2.10 Beobachtete und prognostizierte Veränderungen in der alpinen Lebewelt

Georg Grabherr, Michael Gottfried, Harald Pauli, Andrea Lamprecht & Sophie Niessner

Beobachtete und prognostizierte Veränderungen in der alpinen Lebewelt: *Alpine Ökosysteme sind kältebetonte Lebensräume in den Hochgebirgsregionen der Erde. Sie erstrecken sich von der Waldgrenze bis zu den obersten Grenzen des Lebens und beherbergen eine reiche und einzigartige Flora und Fauna. Der globale Klimawandel, im speziellen die Erderwärmung, stellt eine Gefahr für diesen natürlichen Schatz an biologischer Vielfalt dar. Modellstudien prognostizieren den Rückgang von alpinen Habitaten in europäischen Gebirgen, was noch in diesem Jahrhundert zu einem Rückgang von Arten – im Extremfall zu deren Aussterben – führen kann. Im Zuge von wiederholten Untersuchungen in den Alpen konnte eine Verschiebung der Verbreitungsgrenzen der Arten nach oben bis in die höchsten Vegetationszonen festgestellt werden. Ähnliche Beobachtungen wurden im Ural und in Westkanada gemacht, wo die Baumgrenze im Laufe des 20. Jahrhunderts deutlich in die alpine Region vorgedrungen ist. Detaillierte Studien weisen darauf hin, dass Aussterbephänomene wesentlich komplexere Vorgänge darstellen, als das einfache Aufwärtswandern von Arten. Die Frage, wie und mit welcher Geschwindigkeit die alpine Lebewelt tatsächlich auf den fortschreitenden Klimawandel reagiert, führte zum Aufbau des Langzeitmonitoring-Programms GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments; www.gloria.ac.at). Neueste GLORIA-Studien in europäischen Hochgebirgen zeigen, dass wärmeliebende Pflanzen in alpinen Regionen expandieren, während die Vorkommen von Kältespezialisten kontrahieren, was eine »Thermophilisierung« der Hochgebirgsvegetation zur Folge hat. Zudem konnte auf Gipfeln temperater und borealer Gebirge eine Zunahme von Gefäßpflanzenarten nachgewiesen werden, während die Artenzahlen auf mediterranen Gipfeln abnahmen. Letzteres wird als Folge von Erwärmung – kombiniert mit zunehmender Trockenheit – gedeutet. Diese Veränderungen machen einen fortschreitenden Habitatsverlust in kältebetonten Gebirgslebensräumen sichtbar, der mit einer akuten Bedrohung der alpinen Lebewelt einhergeht.*

Observed and expected consequences for the alpine life zone: *Alpine regions, although rather cold environments throughout the world's high mountain systems, host a rich and unique flora and wildlife. Global climate change, warming in particular, will endanger this natural treasure of biological richness. Model studies predict extensive losses of alpine habitats in European mountains which may lead to species declines or even to extinctions within the 21st century. Revisitations of historical sites in the Alps gave evidence that vegetation at the upper limits of life is already invaded by lower-elevation species. Similarly, natural forest was advancing into alpine areas within the 20th century, such as observed in the Urals and in western Canada. Detailed studies indicate that the extinction syndrome might be much more complex than simple upward movements. The question how and at which velocity alpine biota will actually react to continued climate change has led to the long-term monitoring programme GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments; www.gloria.ac.at). Recent pan-European GLORIA analyses in high mountain regions showed an increase of warm-demanding plants and a decline of cold-adapted plants, indicating a thermophilisation of mountain vegetation. Moreover, temperate and boreal summits showed a rising number of species, whereas species richness was declining on Mediterranean summits, most likely due to combined effects of warming and higher aridity. These transformations indicate a progressing habitat loss in cold mountain environments, thereby threatening their unique flora and fauna.*

Der alpine Lebensraum

Unter dem Terminus »alpin« wird im weiteren Sinne der Lebensraum von der Waldgrenze bis an die Kältegrenzen des Lebens, im engeren Sinne die Höhenstufe zwischen der Baumgrenze und der Obergrenze der geschlossenen Vegetation in den Hochgebirgen der Erde verstanden (Körner 2003; Nagy & Grabherr 2009). Von alpiner Flora und Fauna spricht man daher nicht nur in den Alpen, sondern auch in den neuseeländischen Bergen genauso wie in jenen Kaliforniens (Burga et al. 2004, Wielgolaski 1997). In den temperaten Gebirgen wie den Alpen schließt an die Übergangszone zwischen geschlossenem Wald und den höchsten Baum-Vorposten, dem so genannten Waldgrenzökoton, die Zwergstrauchzone der unteren alpinen Stufe an. Nach oben folgen alpine Urwiesen. Diese lösen sich im subnivalen Ökoton schließlich auf und gehen in die Nivalzone über, wo Pflanzengruppen nur mehr in wärmebegünstigten Nischen auftreten. Die höchsten Vorkommen von Blütenpflanzen finden sich in den Alpen zwischen

4.000 m und 4.500 m, Moose und Flechten steigen noch höher. Im Himalaya wurden Gefäßpflanzen noch oberhalb von 6.000 m gefunden. Aus Bodenproben von Achttausendern konnten immerhin noch Mikroben extrahiert werden.

