

Gletscher und Schnee als Wasserressourcen am Beispiel der tropischen Anden und Zentralasiens

D. Kasang & J. Lozán

Gletscher und Schnee (die Kryosphäre) stellen in einigen Hochgebirgsregionen die wichtigsten Wasserressourcen dar. Ihre lebenswichtige Bedeutung ist besonders groß in angrenzenden Trockengebieten. Trockengebiete insgesamt nehmen 46% der Landoberfläche der Erde ein und besitzen eine Bevölkerung von etwa drei Milliarden Menschen.¹ Ein erheblicher Teil der Bewohner, der Landwirtschaft und der natürlichen Ökosysteme dieser Gebiete ist von der Kryosphäre in Hochgebirgen abhängig, da der Anteil des Schmelzwassers in Trockenzeiten bis zu 50% und mehr am Abfluss betragen kann.² Infolge der Erderwärmung ziehen sich Gletscher und Schneebedeckung zunehmend zurück. Dadurch wird der Wasseranteil aus Schmelzvorgängen langfristig stark abnehmen, während der Anteil aus Regenereignissen größer wird und der Puffereffekt der Schnee- und Eisschmelze an Bedeutung verliert. Dadurch wird die Wasserversorgung besonders in Trockenzeiten und Dürren unbeständiger. Der vorliegende Artikel versucht diese Entwicklung an zwei Hotspots der Wasserversorgung durch Gletscher und Schnee, den tropischen Anden in Peru und den Hochgebirgen in Zentralasien, zu erläutern.

Gletscher und Schnee in den tropischen Anden: Peru

Gletscher kommen nicht nur in kalten Regionen der Erde vor, sondern auch in den Hochgebirgen der Tropen, besonders in Südamerika und Afrika. Die gesamte Fläche der tropischen Gletscher wird vom Weltklimarat IPCC auf 2.341 km² geschätzt und ist damit deutlich größer als die der Alpen (2.092 km²).³ Mehr als 99% der Fläche aller tropischen Gletscher befinden sich dabei in den Anden,⁴ 70% davon in Peru.⁵

Die geographische Lage Perus ist sehr kontrastreich. Im Gegensatz zu dem Osthang der peruanischen tropischen Anden, der seine Niederschläge vom Amazonasgebiet bezieht, ist der Westhang vor dem Pazifischem Ozean sehr trocken und die vorgelagerte Küstenzone sogar wüstenhaft. Die Niederschläge liegen unterhalb von 500 m bei 15-20 mm im Jahr. Dennoch haben hier frühere Kulturen eine hohe Entwicklung erreicht. Zurzeit leben dort ca. 70% der peruanischen Bevölkerung.⁶ Eine wesentliche Grundlage dafür ist und war das Schmelzwasser der Gletscher in den Anden, wo der Niederschlag 500 mm/Jahr und mehr betragen kann.⁷ Dadurch sorgt das Wasser aus Schmelzvorgängen und Regenfällen auch für die Wasserversorgung an der Küste.

¹ IPCC (2019): Desertification. In: Climate Change and Land, 3.1.1, 3.1.3

² Dussaillant, I., E. Berthier, F. Brun, M. Masiokas, R. Hugonnet, and V. Favier (2019): Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat. Geosci.* 12, 802–808. doi: 10.1038/s41561-019-0432-5

³ IPCC (2019): High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Ch. 2, figure 2.4

⁴ Rabatel, A., et al. (2013): [Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change](#). *The Cryosphere*, 7, 81–102

⁵ Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., and Braun, M. (2019): Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations, *The Cryosphere*, 13, 2537–2556, <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>

⁶ Bury, J.T., et al. (2011): Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru, *Climatic Change* 105, 179–206, DOI 10.1007/s10584-010-9870-1

⁷ Arias, P.A., R. Garreaud, G. Poveda et al. (2021): Hydroclimate of the Andes Part II: Hydroclimate Variability and Sub-Continental Patterns. *Front. Earth Sci.* 8:505467. doi: 10.3389/feart.2020.505467

