

## 2.13 Über die Auswirkungen des Klimawandels in den Gebirgsregionen

JOSÉ L. LOZÁN

**Zusammenfassung:** Die Lufttemperatur nimmt in den meisten Gebirgen stärker als im globalen Durchschnitt zu. Mit einigen Ausnahmen verlieren die Gebirgsgletscher weltweit an Fläche, Länge und Volumen. In den ariden und semi-ariden Regionen sind viele kleine und mittlere Gebirgsgletscher bereits verschwunden. Deren Flüsse führen daher nur während der Regenzeit Wasser. Dadurch stehen diese Länder bei der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser vor einer großen Herausforderung. Großräumige Schwankungen des Monsuns infolge der Erderwärmung könnten regional weitreichende Auswirkungen haben. Betroffen können Flüsse wie Brahmaputra, Indus und Ganges sowie Yangtze, Irawadi, Mekong und Gelber Fluss sein, die in den Hochgebirgen Asiens entspringen, mehr als eine Milliarde Menschen mit Trinkwasser versorgen. Auch Europa ist bedroht. Die Alpengletscher verloren zwischen 1850 und 1975 fast die Hälfte ihres Volumens. Seit 2000 betragen die jährlichen Verluste 2–3% des verbliebenen Eisvolumens. Die Alpengletscher dürften innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf kümmerliche Reste verschwunden sein. Damit wären auch Kraftwerke und der Schiffsverkehr sowie die Industrie und Landwirtschaft betroffen. Mit der Erderwärmung ändern Pflanzen und Tiere ihre Verbreitungsgrenzen. Mit diesem Prozess ergibt sich ein hoher Konkurrenzdruck zwischen den Arten. Vor allem langsam wachsende Gebirgspflanzen stehen zunehmend unter einem steigenden physiologischen Stress. Studien anhand von Modellen deuten auf einen starken Habitatverlust und einen Rückgang der Artenvielfalt hin. Auch die Häufigkeit der Wetterextreme wie Starkregen mit dem Klimawandel zeigt eine steigende Tendenz und die Gefahr von Murgängen und Erdbeben in den Bergen nimmt zu. Sie verursachen oft große Schäden mit vielen Toten. Beispielsweise tötete am 14.5.2014 ein Erdbeben über 2100 Menschen in Afghanistan.

**Summary:** Air temperature in most mountain regions increases above the global average. With some exceptions, the world's mountain glaciers are losing their ice mass. In the arid and semi-arid regions, many small and medium-sized mountain glaciers have already disappeared and therefore their rivers carry water only during the rainy season. As a result, these countries are faced with a big challenge in supplying the population with drinking water. The rivers Brahmaputra, Indus, Ganges Yangtze, Irrawaddy, Mekong and Yellow River, which originate from the high mountains of Asia, supplied more than one billion people with drinking water. Potential fluctuations of the monsoon as consequence of the global warming could have far-reaching implications for these rivers. Europe is also threatened. Alpine glaciers lost from 1850 to 1975, almost half of their volume, and since 2000, the annual loss amounts 2-3% of the remaining ice volume. Within the next few decades, only small remnants of the Alpine glaciers are probably to remain. Power plants and waterways as well as industry and agriculture would be also affected. With global warming plants and animals change their distribution limits. This process results in a high pressure of competition between species. Especially slow-growing alpine plants are increasingly under a physiological stress. Projections based on models indicate a strong habitat loss and a decline in biodiversity. Since the frequency of extreme weather events such as heavy rainfall shows with climate change an upward trend, the risk of debris flows and landslides in the mountains increase. They often cause great damage with many casualties. For example, a landslide killed on 14.05.2014 over 2,100 people in Afghanistan.

Die Zunahme der Lufttemperatur seit 1900 ist in den meisten Gebirgen höher, oft fast doppelt so hoch wie im globalen Durchschnitt. Die Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplung wird als eine wesentliche Ursache für die verstärkte Erwärmung sowohl in den Gebirgs- als auch in den Polarregionen genannt. Denn Schnee- und Eisflächen streuen einen Großteil der einfallenden Sonnenstrahlung zurück ins Weltall. Schmelzen sie ab, dann sinkt die Rückstreuung deutlich und die Region erwärmt sich überdurchschnittlich, was zu weiterem Abschmelzen führt.

Fast alle Gebirgsgletscher verlieren gegenwärtig an Massen und auch der Schnee bleibt in den meisten Regionen kürzere Zeit liegen. Der dadurch frei werdende viel dunklere Boden absorbiert weit mehr Sonnenstrahlung und treibt die Erwärmung weiter voran. Gebirgsgletscher, die je nach Größe in Jahren bis Jahrzehnten auf veränderten Massenhaushalt durch Vorstoß oder Rückzug reagieren, sind also gute Anzeiger von Klimaänderungen.

### Schnee, Gletscher und Permafrost

Die Niederschläge fallen in den Hochgebirgen vor allem in den kalten Jahreszeiten als Schnee und dieser prägt das Bild der gebirgigen Landschaft maßgeblich.

<sup>1</sup> Die Albedo ist das Rückstrahlvermögen von Oberflächen. Sie wird bestimmt durch den Quotienten aus reflektierter zu einfallender Lichtmenge.

