

4.5 Die Gletscher der Hindukusch-Himalaya Region

CHRISTOPH MAYER & ASTRID LAMBRECHT

Die Gletscher der Hindukusch-Himalaya Region: Die Region zwischen Pamir im Westen und den östlichen Ausläufern des Himalayas weist die größte Gebirgsvergletscherung außerhalb der Polargebiete auf. Der Hindukush-Karakorum-Himalaya Bogen stellt dabei eine wichtige Barriere zwischen dem indischen Subkontinent und dem Rest Asiens dar. Hier finden sich einige der größten Gebirgsgletscher der Welt, mit über 70 km Länge und bis zu fast 1.000 km² Fläche. Die kleinen Gletscher (unter 1 km²) bilden jedoch die mit Abstand größte Gruppe. Allein in der HKH Region finden sich etwa 38.000 Gletscher mit einer Gesamtfläche von über 44.000 km². Eine systematische Beobachtung dieser ausgedehnten Region ist erst mit der regelmäßigen Abdeckung durch Satellitenaufnahmen möglich. Es zeigt sich ein sehr heterogenes Bild mit einem deutlichen Eisverlust im Himalaya und weitgehend stabilen Verhältnissen im Karakorum und Teilen des Pamir.

The glaciers in the Hindukush-Himalayan Region: The region between Pamir in the west and the eastern foothills of the Himalaya show the highest mountain glacier concentration outside of the polar regions. The Hindukush-Karakoram-Himalaya range forms an important barrier between the Indian sub-continent and the rest of Asia. Several of the largest mountain glaciers of the world are found here some of them reaching more than 70 km in length and covering an area of almost 1,000 km². However, the small glaciers (less than 1 km²) form by far the largest glacier group. In the HKH region only, there are about 38,000 glaciers, which cover an area of more than 44,000 km². The systematic monitoring of this extensive region is only possible since the start of a regular coverage by satellite images. The balance conditions show a rather heterogeneous situation, with a distinct ice loss in the Himalaya and almost stable conditions in the Karakoram and parts of the Pamir.

Das größte vergletscherte Gebiet Asiens findet sich entlang des Hindukusch-Karakorum-Himalayabogens (HKH) von Afghanistan im Westen bis Myanmar im Osten. Zusammen mit den benachbarten Pamir und Tien Schan Gebirgen ist dies die größte Hochgebirgsregion Asiens. Hier befinden sich nicht nur die höchsten Berge der Welt, sondern auch die größten Gebirgsgletscher außerhalb der Polarregionen. Diese Gebirge erstrecken sich von etwa 71° östlicher Länge bis 98° östlicher Länge über gut 3.000 km, wobei der HKH immerhin von 72° bis 92° mit einer Länge von knapp 2.200 km reicht. Durch die von West nach Ost sehr unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ergeben sich sehr unterschiedliche Arten der Vergletscherung. Viele der großen Flüsse Südasiens entspringen in diesen Gebirgen, unter anderem der Amu Darya, der Indus, der Ganges und der Brahmaputra. Gleichzeitig leben in dieser Region fast eine Milliarde Menschen (IMMERZEEL et al. 2010).

Die Abgrenzung der vergletscherten Gebirgsregionen ist schwierig, da diese sich in vielen Richtungen in kleineren Einheiten fortsetzen. Zudem ist auch die Definition einzelner Gebirge nicht immer eindeutig. Daher wird hier eine Abgrenzung nach den Einzugsgebieten der Hauptflüsse getroffen und die Vergletscherung sowie deren Veränderung in diesem Kontext diskutiert (Abb. 4.5-1). Für die HKH Region ergibt sich damit die Einteilung in die Abflussregionen von Indus, Ganges und Brahmaputra. Zum Vergleich wird auch die Entwicklung des westlich anschließenden Amu Darya Einzugsgebietes dargestellt, soweit bekannt. Da bei dieser Einteilung jedoch die Gletscher im östlichen Pamir und auf der Nordseite des Karakorum nicht enthalten sind, wird auch ein Blick auf die Vergletscherungsverhältnisse

des Tarimbeckens geworfen. Im Osten setzt sich das Gebirge in den Einzugsgebieten von Irrawady, Salween und Mekong fort und geht dann in die Hochgebirge von China im Bereich des Yangtses über. Da die Vergletscherung in dieser Region nur noch sehr gering ist, werden diese Gebiete hier nicht berücksichtigt.

Klima

Die klimatischen Verhältnisse in der HKH-Region werden vom wechselnden Einfluss der Westwinde, des indischen Sommermonsuns und des Ostasienmonsuns bestimmt. Im Bereich der Himalaya-Hauptkette ist der indische Sommermonsun für etwa 80% der gesamten Niederschläge verantwortlich (BURBANK et al. 2012). Die Temperaturdifferenz zwischen dem kühleren Ozean und dem heißen indischen Subkontinent erzeugt ein Tiefdrucksystem über Indien und landwärts gerichtete Winde, die die Feuchtigkeit Richtung Himalaya transportieren. Im Winter kehrt sich dieses System um und nordöstliche Winde transportieren trockene Kaltluft vom tibetischen Plateau. Allerdings sind sowohl der sommerliche Monsun wie auch die Situation im Winter von der Aktivität der Westwinde abhängig. Vor allem im westlichen Himalaya und im Karakorum sind weitreichende westliche Strömungen in der oberen Troposphäre vorwiegend im Winter für den Feuchtigkeitseintrag verantwortlich. Der Einfluss des Monsuns nimmt daher von Ost nach West entlang der Gebirge ab und im westlichen Teil stammen mehr als 50% der Niederschläge aus Westwind-Störungssystemen (LANG & BARROS 2004). Das starke Relief der Gebirge ist dabei mit verantwortlich für die Entwicklung von starken troposphärischen Störungen und damit verbundenen

starken Schneefallereignissen im Winter, die auch weit in den zentralen Himalaya reichen können (RIDLEY et al. 2013). Je nach Intensität des Monsuns und der relativen Lage des westlichen Jetstreams, nördlich oder südlich des HKH Hauptkamms, dringt der Monsun unterschiedlich weit in das Gebirge vor. Nördlich des Hauptkamms herrscht jedoch der winterliche Niederschlag vor und sommerliche Monsunereignisse bilden die Ausnahme (MAYER et al. 2014). Die charakteristische, jahreszeitliche Temperaturverteilung ist durch die beschriebenen Druckverhältnisse ebenfalls stark beeinflusst. Während im westlichen Teil der HKH Region die Differenz zwischen Sommer- und Wintertemperaturen sehr groß ist, sind die maximalen Sommertemperaturen entlang des östlichen Himalayas durch die Monsun-bedingte Bewölkung erniedrigt. Gleichzeitig begünstigt das feucht-warme Klima in dieser Region die Gletscherschmelze durch hohe Energieflüsse zur Eisoberfläche, während der Eisverlust in den westlichen Teilen durch die geringere Luftfeuchte zu einem größeren Teil durch wesentlich weniger effektive Sublimation reduziert wird.

