

Der globale Wandel im internationalen Monitoring

Georg Grabherr, Michael Gottfried & Harald Pauli



1. Global Change Research – das aktuelle Forschungsthema

Es waren die vergangenen Jahrzehnte, in denen klar wurde, dass es neben den vielen lokalen Umweltproblemen zunehmend solche gibt, die eine globale Dimension erreicht haben. So ist Landnutzungswandel großen Stils, verursacht durch Überbevölkerung oder technischen Fortschritt, auf allen Kontinenten wahrnehmbar, wird der Klimawandel zunehmend als Folge des anthropogen bedingten Treibhauseffekts verstanden. Stickstoffeinträge aus der Luft oder direkte Immissionen in Böden oder in Gewässer verursachen eine allgemeine Eutrophierung. Durch den globalen Handel und Verkehr sind die Verbreitungsbarrieren zwischen den Kontinenten bzw. Subkontinenten zusammengebrochen, Neobiota können für autochthone Floren und Faunen zur Bedrohung werden, manche gefährden großflächig landwirtschaftliche Kulturen. Last, but not least muss der erhöhte Kohlendioxidgehalt der Atmosphäre über den Weg der Primärproduktion verändernd auf die Lebewelt wirken. Autoren wie der Nobelpreisträger Paul Crutzen sprechen bereits in Analogie zu den Erdzeitaltern von einem Anthropozän (Steffen et al. 2004).

In einer umfassenden Analyse kamen Sala et al. (2000) zu dem Schluss, dass die genannten anthropogen ausgelösten Umweltveränderungen zwar global beobachtbar, aber nicht überall gleich bedeutend für die Lebewelt sind. Regenwälder und Savannen der Tropen sowie Steppen und temperate Biome auf der Südhemisphäre verändern sich derzeit durch zunehmende Nutzung und Nutzungsänderung dramatisch, d.h., es ist der Landnutzungswandel, der hier im Vordergrund steht. In mediterranen Gebieten (Mittelmeergebiet, SW-Australien, Kalifornien, Chile, Kapland) bedrängen die vielen Neobiota die heimische Tier- und Pflanzenwelt und sind also dort das



primäre Global-Change-Phänomen. In den Kulturlandschaften der temperaten Gebiete der Nordhemisphäre wirkt besonders die Stickstoffeutrophierung aus Industrie, Siedlungen und Verkehr. Für die arktischen Tundren, die boreale Taiga und die Hochgebirgsregionen wird der Klimawandel als besonders wirksam geortet.

Für Hochgebirgsländer wie Österreich, die Schweiz, jene Hochasiens oder Südamerikas sind daher klimawandelbedingte Folgewirkungen, seien diese nun kryosphärisch (Gletscherschwund, Veränderung von Permafrost und Schneeregime), hydro-sphärisch (Änderung des Abflussregimes) oder biosphärisch (Vegetationswandel, Verlust an Biodiversität), von besonderer Bedeutung (Huber, Reasoner & Bugmann 2005). Die ökologischen Leistungen der Naturlandschaften hier und in den Gebirgsregionen allgemein können durch den Klimawandel gefährdet, mit Sicherheit aber verändert werden.

Aus alledem folgt, dass der Bedarf an möglichst exakten Prognosen der Entwicklung und an Forschung zum besseren Verständnis der Prozesse enorm gestiegen ist. Dies gilt vor allem für die ökologische Risikoabschätzung, sei dies nun im Hinblick auf den Verlust der Wasserreserven, die zunehmende Erosion infolge Auftauens des Permafrosts, die Zunahme katastrophaler Ereignisse wie Hochwässer und Lawinen oder den Verlust an Biodiversität. Weiters sind die Hochgebirge allgemein als Indikatoren für die ökologischen Klimawandelfolgen entdeckt worden. Ihre Lebewelt ist mit zunehmender Höhe tieferen Temperaturen ausgesetzt, bis an die Kältgrenzen des Lebens. Gebirge finden sich verteilt über so verschiedene Klimaregime wie jenes der Tropen (Tageszeitenklima) oder jenes der Arktis (Polarnacht). Zumindest die hohen Lagen sind meist von direkter Nutzung frei, die Klimawirkungen können daher direkt beobachtet werden.

Aus all diesen Gründen ist das Forschungsinteresse an Hochgebirgen in den vergangenen Jahren gewachsen. Klassische Länder mit Gebirgsforschung, wie Österreich, Schweiz, Frankreich, Russland, die USA (Westregionen) und Neuseeland, haben ihre Forschungen intensiviert, andere kommen mit unterschiedlichsten Zielrichtungen und Motiven dazu. Auf der einen Seite verstärkt sich der Wunsch nach umfassenden Studien, die sowohl die ökologischen als auch die sozioökonomischen Systeme integrativ erfassen sowie auch transdisziplinär orientiert sind – ein Ansatz wie er bereits bei den frühen MAB-Projekten der UNESCO (Oberurgl, Davos, Grindelwald; Price 1995) mit wechselndem Erfolg beschrritten wurde. Auf der anderen Seite sollen spezifische Phänomene, Veränderungen und Prozesse besser erkannt und verstanden sowie die Forschung auf diese fokussiert werden, wie z.B. die Veränderung des Permafrosts. Trotzdem – und erstaunlicherweise – hat sich bis vor wenigen Jahren keine international kommunizierende, hochgebirgsorientierte Forschungsszene herausgebildet, wie dies etwa die Arktisforschung schon lange kennt. Auch die großen

ökologischen Forschungsprogramme wie das „International Geosphere-Biosphere Programme“ (IGBP), DIVERSITAS oder das „Global Terrestrial Observing System“ (GTOS) nahmen in ihrer Anfangsphase die Existenz von Hochgebirgen nicht wahr. Es war ein erstes Meeting im Jahr 1996 in Kathmandu, aus der sich die IGBP-verankerte „Mountain Research Initiative“ (MRI) entwickelte (Becker & Bugmann 2001), die letztlich mit dem Projekt GLOCHAMORE, finanziert als „Specific Support Action“ durch das 6. Forschungs-Rahmenprogramm der EU und in Zusammenarbeit mit der UNESCO, den Versuch unternahm, eine umfassende „Global Change Research Strategy“ zu entwickeln (Björnsen Gurung 2006). Diese baut auf vier grundlegenden Aktivitäten auf, wie sie bereits in Kathmandu skizziert wurden:

1. Monitoring von Gebirgsökosystemen, von kryosphärischen und hydrologischen Veränderungen;
2. Entwicklung von Prognosemodellen;
3. Feldstudien betreffend die Interaktionen von abiotischen und biotischen Prozessen, inklusive experimentelle Ansätze;
4. Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die sozioökonomischen Systeme in Hochgebirgsregionen.

