

Ökologische Klimafolgenforschung im Hochgebirge: das Beispiel GLORIA (The Global Observation Research Initiative in Alpine Environments)

von Georg Grabherr, Michael Gottfried u. Harald Pauli

Keywords: Klimawandel, Hochgebirge, Bergflora, Vegetation, GLORIA

Die Hochgebirgslebewelt an den Kältengrenzen des Lebens hat in den letzten Jahren vertieftes Interesse erfahren, da Klimawandeleffekte hier besonders klar und weitgehend ohne direkte Störwirkungen durch Landnutzung in Erscheinung treten. Auf der einen Seite läßt sich durch Veränderungen der hochalpinen Pflanzen- und Tierwelt darstellen, in welcher Intensität der Klimawandel bereits wirkt, andererseits könnten diese ökologischen Indikatoren selbst in Bedrängnis geraten, wenn in Reaktion auf die Erwärmung die Arten in größere Höhen ausweichen müssen und letztlich aufgrund begrenzter Höhenerstreckung der Gebirgsregion keine geeigneten Habitate mehr vorhanden sind. Für die europäische Bergflora sagen Computermodelle einen Verlust bis zu 60% voraus. Ob solche Prognosen zutreffen oder nicht, läßt sich aber letztlich nur durch vergleichende Direktbeobachtung in den Hochgebirgsregionen der Welt untersuchen. Genau dieses Ziel verfolgt das internationale Forschungsprogramm GLORIA (The Global Observation Research Initiative in Alpine Environments), an dem sich inzwischen mehr als 50 Forschergruppen, von den Anden Südamerikas, den Neuseeländischen Alpen, den kalifornischen Hochgebirgen bis zum Nordural beteiligen. Nach einem standardisierten Methodenkanon, an dessen Formulierung mehr als 50 Wissenschaftler beteiligt waren, werden auf vier unterschiedlich hohen Gipfeln ausgewählter Gebirgsregionen (z.B. Sella/Latemar-Gruppe in Südtirol) Dauerbeobachtungsflächen angelegt, in denen detaillierte Vegetationsdaten erhoben und langfristige Temperaturmessungen durchgeführt werden. Nach der Erstinstallation erfolgen Wiederaufnahmen in Intervallen von 5 - 10 Jahren. Erste Wiederaufnahmen zeigen, dass bereits nach 10 Jahren (1994-2004) eindeutige Veränderungen stattgefunden haben. Die erste große Wiedererhebung auf Dauerbeobachtungsflächen findet im Jahr 2008 statt, welche im Rahmen eines EU-geförderten Projektes (GLORIA-Europe) angelegt wurden. Man darf gespannt sein, wie sich der Klimawandel der letzten 10 Jahre aus gesamt-europäischer Sicht ausgewirkt hat. In diesem Beitrag sind Konzept, Entwicklung, Methodologie, erste Ergebnisse und wissenschafts-organisatorische Aspekte dargestellt. Die Initiative zu GLORIA entstammte der Hochgebirgsforschung an der Universität Wien (Department für Naturschutzforschung, Vegetations- und Landschaftsökologie) und wurde bzw. wird von der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (als Teil der Forschungsstelle "Gebirgsforschung: Mensch und Umwelt"), dem Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung, der Schweizer MAWA-Stiftung, dem Österreichischen Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung und aus den wissenschaftlichen Rahmenprogrammen der Europäischen Union gefördert.

Die Aufgabe der Wissenschaft

Klimawandel ist das Thema dieses Jahrzehnts und wird es nach den Prognosen der Klimaforscher wohl auch bleiben (IPCC 2007). Die erwartete allgemeine Erwärmung, die Veränderungen des Niederschlagsklimas, die Häufung allfälliger Katastrophenereignisse müssen sich natürlich auf die Bergwelt ebenso auswirken wie auf das Siedlungsland der Tieflagen. Die Forschung hat hier die Aufgabe, die Mechanismen solcher Veränderungen aufzuklären, darauf aufbauend Prognosen zu erstellen, aber auch durch sorgfältiges Beobachten die Prognosen zu überprüfen und zu verbessern.

Die Hochgebirgslebewelt als Indikator klima-ökologischer Folgen

Die Gebirgswelt als ideales Beobachtungsfeld für ökologische Klimawandelfolgen wurde schon zu Beginn des vergangenen Jahrhunderts entdeckt, zu einem Zeitpunkt als noch kaum jemand von Klimawandel in heutigem Sinne sprach. Es war der österreichische Geologe und Botaniker Raimund von Klebelsberg, der angesichts der zurückweichenden Gletscher nach dem Höhepunkt der kleinen Eiszeit um 1850 daran dachte, dass sich die alpine Pflanzenwelt ebenfalls verändern müsste und der entsprechende Beobachtungen bereits im Jahr 1913 präsentierte (KLEBELSBERG 1913). Vergleichbare Initiativen setzte der Botaniker JOSIAS BRAUN-BLANQUET in der Schweiz, indem er Gipffloren in den Rätischen Alpen kartierte und mit alten Aufnahmen verglich, die am höchsten Gipfel der Silvretta, dem Piz Linard (3411 m), bis ins Jahr 1835 zurück reichen (Photo 1). BRAUN-BLANQUET (1957, 1958) fand, dass die Artenzahlen auf den untersuchten Gipfeln, alles Dreitausender, eindeutig zugenommen hatten und deutete dies als Resultat der beobachteten Erwärmung seit den letzten 100 Jahren. HOFER (1992) bestätigte dies für die Rätischen Berge, für die, wie dem Piz Linard, verlässliche alte Angaben verfügbar waren. Und schließlich konnten die Autoren dieses Beitrages anhand eines breiten und sorgfältig erhobenen Datenmaterials die nötige Sicherheit liefern, dass sich die Gipffloren tatsächlich in den letzten 150 Jahren verändert haben und dies durch nichts anderes erklärt werden kann als durch die beobachtete Erwärmung (GRABHERR et al. 1994, GOTTFRIED et al. 1994).

Die Pflanzenwelt an den Kältgrenzen des Lebens hat sich somit als idealer Indikator dafür erwiesen, dass der beobachtete Klimawandel ökologisch relevant war und es weiterhin ist. Die Beobachtung von Gipffloren hat den Vorteil, dass mit Ausnahme viel begangener und technisch erschlossener Berge, der direkte Einfluss durch Landwirtschaft und Tourismus ausgeschlossen werden kann oder zumindest sehr gering ist – je höher der Berg, umso eindeutiger. Die Wirkungen des Klimas sind quasi ohne anthropogenes Rauschen nachweisbar.

GLORIA – ein internationales Beobachtungsnetzwerk

Hochgebirge mit einer baumlosen alpinen (oft auch schneebetonten nivalen) Stufe finden sich in allen zonalen Lebensräumen der Erde, von den tropischen bis zu den polaren, von den ariden Wüstenbergen bis zu den niederschlagsreichen Gebirgen der temperaten Regionen. Sie haben alle eines gemeinsam: Es sind kältebetonte Lebensräume und damit Temperaturveränderungen unmittelbar ausgesetzt (KÖRNER 2003). Ihr Wert als Indikator ökologischer Veränderungen auf die Lebewelt ist in den Alpen nachgewiesen bzw. es wurden ähnliche Befunde auch aus den Skanden (KLANDERUD & BIRKS

2003, KULLMANN 2002, 2003), den balkanischen Bergen (MESHINEV et al. 2000) und dem Ural (MOISEEV & SHIYATOV 2003) berichtet, speziell über Veränderungen der Waldgrenze. Die Frage aber, ob die beobachteten Klimafolgen ein globales Phänomen sind bzw. sich überall ähnlich auswirken, kann damit nicht beantwortet werden.

