

## 4.10 Gletscher Südamerikas

JOSÉ L. LOZÁN & DIETER KASANG

**Gletscher Südamerikas** - In Südamerika unterscheidet man zwei Gletschergebiete: a) die tropischen Gletscher in Peru, Bolivien, Ecuador, Kolumbien und Venezuela und b) diejenigen in Patagonien und auf Feuerland (Südpatagonien und -argentinien). Die Gletschergebiete unterliegen sehr unterschiedlichen klimatischen Bedingungen. Die Fläche der südamerikanischen Gletscher wurde Mitte der 1970er Jahre auf ca. 25.000 km<sup>2</sup> geschätzt. Etwa 10% davon liegen im tropischen Gebiet. Sie sind dort ökonomisch sehr wichtig, vor allem für die Wasserversorgung. Die tropischen Gletscher gehören überwiegend zu den sog. warmen Gletschern, das heißt, ihre Eistemperatur befindet sich am Druckschmelzpunkt. Sie reagieren daher auf Temperaturänderung relativ kurzfristig und sind schnelle Indikatoren für Klimaschwankungen. Während des ganzen Jahres gibt es in den tropischen Anden Bedingungen, die eine Ablation zulassen. In anderen Regionen wie in den Alpen, sind die Wintermonate durch Akkumulation und die Sommermonate durch Ablation bestimmt. In den tropischen Anden können im Sommer beide Prozesse - maximale Ablation und maximale Akkumulation - stattfinden. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass die Niederschläge meistens in den Sommermonaten fallen, wenn die Insolation maximal ist. Alle Wissenschaftler stimmen darin überein, dass sich die tropischen Gletscher seit 40 Jahren mit einer Geschwindigkeit ohne Beispiel während der letzten drei Jahrhunderte zurückgezogen haben. Der Hauptgrund liegt in der globalen Erwärmung; daneben spielt für kürzere Zeiträume auch die El-Niño-Southern-Oscillation (ENSO) im Pazifik eine wichtige Rolle. Wie Berechnungen mit Hilfe von Klimamodellen zeigen, kann aufgrund der zu erwartenden Erwärmung von 4-5 °C davon ausgegangen werden, dass der größte Teil der tropischen Gletscher bis 2100 verschwunden sein wird. In den südlichen Anden unterscheidet man vier vereiste Gebiete: Die nördlichen Patagonischen Anden, das Nord- und das Südpatagonische Eisfeld sowie die Cordillera Darwin auf Feuerland, von denen das Südpatagonische Eisfeld mit Abstand das größte ist. Während die tropischen Gletscher primär durch vom Atlantik stammende Niederschläge beeinflusst werden, kommt der Hauptniederschlag nach Patagonien durch Westwinde vom Pazifik und prägt an der Küste das maritime Klima; die Ostseite der Anden ist jedoch relativ trocken. Die Anden verlieren nach Süden hin ab 35° S an Höhe und liegen mit wenigen Ausnahmen unter 3.000 m. Die mittlere Temperatur nimmt nach Süden ab und die starken Niederschläge bewirken die Bildung von großen Gletschern. Auch die Gletscher der südlichen Anden zeigen ein starkes Abschmelzen in den letzten Jahrzehnten, das allerdings ca. 10 Jahre später als in den tropischen Anden einsetzte. Auch für den Rückgang der Gletscher in den südlichen Anden wird die globale Erwärmung als Hauptgrund angesehen. Daneben spielen in Einzelfällen möglicherweise abnehmende Niederschläge und bei kalbenden Gletschern die Beschaffenheit des Untergrundes eine Rolle.

**The South America Glacier:** There are two glaciated areas in South America a) the tropical glaciers in Peru, Bolivia, Ecuador, Colombia and Venezuela, and b) those in Patagonia and Tierra del Fuego (southern Chile and -Argentina). They are subject to very different climatic conditions. The total area of the South American glaciers was estimated in the mid-1970s to be approximately 25,000 km<sup>2</sup>. About 10% are located in the tropical region. They are there economically very important, especially for water supply. The tropical glaciers belong mainly to the so-called warm glaciers, that is, their ice temperature is located at the pressure melting point. They react therefore in a relatively short time to temperature change and are quick indicators of climate change. Throughout the year there are conditions in the tropical Andes that allow ablation. In other regions such as the Alps, the winter months are determined by the accumulation and the summer months by ablation. In the tropical Andes both processes - maximum ablation and maximum accumulation - can take place during the summer. The reason for this is the fact that the rainfall usually occurs during the summer months, when the insolation is at its maximum. Scientists agree that the tropical glaciers have retreated for 40 years at a rate without precedent during the last three centuries. The main reason lies in global warming; beside that El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in the Pacific plays for an important role for short time periods. According to the climate projection, it can be assumed that, due a warming of 3-4 °C, most of the tropical glaciers will be gone by 2100. In the southern Andes we can distinguish four glaciated areas: the northern Patagonian Andes, the North and the South Patagonian ice areas as well as the Cordillera Darwin in Tierra del Fuego. From these, the South Patagonian ice area is by far the largest. While the tropical glaciers are primarily influenced by the rainfall from the Atlantic, westerly winds bring from the Pacific Ocean the main precipitation to Patagonian and determine the maritime character of the climate in the coastal zone; contrary to that, the eastern side of the Andes is relatively dry. The Andes are, with few exceptions, below 3,000 m high south of 35 °S. The mean temperature decreases and heavy rainfall simultaneously cause the formation of large glaciers. They show as well a strong melting in recent decades, however, about 10 years later than in the tropical Andes. Also for the retreat of glaciers in the southern Andes global warming is seen as the main reason. An additional role can be played by the decreasing precipitation in some cases as can the nature of the surface for calving glaciers.

Die südamerikanischen Gebirgsgletscher liegen in den Anden, die sich über mehr als 7.000 km von Norden nach Süden am Westrand des südamerikanischen Kontinents durch Venezuela, Kolumbien, Ekuador, Peru, Bolivien sowie Argentinien und Chile erstrecken. Entsprechend dieser Ausdehnung liegen die Gletscher in ganz unterschiedlichen klimatischen Zonen. Im nördlichen Teil der Anden (12° N bis 5° S) ist das Klima durch die tropischen Zirkulationsmuster bestimmt und durchgehend feucht (innere Tropen). So fallen in Venezuela, Kolumbien und Ekuador konvektive Niederschläge durch die vom Atlantik her eindringenden (Nordost-) Passatwinde nahezu das ganze Jahr durch, und die Temperatur schwankt nur sehr geringfügig. Dadurch erhalten die Gletscher auch das ganze Jahr Niederschläge. Von Nord- (ca. 5° S) bis Südperu (17° S) nehmen die jahreszeitlichen Temperaturschwankungen zu und die Niederschläge fallen vor allem in den Sommermonaten der südlichen Hemisphäre. Hinzu kommen die klimatischen Gegensätze durch die sich grob von Nord nach Süd erstreckende Gebirgskette der Anden. Während die östlichen Anden (inkl. das Amazonas-Gebiet) Niederschläge deutlich über 2.000 mm/Jahr erhalten können, ist die westliche peruanische und nordchilenische Andenkette mit nur rund 50 mm/Jahr deutlich trockener. Die größeren Gletschergebiete liegen daher in den östlichen Gebirgszügen der Anden. Nach Süden hin ab 17° S verringert sich der tropische Einfluss, und durch die Lage am Pazifik mit dem kal-

ten Humboldt-Strom vor der südamerikanischen Küste dominiert zunehmend extreme Trockenheit. Aufgrund des Mangels an Feuchtigkeit können sich in Südperu und Nordchile nur wenige Gletscher bilden. Das Gebiet südlich von 35° S befindet sich dann zunehmend unter dem Einfluss der Westwinde, und mit einer sehr feuchten West- und einer relativ trockenen Ostseite dreht sich die Niederschlagsverteilung in den Anden um. Dadurch kommt es wieder zur Gletscherbildung, auch bei Gebirgen unter 5.000 m Höhe, in Patagonien und Feuerland sogar bei Gebirgen unter 3.500 m und mit Gletscherzungen, die direkt in pazifische Fjorde kalben. Hier liegen die mit Abstand größten Gletschergebiete Südamerikas, die etwa 90% der vergletscherten Gesamtfläche in Südamerika ausmachen. Insgesamt wurde die Fläche der südamerikanischen Gletscher auf ca. 25.000 km<sup>2</sup> Mitte der 1970er Jahre geschätzt. Davon lagen knapp 2.750 km<sup>2</sup> im tropischen Gebiet (vor allem in Peru und Bolivien) und 22.500 km<sup>2</sup> in Patagonien/Feuerland (Südargentinien und Südchile) (Abb. 4.10-1). Infolge der Gletscherschmelze der letzten Jahrzehnte ist diese Fläche deutlich kleiner geworden. Nach der Zusammenstellung von RABATEL et al. (2013) betrug die Fläche im tropischen Gebiet 2006 nur ca. 1.920 km<sup>2</sup>. Nach HOFFMANN (pers. Mitt.) dürfte die heutige Fläche bei 1.600 km<sup>2</sup> liegen.

