4.9 Tropische Gletscher mit Fokus auf Ostafrika

Thomas Mölg

Tropische Gletscher mit Fokus auf Ostafrika: *Nur drei Hochgebirge in Ostafrika sind gegenwärtig noch vergletschert. Dieses Kapitel illustriert den starken Gletscherrückgang in diesem Teil der Erde seit dem 20. Jahrhundert und die klimatischen Ursachen. Ostafrikas Eismassen sind Relikte eines vergangenen Klimas, doch ihre Eigenschaft als „Sensoren" in der mittleren Troposphäre macht sie zu wertvollen Indikatoren des Klimawandels, die zudem Information über großräumige Atmosphären-Ozeandynamik speichern.*

Tropical glaciers with a focus on East Africa: *Only three high mountains in East Africa are presently glaciated. This chapter illustrates the strong glacier shrinkage since the 20th century in this part of the world, and the underlying climatic causes. East Africa's glaciers are remnants of a past climate; yet they are unique »sensors« of climate change in the mid troposphere which, moreover, store information on large-scale atmosphere-ocean dynamics.*

Schnee und Eis in den Tropen

Die bodennahen Luftschichten in den Tropen kennzeichnen sich durch ganzjährig hohe Temperaturen. Daher können Gletscher in dieser Klimazone nur in sehr großer Höhe entstehen, wo Niederschlag als Schneefall möglich ist. Diese Voraussetzung erfüllen viele Gebirge in den niederen Breiten, dennoch ist die Assoziation von Schnee und Eis mit den Tropen für viele Menschen nach wie vor kontraintuitiv. So auch gegen Mitte des 19. Jahrhunderts, als Johannes Rebmann erstmals von einer schneebedeckten Spitze in Afrika berichtete, seine Entdeckung von den Gelehrten in Europa aber jahrelang zurückgewiesen wurde.

Tropische Gletscher befinden sich heute zum allergrößten Teil in den Gebirgen Südamerikas, nämlich mehr als 99% in Bezug auf Gletscherfläche (Kaser & Osmaston 2002). Einige sehr kleine Gletscher existieren außerdem in drei ostafrikanischen Gebirgen und im Irian-Jaya-Gebirge auf Indonesien. All diese Gletscher erfüllen die von Kaser et al. (1996) eingeführte Definition: (1) Sie liegen in den astronomischen Tropen (Zenitalstände der Sonne). (2) In den jeweiligen Regionen ist der Jahresgang der Lufttemperatur nur schwach ausgeprägt (Tageszeitenklima der Tropen). Sowie (3), die Regionen liegen im Einflussbereich eines bedeutenden Strömungssystems, der sog. Intertropischen Konvergenzzone, die eine Abfolge von Feucht- und Trockenzeiten im Jahresverlauf bewirkt (hygrische Saisonalität).

Da die meisten Studien über tropische Gletscher Südamerika thematisieren (z.B. Rabatel et al. 2013), was exemplarisch auch in diesem Buch der Fall ist (Kap. 4.10, 4.11 und 7.5), legt dieses Kapitel den Fokus auf Ostafrika. Die letzte Bestandsaufnahme der indonesischen Gletscher stammt meines Wissens nach von Klein & Kincaid (2006), die eine Ausdehnung von nur 2,2 km² für 2002 ermittelten.

Die Gletscher Ostafrikas und ihr aktueller Rückgang

Gegenwärtig findet man in Ostafrika noch drei vergletscherte Gebirge: Ruwenzori (höchster Punkt 5.111 m), Mount Kenia (5.199 m) und Kilimandscharo (5.895 m). Die typische Abfolge von Trocken- und Feuchtzeiten prägt auch das dortige regionale Klima, die Tagesmittel der Temperatur schwanken hingegen nur gering. Demzufolge fällt der meiste Schnee im Hochgebirge zwischen März und Mai sowie Oktober und Dezember, die Monate Juni bis September bringen die ausgeprägteste Trockenzeit. Die obige Reihenfolge entspricht aber auch jener von allgemein »feucht zu trocken« – so sind Trockenzeiten am Ruwenzori etwa deutlich schwächer ausgeprägt. Die heutigen Gletscher beginnen daher am Kilimandscharo erst über 5.000 m Höhe, jene in den anderen beiden Gebirgen reichen einige hundert Höhenmeter tiefer hinab.

