

## 7.5 Rückgang der Gletscher und die Wasserversorgung in den tropischen Anden

DIETER KASANG & MANUEL LINSENMEIER

**Gletscher und Wasserversorgung in den tropischen Anden:** In den tropischen Anden ist in den letzten Jahrzehnten ein Abschmelzen der Hochgebirgsgletscher beobachtet worden, das sehr wahrscheinlich auf den globalen Klimawandel zurückzuführen ist. Vor allem für die in den äußeren Tropen gelegenen Länder Peru und Bolivien, aber auch in dem innertropischen Ecuador ist die Fähigkeit der Gletscher, über längere Zeit Wasser zu speichern und beim Schmelzen wieder abzugeben, ein wichtiger Faktor in der Wasserversorgung der Bevölkerung, der Landwirtschaft und der Energieproduktion. Betroffen sind davon auch die Millionenstädte Quito (Ecuador), Lima (Peru) und La Paz und El Alto (Bolivien), aber auch landwirtschaftlich geprägte Regionen. In einigen Gebieten wie im Rio Santa Tal in Peru ist eine Abnahme des Gletscherwassers bereits spürbar; in den meisten anderen wird damit erst in den nächsten Jahrzehnten gerechnet, da die verstärkte Gletscherschmelze den Abfluss zunächst erhöht und erst nach einer deutlichen Verringerung des Gletschervolumens verringern wird. Die Wasserwirtschaft der betroffenen Staaten hat auf den drohenden Wassermangel, der gegenwärtig vor allem durch das Bevölkerungswachstum und die Wirtschaftsentwicklung bedingt ist, mit verschiedenen Maßnahmen bis hin zur Wasserumleitung von der feuchteren Ostseite der Anden reagiert. Ob diese und andere technischen Lösungen auch in den kommenden Jahrzehnten für eine hinreichende Wasserversorgung genügen werden, wenn sich das Wasserproblem zusätzlich durch die Gletscherschmelze verschärft, muss die Zukunft zeigen.

**Glaciers and water supplies in the tropical Andes:** Over the last decades many of the mountainous glaciers in the tropical Andes have been retreating, a process that can with high likelihood be attributed to global climate change. In particular, countries located in the outer tropics, such as Peru and Bolivia, but also countries in the inner tropics, such as Ecuador, have been affected, above all by the reduction of the glaciers' capacity to store water in form of ice and release it in drier periods of the year. In the past this seasonal water storage capacity has been a crucial factor for the provision of a reliable supply of drinking water, as well as for agriculture and the generation of electricity. As a result of the glaciers' retreat some of the largest cities such as Quito (Ecuador), Lima (Peru), La Paz and El Alto (both Bolivia), as well as rural regions with major agricultural activity have been confronting major difficulties regarding their water supply. While in some regions the flow of melting water has already decreased, such as in the valley of the Rio Santa in Peru, in most regions the retreat of the glaciers initially enhances the flow of melting water and only in the long run makes it increasingly scarce. The threat to local hydrological resources, which has been exacerbated by population growth and economic developments, has been addressed with a number of measures including the engineered re-direction of water flowing from the wetter eastern side of the Andes. It remains to be seen to what extent these and similar measures suffice to ensure a reliable and sufficient supply of water, as scenarios of climate change project that most glaciers will continue to retreat and that presently existing challenges regarding the supply of water will hence be further exacerbated.

Die Anden besitzen mit großem Abstand die weltweit größte Dichte an tropischen Gletschern. Neben deren ästhetischem und damit auch touristischem Wert sind die Gletscher insbesondere für die andinen Ökosysteme und die Wasserversorgung bestimmter Regionen von Bedeutung. Mehr als 80% des Trinkwassers in den semi-ariden tropischen und subtropischen Regionen der Anden stammen aus Gebirgen, ein Teil davon aus dem Schmelzwasser der Gletscher. Die besondere Bedeutung der Gletscher hängt dabei mit den ausgeprägten jahreszeitlichen Schwankungen des Niederschlags zusammen, die von den tropischen Gletschern teilweise ausgeglichen werden können. Dabei wird der Niederschlag in der Regenzeit in Form von Schnee auf den Gletschern abgelagert, zu Eis geformt und schließlich in der Trockenzeit durch Gletscherschmelze wieder abgegeben. Diese Wasserspeicherung in Gletschern ist in den tropischen Regionen der Anden von besonderer Bedeutung, da hier im Vergleich

zu Gebirgen der mittleren Breiten vielerorts die intensive Sonneneinstrahlung eine Wasserspeicherung durch Schneeablagerung verhindert (VUILLE 2013). Das im Zusammenhang mit dem Klimawandel beobachtete Abschmelzen der Gletscher in den Anden hat daher langfristig eine Verstärkung der jahreszeitlichen Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit zur Folge.

### Überblick

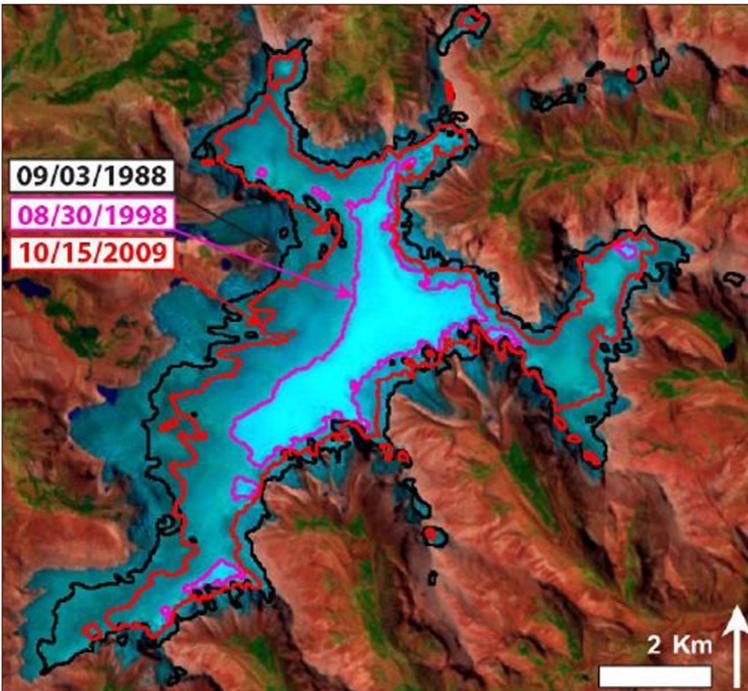
Der in den letzten Jahrzehnten beobachtete Rückzug der Gletscher in den Anden überlagert Trends über größere Zeitspannen von Jahrhunderten. In den letzten 1.000 Jahren zeigten die Gletscher der tropischen Anden ihre größte Ausdehnung während der »Kleinen Eiszeit«. Zum Teil kann die damalige vergleichsweise größere Gletscherbedeckung mit den niedrigeren Temperaturen erklärt werden. Von mindestens ebenso großer Bedeutung waren jedoch die stärkeren Niederschläge, die damals etwa 20–30% über den heutigen Werten

