Zeitschrift: Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft Bern

Herausgeber: Geographische Gesellschaft Bern

Band: 61 (2003)

Artikel: Abiotische und biotische Dynamik in Gebigräumen : Status quo und Zukunftsperspektiven : eine Einführung

Autor: Burga, Conradin A. / Haeberli, Wilfried / Krummenacher, Bernhard

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-960311

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

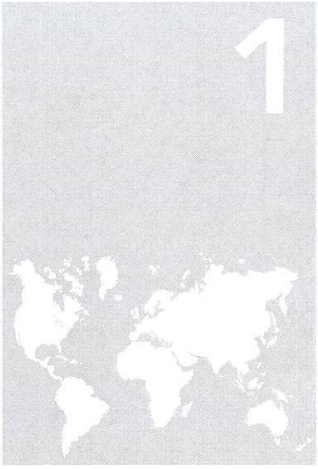
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 05.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Abiotische und biotische Dynamik in Gebirgräumen – Status quo und Zukunftsperspektiven

EINE EINFÜHRUNG



CONRADIN A. BURGA, WILFRIED HAEBERLI,
BERNHARD KRUMMENACHER, GIAN-RETO WALTHER

1 Abiotische Dynamik

1.1 Gebirge als ökologisch sensitive Regionen

Das Kapitel 13 «Managing Fragile Ecosystems: Sustainable Mountain Development» der Agenda 21 ist den Gebirgs-Ökosystemen gewidmet, insbesondere deren Wälder und Bevölkerung. Darin werden nachhaltige Entwicklungskonzepte auf allen räumlichen Massstabsebenen, Naturschutz, Problem-Wahrnehmung, Monitoring, Kommunikation zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Bevölkerung sowie die sozio-kulturellen Dimensionen diskutiert. Von der natürlichen und anthropogenen Klimadynamik sind in der Regel Ökosysteme und sozio-kulturelle Bereiche direkt oder indirekt betroffen.

Das Buch «Mountains of the World» (MESSERLI & IVES 1997), ein Beitrag zu Kapitel 13 der Agenda 21 sozusagen als «Manifest» zu den Gebirgen der Erde, vermittelt einerseits einen Überblick zu den Gebirgsökosystemen, deren Ressourcen, Umweltrisiken und Verknüpfung mit Klimaänderungen; andererseits werden die sozio-kulturellen Aspekte der Gebirgsregionen dargelegt.

Als entsprechende regionale Standortbestimmung zur aktuellen Situation in den Alpen kann der 2. ALPENREPORT (2001), herausgegeben von der Internationalen Alpenschutzkommission CIPRA, bezeichnet werden.

Gebirgsregionen, insbesondere Hochgebirge mit mindestens 1000 m Reliefenergie, sind meistens dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens ein Landschaftsgürtel durchstossen wird. Gewöhnlich weisen die verschiedenen abiotischen Umweltparameter (Meereshöhe, Klima, Morphodynamik usw.) steile Gradienten auf; zudem sind zahlreiche ökologische Nischen bzw. Kleinstandorte typisch. Aufgrund dieser steilen Gradienten und dementsprechend eng aufeinanderfolgenden zonalen Landschafts- und Vegetationsgürteln sind bei sich ändernden Umweltparametern auch entsprechende empfindliche Reaktionen im Landschafts- und Artengefüge zu erwarten.

Beruhend auf mehrjährigen Beobachtungen verschiedenster abiotischer und biotischer Umweltparameter (Einzelheiten vgl. unten) kommen die Berichte zu dieser Thematik (vgl. IPCC-BERICHT 2001a; PROCLIM-BERICHT 2002 und OCCC-BERICHT 2002) zum Schluss, dass klare Indizien bestehen zur globalen Erwärmung (Mitteltemperatur von 1880-2000 um 0.6°C; in der Schweiz von 1864-1990 um 1-1.6°C, je nach Region und Jahreszeit) sowie zur Niederschlagsverteilung und -menge (in der Schweiz Zunahme von

1901-1990 um 10-20%, je nach Region). Die letzten 50 Jahre sind durch eine hohe Häufigkeit von Klimaanomalien im warmen Temperaturbereich gekennzeichnet (vgl. BADER & KUNZ 1998), wobei sich die Vegetationsperiode seit 1951 um durchschnittlich 13.3 Tage verlängert hat. Die Reaktionen auf die globale Klimaerwärmung manifestieren sich in den verschiedenen abiotischen und biotischen Systemen der Erde bereits z.T. in dramatischer Weise (vgl. unten).

Im Alpenraum als ökologisch besonders sensitive Zone sind die Folgen des Klimawandels rascher und unmittelbarer zu erwarten bzw. machen sich bereits z.B. durch rasches Schmelzen der Gletscher, schwindenden Permafrost, zunehmende Steinschlaggefahr, grüne Winter, Vegetationswandel usw. bemerkbar. Was die natürlichen Ursachen anbelangt ist es zwar nicht das erste Mal, dass sich das Klima in den letzten 12'000 Jahren rasch änderte (BURGA & PERRET 1998). Ein besonderes Merkmal der aktuellen und zukünftigen Situation ist jedoch der stark zunehmende menschliche Einfluss auf die Umwelt und die dadurch signifikant grösseren Änderungsraten innerhalb der verschiedenen Sphären und Prozessbereiche. Nachfolgend werden verschiedene abiotische und biotische Aspekte zur aktuellen Dynamik und zu Langzeitsignalen des Alpenraums kurz dargestellt.

1.2 Schnee und Eis

Schnee und mehr oder weniger «ewiges» Eis prägen das Bild von Hochgebirgslandschaften, haben aber ganz unterschiedliche Charakteristiken und Funktionen in alpinen Ökosystemen. Nicht nur das Klima (IPCC-BERICHT 2001a) und die menschliche Aktivität, sondern auch entsprechende Grundlagen der Wissenschaft wandeln sich mit zunehmender Geschwindigkeit. Diese Beschleunigung – wahrscheinlich weit über alle uns bekannten Zustände und Geschwindigkeiten hinaus – dürfte die kommenden Jahrzehnte prägen (HAEBERLI 2002). Sie macht grundsätzliches Umdenken nötig und fordert Politik und Wissenschaft auf ganz neue Art. Der Schwund des vermeintlich «ewigen» Eises im Bereich der höchsten Berge steht da keineswegs allein, sondern ist ein besonders auffälliger Teil des sich wandelnden, komplexen, hochvernetzten und deshalb ausgesprochen störungsanfälligen Gesamtsystems.