Aufgrund der markanten klimatischen Unterschiede in der Nord-Süd-Erstreckung der Anden ist eine Einteilung der südamerikanischen Vereisungen in drei Regionen angebracht: tropische Gletscher, Gletscher in Patagonien und auf Feuerland sowie die dazwischen liegenden wenig vergletscherten Gebiete (Nordargentinien und -chile).

## TROPISCHE GLETSCHER

### Venezuela

Die Gletscher in Venezuela hatten mit einer Fläche von ca. 200 km<sup>2</sup> ihre größte Ausdehnung in der Kleinen Eiszeit zwischen 1600 und 1850, als die Temperaturen in den Anden Venezuelas nach RABATEL et al. (2013) um 3,2°C unter den heutigen Werten lagen und etwa 22% mehr Niederschläge fielen. Um 1900 betrug die Gletscherfläche nach BRAUN & BEZADA (2013) nur noch etwa 10 km<sup>2</sup>, reduzierte sich bis in die 1950er Jahre auf ca. 3 km<sup>2</sup> und bis 2011 auf nur noch 0,1 km<sup>2</sup>. Von 10 noch in den 1950er Jahren kartographisch festgehaltenen Gletschern existierten in den 1990er Jahren nur noch fünf, die zudem deutlich kleiner geworden waren. Insgesamt ist die Vergletscherung besonders stark in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts zurückgegangen. Der Rückgang stagnierte zwischen den 1950er und 1970er Jahren und beschleunigte sich dann bis heute erneut.

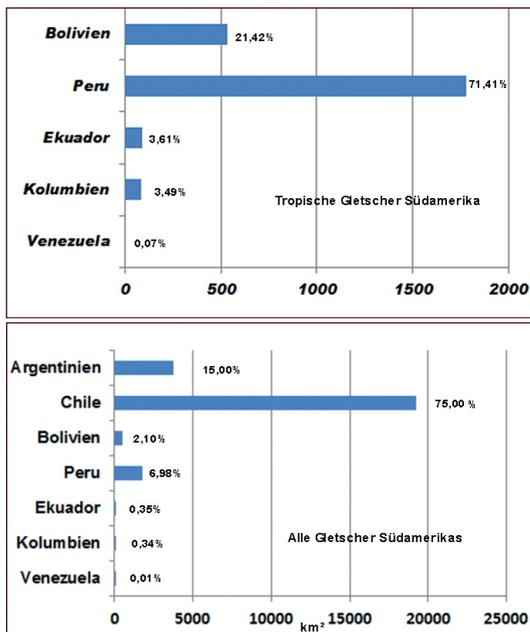


Abb. 4.10-1: a) Fläche aller Gletscher in Südamerika. b) Fläche tropischer Gletscher in Südamerika. Daten: Verschiedene Quellen (s. Text). Eigene Darstellung.

Die letzten Gletscher des Landes fanden bzw. finden sich am Pico Bolívar (4.981 m) (Abb. 4.10-2), Pico La Concha (4.922 m) und Pico Humboldt (4.940 m) sowie im Pico Bonpland Massif (4.883 m); alle Gipfel liegen in der Sierra Nevada de Mérida (West-Venezuela). Die Vereisung im Pico Bonpland Massif ist seit 2011 völlig verschwunden. Das Eis auf dem Pico Bolívar und Pico La Concha ist im Laufe der letzten Jahrzehnte ebenfalls abgeschmolzen. Der verbliebene Humboldt-Gletscher besitzt nach Braun & Bezada (2013) keine Akkumulationszone mehr und könnte höchstwahrscheinlich noch in diesem Jahrzehnt ganz aufhören zu existieren. Venezuela wird dann der erste gletscherfreie Andenstaat sein. Die Höhe der 0°-Isotherme im Gebiet des Humboldt-Gletschers lag schon in den 1990er und 2000er Jahren etliche Male höher als die Obergrenze des Gletschers (4.850 m) und befand sich 2010 bei fast 5.000 m. Grund ist eine zunehmende Erwärmung der Atmosphäre. Zusätzlich haben sich die Niederschläge seit ca. 1990 deutlich verringert (BRAUN & BEZADA 2013).

### Kolumbien

Die Gletscherfläche während der Kleinen Eiszeit wurde für ganz Kolumbien auf 374 km<sup>2</sup> geschätzt. Zahlreiche Gletscher sind seitdem abgeschmolzen, davon allein acht Gletscher im 20. Jahrhundert. Die gesamte Gletscherfläche ist zwischen 1850 und 1950 um 60-80% zurückgegangen. Für 1950 wird eine Fläche von ca. 110 km<sup>2</sup> und für 2011 45 km<sup>2</sup> angegeben (RABATEL et al. 2013, IDEAM 2012)). Die Verlustrate hat sich in den letzten 15 Jahren deutlich beschleunigt. Gegenwärtig gibt es nur noch sechs vergletscherte Gebirgszüge. Davon ist die Sierra Nevada de Santa Marta die nördlichste Region mit tropischen Gletschern Südamerikas, mit Gipfeln höher als 5.500 m, wie dem Pico Simón Bolívar. Die Gletscher liegen nur 46 km von der karibischen Küste entfernt. Das größte zusammenhängende Gletschergebiet Kolumbiens befindet sich in der Sierra Nevada del Cocuy im Nordwesten Kolumbiens (Cordillera Occidental). Hierzu gehört als höchster Gipfel

der Ritacuba Blanco (5.330 m). Einige Gletscher der Cordillera Central liegen auf aktiven Vulkanen wie dem Nevado del Ruiz (5.321 m), deren Ausbrüche in den letzten Jahren ebenfalls zum Gletscherverlust beigetragen haben (POVEDA & PINEDA 2009).

Die wahrscheinlichste Ursache der Gletscherschmelze in Kolumbien ist die deutliche Zunahme der Minimum- und der mittleren Temperatur. Beide haben in den letzten 20 Jahren um 1°C zugenommen. Bei den Niederschlägen ließen sich dagegen keine klaren Trends feststellen. Falls die gegenwärtigen klimatischen Bedingungen und die Verlustraten der Gletscher anhalten, wird es nach POVEDA & PINEDA (2009) spätestens um 2022 keine Gletscher mehr in den kolumbianischen Anden geben. Möglicherweise könnte es aber schon früher zum totalen Gletscherverlust kommen, falls häufiger El-Niño-artige Verhältnisse im Pazifik eintreten. Die hohen Temperaturen und die größere Trockenheit während eines El Niño wirken sich negativ auf die Massenbilanz aus, während La Niña mit geringeren Temperaturen und mehr Niederschlag zu einer positiven Bilanz führt (WGMS 2007).

### Ekuador

Die Gletscher in Ekuador liegen zum einen in der Cordillera Occidental und zum anderen in der Cordillera Oriental. Die höchsten vergletscherten Berge sind der Chimborazo mit 6.310 m in der Cordillera Occidental, der Cotopaxi mit 5.897 m, der Cayambe mit 5.790 m sowie der Antisana (5.704 m) in der Cordillera Central. Bei allen Gletschern ist seit dem 19. Jahrhundert die Gleichgewichtslinie zwischen Ablation und Akkumulation bis heute um rund 250 m nach oben gewandert. RABATEL et al. (2013) schätzt die gesamte Gletscherfläche Ekuadors im Jahr 1976 auf ca. 113 km<sup>2</sup> und im Jahr 2006 auf 79 km<sup>2</sup>.

