3.4 Wenn Gletscher abrutschen

Andreas Kääb

Nicht alle Gebirgsgletscher der Erde fließen gemächlich, mit typischen Geschwindigkeiten von wenigen Metern bis hunderten von Metern pro Jahr. Einzelne Gletscher können instabil werden und sich vorübergehend viel schneller bewegen. Sogenannte »galoppierende« Gletscher, meist mit dem englischen Fachbegriff »surges« bezeichnet, fließen über Zeiträume von Monaten bis zu wenigen Jahren mit bis zu mehreren Kilometern pro Jahr und stoßen dabei oft auch über mehrere Kilometer vor. Bei einer weiteren Art von Gletscherinstabilität, Eislawinen, bricht von steilen Gletscherpartien Eis ab und erzeugt Lawinen, ähnlich Schneelawinen. Eine dritte seltene Art von Gletscherinstabilitäten, die erst vor kurzem erkannt wurde, kombiniert die großen Volumina von »surges« mit den hohen Geschwindigkeiten von Eislawinen. Bei diesen Gletscherlawinen rutschen große Teile flacher Gebirgsgletscher, mit einem Volumen von bis zu 100 Millionen Kubikmeter und mehr, plötzlich ab und rasen mit Geschwindigkeiten bis zu 300 km/h zu Tale. Die Klimaerwärmung verändert wo, wie häufig und wie große Gletscherinstabilitäten in den Hochgebirgen und den Polarregionen der Erde geschehen können. Allerdings sind die Wechselwirkungen diese Ereignisse mit dem Klima (z.B. Anstieg der Lufttemperaturen, Veränderung des Niederschlags) sehr komplex. Je nach lokalen Gegebenheiten können die Gefahren aus diesen Prozessen zu- oder abnehmen.

When glaciers slide down: *Not all mountain glaciers on Earth flow slowly, with typical speeds of a few meters to hundreds of meters per year. Individual glaciers can become unstable and temporarily move much faster. So-called surging glaciers flow over periods of months to a few years at up to several kilometres per year, and often advance over several kilometres. In another type of glacier instability, ice avalanches, ice breaks off from steep glacier areas and creates avalanches, similar to snow avalanches. A third, though rare type of glacier instability, which was only recently recognized, combines the large volumes of glacier surges with the high speeds of ice avalanches. In these glacier detachments, large parts of flat mountain glaciers, up to 100 million cubic meters and more, suddenly slide off and race down a valley at speeds of up to 300 km / h. Global warming is changing where, how often and how large glacier instabilities can occur in the high mountains and Polar Regions of the world. Changes in ice avalanches, glacier surges, and glacier detachments, however, are associated in a complex way with an increase in air temperatures. Depending on local conditions, the hazards from these processes can increase or decrease.*

Unerwartete Katastrophen

Können Sie sich folgendes vorstellen? Sie wohnen in einem Gebirgstal inmitten grüner Wiesen. In der Ferne, nur an klaren Tagen sichtbar, ca. 20 km talaufwärts, liegt ein unscheinbarer Gletscher zu dem Sie schon oft entlang des Tales gewandert sind. Eines Tages rutscht Ihnen plötzlich der gesamte Gletscher mit der Geschwindigkeit eines ICE in voller Fahrt entgegen, räumt das Gletschertal leer und bedeckt schließlich den Talboden 20 km unterhalb des ursprünglichen Gletschers mit einer über hundert Meter dicken Masse aus Eis und Schutt. Bis in das Jahr 2002 hätten die allermeisten Gebirgsbewohner und Gletscherforscher der Welt so ein Szenario für völlig unmöglich gehalten. Aber am 20. September 2002 rutschte tatsächlich der Kolkagletscher am Nordhang des Russischen Kaukasus plötzlich ab, raste mit Geschwindigkeiten von bis zu 250-300 km/h talwärts und blieb nach 5 Minuten und 18 km Strecke vor einer Talverengung liegen. Dabei löste sich dann eine Schlammlawine aus der abgelagerten Eis- und Schuttmasse, die das Tal noch weitere 15 km abwärts verwüstete (*Abb. 3.4-1*). Insgesamt starben bei der Katastrophe 120-130 Menschen (Huggel et al. 2005, Evans et al. 2009). Die Höhendifferenz zwischen der oberen Abbruchkante und den Eisablagerungen beim Dorf Karmadon betrug 2.200 m. Die abgerutschte Gletschermasse hatte ein Volumen von ca. 120 Millionen Kubikmeter. Auf einen Güterzug verladen, hätte diese fast einmal um die ganze Weltkugel gereicht.

