

Ber. d. Reinhold-Tüxen-Ges. 24, 77-87. Hannover 2012

Das GLORIA-Monitoring-Netzwerk zum Klima- und Vegetationswandel in den Hochgebirgen

– Georg Grabherr, Michael Gottfried & Harald Pauli, Wien –

1. Einleitung

Schon vor 100 Jahren wurde vermutet, dass sich durch die Erwärmung seit Ende der kleinen Eiszeit um 1850 die hochalpine Vegetation in dem Sinne verändert habe, dass Pflanzenarten aus tieferen Höhenstufen höher anzutreffen sind (KLEBELSBERG 1913). In den 1950er-Jahren war es dann BRAUN-BLANQUET, der durch den Vergleich historischer und aktueller Artenlisten ausgesuchter Gipffluren in den Rätischen Alpen eindeutige Befunde für diesen Effekt lieferte (BRAUN-BLANQUET 1955, 1957, 1958). Der Trend alpiner und nivaler Arten, die obere Verbreitungsgrenze auszudehnen, wurde zu Beginn der 1990-Jahre auf breiter Basis, d.h. für den Hauptkamm der Ostalpen nachgewiesen (GRABHERR et al. 1994, HOFER 1992). Inzwischen bestätigen vergleichbare Studien von anderen Hochgebirgsregionen, dass es sich hier um ein verbreitetes Phänomen handelt (z.B. BRITTON et al. 2009/ Schottland, KLANDERUD & BIRKS 2003, VIRTANEN et al. (2003)/Skanden, VITTOZ et al. 2008/ Westalpen, PAULI et al. 2012/ europäische Hochgebirge). WALTHER et al. (2005) berichten von einer Beschleunigung des Prozesses seit der Jahrtausendwende, und letztendlich fanden PAULI et al. (2007), dass besonders nivale Arten zurückgehen, noch ohne dem Konkurrenzdruck der hoch kommenden Arten ausgesetzt zu sein. Offenbar wirkt die veränderte Klimasituation direkt auf Lebensprozesse wie Reproduktion oder metabolische Prozesse. HOLZINGER et al. (2008) ergänzten, dass kein Unterschied zwischen Kalk- und Silikatflora bestünde,

Die hochalpine Vegetation und Flora an den Kältengrenzen des Lebens erwies sich und erweist sich somit als geeigneter Indikator für die ökologische Relevanz des Klimawandels (GRABHERR 2003). Durch den geringen menschlichen Einfluss tritt das Klimasignal besonders deutlich in Erscheinung. Vor allem in den Ländern mit traditioneller Gebirgsforschung hat sich inzwischen eine intensive Forschungsaktivität entwickelt, wobei methodologisch drei sich gegenseitig ergänzende Ansätze einzeln oder in Kombination verfolgt werden: 1) Modellbildung zur Exploration möglicher Entwicklungen, 2) Experimente, Feldstudien (z.B. ökophysiologische, populationsökologische) zur Generierung und Prüfung von Hypothesen. und 3) Monitoring zur Dokumentation der realen Situation. In diesem Beitrag werden Beispiele dazu aus eigener Forschung dargestellt und der Stand des Wissens allgemein umrissen. Ein Schwerpunkt liegt auf dem globalen Monitoringnetzwerk GLORIA „Global Observation Research Initiative in Alpine Environments“ und seinen jüngsten Ergebnissen.

2. Modellbildung

Die Notwendigkeit Prognosen zu erstellen führte zu den heute hoch entwickelten, komplexen und computerunterstützten Modellen (für eine erste Übersicht siehe SOLOMON & SHUGART 1993). Vorläufer waren vorerst Überlegungen zur allgemeinen Höhenverschiebung der Vegetationszonen (OZENDA & BOREL 1990, HALPIN 1995), zur Verbreitung einzelner Arten aber auch funktioneller Typen (THEURILLAT & GUISAN 2001). Die dazu notwendige Kenntnis der Habitatsbindung bzw. funktionalen Verknüpfungen ist aus Feldbeob-

achtungen abgeleitet. Der derzeitige Stand des Wissens dazu findet sich kondensiert in den sogenannten Zeigerwertsystemen, wie die spezifisch für die Alpen erstellte FLORA INDICATIVA (LANDOLT 2010). Moderne Synthesen mit ökophysiologischer Ausrichtung sind etwa KÖRNER (2003), mit synökologischer NAGY & GRABHERR (2009).

Eine Voraussetzung vieler Modelle ist es, ökologische Steckbriefe (environmental envelopes) oder Profile anhand von morphologischen, anatomischen und physiologischen Eigenschaften erstellen zu können. Die dazu erstellten großen Datenbanken sind allerdings selten einigermaßen vollständig. Das bis dato wohl vollständigste auf Messungen beruhende Profil für eine alpine Art haben LARCHER & WAGNER (2004) für *Rhododendron ferrugineum* zusammengestellt. Als Resultat Jahrzehnte langer Untersuchungen zeigt sich deutlich, dass eine wirklich kausale Prognostik auf Basis der Eigenschaften einzelner Arten unbefriedigt bleiben muss, weil Daten schlichtweg fehlen. Bei Konzentration auf Schlüsseigenschaften ist dies eher möglich wie LARCHER et al. (2010) für nivale Arten darstellten, oder man nutzt bottleneck-Situationen, wie die spektakulären Untersuchungen von KÖRNER (2012) an den höchsten Blütenpflanzenvorkommen in den Alpen (*Saxifraga oppositifolia*, Dom: 4.595 m) gezeigt haben.