Anteil von Gletscherwasser am Abfluss des Rio Santa

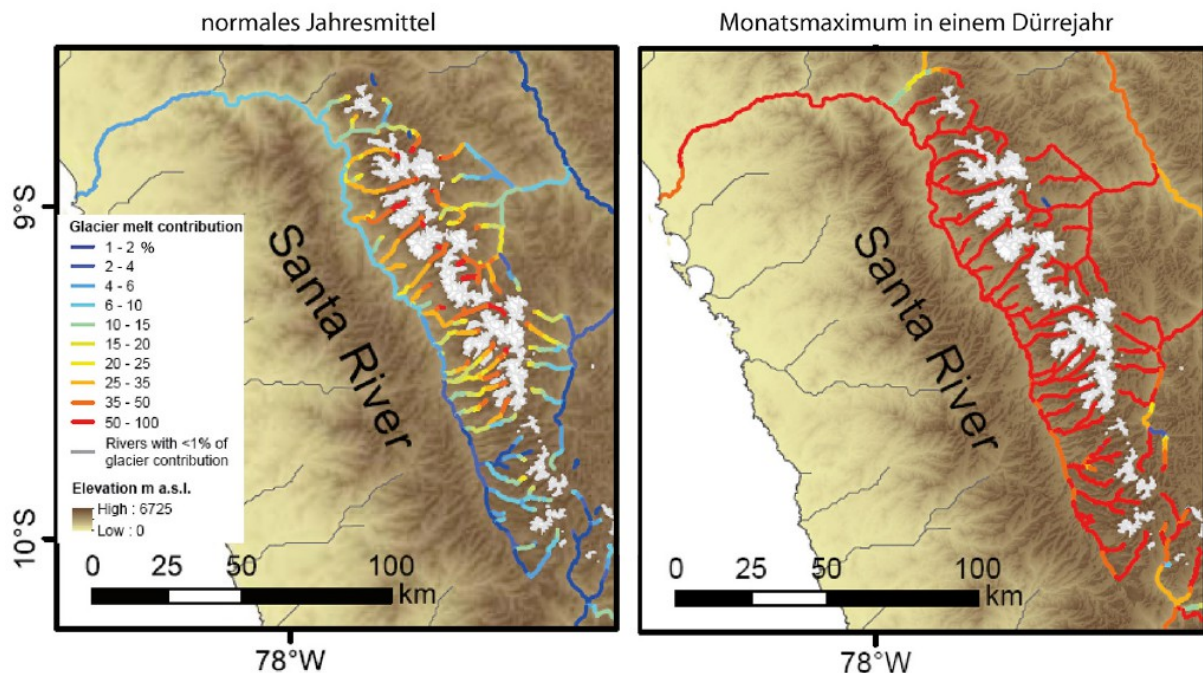


Abb.1: Anteil von Gletscherwasser am Abfluss des Rio Santa in einem normalen Jahr (links) und im trockensten Monat eines Dürrejahres (rechts) nach Modellberechnungen (Buytaert et al. 2017, CC BY).

Abb.1 zeigt das Flusssystem des Rio Santa im Nordwesten Perus, wo die größte Eisreserve des Landes (in der Graphik weiß dargestellt) liegt. Dort befindet sich die Cordillera Blanca mit dem höchsten vergletscherten Gipfel des Landes, dem Huascaran (Höhe 6.768 m). Hier entspringen die Quellflüsse eines der größten Flüsse an der peruanischen Küste, des Rio Santa. Das Wasser einzelner Flüsse stammt bis zu 25% aus Gletscherwasser, in der Trockenzeit vom Juni bis August sogar bis zu 50%.⁸ Anders als in vergletscherten Gebieten der mittleren und hohen Breiten gibt es in den tropischen Anden keine saisonale Schneebedeckung außerhalb der vergletscherten Gebiete, die als zusätzlicher Wasserspeicher in trockenen Zeiten dienen könnten. Durch die hohe ganzjährige Sonneneinstrahlung schmilzt der außerhalb von Gletscherflächen fallende Schnee innerhalb weniger Tage weg.⁹ Für die trockene Jahreszeit und unregelmäßig auftretenden Dürren sind daher die Andengletscher ein unverzichtbarer Wasserspeicher.

Im Gegensatz zur Lage an der Küste ist die Wasserversorgung in den peruanischen Hochgebirgen aufgrund der Nähe zu den Gletschern und der höheren Niederschläge weniger dramatisch. Die Abhängigkeit vom Wasser der Gletscher ist jedoch u.a. für die landwirtschaftlichen Kleinbetriebe in den Andentälern und andere wirtschaftliche Aktivitäten wie Viehzucht, Ackerbau und Tourismus größer geworden. In den tropischen Anden, die sich von Kolumbien über Ecuador und Peru bis Bolivien erstrecken, sind in der Trockenzeit ca. 4 Mio. Menschen in ihrer Wasserversorgung auf Gletscherwasser angewiesen.¹⁰

⁸ Bury, J.T., Mark, B.G., McKenzie, J.M. et al. (2011): Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru, *Climatic Change* 105, 179-206, DOI 10.1007/s10584-010-9870-1.

⁹ Soruco, A., C. Vincent, A. Rabatel, B. Francou, E. Thibert, J.E. Sicart & T. Condom (2015): Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia (16°S). *Annals of Glaciology*, 56, 147-154

¹⁰ Buytaert, W., S. Moulds, L. Acosta et al. (2017): Glacial melt content of water use in the tropical andes. *Environ. Res. Lett.* 12, 114014. doi:10.1088/1748-9326/aa926c

Änderung der Gletscherbedeckung in den peruanischen Anden

Bereits seit dem Ende der Kleinen Eiszeit Mitte des 19. Jahrhunderts zeigt die Massenbilanz der Gletscher in den tropischen Anden wie fast überall auf der Erde einen negativen Trend, der sich seit den 1970er Jahren deutlich verstärkt hat. Von 2.400 km² Gletscherfläche um 1970 waren 2016 nur noch 1.114 km² übrig. Im zentralen Teil der peruanischen Anden hat sich die Fläche der Gletscher zwischen 1962 und 2016 um 70% verringert, im südlichen Teil um 60%¹¹. Dabei sind die kleinen und mittleren Gletscher fast völlig verschwunden. Abb.2 zeigt die Änderung der Gletscherfläche in der Cordillera Blanca für die Zeit von 1987 bis 2010. In nur vier Jahren von 2013 bis 2016 war in Peru der Rückgang der Gletscherausdehnung mit 203 km² bzw. 16% besonders stark, wofür das ungewöhnlich heftige El-Niño-Ereignis von 2015/16 als Grund angenommen wird.¹² Solche natürlichen Schwankungen werden jedoch langfristig überlagert durch die Wirkung des anthropogenen Klimawandels. Die Temperaturen sind in den tropischen Anden in den letzten 50 Jahren weit über den globalen Durchschnitt angestiegen, und gleichzeitig haben sich die Niederschläge in den zentralen peruanischen Anden um 25-75 mm pro Jahrzehnt verringert.¹³ Dadurch hat sich das Abschmelzen von Gletschereis verstärkt und die Akkumulation verringert.