Die Ereignisse im Kaukasus wurden damals von Russischen Wissenschaftlern intensiv erforscht, nicht zuletzt auch in Zusammenarbeit mit Schweizer Forschern. Man ging damals besonders den offensichtlichen Fragen nach: Was hat diese Gletscherlawine verursacht? Könnte ähnliches auch an anderen Gletschern passieren? Wenn auch die Ursachen der Gletscherlawine des Kolkagletschers bis heute nicht ganz klar sind, schien es doch so, dass es sehr spezielle lokale Bedingungen und Vorereignisse gewesen sein mussten, die den Gletscher zum Abrutschen gebracht haben (Huggel et al. 2005, Evans et al. 2009).

Doch am 17. Juli 2016 rutschte völlig unerwartet ein namenloser Gletscher auf dem Hochland von Tibet in sehr ähnlicher Weise wie der Kolkagletscher ab (*Abb. 3.4-2*). Obwohl die Gegend sehr dünn besiedelt ist, kamen neun Hirten und hunderte ihrer Yaks ums Leben. Noch während der Analyse der Ereignisse durch ein internationales Forscherteam entdeckten diese auf Satellitenbildern, dass auch ein Nachbarglet-

scher ungewöhnliche verdächtige Spalten entwickelte. Zwischen dem Versenden einer Warnung des Forscherteams und ihrer Ankunft bei den lokalen Behörden in Tibet rutschte auch dieser zweite Gletscher in einer riesigen Lawine ab (*Abb. 3.4-2*). Diese richtete aber keinen Schaden an. Die abgerutschten Gletschermassen hatten Volumina von 70 bzw. 80 Millionen Kubikmetern, und erreichten Spitzengeschwindigkeiten von ca. 300 km/h (Kääb et al. 2018). Seit den unerwarteten Ereignissen in Tibet versucht nun ein internationales Team aus Wissenschaftlern zu verstehen, wie es zu diesen gigantischen Gletscherlawinen kommen konnte, ob sie auch andernorts zu erwarten sind, und ob dabei die Klimaänderung eine Rolle spielen könnte. Obwohl diese Gletscherrutschungen sehr selten scheinen, können sie doch viele Menschenleben kosten und schwere Schäden anrichten.

