

Hochgebirge:

Definition, Bedeutung, Veränderungen und Gefahren

JOSÉ L. LOZÁN, SIEGMAR-W. BRECKLE, HEIDI ESCHER-VETTER, HARTMUT GRAßL & DIETER KASANG

Gebirge sind vielfältige Landschaftsformen, die nach Form, Alter und Entstehungsart in verschiedene Gebirgstypen eingeteilt werden können. Sie haben eine vielseitige Bedeutung für das Klima und die Biodiversität. Sie stellen Hindernisse für die Luftströmungen dar und haben erhebliche Auswirkungen auch auf die allgemeine atmosphärische Zirkulation und damit den weiträumigen Transport von Wärme und Wasserdampf. In Abhängigkeit von der Höhenlage entsteht in Hochgebirgen wegen der mittleren Temperaturabnahme mit der Höhe eine Vielzahl von Lebenszonen auf engem Raum, woraus eine außerordentlich hohe Biodiversität folgt. Wegen der höheren Niederschläge sind Gebirge für die Wasserversorgung der Niederungen von großer Bedeutung. Wegen der zunehmenden Erwärmung der unteren Atmosphäre ziehen sich mit wenigen Ausnahmen weltweit die Gletscher zurück und die Schneegrenze steigt an. Als Folge dieser Veränderungen nehmen die Naturgefahren zu. So bilden sich neue Gebirgsseen und die Gefahr eines See-Ausbruchs nimmt zu, wenn ein kontrollierbarer Abfluss fehlt. Die überdurchschnittliche Erwärmung in den Hochgebirgen bewirkt auch das Schwinden des Permafrosts, was oft zu einer größeren Instabilität von Felshängen und Gletschermoränen führt. Andere Naturereignisse wie Erdbeben und Starkniederschläge können sogar Bergstürze und Murgänge auslösen oder zumindest befördern.

Mountains: Definition, mountain types, importance, changes and hazards: *Mountains are especially diverse forms of landscape. According to their shape, age and origin they can be classified into different types. All high mountains have a strong influence on climate and biodiversity. As obstacles to air flow they have a strong and far reaching impact on general atmospheric circulation and thus on the long-range transport of heat and water vapor. Depending on the general decrease of temperature with height and on the overall height of a mountain, a large number of life zones close to each other arises, which results in an extraordinary biodiversity. Due to higher precipitation they also play an important role for the water supply of valleys and lowlands. With the warming of the lower atmosphere, glaciers retreat worldwide with a few exceptions and the snow line is moving upward. Also natural hazards increase due to these changes. Often new mountain lakes form and the risk of their outbreak increases if there is no runoff control. The above-average warming in most high mountain areas also causes the mountain permafrost to thaw, which can result in great instability of rocky slopes and glacial moraines. Earthquakes and heavy rainfall can even enhance events such as landslides and debris flows.*

Was sind Gebirge bzw. Hochgebirge?

Gebirge sind komplexe Landerhebungen der Erde. Gebirge stellen in der Regel eine Gruppe von Bergen dar, die auch als Gebirgszug oder Gebirgskette bezeichnet werden. Ein Gipfel ist der höchste Punkt eines Berges oder eines Gebirgszuges. Meist trägt ein Berg denselben Namen wie sein höchster Gipfel. Die meisten Berge haben mehrere, Gebirgszüge oft viele Gipfel. Nicht alle Gipfel haben Namen. In manchen Gebieten jedoch – wie in den Alpen – ist die Anzahl benannter Gipfel groß. Es wird manchmal zwischen Haupt-, Vor- und Nebengipfel unterschieden. Gebirgsmassive sind kompakte Berge, die sich von ihrer Umgebung relativ scharf abgrenzen; sie stellen also keine Gebirgskette dar (Abb. 1).

Für eine Ansammlung von Kleinerhebungen unter 200 m Höhe wird die Bezeichnung Hügelland ver-

wendet. In der Regel werden Erhebungen höher als 200 m als Mittelgebirge bezeichnet. In Europa heißen Gebirgsregionen mit einer Höhe über 1.500 m meist Hochgebirge. Es gibt aber mehrere Definitionen für Hochgebirge, die je nach Breitengraden unterschiedlich sind (s. BURGA et al. 2004). In Tab. 1 sind die höchsten Hochgebirge für alle sieben Kontinente zusammengestellt. Abhängig von der Auffassung über die Grenze Australiens zum asiatischen Kontinent kommen Puncak Jaya (Neuguinea) und Mount Kosciuszko (Australien) als der höchste Gipfel für den Kontinent Australien in Frage. Für Europa wird in der Literatur meist der Mt. Blanc als der höchste Berg genannt. Wird die Gebirgskette Kaukasus zu Europa gezählt, dann ist der Elbrus als der höchste Berg Europas zu betrachten. Nirgendwo auf der Erde gibt es so ausgedehnte und



Abb. 1: Kilimandscharo-Massiv mit seinen drei Gipfeln: Shira, Kibo und Mawenzi (von links nach rechts).

so hohe Hochgebirgslandschaften wie in der Hindukusch-Karakorum-Himalaya-Region in Asien. In dieser Region befinden sich alle 14 Achttausender der Erde: Zehn liegen im Himalaya und vier im angrenzenden Karakorum. Die längste Bergkette sind mit Abstand die Anden (7.500 km). Die Angabe in der Literatur über die amerikanischen Kordilleren, von Alaska bis nach Feuerland (Länge von 15.000 km), ist irreführend, da die Gebirgsketten in Südamerika, Mittelamerika und Nordamerika nicht zusammenhängend sind (s. Kap. 1.4 - in diesem Band).

Mit zunehmender Höhe entstehen bei Hochgebirgen vor allem infolge der Abnahme der Temperatur im Mittel mit 0,5 bis 0,6 K je 100 Höhenmeter spezielle geökologische Höhenstufen (Ökotope). *Abb. 2* zeigt die Vegetationshöhenstufen der Schweizer Alpen, die von der kollinen und montanen bis zur fast vegetationsfreien nivalen Höhenstufe reichen. Die Bezeichnung der Höhenstufen planar – kollin – montan – subalpin – alpin – nival stammt zwar ursprünglich aus den Alpen, wird aber heute weltweit angewandt. Die klimatischen und ökologischen Merkmale einzelner Höhenstufen können sich innerhalb eines Gebietes in Abhängigkeit von der Entfernung zum Meer ändern. Beispielsweise stellen in den nördlichen Randalpen (Klimatyp: mit-

teleuropäisch-ozeanisch) Fichte und Legföhre meistens die Waldgrenzbildner dar; in den Zentralalpen (Klimatyp: subkontinental) sind dagegen die Arve (Zirbelkiefer) und Lärche die Waldgrenzbildner. Verantwortlich für diese Unterschiede sind die höheren Niederschläge sowie kühlere Sommer und wärmere Winter in den nördlichen Randalpen. In ariden Regionen fehlen die Wälder und damit die montanen und subalpinen Wald-Höhenstufen, die zur Abgrenzung der unteren von der alpinen Stufe dienen. Dafür treten dann Gebirgshalbwüsten oder Gebirgswüsten auf. Im arktisch-borealen Bereich sind diese Hochgebirgsbedingungen schon bei geringer Meereshöhe erreicht, in subtropischen Zonen dagegen erst in mehreren Tausend Metern Höhe. In Spitzbergen liegt die alpine Höhenstufe quasi auf Meereshöhe, in Bolivien oder Tibet beginnt sie erst oberhalb etwa 4.500 m (*Abb. 3* und *4*).