Nur wenn der Schnee über das ganze Jahr liegen bleibt und zu Firn bzw. über mehrere Jahre zu Eis wird, bilden sich Gletscher, die infolge der Schwerkraft in tiefere Lagen zu fließen beginnen, in denen die Abschmelzvorgänge überwiegen. Die Höhenlage, in der sich ein Gleichgewicht zwischen Zunahme und Abschmelzen einstellt, wird Gleichgewichtslinie genannt.

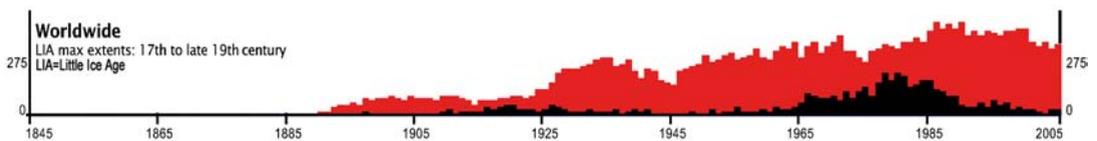
Mit wenigen Ausnahmen ziehen sich zurzeit infolge der anthropogenen Erderwärmung die Gebirgsgletscher zurück; sie verlieren an Fläche, Länge und Volumen (*Abb. 2.13-1*). Beispielsweise haben die Alpengletscher zwischen 1850 und 1975 fast die Hälfte ihres Volumens verloren und zwischen 1975 und 2000 ist im Mittel jährlich 1% des verbliebenen Eisvolumens weggeschmolzen (HAEBERLI & MAISCH 2007). Seit 2000 sind die jährlichen Verluste auf 2–3% gestiegen. Im heißen Sommer 2003 betrug die Verluste sogar rund 8%. Die Prognose für die nächsten Jahrzehnte sieht nicht besser aus; selbst bei einer günstigen Klimaentwicklung (Stabilisierung bei einer mittleren globalen Erwärmung von 2 °C) dürften die Alpengletscher innerhalb weniger Jahrzehnte bis auf kümmerliche Reste verschwunden sein (HAEBERLI & MAISCH 2007). Die systematische Beobachtung von Gletschern durch den World Glacier Monitoring Service (WGMS) ist daher von großer Bedeutung, da die Gletscher in vielen Regionen sehr wichtig für die Wasserversorgung der Bevölkerung, Landwirtschaft und Industrie sowie Stromproduktion sind. Ferner lässt der Rückgang der Gletscher den globalen Meeresspiegel ansteigen. Das globale Monitoring der Gletscher besteht heute in der Kombination aus Massenbilanzmessungen für über 50 weltweit verteilte Gletscher mit Längenmessungen an mehreren hundert Gletschern, die leicht zugänglich sind, und mit der Erfassung von Flächenänderung von mehreren tausend Gletschern anhand von Satellitenbildern. In *Abb. 2.13-2* werden vorläufige Daten aus dem hydrologischen Jahr 2012 aus den Massenbilanzmessungen gezeigt. Dabei werden die Massenbilanzmessungen von kontinuierlich beobachteten 37 Referenzgletschern aus 10 Regionen und aller gemeldeten Gletscher (120) verglichen. Daraus ist ersichtlich, dass

sich die Schrumpfung fortsetzt. Die mittleren Eisverluste während der Jahre 1996–2005 entsprechen etwa 0,58 Meter Wasser Äquivalent (m w. e.); diese sind zweimal größer als die Verluste während der Jahre 1986–1995 (0,25 m w. e.) und viermal größer als die während der Zeit 1976–1985 (0,14 m w. e.). Insgesamt hat der summierte mittlere Verlust bei den Referenzgletschern in den letzten sechs Jahrzehnten schon über 20 m w. e. erreicht (ZEMP et al. 2008)

Schnee übt im Ökosystem verschiedene Funktionen aus. Aufgrund der im Schnee enthaltenen und schlecht wärmeleitenden Luft wirkt er wie eine Schutzdecke und verhindert, dass Pflanzen und Tiere unter der Schneedecke und im Boden im Winter erfrieren. Auch die Gletscher und der gefrorene Boden (Permafrost) werden durch den darüber liegenden Schnee vor rascher weiterer Abkühlung während der Wintermonate geschützt. Wenn Schnee lange Zeit über dem gefrorenen Boden liegt, ist die Temperatur unmittelbar über dem Boden höher als in der Luft.

Andererseits werden Siedlungen in den Tälern aber bei zu starken Schneefällen von Lawinen bedroht. Im Frühjahr schützt der noch liegende Schnee die Gletscher und den Permafrost vor dem Abschmelzen während der ersten warmen Tage. *Abb. 2.13-3* (oben) zeigt die Wechselwirkung zwischen Schnee, Gletschern und Permafrost mit den durch den Klimawandel betroffenen Aspekten. In *Abb. 2.13-3* (unten) wird versucht zu veranschaulichen, wie komplex die Zusammenhänge zwischen Mensch, Natur und Lebensraum im Hochgebirge als Folge des Klimawandels sein können (aus HAEBERLI & MAISCH 2007).