In den immerfeuchten Tropen wie den Bergen Ostafrikas (z.B. Mt. Kenya, Mt. Elgon, Ruwenzori), wo im tropischen Tageszeitenklima jeden Tag Sommer und jede Nacht Winter ist, finden wir über dem Waldgrenzökoton die spektakulären Riesenschopf-Pflanzen (*Abb. 2.10-1*). In den tropisch-subtropischen Regenzeitengebieten der Anden, so wie auf der Südhemisphäre insgesamt, bilden knie- bis hüfthohe Büschelgräser (= Tussock-Gräser) ausgedehnte Grasfluren in der alpinen Zone (*Abb. 2.10-2*). Sogar in den extremen Lebensräumen der Wüsten-Anden finden sich an vulkanischen Hot-Spots mit Wasserdampfaustritten noch Ökosysteme auf über 6.000 m, mit Moosen und Flechten als Primärproduzenten, Insekten und anderen Wirbellosen sowie Kleinvögeln und Kleinsäugern (Halloy 1991). Wie diese Sonderfälle reichern Felsfluren, Schutthalden, Schneeböden, Moore, Bäche und Seen, sogar die Gletscher mit ihrer sogenannten Kryokonitfauna (Bärtierchen, Gletscherflöhe) die Habitatsvielfalt und damit die Artenvielfalt in den Hochgebirgen der Erde an. Wie immer dieses Mosaik an Lebensräumen verwirklicht ist, die alpinen Lebensräume sind kältebetont und damit dem Klimawandel, insbesondere einer Erwärmung, stark ausgesetzt.

Gebirgslebewesen als sensible Indikatoren für den Klimawandel

Von allen Ökosystemen der Erde gehört die alpine Lebewelt zu jenen, die unverhältnismäßig stark von der Erderwärmung betroffen sind (Sala et al. 2000). Konkurrenzdruck durch nachrückende, rascher- und höherwüchsige Arten und steigender physiologischer Stress engen die ohnehin kleinflächigen Vorkommen von Gebirgspflanzen weiter ein. Nach einer weltweiten Metaanalyse erfuhren Verschiebungen von Verbreitungsgrenzen sowohl polwärts als auch in Richtung höherer Lagen eine deutliche Beschleunigung; vertikal wurde eine durchschnittliche aktuelle Rate von 11 m pro Dekade ermittelt (Chen et al. 2011). Computermodelle zeigen einen drastischen Habitatverlust und Fragmentierung waldfreier, alpiner Lebensräume, was zu einem Rückgang der biotischen Vielfalt und zu einem regionalen Aussterben vieler alpiner und nivaler Arten führen kann (z.B. Gottfried et al. 1999; Dirnböck et al. 2003). Vergleichende Modellstudien europäischer Gebirge prognostizieren, dass durch den Klimawandel bis zum Ende des Jahrhunderts je nach Gebiet zwischen 5

Abb. 2.10-1: *Riesenschopf-Pflanzen der Gattung Dendrosenecio am Mount Elgon (Uganda). Bestände dieser spektakulären Pflanzengestalten prägen hier die alpine Stufe (Foto: H. Pauli).*

und 55% der Pflanzenarten ihren potentiellen Lebensraum verlieren werden (Engler et al. 2011). Die hohe reliefbedingte Vielfalt an mikroklimatisch unterschiedlichen Standorten in den Hochgebirgen könnte klimainduzierte Biodiversitätsverluste bis zu einem gewissen Grad abpuffern (Scherrer & Körner 2011), sofern potentielle Ersatzhabitate auch über entsprechende Böden verfügen. Weiters ist davon auszugehen, dass Aussterbeprozesse durch die hohe Persistenz vieler alpiner Arten erst mit zeitlicher Verzögerung um möglicherweise mehrere Jahrzehnte sichtbar werden (Dullinger et al. 2012).

Bei einem Artenanteil von einem Fünftel (etwa 2.500 Arten) der gesamt-europäischen Flora alleine in den alpinen Hochlagen Europas (Väre et al. 2003), wird jedoch die potentielle Dimension und das Risiko für mögliche Biodiversitätsverluste sichtbar.

Ein weiterer Grund für die besondere Eignung der alpinen Lebewelt für die ökologische Klimawandelforschung liegt in der nur geringen Beeinflussung durch die menschliche Landnutzung, wodurch Klimawandelfolgen deutlicher beobachtet werden können. Zwar können punktuell touristische Wirkungen und landwirtschaftliche Nutzung wirksamer sein, man findet in vielen Hochgebirgen der Erde aber Regionen, wo man direkte Nutzung praktisch ausschließen kann. Natürlich wird in vielen Gebirgsräumen auch Weidebewirtschaftung betrieben, deren Einfluss aber mit der Höhe abnimmt und in Hochgebirgen sind auch indirekte Effekte anthropogener Genese wie luftbürtiger Stickstoffeintrag und steigende Kohlendioxidgehalte der Luft wirksam. Diese wirken aber allgemein und überall. Jedenfalls zählen die alpinen Zonen der Hochgebirge noch zu jenen Ökosystemen, die die ökologische Relevanz des Klimawandels direkt beobachten lassen.

Diesen Umstand macht sich beispielsweise das internationale Forschungsnetzwerk GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpine Environments*) zu Nutze (www.gloria.ac.at; zur Erhebungsmethodik siehe Pauli et al. 2014). Ausgehend von einem europäischen Pilotprojekt haben inzwischen unzählige Forschergruppen in mehr als 120 ausgewählten Gebirgsregionen (target regions) der Erde (*Abb. 2.10-3*) Dauerbeobachtungsflächen im Bereich unterschiedlich hoher Gipfel nach einem standardisierten Methodenkanon angelegt. In Intervallen von 5 bis 10 Jahren werden diese Beobachtungsflächen wieder besucht. Die Erwartung ist, dass sich dadurch mit der Zeit ein sicherer, auf direkten Beobachtungen basierender Datensatz aufbaut, der weltweite Vergleiche zulässt. Der Ökologie werden damit standardisierte Zeitreihen zur Verfügung gestellt, wie sie die Meteorologie schon seit 150 Jahren zur Verfügung hat.