Gletscherinventare

Eine wesentliche Voraussetzung zur Beurteilung der Gletscherentwicklung ist die Kenntnis über die vorhandenen Gletscherressourcen. Während in Europa und

auch in der ehemaligen Sowjetunion schon um 1960 damit begonnen wurde ganze Gletschergebiete systematisch zu kartieren, sind solche Initiativen in anderen Teilen der Welt erst später begonnen worden. Ein Grund mag dabei auch die relative Zugänglichkeit der vergletscherten Gebirge gewesen sein. Spätestens seit der problemlosen Verfügbarkeit von hochauflösenden Satellitenbildern ab etwa 1980 wurde damit begonnen, die Gletscher in vielen Regionen der Erde in ihrer Ausdehnung zu dokumentieren. Speziell das Global Land Ice Monitoring from Space (GLIMS, KARGEL et al. 2005) Projekt hat dabei einen wichtigen Beitrag durch Standardisierung der Verfahren und eine strategische Verteilung der Aufgaben geleistet. Allerdings sind die meisten Gebiete erst in den letzten 15-20 Jahren kartiert worden (Abb. 4.5-2). Somit sind die Aussagen über längerfristige Veränderungen eingeschränkt. Die Einschätzung der mittelfristigen Entwicklung der Gletscher in dieser Region beruht daher bis in die jüngste Zeit nur auf vereinzelt Messungen an wenigen Gletschern, während Gletscherinventare in wenigen Ländern innerhalb der Nationalgrenzen erstellt wurden (z.B. in Indien 1999 und China 2000, RAINA & SRIVASTAVA 2008; SHI et al. 2009). Inzwischen stehen auch durch andere Initiativen (z.B. COGLEY 2011; GlobGlacier: PAUL et al. 2009) weitgehend lückenlose Gletscherinventare in

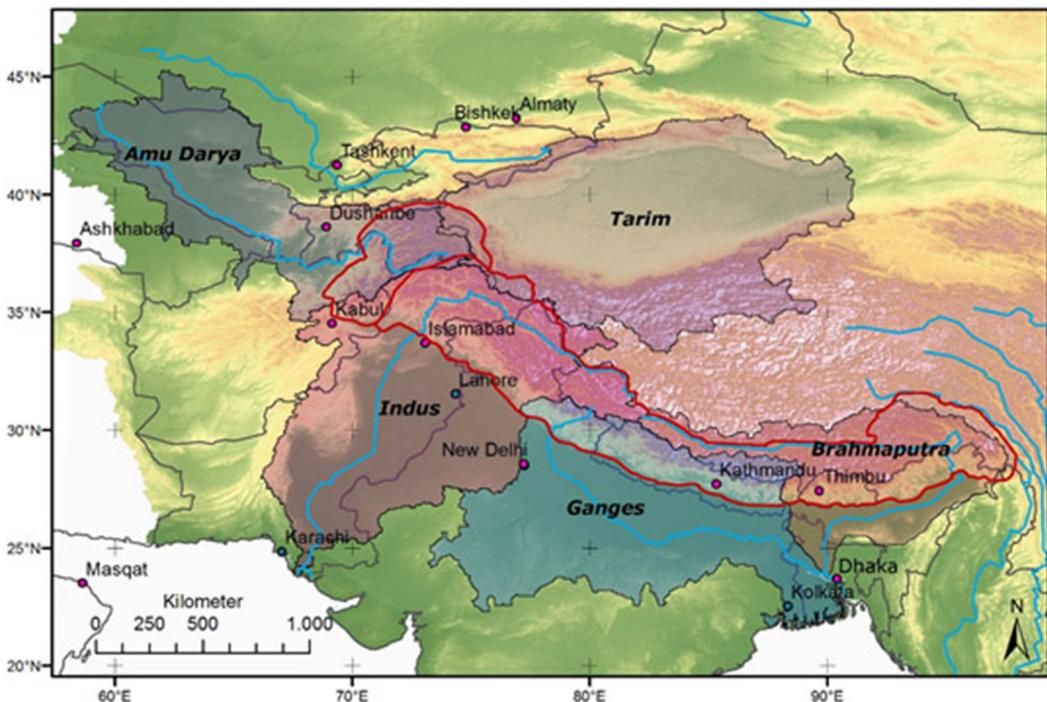


Abb. 4.5-1: Einzugsgebiete der Hauptflüsse im Bereich des Pamir und des HKH. Die Gebirgsregion des HKH ist in rot markiert (Kartengrundlage: GTOPO30).

der HKH Region zur Verfügung. Hervorzuheben sind dabei die Aktivitäten des *International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD)* in Nepal, welches eine wichtige Rolle für die Koordinierung von Kartierungsaktivitäten unterschiedlicher Akteure in dieser Region spielt (BAJRACHARYA & SHRESTA 2011). Basierend auf optischen Satellitenbildern aus einem Zeitraum von wenigen Jahren um 2005 wurde hier ein Inventar aller Gletscher in der HKH Region erstellt. Es hat sich allerdings auch hier, wie bei ähnlichen Initiativen gezeigt, dass eine vollständig automatische Kartierung nicht möglich ist. Vor allem schuttbedeckte Gletscherzungen und die Abgrenzung der schneebedeckten Akkumulationsgebiete erfordern immer wieder manuelle Korrekturen. Die Daten für das Amu Darya Einzugsgebiet wurden für diesen Beitrag aus dem Randolph Glacier Inventory (RGI) entnommen (PFEFFER et al. 2014). Da dieses Inventar keine enge Zeitspanne der Kartierungen und auch keine einheitlichen Kartierungsstrategien besitzt, sind diese Daten nicht so zuverlässig. Für einen prinzipiellen Vergleich der Gebiete reicht die Datenqualität jedoch aus.

Ein entscheidender Punkt in Bezug auf die Gletscheranzahl ist die minimale Gletscherfläche, da kleine Gletscher überproportional häufig vorkommen.

