

4.11 Die Auswirkungen des Klimawandels auf die tropischen Gletscher Boliviens

DIRK HOFFMANN

Die Auswirkung des Klimawandels auf die tropischen Gletscher Boliviens: Es werden die Gletscher Boliviens betrachtet, die aufgrund ihrer Lage alle der Kategorie der tropischen Gletscher zugeordnet werden, was sie besonders empfindlich gegenüber Klimaänderungen macht. Wie auch in anderen Ländern der Zentralanden hat die Globale Erwärmung zu einem rasanten Abschmelzen der bolivianischen Gletscher seit Beginn der 1980er Jahre geführt. Die Konsequenzen der Gletscherschmelze betreffen in erster Linie den Wasserkreislauf und die Ökosysteme der hochandinen Regionen, wirken sich aber auch auf die Wasserversorgung des Ballungsraums La Paz-El Alto aus. Wichtiger aber noch als ihre reale physische Bedeutung scheint die von den schwindenden Gletschern ausgehende Warnung bezüglich der Folgen der Globalen Erwärmung. Auch wenn es gelingt, den weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen zu senken, wird die Mehrzahl der Gletscher Boliviens nicht zu retten sein. Einzig für die größten von ihnen mit Nährgebieten in Höhen um die 6.000 m können drastische Emissionsbegrenzungen das teilweise Überleben bis ins 22. Jahrhundert hinein ermöglichen.

The impact of climate change on tropical glaciers in Bolivia: This chapter analyses the situation of Bolivian glaciers, which all belong to the category of Tropical Glaciers, making them extremely vulnerable to variations of the climate. As in the other central Andean countries, since the early 1980s global warming has led to an accelerated retreat of these glaciers. The consequences of this rapid melting of glaciers are mainly on the hydrological cycle and the ecosystems of high Andean regions, but water availability of the metropolitan area La Paz-El Alto is also affected. However, the warning sign arising from melting glaciers due to the impacts of global warming is likely more important than their actual physical relevance. Even if the world should be successful in reducing greenhouse gas emissions, the majority of Bolivia's glaciers cannot be saved anymore. Only for glaciers with an accumulation area in the range of 6,000 m.a.s.l., will drastic emissions reductions enable a partial survival into the 22nd century.

Anknüpfend an die Ausführungen über tropische Gletscher in Südamerika im Allgemeinen (s. 4.10), werden in diesem Kapitel die Gletscher Boliviens betrachtet, die aufgrund ihrer Lage alle der Kategorie der tropischen Gletscher zugeordnet werden (CANPRAA-IRD 2013). Bolivien beherbergt mit rund 20% nach Peru (gut 70%) den weltweit zweitgrößten Anteil an tropischen Gletschern.

Bedingt durch die Globale Erwärmung haben sich in den letzten Jahrzehnten die Temperaturen in den Anden merklich erhöht, was im Zusammenspiel mit verändertem Niederschlagsverhalten zu einem rasanten Abschmelzen der Gletscher seit Beginn der 1980er Jahre geführt hat. Die Konsequenzen des Verlustes der Gletscher betreffen in erster Linie den Wasserkreislauf und die Ökosysteme der hochandinen Regionen, wirken sich aber auch auf die Wasserversorgung der Menschen flussabwärts und im angrenzenden Ballungsraum La Paz-El Alto aus. Wichtiger aber noch als die reale physische Bedeutung der Gletscher als »Süßwasserspeicher in großer Höhe« scheint die von den rapide schmelzenden Gletschern ausgehende Warnung bezüglich der Folgen der Globalen Erwärmung. Die besonders empfindlichen tropischen Gletscher führen deutlich vor Augen, welche Auswirkungen der Klimawandel auch auf andere Ökosysteme hat.

Auch wenn es gelingt, demnächst den weltweiten Ausstoß von Treibhausgasen drastisch zu senken, wird es nicht möglich sein, die kleineren und niedrig

gelegenen Gletscher Boliviens vor dem kompletten Abschmelzen zu retten. Einzig für die größten Gletscher mit Nährgebieten in Höhen von etwa 6.000 m können drastische Emissionsbegrenzungen das teilweise Überleben bis ins 22. Jahrhundert hinein ermöglichen.

Die Gletscher Boliviens

Die bolivianischen Gletscher befinden sich bis auf ganz wenige Ausnahmen in der Cordillera Oriental, der östlichen Andenkette, welche sich von Peru im Norden bis in den Süden des Landes erstreckt. Der zentrale Teil, die Cordillera Real (Königskordillere), beherbergt etwa 55% der Gletscherfläche, die Cordillera Apolobamba etwa 37% und 7,5% entfallen auf die Cordillera Quimsa Cruz, das am südlichsten gelegene vergletscherte Gebirge der Zentralanden. In der Westkordillere verfügt neben dem stark vergletscherten Sajama nur noch der Pomerape über einen Gletscherrest.

Das Gletscherinventar aus den 1980er Jahren (JORDAN 1991) zeigt, dass Bolivien zur damaligen Zeit über eine Gletscherfläche von 566 km² verfügte, was 20,15% der weltweiten tropischen Gletscher darstellte. Gezählt wurden insgesamt 1.830 Gletscher. Für viele Jahre bildeten diese Daten die Grundlage für die Information des World Glacier Monitoring Service (WGMS) über die bolivianischen Gletscher. Nicht abgebildet sind in diesen Daten die in verschiedenen Teilen der Cordillera Real und des südlichen Altiplano vorhandenen Blockgletscher, für die erst seit kurzem ein Überblick vorliegt.