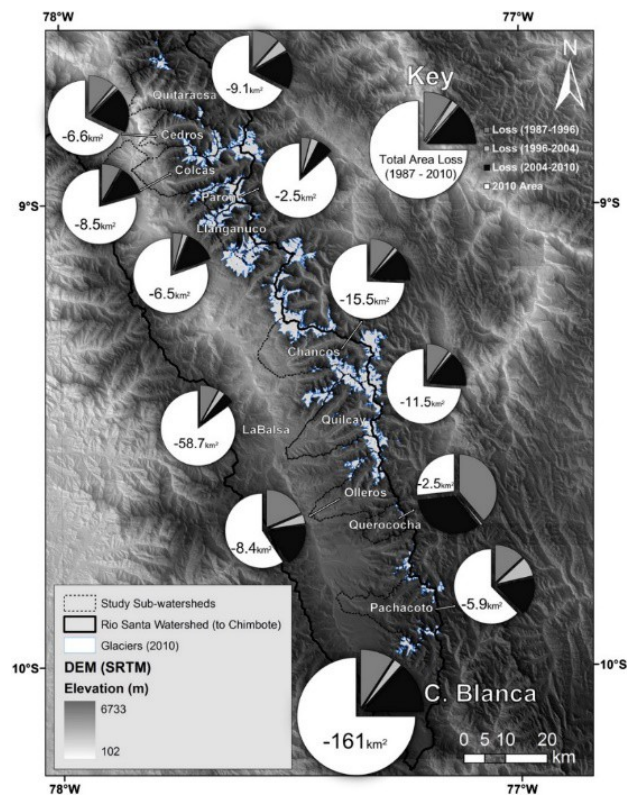


Abb.2: Änderung der Gletscherfläche in der Cordillera Blanca von 1987 bis 2010. Die Verluste werden in Grau bis Schwarz angezeigt, die verbliebenen Flächen im Jahr 2010 in Weiß.¹⁴

11 Masiokas, M.H., A. Rabatel, A. Rivera et al. (2020): A Review of the Current State and Recent Changes of the Andean Cryosphere, *Front. Earth Sci.*, <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00099>

12 Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., and Braun, M. (2019): Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations, *The Cryosphere*, 13, 2537–2556, <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>

13 Pabón-Caicedo, J.D., P.A. Arias, A.F. Carril et al. (2020): Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Front. Earth Sci.* 8, 61. doi:10.3389/feart.2020.00061

14 Burns, P., A. Nolin (2014): Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010, *Remote Sensing of Environment* 140, 165–178; Lizenz: CC BY-NC-ND

Der Klimawandel wird in den nächsten Jahrzehnten das Abschmelzen der Gletscher in den tropischen Anden weiter vorantreiben. Nach Modellsimulationen sind bei einem hohen Szenario bis 2100 Temperaturzunahmen um 5 °C möglich, und die Niederschläge könnten um 10-30% zurückgehen.¹⁵ Hinzu kommt, dass auch die Anzahl trockener Jahre nach dem hohen Szenario RCP8.5 um ca. 20% zunehmen wird.¹⁶ Die Gleichgewichtslinie, die Grenze zwischen Nähr- und Zehrgebiet eines Gletschers, wird sich nach diesem Szenario bis zum Ende des 21. Jahrhundert um mehrere hundert bis 1.000 m nach oben verschieben.¹⁷ Die Gletscher werden dadurch einen großen Teil ihres heutigen Nährgebietes verlieren, und nur einige kleine Gletscher auf den höchsten Gipfeln werden überleben.¹⁸

Hydrologische Folgen

Die Auswirkungen der Gletscherschmelze für die Abflusssysteme in Hochgebirgen vollziehen sich in zwei Phasen. In der ersten Phase nimmt der Anteil von Gletscherwasser an den Abflüssen zu. Bei fortgesetztem Abschmelzen der Gletscher wird jedoch wegen der sich verringernden Eismasse der Höhepunkt (*peak water*) überschritten und die Abflussmenge, die dem Gletscher entstammt, nimmt in der zweiten Phase ab.¹⁹ In Einzelfällen hat der Abfluss das *peak water* bereits hinter sich gelassen. So ist nach Bury et al. (2013)²⁰ der Anteil von Gletscherwasser im Rio Santa und vielen seiner Zuflüsse in der Trockenzeit bereits geringer geworden. Ein weitgehendes Abschmelzen der Gletscher der Cordillera Blanca würde in den nächsten Jahrzehnten eine Reduzierung des Abflusses in der trockenen Jahreszeit um 30% gegenüber heute zur Folge haben. Angesichts der zu erwartenden Zunahme der Bevölkerung und des erhöhten Wasserbedarfs in der Landwirtschaft und anderen ökonomischen Sektoren wie Bergbau und Stromerzeugung stellt der Rückgang des Gletscheranteils am Abfluss ein hohes Risiko dar. In vielen Städten an der Küste steht Leitungswasser schon heute täglich nur für 2-3 Stunden zur Verfügung.

Lösungen des Problems können in der Erschließung neuer Wasserquellen liegen. Durch das Abschmelzen der Gletscher entstehen neue Gletscherseen und können andine Sumpfgebiete, die sogenannten *Páramos*, gespeist werden, die die Wasserspeicherfunktion der Gletscher wenigstens teilweise übernehmen könnten. Eine ähnliche Funktion besitzen bereits vorhandene künstliche Stauseen. Durch groß angelegte weitere neue Projekte soll mit Hilfe von Tunneln und Aquädukten die feuchtere Ostseite der Andenkette erschlossen werden, was teilweise trotz der erforderlichen hohen Investitionen auch schon geschieht .

15 Pabón-Caicedo, J.D., P.A. Arias, A.F. Carril et al. (2020): Observed and projected hydroclimate changes in the Andes. *Front. Earth Sci.* 8, 61. doi:10.3389/feart.2020.00061

16 Neukom, R., Rohrer, M., Calanca, P., Salzmann, N., Huggel, C., Acuña, D., et al. (2015): Facing unprecedented drying of the Central Andes? Precipitation variability over the period AD 1000–2100. *Environ. Res. Lett.* 10:084017. doi: 10.1088/1748-9326/10/8/084017

17 VUILLE, M., M. CAREY, C. HUGGEL et al. (2018): Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead, *Earth-Sci. Rev.*, 176, 195-213, <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019>.

18 Schauwecker, S., M. Rohrer, C. Huggel et al. (2017): The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 122, 5172-5189, doi:10.1002/2016JD025943.

19 IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Chapter 2: High Mountain Areas, 2.3.1

20 BURY, J., B. G. MARK, M. CAREY et al. (2013): New geographies of water and climate change in Peru: Coupled natural and social transformations in the Santa river watershed. *Annals of the Association of American Geographers*, 103 (2), 363-374.