Die Abteilung „Global-Change-Forschung“ an der Forschungsstelle „Gebirgsforschung: Mensch und Umwelt“ ist in diesem Forschungsszenario zentral positioniert. Prof. Grabherr und Dr. Gottfried waren bereits in Kathmandu 1996 dabei und beteiligten sich, zusammen mit Dr. Pauli, Universität Wien, intensiv am Aufbau von MRI. Die Koordination des EU-Projekts GLOCHAMORE lag in unseren Händen. Die bedeutendste Leistung war aber zweifellos die Etablierung des Monitoring-Netzwerks GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments), dem dieser Beitrag gewidmet ist. GLORIA ist das einzige global angelegte, „ground based“ Monitoringprogramm das – unseres Wissens – nicht nur auf dem Papier steht, sondern operativ ist. Mehr als 50 Forschergruppen und 47 Beobachtungsgebiete (Target Regions, Abb. 5, S. 24) sind inzwischen eingebunden und werden in Zusammenarbeit von IGF und dem Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie der Universität Wien koordiniert und betreut.

2. Leben im Hochgebirge – der Klimaerwärmung unmittelbar ausgesetzt

Bei einem mittleren Temperaturgradienten von 0,6 Grad Celsius pro 100 Höhenmeter würde ein Temperaturanstieg um 3 Grad Celsius eine Höhenverschiebung um 500 Meter ergeben – bei der für den Alpenraum prognostizierten Temperaturzunahme um bis zu 5 Grad Celsius bis 2100 (Mitchell et al. 2004) eine Verschiebung um über 800 Höhenmeter. Aufgrund dessen wird das folgende Szenario wahrscheinlich:

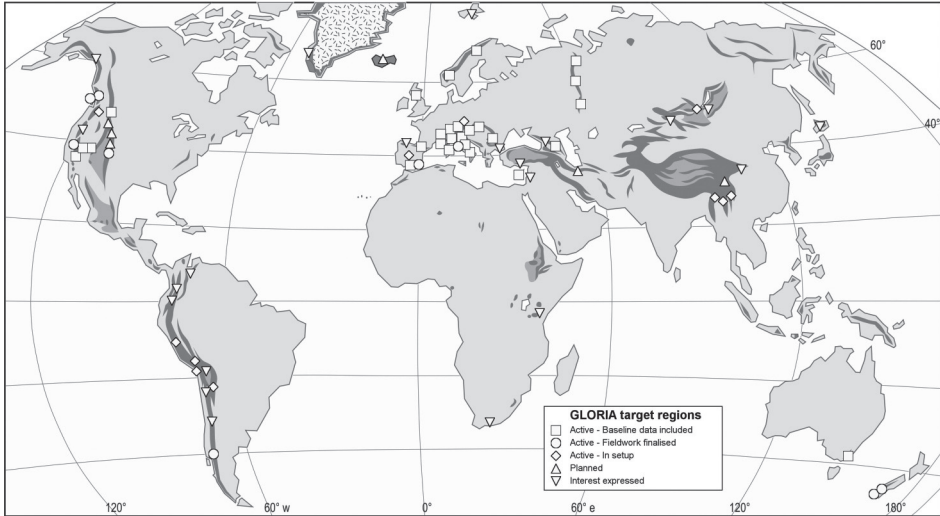


Abb. 5: GLORIA Beobachtungsgebiete (Target Regions), Stand Oktober 2006.

In vielen Teilen der Alpen könnte die alpine Zone mittel- oder zumindest längerfristig verschwinden. Wie rasch dieser Rückgang vor sich gehen wird, kann heute noch nicht gesagt werden. Die Zusammensetzung der Pflanzengesellschaften im Hochgebirge, wie wir sie heute kennen, wird sich verändern, denn Pflanzenarten wandern unterschiedlich schnell. Konkurrenzstarke Arten werden aus tieferen Lagen einwandern und das Areal kälteadaptierter Hochlagenspezialisten einengen. Geeignete Lebensräume für viele Hochgebirgspflanzen werden zunehmend in weiten Gebieten der Alpen fehlen. Modellstudien zeigen: Sind die höchsten Punkte erreicht, dann könnten Gipfel zu Arten- und damit zu Biodiversitätsfallen werden (Gottfried, Pauli & Grabherr 1998; Gottfried et al. 1999).

In geographisch weit voneinander entfernten Gebirgsräumen hat sich die obere Wald- und Baumgrenze im Laufe des 20. Jahrhunderts bereits in höher gelegene Zonen verlagert, etwa in Bulgarien (Meshinev, Apostolova & Koleva 2000), im Ural (Moiseev & Shiyatov 2003), in Skandinavien (Kullman 2002, 2003), in Alaska (Sturm, Racine & Tape 2001) und in Neuseeland (Wardle & Coleman 1992). Klimatische Gründe sind die wahrscheinliche Ursache für diese möglicherweise weltweite Dynamik. Im Ural, wo kaum bis keine menschlichen Nutzungseinflüsse vorliegen, hat sich die Waldgrenze deutlich nach oben verschoben: im Norden um 20–40 Meter innerhalb von 35 Jahren, im Süden um 60–80 Meter in 70 Jahren (Moiseev & Shiyatov 2003). Die beobachtete Baumgrenzenverschiebungen in Skandinavien von bis zu 150–165 Metern hielt Schritt mit der Erwärmung von etwa 1 Grad Celsius während des 20. Jahrhunderts (Kullman 2004).