Allen drei Gebirgen gemein ist jedoch, dass sich die Gletscher seit vielen Jahrzehnten konstant und stark verkleinert haben (*Abb. 4.9-1*). Zudem erkennt man in *Abb. 4.9-1*, dass die Gletscher generell klein sind und die Rückzugsraten im gesamten 20. Jahrhundert stark waren; die jüngsten Dekaden treten hier nicht als Anomalie hervor. Die Situation im indonesischen Irian Jaya sieht übrigens sehr ähnlich aus: die Fläche zu Beginn des 21. Jahrhunderts entsprach weniger als 20% jener im frühen 20. Jahrhundert (Klein & Kincaid 2002). Der am besten vermessene Einzelgletscher Ostafrikas ist der Lewis- Gletscher am Mount Kenia, für den neben Flächenänderungen auch Volumenänderungen als Indikator des Rückgangs vorliegen (Prinz et al. 2011). Die monotone Abnahme der Fläche seit dem 20. Jahrhundert verdeutlicht, dass Ostafrikas Gletscher Relikte eines früheren Klimas sind, das Eisbildung und -erhaltung ermöglichte.

Frühere Hochstände in Ostafrika

Geomorphologische Indizien weisen auf vergangene Klimate mit deutlich größeren Gletscherausdehnungen hin. Aus historischen Dokumenten ist bekannt, dass der letzte Hochstand in allen drei Gebirgen in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts auftrat, dessen Moränen im Gelände noch gut erhalten sind (Kaser & Osmaston 2002). Am Kilimandscharo-Südhang beispielsweise liegen diese Moränen auf etwa 4.400 m. Auch am

Mount Kenia und im Ruwenzori wurden diese Moränen identifiziert und liegen circa 200-300 m tiefer als die heutigen Gletscherenden.

Noch tiefer liegende Moränen deuten größere und noch frühere Gletscherausdehnungen in Ostafrika an, was Shanahan & Zreda (2000) für den Kilimandscharo und Mount Kenia untersucht haben. Die Autoren datierten gut erhaltene Moränen auf das Ende der letzten globalen Eiszeit vor ca. 20.000 Jahren und zeigen, dass die Gletscher damals bis weit unter 4.000 m hinabflossen, und dass auch heutige eisfreie Gebirgsteile vergletschert waren (z.B. der östliche Teil des Kilimandscharo, Mawenzi). Wie sehr solche Änderungen das Landschaftsbild umgestalten, zeigt der Vergleich der heutigen Gletscher am Kilimandscharo mit der Situation 1912, welche noch relativ nahe am letzten Hochstand war (*Abb. 4.9-2*). Auch die Erkenntnisse aus Paläodaten belegen also, dass sich die gegenwärtigen klimatischen Bedingungen nicht für die Gletscherexistenz in Ostafrika eignen.

Die klimatischen Ursachen (Antriebe) des rezenten Gletscherrückgangs in Ostafrika

Wie für alle Gletscher ist die Massenbilanz auch in den Tropen die unmittelbare Kenngröße, die den Zusammenhang zwischen Gletschervolumen und atmosphärischem Antrieb beinhaltet. Ist man in der Lage, die dahinterstehenden Massen- und Energieflüsse aufzuschlüsseln, erhält man Einsicht in die physikalischen Gründe von Massenschwankungen und somit in die klimatischen Ursachen des Gletscherrückgangs. Massenflüsse sind zum Beispiel Schmelzen, Sublimation und Schneefall. Energieflüsse sind etwa Strahlung in verschiedenen Wellenlängenspektren, turbulenter Energietransfer und Wärmeleitung im Gletscher. All diese Flüsse unterliegen verschiedenen Steuerungen im Klima.