Gebirgstypen

Gebirge lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien kennzeichnen. Es kann eine Einteilung nach dem Alter erfolgen (z.B. variszisch, Tertiär), nach den geomorphologischen Erscheinungsformen (Kammgebirge, Faltengebirge, vulkanisches Gebirge) oder auch nach

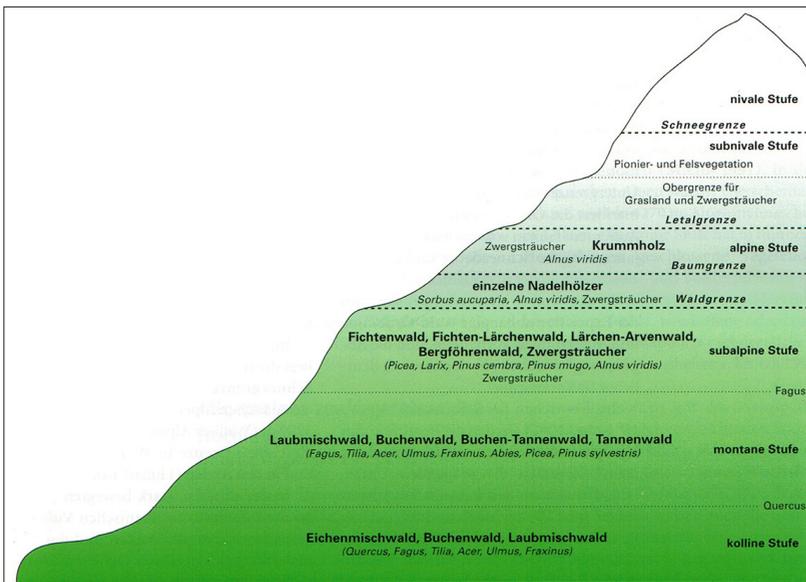


Abb. 2: Vegetationshöhenstufen der Schweizer Alpen (aus BURGA et al. 2004).

Tab. 1: Höchste Gipfel der Kontinente.

Kontinent	Gipfel	Höhe	Gebirge	Land
Afrika	KIBO	5.895 m	Kilimandscharo	Tansania
Antarktika	Mt. VINSON	4.892 m	Sentinel Range	
Asien	Mt. EVEREST	8.848 m	Himalaya	Nepal/China
Australien	PUNCAK JAYA	4.884 m	Sudirman-Gebirge	Indonesien
	Mt. KOSCIUSZKO	2.229 m	Great Dividing Range	Australien
Europa	Mt. BLANC	4.810 m	Alpen	Frankreich/Italien
	ELBRUS	5.642 m	Kaukasus	Russland
Nordamerika	DENALI	6.190 m	Alaskakette	USA
Südamerika	ACONCAGUA	6.951 m	Anden	Argentinien

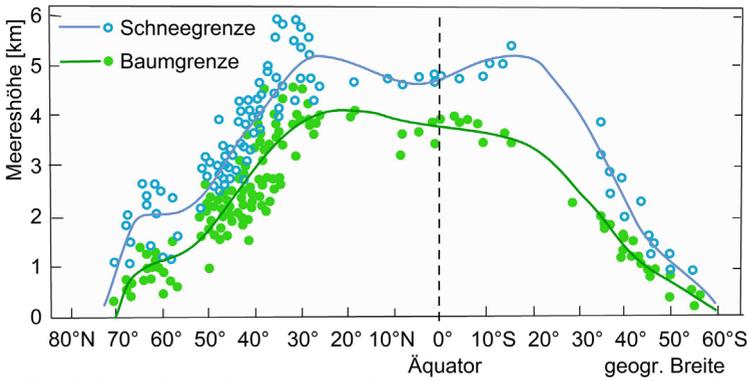


Abb. 3: Die Höhe der Baumgrenze und Schneegrenze auf unterschiedlicher Breitengradlage von der Arktis bis zur Antarktis, entnommen aus der globalen Übersicht von HERMES (1955), ergänzt und vervollständigt unter Verwendung von Daten aus verschiedenen anderen neueren Quellen (nach KÖRNER 1999).

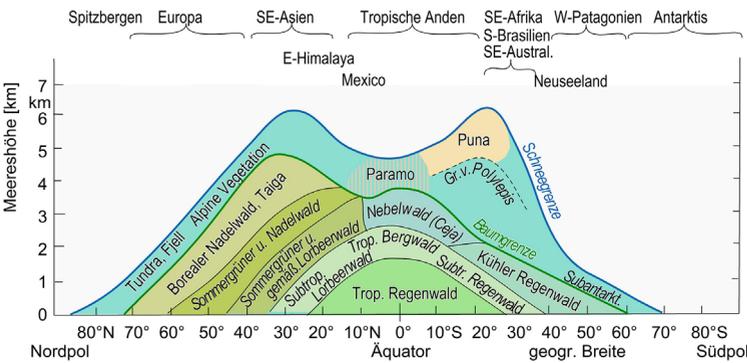


Abb. 4: Die wesentlichen Vegetationsformationen in globaler Sicht und ihre Verteilung entlang der Breitengrade über der Erde (in Anlehnung an TROLL 1948, verändert).

ökologischen Gesichtspunkten. Danach wären Hochgebirge solche, bei denen die Berge über die Wald- bzw. Baumgrenze hinausragen und die damit eine alpine Stufe aufweisen. Unter natürlichen Bedingungen liegt die Waldgrenze meist nur knapp unter der Baumgrenze.

Die Gebirgsbildung ist ein dynamischer Vorgang. Er vollzieht sich über geologisch lange Zeiträume. Junge Gebirge, wie die Alpen, heben sich noch immer. Ältere Gebirge, wie das Rheinische Schiefergebirge, ruhen meist und unterliegen im Wesentlichen nur noch der Erosion.

Geologisch-tektonisch kann man Gebirge in plattentektonischer Hinsicht nach ihrer Entstehung unterscheiden. Durch Kollision von Lithosphärenplatten entstehen herausgehobene Gebirgsketten, zum Teil mit kräftigen Gesteinsfaltungen und Deckenüberschiebungen (Alpen, Kaukasus, Himalaya). Bei der Kollision einer ozeanischen mit einer kontinentalen taucht die ozeanische Platte mit höherer Dichte unter die kontinentale ab (Subduktion). Dadurch bildet sich eine tiefe Meeressenke und der Rand der Kontinentalplatte wird gestaucht, oft gefaltet und auch angehoben. Dabei ist die vulkanische Aktivität besonders hoch (Anden). Bewegen sich ozeanische Platten auseinander, dann entstehen mittelozeanische Rücken aufgrund von aufsteigendem Erdmantelmagma. Sie können sich über Tausende von km unter Wasser erstrecken (Mittelatlantischer Rücken) und kommen nur gelegentlich an die Oberfläche (Azoren, Island). An bestimmten Hotspots entstehen außerdem auf ozeanischen Platten über ortsfesten Magmaquellen des Erdmantels oft hohe Vulkane. Es kommt dabei meist

zu einer Abfolge von unterschiedlich alten Vulkanen (Hawaii, Galapagos, Kanaren, Kapverden) (s. Kap. 1.4 - in diesem Band).