Ein entscheidendes Merkmal von Hochgebirgsregionen ist die extreme Stauchung von Gradienten des Klimas und der entsprechenden Höhengürtel, deren Eigenart vor allem oberhalb der Waldgrenze primär von klimatischen Effekten gesteuert wird (HAEBERLI & BENISTON 1998). Mit fortschreitendem Temperaturanstieg in der Atmosphäre verschieben sich diese Höhenzonen nicht einfach, da Teil-Systeme wie «die Gletscher», «die alpinen Matten» oder «der Wald» nicht synchron reagieren. Sie werden sich aber auch nicht einfach verformen (ausdehnen/kontrahieren), da einzelne Prozesse wie «Abtrag», «Bodenbildung», «Gletscherschmelze» oder «Wärmediffusion im tieferen Untergrund» innerhalb der verschiedenen Teil-Systeme mit völlig verschiedenen Geschwindigkeiten ablaufen. Das wahrscheinlichste Szenario ist daher die Entwicklung von zunehmenden Ungleichgewichten. Um mit der entsprechenden Dynamik angemessen umgehen zu können, muss eine Wissenschaft der «Ungleichgewichte» entwickelt werden. Im Hochgebirge spielen dabei die Kryosphärenkomponenten Schnee, Gletscher und Permafrost wichtige, aber sehr unterschiedliche Rollen.

Der stark von kurzfristigen Wetterabläufen abhängige Schnee ist primär ein *«nervöses Interface»* zwischen Himmel und Erde. Mit fortgesetztem atmosphärischem Temperaturanstieg könnte langfristig unten zu wenig und oben zu viel Schnee fallen (Abegg & Elsasser 1996, SLF 2000). Die letzten Jahre weisen allerdings auf die erhebliche interannuelle Variabilität der alpinen Schneeverhältnisse (Laternser & Schneebeli, in press) und die damit verbundene Unsicherheit solcher Projektionen hin. Ein *«sicherer Zeiger»* sind hingegen die Gletscher, die mit ihrer langfristigen Schwundtendenz heute in internationalen Programmen (IPCC, Global Climate Observing System; IPCC-Bericht 2001b, Cihlar et al. 1997) neben den instrumentellen Messungen der Luft- und Meeresoberflächentemperatur als natürliche Schlüsselindikatoren im komplexen Klimasystem gelten. Permafrost als der *«langfristig Unsichtbare»* reagiert ausserordentlich langsam, aber auch langanhaltend, und zudem tief im Inneren der Berge (Harris et al. 2001). Nicht nur die Beobachtung, auch allfällig notwendige Massnahmen sind hier schwierig und aufwendig. Sowohl die Gletscher wie der Permafrost hängen stark von der Entwicklung des Schnees mit ihren Unberechenbarkeiten ab. Hochauflösende Klimamodelle gekoppelt mit GIS-basierten räumlichen Simulationen für Schnee und Eis können in Zukunft die Folgen komplexer Interaktionen abschätzen helfen. Wichtigste Entscheidungsgrundlage bleibt jedoch die direkte Beobachtung in der Natur (Cihlar et al. 1997).

Etwa die Hälfte des Gletschervolumens in den Europäischen Alpen ist seit der Mitte des 19. Jahrhunderts bis zur Aufnahme der Gletscherinventare rund um die 1970er Jahre verschwunden. Allein in den letzten beiden Jahrzehnten haben die Alpengletscher wohl nochmals etwa einen Viertel des verbleibenden Gesamtvolumens eingebüsst (Haeberli, Maisch & Paul 2002) (Fig. 1). Der Permafrost in europäischen Gebirgen ist in den obersten rund 50 Metern im 20. Jahrhundert bis zu 2°C wärmer geworden (Harris et al. 2001). Den Gesetzen der Wärmediffusion folgend wird sich die entsprechende thermische Anomalie weiter in die Tiefe fortpflanzen (Fig. 2). In den kommenden Jahrzehnten könnten sich manche Gebirgsregionen der Erde weitgehend entgletschern, und im gefrorenen Untergrund könnten sich langfristige und tiefgreifende Änderungen abspielen. Ausmass und Geschwindigkeit dieser Vorgänge dürften weit jenseits historischer Erfahrung liegen. Das «Geotop Hochgebirge» ist schon jetzt ein Fenster zu ausserordentlichen Zuständen der

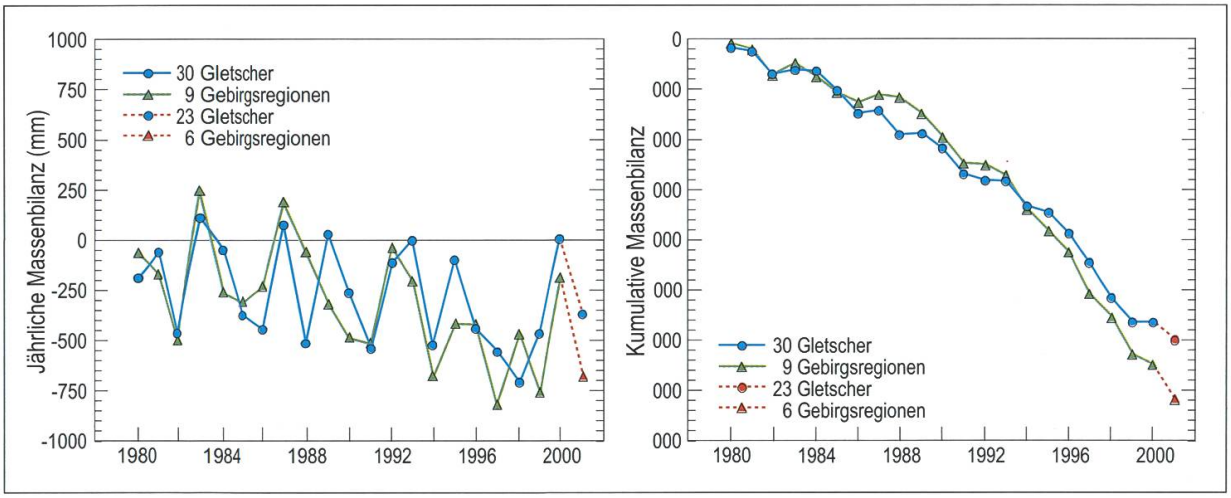


Fig. 1: Jährliche (links) und kumulative (rechts) Massenbilanzen von Gebirgsgletschern weltweit (Daten: World Glacier Monitoring Service, Universität Zürich)

jüngsten Erdgeschichte. Schon bald könnte das zunehmend entgletscherte Hochgebirge Mahnmal für die vom Menschen verursachte Klimaänderung werden.