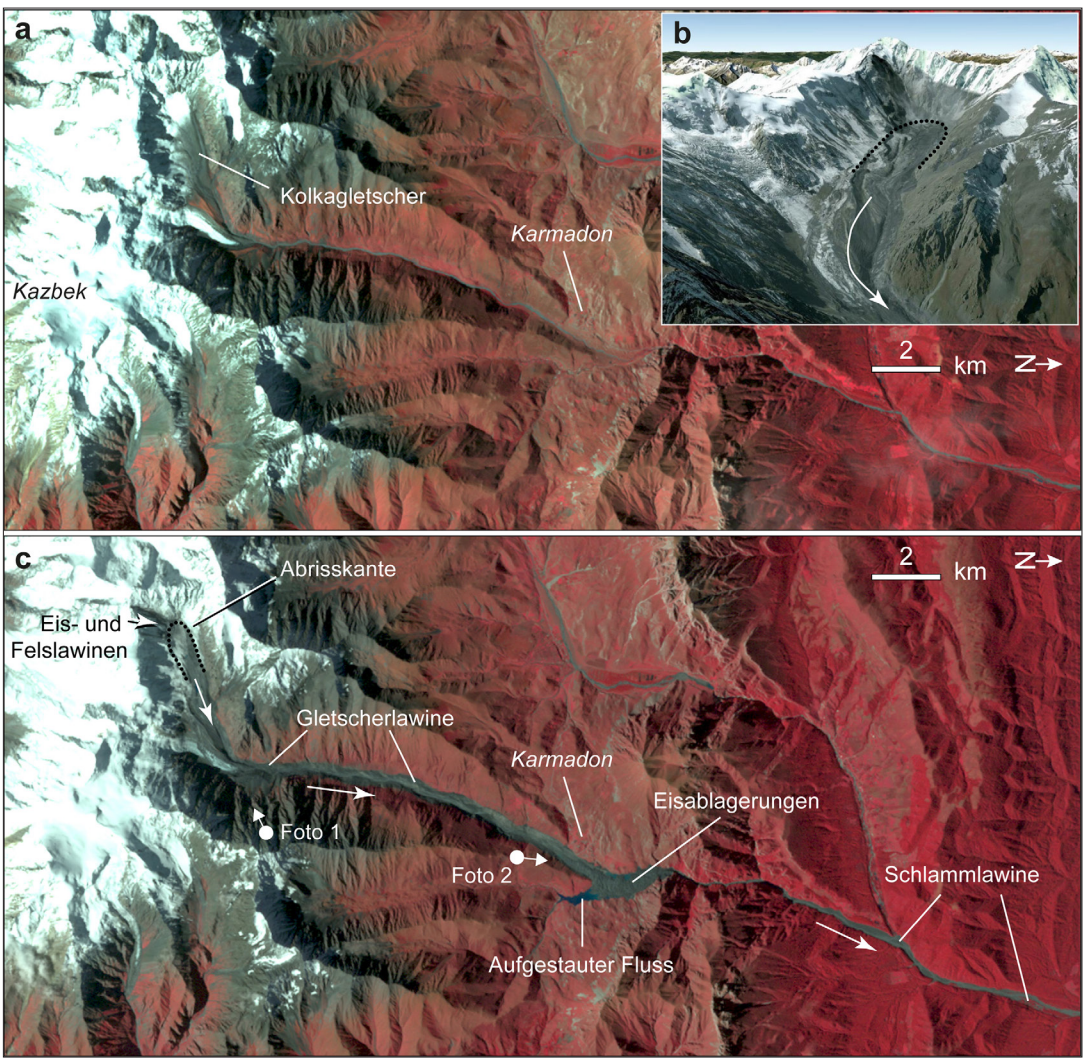

Abb. 3.4-1: *Die Gletscherlawine des Kolkagletschers, Kaukasus, vom 20.9.2002. (a) Landsat Falschfarbensatellitenbild vom 3.10.2001. Vegetation erscheint rot. Der höchste Berg des Gebietes, der Kazbek, links im Bild, das Dorf Karmadon in der Mitte. Norden nach rechts. (b) Auf ein Höhenmodell projiziertes Quickbird Satellitenbild vom 25.9.2002, also nur 5 Tage nach Abrutschen des Gletschers. (c) Landsat Falschfarbensatellitenbild vom 2.10.2002. Die Spur der Gletscherlawine, seine Ablagerungen beim Dorf Karmadon, und die darauffolgende Schlammlawine sind gut zu erkennen. Insgesamt reichte das Ereignis ca. 35 km weit über eine Höhendifferenz von 2.600 m (20 km und 2.200 m bis zu den Eisablagerungen beim Dorf Karmadon). »Foto 1« markiert die Position der Schrägansicht b, »Foto 2« die Position des Fotos Abb. 3.4-3 a.*

Eislawinen

Instabile Gletscher sind an sich nichts völlig Neues. Bisher kannte man vor allem zwei Typen solcher Instabilitäten: Eislawinen und *Surges*. Eislawinen sind oft ein natürlicher Prozess mit dem steile Gletscher, wenn sie am Fels angefroren sind, den Massenzuwachs durch Schneefall wieder ausgleichen, um ihre Masse im Gleichgewicht zu halten. So wie gewöhnliche Talgletscher den Massenzuwachs des Winters durch Schmelze im Sommer kompensieren, bzw. unter der atmosphärischen Erwärmung eben überkompensieren. Solche Eislawinen sind in der Regel klein, selten mehr als 1 Million Kubikmeter, und haben keine großen Reichweiten (Faillettaz et al. 2015). Sie gefährden auf diese Weise nur Menschen und Infrastruktur in ihrer Nähe. Eislawinen können allerdings zu größeren Katastrophen führen, wenn sie Kettenreaktionen auslösen. Zum Beispiel kann eine Eislawine in eine See stürzen, die entstehende Schwallwelle den See zum Überlaufen bringen, und das ausbrechende Wasser schließlich einen großen Murgang erzeugen, der viel mehr Schaden anrichtet als es die Eislawine allein je getan hätte. In den Hochgebirgen der Welt sind viele solcher Kettenreaktionen dokumentiert. In sehr seltenen Fällen können steile Gletscher (sogenannte »Hängegletscher«) sich auch komplett vom Fels, auf dem sie liegen, lösen.