BAJRACHARYA & SHRESTA (2011) verwenden als minimale Gletscherfläche 0,02 km² (z.B. GLIMS: 0,05 km²). Die Resultate können daher nicht unbedingt mit anderen Inventaren in Bezug auf eine Veränderung der Anzahl der Gletscher verglichen werden.

Die Ergebnisse werden in *Tab. 4.51* in kondensierter Form dargestellt und verdeutlichen die Signifikanz der Gletscher in der HKH Region. In der engeren HKH Region existieren demnach etwa 38.000 Gletscher mit einer Gesamtfläche von 44.000 km², bei einer gesamten Einzugsgebietsfläche von etwa 2,7 Mio. km². Die Erweiterung der Region um die benachbarten Einzugsgebiete des Amu Darya und des Tarimbeckens (im Wesentlichen Pamir, Kunlun und Teile des Tien Shan) resultiert in einer Gletscheranzahl von beinahe 60.000 Gletschern mit einer Fläche von 78.000 km².

Der Vergletscherungsgrad des gesamten Einzugsgebietes ist mit 1,54% sehr niedrig, da fast alle Einzugsgebiete über sehr ausgedehnte, meist tiefliegende Regionen verfügen. In Bezug auf die Gletscherregionen (die Fläche bis zur tiefsten Gletscherzunge im jeweiligen Gebiet) ist die Vergletscherung deutlich höher und beträgt für das Induseinzugsgebiet 6,4% und das Gangesgebiet 9,3%. In den ariden Zonen nördlich der Hauptwasserscheide ist die Vergletscherung gerin-

Tab. 4.5-1: Flächenverhältnisse der einzelnen Einzugsgebiete mit der Anzahl der kartierten Gletscher (basierend auf BA-JRACHARYA et al. 2011 und PFEFFER et al. 2014).

	<i>Indus</i>	<i>Ganges</i>	<i>Brahmaputra</i>	<i>Amu Darya</i>	<i>Tarim</i>
<i>Fläche (km²)</i>	1,12 Mio.	1,02 Mio.	573.000	644.000	1,07 Mio
<i>Gletscheranzahl</i>	18.500	7.960	11.500	9.000	12.500
<i>Gletscherfläche (km²)</i>	21.200	9.000	14.000	13.500	20.400

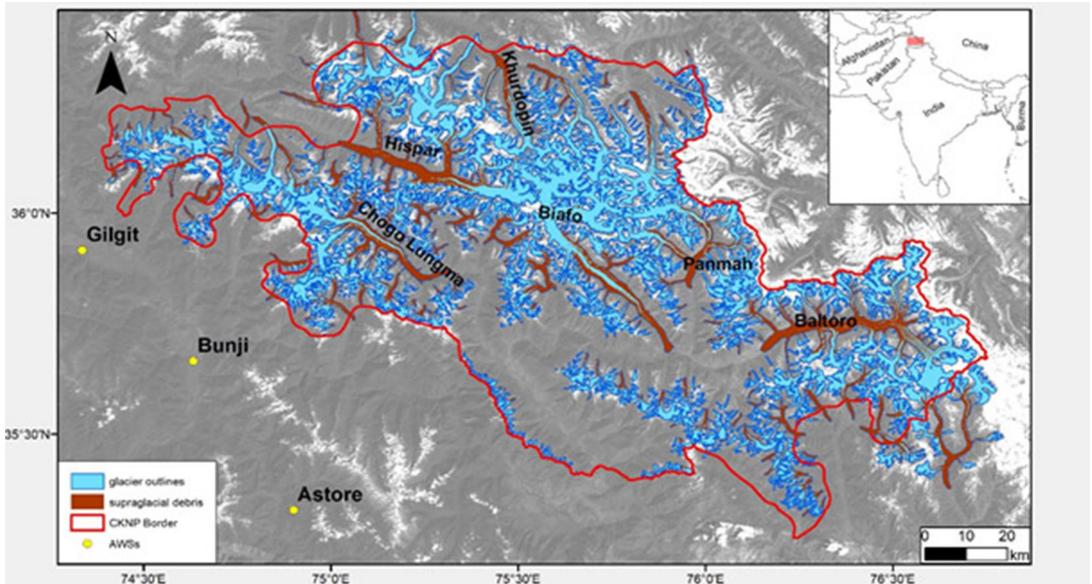


Abb. 4.5-2: Beispiel eines Gletscherinventars für den zentralen Karakorum (nach MINORA et al. 2015, *subm.*). Die Gletscherflächen sind in blau dargestellt, die schuttbedeckten Gletscherflächen in braun.

ger, mit 4,3% im Brahmaputraeinzugsgebiet und 4,7% im Tarimgebiet. Wie in allen vergletscherten Gebirgsregionen zeigt sich, dass auch hier die mittlere Gletscherfläche mit 1,15 km² in der HKH-Region und 1,3 km² in der Gesamtregion sehr klein ist. Diese mittlere Fläche nimmt von West nach Ost leicht ab und weist im Tarimbecken mit 1,6 km² den höchsten Wert auf. Dies bedeutet, dass es eine sehr große Anzahl (>70%) sehr kleiner Gletscher unter 0,5 km² Größe gibt. Im Gegensatz dazu bedecken in allen Regionen die größten 3% der Gletscher mehr als 50% der vergletscherten Fläche.

Auch bei den größten Gletschern in den jeweiligen Einzugsgebieten ist eine abnehmende Tendenz von West nach Ost zu beobachten, die vermutlich neben klimatischen auch topographische Ursachen hat. Die ausgedehnten Hochgebirgssysteme des Pamir und des Karakorum erlauben eher die Ausbildung von langen Gletscherzungen und komplexen Gletschersystemen als

die engen und tiefen Täler des Himalayas. Zudem haben ausnahmslos alle der ganz großen Gletscher (>100 km²) schuttbedeckte Zungen, welche das Eis auch noch in relativ tiefen Lagen vor zu schnellem Abschmelzen schützen. Der größte Gletscher im gesamten asiatischen Raum ist der Siachengletscher im östlichen Karakorum, mit einer Länge von 74 km und einer Fläche von 970 km².