Abb. 2.10-2: *Büschelgräser (Tussock-Grasland), das Markenzeichen der alpinen Systeme in den Bergen der Südhemisphäre. Hier abgebildet sind Arten der Gattung Chionochloa, die mit einer Ausnahme auf Neuseeland beschränkt ist (Foto: H. Pauli).*

Artenzuwachs in den Hochlagen der Alpen

Bis dato haben Botaniker nur in Einzelfällen die Gipfelflora dokumentiert, vor allem, wenn sie einen besonders hohen Berg bestiegen hatten. Die früheste Notiz dieser Art stammt vom Schweizer Pfarrer und Naturforscher Oswald Heer aus dem Jahre 1835 vom höchsten Berg der Silvretta, dem Piz Linard (3.411 m). Er fand am Gipfel des Berges damals eine einzige Art, den Alpenmannsschild (*Androsace alpina*). Dieser Berg wurde später mehrfach wieder besucht und die vorkommenden Arten notiert. Seit Heer stieg die Zahl inzwischen auf 16 Arten an (*Abb. 2.10-4*), deren Populationen nahmen vor allem in den letzten Jahrzehnten stark zu (Pauli et al. 2003; Wipf et al. 2013). Es ist naheliegend, die Zunahme an Arten auf die nachgewiesene Erwärmung im letzten Jahrhundert zurückzuführen. Die so genannte Kleine Eiszeit, die um 1850 ihren letzten Höhepunkt erreichte und möglicherweise zum Verlust alpiner Arten in großen Höhen geführt hatte, war zu Ende gegangen und nivale Spezialisten, zu denen die 16 Arten des Piz Linard zählen, konnten durch die Erwärmung wieder ihre Plätze auf diesem Berggipfel einnehmen. Dies konnte durch Wiederholungsbeobachtungen auf 30 weiteren Dreitausendern in der Schweiz und in Österreich bestätigt werden (Gottfried et al. 1994; Grabherr et al. 1994, 2001). Allerdings sind die Unterschiede zwischen aktueller Artenzahl und historischer mitunter sehr verschieden. Besonders markant war dies am Piz Linard selbst der Fall, der nach den 1930er Jahren keine Zunahme der Artenzahl zeigte (*Abb. 2.10-4*). Erst im Jahr 2003 konnten zwei neue Arten, allerdings nur sehr selten vorkommend, festgestellt werden. Weitere Neuzugänge wurden 2010 verzeichnet. Diese Unterschiede sind einerseits auf die Verbreitungseigenschaften der einzelnen Arten (schnelle versus langsame Verbreiter) bzw. auf Ausbreitungshindernisse zurückzuführen. So sind die untersuchten Gipfel mit geringer Zunahme, so wie der Gipfel des Piz Linard, durch ausgedehnte Block- und Schuttfelder gekennzeichnet, die wesentlich schwieriger zu überwinden sind als kompakte Felsrippen mit ihren Rissen und Spalten. Weitere Arten, die am Piz Linard dazu kommen könnten, sitzen heute gut 100 m unter dem Gipfel. Das heißt, es war bis dato noch nicht warm genug, oder die Blockfelder konnten noch nicht überwunden werden.

Die Erwärmung des Klimas wirkt sich nicht in allen Lebensräumen gleich aus. Im Rahmen des Forschungsprogramms GLORIA konnte gezeigt werden, dass Berggipfel temperater und borealer Gebirgsregionen Europas zwischen 2001 und 2007 einen durchschnittlichen Artenzuwachs von 3.9 Pflanzenarten pro Gipfel aufwiesen, während jene der mediterranen Regionen eine Abnahme von 1.4 Arten zeigten (Pauli et al. 2012). Kombinierte Effekte aus höheren Durchschnittstemperaturen und größerer Trockenheit im Mediterranraum könnten diesen besonders auffälligen Unterschied erklären. Artenrückgänge in mediterranen Gebirgen sind insofern sehr kritisch als hier die alpinen Habitate äußerst kleinräumig und fragmentiert sind und

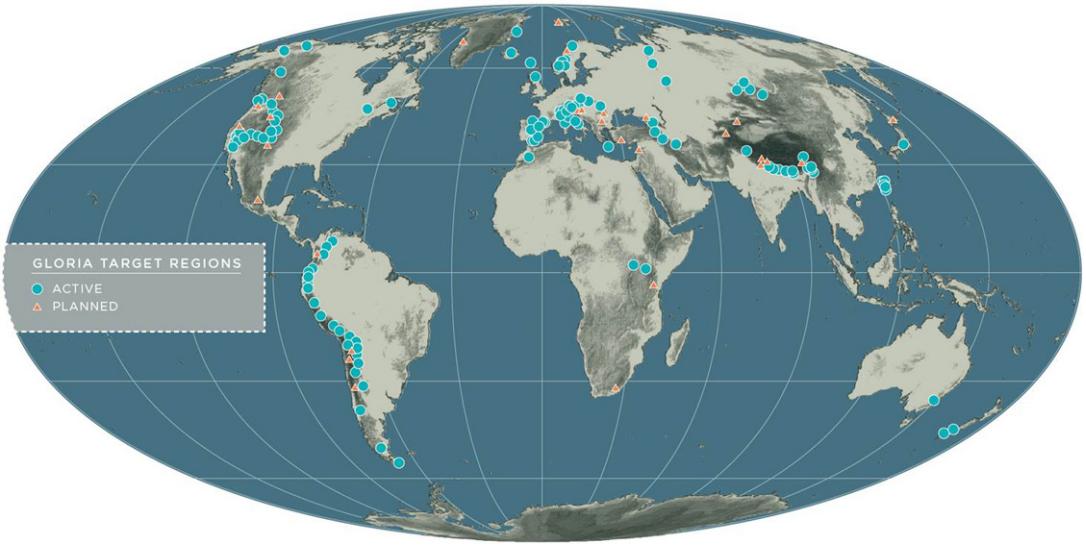

Abb. 2.10-3: *Untersuchungsgebiete (target regions) des internationalen Forschungsnetzwerks GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments). Nach standardisiertem Aufnahmeprotokoll werden die Pflanzengarnitur und die Bodentemperatur auf ausgewählten Gipfeln einer Zielregion erhoben. Ein weltweiter Vergleich ist dadurch möglich.*

der Großteil der Arten endemisch ist, deren Vorkommen sich also nur auf die Hochlagen einzelner kleiner Gebirgssysteme beschränkt.