Globale Verteilung der Hochgebirge

Die Flächen, die die Hochgebirge auf der Erde einnehmen, sind stark von der Höhenlage bestimmt. Es ist einleuchtend, dass diese Fläche mit der Höhe auch stark abnimmt, dies ist in Abb. 5 für drei Gebirgsregionen gezeigt, wobei die 100% auf die Fläche oberhalb der Baumgrenze bezogen sind. Die prozentuale Abnahme mit zunehmender Höhe unterscheidet sich in den drei Gebirgsregionen deutlich. Die Gebirgsregionen sind über die ganze Erde sehr unterschiedlich verteilt. In Abb.6 sieht man für jeweils 10° geografische Breite, dass die Nordhemisphäre wesentlich mehr Gebirge aufweist; zwischen 30° und 40°N sind es 27% der Fläche. Besonders kennzeichnend ist für alle Gebirge die Region unmittelbar oberhalb der Baumgrenze. Diese Region steigt mit der Höhenlage der Baumgrenze an von Meereshöhe in der Arktis auf über 4.000 m am nördlichen Wendekreis (Abb. 3 und 7). In den Tropen liegt sie tiefer und bildet nur einen schmalen Gürtel, der von den südlichen Subtropen wieder fast bis auf Meereshöhe in der Subantarktis abfällt (Abb. 3 und 4).

Man erkennt aus den Einzelwerten in Abb. 3, dass es keine strikte Beziehung zwischen der Höhe der alpinen Baumgrenze und dem Breitengrad gibt, auch wenn man den thermischen Äquator berücksichtigt, der 6-7° nördlich des geografischen Äquators liegt. Es gibt einen steilen, fast linearen Anstieg der Baumgrenze in der gemäßigten Zone, das Maximum wird in den Subtropen bei 32°N erreicht bzw. bei 20°S. Die große Streuung der Werte auf der Nordhemisphäre hängt damit

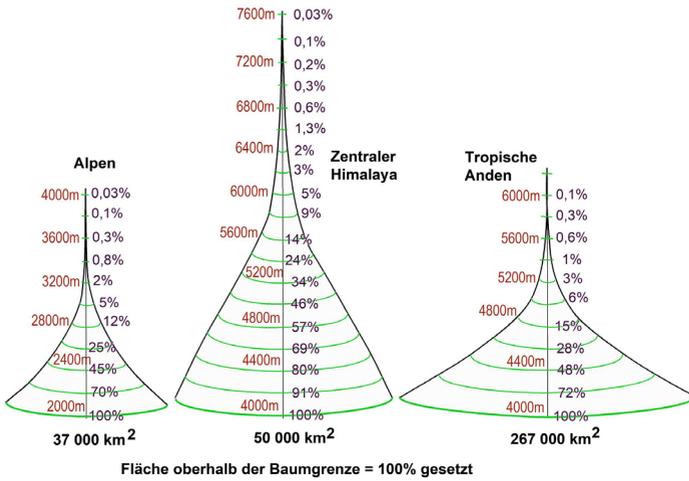


Abb. 5: Die starke Abnahme der Landfläche mit zunehmender Höhe oberhalb der Baumgrenze in 3 verschiedenen Bergregionen (die gesamte Landfläche oberhalb der Baumgrenze ist 100% gesetzt) (aus KÖRNER 2002).

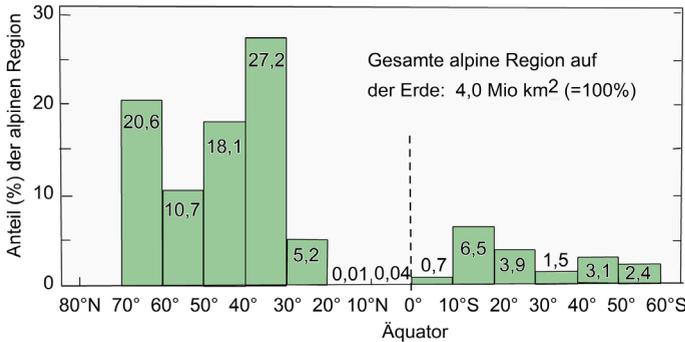


Abb. 6: Das Diagramm zeigt den relativen Beitrag jedes 10°-Breitenbereichs zur gesamten globalen Fläche, die in die alpine Lebenszone fällt (wie in Abb. 3 definiert). Aufgrund der unterschiedlichen Landmassenverteilung auf der Erde liegen 82% der alpinen Region auf der Nordhalbkugel. Die arktisch und subantarktisch alpinen Regionen machen 23% der globalen alpinen Landfläche aus, die kühl-gemäßigten alpinen Regionen 32%, die warm-gemäßigten bis nemoralen alpinen Regionen 29% und die subtropischen und tropischen alpinen Regionen zusammen 16% (KÖRNER 1995a). Die gesamte alpine Region auf der Erde wird mit etwa 4,0 Mio. km² angegeben. Setzt man diese gleich 100%, so ergeben sich die im Diagramm gezeigten Prozentwerte für die einzelnen 10°-Breitenbereiche. Auch daraus wird die sehr ungleiche Verteilung der Gebirgsregionen über die geographischen Breitenbereiche deutlich.

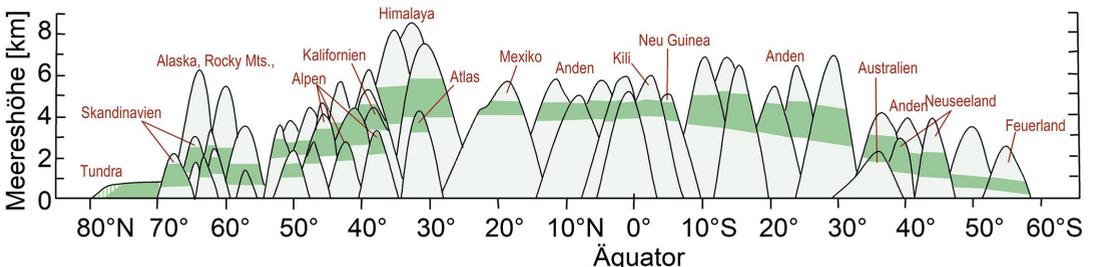


Abb. 7: Die mittleren Höhengrenzen der alpinen Region vereinfacht dargestellt über den ganzen Breitenbereich der Erde. Schraffiert der allmähliche Übergang der arktisch-alpinen Vegetation in arktische Gebirgstundra (nach KÖRNER 1999). Die alpine Region wird hier vereinfachend definiert als das baumlose Land oberhalb der Baumgrenze; in diesem Sinne bezieht sich alpin nicht nur auf den Höhengürtel in den Alpen, sondern gilt global (nach seiner indo-germanischen Bedeutung von »steilen Hängen«), mit »andin« und »afroalpin« als Synonyme. Die Hänge darunter gehören zum montanen Vegetationsgürtel.

zusammen, dass nicht zwischen ozeanischen (erniedrigte Baumgrenzen) und kontinentalen Gebirgen (erhöhte Baumgrenzen) unterschieden wurde. Ein Großteil der Bergregionen ist eher kontinental geprägt. Bei 40°N liegt die Baumgrenze zwischen 2.100 und 3.700m Höhe. In den Alpen bei 47°N variiert die Baumgrenze zwischen 1.600 und 2.300m Höhe. Die Baumgrenze verläuft annähernd parallel zur Höhe der permanenten Schneegrenze (nivale Stufe), die ja stärker physikalisch bestimmt ist. Sowohl für Baum- als auch Schneegrenze ist die Temperatur die wesentliche Steuergröße. Die Baumgrenze liegt bei einer mittleren Temperatur von 6°C für die Wachstumsperiode, die Schneegrenze bei einer Jahresmitteltemperatur von 0°C. Der Abstand zwischen Baumgrenze und Schneegrenze erreicht ein Maximum in den Subtropen (Abb. 4 und 7), kleinere Werte in der gemäßigten Zone und in den inneren Tropen. Eine mittlere Temperatur von 6°C für die Wachstumsperiode ist eine gute Näherung für die mittlere Lufttemperatur an der Baumgrenze, auch wenn heute oft 6,5°C gemessen werden, weil wegen des raschen weltweiten Klimawandels und des langsamen Wachstums eines Baumes der Anstieg der Baumgrenze verzögert ist. Langfristig wird die Baumgrenze ansteigen, aber es dauert Jahrhunderte bis ein neues Gleichgewicht erreicht sein wird. Gegenwärtig beobachtet man breitere Jahresringe, die Waldfläche hat sich aber fast nicht verändert. Die Mitteltemperatur von 6°C während der Wachstumsperiode liegt in Trockengebieten oder im Inneren großer Gebirgssysteme bei größeren Meereshöhen, wenn es wenig Wolken