Der globale Aspekt bekommt vor allem dann enorme Bedeutung, wenn die Möglichkeiten von Diversitätsverlusten bedacht werden. Berge sind in der Höhe begrenzt und die hochwandernde Kälteflora und -fauna findet letztlich keine Lebensmöglichkeiten mehr. Für die europäische Gebirgsflora prognostizieren Modelle einen besonders starken Verlust von bis zu 60% der Pflanzenarten im "worst case"-Szenario (THULLER et al. 2005), für die Neuseeländischen Berge mit einer alpinen Flora von 613 meist endemischen Arten wurde ein Verlust von 200-300 Pflanzenarten für 3°C Erwärmung errechnet (HALLOY & MARK 2003), ein Szenario, das keineswegs unwahrscheinlich ist, überblickt man die nächsten 100 Jahre. Zwar gilt, dass die Biodiversität rein quantitativ mit zunehmender Höhe abnimmt, die alpinen Artengarnituren der Hochgebirge aber zur Gesamtdiversität der regionalen Floren wesentlich beitragen. Allein für Europa beträgt diese etwa ein Fünftel (VÄRE et al. 2003). Von den ca. 11.000 europäischen Sprosspflanzenarten sind ca. 2.500 mit Schwerpunkt auf die Zonen um und oberhalb der Waldgrenze, also auf die alpine bzw. nivale Stufe, beschränkt. Da der Klimawandel ein globales Phänomen ist und Hochgebirge weltweit verbreitet sind, ist ein essentieller globaler Biodiversitätsverlust nicht auszuschließen.

Es waren Fakten der genannten Art, d.h. des Indikatorwertes der Hochgebirgslebewelt einerseits und deren Gefährdung andererseits, die zur Etablierung des globalen Beobachtungsnetzwerkes GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments) führten. Es ist verankert in großen internationalen Programmen, insbesondere im International Geosphere-Biosphere Programme des International Council for Science und hier in der Mountain Research Initiative (MRI), im Man and Biosphere Programme der UNESCO, im Global Terrestrial Observation System der FAO. Die Initiative erfolgte durch den Autor und seine jungen Mitarbeiter Michael Gottfried und Harald Pauli, unterstützt vom Staff des Departments, Studenten, post docs und Kollegen. Finanziert durch die Europäische Union (5. Forschungs- Rahmenprogramm: Laufzeit 2001-2003) wurden im Rahmen eines Pilotprojektes (GLORIA-Europe) in 18 Gebirgsregionen Europas (3 Regionen in den Alpen, 2 Apennin, 1 Pyrenäen, 1 Sierra Nevada, 1 Kreta, 2 Karpaten, 2 Ural, 1 Kaukasus, 1 Schottland, 2 Skanden) Dauerbeobachtungsflächen angelegt und ein Methodenhandbuch zum Langzeitmonitoring entwickelt (PAULI et al. 2004). Inzwischen haben sich Arbeitsgruppen in Südamerika, den USA (Photo 2), in Kanada, Australien, Neuseeland angeschlossen und GLORIA-Forschungsstationen nach dem Handbuch etabliert. Insgesamt sind für 33 Stationen Feldarbeit und Dateneingabe in die zentrale Datenbank abgeschlossen, für 6 die Feldarbeit, an 9 findet gerade die Feldaufnahme statt, für 7 Stationen ist diese für 2007 noch geplant, Interessensbekundungen existieren für weitere 22 Stationen (Abb. 1). Das Netzwerk wird von der Wiener Arbeitsgruppe am Department für Naturschutzforschung, Vegetations- und Landschaftsökologie koordiniert (inkl. Betreuung der zentralen Datenbank).

Forschungsansatz und Methodik

Der Grundansatz (basic approach)

Entgegen den bereits viele Jahrzehnte existierenden Wetterstationen weltweit, verfügt die Ökologie mit wenigen Ausnahmen (z.B. phänologische Beobachtungen an Wetterstationen) nicht über standar-

disierte Beobachtungsstationen ähnlicher Dichte und Güte. Zeitserien von Luftbildern, die bis in die 30-er Jahre des vergangenen Jahrhunderts zurückreichen, oder gar die jüngeren Satellitenbilder, versagen, wenn Details gefragt sind, wie eben die Veränderung der Biodiversität von Ökosystemen. Dafür kommen nur grundbasierte und standardisierte Dauerbeobachtungsflächen in Frage und darauf baut GLORIA. Der sogenannte Mehr-Gipfel-Ansatz (multi summit approach), besteht darin, auf ausgesuchten Gipfeln einer in sich homogenen Gebirgsregion (target region; z.B. Silvretta-Alpen, Dovrefjell-Norwegen, White Mountains-Kalifornien) genormte Dauerbeobachtungsflächen einzurichten, die in Intervallen von 5-10 Jahren (aber auch länger) aufgesucht werden. Es entstehen so Zeitreihen, die die ökologischen Veränderungen verfolgen und interpretieren lassen. Den eigentlichen Wert von GLORIA werden erst die nächsten Generationen erfahren – und wohl zu würdigen wissen.

Ökologische Langzeitforschung dieser Art ist schwer zu finanzieren. Die Basisaktivität von GLORIA orientiert sich am Grundsatz, solide Daten bei geringsten Kosten zu liefern und mit geringstem administrativem Aufwand zu verwalten. GLORIA-target regions können auch unter Expeditionsbedingungen etabliert werden. Wie läuft dies ab (zu Details siehe das GLORIA field manual, PAULI et al. 2004)? Pro target region werden 4 unterschiedlich hohe Gipfel ausgesucht (multi summit approach), einer, der gerade über der Waldgrenze liegt, ein zweiter, dessen Spitze bis in den Übergang zwischen unterer und oberer alpiner Stufe reicht (meist Zwergstrauchstufe/ Rasenstufe), ein dritter an der Obergrenze der Rasenstufe (alpin/nivales Ökoton) und ein vierter an den Grenzen des Lebens (Abb. 2). Damit wird der ökologische Höhengradient genutzt und gleichzeitig werden die vier Himmelsrichtungen am Gipfel beachtet. Gipfel sind auch klare Landmarken für spätere Wiederaufnahmen. Dieser multi summit approach ist aus diesen Gründen, aber auch aus Gründen der Beachtung von ökologischer Variabilität, den üblichen Transektaufnahmen entlang eines Berghanges (single mountain approach) überlegen und liefert die beste Übersicht bei geringstem Aufwand.

Auf den Gipfeln werden die Dauerbeobachtungsflächen nicht direkt am höchsten Punkt angelegt, sondern 5-10 Höhenmeter unterhalb, orientiert nach den 4 Himmelsrichtungen (Abb. 3). Pro Himmelsrichtung sind 9 ein Quadratmeter große Flächen ausgelegt, wobei in den 4 Eckflächen die vollständige Liste an Gefäßpflanzenarten und ihre prozentuellen Deckungswerte aufgenommen werden. Zudem kommen hier feinmaschige Rasterrahmen (Maschenweite 1 dm) zur Mengenschätzung (Frequenz der Arten) zur Anwendung. Pro Gipfel wird somit in 16 Flächen eine genaue Erhebung der Artenzahl pro Fläche und deren Mengen erhoben. Trotz der 16 Flächen, die zentimetergenau verortet sind, ist die Möglichkeit groß, dass noch andere Arten im Gipfelbereich, aber nur außerhalb der Quadratmeterflächen vorkommen. Deshalb suchen die Aufnahmeteams noch den ganzen Gipfel ab bzw. tun dies in einzelnen Teilsektoren, je nach Himmelsrichtung. Das gesamte Datenset besteht aus 3 Teilssets: 16 Detailaufnahmen (1m²) mit Prozentdeckungen der Arten, 16 Detailaufnahmen (1m²) mit Frequenzdaten, 8 Sektorenaufnahmen (im Mittel etwa 200 bis 1000 m²) mit Prozentdeckung oder Häufigkeitsangaben der Arten. Die 16 Detailflächen sowie alle Eckpunkte der Gipfelsektoren werden fotografisch dokumentiert. Gemäß dem Prinzip, robuste und aussagekräftige Daten bei geringstem finanziellem und logistischem Aufwand zu liefern, sind beim Grundansatz die Klimamessungen entsprechend einfach konzipiert. Ein Miniaturdatenlogger, der einmal pro Stunde die Temperatur misst (Messdauer bis 3 Jahre), wird in 10 cm Tiefe zwischen den Detailflächen vergraben (optional 1 Fühler direkt am Gipfel). Die Entscheidung, die Bodentemperatur zu messen, resultiert aus folgenden Überlegungen: 1) es werden Strahlungsfehler vermieden, 2) 10cm ist noch nicht zu tief, um die täglichen Temperaturänderungen zu erfassen (bes. auch Schneefallereignisse), 3) das gesamte Gerät ist nicht sichtbar und daher nicht anfällig für Vandalenakte.