Zentralasien

Die Region

Zentralasien liegt im Herzen des eurasischen Kontinents. Das Gebiet umfasst vier Mio. km² und besitzt eine Bevölkerung von 65 Mio., die sich auf die Staaten Kasachstan, Kirgistan, Usbekistan, Tadschikistan und Turkmenistan verteilen.²¹ Das Klima ist extrem kontinental mit heißen und trockenen Sommern und kalten und feuchten Wintern. 90% des Gebietes erhält weniger als 400 mm Niederschlag pro Jahr, in Turkmenistan sind es nur 191 mm. Im Osten ist das Gebiet durch die Hochgebirge des Pamir und Tien Shan begrenzt, die als Wassertürme Zentralasiens gelten. Trotz der kontinentalen Lage fallen hier deutlich mehr Niederschläge als in den tiefer gelegenen Regionen im Westen. Diese profitieren von den Niederschlägen sowie der Gletscher- und Schneeschmelze in den Hochgebirgen über die Flusssysteme des Syr Darya und Amu Darya, die eines der größten bewässerten Gebiete der Welt mit Wasser versorgen. Dabei entspringen die Quellflüsse des Amu Darya hauptsächlich im Pamir und die des Syr Darya im Tien Shan.

Wasserressourcen und Wassernutzung

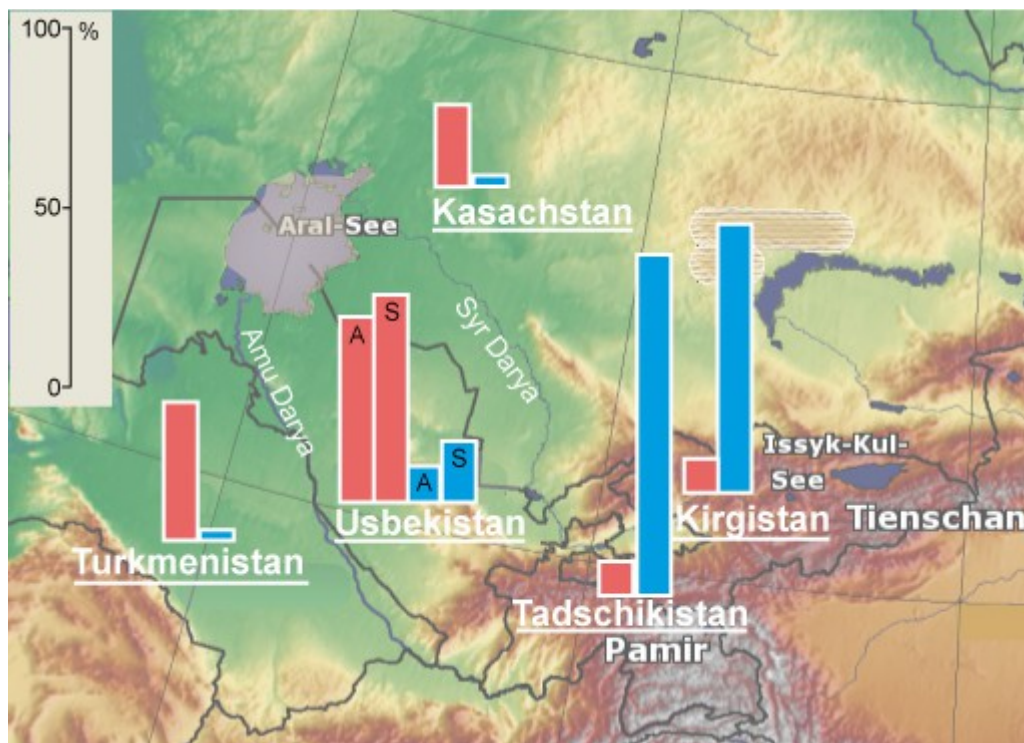


Abb. 3: Das Missverhältnis zwischen Produktion und Verbrauch von Wasser zwischen den Staaten Zentralasiens. Dargestellt sind die Anteile am Wasser der Flusseinzugsgebiete des Amu Darya (Turkmenistan, Usbekistan, Tadschikistan) und Syr Darya (Kasachstan, Usbekistan, Kirgistan) in %. Beim Aralsee sind die restlichen Wasserflächen nach einer NASA-Aufnahme vom August 2021 sowie die frühere Ausdehnung gezeigt.²²

Im Unterschied zu den tropischen Anden in Peru sind sowohl Schnee- wie Gletscherschmelze wichtige Komponenten des Oberflächenabflusses, der einen deutlich saisonalen Charakter mit

21 Hamidov, A., Helming, K., Balla, D., 2016. Impact of agricultural land use in Central Asia: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 6. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0337-7>

22 Eigene Darstellung; Daten nach Chen, Y., Li, Z., Fang, G., & Li, W. (2018): Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 5059–5069. <https://doi.org/10.1029/2017JD028184>

einem Maximum im Sommer besitzt. Dabei dominiert die Schneeschmelze von Mai bis Juni und die Gletscherschmelze von Juli bis August. Im Jahresmittel macht die Schneeschmelze über 60% des Abflusses aus, während im Sommer auch der Abfluss von den Gletschern überwiegen kann.²³ So trägt das Gletscherwasser im Tien Shan im Spätsommer 40-60% zum Abfluss bei.²⁴

Zwischen den Staaten Zentralasiens sind die Wasserressourcen sehr ungleich verteilt (Abb. 3). Die hochgelegenen Staaten Kirgisistan und Tadschikistan befinden sich an der Quelle des Gebirgswassers und liefern über 70% der Wasserressourcen der Region, wovon sie selbst aber nur 10% verbrauchen. Die Tieflandstaaten Kasachstan, Turkmenistan und Usbekistan generieren dagegen nur 20% der Wasserressourcen, verbrauchen aber je nach Land 50-75%.²⁵ Die Landwirtschaft ist in den meisten Staaten mit 90% der Hauptverbraucher des Wasserangebots. Sie nimmt 70% der Fläche Zentralasiens ein, wovon allerdings der bei weitem größte Teil als Weideland genutzt wird. Das bewässerte Land erstreckt sich über 5-10% der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Weizen und Baumwolle bestimmen den Anbau. Das Wasser wird durch offene Kanäle von den Flüssen auf die Felder geleitet. Wegen mangelhafter Drainage ist es in Zentralasien zu einer Bodendegradation und Versalzung von fast 50% des bewässerten Landes gekommen, in Turkmenistan sogar zu 96%. Die Folge war ein Rückgang der Produktion von Baumwolle und Weizen.²⁶ In den hoch gelegenen Staaten Kirgisistan und Tadschikistan profitiert neben der Landwirtschaft auch die Stromproduktion von dem Schmelzwasser aus den Bergen.