Letzterer Fall führt uns direkt zum möglichen Einfluss der Klimaerwärmung auf Eislawinen. Solche

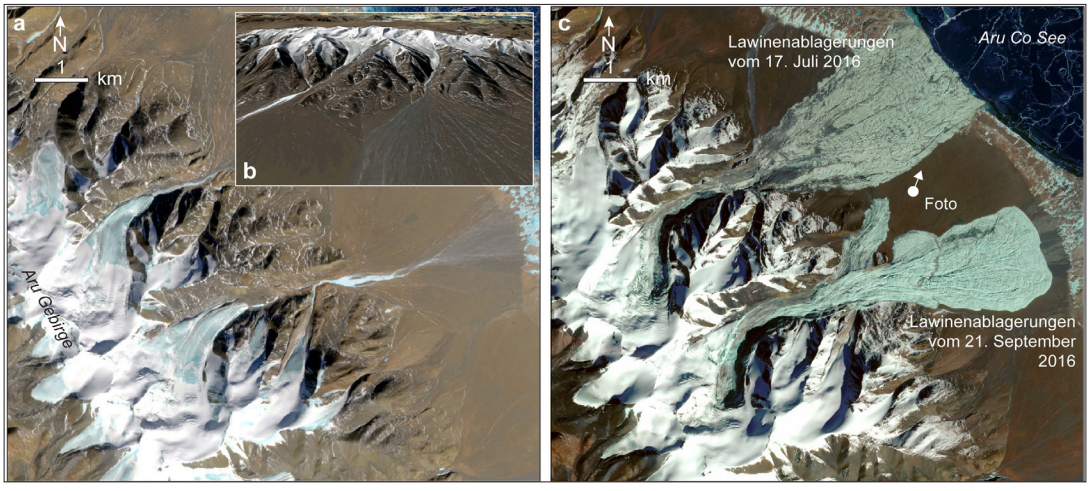

Abb. 3.4-2: *Die Gletscherlawinen aus dem Aru-Gebirge, Tibet, vom 21.7.2016 und 21.9.2016. (a) Sentinel-2 Satellitenbild vom 10.1.2016. (b) Dasselbe Satellitenbild wie in (a), aber auf ein Höhenmodell projiziert. (c) Bild eines Mikrosatelliten der Firma Planet vom 29.11.2016 mit beiden Gletscherlawinen. Ein Teil des zugefrorenen Sees Aru Co in der oberen rechten Bildecke. Die beiden Ereignisse hatten eine Reichweite von jeweils ca. 8 km über eine Höhendifferenz von ca. 800 m. „Foto" markiert die Position des Fotos Abb. 3.4-3 b.*

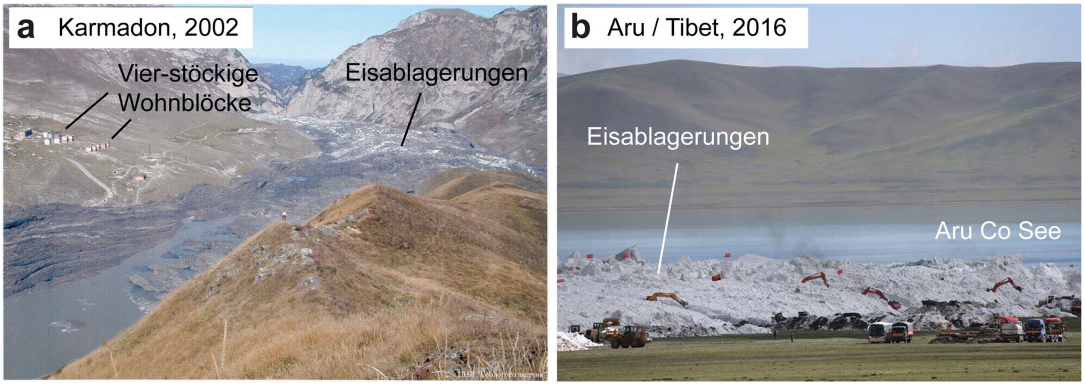

Abb. 3.4-3: *(a) Foto der Eisablagerungen der Gletscherlawine vom 20.9.2002 beim Dorf Karmadon, Kaukasus. Die Position des Fotos ist in Abb. 3.4-1 mit „Foto 2" markiert. Foto: Igor Galushkin. (b) Foto der Eisablagerungen der Gletscherlawine vom 21.7.2016 beim Aru Co See, Tibet. Die Position des Fotos ist in Abb. 3.4-2 mit „Foto " markiert. Foto: Xinhua News.*