Genauere Messungen gibt es für das Antisana-15-Eisfeld (0,32 km<sup>2</sup>) (s. Abb. 4.10-3). Es liegt ungefähr 40 km von der ekuadorianischen Hauptstadt Quito entfernt und ist für die Wasserversorgung der



Abb. 4.10-2: Pico Bolívar (Venezuela) 1950 (links) und 2011 (rechts). Quelle: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pico\\_Bol%C3%ADvar\\_1950-2011.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pico_Bol%C3%ADvar_1950-2011.jpg); Autor: The Photographer, Creative Commons CCO 1.0

Hauptstadt wichtig. Der Antisana 15 ist der langfristig am besten untersuchte südamerikanische Gletscher, der in der Nähe des geographischen Äquators liegt. Seine Massenbilanz war in den Jahren 1995-2003 trotz hoher jährlicher Schwankungen insgesamt negativ. Im Durchschnitt betrug die jährliche Massenbilanz -627 Millimeter Wasser Äquivalent (mm w. e.). Dieser negative Trend wurde 1999 und 2000 durch eine positive Bilanz unterbrochen. Die Jahre 2004 und 2005 waren wieder negativ mit Werten von -572 und -789 mm w. e. Die Schwankungen sind im Wesentlichen auf das El-Niño-Southern-Oscillation-Phänomen (ENSO) zurückzuführen (WGMS 2007).

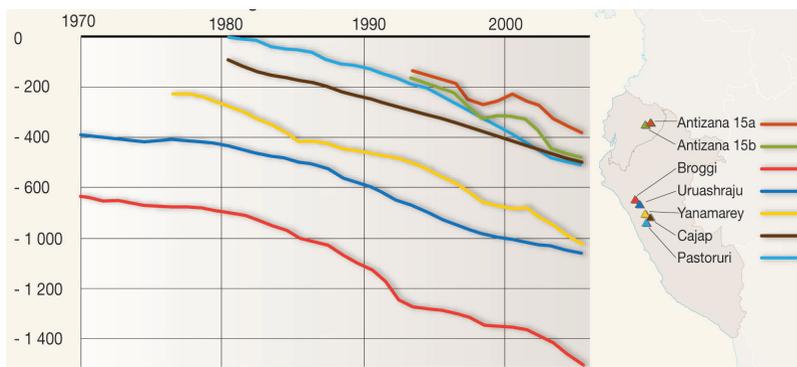
## Peru

Über 70% der tropischen Andengletscher befinden sich in Peru (s. Abb. 4.10-1). Nach MORALES-ARNAO & HASTENRATH (1998), KASER & OSMASTON (2003) u.a. betrug die peruanische Gletscherfläche 1970 rund 1.960 km<sup>2</sup>. Aufgrund der Schmelzprozesse der letzten Jahrzehnte hat sich diese Fläche bis 2013 auf 1.298,59 km<sup>2</sup> reduziert; sie ist auf 2.679 Gletscher verteilt (UGRH, UNIDAD DE GLACIOLOGIA Y RECURSOS HIDRICOS 2014). Das bedeutet im Vergleich mit 1970 einen Rückgang um 42%. Es gibt in Peru 20 verschiedene Bergketten (Abb. 4.10-4). Die drei größten Gletschersysteme sind: Die Cordillera Blanca (Nordperu), Vilcanota (Südostperu) und Vilcabamba (Zentralperu) mit zurzeit 755, 374 bzw. 355 Gletschern. Die Cordillera Blanca (Weiße Kordillere) (Cordillera Occidental) mit einer Ausdehnung von rund 200 km und einer vergletscherten Fläche in den 1970er Jahren von 723 km<sup>2</sup>. Nach UGRH (2014) ging diese Fläche bis Anfang 2000er Jahre auf 527.62 km<sup>2</sup> zurück. Die Gebirgskette Vilcanota (Cordillera Oriental) hatte 1970 eine vergletscherte Fläche von 418.43 km<sup>2</sup> und im Jahr 2013 nur noch 279.40 km<sup>2</sup> (UGRH 2014). Infolge der Schmelzprozesse ist die Anzahl der Gletscherseen gestiegen. Im Jahr 2013 wurden 8.355 mit einer Fläche von 916,64 km<sup>2</sup> registriert (UGRH 2014, SALZMANN et al. 2013).

Die Cordillera Blanca (Abb. 4.10-4 und 4.10-5) beherbergt über 50 Gipfel, die höher als 5.700 m sind. Sie stellt die höchste Gebirgskette des amerikanischen Kontinents dar. Im Westen der Cordillera Blanca befindet sich die Cordillera Negra, die trotz Höhen von über 5.000 m völlig eisfrei ist. Der höchste Berg der Cordillera Blanca ist der Huascarán (6.768 m). Andere wichtige Berge sind der Nevado Huantsán (6395 m), Hunadoy (6.360 m), Chopicalqui (6.345 m), der Nevado Palcaraju (6.274 m), Pukarahu (6259 m), Nevado Chinchey (6222 m), Nevado Copa/Qupa (6188 m), Ranrapalca (6.188 m), Pukaranra (6.147 m), Wallqan (6.122 m) u.a. Als einer der schönsten Berge der Welt gilt der weiter nördlich gelegene Alpamayo (5.947 m). Die meisten dieser Berge wurden während mehrerer Deutsch-Österreichischer Alpenvereinsexpeditionen in den 1930er Jahren erstbestiegen.

Auch in der Cordillera Blanca sind in jüngerer Zeit mehrere kleine Gletscher abgeschmolzen oder haben sich stark verkleinert. So ist der Broggi-Gletscher um 2005 verschwunden (Abb. 4.10-5). Der Yanamarey besaß 1994 noch eine Gletscherfläche von 2 km<sup>2</sup>. Heute schätzt man seine Fläche auf nur 0,2 km<sup>2</sup>; er wird vermutlich innerhalb der nächsten Jahre verschwinden. Der Pastoruri-Gletscher ist ebenfalls stark betroffen; er teilte sich 2007 in zwei nicht mehr verbundene Gletscherteile (Abb. 4.10-5). Die Gletscher auf den großen Bergen der Cordillera Blanca sind immer noch ausgezehnt, auch wenn manche der Zungen stark in Mitteleisenschaft gezogen sind.

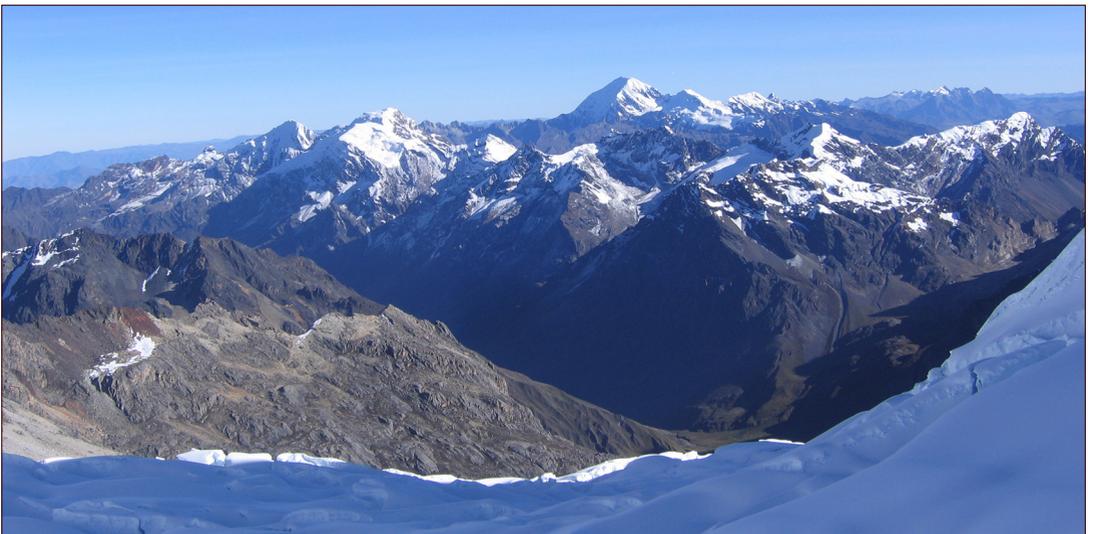
Das zweitgrößte vergletscherte Gebiet Perus, die Gebirgskette Vilcanota (s. Abb. 4.10-4), befindet sich in der Region Cusco-Puno; es beherbergt 14 Gipfel, die höher bzw. gleich 5.700 m sind. Einige davon sind: Qullpa Ananta (6.110 m), Nevado Chumpe (6.106 m), Nevado Alcamarinayoc (Allqamarinayuc) (6.102 m), Hatunuma (6.093 m) und Yayamari (6.049 m). Am Südostrand beherbergt die Gebirgskette Vilcanota mit der Quelccaya-Eisfläche, die 44 km<sup>2</sup> umfasst, die größte tropische Eiskappe der Welt. Sie liegt an der