lagen (RABATEL et al. 2013). In den letzten Jahrzehnten wurde in den tropischen Anden ein allgemeiner Temperaturanstieg beobachtet, der nach VUILLE (2013) im Zeitraum 1939–2006 im Mittel etwa  $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$  betragen hat. Die Niederschläge änderten sich im gleichen Zeitraum dagegen kaum, wobei die geringe Verfügbarkeit und Verlässlichkeit von Messdaten genauere Aussagen verhindert. Die Gletscherflächen der verschiedenen Gebirgsketten in den peruanischen Anden (Cordillera Blanca, Cordillera Vilcanota u.a.) haben nach RABATEL et al. (2013) über die letzten Jahrzehnte um etwa 20% bis über 30% abgenommen, wobei die Verluste besonders seit Ende der 1990er Jahre stark angestiegen sind. Neben dem langjährigen Trend gab es in manchen Regionen auch stärkere jährliche Schwankungen, die vor allem durch das ENSO-Phänomen bedingt sind. In El-Niño-Jahren hat sich der Gletscherrückzug beschleunigt, in La-Niña-Jahren etwas verlangsamt. Auch die Massenbilanz der tropischen Gletscher hat deutlich abgenommen. Dabei zeigt sich ein merklicher Unterschied zwischen den höher gelegenen (über 5.400 m) und den niedriger gelegenen Gletschern (unter 5.400 m) mit fehlendem dauerhaftem Akkumulationsgebiet, die etwa doppelt so schnell an Masse verloren haben. Insgesamt legen die Daten nahe, dass die Gletscher der tropischen Anden schneller an Masse verlieren als die meisten Gletscher in anderen Regionen der Welt. Zudem zeigen die tropischen Gletscher bereits seit den 1970er Jahren einen sich beschleunigenden Gletscher-

schwund und damit bereits deutlich länger als die Gletscher der mittleren und höheren Breiten, die erst seit den 1990er Jahren verstärkt abschmelzen (RABATEL et al. 2013) (Abb. 7.5-1)

Die den Wasserabfluss regulierende Funktion der Gletscher ist insbesondere in den äußeren Tropen Perus und Boliviens von großer Bedeutung, da hier die jahreszeitlichen Unterschiede im Niederschlag durch den Wechsel von relativ stark ausgeprägten trockenen und feuchten Jahreszeiten besonders groß sind. Aber auch das innertropische Ecuador ist teilweise vom Gletscherwasser abhängig (s.u.). Wie stark sich das Zurückziehen der Gletscher lokal auf die Wasserversorgung auswirkt, hängt daher von verschiedenen Faktoren ab: der Größe und damit der Bedeutung eines Gletschers als saisonaler Wasserspeicher, dem Abstand des Standorts vom Ort der Gletscherschmelze sowie der jahreszeitlichen Verteilung und der Jahressumme an Niederschlägen. In den innertropischen Regionen Ecuadors und Kolumbiens kommt noch das Vorhandensein von hochgelegenen Feuchtgebieten (páramos) hinzu, die ähnlich wie Gletscher Wasser speichern und damit jahreszeitliche Unterschiede ausgleichen können (VUILLE 2013).

Bei den hydrologischen Folgen des Gletscherrückzugs können zwei Phasen unterschieden werden. Während sich kurzfristig durch die schmelzenden Gletscher die Menge an abfließendem Wasser erhöht, führt das Abschmelzen der Gletscher langfristig zu einem insgesamt verringerten Abfluss sowie stärkeren jahreszeit-



**Abb. 7.5-1:** Veränderungen der Schneelinie auf der Quelccaya-Eiskappe (Cordillera Vilcanota, Peru) mit deutlicher Auswirkung des El Niño 1997/98 (HANSHAW & BOOKHAGEN, Supplementary Material 2014).

lichen Schwankungen durch die geringere natürliche Wasserspeicherkapazität. Bereits die kurzfristige Zunahme des Schmelzwassers kann dabei lokal zu großen Problemen wie einer Zunahme des Risikos von Überschwemmungen, Erdbeben, Gletscherseeausbrüchen und Schäden in Ökosystemen führen (CHEVALLIER et al. 2011, RABATEL et al. 2013). Langfristig bedeutet das Zurückziehen der Gletscher vielfältige Herausforderungen unter anderem für Ökosysteme, die landwirtschaftliche Bewässerung, eine zuverlässige Trinkwasserversorgung und die Stromversorgung durch Wasserkraftwerke (VUILLE 2013). Besonders betroffen vom Verschwinden der Gletscher sind die 4 Millionenstädte Quito (Ecuador), Lima (Peru) und La Paz und El Alto (Bolivien), in deren Regionen Gletscher einen wichtigen Beitrag zur Wasser- und Energieversorgung leisten (CHEVALLIER et al. 2011).

Wie stark sich das Zurückziehen der Gletscher in den Anden für die lokale Bevölkerung auswirkt, hängt daher nicht nur von natürlichen Gegebenheiten, zum Beispiel der Lage und Größe der Gletscher und der jahreszeitlichen Verteilung des Niederschlags, sondern auch von sozio-ökonomischen Faktoren, zum Beispiel der Abhängigkeit der Trinkwasserversorgung vom Gletscherwasser und der Bedeutung der Landwirtschaft ab. Anhand von ausgewählten Beispielen aus Ecuador, Peru und Bolivien werden in den folgenden Abschnitten die Bedeutung der Gletscher und die beobachteten und möglichen zukünftigen Folgen des Gletscherschwunds für die lokale Bevölkerung in den Anden dargestellt.