Mit Skalierungsverfahren kann aus der Gletscherfläche das Gletschervolumen abgeschätzt werden. Für das HKH haben FREY et al. (2014) das Volumen mit einem optimierten Verfahren geschätzt. Die Gletscherabdeckung ist allerdings in andere Regionen unterteilt wie in Tab. 4.51. Für das gesamte HKH Gebiet ergibt sich ein Gletschervolumen von 2.200 bis 4.700 km³. Die sehr große Bandbreite erklärt sich aus den Unsicherheiten in den verwendeten Methoden und der fehlenden Möglichkeit, die Parameter durch vorhandene Kontrollmessungen zu kalibrieren. BAJRACHARYA &

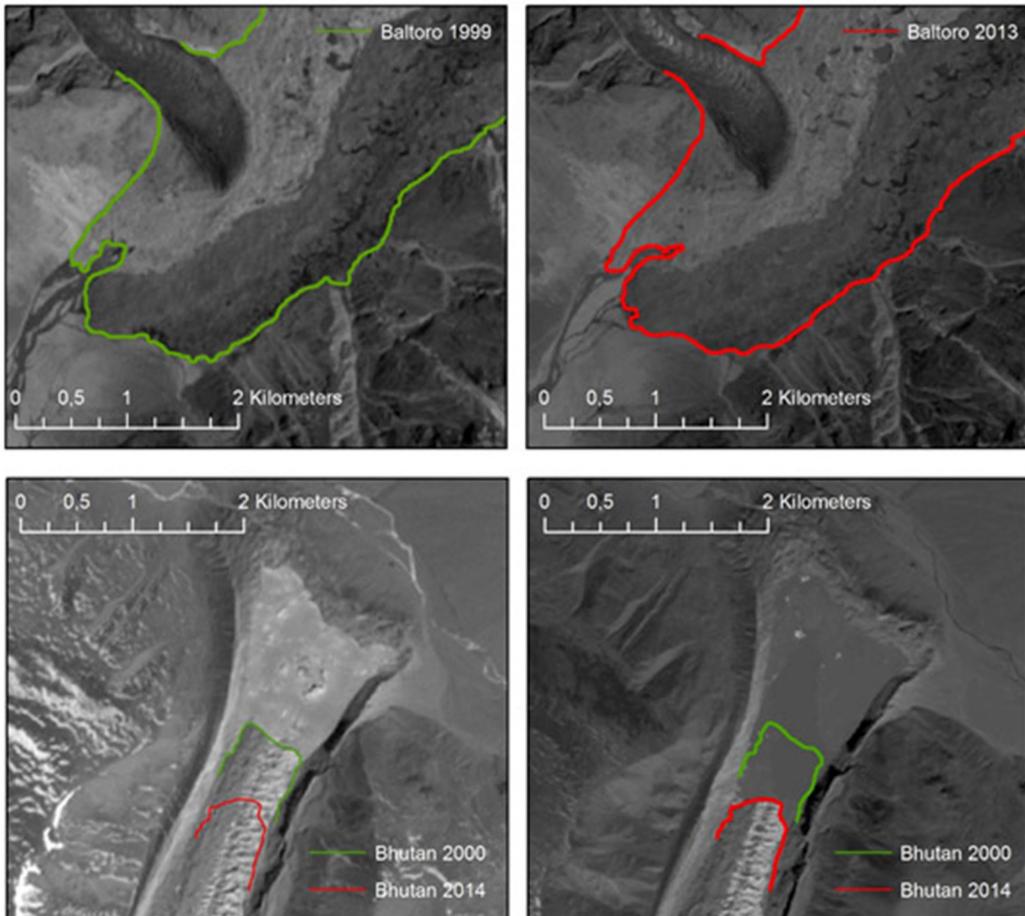


Abb. 4.5-3: Gletscherzunge des Baltorogletschers im Karakorum in den Jahren 1999 und 2013 (oben) und eines Gletschers auf der Nordseite des Buthanischen Himalayas in den Jahren 2000 und 2014 (unten). Während die schuttbedeckte Zunge des Baltorogletschers sich in den 14 Jahren nicht veränderte, zeigt die Gletscherzunge in Bhutan einen deutlichen Rückgang und eine gleichzeitige Vergrößerung des proglazialen Sees.

SHRESTA (2011) kommt für dieses Gebiet auf 4.800 km³, was sehr nahe am Maximum der Abschätzungen von FREY et al. (2014) liegt. Erwähnenswert ist, dass die mittlere Eisdicke im Karakorum mit 105-150 m deutlich höher ist als die mittlere Eisdicke im Himalaya mit 55-72 m (FREY et al. 2014).

Flächenänderungen

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Inventare auf Daten des letzten Jahrzehnts beruhen, gibt es bisher keine aussagekräftigen Untersuchungen über die langfristigen Flächenänderungen des gesamten Gebiets. Einzelne Messungen der Gletscherlängen, vorwiegend im indischen Himalaya, gehen jedoch bis über 100 Jahre zurück und erlauben Rückschlüsse auf die allgemeine Entwicklung der Gletscher in diesem Zeitraum. Beinahe alle beobachteten Gletscher zeigen in diesem Zeitraum (und teilweise zurück bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts) einen Rückgang ihrer Länge und damit auch ihrer Fläche (BHAMBRI & BOLCH 2009). Messungen im Karakorum weisen ein deutlich heterogeneres Bild auf, mit einer allgemeinen Abnahme der Gletscherlänge im letzten Jahrhundert, aber auch einer Zunahme von einzelnen Gletschern in den letzten 40-50 Jahren (HEWITT 2011). In Bezug auf Flächenänderungen gibt es eine Vielzahl von regionalen Studien, die einzelne Gebirgsgruppen, bzw. mehrere Testgebiete in unterschiedlichen Regionen vergleichen und dazu auch ältere Satellitendaten und Bodenbeobachtungen verwenden. Diese Studien zeigen, dass die Veränderung der Gletscherflächen in den vergangenen Jahrzehnten regional und auch zeitlich sehr unterschiedlich ist (vgl. *Abb. 4.5-3*).