Dauerhaft gefrorene Böden (Permafrost) kommen nicht nur in Sibirien, Nordkanada und Alaska vor, sondern auch in der Hochebene von Tibet und an vielen anderen Stellen, z.B. oberhalb von 2.500 m in den Alpen. Mit der fortschreitenden Erderwärmung und einem langsamen Auftauen des Permafrosts werden die Berghänge eher instabil. Aus diesen Gründen wird in den Alpen die Temperatur im Permafrost durch ein Messnetz beobachtet. Als Permafrost werden nicht nur gefrorene feste Böden bezeichnet, sondern auch gefro-

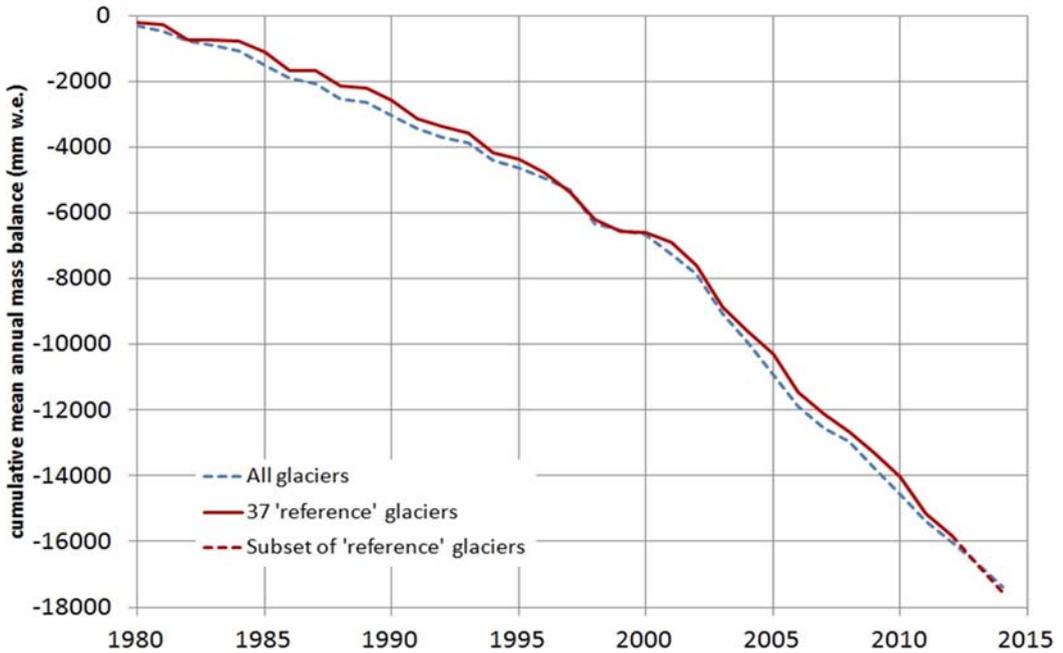


**Abb. 2.13-1:** Längenänderungen von Gletschern aus der ganzen Welt bis 2005. Die roten Säulen geben die Anzahl der schrumpfenden Gletscher an; die schwarzen weisen auf einen Vorstoß auf. Diese Abbildung enthält Informationen aus 30.420 Beobachtungen von Längenänderungen. Der Zeitunterschied zwischen Messung und Referenzjahr beträgt weniger als 4 Jahre. Die Abbildung ist auf der Grundlage der Datenanalyse von R. Prinz, Universität Innsbruck dargestellt. Daten aus WGMS. Mehr Details unter *Global Glacier Changes: Facts and figures* (<http://www.grid.unep.ch/glaciers/>).

renes Lockermaterial wie Schutt und Steine; sie enthalten manchmal mehr Eis als Gesteinsmaterial. Beim Abschmelzen dieser eisreichen Schutthalden verlieren sie ihren inneren Zusammenhalt und werden instabil. Die Temperatur in den gefrorenen Böden hängt wesentlich vom Jahresgang der Lufttemperatur ab, wodurch die Temperatur aber nur in den oberen 10 m im Verlauf

des Jahres schwankt. Wie mächtig der Permafrost sein kann, hängt stark von der Klimageschichte ab. In sehr kalten Regionen, z.B. der Brooks Range in Alaska, wo sehr wenig oder kaum Schnee fällt, kann der Boden bis in große Tiefen frieren.

Generell nimmt die Temperatur mit der Bodentiefe zu. Das Auftauen des Permafrost beginnt daher von un-



**Referenzgletscher (37) mit kontinuierlichen Massenbilanzmessungen seit 1980**

**Gletschergruppe**

- Alaska
- Pacific Coast Ranges
- Anden
- Kanadische Arktis
- Spitzbergen (Svalbard)
- Skandinavien

**Gletscher**

- Gulkana, Wolverine
- Place, South Cascade, Helm, Lemon Creek, Peyto
- Echaurren Norte
- Devon Ice Cap NW, Meighen Ice Cap, White
- Austre Broeggerbreen, Midtre Lovénbreen
- Engabreen, Alftobreen, Nigardsbreen, Grasubreen, Storbreen, Hellstugubreen, Hardangerjoekulen, Storglaciaeren
- Saint Sorlin, Sarennes, Argentière, Silvretta, Gries, Stubacher Sonn- blickees, Vernagtferner, Kesselwandferner, Hintereisferner, Caresèr
- Djankuat
- No. 125 (Vodopadniy), Maliy Aktru, Leviy Aktru
- Ts. Tuyuksuyskiy, Urumqi Glacier No.1