Klimaänderungen und die Folgen für die Schnee- und Eisbedeckung

Der Klimawandel hat sich in Zentralasien bereits im 20. Jahrhundert mit einem Temperaturanstieg von 0,18 bis 0,42 °C pro Jahrzehnt bemerkbar gemacht. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts wird bei dem hohen Szenario RCP8.5 im Vergleich zu 1981-2010 eine Temperaturzunahme der Jahresmittel um 5 °C und der Sommertemperatur um 6,5 °C erwartet, was deutlich über dem globalen Mittel liegen würde.²⁷ Besonders stark ist schon heute der Temperaturanstieg in den Gebirgsregionen und vor allem in den schnee- und eisbedeckten höheren Lagen. So nahm die Temperatur im Tien Shan seit Mitte des 20. Jahrhunderts um bis zu 0,4 °C pro Jahrzehnt zu.²⁸ Die jährlichen Niederschläge haben sich in Zentralasien bisher dagegen nur wenig und regional unterschiedlich geändert, wobei im Norden eher Zunahmen von bis zu 11% und im Süden bis 15 % Abnahmen registriert wurden. Bei zukünftigen Niederschlägen wird damit gerechnet, dass sie im Sommer in den meisten Gebieten um bis zu 50% abnehmen, im Winter und Frühling dagegen um bis zu 30% und

23 Barandun, M., J. Fiddes, M. Scherler, T. Mathys, T. Saks, D. Petrakov, M. Hoelzle (2020): The state and future of the cryosphere in Central Asia, *Water Secur.*, 11, Article 100072, [10.1016/j.wasec.2020.100072](https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072)

24 Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., et al. (2021): Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092084. <https://doi.org/10.1029/2020GL092084>

25 Chen, Y., Li, Z., Fang, G., & Li, W. (2018): Large hydrological processes changes in the transboundary rivers of Central Asia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123, 5059–5069. <https://doi.org/10.1029/2017JD028184>

26 Hamidov, A., Helming, K., Balla, D., 2016. Impact of agricultural land use in Central Asia: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 36, 6. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0337-7>

27 Didovets, I., A. Lobanova, V. Krysanova et al. (2021): Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 34, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779>

28 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

mehr zunehmen werden.²⁹ Im Tien Shan zeigte sich schon in den letzten ca. 50 Jahren eine deutliche Zunahme im Winter, im westlichen Tien Shan sogar um 23%.³⁰

Schneebedeckung

Höhere Temperaturen haben für die Schnee- und Gletscherbedeckung negative Auswirkungen, höhere Niederschläge bewirken das Gegenteil. Die Folgen von Temperatursteigerungen auf Schneefall und Schneebedeckung sind vielfältig. Zum einen fällt bei einer Erwärmung der Niederschlag zunehmend als Regen und weniger als Schnee. Dadurch verkürzt sich in der Regel die Schneesaison, und die Schneefallgrenze wandert nach oben. Bereits in der 2. Hälfte des 20. Jahrhunderts hat sich die Schneedicke im Tien Shan um 8-14 cm verringert (Abb. 4).³¹ Auch die Dauer der Schneebedeckung hat sich im Mittel um neun Tage reduziert, und deren maximale Ausdehnung zeigt zwischen 2002 und 2013 einen abnehmenden Trend um 672 km² pro Jahr. Nur im westlichen Tien Shan hat die Schneebedeckung durch stärkere und feuchtere Westwinde geringfügig um 2,3 km² pro Jahr zugenommen.³² Die frühere Schneeschmelze führt dazu, dass die dunklere Oberfläche von Felsuntergrund und Gletschern frei wird und die Albedo abnimmt. Die Folgen sind eine stärkere Absorption der Sonneneinstrahlung und weiter zunehmende Erwärmung. Schon eine Temperaturzunahme um 2 °C bei einem niedrigen Szenario und ein Rückgang der Niederschläge um 30% würde in diesem Jahrhundert die Speicherung von Wasser in Schnee im Monat März um fast ein Drittel verringern.³³

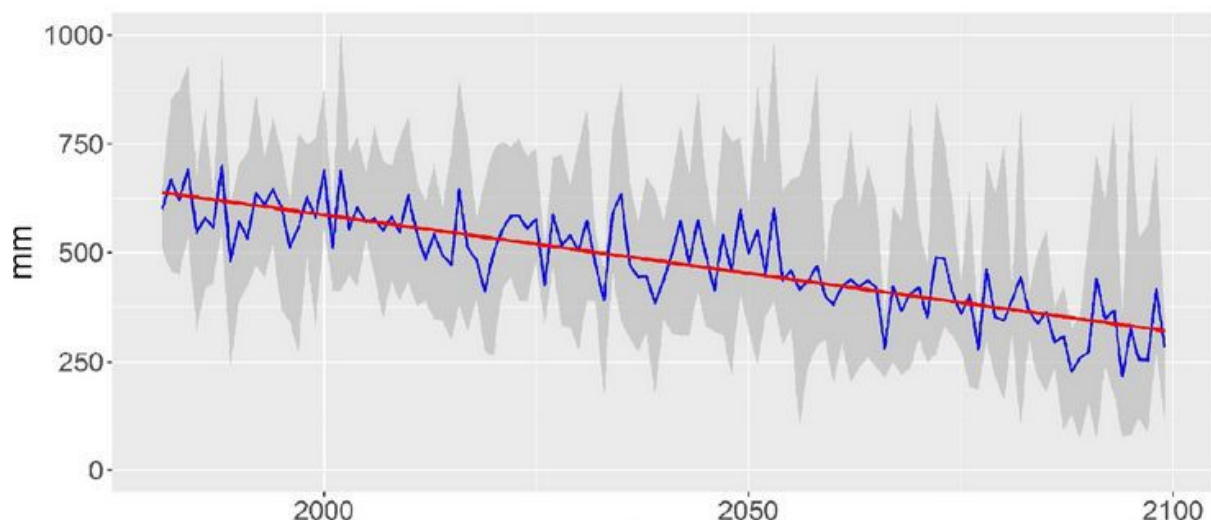


Abb. 4: Abnahme der Schneedicke im westlichen Tien Shan 1981-2100 nach Modellberechnungen mit dem hohen Szenario RCP8.5.³⁴