Nivale Arten sind die ersten Verlierer

Das Beispiel Piz Linard zeigt, dass die realen Prozesse, die die Reaktion der Lebewelt auf den Klimawandel bestimmen, im Endeffekt sehr komplex sind. Dies legen auch räumlich explizite Computermodelle nahe, wie jenes vom Schrankogel (3.497 m; *Abb. 2.10-5*) in den Stubaier Alpen, Tirol (Gottfried et al. 1998, 1999, 2002). Durch die hohe räumliche Auflösung (1 m²) konnte das Mikrorelief im alpin-nivalen Ökoton sehr gut nachgezeichnet und mit mehr als 30 Temperaturmessstellen, verteilt über das Ökoton, in Bezug gesetzt werden. Für die einzelnen Arten konnte aus diesem Datensatz auch ihr Temperaturfenster abgeleitet werden. Das darauf aufbauende Computermodell zeigt deutlich, dass vor allem eine Erwärmung um mehr als 2 °C im Durchschnitt zum Verlust geeigneter Habitate für die nivale Artengarnitur führen muss, dass aber durch das bewegte Mikrorelief kleine Populationen in Fluchtnischen überleben können.

Die Untersuchungen am Tiroler Schrankogel lieferten noch weitere überraschende Ergebnisse. In einer Stichprobe von >350 aus ca. tausend 1 m² großen Flächen im alpin-nivalen Ökoton (2.900–3.200 m), deren Artenzahl an Blütenpflanzen inklusive Deckungsgrad im Jahr 1994 aufgenommen worden war, hatten im Jahr 2004 jene Arten, die an sich der alpinen Stufe zuzurechnen sind, hinsichtlich Deckungsgrad deutlich zugenommen, alle subnivalen bis nivalen Kältespezialisten nahmen hingegen ab (Pauli et al. 2007). Die Arten mit Flächenzunahme waren vorwiegend Pionierarten hochalpiner Rasen, wie die Polsterpflanze Stängelloses Leimkraut (*Silene exscapa*) und die Gras-Arten Kopfgras (*Oreochloa disticha*) und Mittlerer Felsenschwingel (*Festuca intercedens*). Neue Arten von weiter unten waren trotz der deutlichen Erwärmung in den letzten 10 Jahren noch kaum vorhanden. Interessant ist aber, dass die nivalen Arten offensichtlich nicht von den alpinen verdrängt wurden, sondern scheinbar »von selbst« abnahmen. Mehrere Gründe sind denkbar, sowohl ausbreitungsbiologische als auch ökophysiologische Stressfaktoren, die direkt aus geänderten thermischen Bedingungen resultieren, oder aber doch eine noch