Dass beim Grundansatz (basic approach) nur Gefäßpflanzen berücksichtigt werden, basiert auf den Eigenschaften dieser Artengruppe. Sie integrieren als wurzelnde Pflanzen edaphische und atmosphärische Veränderungen. Hochgebirgspflanzen im Speziellen sind langlebig, Änderungen im Artenbestand finden kaum von Jahr zu Jahr statt, die interannuelle Variabilität ist gering. Hochgebirgspflanzen sind Indikatoren für langjährige Trends. Pflanzen haben weiters den Vorteil, relativ leicht bestimmbar und als wurzelnde Organismen immobil zu sein. Ferner ist ihr Auftreten nicht an kurze Zeitperioden (z.B. Schwärmaktivitäten bei Insekten) gebunden und schließlich sind auch alpine Pflanzengesellschaften relativ artenreich. GLORIA zielt vor allem auf die Aussage ab, ob sich die Artengarnituren verändern, d.h. ob Arten verschwinden bzw. neu hinzukommen. Veränderungen in den Mengen, d.h. den Populationsdichten sind ebenfalls von Bedeutung, aber nicht das primäre Kriterium. Sie können relativ kurzfristige Wirkungen des Klimawandels aufdecken helfen (PAULI et al. 2007). In Gebieten mit relativ wenigen Gefäßpflanzen (polarer Ural, Skanden, Schottland) aber reicher Moos- und Flechtenflora ist es allerdings angezeigt, auch diese Artengruppen im Grundansatz einzubinden, was in der Regel allerdings aufwendige Bestimmungsarbeit erfordert.

Nach der Geländeerhebung übermittelt die Arbeitsgruppe den Datensatz an die zentrale Datenbank der GLORIA-Koordination in Wien. Datenlieferanten haben die Möglichkeit, die Datensätze anderer Arbeitsgruppen für Vergleichsanalysen zu verwenden, vorausgesetzt die Datenspender stimmen zu. Damit ist ein weiteres wesentliches Element von GLORIA angesprochen, der Vergleich von unterschiedlichsten Gebirgsräumen. Durch die globale Ausrichtung werden in Zukunft wesentlich solidere allgemeine Aussagen zur Hochgebirgsökologie allgemein bzw. zu Veränderungen möglich sein. GLORIA nimmt absichtlich Abstand von klassischen Ökosystemanalysen an einem System, an einem Ort, mit aufwendigen Geräteparks. GLORIA sucht im Vergleich von indikatorischen Datensätzen zu allgemeinen Aussagen zu kommen und damit Testsubstrat für ökologische Theorien zu liefern bzw. solche selbst zu entwickeln.

GLORIA – master sites und erweiterte Aktivitäten (optional activities = OPA's)

Der Grundansatz (basic approach) von GLORIA bedient eine der drei kardinalen Aktivitäten ökologischer Forschung, nämlich die empirische Feldforschung im Sinne der Beobachtung von Raum-Zeit-Mustern. Die anderen, nämlich funktionales, vor allem räumlich explizites Modellieren bzw. theoriebasiertes Experimentieren, sind Aufgabe von Arbeitsgruppen, die über die personellen und finanziellen Ressourcen verfügen, einen so genannten master site einzurichten. Master sites sind GLORIA target regions, in denen z.B. der Katalog aufzunehmender Organismengruppen ausgeweitet wird (z.B. um Moose, Flechten, tierische Organismen), oder für die räumlich explizite und aufwendige Computermodelle entwickelt werden, mit deren Hilfe diverse Klimawandelszenarien und deren Folgen simuliert werden können. Experimentelle Ansätze sind Transplantationsexperimente, bei denen Arten bzw. ganze Artengemeinschaften entlang des Höhengradienten ausgetauscht werden oder Experimente, bei denen die Standortbedingungen verändert werden (Schneegatter, Open Top Chambers, Düngeexperimente, CO₂-Experimente). Für die optional activities gibt es keine bindenden Empfehlungen. Die GLORIA-Strategie ist hier sehr pragmatisch: Alles, was hilft, die Beobachtungen des GLORIA-Basis-Monitorings zu erklären, ist willkommen. Derzeit existieren zwei Gebiete, die als GLORIA master stations aktiv sind (Schrankogel – Österreich, White Mts – Kalifornien).

Was hat GLORIA bis dato gebracht?

Der wissenschaftliche Ertrag

Der bedeutendste wissenschaftliche Ertrag wird sich zweifellos aus den Folgebeobachtungen ergeben, wobei als nächster Termin das Jahr 2008 angesetzt ist, zu dem die 64 GLORIA-sites des GLORIA -Europe- Projektes wieder aufgenommen werden (Erstaufnahme 2001). Die Ergebnisse einiger Vorläuferstudien (PAULI et al. 2007, ERSCHBAMER 2007) lassen spannende Erkenntnisse dieser ersten, umfassenden und europaweiten Wiedererhebung erwarten. PAULI et al. (2007) verglichen 2004 im Gebiet des master site Schrankogel (Photo 3) im Bereich eines Streifens von 2900-3200 m (alpin/nivaler Ökoton, Photo 4) mehr als 300 Einzelflächen (1 m²) mit solchen, die im Jahr 1994 angelegt wurden. Allgemein nahm aufgrund der Erwärmung im letzten Jahrzehnt (Abb.4) die Artenzahl pro Fläche zu – in Flächen mit subnival/nivaler Vegetation allerdings wesentlich stärker als in alpinen Rasenflächen. Die Zunahme an Arten entspricht aber weniger einem Höherwandern von Arten aus tieferen Zonen (nur zwei neue Arten tauchten auf), sondern einer Erhöhung der Populationsdichten bereits vorhandener Arten, besonders solcher, deren Schwerpunkt in der alpinen Rasenstufe oder in Pionierstadien alpiner Rasen liegt. Diese Arten zeigten auch einen deutlichen Flächengewinn. Die Kältespezialisten, die ihren Schwerpunkt oberhalb der alpinen Rasenstufe haben, die sogenannten nivalen Arten, verlieren an Flächendeckung – und das, ohne bereits dem Konkurrenzdruck der alpinen Arten voll ausgesetzt zu sein (Photo 5). Ohne einer fundierten Analyse vorgreifen zu wollen: es wird ihnen offensichtlich schon zu warm.

Dass es sich bei den alpinen und nivalen Artenpools um klar trennbare Artengruppen handelt, wurde quasi als Begleitprodukt der GLORIA-Forschung von PAULI et al. (1999) herausgearbeitet. GOTTFRIED et al. (2002) stellten anhand umfassender Temperaturmessreihen und davon abgeleiteten Daten zur Schneedeckendauer am master site Schrankogel schließlich fest, dass es vor allem die Toleranz gegenüber einer langen Schneedeckendauer und nicht jene gegenüber "extremer Kälte" ist, die die nivalen Arten so hoch steigen lässt (Abb.5). Dies erklärt auch die auffällige Variabilität der Lebensformen der nivalen Flora, vom Polster eines Alpen-Mannsschildes (*Androsace alpina*), zum saftlaubigen Zwerggras (*Poa laxa*), zum mastigen Kraut des Gletscher-Hahnenfusses (*Ranunculus glacialis*).