Noch schwieriger ist das ökosystemare Niveau. Für die prozessorientierte Sicht haben BOWMAN et al. (2001) die Ergebnisse langjähriger Forschung im Gebiet der alpinen Rasen der Niwot Ridge (Rocky Mountains) zusammengestellt und vor allem die Bedeutung des Stickstoffkreislaufs in Bezug zum luftbürtigen Teil und die Mineralisierung durch die saisonal unterschiedlichen Mikrobengemeinschaften dargestellt. In ähnlicher Weise versuchte GRABHERR (1989) die produktionsbiologischen und populationsökologischen Aspekte im Krummseggenrasen der Zentralalpen zu einem strukturell-funktionalen Gesamtbild zusammenzufügen. Die größte Biomasse stellen die Flechten, ihre funktionale Bedeutung ist hingegen gering.

Mit der Einführung robuster und ausdauernder MiniDatalogger gelang zumindest was die Habitatscharakterisierung und damit die Skizzierung der realisierten Nische angeht ein Quantensprung. Auf Basis von > 40 Messstellen am Schrankogel, Tirol konnten z.B. GOTTFRIED et al. (1998, 1999) für einen Großteil von Hochlagenarten einen direkten Bezug zwischen Standorttemperatur und Schneebedeckung herstellen. Bezogen auf die gemessenen Temperaturwerte sind nivale Arten von alpinen klar geschieden. Die Temperaturprofile verknüpft mit einem feinmaschigen digitalen Höhenmodell des Schrankogels zeigten deutlich die Bedeutung von Mikrorefugien (GOTTFRIED et al. 1998, 1999). Sogar beim +5°C-Szenario finden sich immer noch kleine Stellen am Schrankogel, die ein Überleben nivaler Arten ermöglichen (Abb.1). Die große Bedeutung des Feinreliefs und damit verbundener Verfügbarkeit von Mikrorefugien demonstrierten in weiterer Folge eindrucksvoll SCHERRER et al. (2011) mittels Zeitreihen von hochauflösenden Infrarotfotos.

Die ersten räumlich expliziten Computermodelle zur Exploration kontinentweiter, ja globaler Effekte fanden, obwohl noch sehr ungenau, weite Beachtung, unter anderem auch dadurch, dass die Gebirgsarten als besonders gefährdet ausgewiesen wurden. THUILLER et al. (2005; 50x50km) berechneten etwa einen Verlust von bis zu 60% der europäischen Gebirgsarten. Engmaschigere Modelle weichen ab und zeigen ein wesentlich differenzierteres, zum Teil konträres Bild. RANDIN et al. (2009) modellierten in gleicher Weise wie THUILLER et al. (2005), aber mit 25x25m Auflösung in zwei sehr hohen Alpenregionen (Diablerets, Zermatt) die Entwicklung, wobei keine der Arten, bzw. ihre Habitate hier als gefährdet ausgewiesen wurden. Jüngere Modellstudien, die mehrere Gebirge Europas berücksichtigten, zeigten hingegen starke Habitatsverluste für die niedrigeren alpinen Regionen, die keine Nivalstufe aufweisen (ENGLER et al. 2011).

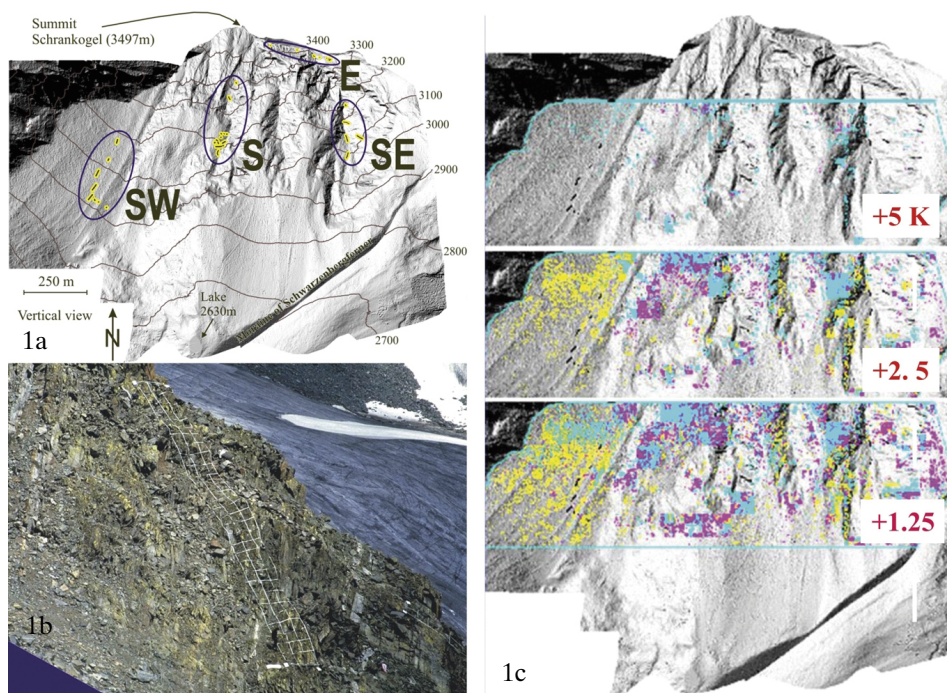


Abb.1: Digitales Höhenmodell des Schrankogel (3497 m, Tirol, Österreich) und Aufnahmeflächen; 1c räumlich explizites Verteilungsmodell von *Androsace alpina* am Schrankogel unter verschiedenen Temperaturszenarien (GOTTFRIED et al. 1998, 1999).