Die bolivianische Gletscherforschung

In den Anden geht die Erkundung des ewigen Eises bis ins Jahr 1740 zurück, als französische und spanische Akademiker die ersten drei Breitengrade unter dem Äquator vermaßen (FRANCOU 2011). Die systematische Erfassung und Erforschung der bolivianischen Gletscher begann in den 1980er Jahren; es lassen sich insgesamt drei verschiedene Phasen unterscheiden.

Die erste Phase beginnt mit der Pionierarbeit des deutschen Geografen Ekkehard Jordan, der Mitte der 1980er Jahre während mehrerer Jahre die bolivianischen Anden durchstreifte. Mittels Geländekartierungen und der Analyse von Luftaufnahmen erstellte Jordan ein komplettes Gletscherinventar Boliviens, welches nebst Karten unter dem Titel »Die Gletscher der bolivianischen Anden« (JORDAN 1991) in Deutschland veröffentlicht wurde. Eine bahnbrechende Arbeit, die noch immer gelegentlich als »die Bibel der bolivianischen Gletscherforschung« bezeichnet wird.

Die zweite Phase der bolivianischen Gletscherforschung beginnt 1991 mit der Einrichtung eines permanenten Monitoring von zwei Gletschern der Cordillera Real durch die französische Wissenschaftskooperation ORSTOM. Das länderübergreifende Programm der Gletscherbeobachtung und kontinuierlichen Messung umfasst den Zongo-Gletscher am Huayna Potosí und den Chacaltaya-Gletscher sowie jeweils zwei Gletscher in Peru und Ecuador (vgl. FRANCOU et al. 2003).

Die damals begonnenen Mess- und Forschungsprogramme werden mit einheimischen Partnern bis heute unter dem Namen des »Forschungsinstituts für die Entwicklung« (Institut de Recherche pour le Développement - IRD) fortgeführt. Gemeinsam mit dem Hydrologie- und Hydraulikinstitut sowie der Geologischen Fakultät der staatlichen Universität San Andrés (UMSA) in La Paz wird die Gletscherforschung vorangetrieben. Neben der eigentlichen Gletscherforschung, die sich insbesondere mit der Massen- und Energiebilanz der schwindenden bolivianischen Gletscher beschäftigt, findet Training und Ausbildung von Glaziologen und Technikern statt.

Mit dem Charquini wird in dieser Zeit ein neuer Gletscher in das Messprogramm aufgenommen, nachdem die Messungen des Chacaltaya-Gletschers Anfang des 21. Jahrhunderts eingestellt worden sind – der Gletscher war bis auf kleinere Eisflächen weggeschmolzen.

Die Funktion der Gletscher als »Klimaarchive« hat bei Klimaforschern großes Interesse geweckt und auch in Bolivien zu mehreren Expeditionen auf die höchsten Berge des Landes geführt, um dort Bohrungen ins Gletschereis vorzunehmen (Sajama 1997, Illimani 1999 und 2015). Die Forscher haben es eilig, denn mit dem rasanten Voranschreiten der Gletscherschmelze

werden diese Klimaarchive in wenigen Jahrzehnten verschwunden sein (s. auch KIPFSTUHL Kap. 6.1 in diesem Band).

In der dritten Phase wird die Gletscherforschung ausgeweitet bezüglich der Folgen und Auswirkungen der Gletscherschmelze. Dies geschieht etwa ab 2006, mit ersten Aktivitäten des Bolivianischen Gebirgsforschungsinstituts BMI und ersten Arbeiten von Hoffmann (HOFFMANN 2008) sowie der Andinen Gemeinschaft der Nationen (Comunidad Andina de Naciones).

Das Hauptaugenmerk richtet sich zunächst auf die Auswirkungen der Gletscherschmelze auf die städtische Wasserversorgung von La Paz und El Alto (u.a., RAMÍREZ 2008 und SORUCO et al. 2015). In der Folge kommen auch vermehrt sozialwissenschaftliche und ökonomische Aspekte ins Blickfeld und es beginnt die Kommunikation der Gletscherforschung in Richtung Gesellschaft (INSTITUTO BOLIVIANO DE LA MONTAÑA 2014 und MMAYÁ 2013).

Der Klimawandel in Bolivien

Der Hauptgrund für den beschleunigten Rückgang der tropischen Gletscher ist die globale Erwärmung, die auch in den Anden für einen deutlichen Temperaturanstieg gesorgt hat (VUILLE et al. 2003, MARENGO et al. 2011).

VUILLE et al. (2008) geben die Temperaturerhöhung in den letzten 60 oder 70 Jahren für den zentralen Andenraum mit 0,1 °C pro Jahrzehnt an, verweisen jedoch darauf, dass der Anstieg in den letzten beiden Jahrzehnten etwa 0,3 °C betragen hat. Wichtig für die Andenregion sind hierbei jedoch zwei Punkte: Die globale Erwärmung findet nicht homogen statt, sondern verschiedene Regionen des Globus erwärmen sich unterschiedlich stark. So ist die Erwärmung im Inneren der Kontinente sehr viel größer als über den Ozeanen, die rund zwei Drittel der Erdoberfläche bedecken. Die Temperaturzunahme über großen Landflächen ist etwa doppelt so groß wie der globale Durchschnitt. Die stärkste Temperaturzunahme wird derzeit in der Arktis gemessen (zwei- bis dreimal stärker als das globale Mittel).