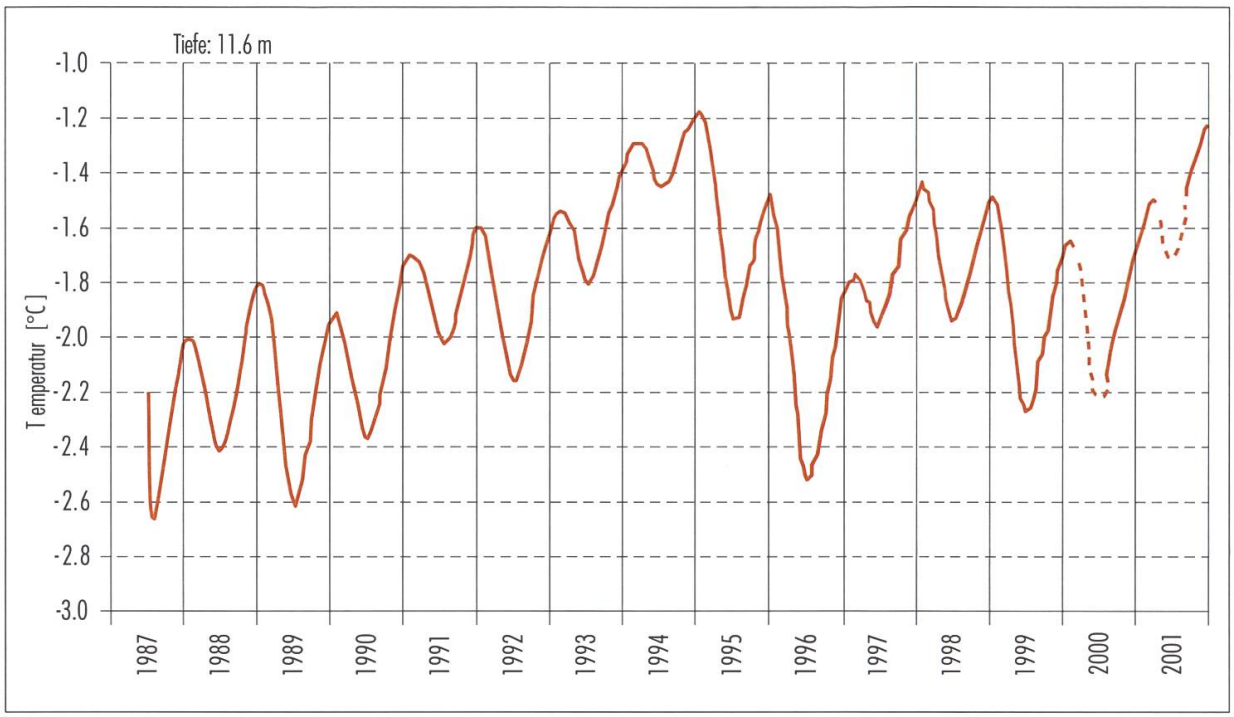


Fig. 2: Bohrlochtemperatur (11.6 m Tiefe) im Permafrost des aktiven Blockgletschers Murtel-Corvatsch, Oberengadin, Schweizer Alpen (Daten und Graphik: D. Vonder Mühll)

1.3 Naturgefahren und Risikoabschätzungen

Die Meldungen über extreme Naturereignisse scheinen sich zu häufen. Das Ausmass der Ereignisse übersteigt dabei oft die bekannten Grenzmarken der letzten Jahrzehnte oder Jahrhunderte. Dass das Schadenpotenzial und die Verletzlichkeit der Sachwerte in den vergangenen Jahrzehnten massiv zugenommen hat, bestätigen die Versicherer.

Sind die Gebirgsregionen in einem schnelleren Wandel und ist die aktuelle Dynamik aussergewöhnlich?

Überschwemmungen verwüsten oft ganze Talebenen oder gefährliche Naturprozesse wie z.B. Steinschlag oder Rutschungen treten an Orten auf, die bisher als sicher angenommen wurden. Dieser Eindruck kann bestätigt werden, da durch die immer dichter werdende Nutzung rein statistisch die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass ein Ereignis einen Schaden bewirkt und dass verbunden mit dieser intensiven Nutzung auch die Wahrnehmung und die Kommunikation über ein Naturereignis intensiver ist. Ob aber gemessen an diesem Befund der Schluss gezogen werden könnte, dass die Dynamik der Prozesse tatsächlich ansteigen würde, wäre gewagt.

Der alpine Raum zeichnet sich durch grosse Reliefenergien aus. Die gravitativen Prozesse der Wasser-, Erd- und Felsbewegungen entwickeln eine Morphodynamik, die primär durch die Beschaffenheit des Untergrundes geprägt ist. Die lithologischen und geotechnischen Eigenschaften des Untergrundes bilden dabei neben dem Niederschlag und Abfluss die Schlüsselgrössen.

Die bedeutendsten Prozesse im steilen Relief sind Steinschlag, Fels-, Eis- und Bergstürze, Rutschungen, Murgänge und Lawinen. In den Talböden beanspruchen sowohl die Ablagerungen der oben genannten Prozesse als auch Überflutungen Gebiete, die mit unseren Nutzungsräumen z. T. stark überlappen (KRUMMENACHER 1998).

Nicht zu vergessen sind die komplexen Wirkungen der Sturmwinde, die nicht nur Schutzwälder in wenigen Augenblicken zerstören können, sondern die in der Lage sind, auch Siedlungen und Infrastrukturanlagen grossflächig zu beschädigen. Oft sind mit den orkanartigen Winden auch extreme Niederschläge verbunden, die die oben genannten Prozesse auslösen und beschleunigen.

Naturereignisse laufen in der Regel so ab, dass sie unseren Lebensraum nicht beeinträchtigen, und die erstellten Schutzbauten wie Hochwasserdämme, Lawinen- und Steinschlagverbauungen usw. erfüllen ihre Wirkung. Läuft die Dynamik eines Prozesses aus unserer Sicht jedoch in ungewohnter Form ab, so können deren Auswirkungen unseren Lebensraum empfindlich stören.

Eine Änderung in der Dynamik und im Ausmass eines Prozesses ist sehr schwierig festzustellen, und zwar vor allem dann, wenn entsprechende Referenzereignisse fehlen oder nur schlecht dokumentiert sind.
Bereits jetzt verändern sich die Verhältnisse in der Natur besonders im Hochgebirge vielerorts über den historisch/holozänen Schwankungsbereich hinaus. Mit zunehmender Geschwindigkeit wächst die Entfernung von historisch-empirisch dokumentierten Zuständen der Gletscher, des Permafrostes und damit des Wasserkreislaufes oder der Stabilität steiler Hänge und Felsflanken oberhalb der Waldgrenze.

Eines der wichtigsten Instrumente zur Beurteilung der Veränderungen ist der Ereigniskataster. Früher wurden grosse Ereignisse mit ungewöhnlichem Ausmass meist in Chroniken festgehalten. Heute verfügt die Schweiz über ein einheitliches Aufzeichnungssystem, bei welchem die Kantone in einer zentralen Datenbank (StorMe) autonom alle Naturereignisse systematisch aufzeichnen können. Dieser Kataster bildet ein zentrales Element bei der Gefahren- und Risikoanalyse sowie bei deren Bewertung (BUWAL 1999).