In dieser Hinsicht sind die klimatischen Gründe für den Gletscherrückgang am Kilimandscharo am besten erforscht, was vor allem auf zwei Tatsachen basiert. Einmal finden dort seit inzwischen 15 Jahren meteorologische Messungen mit mehreren automatischen Wetterstationen auf den Gletschern statt, die von den Universitäten Massachusetts (Amherst) und Innsbruck initiiert wurden und über 5.700 m erfolgen. Zum anderen wurden diese Messungen in numerischen Modellen angewendet, um die oben genannten Kontrollmechanismen der Massenbilanz zu enträtseln (z.B. Mölg & Hardy 2004, Mölg et al. 2009a). Auch am Mount Kenia wurde 2010 ein ähnliches Feldprogramm gestartet (Prinz et al. 2011) mit der Absicht umfassender Datengewinnung für kausale Modellierungen und deren Evaluierung (Nicholson et al. 2013). Die Gletscher am Ruwenzori sind in dieser Hinsicht am wenigsten untersucht, was noch immer aus der lange Zeit schwierigen Zugänglichkeit – politisch sowie naturräumlich – resultiert.

Allgemein kann man sagen, dass die Häufigkeit und Menge des festen Niederschlags der dominante lokale Klimafaktor für die Massenbilanz der Gletscher sind. Die Erklärung dafür liefern die aufgeschlüsselten Massen- und Energieflüsse auf ausgewählten Gletschern am Mount Kenia und Kilimandscharo (Mölg & Hardy 2004, Mölg et al. 2009a, Nicholson et al. 2013, Prinz et al. 2015). Der mit Abstand variabelste und größte Energieeintrag auf die Gletscher ist die kurzwellige absorbierte Strahlung, die maßgeblich vom Reflexionsvermögen (der Albedo) des Gletschers abhängt. Die Reflexion auf Gletschern ist immer dann stark, wenn regelmäßig und viel Schnee auf die Oberfläche fällt. Zwei Faktoren bestimmen dies: die Niederschlagsmenge und -frequenz selber sowie die Lufttemperatur, die die Niederschlagsphase steuert (fest/flüssig). In den großen Höhen, in denen die Gletscher am Mount Kenia und Kilimandscharo vorkommen, sind die Temperaturen aber ganzjährig tief genug, damit Niederschlag fast ausschließlich in fester Form fällt. Die Kontrolle über die

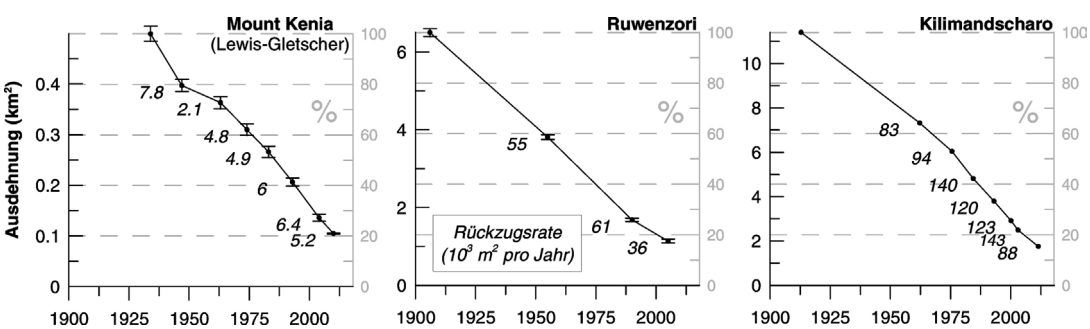

Abb. 4.9-1: *Veränderung der vergletscherten Fläche am Lewis-Gletscher (Mount Kenia), im Ruwenzori-Gebirge und am Kilimandscharo. Absolutwerte (linke y-Achsen, verschieden skaliert!) und prozentuale Veränderung, relativ zum ersten verfügbaren Flächenwert (rechte y-Achsen). Die kursiven Zahlen in den Diagrammen geben die mittlere Flächenabnahme zwischen dem angedeuteten und vorherigen Zeitpunkt an (in Tausenden Quadratmetern pro Jahr) (Quelle: Mölg et al. 2013; leicht verändert).*