steilen Gletscher können sich nämlich oft nur an steilen Felswänden halten, weil sie ganz oder teilweise am Fels angefroren sind. Durch die Erwärmung der Atmosphäre kann sich das Eis über dem Fels und der Fels unter dem Gletscher erwärmen, oder der auf dem Gletscher akkumulierte Schnee wird durch vermehrte Produktion von Schmelzwasser wärmer und diese Wärme wird durch das Fließen des Gletschers langsam an sein Bett transportiert. In beiden Szenarien wird der angefrorene Teil des Gletschers kleiner und schwächer – und der Gletscher kann sich im Extremfall von der Felswand lösen und abstürzen. Für diesen Typ von Eislawinen ist der verstärkende Einfluss der Klimaerwärmung vergleichsweise klar (Hock et al. 2019). Bei den anderen, kleineren und gewöhnlicheren Eislawinen ist die Sache jedoch nicht so einfach. Je nach Einzelfall kann die Gefahr durch Eislawinen nämlich sowohl zu- als auch abnehmen. Zwei Beispiele: Ein gewöhnlicher Talgletscher, von dem bisher keine Eislawinen ausgingen, zieht sich durch die Klimaerwärmung in eine steile Felsstufe zurück und produziert von nun an Eislawinen. Ein anderer Gletscher, der regelmäßig Eislawinen abstößt, verkleinert sich unter dem Einfluss zunehmender Gletscherschmelze, bis er so klein wird, oder sich in einen flacheren Hangabschnitt zurückzieht, dass er keine Eislawinen mehr erzeugt. Der Einfluss der Klimaerwärmung auf Eislawinen ist also kein einfaches schwarz-weiß Bild, sondern von vielen lokalen Faktoren und Nuancen geprägt (Hock et al. 2019).

Galoppierende Gletscher

Der zweite Typ instabiler Gletscher, den die Wissenschaft schon lange vor den Gletscherlawinen im Kaukasus und in Tibet gekannt hat, sind *surges* (eigentlich wird auch in der Deutschen Fachwelt meist dieser englische Begriff verwendet). Am besten ließe sich das vielleicht mit »galoppierende Gletscher« übersetzen. Viele hundert Gletscher in fast allen Gletschergebieten der Welt haben schon einmal oder mehrmals »gesurged« (Sevestre & Benn 2015). Dabei fließen sie dann über Zeiträume von Monaten oder Jahren viel schneller als gewöhnlich (zehnmal so schnell oder mehr), und stoßen bis zu mehrere Kilometer vor. Die großen Fließgeschwindigkeiten und Spannungen im Eis reißen den Gletscher auf und erzeugen ein gewaltiges Spaltenmeer. Trotz dieser Wucht laufen die Prozesse viel langsamer ab als bei Eislawinen, involvieren aber dafür riesige unaufhaltbare Massen, in der Regel eben ganze Gletscher (Harrison et al. 2015). Schaden aus solchen *surges* entsteht, wenn der vorrückende Gletscher Infrastruktur oder Weideland überfährt, was eher selten der Fall ist. Ein größeres Problem ist, dass *surgende* Gletscher bei ihrem Vorstoß gelegentlich Bäche oder Flüsse aufstauen und so temporäre Seen entstehen. Da diese dann nur durch aufgerissenes Gletschereis gestaut werden, können sie ausbrechen und plötzliche große Flutwellen erzeugen, die schwere Verwüstungen über viele zehn oder sogar hundert Kilometer talabwärts anrichten können. Solche Katastrophen erreichen Menschen, die keine spezielle Beziehung zum Hochgebirge und dessen Gletschern haben, und womöglich noch nie selber einen Gletscher gesehen haben, also auch kaum auf solche Ereignisse vorbereitet sind.

Um der Frage nachzugehen, ob die Klimaerwärmung sich auf die Intensität von Gletscher-*surges* auswirken kann, müssen wir verstehen wie diese eigentlich zu Stande kommen. Genau das ist aber eines der größten verbleibenden Rätsel der Gletscherforschung. Einigkeit besteht darüber, dass es Gletschern des *surges*-Typus nicht gelingt ihren winterlichen Massenzuwachs kontinuierlich durch Eistransport in sommerliche Schmelzgebiete auszugleichen. Es entsteht ein Ungleichgewicht und die so im Akkumulationsgebiet aufgestaute Eismasse entlädt sich in einem *surge*. Weniger klar ist, wieso sich bei diesen Gletschern Akkumulation, Ablation und Eisfließen nicht die Waage halten. Dazu gibt es zwei Theorien, die wohl beide zutreffen könne, je nach Gletscher, vermutlich sogar in Kombinationen (Harrison et al. 2015, Benn et al. 2019). Die hydrologische Theorie schlägt vor, dass das Abflusssystem unter dem Gletscher, welches das Schmelzwasser transportiert, so gut funktioniert, dass sich unter dem Gletscher kein hoher Wasserdruck aufbaut und er sich so nur wenig – zu wenig – bewegt. Durch die somit anwachsende Gletschermächtigkeit oder andere Ereignissen wird dieses effiziente Abflusssystem nach und nach zerstört. Es funktioniert immer schlechter. Der Wasserdruck unter dem Gletscher steigt, und der Gletscher beginnt unter der so abnehmenden Reibung am Gletscherbett zu rutschen – zu *surgen*.