Hinzu kommt für die Anden die Tatsache, dass die Erwärmung in großen Höhen sehr viel stärker ausfällt (BRADLEY et al. 2006). Dies zeigen nicht nur die Temperaturmodelle, sondern empirische Messungen aus anderen Hochgebirgsregionen der Welt, wie z.B. den Rocky Mountains oder den Alpen. Studien belegen, dass sich die Frostgrenze in den tropischen Gebirgen innerhalb von 30 Jahren um etwa 45 m nach oben verschoben hat. Ebenfalls in höhere Regionen verschoben haben sich die Schneegrenze und die Gleichgewichtshöhenlinie der Gletscher.

Für die Niederschläge der Vergangenheit ist die Datenerhebung schwieriger; hier liegen aufgrund der komplexen topografischen Verhältnisse und des Fehlens eines entsprechenden Messnetzes kaum Studien zum Einfluss des Niederschlagsverhaltens auf die tropischen Gletscher Boliviens vor. Erst in neuerer Zeit werden entsprechende Messungen systematisch und in Gletschnähe durchgeführt. Eine allgemeine Diskussion des Niederschlagsverhaltens in den tropischen Anden findet sich bei GARREAU (2009) und VUILLE (2013).

El Niño

Neben der globalen Erwärmung hat auch der El Niño-Effekt einen erheblichen Einfluss auf die bolivianischen Gletscher (FRANCOU et al. 2004). Während eines El Niño verringert sich der Niederschlag im Altiplano und in den Gebirgsketten erheblich, was eine geringere Schneebedeckung der Gletscher und damit eine geringere Albedo, d.h. die Kapazität einer Oberfläche einstrahlendes Sonnenlicht zu reflektieren, zur Folge hat. Dadurch sind größere Gletscherpartien der direkten Sonneneinstrahlung und damit höheren Temperaturen ausgesetzt, was das Abschmelzen der Gletscher merklich beschleunigt (RAMÍREZ 2008).

Der Verlust des letzten Eisrestes der einstigen Skipiste des Chacaltaya-Gletschers erfolgte während des letzten El Niño zum Jahreswechsel 2009/10. Derzeit (August 2015) besteht eine Wahrscheinlichkeit von über 90%, dass die bereits herrschenden El Niño-Bedingungen auch während der intensivsten Phase der Regenzeit von Dezember 2015 bis Februar 2016 andauern werden (NOAA 2015). Die Mehrzahl der Modelle sieht einen starken El Niño voraus, was zu einem erheblichen Masseverlust der Gletscher in Bolivien führen dürfte. Eine aktuelle Studie von W. CAI und Kollegen (2014) ist aufgrund von Klimamodellierungen zu der Aussage gekommen, dass sich bei fortgesetzten Emissionen von Treibhausgasen auf aktuellem Niveau die Anzahl der starken El Niño-Ereignisse zukünftig verdoppeln würde.

Rußablagerungen

Es gibt aber auch lokale Faktoren, die die Gletscherschmelze beeinflussen, wie z.B. die Ablagerung von kleinen Rußteilchen. Diese werden vom Wind in große Höhen getragen und lagern sich, ebenso wie feinsten Staub aus dem Altiplano, auf der Gletscheroberfläche ab. Die dadurch hervorgerufene Verdunkelung hat zur Folge, dass die Albedo gesenkt wird. Ruß hat ferner einen positiven Strahlungsantrieb. Damit erhöht sich die Energieaufnahme des Gletschers und folglich beschleunigt sich der Schmelzprozess.

Rußteilchen entstehen einerseits bei der Verbrennung von Diesel im Straßenverkehr, zum anderen durch

die Verbrennung von Biomasse. Letzteres geschieht im großen Stil im östlichen Amazonastiefland von Bolivien, wo jährlich zwischen 250.000 und 400.000 ha Wald vernichtet werden, größtenteils durch Brandrodung. Zusätzlich wird jedes Jahr ein Großteil der ausgedehnten Weideflächen in den Tiefland-Departamentos Beni und Santa Cruz abgebrannt, um die Qualität des Grases zu verbessern. Allerdings ist es fraglich, ob dies tatsächlich der Fall ist, oder ob sich nicht sogar das regelmäßige Abbrennen mittelfristig negativ auf die Bodenfruchtbarkeit auswirkt.

Es wird vermutet, dass aufgrund der vorherrschenden östlichen Windrichtung im wesentlichen die Brandrodungen im Tiefland für die dunklere Tönung der Gletscheroberfläche zu Ende der Trockenzeit verantwortlich sind. Derzeit werden vom Labor für Atmosphärenphysik der Universität San Andrés (UMSA) in La Paz auf dem Chacaltaya Untersuchungen durchgeführt, um die Herkunft der Partikel und ihre genaue Auswirkung auf die Gletscherschmelze zu klären. Die seit den 1950er Jahren bestehende und auf etwa 5.200 m gelegene Chacaltaya-Forschungsstation wurde vor wenigen Jahren komplett neu ausgestattet und ist Teil des globalen Beobachtungsnetzwerks GAW – Global Atmospheric Watch.

Die Folgen des Klimawandels für die bolivianischen Gletscher

Aufgrund ihrer relativ geringen Größe, dem starken Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche in den tropischen Breiten sowie den dort herrschenden klimatischen Gegebenheiten (KASER 2001 und MARTÍNEZ et al. 2011) sind die tropischen Gletscher besonders empfindlich gegenüber geringen klimatischen Schwankungen. Eine Besonderheit der tropischen Gletscher besteht darin, dass die unteren Gletscherbereiche ganzjährig Zährgebiet sind, d.h. sich hier zu keinem Zeitpunkt die Gletschermasse vergrößert (CAN-PRAA-IRD 2013).