Eine weitere wesentliche Verfeinerung der Computermodele ergab sich durch die Einbeziehung von Verbreitung und Etablierungsfähigkeit einzelner Arten (DULLINGER et al. 2004). Ebenso ist die vorhandene Vegetation und deren Widerstand gegenüber Invasionen von anderen Arten zu beachten, wie es beispielsweise DULLINGER et al. (2004) für Waldgrenzhabitats der Nordostalpen mit dominanter Latsche (*Pinus mugo*) entwickelten. Die Reaktion der Latschen hängt weit hinter dem Potential zurück. In 1000 Jahren wird sich laut Modell die von *Pinus mugo* bedeckte Fläche nur um 10% vergrößert haben. So wie die Latsche sich ausdehnt ist eine Reduktion des Areal der alpin-nivalen Arten zu erwarten, im Durchschnitt um 44-50% (DULLINGER et al. 2012). Auch hier ist mit einer beachtlichen Verzögerung des Prozesses zu rechnen. Von den 150 Arten, die für die Analyse benutzt wurden, passten am Ende des Jahrhunderts im Durchschnitt 40% des besetzten Areals nicht mehr in die ursprüngliche klimatische Nische.

Fazit: Die Exploration der Klimawandelfolgen mittels räumlich explizierter Computermodele hat durch die Einbeziehung von verbreitungsrelevanten Parametern an Aussagekraft enorm gewonnen. Ausrottungsereignisse durch den Verlust geeigneter Habitate und begrenztes Ausbreitungspotential sind lokal, regional, im Fall von Endemiten auch global, nicht auszuschließen. Vor allem das Aufzeigen der großen Bedeutung von Mikrorefugien und lag-Phasen ist hervorzuheben.

3. Vitale Eigenschaften: Beobachtungen und Experimente

So differenziert die Modelle heute sind, so fehlt – wie schon erwähnt – für viele alpine Arten die Kenntnis über vitale Eigenschaften und man sucht vergeblich nach konkreten quan-

titativen Angaben. Komplementär zu den Modellen, um die Ergebnisse derselben zu prüfen, bieten sich experimentelle Ansätze an. Durch reziproke Transplantationsexperimente in den Otago-Bergen (Neuseeland) wiesen MARK (1965) und GREER (1979) eine ausgeprägte ökotypische Differenzierung beim dominanten snow tussock (*Chionochloa*) nach. Als Nebeneffekt zeigte sich, dass *Chionochloa* über der natürlichen Höhengrenze vegetativ mehrerer Jahrzehnte vital überstand. Blühen und Fruchtbildung waren stark reduziert. Zu diesen ältesten Beobachtungen zählen auch Suzeptionsstudien auf gestörten Flächen in den cushion fields und beweisen die lange Dauer (MARK & WILSON 2005). Mit direktem Bezug zum Klimawandel und ausgedehnt auf Pflanzengemeinschaften verpflanzten FRIEDMANN & GRABHERR (2009) ganze Ziegel von *Carex firma* und *Carex curvula*-Rasen in den Botanischen Garten der Universität Wien, was einem Temperatursprung von 8-10°C entspricht. Die Grundstruktur mit dominanter *Carex firma* und subdominant *Dryas octopetala* veränderte sich wenig (Abb.2), In anderen Proben ohne klare Dominanz setzten sich zum Teil Arten durch, von denen man es nicht erwartet hätte, z.B. *Campanula cochleariifolia*.



Abb. 2: *Carex firma*-Rasen im zweiten, dritten und vierten Jahr im Botanischen Garten

Obwohl „rough und dirty“ bewies dieses Experiment, dass in realen Gemeinschaften mit Überraschungen zu rechnen ist. Realitätsnäher sind die Erwärmungsexperimente mit open top chambers (OTC), bei denen Temperatureffekte um plus 1-2 °C erzielt werden können. Allgemein reagierten Arten sehr individuell, die in alpinen Rasen dominanten Graminoiden verzögert oder gar nicht (ERSCHBAMER et al. 2007). Diese bilden klonale Systeme, die im Falle von *Carex curvula* ein extrem hohes Alter erreichen können (Abb. 3). Die Vermutung von GRABHERR et al. (1977) aufgrund produktionsbiologischer Untersuchungen, dass *Carex curvula* möglicherweise über 1.000 Jahre alt werden könnte, fand durch DNS-Fingerprinting Bestätigung (STEINGER et al.1996) und wurde von DE WITTE et al. (2012) auf bis zu 5.000 Jahre präzisiert.

Fazit: Die Arten reagieren auf Erwärmung sehr individuell. Ökosystemingenieure wie die Graminoiden der alpinen Rasen oder manche Arten der Zwergstrauchstufe haben Klimaänderungen vor Ort überstanden, die den heutigen entsprechen.

4. Monitoring

Wie die Vegetation und die floristischen Verbreitungsmuster sich nun tatsächlich verändern, kann letztlich nur durch direkte Beobachtungen festgestellt werden. Wie schon angedeutet gab es bereits frühe Hinweise, dass erwärmungsbedingt Arten entlang des Höhengradienten höher wanderten.

Im Jahre 1835 bestieg der Schweizer Botaniker OSWALD HEER den Piz Linard (3411m) in der Silvretta und fand am Gipfel selbst nur die Art *Androsace alpina*. Der Gletscherhah-

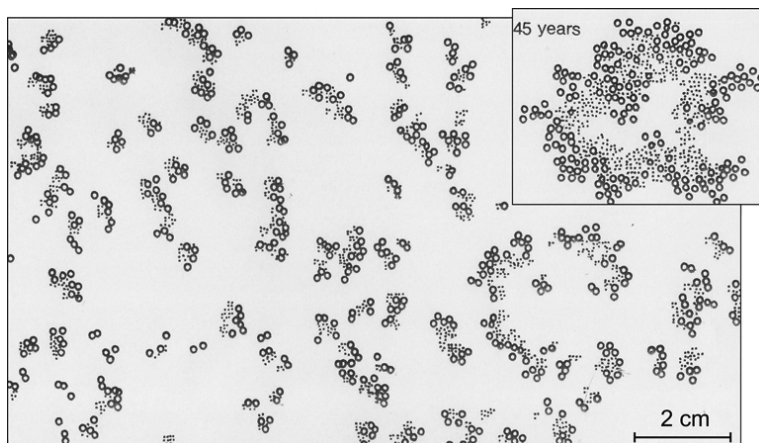


Abb. 3: Klonssystem von *Carex curvula*. Ein Hexenringstadium (40-60 Jahre) ist rechts oben zu sehen. Die Struktur des vorwiegenden „Reifestadiums“ entsteht durch die Verzweigungsarchitektur (GRABHERR 1997).