Aufgrund von historischen Vergleichskartierungen auf Alpengipfeln konnte auch in den Hochlagen der Gebirge eine aufwärtsgerichtete Migration festgestellt werden. Die Artenzahl hat in der Mehrheit der erneut untersuchten Gipfelzonen auffällig zugenommen, während kein Gipfel einen deutlichen Rückgang zeigte (Gottfried, Pauli & Grabherr 1994; Grabherr, Gottfried & Pauli 1994, 2001; Pauli, Gottfried & Grabherr 2001). Eine Anreicherung der alpinen Stufe mit Arten tieferer Lagen konnte auch im südlichen Norwegen beobachtet werden (Klanderud & Birks 2003) und jüngere Untersuchungen aus den Alpen zeigten eine Beschleunigung dieses Migrationsprozesses innerhalb der vergangenen beiden Dekaden (Walther, Beißner & Burga 2005).

Trotz der zunehmenden Befunde über die ökologischen Auswirkungen des Klimawandels fehlt es an großräumig vergleichbaren Daten. Die noch weitgehend unabhärbaren Konsequenzen einer weltweiten Klimaerwärmung für das Wirkungsgefüge und die Biodiversität in Hochgebirgslebensräumen sind letztlich nur durch ein geographisch weit gefächertes Monitoringprogramm zu klären. Das war der Ausgangspunkt der Forschungsinitiative GLORIA, der „Global Observation Research Initiative in Alpine Environments“, wie sie in zahlreichen Monitoring-Empfehlungen nachdrücklich gefordert wurde (z.B. Becker & Bugmann 2001; EEA 1999, 2004; Heal 1999; Körner & Spehn 2002; Messerli & Ives 1997; Price & Neville 2003). GLORIA ist um die Jahrtausendwende nach einer Testphase in den Alpen und in der südspanischen Sierra Nevada am Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie der Universität entstanden. Wichtige Unterstützung während der Testphase kam auch von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften im Rahmen des „International Geosphere-Biosphere-Programms“.

3. Alpine Ökosysteme – ideale Freilandlaboratorien

Hochgebirge, die Zone oberhalb der klimatischen Waldgrenze, sind ein idealer Schauplatz für die Klimafolgenforschung. Alpine Ökosysteme können aus folgenden Gründen sozusagen als „ökologische Messinstrumente“ für die Klimaerwärmung dienen: Zum einen sind sie vergleichsweise einfache Systeme. Zentrale klimatische Einflussgrößen wie Temperatur und Niederschlag stehen deutlich im Vordergrund. Zum anderen aber sind Hochgebirge der einzige terrestrische Großlebensraum von weltweiter Verbreitung. Ein steiler Temperaturgradient ist allen Gebirgen ein gemeinsamer ökologischer Leitfaktor – von den Tropen bis zu den Polargebieten. Überall finden wir eine Abfolge von hochwüchsigen Formationen, die oberhalb der zumeist vorhandenen klimatischen Waldgrenze sukzessive in kälteadaptierte niedrige Vegetation und zuletzt in offene Schutt- und Felsvegetation übergeht. Drittens sind Gebirge jene Regionen, in denen auch heute noch der direkte menschliche Einfluss relativ gering ist. Zwar sind Bergwälder und alpine Grasländer in vielen Gebirgen der

Welt anthropogen zumindest mitgeprägt, dennoch aber meist wesentlich naturnäher geblieben als Lebensräume tieferer Lagen. In den höchsten Gebirgszonen, wo Fels und Schutt dominieren, finden wir auch heute noch echte Wildnis. Hochgebirgsräume stellen damit ein ideales „Freilandlaboratorium“ für Direktbeobachtungen zur Klimaerwärmung und ihren ökologischen Folgen dar.

Durch die globale Verbreitung finden wir in Hochgebirgen allerdings eine große Vielfalt unterschiedlicher Ausprägungen kalter Ökosysteme, die zudem durch den steilen klimatischen Gradienten und durch das ausgeprägte Relief gefördert wird. Die Artenzahl im Großlebensraum Hochgebirge liegt über dem weltweiten Durchschnitt (Körner 2003). In Europa haben etwa 20 Prozent der 11.500 natürlich vorkommenden Pflanzenarten des Kontinents ihren Schwerpunkt oberhalb der Waldgrenze – ein Gebiete das nur drei Prozent der Fläche Europas ausmacht (Väre et al. 2003). Viele Arten sind durch orographische, kältebedingte Isolation endemisch und kommen nur in einzelnen Gebirgsstöcken vor, während andere, arktisch-alpine Arten eine weite Verbreitung von Eurasien bis Nordamerika finden. Eine weltweite Einengung kalter Lebensräume wird sowohl Endemiten als auch weit verbreitete Gebirgsarten und insgesamt einen erheblichen Anteil der globalen biologischen Diversität betreffen.

4. GLORIAS Multi-Summit Approach – ein effizienter Monitoring-Ansatz

GLORIA ist mit dem weltweiten Fokus auf Breitenwirkung ausgerichtet: der „Multi-Summit Approach“ von GLORIA beinhaltet ein kostengünstiges und relativ rasch durchführbares Monitoringprogramm, das auch unter Extrembedingungen in entlegenen Regionen und in Ländern mit geringen Forschungsbudgets durchgeführt werden kann (Gottfried et al. 2002a; Grabherr, Gottfried & Pauli 2000; Pauli et al. 2005). Mit diesem Kernbereich von GLORIA wird ein Maximum an Vergleichbarkeit angestrebt. In jedem Beobachtungsgebiet (Target Region) werden Gipfelzonen in vier unterschiedlichen Höhenlagen ökologisch und klimatologisch untersucht (vgl. Abb. 19 h, S. 81).