Die Erstaufnahmen generieren zwangsläufig Hypothesen, wie sich die Pflanzenwelt der target regions unter verschiedenen Szenarien entwickeln könnte. Neben einfachen Überlegungen, die auf den Höhenamplituden der gefundenen Arten beruhen, bis zu komplexen, räumlich expliziten Modellen reicht die Palette. So interpretieren KAZAKIS et al. (2006) die Daten der GLORIA-Erstaufnahme in den weißen Bergen Kretas (Lefka Ori) dahingehend, dass die stenöken Lokalendemiten der Gipfelregionen tatsächlich aussterben könnten, STANISCI et al. (2005) prognostizieren ähnliche Effekte für die hohen Lagen des Appenin. Ein genaues, räumlich explizites Bild am master site Schrankogel entwarf GOTTFRIED (1998, 1999) mit Hilfe eines digitalen Höhenmodells und klimatischer Steckbriefe für die nivalen und alpinen Arten. Der allgemeine Habitatsverlust für die nivalen Arten wird ab dem +2°C-Szenario deutlich und ab dem +4°C-Szenario dramatisch (Abb. 6). Aber auch dann gibt es noch aufgrund der mikrotopographischen Gegebenheiten Fluchtnischen für die nivalen Arten bzw. sind dadurch nicht alle Positionen für alpine Arten leicht besiedelbar. Die realen Effekte im stark reliefierten Gelände der Hochgebirge werden von einer rein zonalen Betrachtungsweise mit Sicherheit sehr verschieden sein. Für die target region Hochschwab (Österreich), ergaben Modellrechnungen von DULLINGER et al. (2004), dass die Latschenbestände aufgrund geringen Wachstums und geringer Migrationsraten

nur sehr langsam höher wandern werden und zeigten auf, dass die bestehende Vegetation der Ausbreitung Grenzen setzen kann, zumindest diese deutlich verzögert. Es werden die GLORIA- Dauerbeobachtungen und die damit gegebenen Vergleichsmöglichkeiten sein, die diese Prognosen auf breiter Basis bestätigen oder nicht bzw. werden Sicherheit bis in Details verschaffen.

Die genannten Beispiele zeigen deutlich, dass GLORIA kein reines Monitoringprogramm ist, sondern Wesentliches zum ökologischen Wissen über die Hochgebirgswelt beitragen kann und bereits beigetragen hat. GLORIA regt Grundlagenforschung an und braucht sie. Am Department in Wien entstanden z.B. Studien zur Phänologie der alpin/nivalen Arten am Schrankogel (HÜLBER et al. 2006) bzw. zur endozoochoren Verbreitung von Diasporen (ERTL et al. 2002) und den Nahrungspräferenzen von Schafen, Ziegen, Gämsen (HÜLBER et al. 2005). Bei den phänologisch untersuchten Arten ist nicht entscheidend, wie lange die Individuen schneefrei sind bis sie blühen, sondern es ist ausschließlich die Wärmesumme entscheidend, die notwendig ist, die Pflanzen zum Blühen zu bringen. Frühere Schneeschmelze durch geringere Niederschläge würde beispielsweise keinen Effekt erzielen. Infloreszenzen von Kräutern werden im Gegensatz zu denen von Gräsern bevorzugt gefressen. Mit Studien dieser Art wächst die Möglichkeit, die Beobachtungen auf den Monitoringflächen zu erklären.

Organisatorische Aspekte

GLORIA ist ein offener Prozess und hat mitgeholfen, Hochgebirgsforscher aus allen Teilen der Welt zusammenzubringen. Allein GLORIA-Europe vereint Forscher aus 13 Staaten und mit 10 Sprachen (Projektsprache: Englisch), das GLORIA-Methodenhandbuch (Original in Englisch: The GLORIA Field manual – Multi-Summit Approach) ist inzwischen ins Spanische und Chinesische übersetzt. Der ökologischen Hochgebirgsforschung fehlte bis dato ein internationales Forum, so wie es etwa die Arktisforschung schon lange kennt. Im Gegensatz zu anderen Initiativen (z.B. MRI) beschränkt sich GLORIA aber auf den Kernbereich des ökologischen Monitorings und einer unterstützenden Forschungsperipherie – das GLORIA-Netzwerk ist somit primär naturwissenschaftlich ausgerichtet. GLORIA ist als loser Verbund aus autonomen Arbeitsgruppen organisiert, die in einem permanenten methodischen Diskurs involviert sind. Am Methodenhandbuch waren mehr als 50 Wissenschaftler beteiligt, die weiterhin Fragen zur Quantifizierung von Artmengen, zum Beobachtungsfehler (interobserver error), zur statistischen Analyse, zur standardisierten Auswertung und Präsentation und zu rechtlichen Fragen diskutieren. So zeigte sich in der Vergangenheit mehrfach, dass verschiedene Bearbeiter nicht ganz idente Artenlisten liefern. Der Grund: Gar nicht wenige Arten treten in den Beobachtungsflächen in so geringen Mengen auf, dass sie fast gesetzmäßig immer wieder übersehen werden. Um dies zu quantifizieren werden derzeit eigene Versuchsserien gestartet bzw. war dies Diskussion und Übung bei einem internationalen Workshop vor Ort (Hochschwab, Österreich).

GLORIA ist ein Programm, das gewissermaßen auf "ewige" Zeiten ausgelegt ist und fordert damit die gängige wissenschaftliche Förderungspraxis heraus, die nur Projekte mit kurzfristigen Erfolgsgarantien kennt. Ein Projekt zu fördern, dessen Ergebnis in 10 Jahren, 20 Jahren oder gar 50 Jahren erst vorliegt, erscheint illusorisch. GLORIA ist deshalb so angelegt, aktuelle Förderungsmöglichkeiten geschickt zu nutzen. Der Grundansatz ist so billig und einfach, dass er auch ohne große Unterstützung durchgeführt werden kann. Die Beobachtungsintervalle sind nicht festgeschrieben. Gruppen werden auch wechseln, verschwinden, neue entstehen. Jede Gruppe muss sich um die Finanzierung selbst küm-

mern, das gilt auch für die Koordination und das Datenbanking in Wien. Eine Ausnahme stellt GLORIA-Europe dar, dessen Etablierung im Rahmen des 5. EU-Forschungs-Rahmenprogrammes erfolgte und mehrere Arbeitsgruppen erfasste. Möglichkeiten einer formalen Strukturierung werden derzeit ausgelotet. So ist etwa die längerfristige Absicherung der Koordinationsstelle in Wien im Rahmen eines Vertrages zwischen Österreichischer Akademie der Wissenschaften und der Universität Wien in Aussicht gestellt.

Schlussbetrachtung

Mit GLORIA wurde der Versuch gestartet, ein informelles Netzwerk von Hochgebirgsforschern aufzubauen, die sich an einen gemeinsamen Methodenkanon des ökologischen Monitorings halten und damit weltweit Vergleichsmöglichkeiten schaffen. GLORIA reicht weit in die Zukunft. GLORIA entsprang nicht reiner Neugier an der Lebewelt des Hochgebirges, sondern reagiert auf den Bedarf der Gesellschaft an sicherem Wissen. Der Klimawandel gibt Anlass zu Sorge. Sichere Haltegriffe des Wissens sind gefragt. GLORIA will seinen, zugegebenermaßen sehr spezifischen, Teil dazu beitragen. Was die Beteiligten natürlich auch verbindet: die Faszination der Berge und ihre interessante Lebewelt.