Massenbilanz bleibt somit beim Niederschlag, einerseits durch die Regulierung der Energieaufnahme und andererseits durch die Akkumulation von Masse. Daher kann auch der letzte Hochstand im späten 19. Jahrhundert aus physikalischer Sicht nur durch ein lokal feuchteres Klima erklärt werden (Mölg et al. 2009a).

Für die Massenbilanz am Kilimandscharo sind zwei Besonderheiten zu beachten. Einmal entsteht ein großer Teil der jährlichen Massenausgabe (Ablation) neben Schmelze durch Sublimation, die etwa 2/3 in der höchsten Zone (~5.800 m) und noch ein Viertel in der gegenwärtig untersten vergletscherten Zone (~5.200 m) ausmacht. Auch am Mount Kenia tritt Sublimation systematisch auf, jedoch vorwiegend in der Trockenzeit und in kleineren Mengen. Somit ist die relative Bedeutung im Jahresmittel dort deutlich kleiner (Nicholson et al. 2013). Zweitens existieren am Kilimandscharo markante, steile Eiskliffs am Rand der tafelförmigen Gletscher auf dem Gipfelplateau (über ~5.700 m Höhe; *Abb. 4.9-3*), was zusammen mit der scheinbaren Sonnenbahn am Äquator (halbjährig nördlich oder südlich) ein spezielles Massenbilanzregime schafft. Die genaue Entstehung der vorwiegend nord- und südexponierten Kliffs ist übrigens noch ungeklärt. Sobald sie aber existieren, erfahren sie einen Rückgang von 0,5 bis 1 m pro Jahr, den vor allem die Schmelze während des Halbjahres direkter Besonnung produziert (Mölg et al. 2003, Winkler et al. 2010). Selbst wenn die Masse auf den horizontalen Oberflächen der Plateaugletscher zunähme, würde der Flächenverlust aufgrund der rückschreitenden Eiskliffs fortfahren. Am Kilimandscharo ist daher die Unterscheidung in Plateau- und Hanggletscher für Klimastudien zwingend nötig (Kaser et al. 2010).

Bei den Studien zum Kilimandscharo wurden die Erkenntnisse zur Massenbilanz zusätzlich in ein skalenübergreifendes Konzept eingebettet, um die Kausalitätskette zwischen den lokalen und großräumigen Prozessen zu verstehen (z.B. Mölg et al. 2009b, 2012), was für Gletscherstudien in dieser Weise vorher nicht gemacht wurde[1]. Es zeigte sich, dass reduzierte lokale Schneefälle am Gipfel des Kilimandscharo im 20. Jahrhundert großräumige Ursachen in der Dynamik des Indischen Ozeans haben. Dabei spielt ein selteneres Auftreten des sog. Dipol-Modus die wahrscheinlich entscheidende Rolle, was die Zufuhr feuchter und labiler Luftmassen nach Ostafrika verringert. Für die regionale Strömung über dem Gebirge bedeutet dies, dass die thermodynamische Stabilität der anströmenden Luft im Mittel zugenommen hat und Konvektion und Niederschlagsbildung in den oberen Höhenzonen erschwert werden (Mölg et al. 2009b). Die erste Einschätzung der klimatischen Antriebe des Gletscherrückgangs am Kilimandscharo von Thompson et al. (2002), nämlich eine Temperatursteuerung bis hin zur lokalen Skala auf der Basis statistischer Eisbohrkernanalysen, konnte den detaillierten Ergebnissen der physikalischen Studien nicht standhalten.