gibt. Daher liegen die höchstgelegenen Baumgrenzen in Tibet und in Bolivien bei nur rund 300 mm Jahresniederschlag. Wenn es oft bewölkt ist, was in den feuchten Tropen um den Äquator der Fall ist, liegt die Mitteltemperatur von 6°C während der Wachstumsperiode und damit die Baumgrenze niedriger. In Ecuador und Peru, äquaturnah, liegt sie (potenziell) bei nur 3.700-4.000 m, real wegen der Eingriffe des Menschen noch tiefer. Die höchstgelegenen Baumgrenzen liegen mit 4.800-4.900 m in Bolivien (19°S) und im südlichen Tibet (29°N).

Bedeutung der Gebirge

Biodiversität

Hochgebirge sind Gebiete mit einer überdurchschnittlich hohen Anzahl von Arten. Der besondere Artenreichtum hängt mit dem Vorhandensein einer durch die oft komplexere Topographie bedingten Vielfalt des Mikroklimas zusammen. Dies führt zur Bildung von unterschiedlichen Habitaten in einem reich strukturierten Mosaik. In Abhängigkeit von der Höhenlage ergeben sich klimatische und ökologische Gradienten. Hinzu kommen die dynamischen Prozesse der Elemente der Kryosphäre, das ist das Vorkommen von Wasser in Form von Eis, Schnee oder Permafrost.

Schnee ist im Gebirge oft sehr ungleich verteilt. An einige Stellen wird der Schnee ständig weggeblasen (windgefegte Stellen), an anderen Stellen wird Schnee angeweht und es können sich mehrere Meter mächtige Schneeverwehungen bilden. Solche Stellen schmelzen im Sommer bis zum darunterliegenden Boden sehr spät ab (ausapern) (Abb. 8), andere Stellen sind fast ganzjährig ohne Schneeschutz. Dementsprechend ist die Vegetation völlig verschieden.

So entsteht in jeder Höhenstufe eine Vielzahl von Lebenszonen auf engem Raum, woraus eine außerordentliche Vielfalt von Arten und Ökosystemen resultiert. Eine hohe Anzahl von Spezialisten und endemischen Arten findet dort einen Lebensraum. Viele Pflanzen und Tiere sind an nur geringe Schwankungen der biotischen und abiotischen Faktoren angepasst. Aus diesen Gründen sind die Ökosysteme der Hochgebirge teilweise sehr empfindlich gegenüber Effekten des Klimawandels (SCHICKHOFF 2016). Da aber auf engem Raum und damit auf kurze Distanz viele topographisch bedingte Ausweichmöglichkeiten existieren mit einem geeigneten Mikroklima, ist der alpine Vegetationsgürtel fast überall der sicherste Ort für Organismen, wenn sich das Klima ändert, egal in welche Richtung (KÖRNER, mündl. Mitteilung, 2020). Die Daten meteorologischer Stationen sind für den alpinen Höhengürtel weniger aussagekräftig als in tieferen Lagen, das Mikroklima-Mosaik ist oft entscheidend. Im Schatten eines Felsblocks können +2°C herrschen, 2 m davor am Fuß des Felsblocks auf der Südseite hingegen 48°C. Aber der menschliche

Einfluss durch Forstwirtschaft, Beweidung, Almwirtschaft und Tourismus im Bereich der Waldgrenze und in der alpinen Stufe ist es, der weitreichende und direkte Auswirkungen hat (KÖRNER 1999).

Ein wichtiger Vorgang der Bildung neuer Arten ist in manchen Gebirgen mit Nord-Süd-Ausrichtung zu beobachten. Dort konnten Arten aus dem borealen oder gemäßigten Bereich bis in die tropischen Bergketten migrieren. So entstanden aus vielen Gattungen der Nordhalbkugel in den tropischen Gebirgen zahlreiche neue Arten (Eichen in Costa Rica; Rhododendron und Kiefern in Südostasien).

In den meisten Gebirgen hat sich im Laufe der jeweiligen Gebirgsbildung eine eigene Gebirgsflora (Oreophyten) und typische Vegetation mit Höhenstufen herausgebildet. Während des Wechsels von Eiszeiten und Zwischeneiszeiten mussten die Arten mehrfach erhebliche Wanderungen auf und ab bzw. nord- und südwärts bewältigen. Dies hat nicht selten zur Isolation einzelner Arten oder zur Herausbildung neuer Arten geführt. Gerade in Gebirgen gibt es viele Arten, die nur in einem bestimmten eng begrenzten oder isolierten Gebirgsraum vorkommen, also für dieses Gebiet endemisch sind. Ein typisches Beispiel sind die verschiedenen Tannenarten (*Abies*) europäischer Gebirge. Ein weiteres Beispiel sind die zahlreichen Dornpolsterarten (Abb. 9) in den trockenen Gebirgsstufen der iranisch-afghanischen Gebirge, z.B. Zagros, Alburs, Hindukusch (BRECKLE 2017, BRECKLE & RAFIQPOOR 2020) mit oft sehr kleinen, gefährdeten Arealen.

Klima und atmosphärische Zirkulation

Bei der Verbreitung von Pflanzen und Tieren spielt der Verlauf der Gebirgszüge eine wichtige Rolle. Aufgrund des Ost-West-Verlaufs der Alpen und der Pyrenäen war es während der letzten Eiszeit Pflanzen und Tiere aus nördlichen Regionen kaum möglich nach Süden zu migrieren, um der nördlichen Kälte auszuweichen. Viele



Abb. 8: In Gebirgen ist die Schneeverteilung und das Freiwerden der Oberfläche durch Schneeschmelze (Ausapern) oft sehr unterschiedlich auf kurze Distanz. Dies führt zu einer kleinräumigen Mosaikbildung der Gebirgsvegetation wie hier im nördlichen Hindukusch (Foto: M. Keusgen).

Arten starben aus. Wahrscheinlich ist dies der Grund für die geringere Artenvielfalt in Europa gegenüber Nordamerika und Ostasien. Jede langfristige Veränderung der Temperatur, des Niederschlags und des Niederschlagsverlaufs führt dazu, dass sich Arten an neuen Standorten dauerhaft etablieren müssen, sonst sterben sie aus.

In Nordamerika verlaufen die Rocky Mountains in Nord-Süd-Richtung. Das ist eine der Ursachen, weshalb in den USA Tornados häufiger als in vielen anderen Regionen der Welt entstehen. Eine Voraussetzung sind die feuchtwarmen Luftmassen aus der Golfregion, die aufgrund des Nord-Süd-Verlaufs der Rocky Mountains ungehindert nach Norden strömen können. Das Zusammentreffen mit der kalten Luft der oberen Troposphäre aus dem Norden bewirkt häufig die Bildung von Schauer- oder Gewitterwolken mit starken Aufwinden auf engstem Raum im Inneren der Wolken. Östlich der Rocky-Mountains ist das Gebiet, wo die meisten Tornados registriert werden (LOZÁN et al. 2018).

