der weit verbreitete Gletscherrückgang, die Veränderungen in der saisonalen Schneedeckendynamik und der auftauende Permafrost im Vordergrund (BOLCH et al. 2019, HOCK et al. 2019). Diese klimabedingten Veränderungen der Kryosphäre zeigen sich in den einzelnen Abschnitten der südasiatischen Hochgebirge in unterschiedlicher Intensität. Generell wird nach einer Zwischenphase vermehrter Schmelzwasserabflüsse (*Peak Water*) eine langfristig reduzierte Wasserverfügbarkeit prognostiziert (HUSS & HOCK 2018).

Dieser Zusammenhang wird zumeist auf großregionaler Maßstabsebene mit den Gebirgsräumen als Wasserspeicher und den dicht besiedelten indo-gangetischen Vorländern des südasiatischen Subkontinents diskutiert, die durch einen zunehmenden Wasserbedarf gekennzeichnet sind (IMMERZEEL et al. 2010). Dagegen werden die bereits feststellbaren und zukünftig zu erwartenden Auswirkungen des Klimawandels auf die in den Hochgebirgsräumen lebenden Bevölkerungsgruppen und die dort praktizierten Anpassungsmaßnahmen nur selten betrachtet (CAREY et al. 2017, MUKHERJI et al. 2019, RASUL et al. 2020). Besonders deutlich werden die Veränderungen im glazio-fluvialen Abflussregime in der Bewässerungswirtschaft der ariden Hochgebirge. Die komplexen Bewässerungssysteme, Techniken und Institutionen des Wassermanagements wurden von der lokalen Bevölkerung über Generationen entwickelt und sind bis heute eine wichtige Grundlage der Lebenssicherung. In Abhängigkeit von den topographischen und klimatischen Verhältnissen sowie den

lokalen Praktiken und rechtlichen Arrangements der Wasserverteilung lassen sich unterschiedliche Bewässerungssysteme identifizieren. Ihre Funktion wird in unterschiedlicher Weise durch die Auswirkungen des Klimawandels und gleichzeitig auch durch sozioökonomische Veränderungen beeinflusst.

Um die Interaktionen und Rückkopplungen zwischen Wasserverfügbarkeit, Wasserzugangsmöglichkeiten und Wassernutzung auf lokaler Ebene systematisch zu analysieren, bietet das in den vergangenen Jahren entwickelte Konzept der Sozio-Hydrologie einen geeigneten Ansatz. In diesem integrativen Ansatz werden Wasser und Gesellschaft als gekoppeltes sozialökologisches System aufgefasst. Hierbei wird von der Annahme ausgegangen, dass Veränderungen der physischen Wasserverfügbarkeit mit Veränderungen in der Art und Intensität der Wassernutzung einhergehen. Langfristig führen Gletscherrückgang, auftauende Permafrostareale und abnehmende Schneedecken zu einer reduzierten Wasserverfügbarkeit. Daneben sind sozioökonomische und politische Entwicklungen im Gebirgsraum zu berücksichtigen. Zunehmende außerragrarische Einkommensmöglichkeiten und Migrationsbewegungen bedingen tendenziell eine reduzierte Verfügbarkeit von Arbeitskräften in der Landwirtschaft. Dabei sind neben verstärkten wirtschaftlichen Aktivitäten im Tourismussektor oftmals externe Entwicklungsinterventionen durch staatliche und nicht-staatliche Organisationen bedeutsam.

Im Folgenden sollen ausgewählte sozio-hydrologische Interaktionen an zwei Beispielen aus dem Trans-Himalaya aufgezeigt werden: der Region Ladakh in Indien und der Region Mustang in Nepal. Aufgrund

seiner Lage zwischen der Himalaya-Hauptkette und dem Tibetischen Hochplateau ist der Trans-Himalaya generell durch eine ausgeprägte Regenschattenposition gekennzeichnet. Dadurch herrschen in den Tallagen aride Klimaverhältnisse vor und die existenzsichernde Bewässerungslandwirtschaft wird maßgeblich von Schmelzwasser aus der Kryosphäre gespeist.