Die zweite Theorie, die thermale Theorie, gilt eher für kalte Gebirge und Polarregionen. Dort bestehen viele Gletscher teilweise aus Eis mit Temperaturen deutlich unter dem Gefrierpunkt, sogenanntem „kalten" Eis. Im Vergleich dazu finden wir zum Beispiel in den meisten Gletschern der Europäischen Alpen »warmes« Eis, Eis exakt am Gefrierpunkt. Durch kaltes Eis sind Gletscher teilweise am Untergrund angefroren und sie bewegen sich daher sehr langsam – in einigen Fällen eben zu langsam, um den winterlichen Massenzuwachs durch Eisfließen auszugleichen. Die so zunehmenden Gletscherdicke und Gletscherneigung erhöhen Druck und Spannung am gefrorenen Gletscherbett, was zu einer Erwärmung führt und damit zum Auftauen. Der Gletscher beginnt zu rutschen – zu *surgen*.

Bis vor kurzem tendierte die Gletscherforschung zur Meinung, dass *surges* interne Gletscherprozesse sind und daher nur wenig von Änderungen der äußeren Rahmenbedingungen, wie der Klimaerwärmung, beeinflusst werden. Mittlerweile werden aber vermehrt Studien erstellt, die durchaus verschiedene Möglichkeiten skizzieren, wie die derzeitige Klimaveränderung auch die Häufigkeit und Größe von *surges* beeinflussen könnte (Hock et al. 2019). Auch hier zeichnet sich, wie bei den Eislawinen, kein schlichtes schwarz-weiß Bild ab. Einige Beispiele: Durch die verstärkte Eisschmelze und die negative Massenbilanz vieler Gletscher, auch des *surge*-Typs, können diese Gletscher nach einem *surge* einfach nicht mehr genug Masse aufbauen, um den nächsten *surge* zu generieren. Sie »erholen« sich von einem *surge* nicht mehr richtig. Der *surge* kann in Einzelfällen sogar ein irreversibles Abschmelzen eines Gletschers auslösen, wenn er die Gletschermächtigkeit im Akkumulationsgebiet so weit reduziert, dass wichtige Teile dieses Gebietes zum Ablationsgebiet werden und statt Schnee und Firn zu sammeln, Eis durch Abschmelzen verlieren (Nuth et al. 2019). Der Vernagtferner in den Ötztaler Alpen ist der einzige Gletscher der Europäischen Alpen von dem *surges* dokumentiert sind (eventuell mit Ausnahme des Belvederegletschers in Italien), zuletzt Mitte des 18. Jahrhunderts, also gegen Ende der kleinen Eiszeit. Mittlerweile ist der Vernagtferner so sehr geschrumpft, dass er kaum mehr in der Lage sein dürfte solche Instabilitäten hervorzubringen.

Umgekehrt ist es bei einigen polaren Gletscher, bei denen eher eine thermale Änderung einen *surge* verursacht. Dort könnten die steigenden Lufttemperaturen auch die Temperaturen am Gletscherbett beeinflussen, und damit die thermisch gesteuerte Gletscherstabilität (Nuth et al. 2019). Je nach spezifischen Bedingungen kann das einen *surge* eher begünstigen, oder verzögern. Die effizienteste und schnellste Weise, das Gletscherbett zu erwärmen und zu tauen besteht darin, dass Schmelzwasser von der Oberfläche durch Spalten und Gletschermühlen bis ans Gletscherbett gelangt. Und solches Schmelzwasser steht eben in einem wärmeren Klima vermehrt zur Verfügung (Dunse et al. 2015). Zusätzlich könnte Regenwasser auf ähnliche Weise ans Gletscherbett gelangen, wenn der Niederschlag statt als Schnee als Regen fällt.