**Abb. 4.10-3:** Rückzug von sieben tropischen Gletschern. Kumulative Veränderung der Länge der Gletscher in m. Quelle: [www.grida.no/graphicslib/detail/retreat-of-seven-andean-glaciers\\_e31b](http://www.grida.no/graphicslib/detail/retreat-of-seven-andean-glaciers_e31b). Autor: Nieves López Izquierdo, Associate Consultant UNEP/GRID-Arendal.



**Abb. 4.10-4:** Geographische Lage der peruanischen Gletscher; sie sind auf 20 Bergketten verteilt (HAEBERLI et al. 1998 geändert).



**Abb. 4.10-5:** Cordillera Blanca, Alapamayo plateau, Caraz, Peru. Quelle: [https://commons.wikipedia.org/wiki/File:Cordill%C3%A8re\\_Blanche.jpg](https://commons.wikipedia.org/wiki/File:Cordill%C3%A8re_Blanche.jpg). Autor Alberto Cafferata. Creative Commons Attribution 3.0

Grenze des Titicaca-Einzugsgebietes. Die Fläche der Quelccaya-Eiskappe hat nach HANSHAW & BOOKHAGEN (2014) und THOMPSON et al. (2013) zwischen 1980 und 2010 um 19,4 km<sup>2</sup> bzw. 31% abgenommen; das entspricht einer durchschnittlichen Rate von 0,57 km<sup>2</sup>/Jahr. Durch das Schmelzwasser haben sich mehrere Seen und Feuchtgebiete gebildet. Beispielsweise konnte in der Nähe des in einer Höhe von 5.200 m seit etwa 1985 bestehenden Sees neben der Abnahme der Eisdicke ein Rückzug der Schneegrenze im Mittel von etwa 10 m/Jahr im letzten Jahrzehnt festgestellt werden. In höheren Lagen wird jedoch eine Zunahme der Schneeeakkumulation beobachtet. Vor dem Klimawandel war die Landschaft trocken und unfruchtbar. Infolge der Zunahme der Bodenfeuchte ist eine Entfaltung der Biodiversität sichtbar. Neue Säugetiere, Vögel, Reptilien, Amphibien, Insekten u.a. treten auf. Eine Besonderheit ist, dass eine südamerikanische Vogelart (*Diuca speculifera*) auf dem Gletscher brütet; damit zählt ihr Brutrevier möglicherweise zu den höchsten Gelegen der Welt (SINGH et al. 2014).

Zu der Gebirgskette Huayhuash (in der Nähe der Stadt Huancayo) gehört der Gletscher Huaytapallana (5.557 m). Nach den Untersuchungen des Geophysischen Instituts Peru (IGP) betrug im Jahr 1985 seine Gletscherfläche 27,7 km<sup>2</sup>. Genauere Messungen im Jahr 2011 (26 Jahre später) durch das IGP ergaben eine Fläche von nur noch 13,4 km<sup>2</sup>.

### Bolivien

Insgesamt gab es in Bolivien in den 1970er Jahren eine Eisfläche von ca. 560 km<sup>2</sup>. Das war über 20% der tropischen südamerikanischen Gletscher (s. Abb. 4.10-1). Infolge des globalen Klimawandels ist die Vergletscherung jedoch auch hier rückläufig. Nach RABATEL et al. (2013) betrug 2006 die Gesamtfläche nur noch 390 km<sup>2</sup>. In Bolivien findet man Gletscher vor allem in der Cordillera Oriental. In deren nördlichem Teil (Cordillera Apolobamba) ist vor allem der Chaupi Orco zu erwähnen; er ist mit 6.040 m der höchste Gipfel im bolivianisch-peruanischen Grenzgebiet. Im anschließenden Bereich (Cordillera Real und Cordillera Quimza Cruz) findet sich eine Kette von Gipfeln, die über 6.000 m hoch sind. Hierzu gehören die Gipfel: Illampú (6.368 m), Ancohumá (6.427 m), Huayna Potosí (6.088 m) und Illimani (6.462 m).

Ein sehr gut untersuchter Gletscher ist der Zongo der Cordillera Real, der 30 km nordöstlich des Regierungssitzes La Paz liegt. Ein Teil des Schmelzwassers speist die Laguna Milluni (Wasserreservoir für La Paz) und der restliche Teil fließt zu den 10 Wasserkraftwerken im Zongo-Tal. Der erzeugte Strom wird in das nationale Netz eingespeist. Der Zongo hat ab Mitte der

1970er Jahre Verlustrate in der Ablationszone von -0,8 bis -0,9 m pro Jahr (SORUCO et al. 2009) (weitere Details im HOFFMANN Kap. 4.11 in diesem Band). Es ist erwähnenswert, dass der Gletscher Chacaltaya der Cordillera Real im Jahr 2009 völlig verschwand.

### Die Gletscher der tropischen Anden und das Klima

Etwa während der Zeit 1650 bis 1750 (Kleinen Eiszeit, LIA) zeigten die Gletscher der tropischen Anden ihre größte Ausdehnung in den letzten 400 Jahren. Im Gegensatz dazu setzten die meisten Gletscher der Alpen ihre Ausdehnung bis um 1850 fort (FRANCOU et al. 2013). Die Temperaturen lagen während der LIA in kolumbianischen Gebirgen um 3°C, in den anderen Gletschergebieten um 0,8-1,5°C unter den heutigen Werten. Während die Temperaturen geringer waren als heute lagen die Niederschläge 20-30% über denen der Gegenwart (FRANCOU et al. 2013). Ab 1750 begann ein stetiger Schwund der tropischen Gletscher. Der Grund lag vor allem in den trockeneren Bedingungen seit etwa 1800, die bis ins 20. Jahrhundert anhielten. Zwischen 1940 und 1960 deuten die wenigen Daten auf einen mäßigen Rückzug der Gletscher von 0,5%/Jahr hin. Danach bis ca. 1975 gab es kaum Veränderungen. Erst ab 1976 ist ein deutliches Abschmelzen der Gletscher feststellbar, wobei die globale Erwärmung zunehmend die entscheidende Rolle spielte. Die Erwärmung in den Gebirgen ist viel höher als im globalen Durchschnitt. Für die tropischen Anden wird sie für das 20. Jahrhundert im Mittel auf 1,1°C geschätzt (FRANCOU et al. 2013). Neben der globalen Erwärmung besitzt auch die El-Niño-Southern-Oscillation (ENSO) im Pazifik einen Einfluss auf die Veränderung der Gletscher in den tropischen Anden. Während die warme Phase, El Niño, zu einer Beschleunigung der Eisschmelzen führt, bewirkt die kühle Phase, La Niña, manchmal sogar eine positive Massenbilanz. Eine gute Korrelation wird zwischen der negativen Bilanz der Gletscher in Bolivien und dem Gebiet El-Niño 1+2 (im Ost-Pazifik vor der Küste Perus) festgestellt. Die Temperatur in Bolivien ist während eines El Niño 0,7-1,3°C höher als die während der kühlen Phase La Niña. Gleichzeitig gehen die Niederschläge um 10-30% zurück, die Wolken verschwinden und die Zunahme der Insolation bewirkt eine überdurchschnittliche Ablation. In Ecuador und Kolumbien beobachtet man eine ähnliche Auswirkung; die Anomalie in der Temperatur und Niederschläge korreliert hier eher mit El Niño 3-4 (Zentralpazifik).