Studie im zentralen Ladakh

Der Trans-Himalaya von Ladakh ist Teil des oberen Indus-Einzugsgebiets. Trotz eines deutlichen sommerlichen Niederschlagsmaximums fallen die monsunalen Niederschläge gering aus, so dass an der Klimastati-

on Leh (3.500 m) im langjährigen Mittel nur ca. 100 mm Jahresniederschlag gemessen werden. Aufgrund der tief eingeschnittenen Täler bleibt die Ableitung von Wasser aus den Hauptflüssen für die Bewässerung auf wenige Ausnahmen beschränkt. Lediglich etwa 10% der gesamten bewässerten Fläche von Ladakh befindet sich im Auenbereich des Indus in einer Höhe von etwa 3.200 m, wo sich das Tal entlang einer geologischen Nahtstelle (Suturzone) stark weitet (Abb. 4.3-1). Dort konnte die Ausdehnung der Bewässerungsflur durch den aufwändigen Bau von Kanälen erfolgen, mit denen die topographischen Unterschiede zwischen dem Hauptfluss und den seitlichen Schwemmfächern über-

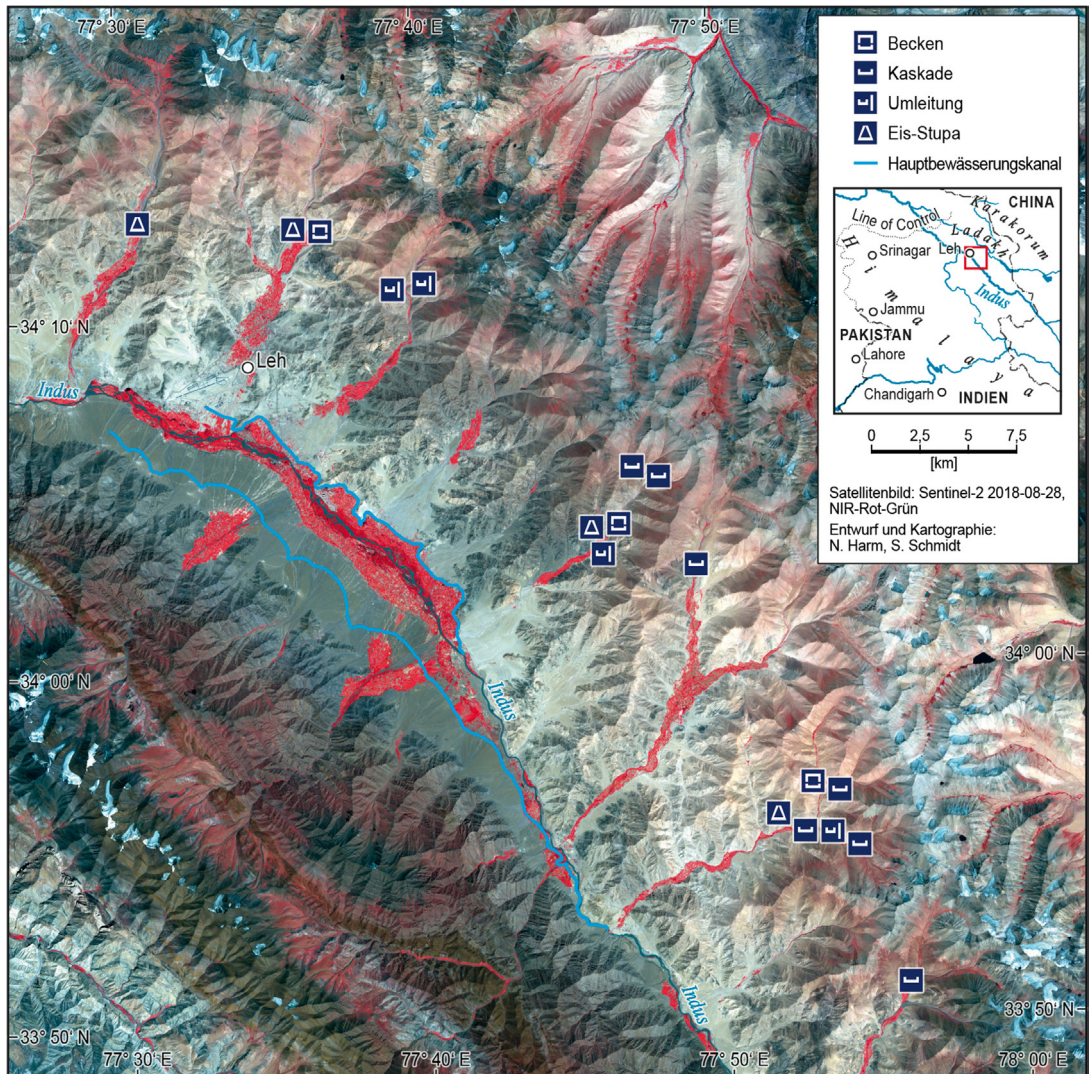


Abb. 4.3-1: Satellitenbildszene von Ladakh. Im Falschfarbkomposit werden die Bewässerungsflächen entlang des Indus und den Seitentälern in intensiven Rottönen dargestellt. Die Eisreservoirs sind als Symbole eingetragen.

wunden werden. Auf der orographisch rechten Seite des Indus konnten dadurch in den 1960er-Jahren erstmals in größerem Umfang neue Kulturlächen angelegt werden. Im Rahmen eines staatlich organisierten Projekts wurden seit den 1980er Jahren auch die Schwemmfächer auf der orographisch linken Seite durch einen mehr als 40 km langen Hauptkanal als Bewässerungsareale erschlossen, womit insgesamt eine Ausdehnung des Kulturlandes um etwa 50 km² realisiert wurde (NÜSSER et al. 2012). Allerdings waren auch 15 Jahre nach Fertigstellung des Hauptkanals nur geringe Bereiche terrassiert und landwirtschaftlich genutzt.

Der weit überwiegende Teil der Bewässerungsflächen in dieser Region befindet sich dagegen auf Schwemmfächern der Seitentäler bis in Höhen von etwa 4.200 m. Diese Areale werden durch Schmelzwasser gespeist, wobei die Gletscher in Ladakh nahezu ausschließlich oberhalb von 5.200 m liegen. Im Zuge des Klimawandels ist in Abhängigkeit von Höhenlage und Exposition ein unterschiedlich