**Alpen**

- Kaukasus
- Altai
- Tien Shan

Der globale deutliche Dickenschwund in m w. e. (meter water equivalent) über die Periode 1980 bis 2013 bestätigt den fortschreitenden Klimaantrieb. Verglichen wird die Entwicklung von über 120 weltweit verteilten Gletschern (all glaciers) und die der Referenzgletscher (37). Aus WGMS (<http://www.wgms.ch/mbb/sum13.html>).

**Abb. 2.13-2:** Kumulierte mittlere Massenbilanz der Referenzgletscher mit kontinuierlichen Massenbilanzmessungen seit 1980, ab 2012: 37 Gletscher. Sie liegen in Nordamerika (10), Südamerika (1), Europa (20) und Zentralasien (6).

ten. Da der Wärmetransport innerhalb des gefrorenen Bodens sehr langsam stattfindet, ist auch das Auftauen ein sehr langsamer Prozess.

Seit 150 Jahren befinden sich die meisten Gletscher im Rückzug und hinterlassen Fels und Geröll. Die Vegetation rückt nur langsam nach.

### Wasserkreislauf

Auch im globalen Wasserkreislauf spielen die Gebirgsregionen eine wesentliche Rolle. Sie stellen den Ausgangspunkt der größten Flusssysteme dar. In Hochgebirgen fallen meist höhere Niederschläge, oft als Schnee, die Tage, Wochen, Monate und Jahre zurückgehalten werden. Sie stellen oft wichtige Wasserspeicher dar und liefern während der warmen und trockenen Monate Schmelzwasser, wenn das Wasser im Unterland knapp wird.

In den letzten Jahrzehnten hat man beispielsweise in den Alpen Veränderungen bezüglich der Verfügbarkeit des Schmelzwassers festgestellt. Dies beruht in erster Linie auf erhöhten Abschmelzvorgängen während der warmen Monate. Nach HAEBERLI & MAISCH (2007) und ESCHER-VETTER (2010) nimmt der Schnee im Herbst nur relativ wenig zugunsten der Regenfäl-

le ab. Hingegen bleibt die Schneedecke im Frühjahr infolge der Erderwärmung in den letzten Jahrzehnten zunehmend nur kürzere Zeit liegen. Die Ergebnisse der räumlich hochauflösenden Klimamodelle besagen, dass die Niederschläge in den Alpen im Winter eher zu- und im Sommer eher abnehmen werden. Bei weiterer Erderwärmung wäre die Folge, dass im Winter in hohen Lagen wie bisher viel und in Tallagen wenig Schnee liegt und dass im Sommer die Gletscher schneller abschmelzen werden, da kaum Niederschläge als Schnee fallen. Die Erderwärmung wirkt sich schneller auf »warme Gletscher« aus, deren Temperaturen auch im Inneren bei 0 °C liegen, als bei »kalten« Gletschern in sehr hohen Lagen der trockenen Gebiete. Um die erhöhten Schmelzvorgänge bei 1 °C Erwärmung insgesamt zu kompensieren, wären jährlich mehrere 100 mm mehr Niederschlag erforderlich, was eine drastische Veränderung bedeutete (HAEBERLI & MAISCH 2007).

In den semi-ariden tropischen und subtropischen Regionen sind die Gletscher für die Wasserversorgung von überragender Bedeutung. Dort herrscht ein ausgeprägter Wechsel zwischen Regen- und Trockenzeit. Dieser Kontrast kann durch die Schmelzprozesse in den Hochgebirgen gedämpft werden. Da die Erderwär-