Wie aus Abb. 4.10-6 ersichtlich, verlieren die tropischen Gletscher sprunghaft von 1976-1980 an Eismasse. Diese Entwicklung war stärker als bei Gletschern anderer Regionen, deren negative Entwicklung erst 10-

15 Jahre später im Jahrzehnt 1990-2000 einsetzte. Wie oben erwähnt beruhte der beobachtete Rückzug der mittleren und großen tropischen Gletscher von 30-50% seit Mitte der 1970er Jahre auf einer Erwärmung von rund  $1.1^{\circ}\text{C}$  im 20. Jahrhundert, die sich seit den 1970er Jahren beschleunigte. Außer auf die globale Erwärmung ist der starke Rückgang der tropischen Anden-Gletscher in den 1970er Jahren nach RABATEL et al. (2013) auch auf die Wende im pazifischen Klima ab 1976 zurückzuführen, die durch wärmere Meeresoberflächentemperaturen und häufigere und stärkere El-Niño-Ereignissen gekennzeichnet ist. Die Gletscher der mittleren und höheren Breiten der Nordhalbkugel stehen dagegen unter dem Einfluss der Nordatlantischen Oszillation (NAO), deren Warmphase erst um 1990 einsetzte. Die Vorhersage von mehreren Klimamodellen für die amerikanischen Gebirge ergibt auf Höhen von über 4.000 m eine Temperaturerhöhung von  $4-5^{\circ}\text{C}$  bis 2100 nach dem A2-Szenario. Mit dem Model CROCUS, das die Schneeschmelzen auf verschiedene Höhen simuliert, wurden die Auswirkungen von  $+4-5^{\circ}\text{C}$  auf den Gletscher Zongo untersucht (FRANCOU et al. 2013). Dabei wurden die Niederschläge zwischen  $-20\%$  und  $+20\%$  variiert. Das Ergebnis war ein Anstieg der Nulllinie (Gleichgewicht zwischen Ablation und Akkumulation) um  $150\pm 30$  m je  $1^{\circ}\text{C}$ -Erwärmung und bei einer Erwärmung von  $4-5^{\circ}\text{C}$  ist eine Erhöhung der Nulllinie zwischen 480 und 900 m zu erwarten. Da sie zurzeit bei 5.150 m liegt und die Höhe des Gletschers 6.000 m beträgt, würde bedeuten, dass der Gletscher Zongo bis 2100 völlig verschwinden wird, wenn eine solche Erwärmung eintritt. Dies gilt auch für alle Gletscher der Region, da die Bedingungen ähnlich sind

### SÜDPERU, WESTBOLIVIEN, NORDCHILE UND NORDARGENTINIEN

In Südp Peru, Westbolivien, Nordchile und Nordargentinien ( $18^{\circ}\text{S}$ - $35^{\circ}\text{S}$ ) befindet sich eine extreme Trockenzone mit relativ wenigen bzw. kleinen Gletschern, obwohl viele über 5.000 m hohe Gipfel dort zu finden sind. Ein Beispiel dafür ist die ca. 110 km lange vulkanische Bergkette Barroso in Südwest-Peru (Abb. 4.10-4). Der Vulkan Tutupaca und der Berg Barroso sind trotz ihrer Höhe von 5.815 m bzw. 5.741 m nur leicht

vergletschert. Insgesamt fehlen in der Region bis  $35^{\circ}\text{S}$  große Gletscher ganz. Abb. 4.10-7 zeigt die Gebirgshöhe zwischen  $15^{\circ}\text{S}$  und  $55^{\circ}\text{S}$ . Daraus ist ersichtlich, dass die Gebirge südlich der  $35^{\circ}\text{S}$  Breite drastisch an Höhe verlieren. Gleichzeitig nehmen die Anzahl der Gletscher und deren Eismasse trotz geringerer Höhe zu.

### GLETSCHER IN PATAGONIEN UND AUF FEUERLAND

Wie oben erwähnt, befinden sich die größten Gletschergebiete Südamerikas in den südlichen Anden in Patagonien und auf Feuerland (Abb. 4.10-8). Hier gibt es insgesamt vier größere vergletscherte Gebiete: Das wenig bekannte und kaum untersuchte Gletschergebiet in den nördlichen Patagonischen Anden südlich von Puerto Montt umfasst eine vereiste Fläche von ca. 900  $\text{km}^2$ , das Nordpatagonische Eisfeld bedeckt eine Fläche von 4.197  $\text{km}^2$ , das Südpatagonische Eisfeld erstreckt sich über 13.000  $\text{km}^2$  und das Eisfeld der Cordillera Darwin über 2.300  $\text{km}^2$ . Das gesamte Gebiet ist durch starke Westwinde geprägt, die auch den Hauptniederschlag bringen. Die dortigen Anden bewirken einen starken Niederschlagsabfall von West nach Ost. Dies spiegelt sich in der Schneegrenze wieder (s. Abb. 4.10-7). Während auf der Westseite der Anden der marine Einfluss für Niederschläge bis zu 7.000 mm pro Jahr sorgt, fallen auf der Ostseite teilweise nur 300 mm/Jahr. Die Temperaturen sind im 20. Jahrhundert in den südlichen Anden um etwa  $1^{\circ}\text{C}$  gestiegen. Die Niederschläge haben in den letzten Jahrzehnten im mittleren Patagonien etwas zugenommen, sich auf Feuerland aber kaum verändert (LOPEZ et al. 2010).

### Gletscher in den nördlichen Patagonischen Anden

Das Gebiet liegt nördlich des Nordpatagonischen Eisfeldes in den nördlichen Patagonischen Anden südlich von Puerto Montt zwischen  $40.5^{\circ}$  und  $44.5^{\circ}\text{S}$ . Die Gipfel der Anden liegen hier bei 1.800 bis 2.500 m, mit Ausnahme des Monte Tronador mit 3.500 m. Vorherrschend sind eher kleinere Gletscher. Fast 70% sind kleiner als 0,5  $\text{km}^2$  und nur 2% größer als 5  $\text{km}^2$ . Klimatische ist das Gebiet stark maritim geprägt mit Niederschlägen bis zu

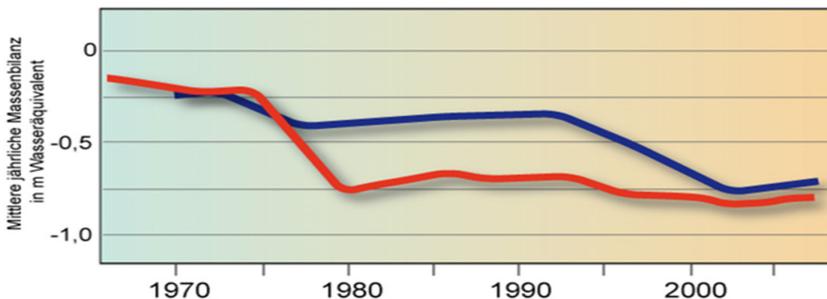


Abb. 4.10-6: Geglättete mittlere Veränderung der Gletscher bezüglich der Eismasse. Blaue Linie: weltweit. Rote Linie: tropische Gletscher Südamerikas (nach RABATEL et al. 2013 verändert).

3.000 mm pro Jahr in Küstennähe, die zum Landesinnern dann schnell abnehmen. Häufige Vulkanausbrüche bedecken die umliegenden Gletscher mit Asche.