stark ausgeprägter Rückgang zu verzeichnen (SCHMIDT & NÜSSER 2017). Aufgrund der großen Höhenlage dieser Gletscher steht das Schmelzwasser für die Bewässerung generell erst im Sommer in ausreichendem Maße zur Verfügung. Insbesondere während und kurz nach der Aussaat der Feldfrüchte kann auf den landwirtschaftlichen Flächen lediglich Schmelzwasser der saisonalen Schneedecke genutzt werden. Damit treten vor allem nach schneearmen Wintern und bei zu spät einsetzender Schmelze wiederkehrende Phasen der Wasserknappheit auf. Insbesondere in Tälern, in denen keine Gletscher in den oberen Einzugsgebieten vorhanden sind und die daher in besonderem

Maße von der saisonalen Schneedecke abhängen, tritt auch im Sommer regelmäßige Wasserknappheit auf, wodurch das Getreide unreif geerntet werden muss.

Zur Überbrückung dieser kritischen Phasen sind in einigen Seitentälern oberhalb der Bewässerungsflur verschiedene Typen von Eisreservoirs errichtet worden, die den winterlichen Abfluss in Form von Eis speichern (Abb. 4.3-1). Dabei wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers durch quer zur Fließrichtung errichtete Steinmauern reduziert, wodurch der Gefrierprozess begünstigt wird. Das langsam abfließende Wasser gefriert unter regelmäßigen Frostwechseln schichtweise, so dass sich über den Winter ein kompakter Eiskörper bilden kann (Abb. 4.3-2). Durch ihre Höhenlage weit unterhalb der Gletscher steht das Schmelzwasser aus diesen Eiskörpern bereits zu Beginn der Vegetationsperiode für die Bewässerung zur Verfügung und die Ertragsrisiken, die aus der hohen Schneevariabilität resultieren, können verringert werden (NÜSSER et al. 2019). Eine weitere Form der saisonalen Wasserspeicherung bilden die sogenannten »Eis-Stupas«, die seit 2015 in verschiedenen Seitentälern von Ladakh errichtet werden. Dabei wird Wasser bei Temperaturen unter dem Gefrierpunkt unter hydrostatischem Druck in Fontänen in die Luft gesprüht und gefriert zu konischen Eisakkumulationen, die von ihrer Form an buddhistische Stupas erinnern. Die »Eis-Stupas« dienen der Erhöhung der lokalen Wasserverfügbarkeit und werden zunehmend auch als touristische Attraktionen genutzt.