29 Didovets, I., A. Lobanova, V. Krysanova et al. (2021): Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 34, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779>

30 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

31 Hoelzle, M., M. Barandun, T. Bolch et al. (2020): The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia, Ch. 8, in: Xenarios, S., D. Schmidt-Vogt, M. Qadir et al.: *The Aral Sea Basin. Water for Sustainable Development in Central Asia*

32 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

33 Hoelzle, M., M. Barandun, T. Bolch et al. (2020): The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia, Ch. 8, in: Xenarios, S., D. Schmidt-Vogt, M. Qadir et al.: *The Aral Sea Basin. Water for Sustainable Development in Central Asia*

Vergletscherung

Außer von der Schneebedeckung ist die Wasserversorgung Zentralasiens in hohem Maße auch von der Vergletscherung in den beiden Hochgebirgen Tien Shan und Pamir abhängig. Im Tien Shan gibt es mindestens 15.000 Gletscher, die eine Fläche von 12.300 km² bedecken; die Anzahl der Gletscher im Pamir wird auf 13.000, die Fläche auf 12.800 km² geschätzt.³⁵ Bei der großen Mehrheit handelt es sich um kleine Gletscher mit einer Fläche von weniger als 2 km².

Fast alle Gletscher des Tien Shan zeigen seit den 1960er Jahren einen abnehmenden Trend. Regional sind mit 20% der Fläche am stärksten die Gletscher im westlichen Tien Shan zurückgegangen. Der Verlust war außerdem am größten in Gebieten mit kleineren Gletschern sowie bei Gletschern in tieferen Lagen. Der Massenverlust belief sich im westlichen Tien Shan zwischen 2000 und 2018 auf -0,3 m Wasseräquivalent (WE)/Jahr, im zentralen Tien Shan auf -0,13 m und im östlichen Tien Shan auf -0,5 m WE/Jahr.³⁶ Nach Modellsimulationen wird das heutige Eisvolumen des Tien Shan bis 2050 möglicherweise auf die Hälfte geschrumpft sein.³⁷

Für den Pamir zeigen Berechnungen hohe Abnahmen der Eismasse von -0,5 m WE/Jahr im westlichen Pamir und geringe Zunahmen in dem für Zentralasien weniger relevanten östlichen Teil.³⁸ Quantitative Angaben liegen für den Pamir im Wesentlichen für einzelne Gletscher vor, so für den Abramov-Gletscher im nordwestlichen Pamir ein kumulativer Massenverlust von ca. 20 m WE zwischen 1960 und 2019 (Abb. 5). Die vergletscherten Flächen nehmen ebenfalls tendenziell ab, und zwar ähnlich wie im Tien Shan mehr in den unteren Lagen als in höheren Gletschergebieten. Für die meisten Flusseinzugsgebiete wurde eine Zunahme der Flächenabnahme im beginnenden 21. Jahrhundert berichtet, besonders in Gebieten mit kleineren Gletschern.³⁹

34 Didovets, I., A. Lobanova, V. Krysanova et al. (2021): Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 34,

<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779> CC BY-NC-ND <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

35 Barandun, M., J. Fiddes, M. Scherler, T. Mathys, T. Saks, D. Petrakov, M. Hoelzle (2020): The state and future of the cryosphere in Central Asia, *Water Secur.*, 11, Article 100072, [10.1016/j.wasec.2020.100072](https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072)

36 Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., et al. (2021): Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092084.

<https://doi.org/10.1029/2020GL092084>

37 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

38 Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., et al. (2021): Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092084.

<https://doi.org/10.1029/2020GL092084>

39 Hoelzle, M., M. Barandun, T. Bolch et al. (2020): The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia, Ch. 8, in: Xenarios, S., D. Schmidt-Vogt, M. Qadir et al.: The Aral Sea Basin. *Water for Sustainable Development in Central Asia*