Die Kernregenzeit, von Dezember bis März, entspricht der Jahreszeit, in der die tropischen Gletscher Masse akkumulieren. Aber wegen der im „südlichen Sommer“ gleichzeitig herrschenden höheren Temperaturen, ist dies ebenfalls die Zeit des größten Masseverlustes der Gletscher durch Abschmelzen. Während der Trockenzeit (Mai bis Oktober) ist die Akkumulation der Gletscher bedingt durch das Fehlen von nennenswertem Niederschlag nahezu Null. Durch die kühleren Temperaturen entsteht der Masseverlust überwiegend durch Sublimation (»Verdunsten«). So haben bereits geringe Schwankungen in Temperatur oder Niederschlag große Auswirkungen auf die Massenbilanz (SORUCO et al. 2015).

Eine weitere Auswirkung der gestiegenen Temperaturen ist der Anstieg der Schnee-Regen-Grenze. In Höhen, in denen bisher die Niederschläge in fester Form (Schnee) erfolgten und damit zum Wachsen des Gletschereises beitrugen, ist nun immer öfter zu beobachten, dass statt Schnee Regen fällt, der seinerseits zum Abschmelzen des Gletschers beiträgt. Je wärmer die Temperatur der Atmosphäre, desto höher steigt die Grenze, bis zu der Niederschläge als Regen erfolgen.

»Von Bolivien bis Ekuador haben die Studien des Teams vom IRD es möglich gemacht zu zeigen, dass ab dem 10. bis 12. Jahrhundert unserer Zeitrechnung die Gletscher vorgestoßen sind. Diese Tendenz erreichte zwischen 1630 und 1730 ihren Höhepunkt (...). Man hat berechnet, dass die Temperatur in den Anden zu dieser Zeit etwa 1°C niedriger lag als im Durchschnitt des 20. Jahrhunderts, und dass die Niederschläge 30% höher waren verglichen mit der Gegenwart« (FRANCOU 2011: 35).

Bernard FRANCOU schätzt, dass mit jedem Grad Temperaturzunahme die ELA (Equilibrium Line Altitude), die Gleichgewichtslinie des Gletschers, um 150-200 m zunimmt. Aktuell liegt diese Linie, abhängig von den Charakteristika des einzelnen Gletschers, zwischen 5.200 und 5.400 m Höhe. Aus dieser Rechnung folgt, dass bei einer lokalen Temperaturerhöhung von nur wenigen Grad Celsius die Gletscher Boliviens praktisch komplett verschwinden werden. Eine derartige Erhöhung der Temperatur im Anden-Hochgebirge kann bereits in wenigen Jahrzehnten erreicht sein (HOFFMANN & REQUENA 2012: 36, MARENGO et al. 2011, URRUTIA & VUILLE 2009 und VUILLE et al. 2008).

Die aktuelle Situation der bolivianischen Gletscher

Mit fotogrammetrischen Methoden hat das Team der französisch-bolivianischen Wissenschaftler die Volumenänderungen von 21 Gletschern der Königskordillere in Bolivien zwischen 1963 und 2006 bestimmt und auf 376 Gletscher der Region hochgerechnet (SORUCO et al. 2009). Im Ergebnis kommen sie zu dem Schluss, dass die Gletscher zwischen 1975 und 2006 43% ihres Volumens und 48% ihrer Oberfläche verloren haben (s. Abb. 4.11-1).

Aufgrund der Erwärmung der letzten Jahre lässt sich aus diesen Ergebnissen schließen, dass innerhalb der letzten 40 Jahre deutlich mehr als die Hälfte der vorhandenen Gletscherfläche von 566 km² (JORDAN 1991) verloren gegangen ist. Bolivien dürfte folglich derzeit über weniger als 280 km² vergletschelter Gebirgsfläche verfügen, mit einer rapide weiter fallenden Tendenz. Aufgrund des Überblicksartikels von RABATEL et al. 2013 gibt es daran keinen Zweifel. Unter den Mitautoren findet sich die Mehrzahl der in der Region tätigen Glaziologen.

Ziel dieser umfassenden Arbeit war die bisherige Entwicklung zusammenzufassen und das zukünftige Verhalten der Gletscher besser abzuschätzen, um die Bedeutung der Gletscher-geprägten Wassereinzugsgebiete besser und genauer zu verstehen.

Gemäß dieser Arbeit folgten nach der kleinen Eiszeit zu Beginn des 18. Jahrhunderts etwa 100 Jahre lang ein langsamer und relativ homogener Gletscherrückzug in der gesamten Region der Zentralanden. Gegen Ende des