Medien- und öffentlichkeitswirksam werden die unterschiedlichen Typen der Eisreservoirs als »künstliche Gletscher« bezeichnet und als nachhaltige An-



Abb. 4.3-2: Eisreservoir in Ladakh bei 4300 m. Das Bachbett im Vordergrund und die Steinmauern sind mit Eis überflossen (Foto: M. Nüsser - 25. Februar 2014).

passungsstrategie an den Klimawandel dargestellt. Die Wirksamkeit dieser angelegten saisonalen Wasserspeicher für die regionale Agrarproduktion besteht aber lediglich in einer Erhöhung der Wasserverfügbarkeit in den Frühjahrsmonaten, womit sich die Anbauperiode verlängern lässt und der Anbau von Kulturpflanzen mit höherem Wasserbedarf möglich wird. Als langfristige Anpassungsmaßnahme gegen die negativen Auswirkungen des Gletscherrückgangs können sie dagegen nur begrenzt interpretiert werden. Auch bildet der erhebliche Arbeitsaufwand für Bau und Wartung dieser Strukturen ein Problem für die dörflichen Gemeinschaften und steht einer breit angelegten Implementierung dieser Wasserspeichertechnologie entgegen.

Studie im oberen Mustang

Die Region Mustang umfasst die oberen Abschnitte des Kali Gandaki, dem markanten Durchbruchstal zwischen den Gebirgsmassiven von Annapurna und Dhaulagiri