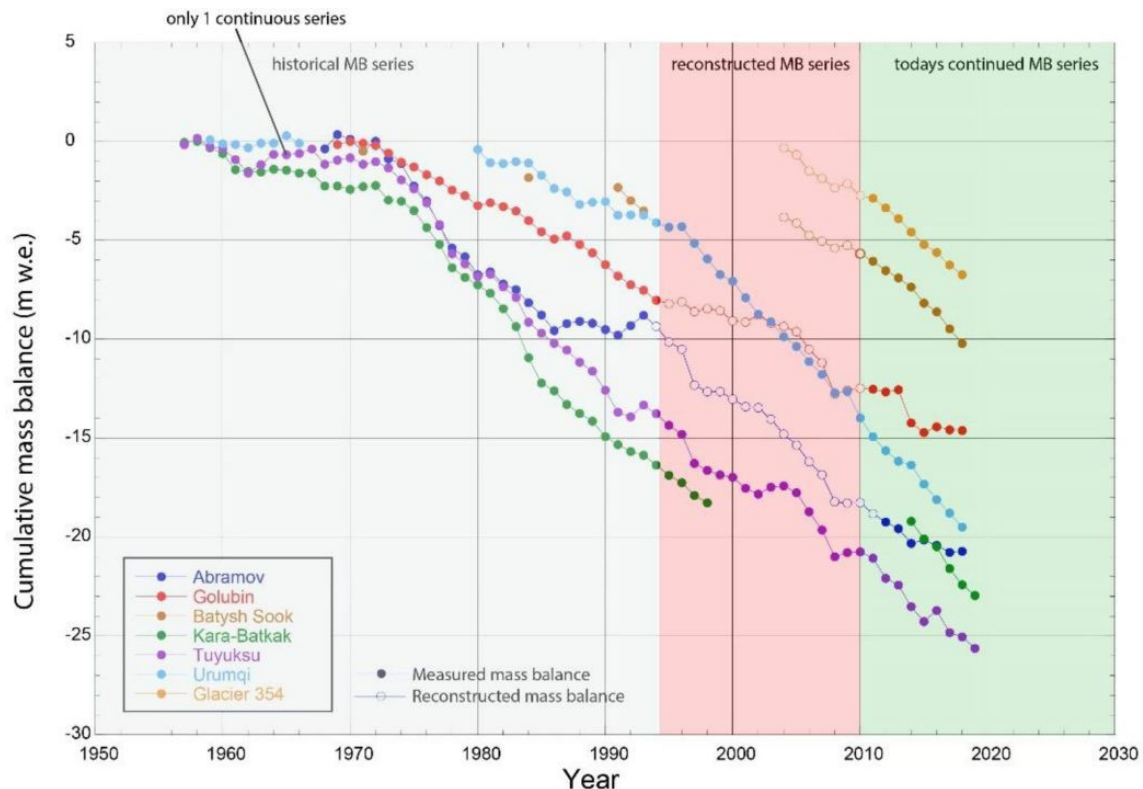


Abb. 5: Zeitserien der kumulativen Änderung der Massenbilanz von einzelnen Gletschern in Zentralasien in m Wasseräquivalent (Abramov: Pamir; alle anderen Gletscher: Tien Shan)⁴⁰

Abfluss

Änderungen der Schnee- und Gletscherbedeckung haben direkte Konsequenzen für die gespeicherten Wasserressourcen (Abb. 6).⁴¹ In den meisten Schneegebieten kommt es durch die höheren Temperaturen zu einem früheren Einsetzen der Schneeschmelze. Die Folge ist eine frühere und durch den oft höheren Schneefall stärkere Abflussspitze. So verschob sich das Hochwassermaximum im Syr Darya von Frühjahr und frühen Sommer auf den späten Winter und frühen Frühling. In einzelnen Zuflüssen erhöhte sich die Abflussmenge zwischen den Zeiträumen 1960-1997 und 1998-2015 um 50% und mehr. Die Konsequenzen für die Gebiete flussabwärts sind gravierend und stellen große Herausforderungen an das Wassermanagement. Zum einen erhöht sich die Gefahr von Hochwasserereignissen durch jahreszeitlich frühere Abflussspitzen. Zum anderen drohen hohe Wasserstände und die Wachstumszeit der Anbaufrüchte zeitlich zunehmend auseinanderzufallen.⁴² In den nächsten Jahrzehnten wird sich dieser Trend fortsetzen. Eine Temperaturzunahme um 2 °C und ein Rückgang der Niederschläge um 30% würde in diesem Jahrhundert die Speicherung von Wasser in Schnee im Monat März um fast ein Drittel verringern.⁴³

40 Barandun, M., J. Fiddes, M. Scherler, T. Mathys, T. Saks, D. Petrakov, M. Hoelzle (2020): The state and future of the cryosphere in Central Asia, *Water Secur.*, 11, Article 100072, [10.1016/j.wasec.2020.100072](https://doi.org/10.1016/j.wasec.2020.100072); Lizenz: [Creative Commons CC-BY-NC-ND](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

41 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

42 Yang, T., Q. Li, S. Ahmad, H. Zhou, and L. Li (2019): Changes in Snow Phenology from 1979 to 2016 over the Tianshan Mountains, Central Asia" *Remote Sensing* 11, no. 5: 499. <https://doi.org/10.3390/rs11050499>

43 Hoelzle, M., M. Barandun, T. Bolch et al. (2020): The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia, Ch. 8, in: Xenarios, S., D. Schmidt-Vogt, M. Qadir et al.: *The Aral Sea Basin. Water for Sustainable Development in Central Asia*

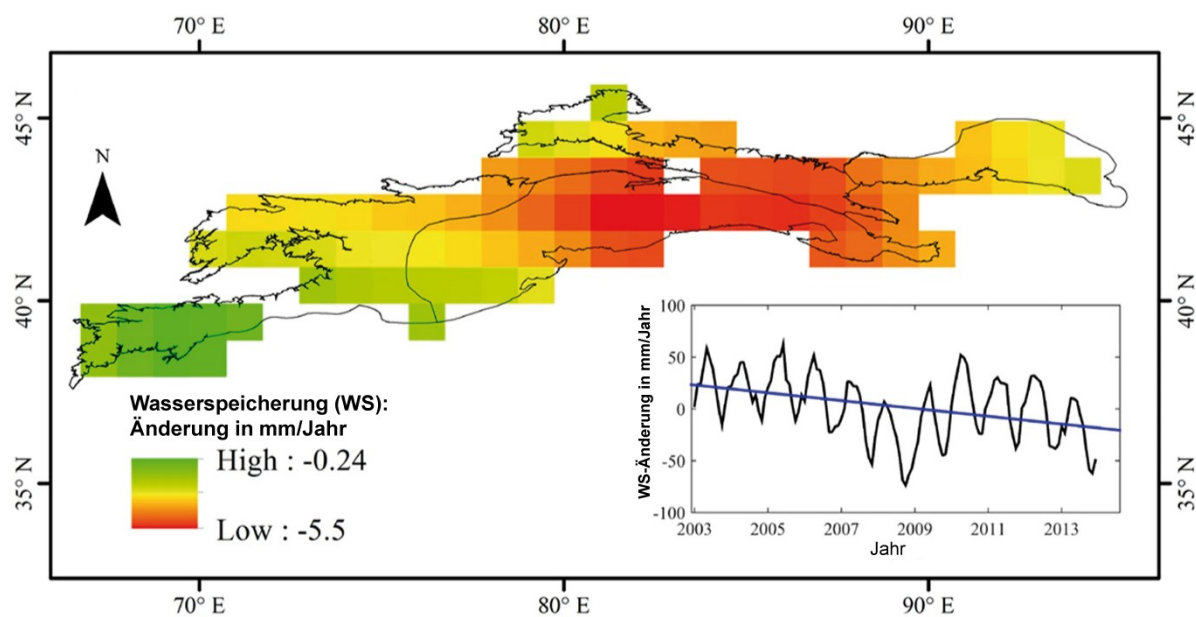


Abb. 6: Änderung des vor allem in Eis und Schnee gespeicherten Wassers im Tien Shan zwischen 2003 bis 2014 in mm/Jahr.⁴⁴