Während vor allem im östlichen Himalaya die Gletscher einen deutlichen Flächenverlust aufweisen, scheinen die Gletscher im Karakorum, im Pamir und auch im Kunlun relativ stabil zu sein. Die relative Flächenänderung in Bezug zur gesamten Gletscherfläche bewegt sich im Bereich von -0,2% bis -0,7% pro Jahr während der letzten 40-50 Jahre in der Region des indischen Himalaya (BOLCH et al. 2012, *Abb. 4.5-4*). Im Karakorum sind dagegen die Flächenänderungen mit 0.01% bis -0.07% deutlich geringer, beziehungsweise die Fläche nimmt sogar leicht zu (LIU et al. 2006, MINORA et al. 2015 sub.). Die Zunahme der Gletscherfläche im zentralen Karakorum hängt allerdings mit der Existenz von zahlreichen Gletschern mit bekannten schnellen Vorstößen (surging glaciers) zusammen. Bei diesen Gletschern wird ein kurzzeitiger Vorstoß beobachtet, ohne dass sich dabei die Gletschermasse insgesamt verändert. Diese Vorstöße stehen nur indirekt mit klimatischen Bedingungen in Zusammenhang. Ohne diese Gletscher ist im zentralen Karakorum eine minimale Reduktion der Gletscherfläche in der ersten Dekade

des Jahrtausends zu beobachten (-0,01% pro Jahr). Im Gegensatz dazu scheint die Gletscherfläche im östlichen Himalaya schneller abzunehmen. In Nepal ist die Gletscherfläche in den vergangenen 40 Jahren um etwa 0,5% pro Jahr zurückgegangen (BAJRACHARYA & SHRESTA 2011). Ein ähnliches Bild ergibt sich für die Gletscher in Bhutan: zwischen 1980 und 2010 sind 0,78% der Gletscherfläche pro Jahr verlorengegangen (BAJRACHARYA et al. 2014). Dort scheint sich der Flächenverlust zu verlangsamen (von -1,2% pro Jahr zwischen 1980 und 1990 auf -0,7% pro Jahr zwischen 2000 und 2010). Dies kann auch damit zusammenhängen, dass die tieferliegenden Gletscherflächen inzwischen verschwunden sind.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Untersuchung rezenter Änderungen der Gletscherzungen (SCHERLER et al. 2011). Die größten Flächenrückgänge verzeichnen dabei die Gletscher auf der Nordseite des Himalaya (Brahmaputra Einzugsgebiet), gefolgt vom indischen Himalaya. Die Gletscher im östlichen Himalaya weisen kleinere Flächenrückgänge auf, während die Vergletscherung im Karakorum annähernd stabil ist. Für SCHERLER et al. (2011) liegt ein Grund für diese Beobachtung in der Existenz von schuttbedeckten Gletscherzungen vor allem in den Regionen mit einer geringen Änderung der Gletscherflächen. Eine sehr dünne Bedeckung der Gletscheroberfläche mit Schutt erhöht die Eisschmelze durch die Erwärmung der Schuttdecke und den damit verbundenen höheren Wärmetransport ins Eis. Schon ab einer Dicke von wenigen Zentimetern wirkt die Schuttbedeckung allerdings isolierend und die Eisschmelze wird verringert. Bei Schuttbedeckungen von mehreren Dezimetern bis Metern auf den untersten Bereichen vieler Gletscher im Karakorum und auch in anderen Regionen wird die Eisschmelze weitgehend verhindert. Auch wenn diese Gletscher insgesamt Eisvolumen verlieren, bleibt die Ausdehnung der Gletscherzunge über längere Perioden konstant (z.B. JUEN et al. 2014). Bei sehr flachen, schuttbedeckten Zungen bilden sich allerdings supraglaziale Abflusssysteme inklusive kleiner Seen aus, die die Schmelze zusätzlich erhöhen (SAKAI et al. 2000). Für Regionen mit einer großen Anzahl von schuttbedeckten Gletschern sind daher andere Messgrößen als die Fläche erforderlich um die Zu- oder Abnahme der Gletscher zu beurteilen.

Gletschermassenbilanz

Idealerweise wird für die Untersuchung der Gletscherentwicklung die Massenbilanz, der Zuwachs durch Schneefall und die Abnahme durch Schnee- und Eisschmelze, innerhalb eines festen Zeitraums gemessen. Solche Messungen vor Ort sind allerdings sehr aufwändig und erfordern regelmäßige Besuche der zu untersuchenden Gletscher. Im Himalaya wird diese aus den Alpen stammende

Methode der Massenbilanzierung noch zusätzliche dadurch erschwert, dass von Westen nach Osten die Gletscher zunehmend mehr Schneefall im Sommer erhalten. Bei diesen Gletschern des Sommerakkumulations-Typs (AGETA & HIGUCHI 1984) können Akkumulations- und Ablationsperiode nicht mehr getrennt gemessen werden. Mehrjährige Massenbilanzmessungen existieren nur für sehr wenige Gletscher in der gesamten Region. Eine Übersicht für den westliche Himalaya gibt VINCENT et al. (2013): von 13 Gletschern weist inzwischen der Chhota Shigri Gletscher in Himachal Pradesh die längste Beobachtungsreihe mit 13 Jahren auf. Trotz unterschiedlicher Beobachtungsspannen zeigen alle Gletscher negative Massenbilanzen (von $-1,46$ m w. äq./a bis $-0,11$ m w. äq./a), seit den frühesten Beobachtungen im Jahr 1975. Auch in Nepal sind an wenigen Gletschern mit -1 bis $-0,4$ m w. äq./a durchweg negative Massenbilanzen während der letzten 30 Jahre beobachtet und teilweise berechnet worden (FUJITA & NUMURA 2011). An Karakorumgletschern wurden bisher keine direkten Massenbilanzmessungen durchgeführt.

Die Gletschermassenbilanz kann auch aus den Höhendifferenzen der Oberfläche zu unterschiedlichen Zeiten abgeleitet werden. Diese Methode wird auf der Grundlage von Satellitendaten verstärkt in unzugäng-

lichen Regionen eingesetzt. Dabei kann die Höheninformation aus optischen Daten durch photogrammetrische Methoden bestimmt werden (Aster, SPOT) oder im Mikrowellenbereich über Interferometrie (ERS1/2, TANDEM-X). Zudem gibt es Satelliten die die Geländehöhe direkt bestimmen (ICESAT, Cryosat). Meist wird dabei das globale Höhenmodell der Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) aus dem Jahr 2000 als Referenzhöhe verwendet. Somit sind die Höhendifferenzen bis auf wenige Ausnahmen auf den Zeitraum der letzten 15 Jahre beschränkt. Die Berechnung der Massenbilanzen aus den Höhendifferenzen beinhaltet viele Annahmen, aber im Vergleich zwischen unterschiedlichen Gebieten sind zumindest die relativen Unterschiede aussagekräftig. Vor allem im Karakorum (und im Pamir) muss auch der Einfluss der vielen schnell vorstoßenden Gletscher berücksichtigt werden. Eine umfassende Studie der Höhenänderungen entlang des gesamten Gebirgsbogens liefert, ebenso wie die anderen Untersuchungen, ein heterogenes Bild der Gletscherentwicklung für den Zeitraum 1999 bis 2011 (GARDELLE et al. 2013). Im östlichen Himalaya zeigen sich nur geringe Änderungen in den Akkumulationsgebieten, während die Ablationsgebiete deutliche Höhenverluste von $-0,5 \pm 0,14$ bis $-0,8 \pm 0,13$ m/a aufweisen. Dies gilt auch für den zen-

