

Publizierbarer Endbericht

gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	SCHRANKOGEL_20YEARS
Langtitel:	<i>Warming in the cold: vascular plant and soil biota responses in the high Alps during the past 20 years</i>
Zitiervorschlag:	Pauli H., Euller K., Illmer P., Lamprecht A., Querner P., Steinbauer K., Winkler M. (2017): <i>Warming in the cold: vascular plant and soil biota responses in the high Alps during the past 20 years</i> . Austrian Climate Research Program 6 (Projekt GZ B368633), Endbericht.
Programm inkl. Jahr:	ACRP 6 th Call for Proposals (2013)
Dauer:	01.04.2014 bis 31.01.2017
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	GLORIA coordination ÖAW (IGF) and BOKU (ZgWN) PD Mag. Dr. Harald Pauli
Kontaktperson Name:	PD Mag. Dr. Harald Pauli
Kontaktperson Adresse:	Silbergasse 30/3, 1180 Wien
Kontaktperson Telefon:	+43-1 47654-99140
Kontaktperson E-Mail:	harald.pauli@oeaw.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Partner 1: Universität Innsbruck, Institut für Mikrobiologie (Prof. Mag. Dr. Paul Illmer), Tirol Partner 2: Universität für Bodenkultur Wien, Department für Integrative Biologie und Biodiversitätsforschung (Dr. Pascal Querner), Wien
Schlagwörter:	Langzeitbeobachtung, Klimawandel, Hochgebirge, Biodiversität, Vegetation, Boden-Mikrobiologie, Arthropoden, Höhengradient, Klimawandel-Indikatoren
Projektgesamtkosten:	403550,00 €
Fördersumme:	268743,00 €
Klimafonds-Nr:	KR13AC6K11076 (Projekt GZ B368633)
Erstellt am:	29.04.2017

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

In Folge des Klimawandels wird sich die Zusammensetzung der Biosphäre global und unabhängig von der Entfernung zu den anthropogenen Aktivitätszentren ändern. Hochgebirge liefern ein ideales ‚Modellsystem‘ für die Abschätzung klimainduzierter Biodiversitätsveränderungen, denn sie zeigen eine Verbreitung kälte-determinierter Lebensräume über alle Klimazonen. In Verbindung mit dem weltweiten Langzeit-Monitoringprogramm GLORIA (www.gloria.ac.at) fokussiert dieses Projekt auf Veränderungen der Vorkommensmuster und der Artenzusammensetzung von Pflanzenarten und Vegetation der Hochlagen in den tiroler Zentralalpen. Darüber hinaus werden die Verbreitungsmuster unterschiedlicher Organismengruppen von der alpinen Rasenstufe bis über die Obergrenzen der Vegetation in der Nivalstufe vergleichend untersucht. Das Projekt basiert auf der größten alpin-nivalen Monitoringstation der Alpen (Schrankogel; Teil der LTSER Plattform ‚Tyrolean Alps‘), die 1994 initiiert wurde.

Das Projekt ist fokussiert auf

- die Feststellung von Größenordnung und Geschwindigkeit von Neubesiedlung und Artenschwund von Hochgebirgspflanzen und die Transformation der Vegetationszusammensetzung;
- Indikatoren, die gerichtete Veränderungen in Zusammenhang mit dem Klimawandel anzeigen;
- die Untersuchung von mikrobiellen Organismengruppen in Böden entlang des alpin-nivalen Höhengradienten;
- vergleichende Untersuchungen von Verbreitungsmustern unterschiedlicher Organismengruppen (Bodenmikroben, Boden- und Oberflächen-Mesofauna) mit der Verteilung der Vegetation;
- die Diskussion der Konsequenzen der beobachteten Klimafolgeneffekte für die Persistenz der Biodiversität im Hochgebirge.

Zwei weitere Schwerpunkte entstanden während des Projektverlaufs:

- Untersuchung der Beobachtbarvariabilität bei der Vegetationserhebung im Vergleich mit der zeitlichen Veränderung über zwei Dekaden;
- Untersuchung der mikrobiellen Diversitätsmuster in der Wurzelzone einer extremen Hochlagen-Pflanzenart entlang ihres gesamten vertikalen Verbreitungsgradienten.

Die Methodik entsprach der aktuellen, international üblichen Vorgangsweise bei Felderhebungen, mikrobiellen Analysen und der Bestimmung der Arthropodenfauna sowie den aktuellen Standard für statistische Analysen.