nenfuß wurde 60 m unter dem Gipfel beobachtet. Schweizer Botaniker besuchten den Piz Linard immer wieder, erhoben die Feldflora und stellten eine Zunahme von Arten fest. In einer Wiederholungsaufnahme 1992 wuchsen im Gipfelbereich zehn Arten (PAULI et al. 2003), die dem nivalen Grundstock zuzuordnen waren (Abb.4). Eine ähnliche Entwicklung wurde auf einer Reihe weiterer Gipfelfluren der Rhätischen und Ötztaler Alpen festgestellt (GRABHERR et al. 1994). Der Zuwachs an Arten war besonders dort groß, wo Migrationskorridore wie feste, durchnischte Felsrücken bis zum Gipfel vorhanden waren. Wo solche fehlten, war die Zunahme an Arten geringer oder gar nicht gegeben.

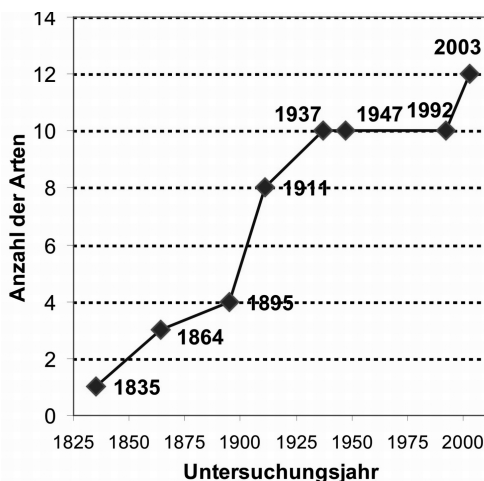


Abb. 4: Zunahme an Gefäßpflanzen am Piz Linard (3497m) seit der Erstbesteigung im Jahre 1835 (PAULI et al. 2003). In den 50-er Jahren hat sich der nivale Artenpool eingestellt. Das Nachrücken der alpinen Arten ist in den Blockfluren der Gipfelregion schwierig.

Standardisiertes Monitoring GLORIA

Auch wenn inzwischen die Zahl von Vergleichsstudien historischer und aktueller Gipfel-

aufnahmen stark zugenommen hat, bleibt eine gewisse Unsicherheit betreffend Aufnahme-
fläche und Genauigkeit der Aufnahme gegeben. Um ein stabiles standardisiertes langfristiges
Monitoring zu etablieren, wurde von unserer Arbeitsgruppe der “Multi-Summit-Approach“
entwickelt. Er besteht darin, dass in einem Gebirgsraum mit einheitlichen Klimabedingungen
Gipfel unterschiedlicher Höhenlage ausgesucht werden (target regions) und auf diesen ein
definiertes Aufnahmedesign platziert wird. Die Grundprinzipien des Vorgehens sind: TIME
SAVING (rasche Durchführung der Feldaufnahmen aufgrund der meist unwirtlichen Wetter-
bedingungen), CHEAP (geringe Kosten, Teilnahme soll auch gering dotierten Forschergrup-
pen möglich sein; capacity building), SIMPLE BUT SOUND: einfach aber wissenschaftlich
so überzeugend wie möglich. Weitere Grundbedingung des GLORIA-Ansatzes ist die Ver-
gleichbarkeit der verschiedenen Gebiete. Dementsprechend ist das Design der Aufnahme-
flächen auf den Gipfelbereichen der ausgesuchten Berge einfach gestaltet (siehe Abb. 5). In den
quadratmetergroßen Flächen (insgesamt 16 pro Gipfel) werden die Blütenpflanzenarten auf-
gelistet und die Deckung mit einer feinen Skala mit Hilfe von Schablonen geschätzt. Mit
Langzeit-Dataloggern können heute Bodentemperaturen in 10 cm Tiefe in Intervallen von
einer Stunde gemessen werden. Dieser einfachste Ansatz kann von gut finanzierten Arbeits-
gruppen ergänzt und verstärkt werden.

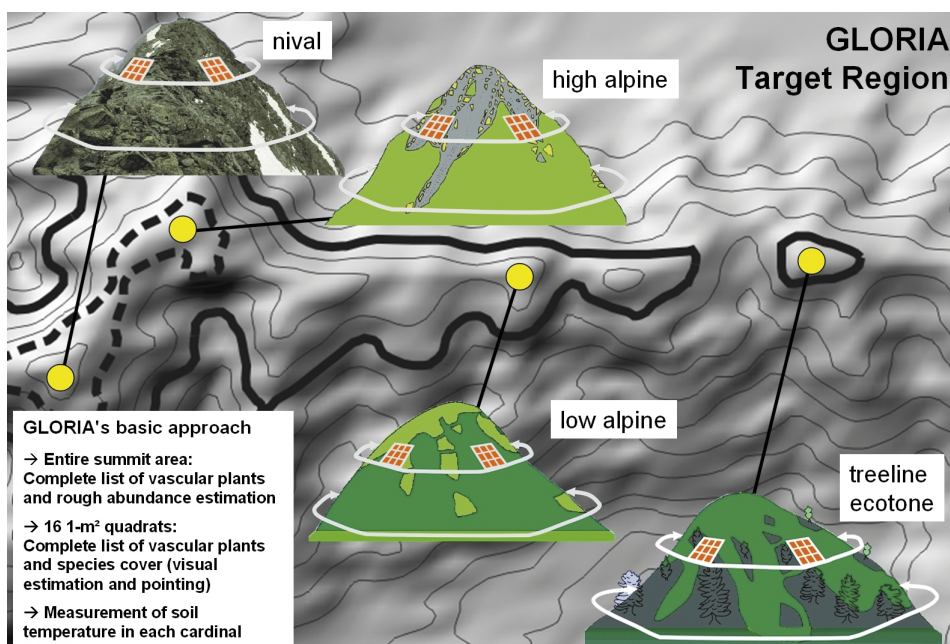


Abb. 5: Der „multi summit-approach“, wie dieser für das GLORIA-Programm entwickelt wurde.