Gletscherlawinen

Gletscherlawinen, also das plötzliche Abrutschen großer Teile vergleichsweiser flacher Gletscher, ist ein erst kürzlich erkannter Prozess. Die größten bekannten Ereignisse dieser Art sind die in der Einleitung beschriebenen Katastrophen des Kolkagletschers im Kaukasus und zweier Gletscher in Tibet (Kääb et al. 2018). Bisher besteht nicht einmal eine einheitliche Bezeichnung dieser Prozesse, die in diesem Beitrag Gletscherlawinen oder abrutschende Gletscher genannt werden. Diese Gletscherlawinen kombinieren die Geschwindigkeit von Eislawinen, die typischerweise viel kleinere Volumina haben, mit der großen Masse von *surges*, die deutlich langsamer sind. Auch könnte man solche Gletscherlawinen als Extremform von *surges* ansehen. Während im Falle von *surge* das Abrutschen des Gletschers doch verhältnismäßig kontrolliert abläuft, verliert der Gletscher im Falle einer Gletscherlawine eben komplett die Bodenhaftung. Seit den Katastrophen von 2016 in Tibet haben Gletscherlawinen an wissenschaftlicher Aufmerksamkeit gewonnen, und es sind einige andere ähnliche, aber kleinere Ereignisse in Südamerika, Alaska, Pamir und Tibet bekannt geworden. Dabei zeigt sich, dass die meisten dieser Ereignisse bei näherem Betrachten deutliche Unterschiede aufweisen, so dass eine Verallgemeinerung ihrer Ursachen und der möglichen Einflüsse der Klimaerwärmung nicht leicht ist.

Die meisten Gletscherlawinen ereigneten sich an Gletschern, deren Bett aus sehr weichem feinen Sediment besteht: Lehm und Schluff (Silt). Auch finden sich in der Nähe dieser Gletscher häufig *surgende* Gletscher, oder sie haben sogar selbst Anzeichen gezeigt, wie sie für *surges* typisch sind, wie Aufwölbungen und starke Spaltenbildung.

Dem Abrutschen des Kolkagletschers im Jahre 2002 gingen große Fels- und Eislawinen voraus, die sich aus der steilen und innerhalb des Permafrostgürtels gelegenen Wand über dem Gletscher lösten und auf dem Gletscher ablagerten. Dieses große zusätzliche Gewicht könnte das Abrutschen des Gletschers begünstigt haben, obwohl andere Bedingungen wie das weiche vulkanische Sediment am Gletscherbett die grundlegenden notwendigen Voraussetzungen lieferten (Huggel et al. 2005, Evans et al. 2009). Solche intensivierten Eis- und Felslawinen können durchaus eine Folge der Klimaerwärmung sein, und damit auch die Kolkakatastrophe mit der Klimaerwärmung in Verbindung bringen.

Die beiden benachbarten Gletscher in Tibet, die im Abstand von ca. 3 Monaten abrutschten, zeigten über Jahre hinweg Anzeichen wie sie für Gletscher-*surges* typisch sind. Die Eismassen, die sich gletscherabwärts verschoben, konnten sich aber nicht in Vorstößen entladen, da die Ränder der Gletscher und deren Zungen in dem kalten Klima auf dem Hochland von Tibet von Permafrost umgeben und angefroren waren. Gleichzeitig wird es auch auf dem Hochland von Tibet wärmer und mehr Schmelzwasser erreicht die Gletscherbetten.

Das hat die Wassermenge und den Wasserdruck unter den beiden Gletschern in der Aru-Gebirgskette erhöht und so die basale Reibung kontinuierlich reduziert, bis die angefrorenen Seiten der Gletscher den Andrang des Eises nicht mehr halten konnten (Gilbert et al. 2018; Kääb et al. 2018). In diesem Falle stellt also die vermehrte Produktion von Schmelzwasser eine Verbindung zur Klimaerwärmung her. Eine zweite, weniger intuitive Verbindung zu klimatischen Veränderungen besteht darin, dass das Aru-Gebirge im einzigen Gebiet der Erde liegt, eingegrenzt von den Gebirgen des Karakorum, Pamir und Westlichen Kunlun Shan, in dem Gletscher trotz Klimaerwärmung wachsen. In dieser kalten Region fällt seit Ende der 1990er Jahre mehr Schnee auf die Gletscher, genug um die vermehrte Schmelze unter erhöhten Lufttemperaturen mehr als zu kompensieren (Treichler et al. 2019). Diese Massenzunahme der dortigen Gletscher könnte sehr wohl die Ursache der *surges* sein, die am Anfang der Aru-Eislawinen standen.