Dank

GLORIA wird vom Enthusiasmus der beteiligten Forscher getragen. Ihnen allen sei für ihren Einsatz gedankt. Dass aber GLORIA überhaupt entstehen konnte, ist der finanziellen Unterstützung vieler Stellen zu danken. In Bezug zur Wiener Koordination sind vor allem die Österreichische Akademie der Wissenschaften, der Österreichische Fonds zur Förderung der Wissenschaftlichen Forschung, das Österreichische Bundesministerium für Wissenschaft und Forschung sowie das BM für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, die Schweizer MAVA-Stiftung für Naturschutz, die UNESCO und die Universität Wien (Bereitstellung der Infrastruktur und Personal), das Land Tirol (master site Schrankogel) zu nennen. Essentiell war die Förderung des Pilotprojektes GLORIA-Europe durch die Europäische Union bzw. weiterer relevanter EU-Projekte (GLOCHAMORE, ALARM im 6. Forschungs-Rahmenprogramm).

Literatur

- BRAUN-BLANQUET, J. (1957): Ein Jahrhundert Florenzwandel am Piz Linard (3414m). Bull. Jard. Bot., Bruxelles, VI. Jubil. W.Robyns: 221-232.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1958): Über die obersten Grenzen pflanzlichen Lebens im Gipfelbereich des Schweizerischen Nationalparks. Kommission der Schweizerischen Naturforschenden Ges. z. wissensch. Erforschung des Nationalparks. Bd. 6: 119-142.
- DULLINGER, S., DIRNBÖCK, T. und G. GRABHERR (2004): Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. Journal of Ecology 92: 241-252.
- ERSCHBAMER, B. (2007): Pressemitteilung 16 der Universität Innsbruck 2007.
- ERTL, S. et al. (2002): Einfluss von Weidevieh und Wild auf die Ausbreitung alpiner Gefäßpflanzen. Bericht über das 10. Österr. Botanikertreffen, BAL Gumpenstein. Irdning: 7-10.

- GOTTFRIED, M., PAULI, H. und 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. und 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. and 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. and G. GRABHERR (2002): Potential Effects of Climate Change on Alpine and Nival Plants in the Alps. In: *Mountain Biodiversity* (Körner, C. and Spehn, E.M. eds.), Parthenon, New York: 213-223.
- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M. and H. PAULI (1994): Climate effects on mountain plants. *Nature* 369, 448.
- HALOY, S.R.P. and A.F. MARK (2003): Climate-change effects on alpine plant biodiversity: A New Zealand perspective on quantifying the threat. *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.* 35, 248-254.
- HOFER, H.R. (1992): Veränderungen in der Vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985. *Ber. Geobot.Inst. ETH, Stiftung Rübel, Heft 58*: 39-54.
- HÜLBER, K., ERTL, S., GOTTFRIED, M., REITER, K. und G. GRABHERR (2005): Gourmets or gourmands? – Diet selection by large ungulates in high-alpine communities and possible impacts on plant propagation. *Basic and Applied Ecology* 6: 1-10.
- HÜLBER, K., GOTTFRIED, M., PAULI, H., REITER, K., WINKLER, M. und G. GRABHERR (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.
- IPCC (2007) Intergovernmental Panel on Climate Change. Working Group I-III. <http://www.ipcc.ch>.
- KAZAKIS, G., GHOSN, D., VOGIATZAKIS, I.N. and V.P. PAPANASTASIS (2006): Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Lefka Ori, Crete. *Biodiversity and Conservation*. DOI.10.1007/s10531-006-9021-1
- KLANDERUD, K. and H.J.B. BIRKS (2003): Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. *The Holocene* 13: 1-6.
- KLEBELSBERG, R. v. (1913): Das Vordringen der Hochgebirgsvegetation in den Tiroler Alpen. *Österr. Bot. Zeitschr.* Jg. 1913: 177-186, 241-254.
- KÖRNER, Ch. (2003): *Alpine Plant Life: Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems*. 2nd edn., Springer, Berlin.
- 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.
- MESHINEV, T., APOSTOLOVA I. and E. KOLEVA (2000): Influence of warming on timberline rising: a case study on *Pinus peuce* Griseb. in Bulgaria. *Phytocoenologia* 30, 431-438.
- MITCHELL, T.D., CARTER, T.R., JONES, P.D., HULME, M. and M. NEW (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). Working Paper 55, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK.
- MOISEEV, P.A. and S.G. SHIYATOV (2003): Vegetation dynamics at the treeline ecotone in the Ural highlands, Russia. In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. and D.B.A. Thompson (Eds.) (2003): *Al-*

- pine Biodiversity in Europe. 3-12, Springer, Berlin.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M. and G. GRABHERR (1999): Vascular plant distribution pattern at the low temperature limits of plant life – the alpine/nival ecotone at Mt. Schrankogel (Tyrol, Austria). *Phytocoenologia* 29, 297-325.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M. and G. GRABHERR (2003): The Piz Linard (3411m), the Grisons, Switzerland – Europe's oldest mountain vegetation study site. In Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. and D.B.A. Thompson (Eds.) (2003) *Alpine Biodiversity in Europe*. 443- 448, Springer, Berlin.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., HOHENWALLNER, D., REITER, K., CASALE, R. and G. GRABHERR (2004): The GLORIA* Field Manual – Multi-Summit Approach. European Commission, DG Research, 10 p.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., REITER, K., KLETTNER, Ch. and 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.
- REGINSTER, I., ROUNSEVEL, M., SPANGENBERG, J. et al. (2005): Development, Provision and Application of the ALARM Scenarios. Unpublished, distributed internally within the ALARM project. RTD Framework Programme 6 of the European Commission.
- STANISCI, A., PELINO, G. and C. BLASI (2005): Vascular plant diversity and climate change in the alpine belt of the central Apennines (Italy). *Biodiversity and Conservation* 14: 1301-1318.
- THUILLER, W., LAVOREL, S., ARAUJO, M.B., SYKES, M.T. and I.C. PRENTICE (2005): Climate change threats to plant diversity in Europe. *PNAS*, 102/ 23, 8245-8250.
- VÄRE, H., LAMPINEN, R., HUMPHRIES, C and P. WILLIAMS (2003): Taxonomic Diversity of Vascular Plants in the European Alpine Areas. In Nagy, L., Grabherr, G., Körner, Ch. and D.B.A. Thompson (Eds.) 2003 *Alpine Biodiversity in Europe*. 133-148, Springer, Berlin.

Anschrift der Verfasser

Univ.-Prof. Dr. Georg Grabherr
Dept. Naturschutzforschung, Vegetations-, Landschaftsökologie der Universität Wien
Althanstr. 14
A-1090 Wien
georg.grabherr@univie.ac.at
www.gloria.ac.at

Dr. Michael Gottfried
(Adresse s.o.)
harald.pauli@univie.ac.at

Dr. Harald Pauli
(Adresse s.o.)
michael.gottfried@univie.ac.at

Der Verein zum Schutz der Bergwelt bedankt sich beim Department Naturschutzforschung, Vegetations- und Landschaftsökologie der Universität Wien für die großzügige finanzielle Unterstützung zur Drucklegung dieses Artikels.