Die gesamte Methodologie wurde im Rahmen des 5. EU-Rahmenprogrammes in einem
Pilotansatz für Europa entwickelt und getestet. Als Ergebnis liegt ein Handbuch vor (PAULI
et al. 2004), das inzwischen weiter entwickelt wurde und vor allem auch den globalen Ansatz
befriedigt. Das europäische Projekt stimulierte Gebirgsforscher in den wichtigsten Zentren
den GLORIA-Ansatz zu übernehmen und sich im Netzwerk einzubinden. Daneben kann der
Grundansatz von GLORIA auch im Rahmen von Expeditionen durchgeführt werden, was
Einzelforschern oder kleinen Gruppen entgegenkommt. In den zehn Jahren des Bestehens
von GLORIA ist die Zahl beteiligter Gruppen auf über hundert angewachsen, die in bislang
112 Gebirgsregionen auf sechs Kontinenten Beobachtungsstationen einrichteten oder gegen-
wärtig einrichten. Davon hat mehr als die Hälfte das Dauerbeobachtungssystem bereits fer-
tig installiert, einige davon, wie etwa in Australien, Neuseeland und in Nordamerika (Kali-

fornien und Montana) haben bereits die ersten Wiederaufnahmen durchgeführt. Laufend kommen neue Beobachtungsstationen hinzu.

Die Flächen des europäischen Pilotprojektes wurden im Jahre 2008 wieder besucht und nach dem GLORIA-Protokoll Artenlisten, Deckung und Mikromorphologie aufgenommen. Zusätzlich erfolgte das Auslesen der Temperaturlogger. Die Daten bildeten die Grundlage für die erste kontinentweite Analyse des Klimawandeleffekts auf natürliche Ökosysteme. Für Veränderungen in der Artenstruktur der untersuchten Pflanzengemeinschaften wurde ein integrierender Indikator entwickelt (GOTTFRIED et al. 2012). Den einzelnen Arten wurde dabei ein Zeigerwert zugewiesen, je nach Höhenpräferenz in den jeweiligen Gebirgen. Aus der Summe der Deckungswerte konnte so ein gewichtetes Mittel für die thermische Position berechnet werden. Aus der Differenz dieses Wertes zwischen 2001 und 2008 konnte ein Erwärmungseffekt, die sogenannte Thermophilisierung, abgeleitet werden. Über die gesamteuropäischen Hochgebirge gemittelt war der positive Trend statistisch signifikant nachweisbar. Es zeigte sich auch eine enge Korrelation zwischen dem Grad der Thermophilisierung und der regionalen Temperaturentwicklung. Mit der Thermophilisierung als integrierender Messgröße kann für die Zukunft eine vergleichende und übersichtliche Auswertung erfolgen.

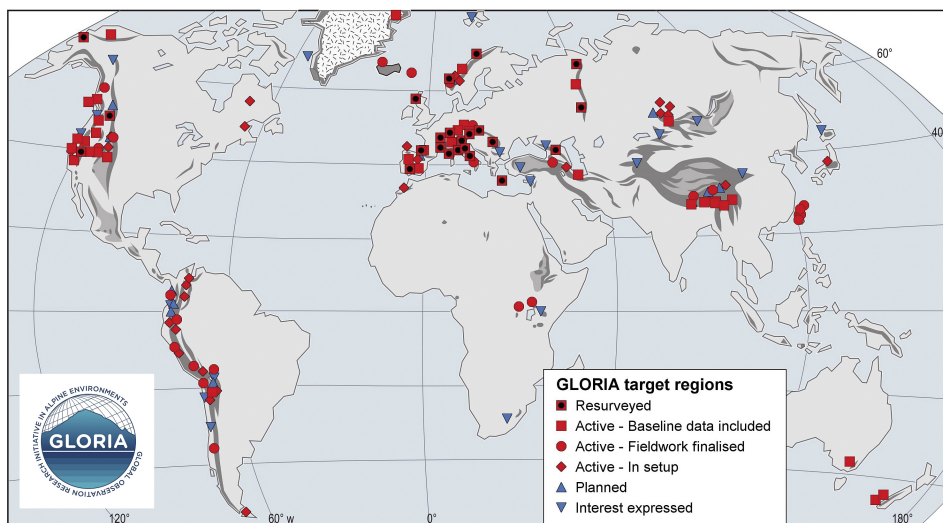


Abb. 6: Veränderung der Artenzahlen in den europäischen GLORIA-target regions

Bezieht sich die Thermophilisierung nicht nur auf die Immigration und Emigration von Arten sondern auch auf die Veränderung der Deckungswerte, so wurde in einer zweiten Analyse die Veränderung der Artenmenge als solche untersucht (PAULI et al. 2012). Insgesamt zeigte sich ein Höhersteigen der Arten in allen europäischen Biomen, das jedoch zu unterschiedlichen Effekten führte: in den mitteleuropäischen und nördlichen Hochgebirgen nahm die Artenzahl zu, in den mediterranen Gebirgen war hingegen ein Rückgang der Artenzahl oder zumindest eine Stagnation zu beobachten. Der Grund für diese unterschiedliche Entwicklung dürfte, zusätzlich zur Erwärmung, in einer Veränderung der Niederschläge in den südlichen Gebirgen liegen.