Zusammenfassung

Klar ist: Die Klimaerwärmung verändert wo, wie häufig und wie große Eislawinen, Gletscher-*surges*, und Gletscherlawinen in den Hochgebirgen und den Polarregionen der Erde geschehen können. Diese Entwicklungen überlagern sich mit Veränderungen der menschlichen Nutzung der Gebirgsräume. Das hat große Bedeutung für Menschen, die im Hochgebirge oder seinen Tälern leben oder diese zum Beispiel als Touristen nutzen, und für dortige Infrastruktur (Hock et al. 2019). Das Auftreten und die Häufigkeit von Eislawinen, Gletscher-*surges*, und Gletscherlawinen sind jedoch in komplexer Weise mit einem Anstieg der Lufttemperaturen und Niederschlagsveränderungen verbunden. Je nach lokalen Gegebenheiten können die Gefahren aus diesen Prozessen zu- oder abnehmen. Schutzstrategien, die auf Statistiken vergangener Ereignisse basieren, sind nicht mehr ausreichend und müssen mit ständiger boden-, luft- oder satelliten-gestützter Umweltbeobachtung und mit mathematischen Projektionen der Klimaerwärmung auf Hochgebirgsprozesse ergänzt werden.

Literatur

BENN, D. I., A. C. FOWLER, I. HEWITT & H. SEVESTRE (2019): A general theory of glacier surges. Journal of Glaciology. 65(253), 701-716.

DUNSE, T., T. SCHELLENBERGER, J. O. HAGEN et al. (2015): Glacier-surge mechanisms promoted by a hydro-thermodynamic feedback to summer melt. The Cryosphere. 9(1), 197-215.

EVANS, S. G., O. V. TUTUBALINA, V. N. DROBYSHEV et al. (2009): Catastrophic detachment and high-velocity long-runout flow of Kolka Glacier, Caucasus Mountains, Russia in 2002. Geomorphology. 105(3-4), 314-321.

FAILLETTAZ, J., M. FUNK & C. VINCENT (2015): Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. Reviews of Geophysics. 53(2), 203-224.

GILBERT, A., S. LEINSS, J. KARGEL et al. (2018): Mechanisms leading to the 2016 giant twin glacier collapses, Aru Range, Tibet. Cryosphere. 12(9), 2883-2900.

HARRISON, W. D., G. B. OSIPOVA, G. A. NOSENKO et al. (2015): Glacier Surges. In: W. Haeberli & C. Whitemann (eds.) - Snow and Ice-related Hazards, Risks, and Disasters. Elsevier, Amsterdam. 437-485.

HOCK, R., G. RASUL, C. ADLER et al. (2019): High Mountain Areas. In: H.-O. Pörtner et al. (Eds.), IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC). IPCC, Geneva.

HUGGEL, C., S. ZGRAGGEN-OSWALD, W. HAEBERLI et al. (2005): The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. Natural Hazards and Earth System Sciences. 5(2), 173-187.

KÄÄB, A., S. LEINSS, A. GILBERT et al. (2018): Massive collapse of two glaciers in western Tibet in 2016 after surge-like instability. Nature Geoscience. 11(2), 114-120.

NUTH, C., A. GILBERT, A. KÖHLER et al. (2019): Dynamic vulnerability revealed in the collapse of an Arctic tidewater glacier. Scientific Reports. 9(1), 5541.

SEVESTRE, H. & D. I. BENN (2015): Climatic and geometric controls on the global distribution of surge-type glaciers: Implications for a unifying model of surging. Journal of Glaciology. 61(228), 646-662.

TREICHLER, D., A. KÄÄB, N. SALZMANN & C. Y. XU (2019): Recent glacier and lake changes in High Mountain Asia and their relation to precipitation changes. Cryosphere. 13(11), 2977-3005.

***Kontakt**:*
Prof. Dr. Andreas Kääb
Institut für Geowissenschaften
Universität Oslo (Norwegen)
kaeaeb@geo.uio.no

Kääb, A. (2020): Wenn Gletscher abrutschen. In: Lozán J. L., S.-W. Breckle, H. Grassl et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. S. 135-140. Online: www.warnsignal-klima.de. doi:10.2312/warnsignal-klima.hochgebirge-im-wandel.20.