Das Abschmelzen der Gletscher führt zunächst zu einem höheren Abfluss besonders in den trockenen Sommermonaten, der teilweise schon zu beobachten ist und größtenteils bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts anhalten wird.⁴⁵ So zeigt der Abfluss der Wasserläufe aus dem Tien Shan aufgrund der verstärkten Gletscherschmelze seit 1960 einen zunehmenden Trend, besonders bei den Flüssen aus dem stark vergletscherten mittleren Teil.⁴⁶ Auch der Vanch, ein sekundärer Zufluss des Amu Darya im westlichen Pamir, weist durch einen wachsenden Gletscherwasseranteil einen erhöhten Abfluss auf, obwohl sich der Niederschlag zwischen 1956 und 2016 kaum geändert hat.⁴⁷ Der mittlere zusätzliche Gletscheranteil am Abfluss einzelner beispielhafter Flüsse betrug für den Tien Shan 9% und für den Pamir 5%.⁴⁸

Da sich die verbleibende Masse der Gebirgsgletscher ab Mitte des 21. Jahrhunderts deutlich verringert haben wird, werden auch die Abflussmengen in den beiden großen Flusssystemen des Amudarja und Syrdarja abnehmen, nach Modellberechnungen um bis zu 40%. Für die Sommermonate wird bei einem hohen Klimaszenario sogar mit einer Abnahme der Abflussmengen von bis zu 60% gerechnet. Außerdem wird sich durch die frühere Schnee- und Eisschmelze der Höhepunkt des Abflusses im Jahresverlauf im späteren 21. Jahrhundert noch weiter nach vorne verschieben.⁴⁹ Das für die Zukunft drohende Ausbleiben des Gletscherwassers gerade in den trockenen Sommermonaten wird für die landwirtschaftliche

44 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458; Lizenz: CC BY

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

45 Hoelzle, M., M. Barandun, T. Bolch et al. (2020): The status and role of the alpine cryosphere in Central Asia, Ch. 8, in: Xenarios, S., D. Schmidt-Vogt, M. Qadir et al.: *The Aral Sea Basin. Water for Sustainable Development in Central Asia*

46 Chen, Y., L. Weihong, H. Deng et al. (2016): Changes in Central Asia's Water Tower: Past, Present and Future. *Scientific Reports* 6, 35458; doi: 10.1038/srep35458

47 Normatov, I., and Normatov, P. (2020): Climate change impact on hydrological characteristics and water availability of the Mountain Pamir Rivers, Proc. IAHS, 383, 31–41, <https://doi.org/10.5194/piahs-383-31-2020>

48 Barandun, M., Pohl, E., Naegeli, K., McNabb, R., Huss, M., Berthier, E., et al. (2021): Hot spots of glacier mass balance variability in Central Asia. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL092084.

<https://doi.org/10.1029/2020GL092084>

49 Didovets, I., A. Lobanova, V. Krysanova et al. (2021): Central Asian rivers under climate change: Impacts assessment in eight representative catchments, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 34, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100779>

Bewässerung in der Hauptwachstumszeit wahrscheinlich ein noch größeres Problem darstellen als der Rückgang der Schneebedeckung. Tien Shan und Pamir sind damit in ihrer Funktion als Wassertürme für Zentralasien ernsthaft bedroht.

Schluss

In Peru und Mittelasien droht ein Abschmelzen von Gletschern, in Zentralasien zusätzlich von Schneelagen, die Wasserversorgung einer großen Bevölkerung und von Ökosystemen zu gefährden. In beiden Regionen ist aber gerade durch die infolge des Klimawandels zunehmenden Schmelzprozesse bis Mitte des 21. Jahrhunderts zunächst mit einer Zunahme des Abflusses aus den vergletscherten und verschneiten Gebirgsregionen zu rechnen. Durch Bevölkerungszunahme und die Ausdehnung der Bewässerungslandwirtschaft wächst allerdings schon seit langem auch der Wasserbedarf. Dennoch bleibt eine Atempause, um sich auf die danach vor allem für die Landwirtschaft, aber auch für die Trinkwasserversorgung der Bevölkerung und die Energieerzeugung mit Wasserkraft drohende katastrophische Situation einzustellen. In Peru hat man bereits vor Jahrzehnten damit begonnen, neue Wasserquellen vor allem auf der feuchten Ostseite der peruanischen Anden durch moderne Infrastrukturanlagen zu erschließen (s.o.). In Zentralasien steht diese Möglichkeit nicht zur Verfügung, da es derartige erreichbare Wasserquellen nicht gibt. Hier bedarf es einerseits einer politischen Kooperation zwischen den wasserreichen und den von ihnen abhängigen wasserarmen Staaten, um zwischenstaatliche Konflikte um Wasser zu vermeiden. Andererseits ist eine Verbesserung der Wassernutzung vor allem in der Landwirtschaft, die in den meisten Staaten 90% des Wassers verbraucht, unumgänglich. Sowohl effektivere Bewässerungsmethoden, die gegenwärtig weitgehend auf veralteten und defekten Anlagen basieren, wie die Auswahl von weniger bewässerungsintensiven Anbaufrüchten bieten Lösungsmöglichkeiten.