[1] *Eine kompakte Zusammenfassung der Gletscher- und Klimastudien am Kilimandscharo seit 2000 gibt folgendes Dokument (auf englisch): http://www.thomasmoelg.info/factsheet_kili.pdf*

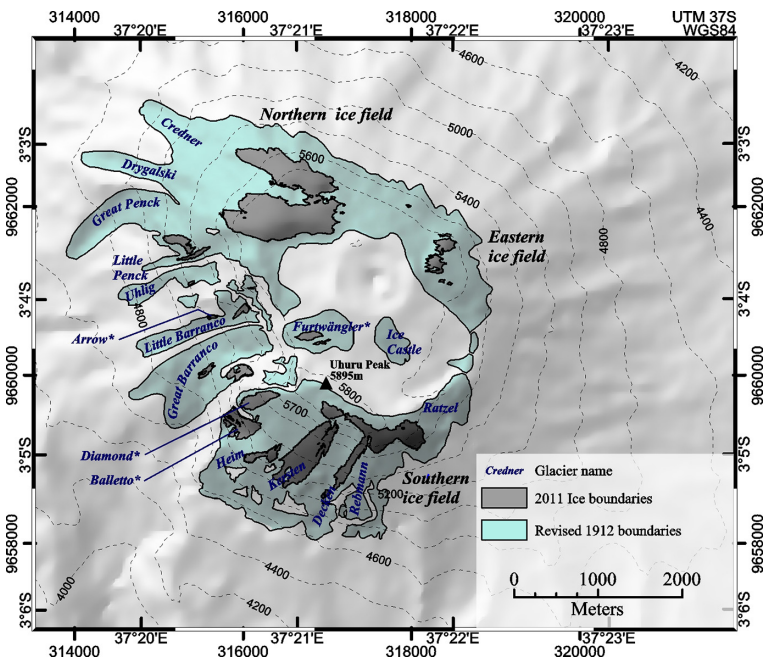

Abb. 4.9-2: *Gletscherausdehnung am Kilimandscharo im Jahr 1912 (**hellblau**) und 2011 (**dunkelgrau**) (aus Cullen et al. 2013, leicht verändert). Eine Animation des Rückgangs stellen die Autoren der Originalarbeit im Online-Material zur Verfügung: http://www.the-cryosphere.net/7/419/2013/tc-7-419-2013-supplement.pdf.*

Wie stark der anthropogene Klimawandel zur geänderten Dynamik im Indischen Ozean beiträgt, ist Gegenstand laufender Forschungen. Die Erkenntnis, dass fehlende Schneefälle den aktuellen Gletscherschwund vor Ort antreiben, heißt also keinesfalls, dass die globale Erwärmung keine Wirkung auf Ostafrikas Eismassen hat. Dies wurde vor allem in der Öffentlichkeit häufig fehlinterpretiert. Vielmehr ist eine Einwirkung in den letzten Jahrzehnten sehr wahrscheinlich, denn großräumige Erwärmungen erfassen die gekoppelte Atmosphären-Ozeandynamik der niederen Breiten, welche regionale Niederschlagsmuster in den Tropen ändert (z.B. Lintner & Neelin 2007).

Bedeutung der Gletscher Ostafrikas und Ausblick

Die oben genannten experimentellen Feldmessungen in Kombination mit aufwändiger numerischer Modellierung lassen wenig Zweifel, dass Veränderungen des festen Niederschlags die lokale Steuergröße für Gletscherschwankungen in Ostafrikas Hochgebirgen sind. Noch stark diskutiert wird jedoch das Alter der gegenwärtigen Gletscher am Kilimandscharo, wobei hier nur jene auf dem Gipfelplateau betrachtet werden. Aus Eisbohrkernen folgerten Thompson et al. (2002), dass die heutigen Plateaugletscher bis zu 11.000 Jahre alt sind, also im gesamten Holozän existierten. Aus den kausalen Studien (oben) und Beobachtungen im Gelände (z.B. Stufen im Eis, Kratertopografie) schlagen Kaser et al. (2010) vor, dass die Plateaugletscher einem Zyklus des »Kommens und Gehens« unterliegen, der das heutige Eis kaum älter als einige hundert Jahre macht. Die vor kurzem präsentierten Ergebnisse auf der IUGG-Konferenz in Prag 2015 stützen letztere Ansicht eines weitaus jüngeren Eises durch eine neue Datierungsmethode[2].