Die wichtigste Arbeit bei der Abschätzung von möglichen Veränderungen der Dynamik bildet neben der Katasterauswertung einerseits die minutiöse Analyse der aktuellen Prozesse und andererseits die Analyse des Geländes hinsichtlich stummer Zeugen. Diese Geländeanalyse wird über den ganzen möglichen Wirkungsraum (unter extremsten Bedingungen denkbarer Prozessraum) durchgeführt und in der Karte der Phänomene mit normierten Signaturen festgehalten (KIENHOLZ & KRUMMENACHER 1995). Oft können anhand dieser Analysen Spuren von sehr weit zurückliegenden Ereignissen erkannt werden. Ein Wechsel des Blickwinkels und der Distanz (z.B. Gegenhang und Luftbild) erleichtert den Zugang zum Erkennen grosser relikter Prozessformen und den Blick für die Gesamtzusammenhänge.

Fehlen lange Aufzeichnungsreihen von Ereignissen mit unterschiedlicher Intensität und sind durch die anthropogenen Einfüsse oder durch andere Naturprozesse (z.B. glaziale Überprägung) die stummen Zeugen verwischt, können Prozesssimulationen dazu dienen, Abschätzungen über mögliche künftige Ereignisse zu skizzieren.

Der Prozessbereich Steinschlag ist ein typisches Beispiel, wo im genutzten Raum die Spuren schnell beseitigt werden. Hier sind bei einer fehlenden Ereignisdokumentation die Geländeanalysen wenig ergiebig. Das Beispiel in Figur 3 zeigt die modellierten Sturztrajektorien für verschiedene Blockgrössen. Bei Computersimulationen können durch die unterschiedliche Wahl der Modellparameter (Dämpfung und Rauhigkeit des Untergrundes und Waldbestand) verschiedene Szenarien berechnet werden (KRUMMENACHER & KEUSEN 1996). Ähnliche Simulationsmodelle existieren auch für die anderen Prozesse. Im Hochgebirge können z.B. durch Sturzprozesse Gletscherrandseen durch Flutwellen zum Überschwappen gebracht werden. In der Folge können sich in den steilen Moränenpartien Murgänge bilden, die bis in die Talebenen vordringen können. Mit Simulationsmodellen können auf der Hinweisstufe mögliche Prozessräume abgegrenzt werden (HUGGEL et al. 2002).

Im Rahmen von Gefahrenanalysen mit Szenarienstudien werden mögliche Prozessräume und die Eintretenswahrscheinlichkeiten bestimmt. Besteht, wie eingangs beschrieben, die Möglichkeit, dass der Prozessraum den Nutzungsraum beansprucht, entstehen Risiken, indem durch den gefährlichen Prozess Menschenleben oder Sachwerte zu Schaden kommen können. Die Analyse und Bewertung von Risiken bildet einen anschliessenden Schritt im modernen Gefahren- und Risikomanagement (WILHELM 1997, PLANAT 2000). Bei der Planung von Massnahmen und bei der Kommunikation der verbleibenden Restrisiken steht der Dialog mit den direkt Betroffenen im Zentrum (FREY, WILHELM & KRUMMENACHER 2001).

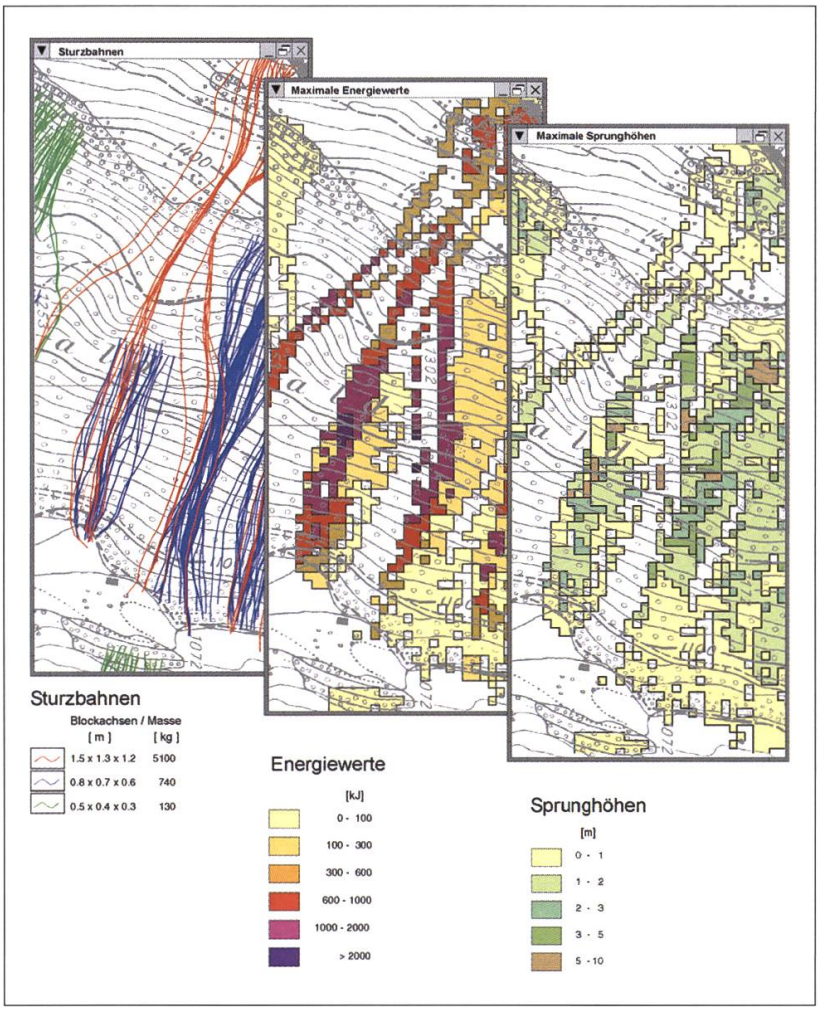


Fig. 3: Szenarienstudie Steinschlag mit Hilfe einer Prozesssimulation. Aus verschiedenen Startgebieten werden die Sturztrajektorien unterschiedlicher Blockgrössen modelliert. Für jeden Bahnpunkt können die entsprechenden Energiewerte und Sprunghöhen berechnet werden. Diese Analyse bildet den Ausgangspunkt für das nachfolgende Risikomanagement.

2 Biotische Dynamik

2.1 Wandel der Gebirgsvegetation: Aktuelle Dynamik und Langzeitsignale

Die natürlichen umweltbedingten und anthropogenen Einflüsse auf die Biosphäre manifestieren sich heute in einem sehr breiten Spektrum qualitativ und quantitativ sehr unterschiedlicher Signale (vgl. z.B. WALKER et al.1999). Diese werden auf ganz unterschiedlichen Ebenen und Skalen im Sinn eines «Biomonitoring» studiert (BURGA & KRATOCHWIL 2001; WALTHER, BURGA & EDWARDS 2001).

Nachfolgend werden beobachtete Vegetationsveränderungen vorgestellt, welche primär als Folge der globalen Erwärmung des Klimas zu sehen sind, und in Bezug zu den erwarteten Arealveränderungen aus Modellberechnungen gestellt werden.