Warum Gipfelbereiche als Vergleichseinheiten? In Gipfelzonen finden sich auf kleinflächigem Areal Habitats in allen Himmelsrichtungen, die charakteristisch für die jeweilige Höhenstufe sind. Kleinräumige ökologische Gradienten, etwa von der Süd- zur Nordseite eines Gipfels, bedingen Übergangszonen der Vegetation, die auf klimatische Veränderungen besonders sensibel mit einer Verschiebung der Artenzusammensetzung reagieren könnten. Zudem sind Gipfel topographisch exakt definierte Landmarken, die auch nach langer Zeit präzise wieder auffindbar sind. Damit ist auch die zeitliche Dimension von GLORIA angedeutet: Der Wert dieser Untersuchungsflächen wird von Jahrzehnt zu Jahrzehnt steigen.

Die Auswahl der Gipfel erfolgt nach klar definierten Richtlinien. Sie sollen einer klimatisch und geologisch einigermaßen einheitlichen Zone innerhalb des jeweiligen Gebirgssystems angehören. Ihr Relief soll weder plateauartig noch zu schroff sein. Je geringer die direkte menschliche Einflussnahme durch Weidevieh oder Tourismus ist, desto geeigneter ist die Situation. Schließlich sollen die Gipfel entlang eines Höhengradienten angeordnet sein. Entsprechend der topographischen Position der Gipfelzone sind die Beobachtungsflächen nach den vier Haupthimmelsrichtungen angeordnet, und zwar auf drei unterschiedlichen Skalenniveaus: im Dezimeter-, Meter- und 10er-Meterbereich (Abb. 6).

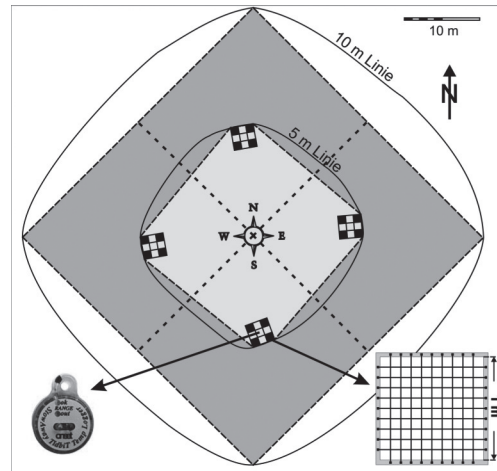


Abb. 6: Sampling Design für einen GLORIA-Beobachtungsgipfel (Multi-Summit Approach).

Der Arbeitsablauf stellt sich – kurz gefasst – wie folgt dar. Vom höchsten Gipfel-
punkt werden mit Kompass und Maßband in jeder Himmelsrichtung die obersten
fünf Höhenmeter ausgemessen. Auf dem 5-Meter-Niveau wird ein Zellennetz von
3 x 3 Meter mit ein Quadratmeter großen Einzelflächen positioniert. Die Eckflä-
chen dieser Raster werden kartiert, also 16 Flächen pro Gipfel. In jeder Fläche wird
der Pflanzenbestand und der prozentuelle Deckungswert der einzelnen Arten erho-
ben. Ergänzend werden ein Rasterrahmen aus 100 Zellen (à 10 x 10 cm) über die
Flächen gelegt und die in jeder Zelle vorkommenden Arten notiert. Neben diesen
kleinskalierten Stichprobenflächen soll auch der gesamte Artenbestand des Gipfels
lückenlos erhoben werden. Dazu wird das Areal der obersten fünf Höhenmeter
exakt an den Zwischenhimmelsrichtungen (Nordost, Südost etc.) in vier Sektoren
abgegrenzt. Ebenso wird ein unterer Gipfelbereich zwischen der 5-Meter- und 10-
Meter-Linie definiert. Damit entstehen insgesamt acht Gipfelsektoren, in denen je-
weils der Artenbestand und die Häufigkeit jeder Art erhoben werden. Die Unter-
teilung in einen oberen und einen unteren Gipfelbereich dient der Erfassung jener
Pflanzenarten, die in nächster Zukunft in die unmittelbare Gipfelzone einwandern.
Schließlich wird in der Mitte jedes 3 x 3-Meter-Rasters ein Miniaturdatenlogger ver-
graben, der stündlich die Temperatur im Wurzelbereich aufzeichnet. Aus diesen lau-
fend über viele Jahre durchgeführten Messreihen kann auch auf die Schneebede-
ckung am Standort rückgeschlossen werden. Die Gipfelzonen können so klimatisch
klassifiziert und verglichen werden.

Eine detaillierte Darstellung des Multi-Summit Approach findet sich im GLORIA-Feldhandbuch (Pauli et al. 2004b), das in Englisch, Spanisch und Chinesisch von der GLORIA Website (www.gloria.ac.at) bezogen werden kann. Die Website ermöglicht auch den Zugang zur zentralen GLORIA-Datenbank. Diese beinhaltet alle Feld- und Kollateraldaten, die im Zuge der Untersuchungen seit 2001 erhoben wurden. Der Zugriff ist teils öffentlich, teils auf das GLORIA Konsortium beschränkt.

5. Vom europäischen zum weltweiten GLORIA-Netzwerk

Die erste große Umsetzungsphase der GLORIA-Initiative erfolgte im 5. Forschungs-Rahmenprogramm der EU mit dem von 2001 bis 2003 laufenden Projekt GLORIA-Europe. Dieses Projekt mit 22 Partnergruppen aus 13 Ländern wurde auch vom Österreichischen Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur sowie von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gefördert. In 18 Zielgebieten, verteilt über fast alle großen Gebirgssysteme Europas von der Sierra Nevada in Südspanien bis zum nördlichsten Ural, konnten insgesamt 71 Gipfelzonen erfolgreich untersucht werden. Das umfangreiche Projektkonsortium wurde durch vier Partnergruppen aus den Bereichen Bildung, Umwelt- und Naturschutz sowie Forschungskoordination ergänzt, die den Aufbau des GLORIA-Netzwerks transparent an die Öffentlichkeit herantrugen.