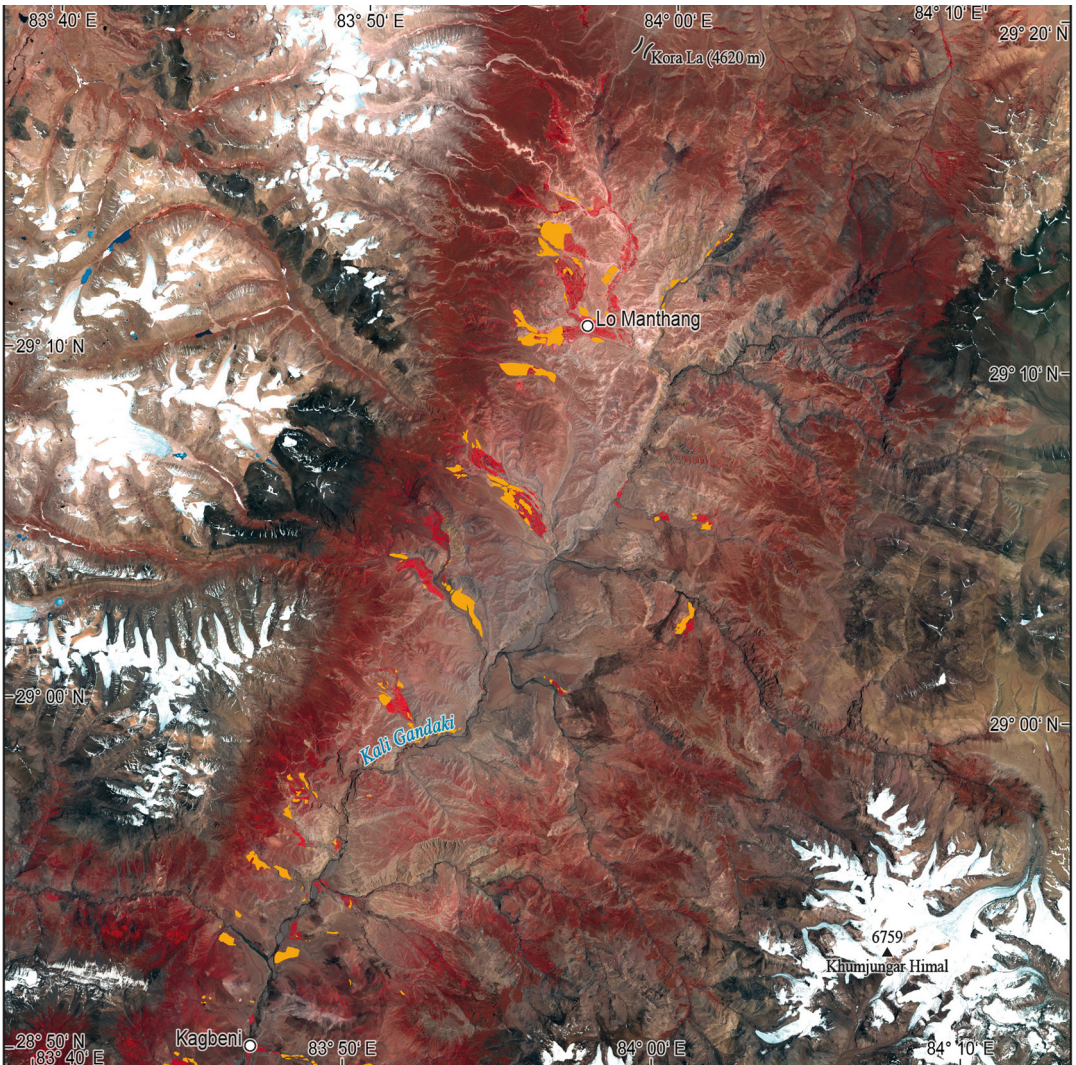
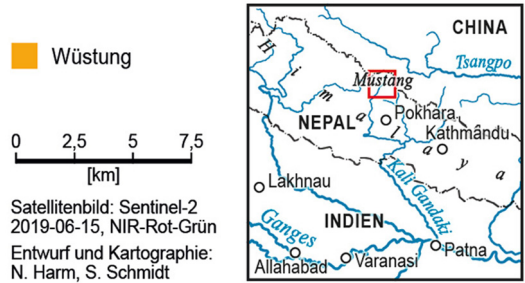


Abb. 4.3-3: Satellitenbildszene des oberen Mustang. Im Falschfarbkomposit werden die Bewässerungsflächen in intensiven Rottönen dargestellt. Die aufgelassenen Kulturlandareale (Wüstungen) sind separat eingetragen.

im zentralen Bereich von Nepal. Als oberes Mustang (Upper Mustang) wird das Gebiet vom Ort Kagbeni (2.850 m) im Süden bis zum Kora La (4.620 m) am Übergang zum tibetischen Plateau bezeichnet (Abb. 4.3-3). Im langjährigen Mittel werden im Hauptort Lo Manthang (3.810 m) etwa 200 mm Jahresniederschlag gemessen. Die im Gelände und auf dem Satellitenbild deutlich erkennbare Vegetationsverbreitung entlang der oberen Hänge belegt einen positiven Niederschlagsgradienten mit der Höhe, der jedoch aufgrund fehlender Klimastationen nur abgeschätzt werden kann. Das im Satellitenbild markant in Erscheinung tretende Vegetationsband zwischen etwa 3.800 und 4.900 m nimmt in der Höhe nach Norden zu und belegt generell eine höhere Feuchtigkeit der westlichen Talseite. Zudem weisen die Hang- und Kammbereiche auf dieser Flanke oberhalb von 5.400 m eine deutlich stärkere Vergleichen auf als die östliche Talseite, die, abgesehen vom Khumjungar-Massiv (6.759 m), weitestgehend gletscherfrei ist. Insgesamt weisen die hoch gelegenen Gletscher im nördlichen Mustang einen deutlichen Rückgang auf.