Neben der Artenzahl und der Thermophilisierung lässt sich auch die Veränderung der Höhenstufen, speziell eine Veränderung in der Lage von Ökotonen, indikatorisch darstellen (GOTTFRIED et al. 2011). Besonders bekannt ist hier natürlich die Waldgrenze, wogegen das

alpin-nivale Ökoton, das im wesentlichen durch die Auflösung der geschlossenen Vegetation gekennzeichnet ist, bis dato wenig beachtet wurde. In einer koordinierten Auswertung von GLORIA-Daten und der Schneelage ergab sich als Resultat, dass die Variabilität des Sommerschnees in den Alpen einen peak bei etwa 3000 m hat und sich diese Höhenlage mit der Auflösung der Vegetation deckt. Oberhalb dieses Ökotons dominieren jene Arten, die als nival bezeichnet werden können. Im Vergleich der Daten von 2001 und 2008 ließ sich eine Verlagerung des Ökotons in höhere Bereiche nachweisen.

5. Schlussfolgerungen

Durch die Fortschritte im Modelling, die erste Wiederholungsaufnahme nach standardisierter Methodologie, erste Transplantationsexperimente zeichnet sich ein in der Zwischenzeit doch sehr klares Bild für die Klimawandelfolgen im alpin-nivalen Lebensraum ab. Ein allgemeiner Trend des Höherwanderns ist für die meisten Hochgebirge Europas nachweisbar. Dies führt gegenwärtig zu erhöhten Artenzahlen, aber auch zu Rückgängen, etwa in mediterranen Gebirgen oder zu einem Rückzug nivaler Arten..

Modellszenarien legen nahe, dass die Veränderungen mit teils beachtlicher Verzögerung eintreten. Bei manchen Arten mit mangelnder Ausbreitungskapazität kann es auch mehrere hundert Jahre dauern bis die potentielle Nische ausgefüllt ist. Viele dominante Arten zeichnen sich durch den Aufbau klonaler Populationen aus, wobei die Geneten in Extremfällen mehrere tausend Jahre alt werden können. Der Großteil der Veränderungen ist auf Arten mit kürzerer Lebensdauer und dynamischerer Entwicklung beschränkt.

Die zahlreichen experimentellen Untersuchungen, etwa mit open top-chambers, weisen auf eine hohe Individualität der Reaktion hin. Transplantationsversuche, gerade solche mit extremen Annahmen, machten deutlich, dass etwa dominante Arten diese Rolle nicht zwangsläufig beibehalten, sondern Überraschungen fast an der Tagesordnung sind.

Eines ist sicher: Die beobachtete Klimaerwärmung hinterlässt bereits ihre Spuren in der alpinen Pflanzenwelt. Ein Verlust von Populationen, beispielsweise endemischer Arten, ist aufgrund der Modelle wahrscheinlich, aufgrund der Persistenz vieler, besonders dominanter Arten aber mit Verzögerungen verbunden. Daher ist es nicht erstaunlich, dass ein Aussterben von Arten bis dato noch nicht berichtet wurde. In summa kann bestätigt werden, dass sich die alpine Pflanzenwelt als sensibler Indikator bestens eignet, der auf der anderen Seite (infolge der Langlebigkeit der Arten) – durch eine Integration der Klimaeffekte ausgezeichnet ist.

Literatur

- BOWMAN, W. D. & SEASTEDT, T. R. (2001): Structure and function of an alpine ecosystem, Niwot Ridge, Colorado. Oxford: Oxford University Press.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1955): Die Vegetationsverhältnisse des Piz Languard, ein Maßstab für Klimaänderungen. – *Svensk Botanisk Tidskrift* **49**: 1-9.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1957): Ein Jahrhundert Florenwandel am Piz Linard (3414 m). – *Bulletin Jardin Botanique Bruxelles*, Vol Jubil. W. Robyns: 221-232.
- BRAUN-BLANQUET, J. (1958): Über die obersten Grenzen pflanzlichen Lebens im Gipfelbereich des Schweizerischen Nationalparks. – *Komm. Schweiz. Naturforsch. Ges. Wiss. Erforsch. Nationalparks* **6**: 119-142.
- BRITTON, A. J., BEALE, C. M., TOWERS, W. & HEWISON, R. L. (2009): Biodiversity gains and losses: Evidence for homogenisation of Scottish alpine vegetation. – *Biological Conservation* **142**: 1728-1739
- DE WITTE, L.C., ARMBRUSTER, G.F.J., GIELLY, L., TABERLET, P. & STÖCKLIN, J. (2012): AFLP markers reveal high clonal diversity and extreme longevity in four key arctic-alpine species. – *Molecular Ecology* **21**: 1081-1097.