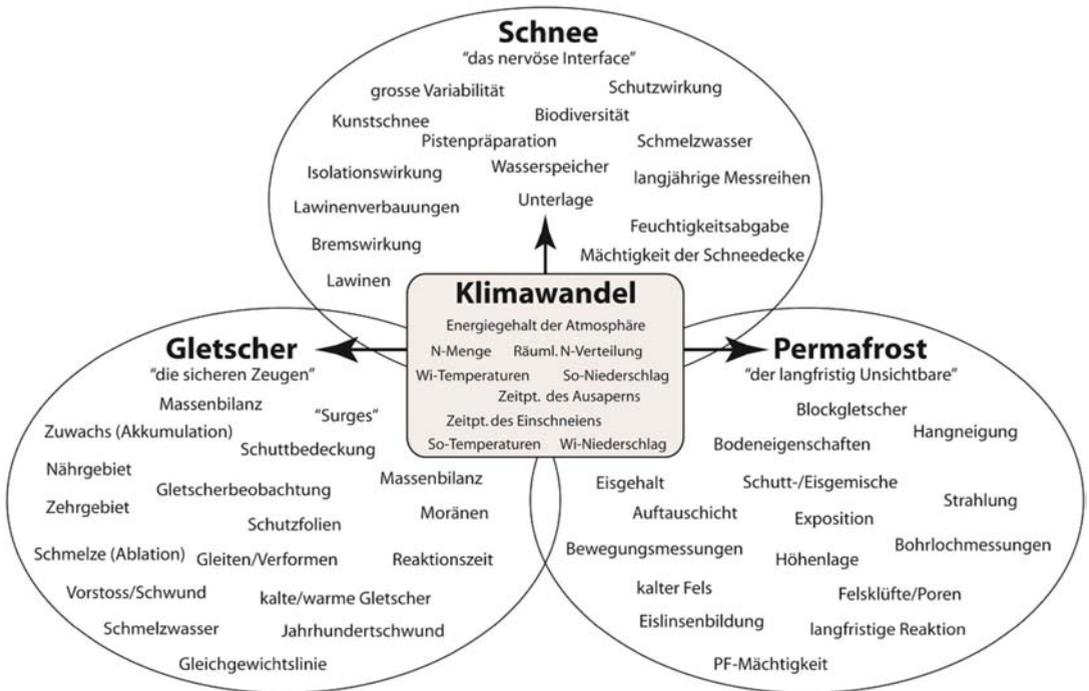


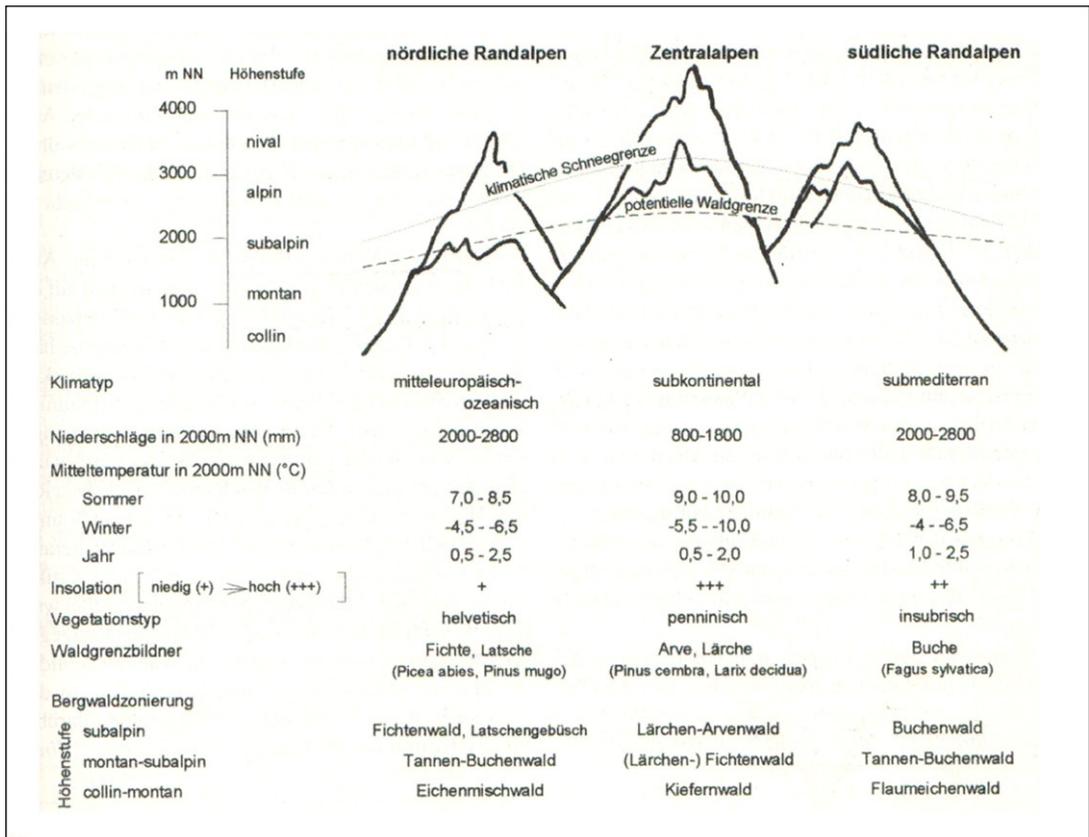
Abb. 2.13-3: Oben: Darstellung der Kryosphären-Elemente: Schnee - Gletscher - Permafrost, deren wichtigste Charakteristiken sowie die bei einem Klimawandel direkt oder indirekt betroffenen Aspekte (Aus Haeberli & Maisch 2007 mit freundlicher Genehmigung des Autors).

mung schon Jahrzehnte andauert, sind viele kleine und mittlere Gebirgsgletscher bereits verschwunden. Viele der kleinen lokalen Flüsse führen daher nur während der Regenzeit Wasser. Dadurch stehen diese Länder bei der Versorgung der Bevölkerung mit Trinkwasser vor einer großen Herausforderung. Dies ist besonders in den großen Städten während der trockenen Monate zunehmend schwierig. Wasser wird auch in der Industrie, Landwirtschaft, Vieh- und Fischzucht und für Wasserkraftwerke benötigt. Mit der erhöhten Trockenheit sinkt auch der Grundwasserspiegel. D.h. der Bedarf an Wasser steigt und damit auch der Konflikt um das knapp werdende Wasser.