Auch im oberen Mustang bildet nicht die Ableitung von Wasser aus dem schluchtartig eingeschnittenen Hauptfluss des Kali Gandaki, sondern das Schmelzwasser aus den Seitentälern die Grundlage der Bewässerungslandwirtschaft (Abb. 4.3-4). Auf die in der Mehrzahl auf der orographisch rechten Seite liegenden Bewässerungsoasen wird Abflusswasser über lange Kanäle geleitet, die teilweise in steilen Hangbereichen angelegt sind. Dagegen weisen die östlichen Hangbereiche deutlich trockenere Bedingungen auf. Nur vereinzelt sind hier aktuell genutzte Bewässerungsareale auszumachen. Hauptanbauprodukte sind Gerste und Buchweizen, die traditionell eine wichtige Grundlage für die Existenzsicherung der lokalen Bevölkerung bilden. Daneben werden in den vergangenen Jahren zu-

nehmend Apfelplantagen angelegt, die den bereits seit mehreren Jahrzehnten in den tieferen Lagen von Mustang (südlich des Satellitenbildes) erfolgreichen Apfelanbau ergänzen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Faktoren Straßenbau und Marktanbindung als entscheidende Faktoren heranzuziehen.

Ein charakteristisches Merkmal der Landnutzungsstrukturen im oberen Mustang bilden die zahlreichen aufgelassenen Bewässerungsflächen (Abb. 4.3-3), die auch für das angrenzende Manang im Annapurna-Gebiet beschrieben sind (AASE et al. 2010). Diese Kulturland- und Siedlungswüstungen lassen sich in vielen Fällen auf einen zunehmenden Wassermangel im Zuge des Klimawandels zurückführen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Umsiedlung der weitestgehend von der Schneeschmelze abhängigen Siedlung Dhe auf der östlichen Talseite des Kali Gandaki bekannt geworden (DEVKOTA 2016). In einzelnen Fällen wurden Wasserumleitungen durch aufwändige Kanalbauten zur Reduzierung des Wassermangels vorgenommen, die teilweise über Wasserscheiden hinweg führen. Als eine weitere Anpassungsstrategie an die zunehmend unsichere Wasserverfügbarkeit werden Wasserrückhaltebecken oberhalb der Bewässerungsflächen angelegt. Aufgrund der zunehmenden Starkniederschlagsereignissen sind die im steilen Relief gebauten Kanäle besonders anfällig gegenüber Hangrutschungen und Erosion, weshalb bereits in der Vergangenheit Wasserzuleitungen zerstört wurden und dadurch ganze Bewässerungsflächen aufgegeben werden mussten. Neben dem Problem einer reduzierten Wasserverfügbarkeit sind allerdings auch sozioökonomische Veränderungen durch Aufnahme außerlandwirtschaftlicher Erwerbstätigkeit und Migration als entscheidende Faktoren anzuführen. Dadurch entstehender Mangel an Arbeitskräften erschwert generell die Aufrechterhaltung der Bewässerungsinfrastruktur.



Abb 4.3-4: Bewässerungsoase im oberen Mustang (Foto: M. Nüsser, 3. April 2017).

Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den weltweit feststellbaren Veränderungen der Kryosphäre, die den Rückgang von Gletschern, Permafrost und Veränderungen in der saisonalen Schneedecke umfassen, lassen sich Hochgebirgsräume als Schlüsselregionen des Klimawandels identifizieren (Hock et al. 2019). Die beiden Fallbeispiele aus dem Trans-Himalaya zeigen allerdings auch ein komplexes Zusammenwirken zwischen einer veränderten regionalen Wasserverfügbarkeit im Zuge des Klimawandels und sozioökonomischen Entwicklungsprozessen. Dabei bildet der integrative Ansatz der Sozio-Hydrologie einen geeigneten Rahmen zur Analyse der damit verbundenen Wechselwirkungen und Kausalitäten. Neben weiteren durch Geländebefunde, fernerkundliche Auswertungen und Modellierungen gestützten Untersuchungen wird ein zukünftiger Fokus auf die Schnittstellen zwischen den physischen Dynamiken und den sozioökonomischen Entwicklungen und Reaktionsmustern zu legen sein. Darüber hinaus sollten zukünftige Forschungsarbeiten zu Mensch-Umwelt-Beziehungen im Hochgebirge generell in stärkerem Maße Anwendungsbezüge berücksichtigen, womit entsprechende Handlungsempfehlungen abgeleitet werden können.