Im Hinblick auf den Klimawandel bieten sich den Gebirgspflanzen grundsätzlich drei Möglichkeiten der Anpassung: a) Weiterbestehen am gegebenen Standort dank Anpassungsvermögen, b) Standortwechsel in ein Gebiet adäquaten Klimas oder c) regionales Aussterben. Im ersten Fall sind mehrere Anpassungsstrategien nützlich, wie graduelle genetische Adaption der Populationen, phänotypische Plastizität bzw. Nutzung ökologischer Puffer (THEURILLAT & GUISAN 2001, CHAPIN III & KÖRNER 1995). Im Zusammenhang mit den möglichen Auswirkungen der Klimaänderung auf den Alpenraum werden häufig Arealverschiebungen der einzelnen Vegetationsgürtel mit Hilfe von Computermodellen simuliert (Fig. 4).

Während solche Darstellungen auf vereinfachten Modellen beruhen, gibt es mittlerweile auch schon Indizien dafür, dass tatsächlich Vegetationsveränderungen im Zusammenhang mit der globalen Klimaerwärmung bereits eingesetzt haben. Aus dieser beobachteten Vegetationsdynamik lassen sich beispielsweise Hinweise ableiten, welche in Figur 4 als «unbekannte» angegebene Pflanzenarten sich neu in der thermocollinen Stufe ansiedeln würden (vgl. GIANONI, CARRARO & KLÖTZLI 1988; CARRARO et al. 1999; WALTHER 1999, 2000, 2002). Auch im Bereich der Alpen gibt es bereits Hinweise zu Arealverschiebungen, wobei sich in erster Linie die Beobachtung der Reaktion des Waldgrenzökotons anbietet (Allgemeines vgl. BENISTON & INNES 1998, KÖRNER 1999, BURGA & PERRET

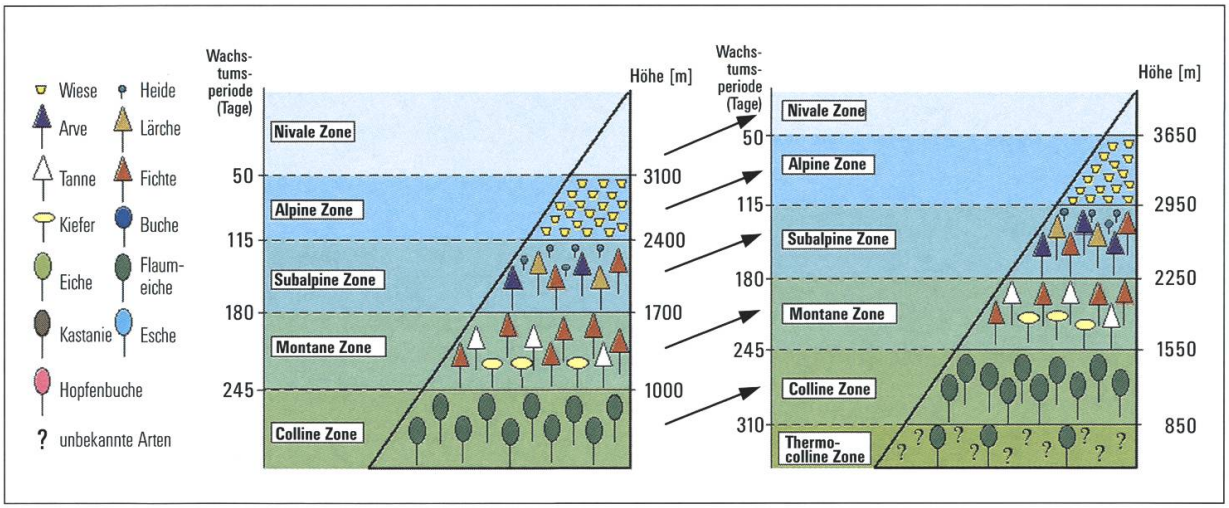


Fig. 4. Schematisierte Höhenverschiebung der Vegetationsgürtel unter Annahme einer Erwärmung um 3 K (verändert nach CLEAR 1997-2000).

2001, HOLTMEIER 2000, PAULSEN & KÖRNER 2001). Im Alpenraum und auch in den meisten anderen Gebirgen der Erde fehlen bisher schlüssige Beweise zu Baumwanderungen oder gar Wald-Arealverschiebungen, welche durch die aktuelle Klimadynamik bedingt wären. Es gibt aber auch Fälle wie den Polar-Ural, wo in den letzten 1100 Jahren ein grossräumiger klimabedingter Waldgrenzanstieg um 60-80 m nachzuweisen ist (SHIYATOV 1993). Mittels eines GIS-gestützten Regressionsmodells wurde das Verhalten von fünf waldbildenden Baumarten der Schweiz bezüglich Klimaänderungen untersucht (BOLLIGER, KIENAST & BUGMANN 2000a; BOLLIGER, KIENAST & ZIMMERMANN 2000b). Aufgrund der Modellrechnungen würden bei einer Erwärmung um 4 Wärmegrade nur bedingt und eher geringe Baumarten-Verschiebungen von der montanen zur subalpinen Stufe stattfinden; bei dieser Grössenordnung wäre somit kein signifikanter Waldgrenzanstieg in den Alpen zu erwarten. Wie die Floren-, Vegetations- und Klimageschichte der Schweiz zeigt, muss aber die Waldgrenzdynamik nicht zwingend mit Klimaänderungen gekoppelt sein (BURGA & PERRET 1998), sondern kann auf biologische Ursachen und Veränderungen am Standort (z.B. pedologische Änderungen) beruhen.

Das 1999 initiierte grossräumig angelegte Monitoring von Gipfelfloren (GLORIA 2001) hat zum Ziel, das längerfristige Verhalten von Blütenpflanzen an deren Grenzstandorten in einer zunehmend wärmeren Erdatmosphäre zu studieren. Einen ersten Hinweis für das Höherwandern von Pflanzen an deren klimatischen Obergrenze lieferte HOFER (1992). Aus dem Vergleich der Floren von 14 Gipfeln im Berninagebiet zwischen 1905 und 1985 ergab sich auf 12 Gipfeln eine Artenzunahme, eine Gipfelflora blieb unverändert, und nur in einem Fall konnte ein Artenrückgang festgestellt werden. GRABHERR, GOTTFRIED & PAULI (1994) erweiterten diesen Datensatz auf insgesamt 26 Gipfel der Zentralalpen und stellten ebenfalls eine Zunahme der Artenzahl gegenüber den historischen Aufzeichnungen fest und dokumentierten somit eine Höhenverschiebung in Hochgebirgslagen um durchschnittlich 0.5-4 m pro Dekade (GRABHERR et al. 1995; GRABHERR, GOTTFRIED & PAULI 2001; siehe auch KELLER, KIENAST & BENISTON 2000). Aus allen diesen beobachteten Veränderungen lässt sich aber auch ableiten, dass nicht mit einer geschlossenen Wanderbewegung der Vegetationsgürtel zu rechnen ist (vgl. z.B. die spät- und postglaziale Einwanderung von Arve, Fichte und Tanne in den Schweizer Alpen, BURGA & PERRET 1998), sondern dass die einzelnen beteiligten Arten individuell und unterschiedlich rasch auf Klimaänderungen, aber auch andere Einflüsse (biologische Ursachen, Standortveränderungen) reagieren können. In diesem Zusammenhang spielen auch die in den Modellen nicht berücksichtigten Eigenschaften der Pflanzen wie z.B. Reproduktionsrate, Wachstumsstrategien, genetische Variabilität, physiologische Plastizität sowie inter- oder intraspezifische Konkurrenz eine wichtige Rolle (vgl. KÖRNER 1999).