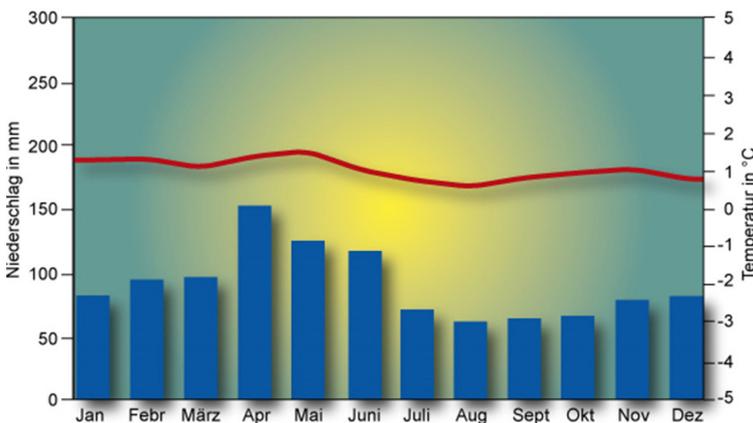
### Ecuador: Quito und die Bedeutung der Vulkangletscher

Wie der Name des Landes es bereits verrät, liegt Ecuador in den inneren Tropen und damit in relativ niederschlagsreichen geographischen Breiten. Die Wasserversorgung von Ecuadors Hauptstadt Quito hängt dennoch

auch vom Wasserabfluss der umliegenden Gletscher ab. Dies liegt an der besonderen Lage der Stadt, die sich auf einer Höhe von fast 3.000 m in einem sich von Nord nach Süd erstreckenden Längstal der Anden befindet. Im Regenschatten der angrenzenden Andenketten gelegen fallen in der Umgebung Quitos im Jahresmittel weniger als 500 mm Niederschlag, während es am Osthang der Anden zum Amazonasbecken hin bis zu 3.000 mm sind (BUYTAERT et al. 2010) (Abb. 7.5-2).

Das Gletscherwasser aus den umliegenden Andenketten erreicht Quito durch einige Flüsse wie zum Beispiel den Humboldt und den Crespo, die nach UNEP (2011) zu etwa 20% vom Gletscher Antisana 15 am Nordwesthang des Antisana-Vulkans gespeist werden. Zudem wird ein Teil der Wasserversorgung Quitos auch durch Wasserabflüsse vom Osthang der Anden gewährleistet (nach BUYTAERT & DE BIÈVRE 2012 sogar 62%), die eigentlich in Richtung Amazonas-Becken fließen würden, jedoch in Richtung der Hauptstadt umgeleitet wurden. Neben dem Antisana-Vulkan sind daher auch die Gletscher des Cotopaxi-Vulkans Wasserspender der Hauptstadt, bei deren künstlicher Schmelzwasserumleitung sogar Höhen von bis zu 800 m und Entfernungen von 125 km überwunden werden (UNEP 2011) (Abb. 7.5-3).

Um das Jahr 2010 herum wurde die Wasserversorgung Quitos von CANNON et al. (2010) als noch ausreichend eingeschätzt. Für die kommenden 5–10 Jahre werden jedoch Probleme für die Trinkwasserversorgung erwartet. Eine Ursache dafür ist das starke Wachstum der Bevölkerung, die in den letzten 60 Jahren von 0,32 auf 2,3 Mio. im Jahr 2011 angestiegen ist, womit auch der Wasserbedarf stark zugenommen hat. Eine weitere Ursache ist das rapide Abschmelzen der Gletscher der umliegenden Vulkane. So haben die Vulkangletscher Ecuadors in den letzten 20 Jahren ein Drittel ihrer Masse verloren, und ihre unteren Ränder sind mit einer Rate von 25 m pro Jahr angestiegen. Als



**Abb. 7.5-2:** Mittlere monatliche Niederschläge (Säulen) und Temperaturen (Linie) 2005–2010 am Rande des Antisana-15-Gletschers in 4.850 m Höhe (eigene Darstellung nach CAUVY-FRAUNIE, S., T. CONDOM, A. RABATEL, M. VILLACIS, D. JACOBSEN & O. DANGLES (2013): Technical Note: Glacial influence in tropical mountain hydro-systems evidenced by the diurnal cycle in water levels, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, 4803–4816 (2013).

Grund dafür wird die starke Temperaturzunahme von 1,5 °C in den letzten 25 Jahren gesehen (CANNON et al. 2010). Die Auswirkungen des langfristigen Temperaturanstiegs durch den menschengemachten Klimawandel werden modifiziert und teilweise noch verstärkt durch das ENSO-Phänomen im östlichen Pazifik. Auf El-Niño-Phasen folgt im Abstand von 1–3 Monaten ein stärkeres Gletscherabschmelzen, weil die Temperaturen höher und die Niederschläge geringer sind. Im Gegensatz dazu sind La-Niña-Phasen mit einer Zunahme der Eismasse verbunden (VEETIL 2012). Für die Zukunft ist mit einem weiteren Temperaturanstieg und damit weiterer Gletscherschmelze zu rechnen. Wie sich das ENSO-Phänomen und damit die Wechsel von El-Niño und La-Niña Phasen angesichts der globalen Erwärmung in Zukunft entwickeln werden, gilt hingegen als unsicher (IPCC 2013). Insgesamt muss durch das Zurückziehen der umliegenden Gletscher und das Bevölkerungswachstum jedoch von einer Verschlechterung der Wassersituation in Quito ausgegangen werden.

### Peru: Lima und die Cordillera Central

Nach Kairo ist Lima die zweitgrößte in einer Wüste gelegene Stadt der Welt. Mit bereits heute fast 10 Mio. Einwohnern gewinnt Lima zudem jährlich über 100.000 Einwohner durch inländische Migration hinzu. Damit verbunden ist eine stetige Zunahme des Wasserbedarfs. Da die Niederschläge in Lima bei lediglich 13 mm im Jahr liegen, ist die Stadt auf Wasser aus Fremdlingsflüssen angewiesen. Ein Großteil davon wird durch die drei Flüsse Chillón, Lurín und Rimac herantransportiert, die auf über 4.000 m Höhe in den Anden entspringen und quer zur Hauptrichtung der Andenkordillere in Richtung Pazifik fließen. Die Flüsse Chillón und Lurín führen das Abflusswasser von großen Teilen der Westkordillere. Der Rimac, für die Trinkwasserversorgung und für die Stromerzeugung Limas mit großem Abstand der wichtigste Fluss, entspringt hingegen über seine beiden Zuflüsse Rio Blanco und Santa Eulalia der Cordillera Central (Abb. 7.5-4).