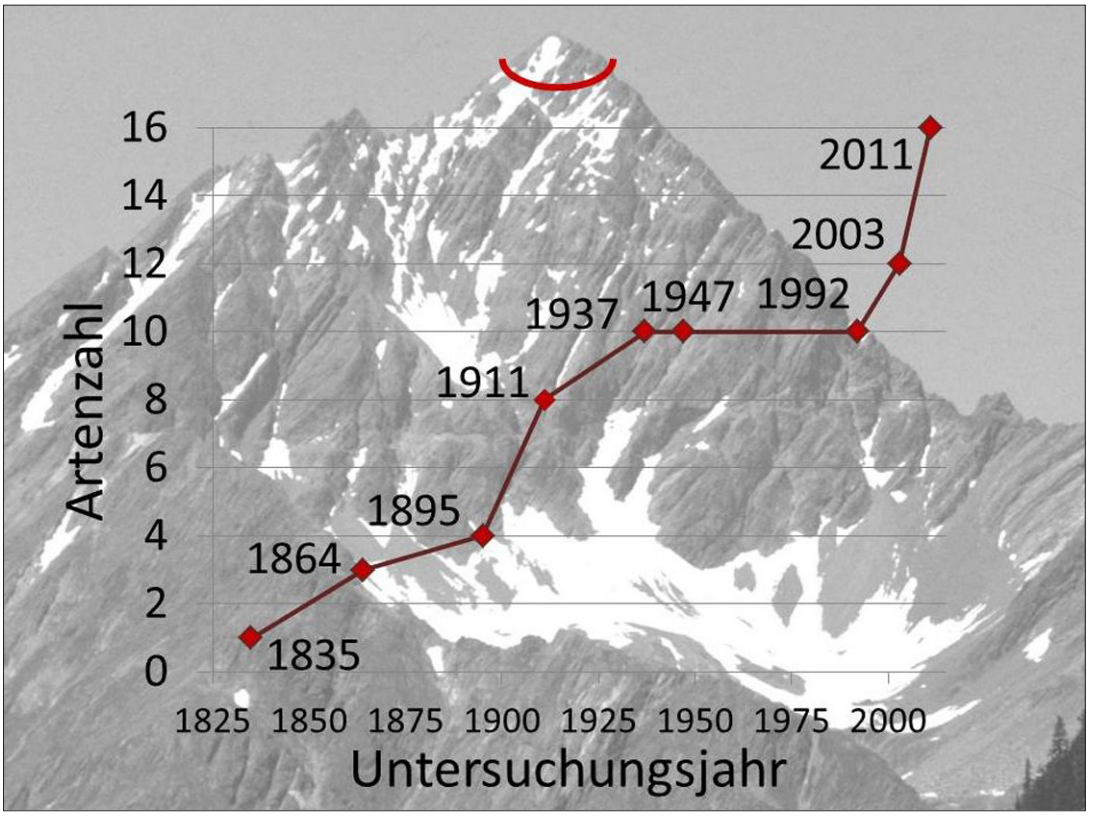

Abb. 2.10-4: *Zunahme an Arten am Gipfel des Piz Linard (3.411 m), Schweiz seit 1835, ein Effekt, der mit der Erwärmung im letzten Jahrhundert in Bezug gebracht werden kann (nach Pauli et al. 2003 und Wipf et al. 2013, aktualisiert).*

nicht sichtbare kompetitive Interaktion zwischen unterschiedlichen Arten. Im Sommer 2014 werden erneut Wiederholungs-Untersuchungen am GLORIA-Mastersite Schrankogel durchgeführt, um die Entwicklung der Vegetation nach weiteren 10 Jahren zu dokumentieren.

Änderungen der Artenzusammensetzung infolge von Temperaturveränderungen sind jedoch keinesfalls ein lokales Phänomen. Eine pan-europäische GLORIA-Studie in 17 Gebirgsregionen Europas, zwischen dem Mittelmeerraum und Nord-Skandinavien, erbrachte den Nachweis einer offenbar großräumig stattfindenden Transformation alpiner Pflanzengesellschaften (Gottfried et al. 2012). Während kälteliebende Arten, die in den Hochlagen der Gebirge ihren Schwerpunkt haben, in den Dauerbeobachtungsflächen überwiegend an Deckung verloren oder aus den Flächen verschwanden, wurden wärmeliebende Arten häufiger. Dieser als Thermophilisierung bezeichnete Umbau alpiner Vegetation stand auch in Zusammenhang mit einer Zunahme der mittleren Temperatur-Minima im Juni, also zu Beginn der alpinen Vegetationsperiode (Gottfried et al. 2012). Überraschend für die an sich langsam-wüchsige alpine Vegetation war der sehr kurze Zeitraum von nur sieben Jahren, über den bereits ein signifikantes Thermophilisierungs-Signal erkennbar war, was eine rapide fortschreitende Einengung kältebetonter Gebirgslebensräume widerspiegelt.

Baumgrenzen wandern

Studien zu Veränderungen von Waldgrenzen haben bereits eine lange Tradition und zeigen ebenfalls Auswirkungen der Klimaerwärmung auf die Vegetation auf. Einen sehr eindrücklichen Nachweis für das Vordringen der Wald- und Baumgrenze lieferte eine Photodokumentation der russischen Akademie der Wissenschaften aus dem Ural, wo innerhalb von 70 Jahren ein Höhersteigen der Grenze des geschlossenen Waldes um etwa 70 Höhenmeter beobachtet wurde (Moiseev & Shiyatov 2003, Kammer et al. 2009; *Abb. 2.10-6*). Im selben Zeitraum ist die jährliche Durchschnittstemperatur im Ural um fast 2 °C angestiegen. Ähnliche Beobachtungen, zum Teil auf Dauerbeobachtungsflächen, stammen aus den skandinavischen Bergen, wo sogar ein »Mitgehen« der Birkenwaldgrenze mit den Klimaschwankungen im letzten Jahrhundert nachgewiesen werden konnte, d.h. ein Höhersteigen während