SHAW & HARTE (2001) gehen davon aus, dass Arealverschiebungen und damit einhergehende Verschiebungen im Artengefüge die ökosystemaren Prozesse stärker beeinflussen werden als dies durch direkte Effekte der rein physikalischen Erwärmung des Systems der Fall sein wird. Gleichzeitig beinhaltet eine effektive Höhenverschiebung der Vegetationszonen aber auch einen Verlust an zur Verfügung stehender Arealfläche, da diese mit zunehmender Höhe kleiner und die einzelnen Flächen voneinander isolierter werden (vgl. auch KÖRNER 1995, GRABHERR 1997, BURGA & PERRET 1998). Für die Populationen in hochalpinen Lagen muss demzufolge mit einer zunehmenden Habitat-

fragmentierung gerechnet werden (McCarthy et al. 2001). In hohen Lagen wachsende Pflanzenarten der alpinen Stufe könnten verdrängt werden und damit lokal aussterben (von ca. 400 endemischen Arten der Alpen wären etwa 100 betroffen). Im Voralpenbereich, wo nicht überall genügend hohe Gipfel für ein Höherwandern der einzelnen Arten zur Verfügung stehen, kann es unter Annahme einer fortschreitenden Klimaerwärmung auch zu Habitatverlusten der alpinen Flora kommen (vgl. oben), sofern nicht reliefbedingte Ausweichhabitate für z.B. fels- und schuttbesiedelnde Pflanzenarten zur Verfügung stehen und Existenzmöglichkeiten auch unter wärmeren Bedingungen bestehen.

Parallel zu den erwarteten und teilweise bereits ablaufenden Vegetations-Veränderungen werden auch bei der Gebirgsfauna, wie z.B. den Vögeln (D'Oleire-Oltmanns, Mingozzi & Brendel 1995, Järvinen 1995) und Säugetieren (Henttonen 1995; Inouye et al. 2000) sowie in aquatischen Ökosystemen (z.B. Byron & Goldman 1990, Sommaruga-Wograth et al. 1997) Veränderungen bzw. Anpassungen zu erwarten sein.

In aller Kürze können hier die jüngsten Entwicklungen im Alpenraum nur angedeutet werden. Es sei aber auf ausführliche Zusammenstellungen über die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Vegetation im europäischen Alpenraum (Theurillat & Guisan 2001) sowie aus globaler Perspektive (Price & Barry 1997) verwiesen. Im weiteren geben Walther et al. (2002) eine Übersicht über die bereits heute sichtbaren ökologischen Auswirkungen der Klimaänderung auf arktisch-alpine bis tropisch-terrestrische und -aquatische Ökosysteme.

3 Zusammenfassung

Ein typisches Merkmal von Hochgebirgsregionen ist die extreme Stauchung der Gradienten des Klimas und der entsprechenden Höhengürtel, deren Eigenart vor allem oberhalb der Waldgrenze primär von klimatischen Effekten gesteuert wird; zudem bestehen für die Organismen der Hochgebirge zahlreiche, sehr unterschiedliche ökologische Nischen bzw. Habitate. Aufgrund dieser steilen Gradienten und der komplizierten Kammerung ergeben sich vielfältige Standorts- und Vegetationsmosaike, welche bei sich ändernden Umweltparametern in komplexer Weise durch Veränderungen im Arten- und Bestandesgefüge reagieren können.

Schnee und Eis als charakteristische Komponenten von Hochgebirgslandschaften haben ganz unterschiedliche Charakteristiken und Funktionen in alpinen Ökosystemen. Der stark von kurzfristigen Wetterabläufen abhängige Schnee ist primär ein *«nervöses Interface»* zwischen Himmel, Erde und Mensch. Ein *«sicherer Zeiger»* sind hingegen die Gletscher, deren langfristige Schwundtendenz heute in internationalen Programmen neben den direkten Messungen als Schlüsselindikator im komplexen Klimasystem gilt. Die entsprechenden atmosphärischen Veränderungen dürften neben dem Schwund des sichtbaren und «begreifbaren» Eises an der Oberfläche auch starke Veränderungen im dauernd gefrorenen Untergrund oberhalb der Waldgrenze auslösen. Permafrost als der *«langfristig Unsichtbare»* reagiert ausserordentlich langsam aber auch langanhaltend und zudem tief im Inneren der Berge. Sowohl die Gletscher wie der Permafrost hängen allerdings stark von der Entwicklung des Schnees mit ihren Unberechenbarkeiten ab. Hoch-

auflösende Klimamodelle gekoppelt mit GIS-basierten räumlichen Simulationen für Schnee und Eis können in Zukunft die Folgen komplexer Interaktionen abschätzen helfen.

Naturereignisse laufen in der Regel so ab, dass sie unseren Lebensraum nicht beeinträchtigen, und die erstellten Schutzbauten wie Hochwasserdämme, Lawinen- und Steinschlagverbauungen usw. erfüllen ihre Aufgabe. Läuft die Dynamik eines Prozesses aus unserer Sicht jedoch in ungewohnter Form ab (Klimaänderung), so können die Wirkungsräume unseren Lebensraum empfindlich stören. Die Aufgaben im Umgang mit Naturgefahren und Risiken bestehen darin, diese Konflikte handhabbar zu machen. Da nicht alle und alles geschützt werden kann, müssen besonders in einem dicht besiedelten Gebiet, wo die Ausweichmöglichkeiten nur gering sind, die Risiken erkannt, bewertet und nach Möglichkeit beseitigt oder abgewälzt werden (Versicherungen). Ein integrales Risikomanagement beinhaltet ein Management-Konzept, welches das systematische Vorgehen in einem Kreislauf von Vorbeugung, Bewältigung und Regeneration beschreibt. Mit Hilfe des integralen Risikomanagements können die zur Verfügung stehenden Mittel und Ressourcen auf allen Handlungsebenen in vernetzter Form optimal eingesetzt werden.