Unumstritten ist, dass Ostafrikas Gletscher seit dem 20. Jahrhundert stark an Fläche und Masse verloren haben. Sollte sich etwa das gegenwärtige Klima am Kilimandscharo fortsetzen, ist das komplette Verschwinden der dortigen Gletscher zwischen 2040 und 2060 sehr wahrscheinlich (Mölg et al. 2003, Cullen et al. 2013). Eine ähnliche Entwicklung scheint auch für den Mount Kenia und Ruwenzori realistisch. Allerdings liegen auch Studien zur großräumigen Klimadynamik vor, die bei fortschreitender globaler Erwärmung eine Verstärkung der Regenzeiten Ostafrikas für physikalisch konsistent halten (z.B. Vecchi & Soden 2007). Die Projektion des Verschwindens aller ostafrikanischen Gletscher im 21. Jahrhundert ist daher auch mit einer offensichtlichen Unsicherheit belegt.

Die Bedeutung der ostafrikanischen Gletscher und ihres Rückgangs ist differenziert. Ihre geringe Größe macht sie im regionalen Wasserhaushalt definitiv vernachlässigbar. Im Gegensatz dazu bestimmen sie das touristische Potenzial in den jeweiligen Regionen aber entscheidend mit. Alleine den Kilimandscharo besuchten in den letzten Jahrzehnten immer wieder mehr als 10.000 Bergsteiger pro Jahr. Und letztlich sind die ostafrikanischen Gletscher spezielle Indikatoren des Klimas auf der Erde: wenn man die Wechselwirkung dieser Gletscher mit der Atmosphäre und ihre Rol-

[2]https://www.czech-in.org/cm/IUGG/CM.NET.WebUI/CM.NET.WEBUI.scpr/SCPRfunctiondetail.aspx?confID=05000000-0000-0000-0000-000000000053&sesID=05000000-0000-0000-0000-000000002518&absID=07000000-0000-0000-0000-000000022001

Abb. 4.9-3: *Südexponiertes Eiskliff am Plateaugletscher des Kilimandscharo. Die Kliffs sind steil (70-90° Neigung und max. 50 m hoch), während die obere Begrenzung durch annähernd horizontale Flächen gebildet wird. Rot eingekreist die automatische Wetterstation 2, die die mikroklimatischen Bedingungen am Kliff aufzeichnet (Foto: N. J. Cullen).*

le im Klimasystem entschlüsseln kann (siehe oben), bietet sich eine hervorragende Möglichkeit, aus den vergangenen, größeren Gletscherständen mehr über Klimaänderungen in der mittleren Troposphäre in 5-6 Kilometern Höhe zu erfahren (Mölg et al. 2009a). Dies ist ein sehr bedeutender Aspekt, da unser Wissen über den Klimawandel zum Großteil die unteren Luftschichten betrifft.

Literatur

CULLEN, N. J., P. SIRGUEY, T. MÖLG, G. KASER, M. WINKLER & S. J. FITZSIMONS (2013): A century of ice retreat on Kilimanjaro: The mapping reloaded. – The Cryosphere 7, 419-431.

KASER, G., S. HASTENRATH & A. AMES (1996): Mass balance profiles on tropical glaciers. – Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 32, 75-81.

KASER, G. & H. OSMASTON (2002): Tropical glaciers. – Cambridge University Press: Cambridge.

KASER, G., T. MÖLG, N. J. CULLEN, D. R. HARDY & M. WINKLER (2010): Is the decline of ice on Kilimanjaro unprecedented in the Holocene? – The Holocene 20, 1079-1091.