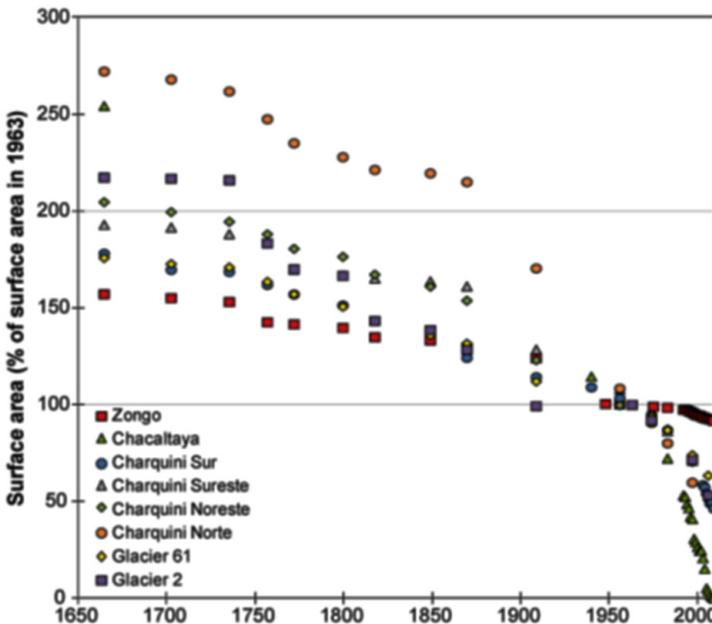


Abb. 4.11-1: Veränderung der Fläche von 8 Gletschern in der Cordillera Real seit der LIA (Kleine Eiszeit) (aus: RABATEL et al. 2013).

19. Jahrhunderts war ein erster beschleunigter Gletscherrückgang festzustellen. Während des 20. Jahrhunderts kann bis etwa 1975 erneut ein leichter Rückgang mit Phasen der Stagnation festgestellt werden. 1976 beginnt in der gesamten Region ein beschleunigter Gletscherrückgang, der sich Ende der 1990er Jahre noch einmal beschleunigt (SORUCO et al. 2009). Die Jahre mit einem starken El Niño sind dabei diejenigen mit dem größten Massenverlust.

Dieses kohärente Verhalten der Gletscher in den gesamten Zentralanden ist für die Gletscherforscher um Rabatel ein deutliches Indiz, dass eine gemeinsame großmaßstäbliche Ursache vorliegt, welche die Klimavariabilität auf regionaler Ebene beeinflusst (CANPRAA-IRD 2013); gemeint ist die Globale Erwärmung.

Der Chacaltaya-Gletscher (Abb. 4.11-2)

Der Chacaltaya-Gletscher rühmte sich einst »die höchstgelegene Skipiste mit Lift« auf der Welt zu sein. Doch diese Zeiten sind lange vorbei. Seit Beginn der 2000er Jahre war der Skilift nicht mehr in Betrieb, weil der einstige Gletscher zu einem Stückchen Resteis zusammengesmolzen war, auf dem regelmäßiges Skifahren nicht mehr möglich war. Während des El Niño von 2009/10 ging auch der letzte Rest der einstigen Skipiste verloren.

So ist der Chacaltaya-Gletscher ohne Zweifel der bekannteste Gletscher Boliviens. Mit seinem kompletten Abschmelzen 2009/10 ist ein Wahrzeichen verloren gegangen. Neuerdings besuchen Schulklassen aus dem nahegelegenen El Alto den Chacaltaya, um von ihren Lehrern die Auswirkungen des Klimawandels gezeigt zu bekommen. Der Chacaltaya-Gletscher ist jedoch keineswegs der einzige Gletscher, den dieses Schicksal ereilt hat, sondern lediglich der Bekannteste. Eine große Zahl kleinerer Gletscher zwischen 5.000 und 5.500 m Höhe ist in den letzten drei Jahrzehnten verschwunden, weitgehend unbemerkt von den Augen der Öffentlichkeit.



Der Zongo-Gletscher

Eine aktuelle Studie von RÉVEILLET und Kollegen (2015) hat das zukünftige Verhalten des Zongo-Gletschers am Huayna Potosí modelliert, unter Zugrundelegung von drei unterschiedlichen Emissionsszenarien des IPCC (IPCC 2013). Beim mittleren Szenario der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre (RCP 6.0) würde der Zongo-Gletscher bis zum Ende des 21. Jahrhunderts etwa 70% seines Volumens einbüßen. Bei starken und unmittelbaren Emissionsreduktionen (Szenario 2.6) würde der Volumenverlust auf rund 40% begrenzt werden können. Bei Fortsetzung des derzeitigen Trends der Zunahme der Treibhausgaskonzentrationen (Szenario 8.5) würde der Zongo jedoch bis zum Jahr 2100 etwa 90% seines Volumens verlieren und wenig später komplett verschwunden sein.

Die Autoren verweisen jedoch darauf, dass diese Modellierungen keine Veränderungen des Niederschlagsverhaltens berücksichtigen, weil es hier keine gesicherten Annahmen gibt. Sollte sich die Niederschlagsmenge stark reduzieren oder sollten häufiger starke El Niño-Ereignisse auftreten (CAI et al. 2014), wie das die Klimamodelle erwarten lassen, kann der Gletscherrückgang während der nächsten Jahrzehnte möglicherweise sehr stark beschleunigt stattfinden.

Die Auswirkungen der Gletscherschmelze für Bolivien

Die bolivianischen Gletscher erfüllen verschiedene Funktionen, von denen die Regulierung des Wasserhaushalts, die Speicherung von Wasser und das Aufrechterhalten von Ökosystemfunktionen die wichtigsten sind.

Gletscher als Süßwasserspeicher (Abb. 4.11-3)

Die Gletscher sind Süßwasserspeicher in großer Höhe. Während der Regenzeit (Dezember bis März) erhalten sie in ihren oberen Teilen Schneefall, der mit der Zeit



4.11-2: Der Chacaltaya-Gletscher ohne Schnee und Eis (2013) (Fotos: D. Hoffmann).

verfestigt wird, und es bildet sich Eis. Bedingt durch die Schwerkraft bewegt sich diese Eismasse langsam talwärts. Die Gletscherzunge liegt in geringerer Höhe, wo die Temperaturen höher sind und das Eis allmählich abschmilzt. Wenn der Zuwachs im oberen Teil des Gletschers mit dem Verlust im unteren Gletscherbereich identisch ist, befindet sich der Gletscher im Gleichgewicht.