Das Überschreiten bestimmter Schwellenwerte der immerwährenden abiotischen und biotischen Dynamik führte, wie dies die Paläoökologie der letzten rund 15'000 Jahre zeigt, wiederholt zu umwälzenden natürlichen Veränderungen in der Biosphäre (z.B. Jüngere Dryas, Waldgrenzschwankungen). Auf der Basis gut dokumentierter Vegetationsbeschreibungen des frühen 20. Jahrhunderts und mittels Biomonitoring lassen sich die jüngsten Änderungen im Artengefüge aufzeigen. Fallstudien von Gebirgsvegetationsveränderungen im Zusammenhang mit dem rezenten Klimawandel werden in zunehmendem Masse aus verschiedenen Erdteilen berichtet: Ein deutlicher Hinweis, dass die Gebirgsflora, aber auch -fauna auf die Klimaänderung zu reagieren beginnt. Es werden tatsächlich heute beobachtete Vegetations- und Arealveränderungen im Bereich der natürlichen Waldgrenze und auf Berggipfeln der Alpen vorgestellt, welche primär im Kontext mit der globalen Klimaänderung zu deuten und aufgrund entsprechender Modellrechnungen zu erwarten sind.

Literatur

ABEGG, B. & ELSASSER, H. 1996: Klima, Wetter und Tourismus in den Schweizer Alpen. Geographische Rundschau 12, 737-742.

ALPENREPORT 2. 2001: 2. Alpenreport. Daten, Fakten, Probleme, Lösungsansätze. CIPRA. Haupt, Bern. 434 S.

BADER, S. & KUNZ, P. 1998: Klimarisiken – Herausforderung für die Schweiz. Wissenschaftlicher Schlussbericht NFP 31. Vdf, Zürich. 307 S.

BENISTON, M. & INNES, J.L. (eds.) 1998: The Impacts of Climate Variability on Forests. Lecture Notes in Earth Science, 74. Springer, Berlin etc. 329 S.

BOLLIGER, J., KIENAST, F. & BUGMANN, H. 2000a: Comparing models for tree distributions: concepts, structures and behavior. Ecol. Model, 134, 89-102.

BOLLIGER, J., KIENAST, F. & ZIMMERMANN, N. E. 2000b: Risks of global warming on montane and subalpine forests in Switzerland – a modeling study. Reg. Environm. Change, 1, 99-111.

BURGA, C.A. & PERRET, R. 1998: Vegetation und Klima der Schweiz seit dem jüngeren Eiszeitalter. Ott – Verlag Thun, 805 S.

BURGA, C.A. & KRATOCHWIL, A. (eds.) 2001: Biomonitoring: General and applied aspects on regional and global scales. Tasks for vegetation science 35. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 242 S.

BURGA, C.A. & PERRET, R. 2001: Monitoring of Eastern and Southern Alpine timberline ecotones. In: C.A. Burga & A.Kratochwil (eds.) Biomonitoring: General and applied aspects on regional and global scales. Tasks for vegetation science 35, 179-194. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 242 S.

BUWAL, 1999: Risikoanalysen bei gravitativen Naturgefahren, Methode, Fallbeispiele und Daten; Umweltmaterialien Nr.107/I und Nr.107/II, Naturgefahren. Bern.

BYRON, E.R. & GOLDMAN, C.R. 1990: The potential effects of global warming on the primary productivity of a sub-alpine lake. Water Ressources Bulletin 26(6), 983-989.

CARRARO, G., KLÖTZLI F., WALTHER, G.-R., GIANONI, P. & MOSSI, R. 1999: Observed changes in vegetation in relation to climate warming. Schlussbericht NFP 31. vdf Hochschulverlag Zürich, 87 S.

CHAPIN III, F.S. & KÖRNER, C. 1995: Patterns, causes, changes, and consequences of biodiversity in arcitc and alpine ecosystems. In: F. Stuart Chapin III & C. Körner (eds.) Arctic and alpine biodiversity. Patterns, causes and ecosystem consequences. Ecological Studies 113, 313-320. Springer, Berlin.

CIHLAR, J., BARRY, T.G., ORTEGA GIL, E., HAEBERLI, W., KUMA, K., LANDWEHR, J.M., NORSE, D., RUNNING, S., SCHOLES, R., SOLOMON, A.M. AND ZHAO, S. 1997: GCOS/GTOS plan for terrestrial climate-related observation. GCOS 32, version 2.0, WMO/TD-796, UNEP/DEIA/TR, 97-7.

CLEAR 1997-2000: Climate and Environment in Alpine Regions. (http://proclimfm.unibe.ch/im/)

D'OLEIRE-OLTMANNS, W., MINGOZZI, T. & BRENDEL, U. 1995: Effects of climate change on birds population. In: A. Guisan, J. I. Holten, R. Spichiger, L. Tessier (eds.) Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian Mountains. Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève, 173-175.

FREY, W., WILHELM, CH. & KRUMMENACHER, B. 2001: Naturge-fahrenforschung – vom Einzelbild zur Gesamtbetrachtung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 5 (152), 199-203.

GIANONI, G, CARRARO, G. & KLÖTZLI, F. 1988: Thermophile, an laurophyllen Pflanzenarten reiche Wald gesellschaften im hyperinsubrischen Seenbereich des Tessins. Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich 54, 164-180.

GLORIA 2001: GLORIA – a Global Observation Research Initiative in Alpine Environments. The Multi-Summit Approach. Field manual. Wien. 35 S.

GRABHERR, G. 1997: The high-mountain ecosystems of the Alps. In: F.E. Wielgolaski (ed.) Polar and alpine tundra. Ecosystems of the World 3, 97-121. Elsevier, Amsterdam.

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

GRABHERR, G., GOTTFRIED, M., GRUBER, A. & PAULI, H. 1995: Patterns and current changes in alpine plant diversity. In: F. Stuart Chapin III & C. Körner (eds.) Arctic and alpine biodiversity. Patterns, causes and ecosystem consequences. Ecological Studies 113, 169-181. Springer, Berlin.

GRABHERR, G., GOTTFRIED, M. & PAULI, H. 2001: Long-term monitoring of mountain peaks in the Alps. In: C.A. Burga & A. Kratochwil (eds.) Biomonitoring: General and applied aspects on regional and global scales. Tasks for vegetation science, 35, 153-177. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. 242 S.

HAEBERLI, W. 2002: Gletscher und Permafrost im Hochgebirge – Beschleunigung zwischen Beschaulichkeit und Alp-Traum. Physische Geographie, Universität Zürich, in Vorber.

HAEBERLI, W. & BENISTON, M. 1998: Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. Ambio, 27/4, 258-265.

HAEBERLI, W., MAISCH, M. & PAUL, F. 2002: Mountain glaciers in global climate-related observation networks. WMO Bulletin, 51/1, 18-25.

HARRIS, CH., HAEBERLI, W., VONDER MUEHLL, D. & KING, L. 2001: Permafrost monitoring in the high mountains of Europe: the PACE project in its global context. Permafrost and Periglacial Processes, 12, 3-11.

HENTTONEN, H. 1995: Climate change and the ecology of alpine mammals. In: A. Guisan, J.I. Holten, R. Spichiger & L. Tessier (eds.) Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian Mountains. Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève, 75-78.

HOFER, H.R. 1992: Veränderungen in der Vegetation von 14 Gipfeln des Berninagebietes zwischen 1905 und 1985. Ber. Geobot. Inst. ETH, Stiftung Rübel, Zürich 58, 39-54.