Die klimatologische Bedeutung der Hochgebirge besteht auch darin, dass sie ein Hindernis für die Luftbewegung bilden; sie haben damit erhebliche Auswirkungen auf die atmosphärische Zirkulation und den Transport von Wärme und Wasserdampf. Die tropischen Anden verhindern mit ihrer langen und hohen Gebirgskette den ungehinderten Durchzug der vom Atlantik kommenden Regenwolken. Das führt zu intensiven Regenfällen im Amazonasbecken an der östlichen Seite der Anden. Die Jahresniederschläge erreichen dort teilweise Werte von über 5.000 mm, während es an der Westseite, an der Pazifik-Küste, verstärkt durch Föhnwirkungen, kaum regnet. Dadurch herrscht im inneren Amazonasgebiet ein tropisches Klima mit besonders hoher Luftfeuchtigkeit und an der Westküste ein wüstenartiges Klima mit Wassermangel.



Abb. 9: Die subalpine Stufe in trockenen Gebirgen, wie hier im nördlichen Hindukusch, weist eine hohe Artenvielfalt an Zwergsträuchern (*Artemisia*, *Nepeta*), *Geophyten* (*Tulipa*, *Gagea*, *Eremurus*, *Iris*) und *Dornpolstern* (*Astragalus*, *Acantholimon*, *Acanthophyllum*, *Onobrychis* etc.) auf (Photo: M. Keusgen).

Hochgebirge als Wassertürme

Hochgebirge schaffen wichtige Wasserressourcen für die Gebirgsregionen selbst und die umliegenden Tieflandgebiete bis in große Entfernungen. Sie werden deshalb auch als »Wassertürme« bezeichnet. Zum einen kommt es in Hochgebirgen zu mehr Niederschlag als in tieferen Regionen, weil feuchte Luftmassen an ihnen zum Aufsteigen gezwungen werden. Dabei kühlen sie sich ab, der in ihnen enthaltene Wasserdampf kondensiert, und es kommt zum Niederschlag in Form von Regen oder Schnee. Außerdem sind viele Gebirgsregionen in der Lage, den Niederschlag über längere Zeiträume als Schnee und in Gletschern zu speichern und somit als Wasserreservoir zu fungieren. Das geschieht auf dreierlei Art und Weise. Je nach Breitenlage und Höhe kommt es erstens in vielen Hochgebirgen zu jahreszeitlich stark schwankendem Schneefall, und das in sehr hohen Lagen sogar in den Tropen. Schnee speichert Wasser von der kalten bis in die wärmere bzw. von der feuchten bis in die trockene Jahreszeit hinein und stellt beim Tauen Wasser zeitlich verzögert oft dann zur Verfügung, wenn andere Quellen versiegen. Zweitens bilden sich aus Schnee in den Hochlagen über längere Zeiträume Gletscher, die einerseits wie Schnee bei höheren Temperaturen und starker Sonneneinstrahlung tauen und als wichtige Wasserquelle in der trockenen Jahreszeit für Gebiete flussabwärts dienen, außerdem auch noch über Jahrzehnte oder Jahrhunderte verlässliche Wasserspeicher sind. Und drittens sind in Gebirgen tektonische wie glaziale Seen wichtige Wassersammler, ebenso wie die Gesteinsschichten, die durch Abflüsse von direkten Niederschlägen sowie Schnee- und Gletscherschmelze gespeist werden. Überall, wo der Mensch Hochgebirge als Siedlungsräume erobert hat, hat er diese Form von Wasserspeicherung durch zahlreiche künstlich angelegte Stauseen erweitert.

Der Mensch nutzt das Wasser der Hochgebirge auf vielfache Weise. An erster Stelle steht die Nutzung für die Bewässerung in der Landwirtschaft. Aber ebenso wichtig ist die Trinkwasserversorgung in kleineren Städten bis hin zu großen Metropolen, die oft durch eine aufwendige Wasserinfrastruktur an die Wasserreservoirs der Hochgebirge angeschlossen sind. Und vielfach wird fließendes Wasser für den Betrieb von Wasserkraftwerken verwendet. Der größte Anteil des elektrischen Stroms in der Schweiz, Österreich und Norwegen stammt aus Wasserkraftwerken.

Durch den Klimawandel sind die Wasserspeicher der Hochgebirge langfristig in vielen Fällen gefährdet. In Hochgebirgen im westlichen Nordamerika, in Europa und Asien haben die Temperaturen in den letzten Jahrzehnten teilweise um 0,3°C pro Jahrzehnt zugenommen und damit weit stärker als im globalen Mittel. Immer mehr Niederschläge fallen als Regen statt als Schnee und

fließen unmittelbar ab. Weltweit schmelzen in den Gebirgsregionen die Gletscher. Das führt zwar zunächst zu einem stärkeren Abfluss, beschwört langfristig aber vielerorts die Gefahr des Versiegens der montanen Wasserreservoirs herauf, nicht nur für die Bergregionen selbst, sondern auch bis weit in die von den großen Strömen aus den Gebirgen durchquerten Tiefländer.

Klimawandel und Vegetation

Bei der in Zukunft zu erwartenden weiteren Zunahme der Temperatur im Zuge des Klimawandels werden in den Gebirgen die temperaturbedingten Höhengürtel sich verändern. Allerdings ist eine solche Verschiebung aufgrund der Lebenszeiten der Baum- und Waldvegetation nur mit großer Phasenverschiebung, d.h. zeitlich um Jahrzehnte verschoben, möglich.

Im alpinen Bereich ist dies anders, dort sind, obwohl die Vermehrungs- und Ausbreitungsmöglichkeiten der Arten von Jahr zu Jahr sehr verschieden sein können, schnellere Anpassungen möglich. Bei einem Szenario einer Erwärmung um 2°C wird sich eine Gefährdung nur auf die höchsten kälteangepassten Pflanzen auswirken können, die dann vielleicht keine adäquaten, konkurrenzfreien Mikrohabitate mehr finden. Die anderen Arten werden fast alle innerhalb des Mikroklima-Mosaiks alpiner Standorte weiterhin geeignete Stellen finden und langsam höhere Standorte erobern (Abb. 10). So gesehen ist aber insgesamt die alpine Stufe ein sicherer Ort für Organismen im Klimawandel (SCHERRER & KÖRNER 2011).

Schwerer abzuschätzen sind die Veränderungen des Wasserkreislaufs; sie wirken sich in ariden Gebirgen besonders stark aus. Gehen die Niederschläge zurück, so sind offene Baumfluren an Grenzstandorten stark gefährdet, aber dies ist in der Vegetationsgeschichte ein bekannter Vorgang, wie die verschwundene Waldvegetation im Hoggargebirge der Sahara zeigt.

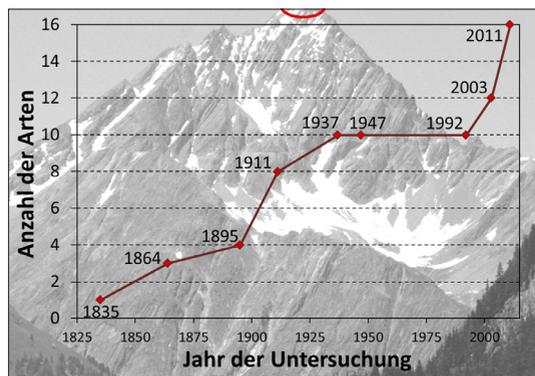


Abb. 10: Zunahme an Arten am Gipfel des Piz Linard (3.411 m), Schweiz seit 1835, ein Effekt, der mit der Erwärmung im letzten Jahrhundert in Bezug gebracht werden kann (nach PAULI et al. 2003 und WIPF et al. 2013, aktualisiert).