Nach PAUL & MÖLG (2014) hat sich zwischen 1985 und 2011 die Fläche der Gletscher von 1.192,5 km<sup>2</sup> im Jahre 1985 auf 899,2 km<sup>2</sup> im Jahr 2011 (-25%) drastisch verringert. Besonders unterhalb von 1.000 m war der Verlust mit 50-100% der Gletscherfläche sehr hoch. Von den 1.664 Gletschern im Jahre 1985 sind 374 Gletscher bis 2011 sogar ganz verschwunden. Betroffen sind von der Gletscherschmelze vor allem die größeren Talgletscher mit längeren, bis in tieferen Lagen reichenden Gletscherzungen, während die höher gelegenen kleineren Gletscher nur wenig abschmolzen, eine Besonderheit, die nirgends sonst in der Welt beobachtet wurde. Etliche der größeren Talgletscher haben zudem komplett ihre Gletscherzunge verloren. Insgesamt kann das starke Abschmelzen der Gletscher in dieser Region als beispiellos bewertet werden.

Die starke Gletscherschmelze in diesem Gebiet ist klimatisch schwierig zu erklären, weil die beobachteten Trends des Klimas in der Küstenzone dazu z.T. im Widerspruch stehen bzw. Daten aus dem Gletschergebiet selbst fehlen. Entlang der Küste wurde eine leichte Abkühlung in den letzten Jahrzehnten beobachtet, die aber nicht für die höheren Lagen, in der sich die Gletscher befinden, gelten muss. Hier gab es möglicherweise einen leichten Temperaturanstieg. Auf der anderen Seite fielen an der Küste ca. 20% weniger Niederschläge, die aber ebenfalls nicht ohne weiteres auf die Gletschergebiete selbst übertragen werden können. Nach PAUL & MÖLG (2014) können abnehmende Niederschläge und eine leichte Erwärmung als wahrscheinliche Ursache des Abschmelzens der Gletscher angenommen werden.

#### **Nordpatagonisches Eisfeld**

Das Nordpatagonische Eisfeld erstreckt sich über eine N-S-Entfernung von 125 km bei einer maximalen W-O-Ausdehnung von 71 km. Die höchste Erhebung ist der Mount San Valentin mit 4.032 m. Das Gebiet weist einen deutlichen Unterschied bei den Niederschlägen zwischen dem sehr regenreichen Westen und dem trockenen Osten auf. Die meisten Gletscher kalben in Süßwasserseen, nur wenige in Fjorde auf der Westseite.

In den letzten 60 Jahren zeigten die Gletscher einen deutlichen Schwund, der sich nach 1990 beschleunigte. Nach Auswertung von Satellitenbildern und Modelluntersuchungen über den Zeitraum von 1975 bis 2011 haben die Gletscher des Nordpatagonischen Eisfeldes insgesamt deutlich an Länge, Fläche und Dicke verloren. Der Flächenverlust betrug allein zwischen 2001 und 2011 50,6 km<sup>2</sup> bzw. 1,3% der Fläche von 2001. Einige Gletscher wie der HPN-1-Gletscher oder der Stef-

fen-Gletscher verloren sogar in diesem einen Jahrzehnt 3,2% bzw. 2,8% ihrer Fläche. Der Steffen-Gletscher gehörte mit einem Längenverlust von 1,6 km auch zu den Gletschern, die von 2001 bis 2011 am stärksten kürzer geworden sind, wobei er seine Rückzugsrate gegenüber den 20 Jahren davor mehr als verdoppelte. Bemerkenswert ist auch der Verlust an Gletscherdicke in der Ablationszone. Sie betrug im Zeitraum 2000-2005 im Mittel 2,6 m/Jahr, bei einzelnen Gletschern sogar 3-4 m/Jahr. Nur wenige Gletscher, die ausschließlich in der trockenen Osthälfte liegen, stagnierten (LÓPEZ & CASASSA 2011).

Eine Folge der Gletscherschmelze ist die Zunahme von Gletscherseen, deren Fläche sich von 4,2 km<sup>2</sup> auf 9,4 km<sup>2</sup> zwischen 2001 und 2011 mehr als verdoppelt hat. Damit hat sich für die Bevölkerung in den tiefer liegenden Gebieten auch die Gefahr von Hochwassern durch Gletscherseeausbrüche erhöht.

Der Hauptgrund für den Gletscherrückgang wird in der atmosphärischen Erwärmung gesehen (LOPEZ et al. 2010). Da einige Gletscher in Seen und Fjorden kalben, spielen auch die topographischen Bedingungen des Untergrunds der Gletscherzunge eine Rolle, die den Gletscherrückgang beschleunigen oder bremsen können. Nach KOPPEL et al. (2011), die den starken Massenverlust des San-Rafael-Gletschers im nördlichen Nordpatagonischen Eisfeld untersucht haben, war ein wesentlicher Grund auch ein Rückgang der Niederschläge um 13% zwischen 1976 und 2005.

#### **Südpatagonisches Eisfeld**

Im Südpatagonischen Eisfeld (*Abb. 4.10-9*) findet sich mit dem 1.265 km<sup>2</sup> großen Brüggen-Gletscher (auch Piox-Gletscher genannt) der größte Gletscher Südamerikas und außerhalb der Antarktis sogar der Südhalbkugel. Die meisten der auf der Ostseite der Anden liegenden Gletscher kalben in Süßwasserseen, zahlreiche Gletscher auf der Westseite dagegen in Fjorde. Auch die Gletscher im Südpatagonischen Eisfeld gingen insgesamt zurück. Vergleiche alter Karten mit Satellitenaufnahmen zeigen nach LOPEZ et al. (2010) bei der Mehrheit der untersuchten Gletscher des Südpatagonischen Eisfelds in den letzten Jahrzehnten eine deutliche Längenabnahme. Nur drei von 32 Gletschern wiesen im Zeitraum 1945-2005 Vorstöße zwischen 1,4 bis 3,8 km auf. Die restlichen Gletscher zogen sich um bis zu 10 km und mehr zurück. So verloren die Gletscher O'Higgins und der Jorge Montt 1945-2005 mit 11,6 km bzw. 10,5 km stark an Länge. Eine Ausnahme stellt jedoch der Brüggen-Gletscher dar. Er ist zwischen 1945 und 1976 um 8 km gewachsen, hat sich seitdem aber kaum verändert (LOPEZ et al. 2010). Der Grund könnte die Mündung in einen See sein, auf dem sich das schwimmende Gletschereis leichter aus-

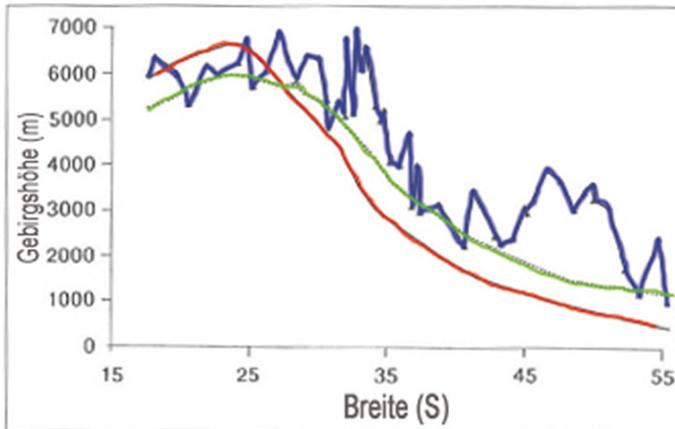


Abb. 4.10-7: Änderung der Gebirgshöhe zwischen 15° und 55° S (Südpeter bis Südargentinien/Südhile) sowie der Schneegrenze an der Ost- (grün) und Westseite der Anden (rot) (aus HAEBERLI et al. 1998).



Abb. 4.4-8: Die drei großen Gletscherfelder (grün) in den Süd-Anden von Norden nach Süden: Nordpatagonisches Eisfeld, Südpatagonisches Eisfeld, das Eisfeld der Cordillera Darwin auf Feuerland. Quelle: U.S. Geological Survey, Department of the Interior (1999): <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/chile-arg/wet/historic.html>; Copyright: U.S. public domain.

dehnen konnte (U.S. GEOLOGICAL SURVEY 1999).

Das Südpatagonische Eisfeld weist nach Satellitendaten in den letzten Jahrzehnten außerdem deutliche Flächenverluste auf. So reduzierte sich die Gesamtfläche zwischen 1985 und 2009 um ca. 420 km<sup>2</sup> bzw. ca. 3% (WHITE & COPLAND 2013). Messungen mithilfe von Satelliten und Modellierungen lassen auch auf einen Massenverlust der südpatagonischen Gletscher schließen, der in jüngster Zeit wahrscheinlich noch zugenommen hat.