KLEIN, A. G. & J. KINCAID (2006): Retreat of glaciers on Puncak Jaya, Irian Jaya, determined from 2000 and 2002 IKONOS satellite images. – Journal of Glaciology 52, 65-78.

LINTNER, B. R. & J. D. NEELIN (2007): A prototype for convective margin shifts. – Geophysical Research Letters 34, L05812.

MÖLG, T., D. R. HARDY & G. KASER (2003): Solar radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice–radiation geometry modeling. – Journal of Geophysical Research 108, 4731.

MÖLG, T. & D. R. HARDY (2004): Ablation and associated energy balance of a horizontal glacier surface on Kilimanjaro. – Journal of Geophysical Research 109, D16104.

MÖLG, T., N. J. CULLEN, D. R. HARDY, M. WINKLER & G. KASER (2009a): Quantifying climate change in the tropical midtroposphere over East Africa from glacier shrinkage on Kilimanjaro. – Journal of Climate 22, 4162-4181.

MÖLG, T., J. H. C. CHIANG, A. GOHM, & N. J. CULLEN (2009b): Temporal precipitation variability versus altitude on a tropical high mountain: Observations and mesoscale atmospheric modeling. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society 135, 1439-1455.

MÖLG, T., M. GROSSHAUSER, A. HEMP, M. HOFER & B. MARZEION (2012): Limited forcing of glacier loss through land-cover change on Kilimanjaro. – Nature Climate Change 2, 254–258.

MÖLG, T., N. J. CULLEN, D. R. HARDY, G. KASER, L. NICHOLSON, R. PRINZ & M. WINKLER (2013): East African glacier loss and climate change: Corrections to the UNEP article “Africa without ice and snow”. – Environmental Development 6, 1-6.

NICHOLSON, L., R. PRINZ, T. MÖLG & G. KASER (2013): Micrometeorological conditions and surface mass and energy fluxes on Lewis Glacier, Mount Kenya, in relation to other tropical glaciers. – The Cryosphere 7, 1205-1225.

PRINZ, R., A. FISCHER, L. I. NICHOLSON & G. KASER (2011): Seventy-six years of mean mass balance rates derived from recent and re-evaluated ice volume measurements on tropical Lewis Glacier, Mount Kenya. – Geophysical Research Letters 38, L20502.

PRINZ, R., L. I. NICHOLSON, T. MÖLG, W. GURGISER & G. KASER (2015): Climatic controls and climate proxy potential of Lewis Glacier, Mt Kenya. – The Cryosphere Discussions 9, 3887-3924.

RABATEL, A. and 27 other autors (2013): Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. – The Cryosphere 7, 81-102.

SHANAHAN, T.M. & M. ZREDA (2000): Chronology of Quarternary glaciations in East Africa. – Earth and Planetary Science Letters 177, 23-42.

THOMPSON, L. G. and 10 other authors (2002): Kilimanjaro ice core records: evidence of holocene climate change in tropical Africa. – Science 298, 589-593.

VECCHI, G. A. & B. J. SODEN (2007): Global warming and the weakening of the tropical circulation. – Journal of Climate 20, 4316-4340.

WINKLER, M., G. KASER, N. J. CULLEN, T. MÖLG, D. R. HARDY & W. T. PFEFFER (2010): Land-based marginal ice cliffs: Focus on Kilimanjaro. – Erdkunde 64, 179-193.

Kontakt:

Prof. Dr. Thomas Mölg
Friedrich-Alexander Universität Erlangen Nürnberg (FAU)
Institut für Geographie
thomas.moelg@fau.de

Mölg, T. (2015): Tropische Gletscher mit Fokus auf Ostafrika. In: Lozán, J. L., Grassl, H., Kasang, D. & H. Escher-Vetter (Hrsg.). Warnsignal Klima: Das Eis der Erde. pp. 159-163. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.24