In Asien befinden sich die höchsten Bergketten der Erde. Das Tibetische Hochland im Norden bis zum Himalaya im Süden und dem Karakorum im Westen umfasst die bedeutendsten Gebirge der Erde, da die von dort entspringenden Flüsse (Brahmaputra, Indus und

Ganges sowie Yangtse, Irawadi, Mekong und Gelber Fluss) mehr als eine Milliarde Menschen mit Trinkwasser versorgen. Veränderungen in dieser Region werden daher mit großen Sorgen betrachtet. Großräumige Schwankungen des Monsuns, die mit der Geographie der Region und der Erderwärmung eng verbunden sind, könnten weitreichende Auswirkungen für viele Länder Südasiens und Zentralasiens haben.

Insgesamt nehmen die Gebirgsregionen (Anden, Himalaya, Alpen und Rocky Mountains) ein Fünftel der kontinentalen Erdoberfläche ein; oft sind sie in den Tälern dicht besiedelt. Hinzu kommt, dass in vielen Regionen die Bevölkerung auch im tiefer liegenden Umland auf die Wasserversorgung aus den Gebirgen angewiesen ist. Für etwa die Hälfte der Weltbevölkerung bilden die Gebirgsregionen direkt oder indirekt die Lebensgrundlage.



**Abb.2.13-4:** Vergleichende Darstellung klimatischer und vegetationskundlicher Charakteristika entlang eines Querprofils durch die Alpen (generalisiert). Während das Klima in den nördlichen Randalpen etwas ozeanisch geprägt ist, zeigen die Zentralalpen ein subkontinentales Klima. Die Sonnenstrahlung (Insolation) ist intensiver und die Niederschläge sind geringer als in den nördlichen und südlichen Randalpen. Daraus resultieren wärmere Sommer und größere sommerliche Trockenheit sowie eine thermische Begünstigung für die Vegetation. Die Waldgrenze erreicht höhere Lagen (aus POTT et al. 2001).

## Pflanzen und Tiere

Ökologisch sind die Gebirgsregionen aufgrund der Höhenunterschiede durch eine Vielzahl kleinräumiger Klimata charakterisiert. Die enge Verbindung zwischen Vegetation und Klima erlaubt auf engstem Raum die Entwicklung einer sehr heterogenen Flora und Fauna mit einer hohen Artenvielfalt, die seit Jahrhunderten und Jahrtausenden an die Bedingungen angepasst sind. Als Folge der Erderwärmung wird daher das Ökosystem in den Gebirgen unverhältnismäßig stark beeinflusst. Die Schattenseite eines Gebirges ist bei gleicher Höhe deutlich kälter als die besonnte Seite. Dementsprechend ändern sich hier auch die klimatischen Bedingungen mit der Höhe ungleichmäßig. Abhängig von Temperatur, Niederschlag und Einstrahlung bildet sich eine Landschaft mit einem bestimmten Vegetationstyp (s. POTT et al. 2001). Die Höhenstufen werden oft in collin, montan, subalpin, alpin, subnival und nival unterteilt (Abb. 2.13-4).

Mit der Erderwärmung ändern Pflanzen und Tiere ihre Verbreitungsgrenzen. Da dieser Prozess je nach Art sehr unterschiedlich ist, ergibt sich ein hoher Konkurrenzdruck zwischen den Arten. Im Allgemeinen sind die »opportunistischen Arten« raschwüchsig und rücken schnell nach und die »Spezialisten«, wie die typischen Gebirgspflanzen, langsam wüchsig, kommen nur auf kleinen Flächen vor und rücken nur langsam nach. Sie stehen zunehmend unter einem steigenden physiologischen Stress. Studien anhand von Modellen deuten auf einen starken Habitatverlust und einen Rückgang der Artenvielfalt hin. Allerdings sind die Prozesse bei den Reaktionen der Pflanzen auf den Klimawandel sehr komplex. Eine umfassende Untersuchung am Tiroler Schrankogel im alpin-nivalen Ökotope (2.900–3.200 m) mit über 350 Beobachtungsstellen von je 1 m<sup>2</sup> ergaben im Zeitraum 1994–2004 eine Zunahme der alpinen Arten und eine Abnahme der subnivalen und nivalen Arten (Kältespezialisten). Die Analyse zeigt, dass die Kältespezialisten »von selbst« und nicht als Folge einer Verdrängung durch die alpinen Arten abnahmen. Die Gründe sind noch unklar (GRABHERR et al. 2014).

Veränderungen der Baum- und Waldgrenzen werden als Beweis für die Auswirkungen von Klimaänderungen in den Hochgebirgen betrachtet. Es ist aber in vielen Gebieten – wie den Alpen – aufgrund der dortigen Bewirtschaftungsaktivitäten schwierig, zwischen klimatischen und anderen Einflüssen zu trennen. HARSCH et al. (2009, 2014) untersuchten weltweit 166 Wälder unterschiedlicher Klimate und stellten fest, dass nicht alle die gleiche Reaktion gegenüber der Erderwärmung zeigen. 87 zeigten seit 1900 einen Anstieg der Baumgrenze, zwei eine Verlagerung nach unten und fast die Hälfte keine Änderung. Dies hängt nicht nur von der

herrschenden Baumart, sondern auch davon ab, ob die Erwärmung in der jeweiligen Region primär im Sommer oder im Winter stattfindet. Somit ist die Änderung von Waldgrenzen kein einheitlicher Prozess.