Die Hauptauswirkungen der Gletscherschmelze in Bolivien betreffen die hochandinen Ökosysteme und Dorfgemeinschaften, sowie die Wasserversorgung der Doppelstadt La Paz-El Alto mit ihren gut 2 Mio. Einwohnern (BRADLEY et al. 2006, HOFFMANN 2008, KASER et al. 2010 und VUILLE 2013).

In der kürzlich vorgelegten wissenschaftlichen Studie »Der Anteil des Gletscherschmelzwassers an den Wasserressourcen der Stadt La Paz, Bolivien (16°S)« (*Contribution of glacier runoff to water resources of La Paz city, Bolivia, 16°S*) haben der bolivianische Glaziologe Álvaro SORUCO (2015) und sein bolivianisch-französisches Team den Gletscherwasser-Anteil an der städtischen Wasserversorgung der Städte La Paz und El Alto für den Zeitraum 1963–2006 untersucht.

Das Ergebnis bestätigt bisherige Studien und Schätzungen: Auf das gesamte Jahr bezogen trugen die Gletscher der vier Wassereinzugsgebiete im betrachteten Zeitraum mit 15% zur Wasserversorgung von La Paz und El Alto bei. Während der Trockenzeit betrug der Wert sogar 27%, was die Bedeutung der Gletscher insbesondere für die Ökosysteme und andinen Dorfgemeinschaften (LORDEMAN et al. 2014) zeigt. Der Großteil der Wasserversorgung wird durch das Auffangen von Regenwasser in großen Staubecken während der Regenzeit gewährleistet.

Hierbei ist wichtig im Auge zu behalten, dass während der Phase der beschleunigten Gletscherschmelze

von den Gletschern mehr Wasser zur Verfügung gestellt wird, als dies im langjährigen Mittel der Fall gewesen ist (VUILLE 2013, VUILLE et al. 2008). Dies führt allerdings auch dazu, dass nach dem »peak water« genannten Scheitelpunkt des Schmelzwasserabflusses in den nächsten Jahrzehnten das Volumen des Gletscherwassers rapide absinken wird. Den Modellierungen von Soruco und Kollegen zufolge wird ein kompletter Gletscherverlust in den Wassereinzugsgebieten zu einem Absinken von 12% der Gesamtwassermenge führen – unter der Annahme eines unveränderten Niederschlagsverhaltens.

Mit diesen Zahlen lassen sich ziemlich genaue Abschätzungen bezüglich der Rolle der Gletscher für die Planung der zukünftigen Trinkwasserversorgung der Metropole La Paz-El Alto machen. Wie die Autoren um Soruco jedoch betonen, stellt das zukünftige Niederschlagsverhalten eine zentrale Variable dar, und hier ist das Wissen noch sehr spärlich (BUYTAERT et al. 2010). Dies liegt einerseits an der für Modellierungen schwierigen Topographie der Hochgebirgsregion um La Paz in unmittelbarer geografischer Nähe zum Amazonastiefland. Andererseits fehlt ein Netz von Messstationen, welches die Basisdaten für die Entwicklung und Kalibrierung von lokalen Klimamodellen liefern könnte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass für die Wasserversorgung von La Paz und El Alto die Gletscher eine reale Bedeutung haben, aber die zukünftige Entwicklung der Wasserressourcen sehr viel stärker von der Entwicklung des Niederschlagsverhaltens abhängt. Vielmehr jedoch noch als von diesen naturwissenschaftlichen Parametern hängt die Wasserversorgung der mehr als 2 Mio. Einwohner der Metropolregion vom zukünftigen Bevölkerungswachstum sowie dem Trinkwassermanagement der zuständigen Institutionen ab (s. KASANG & LINSENMEIER Kap. 7.5 in diesem Band).



Abb. 4.11-3: Der Zongo-Stausee am Fusse des Huayna Potosí dient der Stromerzeugung. (Foto D. Hoffmann).

Kulturelle und ökonomische Bedeutung der Gletscherschmelze

Weitere Auswirkungen der Gletscherschmelze betreffen ihre Bedeutung für die Ökosysteme des andinen Hochlands, die regionale Landwirtschaft, den Tourismus und die kulturelle Identität der Bewohner der Bergregionen. Während vieler Jahrtausende wurden die andinen Gletscherberge von der Bevölkerung als heilige Wesen betrachtet, welche Wasser und Leben für die Menschen zu ihren Füßen spenden. Dieser Glaube hat sich in vielen andinen Dorfgemeinschaften bis heute erhalten.

So werden die Gletscher als »weiße Ponchos« bezeichnet, was auf die Eigenschaft der Berge als Schutzgötter verweist, die über das Schicksal der Menschen wachen. So gehen mit den Gletschern nicht nur wichtige Wasserspeicher verloren, sondern auch ein Teil der Spiritualität und Identität der Bergbewohner.

Viele hochandine Feuchtgebiete (»bofedales«) sind während der Trockenzeit zum Überleben auf die Zufuhr von Gletscherschmelzwasser angewiesen. Diese Feuchtwiesen wiederum sind nicht nur für die Biodiversität von großer Bedeutung, sondern auch als ganzjährig nutzbare Weideflächen.