Während zwischen 1975 und 2000 ein Verlust des Eisvolumens von ca. 16 km<sup>3</sup>/Jahr angenommen wird, liegt der Volumenverlust zwischen 2000 und 2011 bei ca. 22 km<sup>3</sup>/Jahr (SCHAEFER et al. 2015). Die Daten sind allerdings mit großen Unsicherheiten behaftet, vor allem weil die Dichte des Eises und die Mächtigkeit an der Gletscherfront weitgehend unbekannt sind.

Der Hauptgrund für diesen Massenverlust wird von SCHAEFER et al. (2015) im Kalben der zahlreichen in Seen und Fjorde mündenden Gletscher gesehen, was durch Geschwindigkeitsmessungen an den Gletschern teilweise bestätigt wurde. Andere Forscher machen für den Eisverlust vor allem eine Temperaturzunahme von 0,12°C/Jahrzehnt seit 1950 verantwortlich, verbunden mit einem späteren Winter- und früheren Frühjahrsbeginn sowie einer Verringerung des Schneeanteils der Niederschläge (WHITE & COPLAND 2013).

**Eisfeld der Cordillera Darwin**

Das Eisfeld der Cordillera Darwin liegt am südlichsten Ende der Anden auf der Insel Feuerland. Es wird beherrscht von zwei Berggipfeln, dem Mount Darwin mit 2.469 m Höhe und dem Mount Sarmiento mit 2.300 m. Die Ost-West-Ausdehnung beträgt etwa 200 km, die Nord-Süd-Ausdehnung 50 km. Die Niederschläge im Winter fallen hauptsächlich über den westlichen und

südlichen Gletschern, während es im Norden und Osten trockener und wärmer ist. Wegen der schwierigen Zugänglichkeit und des rauen Wetters ist das Eisfeld noch wenig untersucht. Zwischen 2001 und 2011 hat das Eisfeld der Cordillera Darwin nach MELKONIAN et al. (2013) 3,9 Gigatonnen an Masse pro Jahr verloren. Das entspricht einem Volumenverlust von 4,2 km<sup>3</sup> und einem Meeresspiegelanstieg von 0,01 mm pro Jahr. Dabei waren die Verluste auf der trockenen Nordseite des Eisfeldes fast doppelt so groß wie auf der Südseite. Bei vielen Gletschern des Eisfeldes konnte auch eine Zunahme der

Abflussgeschwindigkeit festgestellt werden. Gut untersucht wurde dafür der mit einer Fläche von 133 km<sup>2</sup> größte Gletscher des Eisfeldes, der auf der Nordost-Seite liegende Marinelli-Gletscher, dessen Frontgeschwindigkeit von 7,5 m am Tag im Jahre 2003 auf 10 m pro Tag 2011 zugenommen hat. Gleichzeitig hat sich der Marinelli-Gletscher um 0,4 km pro Jahr zurückgezogen. Der Eisverlust kann den abnehmenden Niederschlägen und der Erwärmung der Atmosphäre sowie der dynamischen Instabilität des größten Gletschers des Eisfeldes, des Marinelli-Gletschers, zugeschrieben werden. Genauer betrachtet haben die Niederschläge vor allem auf der Nordseite ab-, auf der Südseite dagegen etwas zugenommen. Eine Ausnahme stellt der 64 km<sup>2</sup> große und in einen Fjord mündende Garibaldi-Gletscher dar (Abb. 4.10-10), der von 2002 bis 2011 um über 1 km vorgestoßen ist, seine Ausdehnung von 1945 aber nicht erreicht hat. Im Sommer 2007 hat das Wachstum zur Zerstörung von Bäumen und zu einem häufigen Kalben geführt. Die Ursachen sind nicht endgültig geklärt. Möglicherweise spielt die Topographie des Untergrunds eine Rolle, z.B. ein flacher Fjord und Unterwasser-Moränen, die das Kalben abgebremst haben (MELKONIAN et al. 2013).

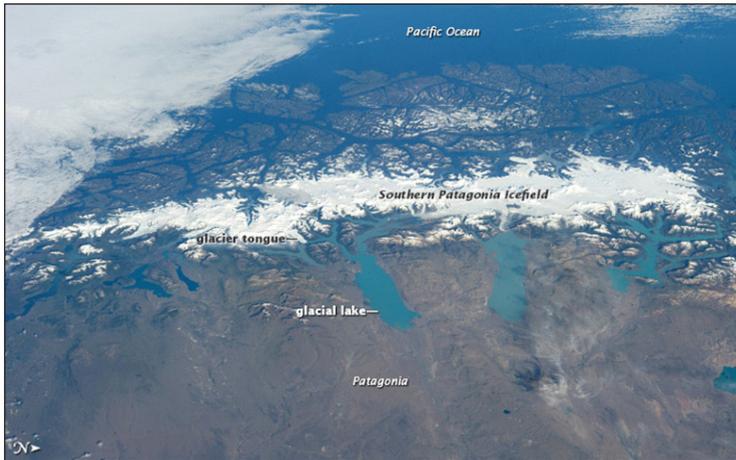


Abb. 4.4-9: Satellitenfoto des Südpatagonischen Eisfeldes von Osten Richtung Pazifik gesehen. Quelle: [http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83249&src=eoaiotd:public\\_domain](http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=83249&src=eoaiotd:public_domain).

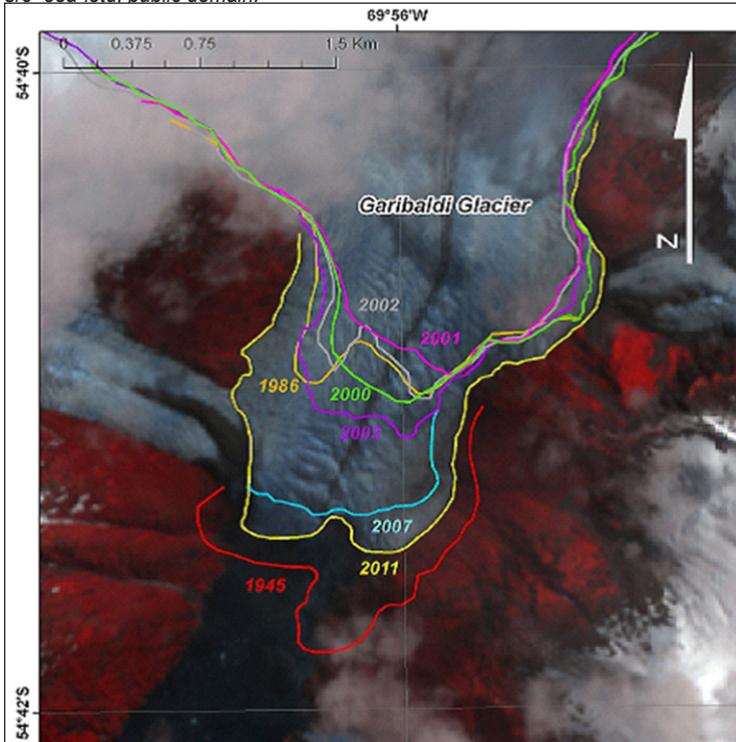


Abb. 4.4-10: Änderungen der Gletscherfront des Garibaldi-Gletschers. Quelle: MELKONIAN et al. (2013), © Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.

## SCHLUSSBETRACHTUNG

Die Erfolge des Klimaschutzes sind trotz der Bemühungen und Empfehlungen der Wissenschaft bisher sehr bescheiden geblieben. Das Beispiel der tropischen Gletscher zeigt deutlich, welche Folgen zu erwarten sind, wenn die Erderwärmung nicht auf ein erträgliches Niveau gestoppt wird. Die Gletscher sind vor allem zur Wasserversorgung der Städte von großer Bedeutung. An der perua-

nischen Küste, wo Zweidrittel der Bevölkerung leben, fällt weniger als 50 mm Regen pro Jahr. Die Wasserversorgung hängt hauptsächlich von den Gletschern und Niederschlägen ab. In La Paz und El Alto (Bolivien) leben ca. 2 Mio. Menschen; man schätzt dort, dass 15% des Wassers im Jahresdurchschnitt aus den Gletschern stammen. Während der Trockenzeit steigt dieser Wert auf 30%. Hinzu kommt die Bedeutung der Gletscher für die Landwirtschaft, die Energieerzeugung und die Bildung des Grundwassers.