Veränderungen der Kryosphäre in Hochgebirgen

Wesentlich für die Beurteilung des Klimawandels im Hochgebirge sind die Gletscher und die Schneebedeckung. Signifikante Langfristtrends von Schneedeckendauer und Schneehöhe liegen aus den meisten Gebirgen der Welt vor und belegen eine Abnahme der Schneebedeckung, was wiederum die Gletscherschmelze begünstigt (HUSS et al. 2017). Während seit 100 Jahren wenige Gletscher terrestrisch vermessen wurden, erhält man heute mit Satellitenaufnahmen häufigere Daten von mehr Gletschern. Der Massenverlust der Gletscher hält seit Jahrzehnten nahezu weltweit an, viele zerfallen und sind mit Schutt bedeckt, die Flächenbestimmung wird schwieriger. Dies gilt z.B. für die Gebirge Hochasiens, welche die ausgedehntesten Gletschervorkommen der Erde außerhalb der Polarregionen beherbergen. Seit der Jahrtausendwende hat sich die Abschmelzrate noch einmal beschleunigt; in einigen Regionen liegt sie bei 0,5 m Wassersäule pro Jahr, ohne Klimaschutz gingen mehr als 90% des Volumens bis 2100 verloren. Eine Ausnahme bilden bisher Gletscher im Karakorum und Teilen des Tien Schans und Pamirs, hier weisen die Gletscher teilweise leicht positive Massenbilanzen auf (s. Kap.3.3 - in diesem Band). Ähnlich verhielten sich die Gletscher Neuseelands mit Massengewinnen am Ende des 20. Jahrhunderts, jetzt aber gefolgt von hohen Massenverlusten, vor allem in den letzten zehn Jahren, als Folge von veränderter atmosphärischer Zirkulation. Die neu auftretenden Gletscherlawinen, nämlich des Kolka-Gletschers im Kaukasus und zweier Gletscher im Aru-Gebirge in Tibet, mit Vorstößen in besiedelte beziehungsweise landwirtschaftlich genutzte Regionen, zeigen eine bisher nicht beobachtete Kombination aus galoppierenden Gletschern und Eislawinen (s. Kap. 3.4 - in diesem Band).

In den Tropen sind die Gletscher Ostafrikas auf Grund ihrer Höhenlage über 5.000 m wichtige Indikatoren des Klimawandels in der mittleren Troposphäre (s. Kap. 3.5 - in diesem Band). Dagegen erstrecken sich die Eisgebiete in Südamerika über alle Höhenlagen, vom Meeresspiegel bis ins Hochgebirge. Sie reichen von vergletscherten Vulkanen in den Hochlagen der Zentralen Anden in den Tropen bis hin zu kalbenden Auslassgletschern in Patagonien (s. Kap. 3.6 - in diesem Band). Auch hier herrscht der Verlust an Masse vor (Abb. 11).

In Nordamerika befindet sich die Gletschermasse zu fast 90% in Alaska, sie bedeckt eine Fläche von rund 87.000 km². Bei komplettem Abschmelzen würde sie einen Meeresspiegelanstieg von ca. 5,5 cm verursachen. Die Gletscher im westlichen Kanada sind vor allem als Schmelzwasserlieferanten von Bedeutung, das gilt auch für die Hochgebirgsgletscher im zusammenhängenden Staatsgebiet der USA, obwohl diese weniger als 1% der nordamerikanischen Gletscherfläche ausmachen. Auch hier geht man von einem Verschwinden fast aller Gletscher bis 2100 aus (s. Kap. 3.7 - in diesem Band).

Für die Gletscherschmelze sind die Mächtigkeit und Zusammensetzung der Schuttdecke auf dem Eis von Bedeutung. Eine dünne Schuttdecke beschleunigt das Abschmelzen und eine dicke reduziert die Schmelzrate stark (Kap. 3.8 - in diesem Band).

Der Permafrost im Hochgebirge oberhalb der Waldgrenze wird vor allem in den Alpen und in Skandinavien durch langfristiges Monitoring von Temperaturen, Änderungen des Eisgehalts und Vermessung von Blockgletschern erforscht, auch um mögliche Risiken durch Muren und Gletscherseeausbrüche einschätzen zu können (vgl. Kap. 3.9 - in diesem Band).

Hydrologische Veränderungen in Hochgebirgen

Viele Steh- und Fließgewässer in den Hochgebirgen sind keinem direkten menschlichen Eingriff ausgesetzt und eignen sich deshalb gut als Indikatoren für Veränderungen des Klimas und der Umwelt. Zwei Beispiele aus Indien und Nepal (Kap. 4.1 - in diesem Band) erläutern, wie Anpassungsmaßnahmen auf den veränderten Schmelzwasserabfluss die sozio-ökonomischen Entwicklungen steuern. Weitere Fallbeispiele zur Wasserversorgung in Peru und in Kalifornien werden in Kap. 4.4 beschrieben. Der Klimawandel verschiebt in beiden Regionen die mengenmäßige und die zeitliche Verteilung des Niederschlages, was bei der stark vom

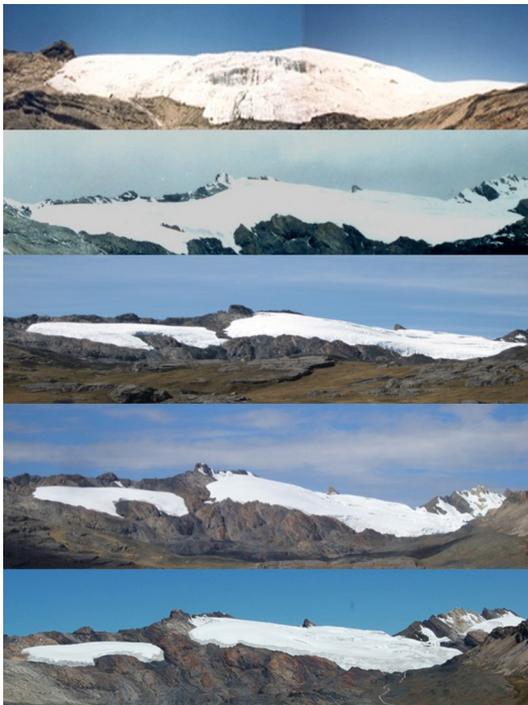


Abb. 11: Rückgang (-60,5%) der Gletscherfläche des Pastoruri (Höhe 5.300 m, Cordillera Blanca, Peru) seit Ende der 1990er Jahre (Maghella, G. (2018): <https://imagegeo.eu.edu/view/12916/>; Lizenz: CC BY).



Abb. 12: Quelccaya-Eiskappe mit Gletschersee in der Cordillera Vilcanota, Peru (Wikimedia Commons (2010): Quelccaya Glacier; Author: Edubucher; https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Quelccaya_Glacier.jpg; Lizenz: CC BY-SA).

Schneefall abhängigen Wasserversorgung der Landwirtschaft und der großen Städte zu erheblichen Problemen führt. Diese Entwicklung wird verstärkt durch die Tatsache, dass fast alle kleinen und mittleren Gletscher als Folge der Erderwärmung nahezu verschwunden sind.