## Murgänge, Erdbeben und andere Gefahren

Regelmäßig entsteht durch die Frostwirkung in den Felswänden Schutt. Ferner werden durch Bewegung der Gletscher oder andere Erosionsprozesse große Gesteinsmassen frei. Bedingt durch ihre Steilheit ist besonders bei starken Niederschlägen der Abtrag in den Gebirgen erheblich. Da die Häufigkeit der Starkregen eine steigende Tendenz zeigt, nimmt die Gefahr von Murgängen in den Bergen zu. Als Murgang wird ein schnell talwärts fließender Strom aus Schlamm und Geröll bezeichnet. Sie verursachen aufgrund ihrer Fließgeschwindigkeit und Mächtigkeit oft große Schäden (Abb. 2.13-5).

Aber auch lang andauernder Regen kann einen Erdbeben (auch Hangrutsch oder Bergbruch genannt) auslösen. Es handelt sich dabei um ein Abgleiten großer Erd- und Gesteinsmassen meist geeigneter Bodenschichten, das durch langsames Eindringen des Regenwassers begünstigt wird. Die großen Schlammmassen können zu großen Sachschäden führen und für Menschen, Tiere und Natur in vieler Hinsicht eine Gefahr darstellen. In den letzten Jahren ereigneten sich in den gebirgigen Regionen der Welt ständig Erdbeben mit vielen Toten. Beispielsweise tötete am 14.5.2014 ein Erdbeben über 2100 Menschen in Afghanistan. Nach Einschätzung von Fachleuten kann ein Zusammenhang zwischen den häufigen Erdbeben und den vermehrten sintflutartigen Niederschlägen bestehen, die Folgen einer Intensivierung des globalen Wasserkreislaufs sein können (STOFFEL & HUGGEL 2012).

Neben Murgängen und Erdbeben treten in den Gebirgsregionen weitere Gefahren wie Lawinen, Stein- und Felschlag sowie Bergstürze und Hochwasser auf. Diese können sich einzeln oder in einer Kombination als Kettenreaktion ereignen. So kann das bergab transportierte Material ein Volumen von 100.000 bis 1.000.000 m<sup>3</sup> haben und in Seen abgelagert werden oder kleine Flüsse verstopfen. Bei deren Ausbruch können Murgänge, SchlammLawinen oder Hochwasserereignisse kurzfristig die Folge sein. Bei Kettenreaktionen wird die Wirkung einzelner Phänomene verstärkt. Manchmal werden solche Katastrophen auch durch Erdbeben oder Vulkanausbrüche ausgelöst. Beispielsweise wurde die Stadt Armero (Kolumbien) am 13. November 1985 durch eine SchlammLawine begraben, die durch den Ausbruch des Vulkans Nevado del Ruiz ausgelöst wurde. Über 22.000 Menschen starben dabei.

## Auswirkungen auf die Ökonomie der Gebirgsregionen

Die Erwärmung der Erdoberfläche und die damit verbundenen Umweltveränderungen haben zahlreiche regionale ökonomische Folgen. Beispielsweise kann eine große Anzahl der o.g. Gefahren (Murgänge, Lawinen, Hochwasser u.a.) zu bedeutenden volkswirtschaftlichen Schäden führen. So blieben in der Schweiz im Sommer 1987 nach schweren Unwettern wichtige Straßen- und Schienenverbindungen für längere Zeit unterbrochen. Das kann in der Zukunft häufiger auftreten, auch wenn in Schutzmaßnahmen investiert wird.

Die Veränderung des Wasserkreislaufes im Jahresgang fordert Anpassungsmaßnahmen bei der Stromerzeugung und Landwirtschaft, da im Sommer eine geringere Wassermenge zur Verfügung stehen wird. Auch der Rückgang des Permafrostes und die angestiegene Gefahr von Überschwemmung erfordern Maßnahmen zur Stärkung der Infrastruktur.

Die Erzeugung von Elektrizität durch Wasserkraft spielt in den Gebirgsregionen eine wichtige Rolle. Neuseeland gewinnt z.B. knapp 60% seiner elektrischen

Energie durch Wasserkraftwerke. Das schnelle Abschmelzen der Gletscher kann allerdings nur vorübergehend zu einer Erhöhung der Stromproduktion führen; die Überschwemmungen können jedoch Staudämme beschädigen.

In vielen Gebirgsregionen ist der Tourismus ein wichtiger Wirtschaftszweig. Die klimatischen Verhältnisse stellen einen wesentlichen Faktor dar; sie können sich sowohl fördernd als auch begrenzend auswirken. Es gibt also Gewinner und Verlierer. Für den Skitourismus im Mittel- und Hochgebirge ist eine Verschlechterung der Bedingungen bereits eingetreten und vielerorts zu erwarten. In den unteren Lagen sind die Aussichten für die Skifahrermöglichkeiten noch schlechter geworden, wodurch sich die Saison verkürzt hat. Die bereits heute vielfach praktizierte künstliche Beschneidung der Pisten dürfte teurer werden. Für das Wandern, Radfahren und Bergsteigen ergibt sich eine Verbesserung der Bedingungen, da mit einer Ausweitung der Saison zu rechnen ist, wobei eine zunehmende Wärmebelastung und Belästigung durch Insekten zu Einschränkungen führen können (siehe MATZARAKIS & TINZ 2014).