Auf seinem etwa 200 km langen Weg fließt der Rí-



**Abb. 7.5-3:** Blick von Quito auf den Cotopaxi (WikimediaCommons: [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cotopaxi\\_desde\\_Parque\\_Metropolitano\\_Guang%C3%BCltagua.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cotopaxi_desde_Parque_Metropolitano_Guang%C3%BCltagua.jpg). Autor: Ika Sami, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0).



**Abb. 7.5-4:** Rio Rimac östlich von Lima bei Niedrigwasser (WikimediaCommons: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rio-Rimac3.jpg?uselang=de>. Autor: Hakan Svensson, Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported).

mac von über 5.000 m Höhe in der Cordillera Central bis in den Pazifik. In einer Höhe von 3.500–5.200 m sammelt der Fluss durch Niederschlag und Gletscherschmelze sein Wasser. Einen Teil des Wassers verdankt er dabei einem stark vergletscherten Gebiet um den 5.646 m hohen Shullcon, das 27 Tal- und Plateaugletscher umfasst (DRENKHAN 2010). In einer Höhe von 1.000-3.500 m wird das Wasser des Rimac von Siedlungen entlang des Flusses seit vorkolonialer Zeit für die traditionelle landwirtschaftliche Bewässerung und als Trinkwasser genutzt. In jüngerer Zeit ist der Betrieb von fünf modernen Wasserkraftwerken hinzugekommen. Unterhalb von 1.000 m, im trockenen Küstenstreifen Perus, wird das Wasser des Rimac dann in der modernen großflächigen Landwirtschaft und für den Wasserverbrauch Limas verwendet (BMZ 2010).

Zwischen 1985 und 2008 zeigten die einzelnen Gletscherzungen in der Cordillera Central nach DRENKHAN (2010) einen starken Rückgang von 90 bis 570 m. Der Schwund war vor allem in der Zeit 1985–1998 festzustellen, während ab 2000 kaum noch Veränderungen zu beobachten waren. Einzelne Gletscher zeigten Besonderheiten, so die Gletscherzunge des Monon Uno, die durchgehend negative Werte aufwies, was zur Entstehung eines schnell wachsenden Sees talabwärts geführt hat. Die Gletscherzunge des Vicuña ist im Gefolge von starken El-Niño-Ereignissen in vier Teile zerbrochen. Seit der Jahrhundertwende nahm die Gletscherfläche wieder zu. Wie sich das Gletschergebiet in Zukunft ent-

wickeln wird, ist nur schwer abschätzbar. Es besteht aber die Gefahr, dass sich das Gebiet »in weniger als 100 Jahren vollständig aufgelöst hat« (DRENKHAN 2010, S. 98).

Wie sich das Zurückziehen der Gletscher in der Cordillera Central auf die Wasserversorgung Limas langfristig auswirken wird, ist laut DRENKHAN (2010) schwierig einzuschätzen. Durch das Abschmelzen der Gletscher entstehen Gletscherseen und können andine Sumpfbereiche, die sogenannten páramos, gespeist werden, die die Wasserspeicherfunktion der Gletscher teilweise übernehmen könnten. Eine ähnliche Funktion besitzen bereits vorhandene künstliche Stauseen wie der Yuracmayo, der durch das Aufstauen des Rio Blanco entstanden ist. Außerdem wird in groß angelegten Projekten (Marca I-IV) durch Tunnel (z.B. durch den 10 km langen Tunnel Transandino) und Aquädukte die feuchtere Ostseite der Andenkette erschlossen und damit das Einzugsgebiet des Rimac und seiner Zuflüsse erweitert (Abb. 7.5-5).

Ob die Umleitungsprojekte allerdings ausreichen, um Lima auch in Zukunft mit genügend Trinkwasser zu versorgen, ist zumindest fraglich. So wird das umgeleitete Wasser heute primär für die Stromversorgung durch Wasserkraftwerke und den Betrieb von Bergwerken entlang des oberen Verlaufs des Rimac genutzt. Zudem ist das in Lima ankommende Wasser des Rimac durch die industrielle Nutzung und durch kommunale Abwässer am Mittel- und Oberlauf des Flusses bereits heute stark belastet, womit das Wassermanagement in



Abb. 7.5-5: Lage der Wasserprojekte Marca I-IV (eigene Darstellung nach Daniel N. Leavell: *The Consequences of Climate Change for the Water Resources of Perú*, [http://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs457\\_article.pdf](http://www.iwra.org/congress/2008/resource/authors/abs457_article.pdf)).

und um Lima häufig überfordert ist und nicht immer für gute Wasserqualität sorgen kann. Es werden daher auch weiter reichende Projekte wie etwa eine Entsalzung von Meerwasser mit Hilfe von Gas-Energie aus der Förderung im Amazonas-Tiefland zur Lösung erwogen.

Eine Einschätzung der Folgen des Gletscherrückzugs wird auch dadurch erschwert, dass die Gefahr einer Wasserknappheit kurzfristig noch nicht unmittelbar besteht. So wird in den nächsten 25–50 Jahren sogar mit einer Zunahme der Wasserabflussmengen aus der Cordillera Central gerechnet, wodurch allerdings auch das Risiko von Überschwemmungen, zum Beispiel durch den Ausbruch von Gletscherseen, zunimmt. Langfristig hingegen werden mit dem schwindenden Gletschervolumen ein geringerer Wasserabfluss sowie insbesondere eine Verstärkung der jahreszeitlichen Unterschiede in der Wasserverfügbarkeit erwartet. Spätestens in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts würde ein fortschreitender Klimawandel bei ausbleibendem Erfolg in den alternativen Wassergewinnungsprojekten dann zu einer ernststen Wasserknappheit in den Trockenzeiten in Lima führen.