Derzeit besteht das GLORIA-Netzwerk aus über 50 Arbeitsgruppen, die bis zum Herbst 2006 in weltweit 47 Beobachtungsgebieten Monitoring-Gipfel nach dem Multi-Summit Approach eingerichtet haben (Abb. 5, S. 24). Neben einer Verdichtung des Netzwerkes in Europa, etwa in der Schweiz, in Spanien, Italien, Deutschland und im Ural, fand die GLORIA-Initiative besonders in Nordamerika große Anerkennung. Der 2003 in Nordamerika entstandene Verbund CIRMOUNT (www.fs.fed.us/psw/cirmount) aus Klima- und Klimafolgenforscherinnen und -forschern hat den Multi-Summit Approach als fixe Komponente ihrer Aktivitäten aufgenommen. Dementsprechend sind in den USA und in Kanada mittlerweile acht GLORIA-Gebiete entstanden. In Südamerika ist GLORIA in Chile, Argentinien, Bolivien und Peru vertreten. In der Cordillera Vilcanota, im Südosten Perus, befindet sich der entlegene und mit 5240 Meter höchste GLORIA-Gipfel (Krajick 2006), wo zwei Blütenpflanzenarten neu für die Wissenschaft entdeckt wurden (Halloy, pers. comm.). Erste Untersuchungsgebiete in der andinen Páramo-Region sind derzeit in Kolumbien in konkreter Planung.

Auf der Südinsel Neuseelands (Mark et al. 2006) und in Australien ist das Netzwerk schon seit Jahren präsent. Beide Gebiete zeichnen sich durch einen besonders hohen Anteil – über 90 Prozent – an endemischen Pflanzenarten aus. In den australischen Snowy Mountains ist die alpine Stufe nur etwa 300 Höhenmeter breit und

damit besonders durch klimainduzierte Migrationsprozesse gefährdet (Pickering & Armstrong 2003).

In Asien entstanden die ersten GLORIA-Gebiete im Jahr 2005, einerseits im russischen Teil des Altai, andererseits im Hengduan Shan im Nordwesten der südchinesischen Provinz Yünnan. Im Hengduan Shan, einer besonders artenreichen Gebirgsregion im sommerfeuchten, monsunal geprägten östlichen Teil des Himalaya-Systems, wurde im Oktober 2006 die Feldarbeit für das dritte GLORIA-Gebiet Yünnans abgeschlossen. Die Arbeiten in Yünnan erfolgten in Kooperation zwischen dem „Missouri Botanical Garden“ und dem neu errichteten botanischen Garten in Zhongdian sowie mit Unterstützung von „The Nature Conservancy“ und der „National Geographic Society“ in Höhenlagen zwischen 4300 und 5000 Metern. Weitere Beobachtungsgebiete sind in Sichuan durch die Chinesische Akademie der Wissenschaften in Chengdu geplant, wo auch das GLORIA-Feldhandbuch ins Chinesische übersetzt wurde. Ein erstes Gebiet im Südwesten Asiens ist im Elburs-Gebirge nördlich von Teheran in Entstehung. Die internationale Arbeitsgruppe „Conservation of Arctic Flora and Fauna“ des „Arctic Council“ beabsichtigt die Einbindung des GLORIA-Protokolls für ein zirkumarktisches Biodiversitäts-Monitoring.

Die Gesamtkoordination des weltweiten GLORIA-Netzwerkes liegt nach wie vor in Österreich beim Department für Naturschutzbiologie, Vegetations- und Landschaftsökologie (Universität Wien) und bei der Gebirgsforschung (IGF) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Die Verantwortung für die zentrale Datenbank und die GLORIA-Website liegt bei der österreichischen Koordination des Netzwerkes. Finanzielle Unterstützung wurde vom Österreichischen Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und weiterhin von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften gewährt sowie durch das MAB-Programm der UNESCO in Paris zum Aufbau von GLORIA-Gebieten in Biosphärenreservaten (Grabherr et al. 2005; Pauli et al. 2004a). Dauerhafte Schutzgebiete wie etwa Biosphärenreservate sind für ein erfolgreiches Langzeit-Monitoring von zentraler Bedeutung. Deshalb liegen etwa 40 Prozent aller Beobachtungsgebiete innerhalb oder in unmittelbarer Nähe von Biosphärenreservaten, andere in Nationalparks oder, wie der Hochschwab, in einem Trinkwasserschutzgebiet.

6. Langzeit-Monitoring – die zeitliche Komponente

Die Dauerbeobachtungsflächen im GLORIA-Netzwerk müssen nicht jedes Jahr untersucht werden. Die meisten Hochgebirgspflanzen sind langsamwüchsig und langlebig. Das Erscheinungsbild der einzelnen Individuen zeigt keine dramatischen Schwankungen von Jahr zu Jahr – vielmehr reagieren die Pflanzen auf länger anhaltende Klimaveränderungen. Eine zu hohe Monitoringfrequenz würde zudem auch



unerwünschte Störungen durch die Kartierungsarbeit verursachen. Deshalb werden Wiederholungsuntersuchungen in Intervallen von fünf bis zehn Jahren empfohlen. Über die Wiederaufnahme von zehn Jahre alten Dauerflächen am GLORIA Master Site Schrankogel in den Tiroler Stubai Alpen wird nachstehend berichtet.

Im Jahr 2008 ist die erste große Wiederholungsuntersuchung der im Jahr 2001 etablierten europäischen GLORIA-Gipfel geplant. Für die effiziente methodische Umsetzung dieses Vorhabens wurde im August 2006 ein internationaler Workshop im österreichischen GLORIA-Gebiet Hochschwab veranstaltet, an dem Mitarbeiter des Netzwerks aus 17 Ländern teilnahmen. Maßgebliche Förderung erfolgte durch die Schweizerische MAVA-Stiftung für Naturschutz, die Unterstützung für die Wiederaufnahme zugesichert hat. Die Akquirierung zusätzlicher finanzieller Mittel aus dem 7. Forschungs-Rahmenprogramm der EU wird angestrebt.