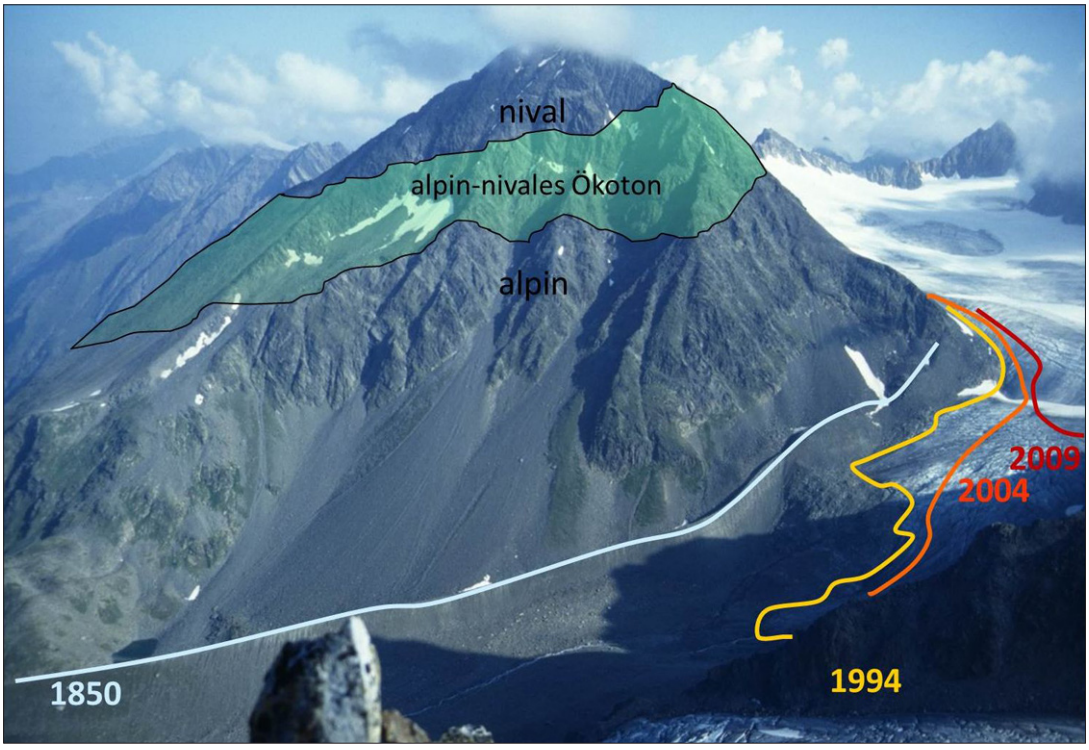

Abb. 2.10-5: *Der Schrankogel (3.497 m) in den Stubaier Alpen als Beispiel eines Berges der temperaten Zone. Alpine Stufe mit so genannten »Urwiesen«, weil nicht erst durch Waldrodung entstanden; darüber die nivale Stufe und dazwischen das alpin-nivale Ökoton mit sich auflösenden alpinen Rasen und Eindringen der Nivalflora von oben her. Die Linien zeigen den Stand der Vergletscherung des Schwarzenbergferners am Ende der Kleinen Eiszeit (1850) sowie in den Jahren 1994, 2004 und 2009 (Quelle: GLORIA-Koordination, ÖAW und BOKU Wien).*

der Warmphase in den 1940er Jahren und einen Rückgang in der folgenden Kaltphase in den 1960er bzw. 1970er Jahren, dann wieder eine Zunahme bis heute (Kullman 2003). Parallel dazu zeigte sich an skandinavischen Waldgrenzen in den 1970er-Jahren ein Rückgang in Populationen der Waldkiefer (*Pinus sylvestris*) und eine verstärkte Etablierung von Jungpflanzen in der darauf folgenden wärmeren Phase (Kullman 2007). Eine Studie aus Südwest-Yukon, Kanada, in der Luftbilder von 1947/1948 mit Bildern von 1989 verglichen wurden, wies starke Veränderungen im Bestand von Weißfichten (*Picea glauca*) (Danby & Hik 2007) auf. Zunehmendes Wachstum, stark gestiegene Populationsdichte an der Baumgrenze und die Ausbreitung der Weißfichte in größere Höhenlagen waren die sichtbarsten Änderungen. Da in dieser Region, ähnlich wie im Ural, keine großen Landnutzungsänderungen oder Naturkatastrophen stattgefunden haben, können die festgestellten Veränderungen mit dem sehr starken Temperaturanstieg von etwa 0.5 °C pro Dekade (seit 1965) in Zusammenhang gebracht werden.

Untersuchungen zu Verschiebungen der Waldgrenzen in den Alpen sind hingegen aufgrund des überprägenden Einflusses der Alp-Bewirtschaftung schwieriger zu interpretieren. Eine Arbeit aus den Schweizer Alpen zeigt, dass der Großteil der Waldverdichtung und des Höhersteigens von Baumarten auf kombinierte Effekte von Nutzungsänderungen und Klimaerwärmung zurückzuführen sind und nur 4% der Höherverschiebung eindeutig mit dem Klimawandel (Gehrig-Fasel et al. 2007) in Zusammenhang stehen.

Harsch et al. (2009) liefern Ergebnisse einer globalen Studie über das Höhersteigen der Baumgrenzen durch Klimaerwärmung, in der auch Alpenstandorte inkludiert sind. In 52% der untersuchten Gebiete zeigte sich seit 1900 ein Anstieg der Baumgrenze, in 47% war keine Reaktion erkennbar, während nur 1% einen Rückzug zeigte. Ein verstärkter Anstiegstrend war in offeneren, locker bestandenen Baumgrenzen erkennbar, unabhängig davon, ob die Erwärmung im Sommer oder im Winter verzeichnet wurde. Im Gegensatz dazu zeigten abrupte oder Krummholz-Baumgrenzen nur einen Anstieg, wenn die Wintertemperaturen stiegen. Ein Höhersteigen von Baumgrenzen ist somit kein einheitliches Phänomen, sondern hängt von vielen Faktoren, wie beispielsweise der Form der Baumgrenze, den vorkommenden Baumarten oder vom direkten anthropogenen Einfluss ab.

Schlussfolgerungen

Wie der kurze Überblick zur gebirgsökologischen Forschungslandschaft zeigt, ist zwar schon manches erforscht, vieles aber noch offen. Direkte Monitoringansätze, die in der ökologischen Klimawandelfolgenforschung im Hochgebirge durch das GLORIA-Netzwerk international etabliert wurden, werden vergleichende Ergebnisse über die Dynamik der Pflanzenzusammensetzung von klimatisch un-

Abb. 2.10-6: *Anstieg des geschlossenen Waldes zwischen 1929 und 1999 um etwa 70 Höhenmeter im Süd-Ural. Quelle:* ***(oben)*** *L.N. Tyulina und* ***(unten)*** *S. Shiyatov & P. Moiseev (Ekaterinburg, Russ. Akademie der Wissenschaften).*

terschiedlichen Gebirgsräumen bringen. Faktum ist jedenfalls, dass allein aufgrund der Höhenverteilung und der absoluten Höhe der jeweiligen Gebirgssysteme Artenverluste aufgrund des prognostizierten Klimawandels auftreten müssen, zumindest in langfristiger Perspektive. Faktum ist ferner, dass die in den letzten 100 Jahren nachgewiesene Erwärmung die alpine Lebewelt in Bewegung gebracht hat, d.h. der Klimawandel ökologisch relevant war und weiterhin ist. Ebenso ist aber auch Faktum, dass die Lebewelt, beispielhaft die alpine, verzögert auf diesen Klimawandel reagiert. Konsequenz daraus: Bis dato ist im Hochgebirge noch kein Fall Klimawandel-bedingter Ausrottung einer Pflanzenart schlüssig nachgewiesen worden, wohl aber eine großräumige Thermophilisierung der alpinen Vegetation der europäischen Gipfelfluren als auch ein Artenrückgang in den stark fragmentierten mediterranen Gebirgen Südeuropas.