### Peru: die Cordillera Blanca und das Rio-Santa-Tal

Über Jahrtausende waren die Gletscherwasser eine wichtige Grundlage für die indianischen Gemeinschaften in den Anden, so z.B. im Rio-Santa-Tal im nordwestlichen Peru. Gegenwärtig leben etwa 270.000 Menschen am oberen Rio Santa, zum Teil in ländlichen Siedlungen und zum Teil in kleineren und größeren Städten, wovon Huaraz mit 96.000 Einwohnern die größte ist. Historisch haben die Gletscher der Cordillera Blanca durch ihr Schmelzwasser für einen ausge-

glichenen Abfluss auch in Trockenzeiten und während Dürren gesorgt. In jüngerer Zeit sind die Einwohner der Region mit ihren Lebensgewohnheiten und wirtschaftlichen Aktivitäten wie Viehzucht, Ackerbau und Tourismus zunehmend vom Wasser der Gletscher abhängig geworden. So hat sich seit den späten 1990er Jahren die Landwirtschaft im oberen Rio-Santa-Tal verstärkt auf bewässerungsintensive Produktion umgestellt. Zudem ist im trockenen Küstentiefland um den Rio Santa eine neue Agro-Exportzone entstanden, die ebenfalls auf eine intensive Wassernutzung angewiesen ist. Außerdem wird das Wasser des Rio Santa für Wasserkraftwerke genutzt, die 10% der Wasserkraftkapazität Perus ausmachen (BURY et al. 2011).

Das Wasser des Rio Santa stammt bis zu 25% aus Gletscherwasser, wobei in der Trockenzeit (Juni bis August) sogar bis zu 50% des Wassers auf die Gletscherschmelze zurückgehen. Der verbleibende Anteil des Wassers entsteht durch Oberflächenabfluss aus Niederschlägen und dem Zufluss von Grundwasser (BURY et al. 2011). In jüngerer Zeit haben sowohl das Bevölkerungswachstum als auch eine Zunahme der wirtschaftlichen Aktivitäten die Wasserressourcen verstärkt beansprucht. Gleichzeitig wurde ein zunehmender Gletscherrückzug in der Cordillera Blanca beobachtet. So sind die Gletscher der Cordillera Blanca seit 1970 bereits um 20-30% geschrumpft. Besonders gefährdet sind die niedriger liegenden Gletscher unter 5.400 m. Da die Niederschläge etwa gleich geblieben sind, wird die Gletscherschmelze auf eine Temperaturzunahme um etwa 0,1 °C pro Dekade seit 1970 zurückgeführt (FRASER 2012) (Abb. 7.5-6).

Ein Beispiel für die zunehmende Gletscherschmelze ist das Yanamarey-Einzugsgebiet (BURY et al.



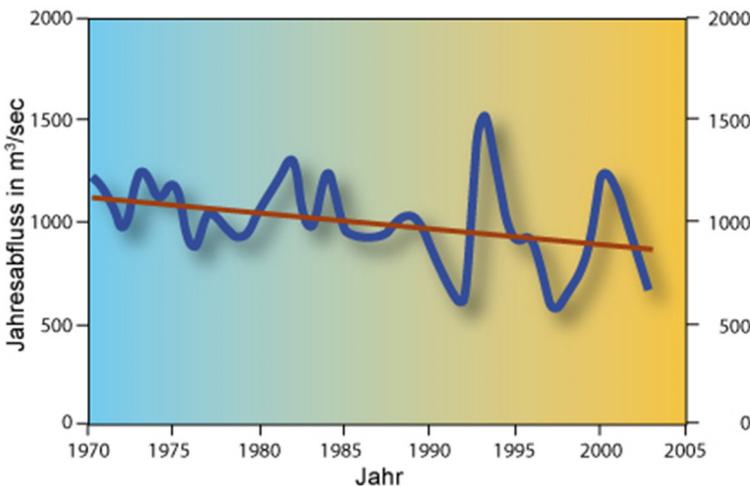
**Abb. 7.5-6:** Gletscher in der Cordillera Blanca in der Nähe der Stadt Huaraz (WikimediaCommons: [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cordillera\\_Blanca\\_Glacier.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Cordillera_Blanca_Glacier.jpg). Autor: Tkent42, public domain).

2011). Der Yanamarey ist ein Nebenfluss des Rio Santa, dessen Einzugsgebiet in der Cordillera Blanca zu einem großen Teil vom Yanamarey Gletscher gespeist wird. Die Gletscherzunge des Yanamarey Gletschers hat sich nach BURY et al. (2011) seit den frühesten Messungen von 1948 um etwa 800 m zurückgezogen. Nach 1970 betrug die Rückzugsrate im Mittel etwa 8 m pro Jahrzehnt. In den letzten sechs Jahren ist die Gletscherfront sogar um etwa 30 m pro Jahr zurückgewichen. Als Folge des zunehmenden Rückzugs ist der Gletscher immer weniger in der Lage, die Abflussmenge des Flusses in der Trockenzeit auszugleichen, weshalb sich die saisonal stark schwankenden Niederschläge stärker als früher bemerkbar machen. Unter fortschreitendem Klimawandel wird mit einem starken Verlust der Gletschermasse in der Cordillera Blanca in den nächsten 50 Jahren gerechnet.

Nach Umfragen ist sich die Bevölkerung im Yanamarey-Einzugsgebiet der Gletscherschmelze durchaus bewusst. So wurde im oberen Yanamarey-Tal deutlich weniger Schnee und Eis sowie das Abbrechen von Gletschereis in großen Stücken beobachtet. Laut der wissenschaftlichen Studie von BURY et al. (2011) zeigt sich die Bevölkerung über den beschleunigten Rückzug der Gletscher, den sie auf den Klimawandel zurückführt, beunruhigt. So berichten viele Teilnehmer der Studie über Folgen für die Gesundheit der Tiere, die landwirtschaftliche Produktion und die Verfügbarkeit von Trinkwasser. Vor allem der Rückgang der in der Trockenzeit vorhandenen Wasserressourcen über die letzten 10 Jahre wurde von fast allen Teilnehmern an der Studie bestätigt. Durch die Abnahme des Gletscherwassers fällt es der lokalen Bevölkerung, die auf die Bewässerung von kleinen Parzellen angewiesen ist, demnach immer schwerer, das bisherige landwirtschaftliche Produktionsniveau zu halten.