Naturgefahren im Hochgebirge

Hochgebirge beherbergen nicht nur wichtige Ressourcen, z.B. hochwertige Mineralien, sondern auch geeignete Lebensräume für Menschen, Tiere und Pflanzen. Mit den hydrologisch-geologischen Veränderungen in den Hochgebirgen ist auch eine Reihe von Naturgefahren wie Steinschläge, große Bergstürze und Murgänge (=Muren) verbunden. Diese Naturgefahren betreffen sowohl die Gebirgsgebiete selber als auch die umliegenden Tieflandregionen. Die meisten Hochgebirge wie die Alpen, der Himalaya, die Anden sind in der jüngsten, der alpidischen Gebirgsbildungsphase entstanden. Sie besitzen daher ein noch wenig durch Erosion eingeebnetes Relief mit steilen und vielfach instabilen Hängen.

Oft werden bei Naturkatastrophen große Materialmengen mobilisiert, die manchmal zu starken Verwüstungen führen können. Diese sind meist Folgen tektonischer Aktivitäten oder der natürlichen Erosion. Sie können auch durch Wetterextreme wie Starkniederschläge oder Erdbeben beeinflusst oder ausgelöst werden. Der Mensch trägt zum großen Schadenspotenzial auch durch den Bodennutzungswandel wie Entwaldung und den Ausbau touristischer Infrastruktur bei. Darüber hinaus ist es eindeutig, dass auch der Klimawandel eine wichtige Rolle spielt. So hat im Schweizer Alpenraum vor allem die drastische Entwaldung im 2. Jahrtausend zu einer Destabilisierung der Böden geführt, deren Folgen Erosion oder klimatisch verursachte Landrutschungen in hohen Lagen sind. Die überdurchschnittliche Erwärmung im Hochgebirge bewirkt das Auftauen des

Gebirgspermafrosts, was eine große Instabilität von Felshängen zur Folge haben kann, da sie in vielen Fällen durch Permafrost zusammengehalten werden. So kommt es, dass die vom Eis befreiten Fels- und Schutthänge teilweise instabil werden.

Zusätzlich zu den tausenden Gewässern in den Gebirgen entstehen auch immer wieder neue Seen, die durch Moränen oder Felsriegel abgedämmt werden und z.B. durch das Abschmelzen von Gletscherzungen und Toteis entstehen (Abb. 12). Sie stellen ohne einen kontrollierten Überlauf eine große Gefahr dar. Das bisherige Gefahrenpotential kann in vielen Fällen durch plötzliche Starkniederschläge verstärkt werden. Bei einigen dieser Seen besteht die Gefahr eines See-Ausbruchs, der sich dann zu einer Mure entwickeln kann. Da sich viele sehr gefährlich entwickeln können, ist eine Risiko-Analyse und ständige Überwachung erforderlich.

Gletscher-Seen bilden sich durch das Schmelzwasser, das meist oberflächlich (supraglazial) abfließt. Das Schmelzwasser kann manchmal auch am Grund des Gletschers abfließen. Dieses subglaziale Schmelzwasser fließt meist durch ein Gletschertor aus und als Oberflächenwasser weiter. Ist ein solcher Ausgang versperrt bzw. kann das Schmelzwasser nicht ausfließen, so entsteht eine Wassertasche – ein unter dem Eis verborgener Gletschersee. Nimmt der Druck innerhalb der Wassertasche stark zu, kann sie platzen und zu einer gefährlichen Schlammlawine führen. Es gibt mehrere Beispiele solcher Ereignisse. Sehr bekannt ist das Platzen der Wassertasche am Fuß des Mont Blanc am 12. Juli 1892. In der Flutwelle aus Wasser, Schlamm und Gestein starben 175 Menschen.

Eine erhebliche Gefahr stellen auch vergletscherte Vulkane dar, wie besonders der Ausbruch des Nevado del Ruiz 1985 in Kolumbien gezeigt hat. Dabei forderte eine verheerende Lawine aus Fels, Schlamm und Wasser (sog. Lahar) in einer 70 km entfernten Stadt 23.000 Menschenleben (Kap. 7.4 - in diesem Band).

Häufig kommt es in Hochgebirgen bei Naturkatastrophen zu kaskadischen Effekten, bei denen ein Ereignis wie z.B. ein Erdbeben weitere Prozesse anstößt und damit die katastrophalen Folgen verstärkt (IPCC 2019). So kann ein Erdbeben zu Hangrutschungen führen, deren Material einen See aufstaut, der später ausbricht und eine Sturzflut verursacht, die weiter flussabwärts Felder überflutet und Gebäude und Infrastrukturanlagen zerstört (Abb. 13). Manche Prozesse, die von Erdbeben ausgehen, können auch durch Folgen des Klimawandels verstärkt werden. So kann das Auftauen von Permafrost (Kap. 7.2 - in diesem Band) oder der Rückgang von Talgletschern die Stabilität von Berghängen schwächen, wodurch es bei Erdbeben leichter zu Felsstürzen kommen kann, die z.B. einen Gletschersee zum Überlaufen bringen. Felsstürze an steilen Hängen haben während des letzten halben Jahrhunderts nach Beobachtungen in den Hochgebirgen Nordamerikas, Neuseelands und Europas durch das Tauen von Permafrost zugenommen (IPCC 2019). Besonders betroffen von diesen Naturkatastrophen ist die Region in der Nähe des Huascarán (dem höchsten Berg Perus, Cordillera Blanca). 1941 brach hier der Palcacocha See aus; ein Drittel der Stadt Huaraz wurde zerstört (VUILLE 2018). Ranrahirca – ein Vorort von Huaraz – wurde 1962 und 1970 von massiven Lawinen aus Schnee, Felsen und Schlamm (Lahar) getroffen, die nach einem Erdbeben an den Hängen des Huascarán entstanden. Mehrere Tausende Menschen starben bei diesen Ereignissen in den Lahar.

Erdbeben haben besonders im Himalaya zu katastrophalen Ereignissen mit vielfachen Kettenreaktionen geführt (Kap. 7.5 - in diesem Band). Das höchste Gebirge der Welt, das durch die Kollision der indischen mit der eurasischen Platte vor über 80 Mio. Jahren entstand, ist immer noch in Bewegung. Schwere Erdbeben mit zahlreichen Todesopfern wie z.B. das Gorkha Beben von 2015 in Nepal kommen immer wieder vor und führen zu Hangrutschungen und Schlammlawinen,

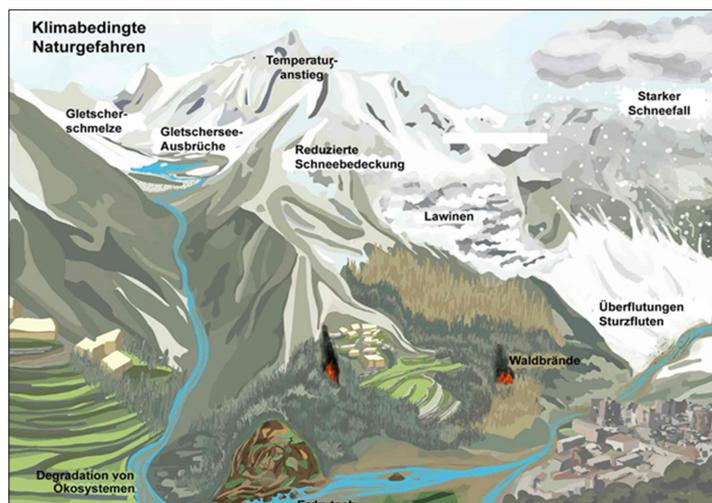


Abb. 13: Naturgefahren in Hochgebirgen. Quelle: Flickr/GRID Arendal (2018): Typical Climate-Related Hazards in Mountains, <https://www.flickr.com/photos/gridarendal/32399357298/>, <http://www.grida.no/publications/425>.

an denen auch das Auftauen von Permafrost beteiligt ist, oder zur Entstehung und zum Ausbruch von Seen. Stark betroffen ist davon auch das Pamir-Massiv (Kap. 7.7 - in diesem Band).