- DULLINGER, S., DIRNBÖCK, T. & GRABHERR, G. (2004): Modelling climate change-driven treeline shifts: relative effects of temperature increase, dispersal and invasibility. – *Journal of Ecology* **92**: 241-252.
- DULLINGER, S., GATTRINGER, S., 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. & HÜLBER, K. (2012): Extinction debt of high-mountain plants under twenty-first-century climate change. – *Nature Climate Change*: 2012/05/06/online
- ENGLER, R., RANDIN, C. E., THUILLER, W., DULLINGER, S., ZIMMERMANN, N.E., ARAUJO, M.B., PEARMAN, P.B., LELAY, G., PIEDALLU, C., ALBRECHT, CH., CHOLER, P., COLDEA, G., DELAMO, X., DIRNBÖCK, T., GEGOUT, J.C., GOMEZ-GARCIA, D., GRYNES, J.A., HEEGAARD, E., HOISTAD, F., NOGUES-BRAGO, D., NORMAND, S., PUSCAS, M., SEBASTIA, M.T., STANISCI, A., THEURILLAT, J.B., TRIVEDI, M., VITTOZ, B. & GUISAN, A. (2009): 21st climate change threatens European mountain flora. – *Global Change Biology* **17**: 2330-2341.
- ERSCHBAMER, B. (2007). Winners and losers of climate change in a recent alpine glacier foreland. – *Arctic, Antarctic and Alpine Research* **39**: 237-244.
- FRIEDMANN, B. & GRABHERR, G. (2009): What happens when alpine plants are exposed to lowland climate. – *Verhandlungen der Zool.-Bot. Ges. Österreich* **146**: 139 – 150.
- GOTTFRIED, M., PAULI, H. & GRABHERR, G. (1998): Prediction of vegetation patterns at the limits of plant life: A new view of the alpine-nival ecotone. – *Arctic and Alpine Research* **3/3**: 207-221.
- GOTTFRIED, M., PAULI, H., REITER, K. & GRABHERR, G. (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. & GRABHERR, G. (2002): Potential effects of climate change on alpine and nival plants in the Alps. In: KÖRNER, CH. & SPEHN, E. (eds.) *Mountain biodiversity: a global assessment*. New York: Parthenon: 213-223.
- GOTTFRIED, M., HANTEL, M., MAURER, C., TÖCHTERLE, R., PAULI, H. & GRABHERR, G. (2011): Coincidence of the alpine-nival ecotone with the summer snowline. – *Environmental Research Letters* **6**: 014013 (12 pp.).
- GOTTFRIED, M., PAULI, H., FUTSCHIK, A., AKHALKATSI, M., BARANCOK, P., BENITO ALONSO, J.L., COLDEA, G., DICK, J., ERSCHBAMER, B., FERNANDEZ CALZADO, M.R., KAZAKIS, G., KRAJCI, J., LARSSON, P., MALLAUN, M., MICHELSEN, O., MOISEEV, D., MOISEEV, P., MOLAU, U., MERZOUKI, A., NAGY, L., NAKHUTSRISHVILI, G., PEDERSON, B., PELINO, G., PUSCAS, M., ROSSI, G., STANISCI, A., THEURILLAT, J.-P., TOMASELLI, M., VILLAR, L., VITTOZ, P., VOGIATZAKIS, I. & GRABHERR, G. (2012): Continent-wide response of mountain vegetation to climate change. – *Nature Climate Change* **2**: 111-115.
- GRABHERR, G. (1989): On community structure in high alpine grasslands. – *Vegetatio* **83**: 223-227.
- GRABHERR, G. (1997): The high-mountain ecosystems of the Alps. In: WIELGOLASKI, F. E. (ed.). *Polar and alpine tundra. Ecosystems of the world 3*, Amsterdam: Elsevier: 97-121.
- GRABHERR, G. (2003): Alpine vegetation dynamics and climate change – a synthesis of long-term studies and observations. In: NAGY, L., GRABHERR, G., KÖRNER, CH. & THOMPSON, D. B. A. (eds.). *Alpine biodiversity in Europe. Ecological Studies* 167. Berlin: Springer: 399-409.
- GRABHERR, G., MÄHR, E. & REISIGL, H. (1977): Net-primary production and reproduction of alpine grass heath community *Caricetum curvulae*. – *Oecologia Plantarum* **13**: 227-251.
- GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., PAULI, H. (1994): Climate effects on mountain plants. – *Nature* **369**: 448.
- GREER, D.H. (1979): Effects of long-term preconditioning on growth and flowering of some snow-tussock (*Chionochloa spp.*) populations in Otago, New Zealand. – *Aust. J. Bot.* **27**: 617-630.
- HALPIN, P.N. (1995). Latitudinal variation in the potential response of mountain ecosystems to climatic change. In: BENISTON, M. (ed.) *Mountain environments in changing climates*. London: Routledge: 180-203.
- HOFER, H. R. (1992). Veränderungen in der Vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985. – *Berichte des Geobotanischen Instituts der Eidgenössischen Technischen Hochschule Stiftung Rübel* **58**: 39-54.
- HOLZINGER, B., HÜLBER, K., CAMENISCH, M. & GRABHERR, G. (2008). Changes in plant species richness over the last century in the eastern Swiss Alps: elevational gradient, bedrock effects and