Bevor dann erstmalig europaweite Daten über die tatsächliche Veränderung der Gebirgsvegetation vorliegen werden, stehen derzeit Modellstudien über Biodiversitätsmuster entlang des Höhengradienten und über potentielle Biodiversitätsverluste in Europa kurz vor der Fertigstellung. Diese Arbeiten werden im Rahmen des großen EU-Projekts ALARM (Assessing Large-scale Risks to Biodiversity with Tested Methods) im 6. Forschungs-Rahmenprogramm durchgeführt. Eine Reihe von Fallstudien aus europäischen GLORIA-Gebieten wurde bereits veröffentlicht (Coldea & Pop 2004; Erschbamer, Mallaun & Unterluggauer 2003; Kanka, Kollár & Barancok 2005; Kazakis et al. 2006; Rossi, Parolo & Dellavedova 2003; Stanisci, Pelino & Blasi 2005). Das Beispiel des mediterranen GLORIA-Gebiets Sierra Nevada etwa lieferte harte Argumente für den hohen Gefährdungsgrad der sehr speziellen Flora dieses kleinen Hochgebirges: Vom niedrigsten zum höchsten Gipfel nimmt der Anteil jener Arten, die zum eindrucksvollen Endemitenreichtum dieses Gebirges beitragen, stetig zu (Pauli et al. 2003). Bewahrheiten sich unsere Vermutungen, so könnte die weltweit einmalige Flora der schmalen Sierra-Nevada-Hochzonen schon bald von der Landkarte der „biodiversity hot spots“ verschwunden sein.

7. GLORIAS Master Sites

Parallel zum Multi-Summit Approach etabliert das GLORIA-Netzwerk sogenannte „Master Sites“. Neben der breitangelegten Vergleichsbeobachtung des Multi-Summit Approach sollen in Master Sites vertiefende Untersuchungen betrieben werden. Die Stationen betreuen die methodische Weiterentwicklung, die Einbeziehung weiterer Organismengruppen, wie etwa Kryptogamen, Arthropoden oder Nematoden (Hoschitz & Kaufmann 2004), sowie die Durchführung von Modellstudien und vertiefenden kausalanalytischen Studien (Pauli et al. 2005). Der erste GLORIA Master Site wurde bereits vor zwölf Jahren am Schrankogel in den Stubai Alpen etab-

liert, der erste außereuropäische im Sommer 2006 an der Forschungsstation der University of California in den White Mountains (Hall 2006).

Der Schrankogel (Abb. 19 c, S. 81) gehört mit 3497 Metern zu den höchsten österreichischen Dreitausendern. Oberhalb einer weiträumigen Gletscher- und Moränenlandschaft bietet er ausgedehnte Rasen- und Schutzzonen, exponierte Felsgrate, aber auch ausgeprägte Rinnen und Kare in verschiedensten Neigungen und Expositionen. Er kann als Modellfall eines hohen zentralalpinen Berges angesehen werden. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich von etwa 2900 Meter bis zum Gipfel. Es umspannt den sogenannten alpin-nivalen Ökoton, der in etwa mit der Untergrenze perennierender Schneefelder zusammenfällt. In diesem Übergangsbereich löst sich das geschlossene alpine Grasland – dominiert von *Carex curvula*, der Krummsegge – in Rasengirlanden und Pioniervegetation auf. Darüber – in der subnivalen und nivalen Stufe – finden sich lockere Fels- und Schuttfuren, deren markanteste Arten *Androsace alpina* (Alpen-Mannsschild) und *Ranunculus glacialis* (Gletscher-Hahnenfuß) sind (Abb. 19 a, b, S. 81).

Im Jahre 1994 wurden in den oberen Flankenbereichen des Schrankogels etwa 1100 Monitoringflächen verortet (Abb. 19 d, g, S. 81). In den 1 x 1 Meter großen Einzelflächen wurde der vollständige Bestand an Gefäßpflanzen sowie deren Oberflächenbedeckung erhoben, neben Angaben zu Moosen und Flechten sowie zu abiotischen Standortfaktoren wie Mikrorelief und Korngrößenverteilungen des Substrats. Die Flächen wurden geodätisch eingemessen und umfassend photodokumentiert. Das gesamte Untersuchungsgebiet wurde in einem engmaschigen digitalen Geländemodell (Auflösung 1 x 1 m) erfasst. Durch die hohe Flächenzahl sowie die feine räumliche Skala und exakte Verortung liegt damit ein weltweit einmaliger Datensatz für alpin-nivale Vegetation in einem in sich geschlossenen Untersuchungsgebiet vor.

Zwischen 1994 und 2006 wurde dieser Grunddatensatz durch zahlreiche erweiternde Studien ergänzt. Neben einer flächendeckenden Vegetationskartierung (Abrate 1998; Dullinger 1998) liegen Modellstudien zur Verteilung der Vegetationsmuster in Abhängigkeit von Mikro- und Makrorelief sowie vom Mikroklima vor (Gottfried, Pauli & Grabherr 1998; Gottfried et al. 1999, 2002b). Darauf aufbauend wurden Szenarien zur zukünftigen Verbreitung von Leitarten entwickelt. Für den Alpen-Mannsschild – ein kälteadaptierter Spezialist, der heute am alpin-nivalen Ökoton des Schrankogels weit verbreitet ist – wird eine Abdrängung in die auch zukünftig noch kalten und schneereichen Standorte und damit ein drastischer Flächenverlust prognostiziert (Abb. 19 f, S. 81). Die Synsystematik der Vegetation (Pauli, Gottfried & Grabherr 1999) wurde ebenso untersucht wie Einflüsse von Wild- und Weidetieren (Ertl et al. 2002; Huelber et al. 2005), Stickstoffgradienten (Huber et al. submitted),



Permafrostmuster (Haeberli et al., unpubl.), Blühphänologie und Photoperiodismus von Leitarten (Huelber et al. 2006; Keller & Körner 2003), sowie Bryophytenmuster (Hohenwallner, Zechmeister & Grabherr 2002). Den bedeutendsten begleitenden Datensatz für die Analyse der Vegetationsentwicklung am Master Site Schrankogel stellen Temperaturmessungen dar, die seit 1997 an etwa 40 Stellen des Flankensystems kontinuierlich durchgeführt werden.