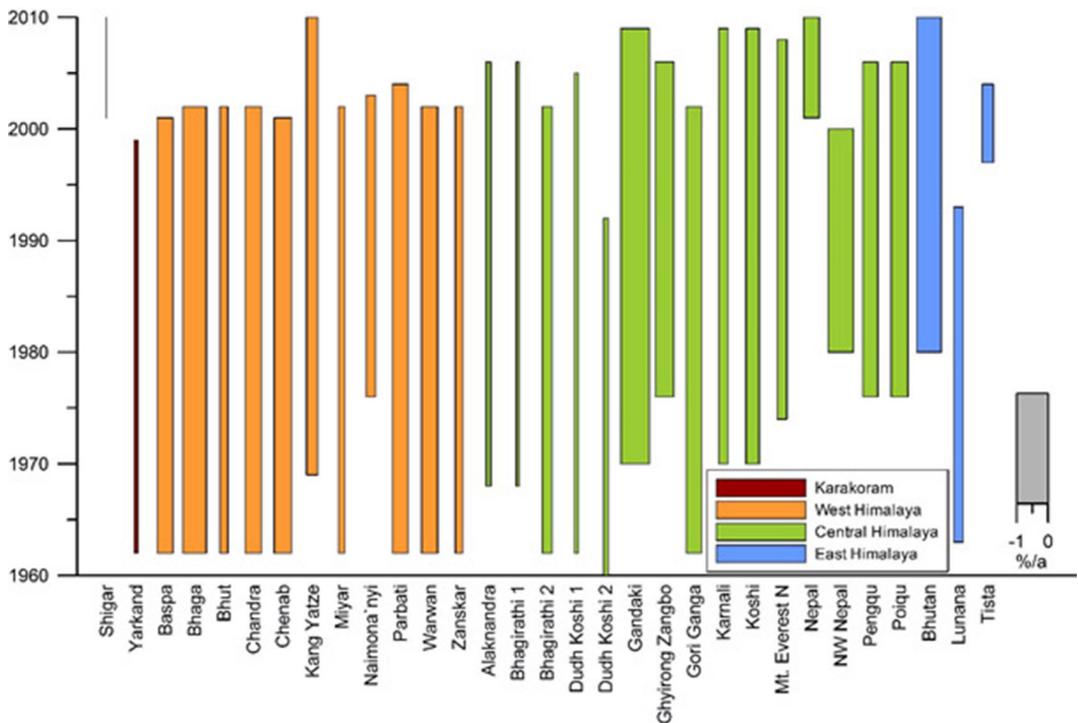


Abb. 4.5-4: Relative Flächenänderung der Gletscher in einzelnen Sub-Regionen vom Karakorum im Westen bis zum Ost-Himalaya während der letzten 40 Jahre. Die Länge der Säulen entspricht dem jeweiligen Beobachtungszeitraum, während die Breite der Säulen die prozentuale Flächenänderung repräsentiert (die graue Säule dient als Skala). Daten nach BOLCH et al. (2012).

tralen Himalaya, wobei dort viele Gletscherzungen mit Kontakt zu Schmelzwasserseen noch größere Höhenabnahmen zeigen. Das Gebiet von Spiti/Lahaul in Himachal Pradesh ist die einzige Region, in der auch eine Höhenabnahme im Akkumulationsgebiet festgestellt wurde. Dagegen scheint es im Karakorum eine leichte Zunahme der Höhe in den Akkumulationsgebieten zu geben ($0,22 \pm 0,14$ bis $0,30 \pm 0,18$ m/a). Die Ablationsgebiete zeigen leicht abnehmende Oberflächenhöhen von $-0,33 \pm 0,16$ m/a. Im Pamir ist dagegen auch die Oberflächenhöhe in den Ablationsgebieten weitgehend stabil. Die resultierenden Massenbilanzen sind entsprechend leicht positiv für den Karakorum (und Pamir) und negativ im Hindukush und Himalaya. Allerdings zeigt sich auch dort eine sehr große Streuung innerhalb einzelner Gebiete mit keinem klaren regionalen Trend. Insgesamt kommt diese Studie zu einer negativen Massenbilanz von $-0,14 \pm 0,08$ m w.äq/a ($-10,1 \pm 5,5$ Gt/a). Dies entspricht einem potentiellen Anstieg des globalen Meeresspiegels um $0,028 \pm 0,015$ mm/a im Beobachtungszeitraum. Eine Studie, die ein ähnliches Gebiet umfasst, aber Satelliten-Altimeterdaten auswertet, kommt zu dem Schluss, dass die Gesamtmassenbilanz für die Periode 2003 bis 2008 -24 ± 2 Gt/a beträgt (Kääb et al. 2015). Auch hier ergibt sich eine sehr heterogene, aber prinzipiell negative Höhenänderung entlang des gesamten Gebirgsbogens (Abb. 4.5-5). Die östlichsten Gletscher im Nyainquentanglha Shan weisen dabei die negativsten Werte mit $-1,34 \pm 0,29$ m/a auf. Die relative Stabilität der Gletscher im Karakorum wird bestätigt, während die Gletscher des Kunlun offensichtlich leicht

positive Massenbilanzen aufweisen ($0,05 \pm 0,07$ m/a).

Kääb et al. (2015) rechnen den Gesamtverlust auf die Einzugsgebiete um, so dass diese Änderungen in Beziehung zu den hier bestimmten Gletscherflächen gesetzt werden können (im Tarimbecken wurden nur Teile der Vergletscherung berücksichtigt):

Indus	Ganges	Brahmaputra	Amu Darya	Tarim
$-0,33 \pm 0,04$	$-0,44 \pm 0,07$	$-1,06 \pm 0,15$	$-0,43 \pm 0,08$	$0,06 \pm 0,08$

Wie daraus ersichtlich sind die großen Höhenänderungen im Brahmaputra-Einzugsgebiet ($-1,06 \pm 0,15$) festzustellen; sie werden durch die stark negativen Massenbilanzen im äußersten Osten des HKH verursacht. Die relativ stabile Situation im Karakorum spiegelt sich in den geringeren Werten für das Indusgebiet wieder.