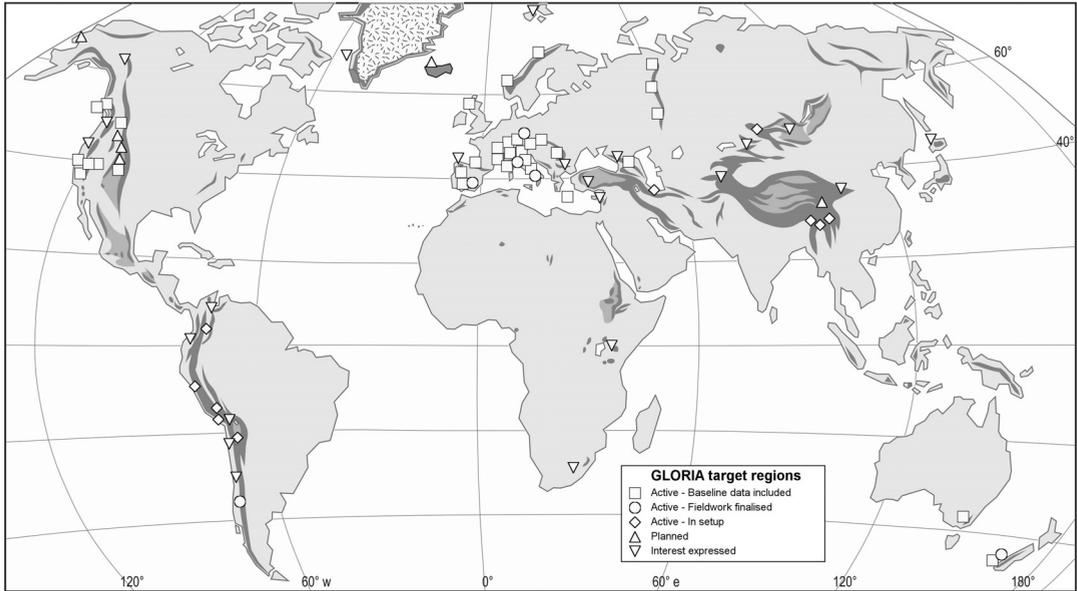


Abb. 1: Das GLORIA-Netzwerk: Dargestellt ist der derzeitige Stand an aktiven target regions (= abgegrenzte Gebirgsregion mit einheitlichem Klima und einheitlicher Geologie) und geplanten target regions. Wie die Karte zeigt, umfasst das Netzwerk inzwischen alle großen Hochgebirgsregionen der Erde.

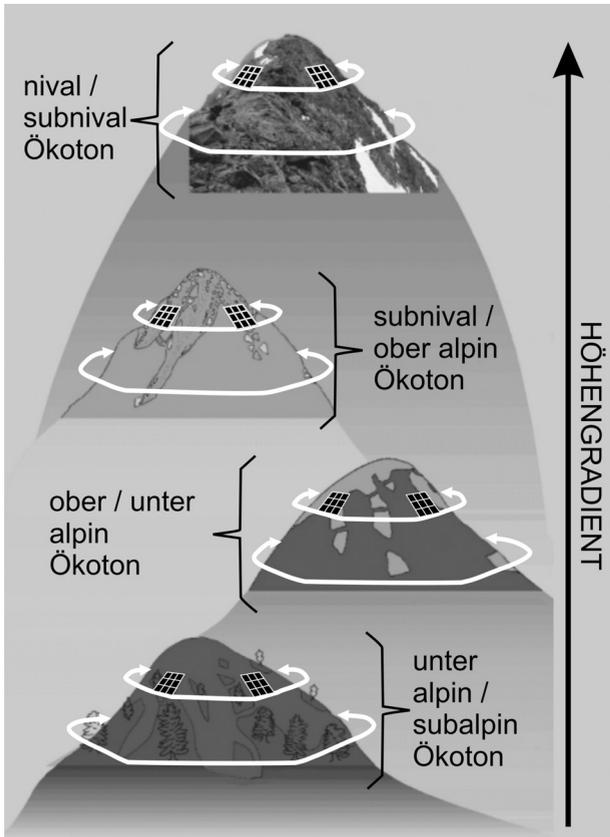


Abb. 2: GLORIA's "Multi Summit Approach": Der Basisansatz von GLORIA ist die Einrichtung von Dauerbeobachtungsflächen auf unterschiedlich hohen Bergen einer target region. Idealerweise sollten die ausgewählten Gipfel in den jeweiligen Übergängen (Ökotonen) der Hochgebirgszone (Baumgrenzen-Ökoton, Ökotone zwischen unterer und oberer alpiner Stufe, zwischen oberer alpiner und nivaler Stufe, Obergrenze höherer Pflanzen) liegen und frei von menschlicher Nutzung sein. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich solche Gipfel in allen target regions vergleichsweise leicht finden lassen, ausgenommen die untersten zwei in Regionen mit extremer Weidenutzung (Anden, Tibet).

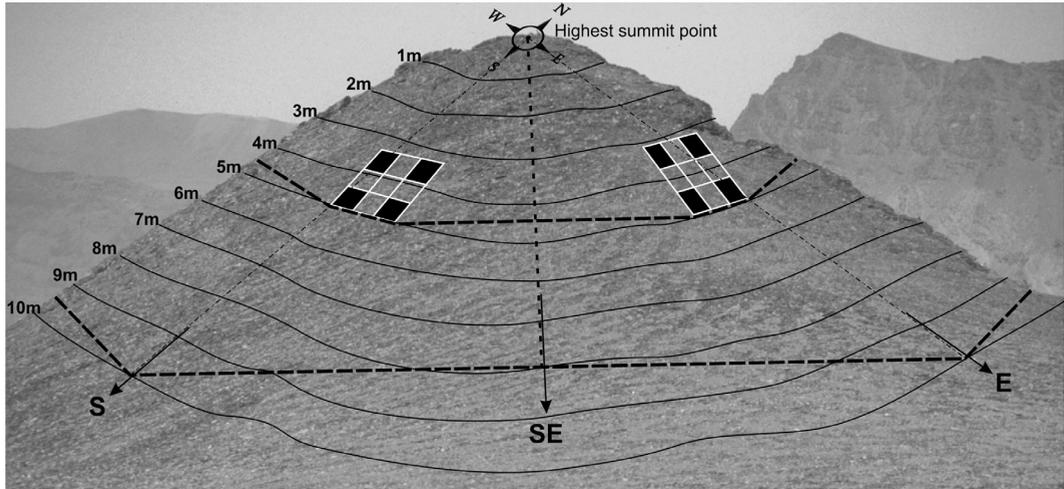


Abb. 3: Das GLORIA Gipfelflächendesign. GLORIA produziert folgende Datensätze: Liste der Pflanzenarten (meist nur Gefäßpflanzen) in Kleinflächen (1 m²; siehe kleine schwarze Flächen; pro Himmelsrichtung je 4 = pro Gipfel insgesamt 16), in 8 Sektoren (je nach Gipfelform 200 - 1000 m²), und für den gesamten Gipfel; Zeitreihen der Bodentemperatur in 10cm Tiefe je nach Himmelsrichtung. Die Kleinflächen sind an der 5m Isohypse unterm Gipfel angelegt, die Sektoren an der 10m Isohypse.

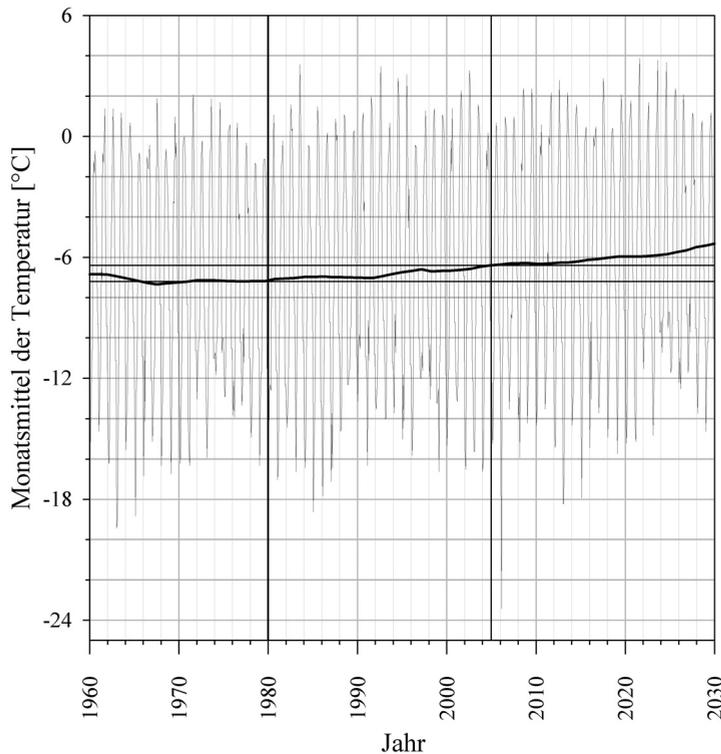


Abb. 4: Monatsmittel der Temperatur zwischen 1960 und 2030 für die hohen Lagen (3000m) der westlichen Stubaier Alpen (Standort des GLORIA-master sites Schrankogel; gemessene Temperaturdaten 1901-2000, modellierte 2001-2100, HadCM3, A1FI story line; Werte gelten für Zellen von 10 Grad (11°05'E, 47°05'N); MITCHELL et al. 2004, REGINSTER et al. 2005). Die durchschnittliche Jahrestemperatur ist in den letzten 25 Jahren am Schrankogel um ca. 1°C angestiegen.