### Bolivien: La Paz und die Cordillera Real

Die auf den Hochebenen der Anden gelegenen Siedlungen und Städte Boliviens sind auf Grund der geringen und sehr unregelmäßigen Niederschläge in besonderem Maße von Wasserspeichern wie Seen und Gletscher angewiesen. Vor allem auf dem Land ist der Zugang der Bevölkerung zu sicheren Wasserquellen sehr begrenzt. Aber auch der in 3.500–4.000 m Höhe liegende Regierungssitz des Landes La Paz und das benachbarte El Alto in ca. 4.000 m Höhe, in denen zusammen über 2 Mio. Einwohner leben, sind bereits heute von großer Wasserknappheit betroffen (RANGECROFT et al. 2013). Ursprünglich eine Art Ausweichsiedlung für die in einem engen Tal liegende und dynamisch wachsende Stadt La Paz hat El Alto die ursprüngliche Stadt sowohl in Anzahl der Einwohner wie in der Wachstumsrate der Bevölkerung mittlerweile überholt. Dabei ist El Alto jedoch nicht nur die am schnellsten wachsende, sondern auch eine der ärmsten Städte Boliviens. Hauptursache für das Wachstum und die Armut El Altos ist die große Zuwanderung aus den ländlichen Gebieten des Altiplanos, die oftmals durch Ernteausfälle aufgrund von extremen Wetterereignissen wie Dürren, zum Beispiel in Folge von El-Niño-Ereignissen, ausgelöst werden. Auf Grund des schnellen und unkontrollierten Wachstums ist zudem die Wasserversorgung in El Alto nur wenig entwickelt. Nur ein relativ geringer Teil der Bevölkerung El Altos besitzt Zugang zu fließendem Wasser. Dabei liegt der Wasserverbrauch in El Alto mit etwa 50 Litern pro Person und Tag im Vergleich zu den wohlhabenden Gebieten von La Paz mit über 200 Litern vergleichsweise niedrig (BUXTON et al. 2013). In jüngster Zeit hat sich die Situation allerdings durch staatliche Maßnahmen und dank internationaler Zusammenarbeit etwas verbessert.



**Abb. 7.5-7:** Jahresabflussmenge am Querococha-See am Westhang der Cordillera Blanca (eigene Darstellung nach UNITED STATES AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT (USAID) (2011): *Adaptation to climate change: case study – glacial retreat and adaptation options in Peru's Rio Santa basin (draft final).*

Da La Paz und El Alto im trockenen Altiplano liegen, sind die Wasservorräte in der Umgebung sehr gering. So werden nur 20% des Wasserbedarfs aus örtlichen Brunnen gewonnen, und die verbleibenden 80% müssen aus dem im Nordosten gelegenen Gebirgsmassiv der Cordillera Real herbeigeschafft werden (SHI et al. 2013). Zum Teil stammt das Wasser in La Paz und El Alto daher auch aus Gletscherschmelzwasser. Der Anteil des Gletscherwassers am Trinkwasser für La Paz wird auf 15% im Jahresmittel und 27% in der trockenen Jahreszeit geschätzt (SORUCO 2014). Da Niederschläge in La Paz und El Alto fast ausschließlich im Südsommer von Dezember bis April vorkommen, ist das Gletscherwasser insbesondere in den trockenen Wintermonaten von Mai bis Oktober für die Wasserversorgung durchaus von Bedeutung. Das Gletscherwasser stammt dabei aus mehreren Gebirgszügen der Cordillera Real, unter anderem dem Cerro Charquini, Condoriri und Tuni. Ebenfalls von Bedeutung ist das Gletscherwasser für die

Energieversorgung, die in La Paz und El Alto teilweise auf Wasserkraftwerken beruht, die auch das Schmelzwasser der Gletschergebiete des Huayna Potosí, des Cerro Charquiri und des Zongo nutzen (Abb. 7.5-9).

In den letzten Jahrzehnten wurde ein starker Gletscherschwund beobachtet. So haben nach SORUCO et al. (2009) die Gletscher in der Cordillera Real von 1963 bis 2006 etwa 40% ihrer Masse verloren und im Zeitraum 1975–2006 etwa 50% ihrer Fläche. Besonders einige der kleineren Gletscher sind so bereits komplett verschwunden, wie zum Beispiel der Chacaltaya Gletscher im Jahre 2009, einst das höchste Skigebiet der Welt (s. HOFFMANN Kap. 4.11 in diesem Band). Nach RABATEL et al. (2013) betrug 2006 die Gesamtfläche nur noch 390 km<sup>2</sup> von ursprünglich 560 km<sup>2</sup> in den 1970er und 1980er Jahren. Als Hauptgrund für das Abschmelzen der Gletscher seit den 1970er Jahren wird der gleichzeitige Temperaturanstieg angenommen. Unter fortschreitendem Klimawandel wird erwartet, dass viele weitere



**Abb. 7.5-8:** Szene auf dem trockenen Altiplano in Bolivien (Foto: Manuel Linsenmeier).



**Abb. 7.5-9:** Abschmelzendes Gletschereis am Huayna Potosí (Foto: Manuel Linsenmeier).

Gletscher bis Mitte des Jahrhunderts verschwunden sein werden. Modellberechnungen des Zongo zeigen, dass dieser bis 2100 nach dem Klimaszenario RCP2.6 etwa 40% seiner Masse verloren haben und nach dem Szenario 8.5 nahezu ganz verschwunden sein könnte (RÉVEILLET et al. 2015).