Und schon immer haben Gletscher die Menschen außerhalb der Gebirgsregionen fasziniert. Die scheinbar ewigen Eismassen wurden aber nicht unbedingt immer als »schön« und »sehenswert« gesehen und verstanden, so wie das unter Touristen heutzutage der Fall ist. Vergletscherte Berge sind dabei für den nationalen wie internationalen Tourismus ein wichtiger Anziehungspunkt im Hochgebirge. Dies gilt ganz besonders für das Trekking und das Höhenbergsteigen.

Ausblick: Die Gletscherschmelze als Warnsignal

Die Bedeutung der Gletscherschmelze in den bolivianischen Anden geht über den Verlust von Wasser-

speichern und landschaftlicher Schönheit der andinen Gebirgswelt hinaus. Im Laufe der Jahre bin ich zu der Überzeugung gelangt, dass die größte Bedeutung der wegschmelzenden Gletscher in ihrer Signalfunktion liegt. Der Gletscherrückzug ist ohne Frage das sichtbarste Signal der Globalen Erwärmung und des Klimawandels in Bolivien.

Es ist beeindruckend und erschreckend gleichermaßen, in welcher kurzer Zeit die Globale Erwärmung in Jahrtausenden gewachsene Eismassen schmilzt (INSTITUTO BOLIVIANO DE LA MONTAÑA 2014). Der bereits erfolgte Verlust des Großteils der kleineren und tiefer gelegenen Gletscher in den letzten drei oder vier Jahrzehnten führt deutlich vor Augen, mit welcher Geschwindigkeit sich Änderungen vollziehen, die unter natürlichen Bedingungen Jahrhunderte gebraucht hätten.

Die Gletscher zeigen uns für jedermann sichtbar die Folgen eines industriellen Entwicklungsmodells, das auf der Verbrennung von fossilen Brennstoffen und Massenkonsum beruht und die Atmosphäre in geologisch einmaligem Tempo mit Treibhausgasen anreichert. Es gibt wenig Anlass zu glauben, dass andere Ökosysteme nicht ebenso stark vom Klimawandel betroffen sind, auch wenn sich das mit dem bloßen Auge weniger deutlich erkennen lässt. Es ist jedoch an uns selbst, dieses deutliche Zeichen ernst zu nehmen und mit politischen Entscheidungen auf verschiedenen Ebenen den Ausstoß von Treibhausgasen bis Mitte des Jahrhunderts auf Null zu reduzieren.

Die Zukunftsaussichten der verbliebenen bolivianischen Gletscher ist unterdessen ziemlich klar: Auch unabhängig von möglichen Erfolgen der Bemühungen zur Emissions-Reduzierung werden die kleinen und tief gelegenen Gletscher innerhalb weniger Jahrzehnte komplett weggeschmolzen sein.

Für die geringe Anzahl größerer Gletscher mit sehr hoch gelegenen Nährgebiet besteht hingegen noch ein

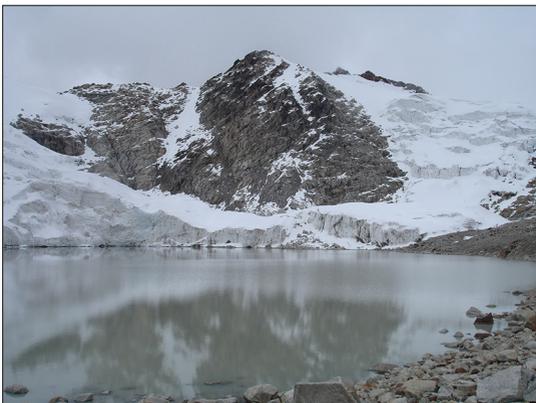


Abb. 4.11-4: Der Culín Thojó-Gletscher am Moro Khala-Gletschensee in der Cordillera Real. Aufnahme links von 2007; rechts von 2015 (Fotos D. Hoffmann).

wenig Hoffnung, dass sie bei einer drastischen Reduzierung des Ausstoßes von Treibhausgasen weltweit bis über das Ende des Jahrhunderts hinaus weiterexistieren können.