Wie hat sich die Hochgebirgsvegetation am Schrankogel in zehn Jahren verändert? Im Jahre 2004 wurde etwa ein Drittel der Monitoringflächen am Schrankogel erneut untersucht (Pauli et al. 2007). Dabei wurde festgestellt:

- (1) Die pflanzliche Diversität pro Flächeneinheit nahm im Bereich des alpin-nivalen Ökoton signifikant zu.
- (2) Diese Artenzahlzunahme ist auf Flächen mit ehemals nivaler Vegetation bei weitem höher als auf alpinen Flächen. Aus einer Analyse der Ersterhebung konnten aufgrund des jeweiligen Artenbestandes diese beiden Gruppen von Beobachtungsflächen unterschieden werden (Pauli, Gottfried & Grabherr 1999).
- (3) Die Zunahme der Artenzahlen rekrutiert sich zum größten Teil aus Arten des alpin-nivalen Ökoton. Nur zwei von etwa 60 Arten konnten als neu ins Untersuchungsgebiet eingewanderte Taxa beobachtet werden. Wir sehen also bisher eher einen „filling process“ als einen „moving process“. Dies ist erklärbar durch die Tatsache, dass einwandernde Arten erst den – in seinem Artenbestand sehr homogenen – hochalpinen Rasengürtel überwinden müssen, um den alpin-nivalen Ökoton zu erreichen. Ähnliches wurde am Piz Linard in Graubünden beobachtet (Pauli, Gottfried & Grabherr 2001).
- (4) An der Position der alpin-nivalen Übergangszone nehmen alpine Arten signifikant an Oberflächenbedeckung und damit an Biomasse zu, nivale Arten hingegen nehmen deutlich ab (z.B. *Saxifraga bryoides*, der Moos-Steinbrech, Abb. 19 e, S. 81).

Die genannten vier Punkte bestätigen die Hypothese, dass die nivale zu Gunsten der alpinen Vegetation unter Druck gerät.

Anhand der Monitoringflächen am Schrankogel konnte damit nicht nur die bereits mehrfach dokumentierte Zunahme der Artenzahl im Hochgebirge bestätigt werden, sondern auch – erstmals in den Alpen – ein klimainduzierter Rückgang der besonders kalteadaptierten Hochgebirgspflanzen (Pauli et al. 2007). Die für 2008 geplante Wiederholung der Gipfelaufnahmen wird zeigen, wie weit sich dieser Trend auch auf europäischem Niveau bestätigen lässt.

8. Literaturverzeichnis

- Abrate, S. 1998: *Vegetationskarte des Schrankogel, Stubaier Alpen*. Diplomarbeit, Universität Wien.
- Becker, A. & H. Bugmann 2001: *Global Change and Mountain Regions. The Mountain Research Initiative*. Stockholm.
- Björnsen Gurung, A. (Hg.) 2006: *GLOCHAMORE. Global Change and Mountain Regions. Research Strategy*. Zürich.
- Coldea, G. & A. Pop 2004: Floristic diversity in relation to geomorphological and climatic factors in the subalpine-alpine belt of the Rodna Mountains (the Romanian Carpathians). *Pirineos* 158–159: 61–72.
- Dullinger, S. 1998: *Vegetation des Schrankogel, Stubaier Alpen*. Diplomarbeit, Universität Wien.
- EEA 1999: *Environment in the European Union at the turn of the century*. European Environment Agency. Copenhagen.
- EEA 2004: *Impacts of Europe's changing climate – an indicator-based assessment*. European Environment Agency. Luxembourg.
- Erschbamer, B., Mallaun, M. & P. Unterluggauer 2003: Die Dolomiten – hot spots der Artenvielfalt. *Gredleriana* 3: 361–376.
- Ertl, S. et al. 2002: Einfluss von Weidevieh und Wild auf die Ausbreitung alpiner Gefäßpflanzen. In: *Bericht über das 10. Österreichische Botanikertreffen*. BAL Gumpenstein. Irdning: 7–10.
- Gottfried, M., Pauli, H. & G. Grabherr 1994: Die Alpen im „Treibhaus“: Nachweise für das erwärmungsbedingte Höhersteigen der alpinen und nivalen Vegetation. *Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt* 59: 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, M. et al. 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. et al. 2002a: GLORIA – The Global Observation Research Initiative in Alpine Environments: Wo stehen wir? *Petermanns Geographische Mitteilungen* 146: 69–71.
- Gottfried, M. et al. 2002b: Potential effects of climate change on alpine and nival plants in the Alps. In: Körner, C. & E. M. Spehn (Hg.): *Mountain biodiversity – a global assessment*. London, New York: 213–223.
- Grabherr, G., Gottfried, M. & H. Pauli 1994: Climate effects on mountain plants. *Nature* 369: 448–448.



- Grabherr, G., Gottfried, M. & H. Pauli 2000: GLORIA: A Global Observation Research Initiative in Alpine environments. *Mountain Research and Development* 20: 190–191.
- Grabherr, G., Gottfried, M. & H. Pauli 2001: Long-term monitoring of mountain peaks in the Alps. In: Burga, C. A. & A. Kratochwil (Hg.): *Biomonitoring: General and applied aspects on regional and global scales*. Dordrecht: 153–177.
- Grabherr, G. et al. 2005: Long-term environmental observations in mountain biosphere reserves: Recommendations from the EU GLOCHAMORE project. *Mountain Research and Development* 25: 376–382.
- Hall, C. 2006: Mono County – performing high-altitude research on global warming. *San Francisco Chronicle*: B1, B5.
- Heal, O. W. (Hg.) 1999: *Arctic-Alpine Terrestrial Ecosystem Research Initiative (ARTERI) – Final report*. European Commission.
- Hohenwallner, D., Zechmeister, H. & G. Grabherr 2002: Bryophyten und ihre Eignung als Indikatoren für den Klimawandel im Hochgebirge – erste Ergebnisse. In: *Bericht über das 10. Österreichische Botanikertreffen*. BAL-Gumpenstein. Irdning: 19–21.
- Hoschitz, M. & R. Kaufmann 2004: Soil nematode communities of Alpine summits: site differentiation and microclimatic influences. *Pedobiologia* 48: 313–320.
- Huber, E. et al. (submitted): Natural ^{15}N abundance indicates a shift in soil-plant nitrogen dynamics of an alpine-nival ecotone: a global change perspective.
- Huber, U. M., Reasoner, M. A. & H. K. Bugmann (Hg.) 2005: *Global Change and Mountain Regions: an Overview of Current Knowledge*. Dordrecht.
- Huelber, K. et al. 2005: Gourmets or gourmands? Diet selection by large ungulates in high-alpine plant communities and possible impacts on plant propagation. *Basic and Applied Ecology* 6: 1–10.
- Huelber, K. et al. 2006: Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Central Alps: Implications for climate warming. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 38: 99–103.
- Kanka, R., Kollár, J. & P. Barancok 2005: Monitoring climate change impacts on alpine vegetation in the Tatry Mts - first approach. *Ekológia* 24: 411–418.
- Kazakis, G. et al. 2006: Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Lefka Ori, Crete. *Biodiversity and Conservation*.
- Keller, F. & C. Körner 2003: The role of photoperiodism in alpine plant development. *Arctic Antarctic and Alpine Research* 35: 361–368.
- 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. & E. M. Spehn 2002: *Mountain Biodiversity: a Global Assessment*. London, New York.