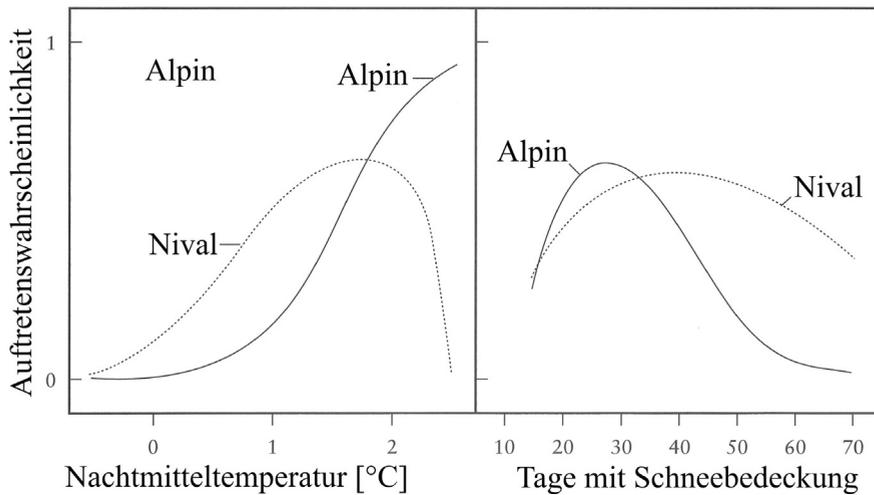


Abb. 5: Temperatur- und Schneeverhältnisse Juni/Juli an den Standorten von Arten mit Schwerpunkt alpine Stufe und solchen mit Schwerpunkt in der nivalen Stufe am master site Schrankogel (Bodenoberflächentemperatur; GOTTFRIED et al. 2002). Nivale Arten tolerieren längere Schneedeckendauer und einige auch deutlich tiefere Temperaturen (da länger unter Schnee). Erwärmung bei geringerem Niederschlag würde für die Nivalflora die negativsten Folgen haben.

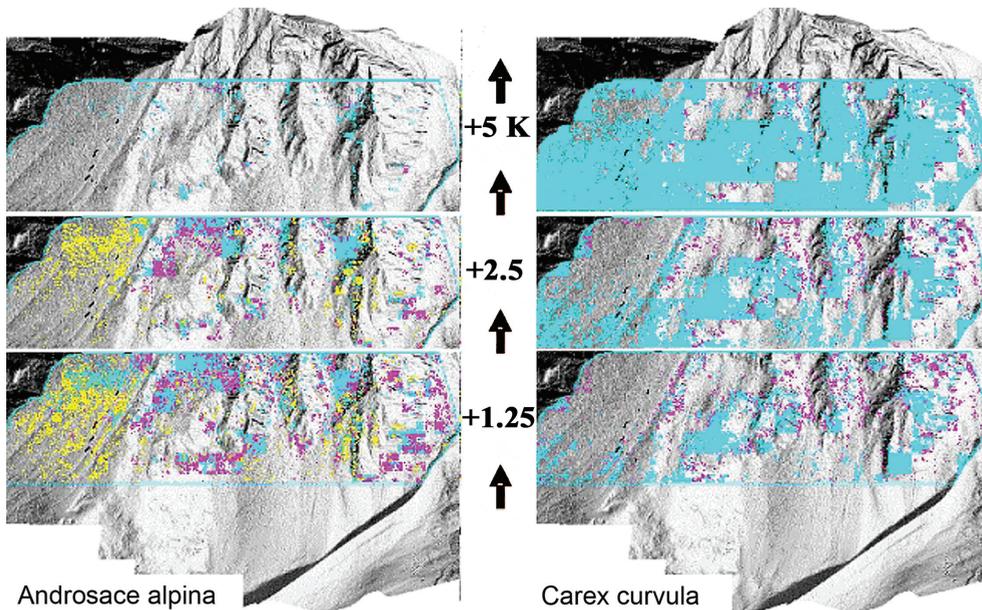


Abb. 6: Räumlich explizites Computermodell für den GLORIA – master site Schrankogel, Tirol: Das Modell basiert auf einem digitalen Höhenmodell (1m Auflösung), den Temperaturwerten von >30 Messstellen und den ökologischen Steckbriefen (relief-, temperatur- und schneebedingtes Vorkommen) alpiner und nivaler Arten. Derzeit besetzte Habitate der nivalen Art Alpen-Mannsschild (*Androsace alpina*) verlieren bei einer Erwärmung um 2,5 °C ihre Habitateignung, bei +5°C verschwinden diese Habitate fast vollständig. Man beachte, dass aber auch nach diesem Szenario, das einer Höhendifferenz von 1000m entspricht, noch einige Refugien übrig bleiben (verändert nach GOTTFRIED et al. 1999). Im Gegensatz dazu nimmt der alpine Rasenbildner Krumm-Segge (*Carex curvula*) zu, kann aber reliefbedingt (Schutthalden etc.) nicht alle Nischen besetzen. Rot: Hohe Dichte, Blau: geringe Dichte, Gelb: mittlere Dichte.

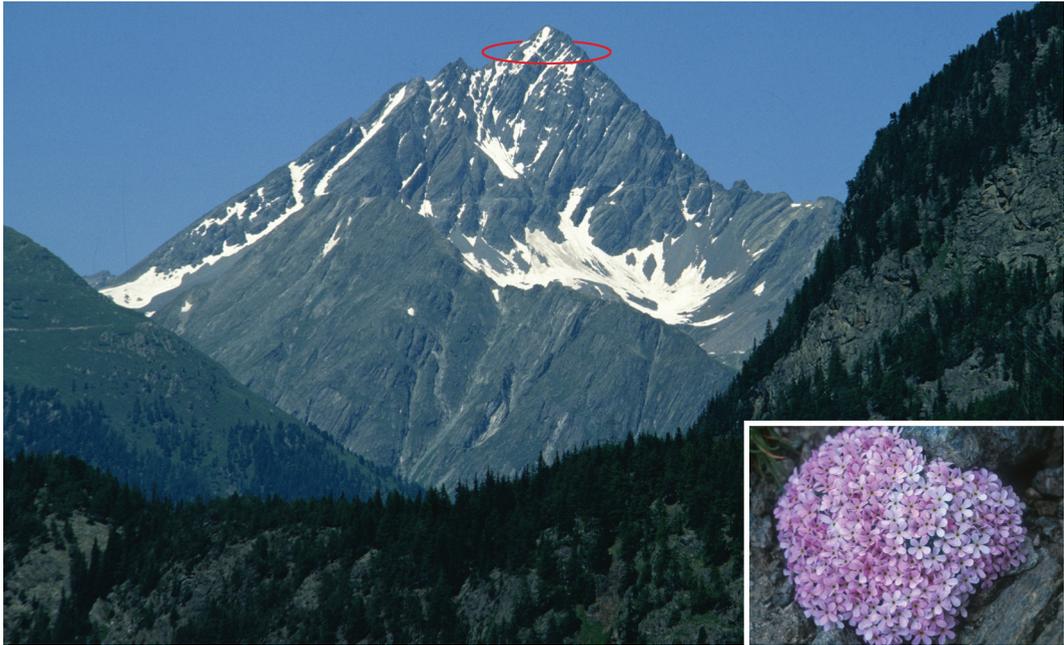


Photo 1a: Der Piz Linard (3.411m), höchster Berg der Silvretta (Grisons, Schweiz) und vermutlich älteste Dauerbeobachtungsfläche der Welt in den Bergen. Bei der Erstbesteigung 1835 fand der Schweizer Pfarrer und Botaniker Oswald Heer am Gipfel nur eine Pflanzenart, i.e. den Alpen-Mannsschild (*Androsace alpina*) (PAULI et al. 2003). Photo 1b: Alpen-Mannsschild (*Androsace alpina*).