Literatur

- AP (ASSOCIATED PRESS) (2009): Disappearing Glaciers: Bolivia's Chacaltaya. Video clip. <https://www.youtube.com/watch?v=BspJfnwGynw> (besucht am 24.07.2015).
- BRADLEY, R., M. VUILLE, H. DÍAZ & W. VERGARA (2006): Threats to water supplies in the tropical Andes. *Science*, 312: 1755-1756.
- BUYTAERT, W., M. VUILLE, A. DEWULF, R. URRUTIA., A. KARMALKAR & R. CÉLLERI (2010): Uncertainties in climate change projections and regional downscaling in the tropical Andes: implications for water resources management, Hydrology and Earth System Sciences, 14: 1247-1258.
- CAI, W., S. BORLACE, M. LENGAINNE, P. v. RENSCH, M. COLLINS, G. VECCHI, A. TIMMERMANN, A. SANTOSO, M.J. McPHADEN, L. WU, M. H. ENGLAND, G. WANG, E. GUILYARDI & F.-F. JIN (2014): Increasing frequency of extreme El Niño events due to greenhouse warming. *Nature Climate Change* 4: 111-116, doi:10.1038/nclimate2100.
- CAN - PRAA - IRD (2013): Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. Lima. 99 pp.
- FRANCOU, B., M. VUILLE, P. WAGNON, J. MENDOZA & J. E. SICART (2003): Tropical climate change recorded by a glacier in the Central Andes during the last decades of the twentieth century: Chacaltaya, Bolivia, 16°S, *J. Geophys. Res.*, 108, D054154, doi: 101029/2002JD002959.
- FRANCOU, B. (2011): Montaña y Glaciares, Montaña – América Natural. Ed. Antonio Vizcaino & Ximena de la Macorra, México, 32-37.
- GARREAU, R. D. (2009): The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22: 3-11.
- HOFFMANN, D. (2008): Consecuencias del retroceso glaciar en la Cordillera boliviana. *Pirineos*, 16: 77-84.
- HOFFMANN, D. & C. REQUENA (2012): Bolivia en un mundo 4 grados más caliente. Escenarios sociopolíticos ante el cambio climático para los años 2030 y 2060 en el altiplano norte. La Paz: Instituto Boliviano de la Montaña und Fundación PIEB, 168 pp.
- HOFFMANN, D. & T. TORRES-HEUCHEL (Hrsg.) (2013): Cambio climático en Bolivia. Lo mejor del Klimablog 2011-2013. Instituto Boliviano de la Montaña – BMI, La Paz. 130 pp.
- IPCC (2013): Climate Change 2013, The Physical Science Basis, AR 5, Working Group I.
- INSTITUTO BOLIVIANO DE LA MONTAÑA (BMI) (2014): Glaciares Bolivia. 12 Testigos del cambio climático. La Paz, 52 pp.
- JORDAN, E. (1991): Die Gletscher der bolivianischen Anden. Eine photogrammetrisch-kartographische Bestandsaufnahme der Gletscher Boliviens als Grundlage für klimatische Deutungen und Potential für die wirtschaftliche Nutzung. Stuttgart, Steiner.
- KASER, G. 2001. Glacier-climate interactions at low latitudes, *J. Glaciol.*, 47: 195-204.
- KASER, G., M. GROSSHAUSER & B. MARZEION (2010): Contribution potential of glaciers to water availability in different climate regimes, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 107: 20223-20227, doi:10.1073/pnas.1008162107.
- LORDEMANN, J. A., D. HOFFMANN & A. H. JIMÉNEZ (2014): Glacial recession and hydrological resources in the Bolivian Cordillera Real: Analysis of perceptions and behavior of peasant households as a basis for adaptation to climate change. Working paper. CATIE, Efd, LACEEP, Universidad de los Andes & CEDE.
- MARENGO, J. A., J. D. PABÓN, A. DÍAZ, G. ROSAS, G. ROSAS, G. ÁVALOS, E. MONTEALEGRE, M. VILLACIS, S. SOLMAN & M. ROJAS (2011): Climate Change: Evidence and Future Scenarios for the Andean Region. In: Herzog, S. K., Martínez, R., Joergensen, P. M. & Tiessen, H. (Hrsg.) *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 110-127.
- MARTÍNEZ, R., D. RUIZ, M. ANDRADE, L. BLACUTT, L. PABÓN, et al. (2011): Synthesis of the Climate of the Tropical Andes. In: Herzog, S. K., Martínez, R., Joergensen, P. M. & Tiessen, H. (Hrsg.) *Climate Change and Biodiversity in the Tropical Andes*. Inter-American Institute for Global Change Research (IAI) Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE), 97-109.
- MMaYa (Ministerio de Medio Ambiente y Agua) (2013): Inventario de glaciares, cuerpos de agua y bofedales de la Cordillera Real de Bolivia. Proyecto PRAA, La Paz, Bolivia. 173 pp.
- NOAA (2015): El Niño/Southern Oscillation (ENSO) Diagnostic Discussion. Climate Prediction Center, 9 July 2015. http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensodisc/discussion/ensodisc.html (besucht am 22.07.2015).
- RABATEL, A., B. FRANCOU, A. SORUCO, J. GOMEZ, B. CACERES, J. L. CEBALLOS, R. BASANTES, M. VUILLE, J.-E. SICART, C. HUGGEL, M. SCHEEL, Y. LEJEUNE, 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, doi:10.5194/tc-7-81-2013.
- RAMÍREZ, E. (2008): Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto, Bolivia. *Revista Virtual REDESMA* [online]. 2: (3) 49-62.
- RÉVEILLET, M., A. RABATEL, F. GILLET-CHAULET & A. SORUCO (2015): Simulations of changes to Glaciar Zongo, Bolivia (16°S), over the 21st century using a 3-D full-Stokes model and CMIP5 climate projections. *Annals of Glaciology*, 56: 89-97.
- SORUCO, A., C. VINCENT, B. FRANCOU & J. F. GONZALEZ (2009): Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L03502, doi:10.1029/2008GL036238.
- 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.
- URRUTIA, R. & M. VUILLE (2009): Climate change projections for the tropical Andes using a regional climate model: Temperature and precipitation simulations for the end of the 21st century. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 114.
- VUILLE, M., B. FRANCOU, P. WAGNON, I. JUEN, G. KASER, B. MARK & S. BRADLEY (2008): Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews* 89: 79-96.
- VUILLE, M., R. S. BRADLEY, M. WERNER & F. KEIMIG (2003): 20th Century Climate Change in the Tropical Andes: Observations and Model Results. *Climatic Change* 59: 75-99.
- VUILLE, M. (2013): Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes. Inter-American Development Bank, Technical Note No. IDB-TN-515. 29 pp.

Kontakt:

Dirk Hoffmann
Instituto Boliviano de la Montaña (BMI)
dirk.hoffmann@berlin.de

Hoffmann, D. (2015): Auswirkung des Klimawandels auf die tropischen Gletscher Boliviens. In: Lozán, J.L., Grassl, H., Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 175-182. Online: www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.26