- Körner, C. 2003: *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems*, 2nd edn. Berlin.
- Krajčick, K. 2006: Living the high life. *Natural History*: 44–50.
- Kullman, L. 2002: Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes. *Journal of Ecology* 90: 68–77.
- 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. 2004: The changing face of the alpine world. *Global Change Newsletter, IGBP* 57: 12–14.
- Mark, A. F. et al. 2006: Two GLORIA long-term alpine monitoring sites established in New Zealand as part of a global network. *Journal of the Royal Society of New Zealand* 36: 111–128.
- Meshinev, T., Apostolova, I. & E. Koleva 2000: Influence of warming on timberline rising: A case study on *Pinus peuce* Griseb. in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30: 431–438.
- Messerli, B. & J. D. Ives 1997: *Mountains of the World*. New York.
- Mitchell, T. D. et al. 2004: *A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901–2000) and 16 scenarios (2001–2100)*. Norwich, UK.
- Moiseev, P. A. & S. G. Shiyatov 2003: Vegetation dynamics at the treeline ecotone in the Ural highlands, Russia. In: Nagy, L. et al. (Hg.): *Alpine Biodiversity in Europe – A Europe-wide Assessment of Biological Richness and Change*. Berlin: 423–435.
- Pauli, H., Gottfried, M. & G. Grabherr 1999: Vascular plant distribution patterns at the low-temperature limits of plant life – the alpine-nival ecotone of Mount Schrankogel (Tyrol, Austria). *Phytocoenologia* 29: 297–325.
- Pauli, H., Gottfried, M. & G. Grabherr 2001: High summits of the Alps in a changing climate. The oldest observation series on high mountain plant diversity in Europe. In: Walther, G.-R., Burga, C. A. & P. J. Edwards (Hg.): *“Fingerprints” of Climate Change – Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges*. New York: 139–149.
- Pauli, H. et al. 2003: Assessing the long-term dynamics of endemic plants at summit habitats. In: Nagy, L. et al. (Hg.): *Alpine biodiversity in Europe - a Europe-wide assessment of biological richness and change*. Berlin: 195–207.
- Pauli, H. et al. 2004a: The GLORIA Multi-Summit Network: a basic approach for the long-term observation of climate-change induced impacts on alpine biodiversity. In: Lee, C. & T. Schaaf (Hg.): *Global Environmental and Social Monitoring, Proceedings of the 1st International GLOCHAMORE Workshop*. Vienna, May 2004. Paris: 86–93.
- Pauli, H. et al. 2004b: *The GLORIA field manual – Multi-Summit approach*. European Commission, Luxembourg.
- Pauli, H. et al. 2005: Ecological climate impact research in high mountain environ-



- ments: GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments) – its roots, its purpose and the long-term perspectives. In: Huber, U. M., Bugmann, H. K. & M. A. Reasoner (Hg.): *Global Change in Mountain Regions: an Overview of Current Knowledge*. Dordrecht: 383–391.
- Pauli, H. et al. 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
- Pickering, C. M. & T. Armstrong 2003: Potential impact of climate change on plant communities in the Kosciuszko alpine zone. *Victorian Naturalist* 120: 263–272.
- Price, M. (Hg.) 1995: *Mountain Research in Europe. An Overview of MAB Research from the Pyrenees to Siberia*. Paris.
- Price, M. F. & G. R. Neville 2003: Designing strategies to increase the resilience of alpine/montane systems to climate change. In: Hansen, L., Biringer, J. & J. Hoffmann (Hg.): *Buying Time: a User's Manual for Building Resistance and Resilience to Climate Change in Natural Systems*. Gland: 73–94.
- Rossi, G., Parolo, G. & R. Dellavedova 2003: Gli organismi vegetali come bioindicatori dei cambiamenti climatici: il progetto GLORIA. In: *Acque a Cremona. Atti del convegno*. Cremona: 81–94.
- Sala, O. E. et al. 2000: Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science* 287: 1770–1774.
- Stanisci, A., Pelino, G. & C. Blasi 2005: Vascular plant diversity and climate change in the alpine belt of the central Apennines (Italy). *Biodiversity and Conservation* 14: 1301–1318.
- Steffen, W. et al. 2004: *Global change and the Earth system: a planet under pressure*. Berlin.
- Sturm, M., Racine, C. & K. Tape 2001: Climate change – increasing shrub abundance in the Arctic. *Nature* 411: 546–547.
- Väre, H. et al. 2003: Taxonomic diversity of vascular plants in the European alpine areas. In: Nagy, L. et al. (Hg.): *Alpine Biodiversity in Europe – A Europe-wide Assessment of Biological Richness and Change*. Berlin: 133–148.
- Walther, G.-R., Beißner, S. & C. A. Burga 2005: Trends in upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16: 541–548.
- Wardle, P. & M. C. Coleman 1992: Evidence of rising upper limits of four native New Zealand forest trees. *New Zealand Journal of Botany* 30: 303–314.