Photo 2: GLORIA – ein globales Netzwerk. Hier die target region Dunderberg (3749 m hoch) in der Sierra Nevada, Kalifornien. GLORIA-Partner: USDA Forest Service, Sierra Nevada Research Center; CalFlora, Albany, CA; University of California, Davis.



Photo 3: Aufnahme der Gefäßpflanzenliste in Kleinflächen am master site Schrankogel (3497m; Stubaier Alpen, Tirol).

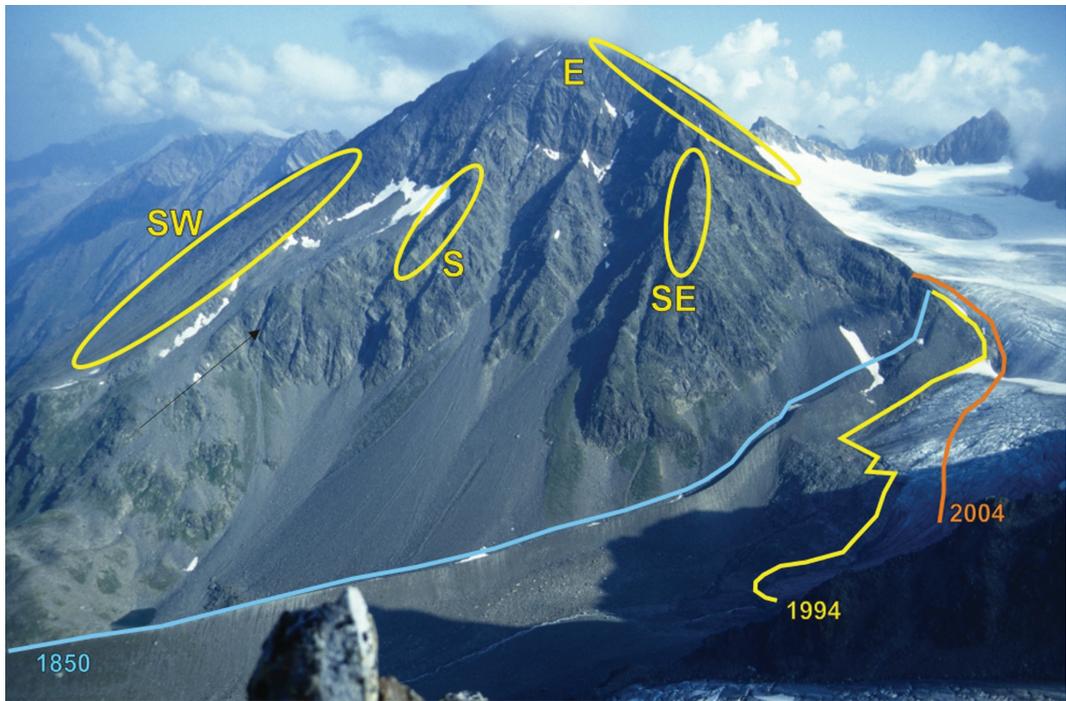


Photo 4: GLORIA – master site Schrankogel (3497m, Stubaier Alpen, Tirol). Gelb markierte Flächen zeigen die Stellen an, an denen detailliert Vegetationserhebungen erfolgten (siehe Photo 3). Beachte die unterschiedlichen Gletscherstände des Schwarzenbergferners zwischen 1850 und 2004.

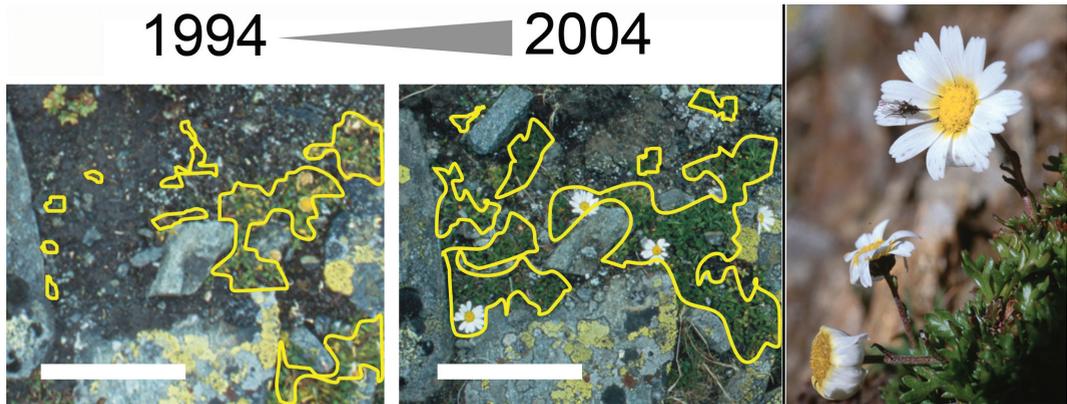


Photo 5a: Zunahme der Bodendeckung von 1994 auf 2004 bei der Alpenmargarite (*Leucanthemopsis alpina*) im oberen Bereich des alpin/nivalen Ökotoes am Schrankogels.

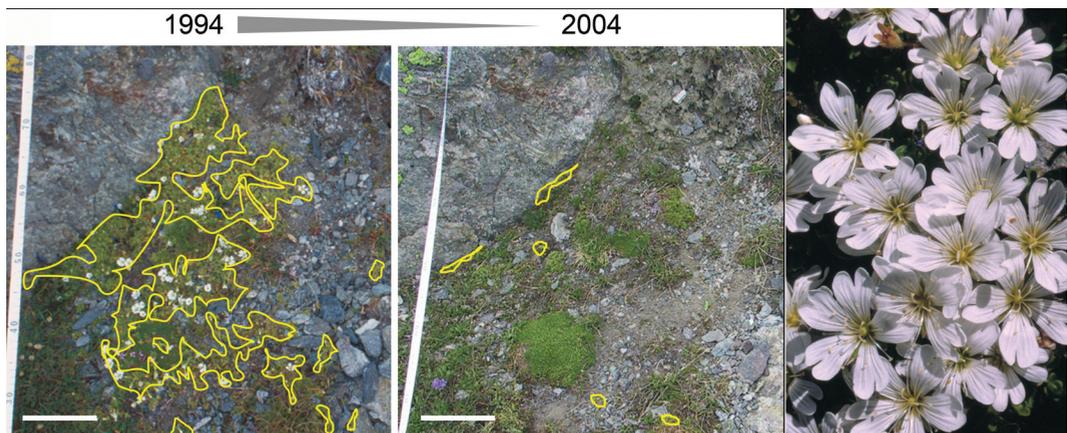


Photo 5b: Abnahme der Bodendeckung beim Einblütigen Hornkraut (*Cerastium uniflorum*) im gleichen Zeitraum. Die Margarite ist repräsentativ für Arten mit weiter Höhenamplitude, die die Erwärmung von ca. 0,8 °C nutzen können, wogegen das Hornkraut als nivale Art der höchsten Zonen unter der Erwärmung offensichtlich gelitten hat.