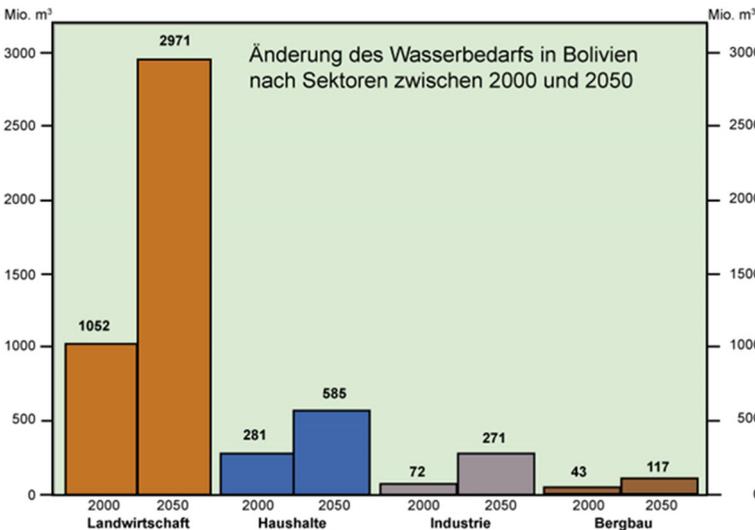
Auch wenn sich die Menge des aus den Gletschern abfließenden Wassers kurzfristig vergrößern dürfte, steht Bolivien langfristig insbesondere in den stark wachsenden Metropolen La Paz und El Alto vor großen Herausforderungen bezüglich der Wasserversorgung. Besonders brisant ist dabei die Tatsache, dass es bereits in den vergangenen Jahren soziale Konflikte um Wasser gegeben hat, allen voran der sogenannte »Wasserkrieg« im Jahr 2000, der durch die Privatisierung der Wasserversorgung in Cochabamba, der viertgrößten Stadt des Landes, ausgelöst wurde. Ähnliche Konflikte können mit knapper werdenden Wasserressourcen durch die abschmelzenden Gletscher auch in Zukunft erwartet werden. Zudem würde eine durch die Gletscherschmelze und die damit verbundenen Schwierigkeiten in der Landwirtschaft ausgelöste bzw. weiter verstärkte Migration die ohnehin bereits prekäre sozio-ökonomische Situation in La Paz und El Alto weiter verschlechtern (KAENZIG 2013) (Abb. 7.5-10).

Angesichts der zu erwartenden Schwierigkeiten wird bereits heute nach Möglichkeiten gesucht, dem Wassermangel infolge des Rückzugs der Andengletscher in Bolivien zu begegnen. Als mögliche Maßnahmen gelten die Verbesserung der Infrastruktur, um die teils großen Wasserverluste durch Lecks in Wasserleitungen oder durch illegale Abzweigungen von Wasser zu reduzieren. Als weitere Maßnahme wird die Erschließung von Wasserressourcen in sogenannten Blockgletschern angesehen. Diese aus einem Gemenge

von Schutt und Eis bestehenden Gebilde sind in den Anden wenig erforscht. Nach Schätzungen in Chile bestehen die andinen Blockgletscher unter einer Schicht aus Felschutt zu 40–60% aus Eis (RANGECROFT et al. 2013). Die Schuttbedeckung wirkt dabei isolierend, sodass davon ausgegangen wird, dass die Blockgletscher auf den Klimawandel langsamer reagieren als die Eismassen freiliegender Gletscher. Nach RANGECROFT et al. (2014) gibt es in Bolivien 94 Blockgletschergebilde, die eine Fläche von 11 km<sup>2</sup> bedecken, von denen aber nur noch 57% aktiv sind, d.h. Eis enthalten. Für die Wasserversorgung der Region um La Paz sind sie gegenwärtig unbedeutend, da sie in der Cordillera Real nur 1 km<sup>2</sup> bedecken. Durch den Klimawandel könnten jedoch aus abschmelzenden Gletschern neue Blockgletscher entstehen, die dann an Bedeutung zunehmen würden. Die Erschließung von Blockgletschern und andere Maßnahmen, die die möglichen Folgen des Verschwindens der Andengletscher für die Einwohner von La Paz und El Alto abfedern könnten, werden in Zukunft unter einem fortschreitenden Klimawandel weiter steigen (RANGECROFT et al. 2013).

**Ausblick**

Wie sich das Zurückziehen der Gletscher auf die lokale Bevölkerung auswirkt, hängt von einer Vielzahl von natürlichen und sozio-ökonomischen Faktoren ab. Wie das Beispiel Lima zeigt, könnten Gletscherseen und Feuchtgebiete mancherorts die regulierende Funktion der Gletscher übernehmen. Zudem können umgeleitete Wasserabflüsse vom feuchteren Osthang der Anden, wie bereits heute in Quito und Lima praktiziert, versiegende Gletscherabflüsse ersetzen. Möglicherweise bergen auch Blockgletscher wie in Bolivien vorübergehende Möglichkeiten der Wassergewinnung. Die in die-



**Abb. 7.5-10:** Wasserbedarf in Bolivien 2000 und 2050 in Mio. m<sup>3</sup> (Daten nach: WORLD BANK (2010): Plurinational State of Bolivia. Adaption to Climate Change – Vulnerability Assessment and Economic Aspects).

sem Kapitel vorgestellten Beispiele aus den ländlichen Regionen entlang der Flüsse Rimac und Rio Santa in Peru zeigen jedoch auch, dass sich über die Jahrhunderte vielerorts starke Abhängigkeiten der Bevölkerung von den sie mit Wasser versorgenden Gletschern entwickelt haben. Gerade in ländlichen Gebieten muss daher mit fortschreitendem Klimawandel davon ausgegangen werden, dass der Rückzug der Andengletscher tiefgreifende Herausforderungen an die Wasserwirtschaft mit sich bringt, die vielerorts die Anpassungsmöglichkeiten überschreiten. Wo technische Maßnahmen und Veränderungen gängiger Praktiken nicht in ausreichendem Umfang verfügbar sind, muss daher von einer zunehmenden Migration ausgegangen werden. Das Beispiel El Alto zeigt bereits heute die Schwierigkeiten, die eine zunehmende Wasserknappheit und eine auch durch Wassermangel bedingte Migration in den größeren Städten der Anden verursachen. Abseits aller Bemühungen um eine Begrenzung des Klimawandels muss der Suche nach geeigneten Anpassungsmaßnahmen daher hohe Priorität eingeräumt werden.