Aktuelle Klimaprognosen und Ergebnisse der Klimawandelfolgenforschung in der alpinen Lebewelt geben damit Grund zur Sorge. Auch wenn eine globale Artenkatastrophe allenfalls langfristig zu erwarten ist, ginge doch ein bedeutender Teil unseres Naturerbes in relativ kurzer Zeit verloren. Lokal und regional wäre dies bereits bei einem Temperaturanstieg von 2 °C möglich, ein Szenario, das bereits in den nächsten Jahrzehnten eintreten kann.

Literatur

BURGA, C.A., KLÖTZLI, F. & G. GRABHERR (Hrsg.) (2004): Gebirge der Erde – Landschaft, Klima, Pflanzenwelt. Ulmer, Stuttgart. 504 S.

CHEN, I. C., HILL, J. K., OHLEMULLER, R., ROY, D. B. & C. D. THOMAS (2011): Rapid Range Shifts of Species Associated with High Levels of Climate Warming. Science 333(6045): 1024-1026.

DANBY, R. K. & D. S. HIK (2007): Evidence of recent treeline dynamics in southwest Yukon from aerial photographs. Arctic 60 (4): 411-420.

DIRNBÖCK, T., DULLINGER, S. & G. GRABHERR (2003): A regional impact assessment of climate and land use change on alpine vegetation. Journal of Biogeography 30: 401-418.

DULLINGER, S., GATTRINGER, A., THUILLER, W., MOSER, D., ZIMMERMANN, N. E., GUISAN, A., WILLNER, W., PLUTZAR, C., LEITNER, M., MANG, T., CACCIANIGA, M., DIRNBÖCK, T., ERTL, S., FISCHER, A., LENOIR, J., SVENNING, J.-C., PSOMAS, A., SCHMATZ, D. R., SILC, U., VITTOZ, P. & K. HÜLBER (2012): Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. Nature Climate Change 2(8): 619-622.

ENGLER, R., RANDIN, C., THUILLER, W., DULLINGER, S., ZIMMERMANN, N. E., ARAÚJO, M. B., PEARMAN, P. B., LE LAY, G., PIÉDALLU, C., ALBERT, C. H., CHOLER, P., COLDEA, G., DE LAMO, X., DIRNBÖCK, T., GÉGOUT, J.-C., GÓMEZ-GARCÍA, D., GRYTNES, J.-A., HEEGAARD, E., HØISTAD, F., NOGUÉS-BRAVO, D., NORMAND, S., PUŞCAS, M., SEBASTIÀ, M.-T., STANISCI, A., THEURILLAT, J.-P., TRIVEDI, M., VITTOZ, P. & A. GUISAN (2011): 21st climate change threatens European mountain flora. Global Change Biology 17: 2330-2341.

GEHRIG-FASEL, J., GUISAN, A. & N. E. ZIMMERMANN (2007): Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? Journal of Vegetation Science 18(4): 571-582.

GOTTFRIED, M., PAULI, H. & G. GRABHERR (1994): Die Alpen im »Treibhaus«: Nachweise für das erwärmungsbedingte Höhersteigen der alpinen und nivalen Vegetation. Jahrbuch des Vereins z. Schutz d. Bergwelt, 59. Jg.: 13-27.

GOTTFRIED, M., PAULI, H. & G. GRABHERR (1998): Prediction of Vegetation Patterns at the Limits of Plant Life: A New View of the Alpine-Nival Ecotone. Arctic and Alpine Research, 30: 207-221.

GOTTFRIED, G., PAULI, H., REITER, K. & G. GRABHERR (1999): A fine-scaled predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climate warming. Diversity and Distributions 5: 241-251.

GOTTFRIED, M., PAULI, H., REITER, K. & G. GRABHERR (2002): Potential Effects of Climate Change on Alpine and Nival Plants in the Alps. In: Körner, C. & E. M. Spehn (eds.) - Mountain Biodiversity. Parthenon, New York. 213-223.

GOTTFRIED, M., PAULI, H., FUTSCHIK, A., AKHALKATSI, M., BARANČOK, P., BENITO ALONSO, J. L., COLDEA, G., DICK, J., ERSCHBAMER, B., FERNÁNDEZ CALZADO, M. R., KAZAKIS, G., KRAJČI, J., LARSSON, P., MALLAUN, M., MICHELSEN, O., MOISEEV, D., MOISEEV, P., MOLAU, U., MERZOUKI, A., NAGY, L., NAKHUTSRISHVILI, G., PEDERSEN, B., PELINO, G., PUŞCAŞ, M., ROSSI, G., STANISCI, A., THEURILLAT, J.-P., TOMASELLI, M., VILLAR, L., VITTOZ, P., VOGIATZAKIS, I. & G. GRABHERR (2012): Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. Nature Climate Change 2: 111-115.

GRABHERR, G., GOTTFRIED, M. & H. PAULI (1994): Climate effects on mountain plants. Nature 369: 448.

GRABHERR, G., GOTTFRIED, M. & H. PAULI (2001): Long-term monitoring of mountain peaks in the Alps. In: Burga, C. A. & A. Kratochwil (eds.) - Biomonitoring: General and applied aspects on regional and global scales. Tasks for Vegetation Science. Kluwer, Dordrecht. 35: 153-177.

HALLOY, S. (1991): Islands of life at 6.000 m altitude: The environment of the highest autotrophic communities on earth (Socompa Volcano, Andes). Arctic and Alpine Research 23: 247-262.