- migration rates. – *Plant Ecology* **195/2**: 179-196.
- KLANDERUD, K. & BIRKS, H. J. B. (2003). Recent increases in species richness and shifts in altitudinal distributions of Norwegian mountain plants. – *The Holocene* **13**: 1-6.
- KLEBELSBERG, R. (1913) Das Vordringen der Hochgebirgsvegetation in den Tiroler Alpen. – *Österr. Bot. Zeitschr. Jahrgang* 177-186, 241-254
- KÖRNER, Ch. (2003): Alpine plant life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems. 2nd ed. Berlin, Springer.
- KÖRNER, C. (2012): Coldest places on earth with angiosperm plant life. – *Alpine Botany*, **121**:11-22
- LANDOLT, E. (ed.)(2010): Flora indicativa. Ökologische Zeigerwerte und biologische Kennzeichen zur Flora der Schweiz und der Alpen. 378 pp. Bern: Haupt.
- LARCHER, W. & WAGNER, J. (2004) : Lebensweise der Alpenrosen in ihrer Umwelt. 70 Jahre ökophysiologische Forschung in Innsbruck. – *Ber. nat.med. Verein Innsbruck* **81**: 251-291.
- LARCHER, W., KAINMÜLLER, CH., & WAGNER, J. (2010): Survival types of high mountain plants under extreme temperatures. – *Flora* **205**: 3-18.
- MARK, A. F. (1965): Ecotype differentiation in Otago populations of narrow-leaved snow tussock *Chionochloa rigida*. – *N.Z.J. Botany* **3**: 277-299.
- MARK, A.F. & WILSON, J.B. (2005): Tempo and mode of vegetation dynamics over 50 years in a New Zealand alpine cushion/tussock community, – *Journal of Vegetation Science* **16**: 227-236.
- NAGY, L. & GRABHERR, G. (2009): The biology of alpine habitats. Oxford, Oxford University Press.
- OZENDA, P. & BOREL, J. L. (1990): The possible responses of vegetation to a global climatic change. Scenarios for western Europe, with special reference to the Alps. In: BOER, M. M. & DE GROOT, R. S. (eds.) *Landscape-ecological Impact of Climatic Change. Proceedings of European Conference*, Luntern, The Netherlands. Amsterdam, IOS Press: 221-249
- PAULI, H., GOTTFRIED, M. & GRABHERR, G. (2003): The Piz Linard (3411m), the Grisons, Switzerland - Europe's Oldest Mountain Vegetation Study Site. In: NAGY L., GRABHERR G., KÖRNER C. & THOMPSON D.B.A. (eds.) *Alpine Biodiversity in Europe - A Europe-wide Assessment of Biological Richness and Change. Ecological Studies* 167, Springer, Berlin, 443-448.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., HOHENWALLNER, D., REITER, K., CASALE, R. & GRABHERR, G. (eds.) (2004): The GLORIA field manual – multi summit approach. European Commission DG Research. Luxembourg: Office for Publications of the European Community.
- PAULI, H., GOTTFRIED, M., REITER, K., KLETTNER, CH. & GRABHERR, G. (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., BENITO ALONSO, J.L., COLDEA, G., DICK, J., ERSCHBAMER, B., FERNENDEZ CALZADO, R., GHOSH, D., HOLTEN, J.I., KANKA, R., KAZAKIS, G., KOLLAR, J., LARSSON, P., MOISEEV, P., MOISEEV, D., MOLAU, U., MOLERO MESA, J., NAGY, L., PELINO, G., PUSCAS, M., ROSSI, G., STANISCI, A., SYVERHUSE, A.O., THEURILLAT, J.-P., TOMASELLI, M., UNTERLUGGAUER, P., VILLAR, L., VITTOZ, P. & GRABHERR, G. (2012): Recent Plant Diversity Changes on Europe's Mountain Summits. – *Science* **336**: 353-355.
- PICKERING, C., HILL, W. & GREEN, K. (2008): Vascular plant diversity and climate change in the alpine zone of the Snowy Mountains, Australia. – *Biodiversity and Conservation* **17**: 1627-1644.
- RANDIN, C. F., ENGLER, R., NORMAND, S., ZAPPA, M., ZIMMERMANN, N. E., PEARMAN, P. B., VITTOZ, P., THUILLER, W. & GUIAN, A. (2009): Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. – *Global Change Biology* **15**:1557-1569.
- SCHERRER, D. & KÖRNER, CH. (2010): Topographically controlled thermal – habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming. – *Journal of Biogeography* doi:10.1111/J1365-2699.2010.02407.x
- SOLOMON, A.M. & SHUGART, H. (eds.)(1993): Vegetation dynamics and global change. New York, Chapman Hall.
- STEINGER, T., KÖRNER, CH. & SCHMID, B. (1996): Long-term persistence in a changing climate: DNA analysis suggests very old ages of clones of alpine *Carex curvula*. – *Oecologia* **105**:94-99.
- THEURILLAT, J.P. & GUIAN, A. (2001): Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. – *Climate Change* **50**: 77-109.
- THUILLER, W., LAVOREL, S., ARAUJO, M.B., SYKES, M & PRENTICE, I. (2005) : Climate change threats to plant diversity in Europe. – *PNAS* **102**: 6245-8250.

- VIRTANEN, R., ESKELINEN, A. & GAARE, E. (2003): Long-term changes in alpine plant communities in Norway and Finland. In: NAGY, L., GRABHERR, G., KÖRNER, CH. & THOMPSON, D. B. A. (eds.). *Alpine biodiversity in Europe*. Ecological Studies 167. Berlin, Springer: 411-422.
- VITTOZ, P., BODIN, J., UNGRICHT, S., BURGA, C. A. & WALTHER, G.-R. (2008): One century of vegetation change on Isla Persa, a nunatak in the Bernina massif in the Swiss Alps. – *Journal of Vegetation Science* **19**:671-589.
- VITTOZ, P., RANDIN, C., DUTOIT, A., BONNETS, F. & HEGG, O. (2009): Low impact of climate change on subalpine grasslands in the Swiss Northern Alps. – *Global Change Biology* **15**: 209-220.
- WALTHER, G.-R., BEISSNER, S. & BURGA, C. A. (2005): Trends in the upward shift of alpine plants. – *Journal of Vegetation Science* **16/5**: 541-548.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. Georg Grabherr, Dr. Gottfried Michael, CVL, Universität Wien, Rennweg 14, A-1030 Wien

Dr. Harald Pauli, Inst für Gebirgsforschung, Österr. Akademie Wiss., Rennweg 14, A-1030 Wien

eMail:

georg.grabherr@univie.ac.at

michael.gottfried@univie.ac.at

harad.pauli@univie.ac.at

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Berichte der Reinhold-Tüxen-Gesellschaft](#)

Jahr/Year: 2012

Band/Volume: [24](#)

Autor(en)/Author(s): Grabherr Georg, Gottfried Michael, Pauli Harald

Artikel/Article: [Das GLORIA-Monitoring-Netzwerk zum Klima- und Vegetationswandel in den Hochgebirgen 77-87](#)