## Literatur

- BMZ, kfW (2010): Adaptation to Climate Change in the Rimac River Basin, <https://www.kfw-entwicklungsbank.de/migration/Entwicklungsbank-Startseite/Entwicklungsfinanzierung/Sektoren/Wasser/Klimawandel/Rimac-River-Basin-Snapshot.pdf>.
- BURY, J. T., et al. Bitte alle Autoren nennen. (2011): Glacier recession and human vulnerability in the Yanamarey watershed of the Cordillera Blanca, Peru, *Climatic Change* 105, 179-206, DOI 10.1007/s10584-010-9870-1.
- BUXTON, N., M. ESCOBAR, D. PURKEY & N. LIMA (2013): Water scarcity, climate change and Bolivia: Planning for climate uncertainties, Stockholm Environment Institut.
- 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.
- BUYTAERT, W. & B. DE BIEVRE (2012): Water for cities: The impact of climate change and demographic growth in the tropical Andes, *Water Resources Research* 48, doi:10.1029/2011wr011755.
- CANNON, P., B. HILL & C. MCCARTHY (2010): Watersheds of Quito: A Consultancy to Bolster FONAG's Contribution, [https://fs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/fsbdev2\\_041302.pdf](https://fs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/fsbdev2_041302.pdf).
- CHEVALLIER, P., POUYAÛD, B., SUAREZ, W. & T. CONDOM (2011). Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources. *Regional Environmental Change*, 11(1), 179-187.
- DRENKHAN, F. (2010): Flächen- und Massenbilanzierung tropischer Gletscher in Peru von 1985-2008 anhand von ASTER- und Landsat-Daten. Eine Abschätzung des glazialen Wasserspeichers in Bezug auf die Wasserversorgung Limas, Stuttgart.
- FRASER, B. (2012): Goodbye Glaciers, *Nature* 491, 180-182.
- HANSHAW, M. N. & B. BOOKHAGEN (2014): Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru, *The Cryosphere* 8, 359-376, doi:10.5194/tc-8-359-2014.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Hrsg. (2013): *Climate change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change*, 14.4.2. Cambridge (University Press).
- KAENZIG, R. (2013): A critical discussion on the impact of glacier shrinkage upon population mobility in the Bolivian Andes; [http://www.academia.edu/3892102/A\\_critical\\_discussion\\_on\\_the\\_impact\\_of\\_glacier\\_shrinkage\\_upon\\_population\\_mobility\\_in\\_the\\_Bolivian\\_Andes](http://www.academia.edu/3892102/A_critical_discussion_on_the_impact_of_glacier_shrinkage_upon_population_mobility_in_the_Bolivian_Andes).
- RABATEL, A., B. FRANCOU, A. SORUCO, J. GOMEZ, B. CÁCERES, J. L. CEBALLOS, R. BASANTES, M. VUILLE, J.-E. SICART, C. HUGGEL, M. SCHEEL, Y. LEJEUNE, Y. ARNAUD, M. COLLET, T. CONDOM, G. CONSOLI, V. FAVIER, V. JOMELLI, R. GALARRAGA, P. GINOT, L. MAISINCHO, J. MENDOZA, M. MÈNEGOZ, E. RAMIREZ, P. RIBSTEIN, W. SUAREZ, M. VILLACIS & P. WAGNON (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.
- RANGECROFT, S., S. HARRISON, K. ANDERSON, J. MAGRATH, A. P. CASTEL & P. PACHECO (2013): Climate Change and Water Resources in Arid Mountains: An Example from the Bolivian Andes, *AMBIO* 42, 852-863, DOI 10.1007/s13280-013-0430-6.
- RANGECROFT, S., S. HARRISON, K. ANDERSON, J. MAGRATH, A. P. CASTEL & P. PACHECO (2014): A First Rock Glacier Inventory for the Bolivian Andes, Permafrost and Periglacial Processes, DOI: 10.1002/ppp.1816.
- RÉVEILLET, M., A. RABATEL, F. GILLET-CHAULET & A. SORUCO (2015): Simulations of changes to Glacier Zongo, Bolivia (16° S), over the 21st century using a 3-D full-Stokes model and CIMP5 climate projections, *Annals of Glaciology* 56, 89-97
- SHI, L., M. ESCOBAR, B. JOYCE & J. KOSTARAS (2013): Strategic Land Use Planning for Climate Change-Driven Water Shortages in El Alto, Bolivia, Lincoln Institute of Land Policy [https://www.lincolninst.edu/pubs/dl/2273\\_1612\\_Shi\\_WP13LS1.pdf](https://www.lincolninst.edu/pubs/dl/2273_1612_Shi_WP13LS1.pdf).
- SORUCO, A., CHRISTIAN VINCENT, BERNARD FRANCOU & J. F. GONZALEZ (2009): Glacier decline between 1963 and 2006 in the Cordillera Real, Bolivia, *Geophysical Research Letters* 36, L03502, doi:10.1029/2008GL036238.
- SORUCO, A., C. VINCENT, A. RABATEL, B. FRANCO, E. THIBERT, J.-E. SICART & T. CONDOM (2014): Impacts of glacier shrinkage on water resources of La Paz city, Bolivia (16 S?? 16° S) over the last four decades, *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 16, EGU2014-6420.
- UNEP (UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME), THE FONDO AMBIENTAL (THE ENVIRONMENTAL FUND) OF THE MUNICIPALITY OF QUITO AND THE FACULTAD LATINO AMERICANA DE CIENCIAS SOCIALES (FACULTY OF SOCIAL SCIENCE IN LATIN AMERICA (FLACSO) (2011): *Environment and Climate Change Outlook: Metropolitan of Quito*. <http://www.pnuma.org/deat1/pdf/2011%20-%20ECCO%20Quito%20Summary%20%28web%29.pdf>.
- VEETIL, B. K. (2012): Three decadal monitoring of mountain glaciers in Ecuador - A case study on ENSO impact on Andean glaciers: A Remote sensing perspective, *International Journal of Geomatics and Geosciences* 3, 269-284.
- VUILLE, M. (2013): *Climate Change and Water Resources in the Tropical Andes*, Inter-American Development Bank, [http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5827/SR2012\\_VUILLE\\_FINAL\\_ENG.pdf;jsessionid=4F81973FB8386046A-FE220A9E37EC63E?sequence=1](http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5827/SR2012_VUILLE_FINAL_ENG.pdf;jsessionid=4F81973FB8386046A-FE220A9E37EC63E?sequence=1).

## Kontakt:

Dr. Dieter Kasang - Manuel Linsenmaier  
Deutsche Klimarechenzentrum (DKRZ)  
Kasang@dkrz.de

Kasang, D. & M. Linsenmeier (2015): *Der Rückgang der Gletscher und die Wasserversorgung in den tropischen Anden*. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 279-288. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.42