## LITERATUR

- BRAUN, C. & M. BEZADA (2013): The History and Disappearance of Glaciers in Venezuela, *Journal of Latin America Geography* 12, 85-124, 10.1353/lag.2013.0016.
- FRANCOU, B., RABATEL, A., SORUCO, A., SICART, J.E., SILVESTRE, E.E., GINOT, P., CÁCERES, B., CONDOM, T., VILLACIS, M., CEBALLOS, J.L., LEHMANN, B., ANTHELME, F., DANGLES, O., GOMEZ, J., FAVIER, V., MAISINCHO, L., JOMELLI, V., VUILLE, M., WAGNON, P., LEJEUNE, Y., RAMALLO, C., & MENDOZA, J. (2013): Glaciares de los Andes Tropicales víctimas del Cambio Climático. Comunidad Andina. Dr. Bernard Francou (Great Ice-IRD). 100 pp.
- HAEBERLI, W., M. HOELZLE & S. SUTER (eds.) (1998): Into the second century of worldwide glacier monitoring prospects and strategies. A contribution to the International Hydrological Programme (IHP) and the Global Environment Monitoring System (GEMS). Prepared by the World Glacier Monitoring Services. 56. Studies and reports in hydrology. Paris-France, UNESCO.
- IDEAM, Glaciares de Colombia, más que montañas con hielo. Bogotá, D.C., 344 pp., 2012.
- 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 (2013): Climate Change 2013, Working Group I: The Science of Climate Change, 14.4.2
- KASER G. & H. ÖSMASTON (2003): Tropical Glaciers. Cambridge University Press. 207 pp.
- KOPPES, M., H. CONWAY, L.A. RASMUSSEN, and M. CHERNOS (2011): Deriving mass balance and calving variations from reanalysis data and sparse observations, *Glacier San Rafael, northern Patagonia, 1950-2005*, *The Cryosphere*, 5, 791-808, 2011
- LOPEZ, P., P. CHEVALLIER, V. FAVIER, B. POUYAUD, F. ORDENES, & J. OERLEMANS et al. (2010): A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America, *Global and Planetary Change* 71, 85-108
- LÓPEZ, P & G. CASASSA (2011): Recent acceleration of ice loss in the Northern Patagonia Icefield based on an updated decennial evolution, *The Cryosphere Discussion*, 5, 3323-3381
- MELKONIAN, A.K., M. J. WILLIS, M. E. PRITCHARD, A. RIVERA, F. BOWN & S. A. BERNSTEIN (2013): Satellite-derived volume loss rates and glacier speeds for the Cordillera Darwin Icefield, Chile, *The Cryosphere*, 7, 823-839, doi:10.5194/tc-7-823-2013
- MORALES-ARNAO, B. & S. HASTENRATH (1998): Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - Glaciers of South America-Glaciers of Perú - With sections on the Cordillera Blanca on Landsat Imagery and Quelccaya Ice Cap. Wis. 53706 U.S.A. U.S. Geological Survey, U.S. Department HYPERLINK "http://www.doi.gov/" of the Interior.
- PAUL, F. & N. MÖLG (2014): Hasty retreat of glaciers in northern Patagonia from 1985 to 2011, *Journal of Glaciology*, Vol. 60, 1033-1043, doi: 10.3189/2014JoG14J104
- POVEDA, G. & K. PINEDA (2009): Reassessment of Colombia's tropical glaciers retreat rates: are they bound to disappear during the 2010-2020 decade?, *Adv. Geosci.*, 22, 107-116
- RABATEL, A., FRANCOU, B., SORUCO, A., GOMEZ, J., CÁCERES, B., CEBALLOS, J. L., BASANTES, R., VUILLE, M., SICART, J.-E., HUGGEL, C., SCHEEL, M., LEJEUNE, Y., ARNAUD, Y., COLLET, M., CONDOM, T., CONSOLI, G., FAVIER, V., JOMELLI, V., GALARRAGA, R., GINOT, P., MAISINCHO, L., MENDOZA, J., MÈNÉGOZ, M., RAMIREZ, E., RIBSTEIN, P., SUAREZ, W., VILLACIS, M. & 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.
- SALZMANN, N., C. HUGGEL, M. ROHRER, W. SILVERIO, B. G. MARK, P. BURNS, AND C. PORTOCARRERO (2013): Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes, *The Cryosphere*, 7, 103–118, doi:10.5194/tc-7-103-2013
- SCHAEFER, M., H. MACHGUTH, M. FALVEY, G. CASASSA & E. RIGNOT (2015): Quantifying mass balance processes on the Southern Patagonia Icefield, *The Cryosphere*, 9, 25-35, doi:10.5194/tc-9-25-2015.
- SINGH, V. P., P. SINGH & HARITASHYA (2014): Encyclopedia of Snow, Ice and Glaciers. ISBN: 978-90-481-2641-5 - Springer Link. 1235 pp.
- SORUCO, A., C. VINCENT B. FRANCOU, P. RIBSTEIN, T. BERGER, J.E. SICART, P. WAGNON, Y. ARNAUD, V. FAVIER, Y. LEJEUNE (2009): Mass balance of Glacier Zongo, Bolivia, between 1956 and 2006, using glaciological, hydrological and geodetic methods. *Annals of Glaciology*, 50, 1–8
- THOMPSON, L. G., E. MOSLEY, M. E. DAVIS, V. S. ZAGORODNOV, I. M. HOWAT, V. N. MIKHALENKO & P.-N. LIN (2013): Annually Resolved Ice Core Records of Tropical Climate Variability over the Past ~1800 Years. *Science*, 340 (6135): 945-950.
- UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos) (2014): Inventario de Glaciares y Lagunas. 36 pp. www.ana.gob.pe.
- U.S. Geological Survey, Department of the Interior (1999): Historic Fluctuations of Outlet Glaciers from the Patagonian Ice Fields. <http://pubs.usgs.gov/pp/p1386i/chile-arg/wet/historic.html>
- WGMS (2007): Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 9 (2004-2005) A contribution to the Global Terrestrial Network for Glaciers (GTN-G) as part of the Global Terrestrial/Climate Observing System (GTOS/GCOS), the Division of Early Warning and Assessment and the Global Environment Outlook as part of the United Nations Environment Programme (DEWA and GEO, UNEP) and the International Hydrological Programme (IHP, UNESCO). Compiled by the World Glacier Monitoring Service (WGMS). HAEBERLI, W., M. HOELZLE & M. ZEMP (eds).
- WGMS (2013): Glacier Mass Balance Bulletin - Bulletin No. 12 (2010-2011) A contribution to the Global Terrestrial Network for Glaciers (GTN-G) as part of the Global Terrestrial/Climate Observing System (GTOS/GCOS), the Division of Early Warning and Assessment and the Global Environment Outlook as part of the United Nations Environment Programme (DEWA and GEO, UNEP) and the International Hydrological Programme (IHP, UNESCO). Compiled by the World Glacier Monitoring Service (WGMS). Michael Zemp, M., S. U. Nussbaumer, K. Naegeli, I. Gärtner-Roer, F. P., M. Hoelzle & W. Haeberli (eds).
- WHITE, A. & L. COPLAND (2013): Spatial and temporal variations of glacier extent across the Southern Patagonian Icefield since the 1970s, *The Cryosphere Discussions*, 7, 1-34

## Kontakt:

Dr. José L. Lozán.

Dr. Dieter Kasang (DKRZ)

Universität Hamburg - Wissenschaftliche Auswertungen  
Lozan@uni-hamburg.de

Lozán, J. L. & D. Kasang (2015): Gletscher Südamerikas. In: Lozán, J.L., Grassl, H., Kasang, D. & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 164-174. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.25