HOLTMEIER, F.-K. 2000: Die Höhengrenze der Gebirgswälder. Arbeiten aus dem Institut für Landschaftsökologie, 8. Westfälische Wilhelms-Universität, Münster. 337 S.

HUGGEL, C., KÄÄB, A., HAEBERLI, W., TEYSSEIRE, W. & PAUL, F. 2002: Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. Canadian Geotechnical Journal, 39 (2), 316-330.

INOUYE, D.W., BARR, B., ARMITAGE, K.B. & INOUYE, B.D. 2000: Climate change is affecting altitudinal migrants and hibernating species. PNAS 97(4), 1630-1633.

IPCC-BERICHT 2001a: Climate change 2001 – synthesis report. Cambridge University Press.

IPCC-BERICHT 2001b: Climate change 2001 – the scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press.

JÄRVINEN, A. 1995: Effects of climate change on mountain bird populations. In: A. Guisan, J.I. Holten, R. Spichiger, & L. Tessier (eds.) Potential ecological impacts of climate change in the Alps and Fennoscandian Mountains. Ed. Conserv. Jard. Bot. Genève, 73-74.

KELLER, F., KIENAST, F. & BENISTON, M. 2000: Evidence of response of vegetation to environmental change on high-elevation sites in the Swiss Alps. Reg. Environ. Change 1(2), 70-77.

KIENHOLZ, H. & KRUMMENACHER, B. 1995: Symbolbaukasten zur Kartierung der Phänomene, Empfehlungen. Ausgabe 1995. Mitt. BWW, 6. BUWAL, EDMZ Nr. 320.022d, Bern.

KÖRNER, C. 1995: Alpine Plant Diversity: A global survey and functional interpretations. In: F. Stuart Chapin III & C. Körner (eds.) Arctic and alpine biodiversity. Patterns, causes and ecosystem consequences. Ecological Studies 113, 45-62. Springer, Berlin.

KÖRNER, C. 1999: Alpine Plant Life. Functional plant ecology of high mountain ecosystems. Springer, Berlin, 338 S.

KRUMMENACHER, B. & KEUSEN, H.R. 1996: Rockfallsimulation and Hazard Mapping based on Digital Terrain Model (DTM). European Geologist, 12.

KRUMMENACHER, B., In: Heinimann, H.R. et.al. 1998: Analyse und Bewertung von Naturgefahren in Gebirgsräumen, Umweltmaterialien Nr. 85, Kap. 6/8. Naturgefahren. Hrsg.: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern. 248 S.

LATERNSER, M. & SCHNEEBELI, M. (in press): Climate trends from homogeneous long-term snow data of the Swiss Alps (1931-1999). International Journal of Climatology.

MCCARTHY, J. J., CANZIANI, O. F., LEARY, N. A., DOKKEN & D. J. & WHITE, K. S. (eds.) 2001 Climate Change 2001: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, 1032 S.

MESSERLI, B. & IVES, J.D. (eds.) 1997: Mountains of the World. A Global Priority. The Parthenon Publishing Group, New York, London. 495 S.

OcCC 2002: Das Klima ändert – auch in der Schweiz. Die wichtigsten Ergebnisse des dritten Wissensstandsberichtes IPCC aus der Sicht der Schweiz. Bern. 48 S.

PAULSEN, J. & KÖRNER, C. 2001: GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggests no exposure effect. Journal of Vegetation Science, 12, 817-824.

PLANAT, 2000: Nationale Plattform Naturgefahren. Auf dem Weg zu einer Risikokultur. Tätigkeitsbericht 1997-2000 der nationalen Plattform Naturgefahren. Biel. 15 S.

PRICE, M. F. & BARRY, R. G. 1997: Climate change. In: B. Messerli. & J. D. Ives (eds.) Mountains of the World – a Global Priority, 409-445. The Parthenon Publishing Group, New York, London. 495 S.

PROCLIM- 2002: Klimaänderung 2001: Zusammenfassungen für politische Entscheidungsträger. IPCC. ProClim-, Bern. 119 S.

SHAW, M. R. & HARTE, J. 2001: Control of litter decomposition in a subalpine meadow-sagebrush steppe ecotone under climate change. Ecol. Appl. 11(4), 1206-1223.

SHIYATOV, S. 1993: The upper timberline dynamics during the last 1100 years in the Polar Ural Mountains. In: B. Frenzel (ed.) Oscillations of the Alpine and Polar Tree Limits in the Holocene. Paläoklimaforschung, 9, 195-203. Fischer Stuttgart. 234 S.

SLF 2000: Der Lawinenwinter 1999 – Ereignisanalyse. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung.

SOMMARUGA-WOGRATH, S., KOINIG, K. A., SCHMIDT, R., SOMMARUGA, R., TESSADRI, R., PSENNER, R. 1997: Temperature effects on the acidity of remote alpine lakes. Nature 387, 64-67.

THEURILLAT, J.-P. & GUISAN, A. 2001: Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. Climatic Change 50, 77-109.

WALKER, B., STEFFEN, W., CANADELL, J. & INGRAM, J. 1999: The Terrestrial Biosphere and Global Change. Internat. Geosphere-Biosphere Programme Book Series, 4. Cambridge University Press, Cambridge. 439 S.

WALTHER, G.-R. 1999: Distribution and limits of evergreen broad-leaved (laurophyllous) species in Switzerland. Bot. Helv. 109(2), 153-167.

WALTHER, G.-R. 2000: Climatic forcing on the dispersal of exotic species. Phytocoenologia 30(3-4), 409-430.

WALTHER, G.-R., BURGA, C.A. & EDWARDS, P. (eds.) 2001: «Fingerprints» of Climate Change. Adapted Behaviour and Shifting Species Ranges. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York etc. 329 S.

WALTHER, G.-R. 2002: Weakening of climatic constraints with global warming and its consequences for evergreen broad-leaved species. Folia Geobotanica 37, 129-139.

WALTHER, G.-R., POST, E., CONVEY, P., MENZEL, A., PARMESAN, C., BEEBEE, T. J. C., FROMENTIN, J.-M., HOEGH-GULDBERG, O. & BAIRLEIN, F. 2002: Ecological responses to recent climate change. Nature 416, 389-395.

WILHELM C. 1997: Wirtschaftlichkeit im Lawinenschutz – Methodik und Erhebungen zur Beurteilung von Schutzmassnahmen mittels quantitativer Risikoanalyse und ökonomischer Bewertung. Mitteilungen des Eidg. Instituts für Schnee- und Lawinenforschung Davos, 54. 309 S.

Adresse der Autoren

Prof. Dr. Conradin A. Burga, Prof. Dr. Wilfried Haeberli, Geographisches Institut der Universität Zürich, Winterthurerstrasse 190, CH-8057 Zürich

Dr. Bernhard Krummenacher, GEOTEST AG, Promenade 153, CH-7260 Davos

Dr. Gian-Reto Walther, Institut für Geobotanik der Universität Hannover, Nienburger Strasse 17, D-30167 Hannover