Abb. 2.13-5: Schutzmauer gegen Murgänge in Berggebieten in der Schweiz (Foto: C. Huggel)

## Schlussbetrachtung

Ein großes Problem der Zukunft wird die Wasserversorgung sein. Betroffen werden nicht nur aride und semi-aride Gebiete sein sondern auch Länder gemäßigter Regionen wie Deutschland. Infolge der zunehmenden Entgletscherung der Alpen können in wenigen Jahrzehnten nach Schneeschmelzen und geringeren Sommerniederschlägen wichtige Flüsse wie Rhein und Rhone weit niedrigere Spätsommerwasserstände haben. Damit würde auch der Schiffstransport stark behindert.

Die Situation in einigen Hochgebirgen kann sich in der Zukunft stark ändern. Der Mensch besiedelt seit frühen Zeiten die Gebirgsregionen und versucht durch Schutzmaßnahmen die Risiken in Grenzen zu halten. Dies wird bei weiterer Erwärmung infolge der Anhäufung von Wetterextremen immer schwieriger.

## Literatur

- BENISTON, M. & W. HAEBERLI (2001): Sensitivity of mountain regions to climate change. In: Lozán, J.L., H. Grassl & P. Hupfer (eds.) – Climate of the 21st Century: Changes and risks. Wissenschaftliche Auswertungen/Geo-Magazin Hamburg, 239-247.
- ESCHER-VETTER, H. (2011): Gebirgsgletscher und die Wasserversorgung. In: Lozán J. L., H. Graßl, P. Hupfer, L. Karbe & C.-D. Schönwiese (Hrsg.). WARNSIGNAL KLIMA: Genug Wasser für alle? 3. Auflage.
- GRABHERR, G. M. GOTTFRIED, H. PAULI, A. LAMPRECHT & S. NIESSNER (2014): Beobachtete und prognostizierte Veränderungen in der alpinen Lebewelt. In: Lozán et al. Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen. 2. Auflage. Kap. 2.10 in diesem Band.
- HARSCH, M.A., ZHOU, Y., LAMBERS, J. & M. KOT (2014): Keeping pace with climate change: stage-structured moving-habitat models. *The American Naturalist*. 184: 25-37.
- HARSCH, M.A., P. E. HULME, M. S. MCGLONE & R. P. DUNCAN (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*. 12: 1040–1049.
- HAEBERLI, W. & M. MAISCH (2007): Klimawandel im Hochgebirge. In: Endlicher, W. & F.-W. Gerstengarbe (Hrsg.): Der Klimawandel. Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. Berlin/Potsdam, S. 98-107.
- HAEBERLI, W., A. NOETZLI, L. ARENSON, R. DELALOYE, I. GÄRTNER-ROER, S. GRUBER, K. ISAKSEN, CHR. KNEISEL, M. KRAUTBLATTER & M. PHILLIPS (2010): Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology*, Vol. 56, No. 200:2043-2058
- HUGGEL, C., S. ALLEN, P. DELINE, L. FISCHER, J. NOETZLI & L. RAVANEL (2012): Ice thawing, mountains falling - are alpine rock slope failures increasing? The Geologists' Association & The Geological Society of London, Geology Today, Blackwell Publishing Ltd. Vol. 28: 3, May–June 2012.
- MATZARAKIS, A. & B. TINZ (2014): Tourismus an der Küste sowie in Mittel- und Hochgebirge – Gewinner und Verlierer. In: Lozán et al. Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere & Menschen. 2. Auflage. Kap 4.1 in diesem Band.
- POTT, R., A. BAUEROCHSE & O. KATENHUSEN (2001): Influence of climate change on the upper timber line in the Alps since the Last Glaciation. In: Lozán, J.L., H. Grassl & P. Hupfer (eds.) – Climate of the 21st Century: Changes and risks. Wissenschaftliche Auswertungen/Geo-Magazin Hamburg, 77-81.
- SEIZ, G. & N. FOPPA (2007): Nationales Klima-Beobachtungssystem (GCOS Schweiz). Publikation des Bundesamtes für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz und ProClim. 92 S.
- STOFFEL, M. & CHR. HUGGEL (2012): Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*. 36(3) 421–439.
- WGMS (2014): Glacier mass balance data 2012/2013 (<http://www.wgms.ch/mbb/sum13.html>).
- ZEMP, M., I. ROER, A. KÄÄB, M. HOELZLE, F. PAUL & W. HAEBERLI (2008): Global Glaciers Changes: Facts and figures. The United Nations Environment Programme (UNEP) - The World Glacier Monitoring Service (WGMS). Copyright © 2008 WGMS. ISBN: 978-92-807-2898-9.

### Kontakt:

Dr. José L. Lozán.  
Universität Hamburg - Wissenschaftliche Auswertungen  
Lozan@uni-hamburg.de