HARSCH, M. A., HULME, P. E., MCGLONE, M. S. & R. P. DUNCAN (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. Ecology Letters 12: 1040-1049.

KAMMER, A., HAGEDORN, F., SHEVCHENKO, I., LEIFELD, J., GUGGENBERGER, G., GORYACHEVA, T., RIGLING, A. & P. MOISEEV (2009): Treeline shifts in the Ural mountains affect soil organic matter dynamics. Global Change Biology 15(6): 1570-1583.

KLANDERUD, K. & H. J. B. BIRKS (2003): Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. The Holocene 13: 1-6.

KÖRNER, C. (2003): Alpine Plant Life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems. Second edition. Springer.

KULLMAN, L. (2003): Recent reversal of neoglacial climate cooling trend in the Swedish Scandes as evidenced by birch tree-limit rise. Global and Planetary Change 36: 77-88.

KULLMAN, L. (2007): Tree line population monitoring of Pinus sylvestris in the Swedish Scandes, 1973-2005: implications for tree line theory and climate change ecology. Journal of Ecology 95(1): 41-52.

MOISEEV, P. A. & S. G. SHIYATOV (2003): Vegetation dynamics at he treeline ecotone in the Ural highlands, Russia. In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. & D. B. A. Thompson (eds.) - Alpine Biodiversity in Europe. Springer, Berlin. 423-435.

NAGY, L. & G. GRABHERR (2009): The biology of alpine habitats. Oxford University Press.

PAULI, H., GOTTFRIED, M. & G. GRABHERR (2003): The Piz Linard (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.

PAULI, H., GOTTFRIED, M., HOHENWALLNER, D., REITER, K., CASALE, R. & G. GRABHERR (2004): The GLORIA field manual – Multi-summit approach. European Commission, DG Research. 85 pp.

PAULI, H., GOTTFRIED, M., REITER, K. KLETTNER, CH. & G. GRABHERR (2007): Signals of range expansions and contractions of vascular plants in the high Alps: observations (1994-2004) at the GLORIA master site Schrankogel, Tyrol, Austria. Global Change Biology 13: 147-156.

PAULI, H., GOTTFRIED, M., DULLINGER, S., ABDALADZE, O., AKHALKATSI, M., ALONSO, J. L. B., COLDEA, G., DICK, J., ERSCHBAMER, B., FERNÁNDEZ CALZADO, R., GHOSN, D., HOLTEN, J. I., KANKA, R., KAZAKIS, G., KOLLÁR, J., LARSSON, P., MOISEEV, P., MOISEEV, D., MOLAU, U., MOLERO MESA, J, NAGY, L., PELINO, G., PUSCAS, M., ROSSI, G., STANISCI, A., SYVERHUSET, A. O., THEURILLAT, J.-P., TOMASELLI, M., UNTERLUGGAUER, P., VILLAR, L., VITTOZ, P. & G. GRABHERR (2012): Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. Science 336: 353-355.

PAULI, H., GOTTFRIED, M., LAMPRECHT, A., NIESSNER, S., RUMPF, S., WINKLER, M., STEINBAUER, K., OPPELT, A. & G. GRABHERR (2014): The GLORIA field manual. Standard multi-summit approach, Supplementary methods and extra approaches. GLORIA-koordination, In Press.

SALA, O. E., CHAPIN III, F. S., ARMESTO, J. J., BERLOW, E., BLOOMFIELD, J., DIRZO, R., HUBER-SANNWALD, E., HUENNEKE, L. F., JACKSON, R. B., KINZIG, A., LEEMANS, R., LODGE, D. M., MOONEY, H. A., OESTERHELD, M., POFF, N. L., SYKES, M. T., WALKER, B. H., WALKER, M. & D. H. WALL (2000): Global biodiversity scenarios for the year 2100. Science 287: 1770-1774.

SCHERRER, D. & C. KÖRNER (2011): Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. Journal of Biogeography 38(2): 406-416.

THUILLER, W., LAVOREL, S., ARAUJO, M. B., SYKES, M. T. & I. C. PRENTICE (2005): Climate change threats to plant diversity in Europe. PNAS, 102/23: 8245-8250.

VÄRE, H., LAMPINEN, R., HUMPHRIES, C. & P. WILLIAMS (2003): Taxonomic Diversity of Vascular Plants in the European Alpine Areas. In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. & D. B. A. Thompson (eds.) - Alpine Biodiversity in Europe. Springer, Berlin. 133-148.

WIELGOLASKI, F. E. (ed.) (1997): Polar and alpine tundra. Ecosystems of the world 3. Elsevier, Amsterdam. 930 pp.

WIPF, S., STÖCKLI, V., HERZ, K. & C. RIXEN (2013): The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. Plant Ecology & Diversity, Vol. 6, 3-4: 447-455.

Kontakt:

Dr. Harald Pauli
Institut für interdisziplinäre Gebirgsforschung
Österreichische Akademie der Wissenschaften
harald.pauli@univie.ac.at

Mag. Andrea Lamprecht
andrea.lamprecht@boku.ac.at
Mag. Sophie Nießner
Zentrum für globalen Wandel und Nachhaltigkeit
Universität für Bodenkultur Wien
sophie.niessner@boku.ac.at

Grabherr, G., M. Gottfried, H. Pauli, A. Lamprecht & S. Nießner (2014): Beobachtete und prognostizierte Veränderungen in der alpinen Lebewelt. In: Lozán, J.L., Grassl, H., Karbe, L. & G. Jendritzky (Hrsg.). Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen. 2. Auflage. Elektronische Veröffentlichung (Kap.2.10) - www.warnsignale.uni-hamburg.de.