Fazit:

Insgesamt ist auch im HKH und im benachbarten Pamir mittel- wie langfristig eine Verringerung der Gletschervolumina zu beobachten. Im südlichen Teil des Tarimbeckens scheinen die Gletscher dagegen derzeit relativ stabil zu sein. Die gesamten Eisreserven des HKH von 2.200 km^3 bis 4.700 km^3 entsprechen einem potentiellen Beitrag zum Meeresspiegelanstieg von 5-11 mm. Die Eisreserven in den Regionen von Amu Darya und Tarim entwässern in abflusslose innerkontinentale Becken und beeinflussen damit den Meeresspiegel nicht. Eine sehr vereinfachte Fortschreibung der derzeitigen Abnahme des Volumens in Relation zu den Gesamtressourcen legt den Schluss nahe, dass die Gletscher im HKH noch mindestens die nächsten 80-400 Jahre überleben. Allein diese Bandbreite zeigt schon die Un-

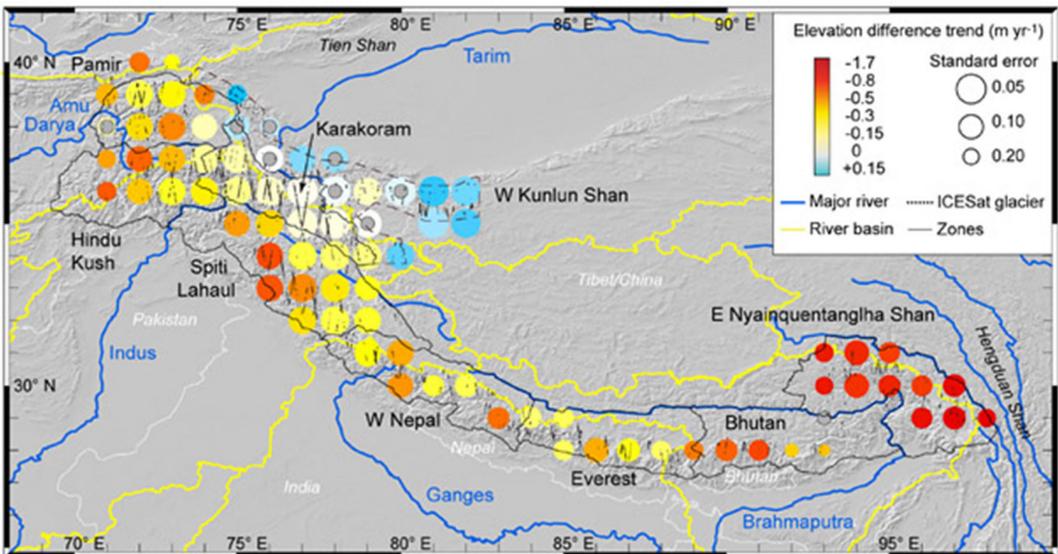


Abb. 4.5-5: Höhenänderungen der Gletscheroberfläche in unterschiedlichen Gebieten im HKH, basierend auf Altimeterdaten von ICESAT im Zeitraum 2003-2008 (aus: Kääb et al. 2015).

sicherheiten des derzeitigen Kenntnisstandes. Dabei sind die Effekte einer Klimaveränderung ebenso vernachlässigt, wie die komplizierten Wechselwirkungen zwischen Eisdickenverteilung, Eisdynamik und Massenbilanz: bei gleich bleibendem Klima und anfänglich negativer Massenbilanz stellt sich durch die kleiner werdende Gletscherfläche nach einiger Zeit wieder ein Gleichgewicht ein. Zudem sind natürlich die ausgedehnten Gletscherflächen oberhalb der derzeitigen Gleichgewichtshöhe ohne eine klimatische Veränderung auch in Zukunft nicht vom Abschmelzen bedroht. Sehr viele der kleinen Gletscher in der Nähe der Gleichgewichtshöhe können allerdings schon durch eine moderate Verschiebung von 100-200 m nach oben (wärmere Sommertemperaturen, oder geringerer Niederschlag) verschwinden.

Literatur:

- AGETA, Y. & K. HIGUCHI (1984): Estimation of mass balance components of a summer-accumulation type glacier in the Nepal Himalaya. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography*, 249-255.
- BAJRACHARYA, S. R., MAHARJAN, S. B. & F. SHRESTHA (2014): The status and decadal change of glaciers in Bhutan from the 1980s to 2010 based on satellite data. *Annals of Glaciology*, 55(66), doi:10.3189/2014AoG66A125.
- BAJRACHARYA, S. R. & B. SHRESTHA (2011): The Status of Glaciers in the Hindu Kush-Himalayan Region, ICIMOD, Kathmandu. 140 pp.
- BHAMBRI, R. & T. BOLCH (2009): Glacier mapping: a review with special reference to the Indian Himalayas, *Progress in Physical Geography*, 33(5), 672-704.
- BOLCH, T., KULKARNI, A., KÄÄB, A., HUGGEL, C., PAUL, F., COGLEY, J. G., FREY, H., KARGEL, J. S., FUJITA, K., SCHEEL, M., BAJRACHARYA, S. & M. STOFFEL (2012): The state and fate of Himalayan glaciers. *Science*, 336, 310-314.
- BURBANK, D. W., BOOKHAGEN, B., GABET, E. J. & J. PUTKONEN (2012): Modern climate and erosion in the Himalaya. *Comptes Rendus Geoscience*, 344(11), 610-626.
- COGLEY, J. G. (2011): Present and future states of Himalaya and Karakoram glaciers. *Ann. Glaciol.*, 52, 69-73.
- FREY, H., MÄCHGUTH, H., HUSS, M., HUGGEL, C., BAJRACHARYA, S., BOLCH, T., KULKARNI, A., LINSBAUER, A., SALZMANN, N. & M. STOFFEL (2014): Estimating the volume of glaciers in the Himalayan-Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8, 2313-2333, doi:10.5194/tc-8-2313-2014.
- FUJITA, K. & T. NUIMURA (2011): Spatially heterogeneous wastage of Himalayan glaciers. *P. Natl. Acad. Sci. USA*, 108, 14011-14014, doi:10.1073/pnas.1106242108.
- GARDELLE, J., BERTHIER, E., ARNAUD, Y. & A. KÄÄB (2013): Region-wide glacier mass balances over the Pamir-Karakoram-Himalaya during 1999-2011. *The Cryosphere*, 7, 1263-1286, doi:10.5194/tc-7-1263-2013.
- HEWITT, K. (2011): Glacier change, concentration, and elevation effects in the Karakoram Himalaya, Upper Indus Basin, Mount. Res. Develop., 31, 188-200.
- IMMERZEEL, W., VANBEEK L. P. H. & M. F. P. BIERKENS (2010): Climate Change Will Affect the Asian Water Towers. *Science*, 328, 1382-1385, doi:10.1126/science.1183188.
- JUEN, M., MAYER, C., LAMBRECHT, A., HAN, H., & LIU, S. (2014): Impact of varying debris cover thickness on ablation: a case study for Koxkar Glacier in the Tien Shan. *The Cryosphere*, 8(2), 377-386.
- KÄÄB, A., TREICHLER, D., NUTH, C. & BERTHIER (2015): Brief communication: Contending estimates of 2003-2008 glacier mass balance over the Pamir-Karakoram-Himalaya, *The Cryosphere*, 9, 557-564, doi:10.5194/tc-9-557-2015.
- KARGEL, J. S., ABRAMS, M. J., BISHOP, M. P., BUSH, A., HAMILTON, G., JISKOOT, H., KÄÄB, A., KIEFFER, H. H., LEE, E. M., PAUL, F., RAU, F., RAUP, B., SHRODER, J. F., SOLTESZ, D., STAINFORTH, D., STEARNS, L. & R. WESSELS (2005): Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space. *Remote Sensing of Environment*, 99(1), 187-219.
- LANG, T. J. & A. P. BARROS (2004): Winter storms in the central Himalayas. *Journal of the Meteorological Society Japan*, 82, 829-844.
- LIU, S., DING, Y., SHANGGUAN, D., ZHANG, Y., LI, J., HAN, H., JIAN, W. & C. XIE (2006): Glacier retreat as a result of climate warming and increased precipitation in the Tarim river basin, north-west China. *Annals of Glaciology*, 43(1), 91-96.
- MAYER, C., LAMBRECHT, A., OERTER, H., SCHWIKOWSKI, M., VUILLERMOZ, E., FRANK, N. & G. DIOLAIUTI (2014): Accumulation Studies at a High Elevation Glacier Site in Central Karakoram. *Advances in Meteorology*.
- MINORA, U.F., BOCCHIOLA, D., D'AGATA, C., MARAGNO, D., MAYER, C., LAMBRECHT, A., VIULLERMOZ, E., SEÑESE, A., COMPOSTELLA, C., SMIRAGLIA, C. & G. A. DIOLAIUTI (2015): subm. to Progress in Physical Geography. Glacier area stability in the Central Karakoram National Park (Pakistan) in 2001-2010 - the "Karakoram Anomaly" in the spotlight.
- PAUL, F.; KÄÄB A; ROTT H; SHEPHERD, A; STROZZI, T. & E. VOLDEN (2009): Globglacier: A new ESA project to map the world's glaciers and ice caps from space. *EARSeL eProceedings* 8: 11-25.
- PFEFFER, W. T., ARENDT, A. A., BLISS, A., BOLCH, T., COGLEY, J. G., GARDNER, A. S., HAGEN, J. O., HOCK, R., KASER, G., KIENHOLZ, C., MILES, E. S., MOHOLDT, G., MOLG, N., PAUL, F., RADIC, V., RASTNER, P., RAUP, B. H., RICH, J., SHARP, M. J., ANDEASSEN, L. M., BAJRACHARYA, S., BARRAND, N. E., BEEDLE, M. J., BERTHIER, E., BHAMBRI, R., BROWN, I., BURGESS, D. O., BURGESS, E. W., CAWKWELL, F., CHINN, T., COPLAND, L., CULLEN, N. J., DAVIES, B., DE ANGELIS, H., FOUNTAIN, A. G., FREY, H., GIFFEN, B. A., GLASSER, N. F., GURNEY, S. D., HAGG, W., HALL, D. K., HARITASHYA, U. K., HARTMANN, G., HERREID, S., HOWAT, I., JISKOOT, H., KHROMOVA, T. E., KLEIN, A., KOHLER, J., KONIG, M., KRIEGEL, D., KUTUZOV, S., LAVRENTIEV, I., LE BRIS, R., LI, X., MANLEY, W. F., MAYER, C., MENOONOS, B., MERCER, A., MOOL, P., NEGRETTE, A., NOSENKO, G., NUTH, C., OSMONOV, A., PETERSSON, R., RACOVITANU, A., RANZI, R., SARIKAYA, M. A., SCHNEIDER, C., SIGURDSSON, O., SIRGUEY, P., STOKES, C. R., WHEATE, R., WOLKEN, G. J., WU, L. Z., WYATT, F. R. & Consortium (2014): The Randolph Glacier Inventory: a globally complete inventory of glaciers. *J. Glaciol.*, 60, 537-552, doi:10.3189/2014jog13j176.
- RAINA, V. K. & D. SRIVASTAVA (2008): Glacier atlas of India. Bangalore, India: Geological Society of India
- RIDLEY J, WILTSHIRE A, & C. MATHISON (2013): More frequent occurrence of westerly disturbances in Karakoram up to 2100. *Sci Total Environ.* doi:10.1016/j.scitotenv.2013.03.074.
- SAKAI, A., TAKEUCHI, N., FUJITA, K. & M. NAKAWO (2000): Role of supraglacial ponds in the ablation process of a debris-covered glacier in the Nepal Himalayas, in: *Debris-covered glaciers*, edited by: Nawako, M., Raymond, C., and Fountain, A., 119-130.
- SCHERLER, D., BOOKHAGEN, B. & M. STRECKER (2011): Spatially variable response of Himalayan glaciers to climate change affected by debris cover. *Nat. Geosci.*, 4, 156-159, doi:10.1038/ngeo1068.
- SHI, Y., LIU, C. & E. KANG (2009): The Glacier Inventory of China. *Ann. Glaciol.*, 50, 1-4, doi:10.3189/172756410790595831.
- VINCENT, C., RAMANATHAN, A.L., WAGNON, P., DOBBAL, D. P., LINDA, A., BERTHIER, E., SHARMA, P., ARNAUD, Y., AZAM, M. F., JOSE, P. G. & J. GARDELLE (2013): Balanced conditions or slight mass gain of glaciers in the Lahaul and Spiti region (northern India, Himalaya) during the nineties preceded recent mass loss. *The Cryosphere*, 7, 569-582, doi:10.5194/tc-7-569-2013.

Kontakt:

Dr. Christoph Mayer

Dr. Astrid Lambrecht

Bayerische Akademie der Wissenschaften

christoph.mayer@lrz.badw-muenchen.de

Mayer, C. & A. Lambrecht (2015): *Die Gletscher der Hindukusch-Himalaya Region. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. pp. 130-137. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.20*