Literatur

- AASE, T. H., R. P. CHAUDHARY & O.R. VETAAS (2010): Farming flexibility and food security under climatic uncertainty: Manang, Nepal Himalaya. *Area* 42, 228-238. doi: 10.1111/j.1475-4762.2009.00911.x.
- BOLCH, T., J. M. SHEA, S. LIU et al. (2019): Status and change of the cryosphere in the extended Hindu Kush Himalaya Region. In: Wester, P., Mishra, A., Mukherji, A. & A.B. Shrestha (eds.): *The Hindu Kush Himalaya Assessment: Mountains, Climate Change, Sustainability and People*. Cham: Springer International Publishing.

- CAREY, M., O. C. MOLDEN, M. B. RASMUSSEN et al. (2017): Impacts of glacier recession and declining meltwater on mountain societies. *Annals of the American Association of Geographers* 107, 350-59. doi:10.1080/24694452.2016.1243039.
- DEVKOTA, F. (2016): *Climate Vulnerability and Adaptation to Climate Impacts in the Himalayan Region of Nepal*. Dissertation, FU Berlin.
- HOCK, R., G. RASUL, C. ADLER et al. (2019): High mountain areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. in press.
- HUSS M. & R. HOCK (2018): Global-scale hydrological response to future glacier mass loss. *Nature Climate Change* 8, 135-140 doi:10.1038/s41558-017-0049-x
- IMMERZEEL, W., L. P. H. VANBEEK & M. F. P. BIERKENS (2010): Climate change will affect the Asian Water towers. *Science* 328, 1382-1385. doi:10.1126/science.1183188.
- MUKHERJI, A., A. SINISALO, M. NÜSSER et al. (2019): Contributions of the cryosphere to mountain communities in the Hindu Kush Himalaya: a review. *Regional Environmental Change* 19, 1311-1326. doi:10.1007/s10113-019-01484-w.
- NÜSSER, M., S. SCHMIDT & J. DAME (2012): Irrigation and development in the upper Indus Basin: Characteristics and recent changes of a socio-hydrological system in central Ladakh, India. *Mountain Research and Development* 32:51-61. doi:10.1659/MRD-JOURNAL-D-11-00091.1.
- NÜSSER, M., J. DAME, S. PARVEEN et al. (2019): Cryosphere-fed irrigation networks in the northwestern Himalaya: Precarious livelihoods and adaptation strategies under the impact of climate change. *Mountain Research and Development* 39(2): R1-R11. doi:10.1659/MRDJOURNAL-D-18-00072.1.
- RASUL, G., B. PASAKHALA, A. MISHRA & S. PANT (2020): Adaptation to mountain cryosphere change: issues and challenges. *Climate and Development* 12, 297-309. doi: 10.1080/17565529.2019.1617099.
- SCHMIDT, S. & M. NÜSSER (2017): Changes of high altitude glaciers in the Trans-Himalaya of Ladakh over the past five decades (1969-2016). *Geosciences* 7, 27. doi:10.3390/geosciences7020027.

Kontakt:

Prof. Dr. Marcus Nüsser

Dr. Juliane Dame

Dr. Susanne Schmidt

Südasien-Institut (SAI), Universität Heidelberg

marcus.nuesser@uni-heidelberg.de

NÜSSER, M., J. DAME & S. SCHMIDT (2020): Sozio-Hydrologie des Trans-Himalaya – Schmelzwasserverfügbarkeit und Bewässerungslandwirtschaft. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL, et al. (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel*. S. 199-204. Online: www.warnsignal-klima.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.hochgebirge-im-wandel.30.