Dass die Schneelawinengefahr durch den Klimawandel verstärkt wird, lässt sich allerdings bisher nicht belegen (Kap. 7.3 - in diesem Band). Zwar steigt die Schneegrenze durch höhere Temperaturen an, wodurch in tieferen Lagen weniger Lawinenereignisse auftreten. Für höhere Lagen in verschiedenen Hochgebirgen gibt es bisher unterschiedliche Beobachtungen und auch Modellsimulationen geben keine befriedigende Antwort, was u.a. auch damit zusammenhängen mag, dass Lawinenereignisse stark von Wetterbedingungen abhängig sind.

Klimaschutz und Anpassung

Eine geschlossene artenreiche Vegetationsdecke ist der beste Schutz gegen Erosion. Eine einmal aufgerissene Vegetation regeneriert sich unter den alpinen Klimabedingungen nur sehr langsam, zumal, wenn dann der Boden abgespült worden ist. Die zahlreichen Skipisten in den Alpen und inzwischen in anderen Gebirgen zeigen diese Schäden überdeutlich.

Der Wintertourismus in Hochgebirgen wird inzwischen vielfach durch künstliche Beschneigung aufrechterhalten, aber zumeist mit hohen ökologischen Kosten (Kap. 8.2 - in diesem Band). Zur Lösung von den in ähnlichen Fällen auftretenden Interessenkonflikten werden zunehmend übergreifende Konzepte sowohl auf lokaler, nationaler als auch internationaler Ebene empfohlen (Kap. 8.4 - in diesem Band).

Eine intakte montane Waldstufe und subalpine Krummholzstufe ist in den gemäßigten Gebirgen noch immer der beste Lawinenschutz; bei der intensiven Nutzung im Alpenraum geht es sicher nicht ohne teilweise aufwendige Lawinen- und Bachverbauungen, um größere Schäden in Siedlungen zu vermeiden. Im Zuge des Klimawandels ist in den dicht besiedelten Alpen ein flächendeckendes Messstellennetz erforderlich und teilweise auch in Betrieb, um mit Anpassungen den veränderten hydrologischen Herausforderungen in der Zukunft begegnen zu können.

Ein beträchtliches Risiko stellen besonders in Hochgebirgen der westlichen USA Waldbrände dar, die mit höheren Temperaturen und verringertem Schneefall in tieferen Lagen zugenommen haben und nicht nur die Wälder, sondern auch menschliche Siedlungen bedrohen. Sie werden u.a. durch kontrollierte Bodenfeuer bekämpft, die Kiefernnadeln, abgebrochene Äste und Sträucher abbrennen, um zu verhindern, dass von kleinen Bränden eine Gefahr für große Bäume bis in die Baumkronen hinein ausgeht.

Ein klimagerechter Waldumbau benötigt nach jahrzehntelanger Monokultur eine gute Planungsgrundlage. Es ist nicht ausreichend, allein die mit anfälligen Baumarten (Fichte und Kiefer) bestockten Wälder umzubauen. Man benötigt auch bessere Informationen über die Klimaansprüche der lokalen Baumarten und genauere Kenntnisse der zukünftigen Umwelt- und Klimafaktoren. Auf dieser Grundlage kann über die Charakteristik eines Mischwalds für die verschiedenen Bergregionen entschieden werden.

Literatur

- BURGA, C. A., F. KLÖTZLI & G. GRABHERR (2004): Gebirge der Erde. Eugen Ulmer, Stuttgart. 504 S.
- BRECKLE S-W 2017: Floristic Analysis of the subnival-nival vegetation of Hindu Kush and Caucasus. Species recorded from the high alpine and nival zones (>3900m) of the Hindu Kush mountains (Afghanistan). Bielefelder Ökologische Beiträge (BÖB) 21: 32-47
- BRECKLE, S-W. & D. RAFIQPOOR (2020): HinduKush - Flora and Vegetation. In: NOROOZI J. (ed.): Plant biogeography and vegetation of high mountains of Central and South-West Asia. Plant vegetation ser., Springer (in press).
- HERMES, K. (1955): Die Lage der oberen Waldgrenze in den Gebirgen der Erde und ihr Abstand zur Schneegrenze. Kölner Geogr.Arb. Heft 5 (Univ. Köln).
- HUSS, M., B. BOOKHAGEN, C. HUGGEL et al. (2017): Toward mountains without permanent snow and ice. *Advanced Earth and space science*. <https://doi.org/10.1002/2016EF000514>.
- IPCC (2019): IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate.
- KÖRNER, C. (1999): Alpine plant life. Springer 346 S. (neue Auflage im Druck).
- KÖRNER, C. (2002): Mountain biodiversity, its causes and function: an overview. In: Körner C. & Spehn E.M. (eds.): Mountain biodiversity. A global assessment. Parton/Boca Raton 3-20.
- LOZÁN, J. L., A. FRIEDRICH, P. GROENEMEIJER & T. SÄVERT (2018): Naturgewalt Tornado: Eine Übersicht. In: LOZÁN, J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRASSL et al. - Warnsignal Klima: Extremereignisse. Wissenschaftliche Auswertungen-GEO, Hamburg. 243-249.
- PAULI, H., M. GOTTFRIED & G. GRABHERR (2003): The Piz Linnard (3.411 m), the Grisons, Switzerland – Europe's oldest mountain vegetation study site. In: NAGY, L., GRABHERR, G., KÖRNER, CH. & D. B. A. THOMPSON (eds.) - Alpine Biodiversity in Europe. Springer, Berlin. 443-448.
- SCHERRER, D. & C. KÖRNER (2011): Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. *J. Biogeogr.* 38: 406-416
- SCHICKHÖFF U. (2016): Aktuelle Biodiversitätsveränderungen in Hochgebirgen. In: LOZÁN, J. L., S.-W. BRECKLE, R. MÜLLER & E. RACHOR - Warnsignal Klima: Die Biodiversität. Wissenschaftlichen Auswertungen-GEO, Hamburg. 107-112.
- TROLL, C. (1948): Der asymmetrische Vegetations- und Landschaftsaufbau auf der Nord- und Südhalbkugel. *Göttinger Geogr. Abhandl.* 1: 11-27
- VUILLE, M., M. CAREY, C. HUGGEL et al. (2018): Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Sci. Rev.* 176, 195-213.
- WIPF, S., V. STÖCKLI, K. HERZ & C. RIXEN (2013): The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linnard summit since 1835. *Plant Ecology & Diversity*, Vol. 6, 3-4: 447-455.

Kontakt:

Dr. José L. Lozán (JL-Lozan@t-online.de)
Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg
Prof. i.R. Dr. Siegmund-W. Breckle
Ökologie-Bielefeld
Dr. Heidi Escher-Vetter
Bayerische Akademie der Wissenschaften, München
Prof. Dr. Hartmut Graßl
Max Planck Institut für Meteorologie
Dr. Dieter Kasang
Deutsches Klimarechenzentrum (DKRZ)

LOZÁN, J. L., S.-W. BRECKLE, H. ESCHER-VETTER, H. GRAßL & D. KASANG (2020): Hochgebirge: Definition, Gebirgstypen und Bedeutung. In: LOZÁN J. L., S.-W. BRECKLE, H. GRAßL, et al. (Hrsg.). Warnsignal Klima: Hochgebirge im Wandel. S. 11-20. Online: www.warnsignal-klima.de. doi: 10.2312/warnsignal.klima.hochgebirge-im-wandel.03.