Hauptergebnisse

- Die Artenvielfalt der Gefäßpflanzen hatte über die Beobachtungsperiode von 20 Jahren zugenommen, allerdings etwas langsamer während der 2. Dekade, bedingt durch einen leichten Rückgang der Neubesiedlung, bei gleichzeitig markanter Zunahme von Artenverlusten in den Dauerbeobachtungsflächen.
- Die Artenzusammensetzung der Vegetation zeigte eine gerichtete Transformation zum mehr wärmebedürftigen Arten, sowie von an trockenere Verhältnisse angepasste Vegetation. Beide Prozesse zeigten eine signifikante Beschleunigung in der zweiten Dekade.
- Extreme (subnival-nivale) Hochlagenarten zeigten den stärksten Rückgang der Artdeckungswerte und der Vorkommenshäufigkeit in den Dauerflächen.

- Neuansiedlung erfolgte überwiegend durch Arten mit Verbreitungsschwerpunkt in der Alpinstufe.
- Die Variabilität zwischen BeobachterInnen war signifikant geringer als die zeitlichen Veränderungen der Artenzahl und der Artdeckungen.
- Die mikrobielle Aktivität nahm entlang der Höhengradienten ab; es zeigte sich aber eine auffällige Abundanz von methanproduzierenden Mikroorganismen in kalten, aber von Pflanzen besiedelten Böden.
- Arthropoden in Polsterpflanzen zeigten für Collembola (Springschwänze) eine auffällig höhere Individuen- und Artenzahlen bei einer sich ausdehnenden Polsterpflanzenart als bei einer rückgängigen Art. Dies was bei den Oribatida (Hornmilben) nicht der Fall.
- Collembola zeigen signifikante Abweichungen in der Individuen- und Artenzahl von den Pflanzenmustern, während andere Organismengruppen vegetationsnahe Muster aufwiesen, mit der höchsten Übereinstimmung bei Spinnen und Bodenkäfern.

Die wichtigsten Schlussfolgerungen

- Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Bestätigung von Modelling-Prognosen zu Artenrückgang und Änderung der Zusammensetzung und darüber hinaus erstmalig auch eine Beschleunigung des Artenrückgangs, der Thermophilisierung sowie der Verschiebung zu mehr an trockene Verhältnisse angepasste Arten in der Hochlagenvegetation.
- Der damit konsistente Schwund der stärker kälteangepassten Arten ist hinsichtlich des limitierten Areal für Ersatzhabitats kritisch.
- Die beobachteten Veränderungen deuten mit großer Wahrscheinlichkeit auf fortschreitende Effekte eines wärmeren Temperaturregimes hin.
- Neben der erwarteten Übereinstimmung der Vorkommen von Boden-Mikroorganismen und Vegetation, ist der deutliche Vorkommensnachweis von methanproduzierenden Mikroorganismen in kalten aber pflanzenbewachsen Böden zu beachten, speziell hinsichtlich der großen Gebiete mit sich ändernden Boden und Vegetationsverhältnissen in den sich rasch erwärmenden hohen Breiten des Nordens.
- Unsere Resultate zeigen auch erste Anhaltspunkte, in welchem Ausmaß andere, weniger erforschte Organismengruppen gleichzeitig mit Gebirgspflanzen unter klimawandelinduzierten Druck geraten können, speziell die eng an Vegetation gebundenen Spinnen und Bodenkäfer, wo hingegen Collembola auch noch in Extremlagen ohne Gefäßpflanzen das Auslangen finden.
- Unsere Studie weist deshalb auch auf den indikatorischen Wert von Gefäßpflanzen als Proxy für Arten aus sehr viel schwieriger zu erfassenden Organismengruppen hin.

Zukunftsperspektiven

Unsere Befunde kommen zwar nur von einem, wenn auch prominenten Standort in den Hochalpen, zeigen aber deutlich den Bedarf einer massiven Intensivierung von Langzeit-Forschung im Kontext von Klimawandel und Biodiversität. Am dringlichsten sind Comittments zur Unterstützung des Betriebs bestehender Monitoringstandorte in Hochgebirgsregionen auf nationaler und internationaler Ebene. Gleichzeitig ist Capacity Building für die junge Generation und der Lückenschluss in stark unterrepräsentierten Regionen von eminenter Bedeutung. Darüber hinaus sind Monitoringansätze neben Pflanzen auch auf andere Organismengruppen auszubauen, soweit ExpertInnen vorhanden sind. Parallel dazu sind die Messung und Kompilierung klimasensibler funktioneller Pflanzenmerkmale für alle Arten der Beobachtungsstationen sowie der Datenaustausch über internationale Datenbanken prioritäre Aufgabefelder. In Verbindung mit diesen Erfordernissen für Langzeitbeobachtung und Forschung sind unsere Befunde von Relevanz für die Umwelt- und Naturschutzpolitik sowie für das künftige Design und Management von Naturschutzgebieten.

2 Executive Summary

Climate change will alter the composition of the biosphere globally and irrespectively of the distance to centres of human presence and activity. For the natural or near-natural part of the biosphere, mountain environments and their ecosystems provide a highly suitable 'model system' for climate impact research through its virtually global distribution of low-temperature governed habitats and species. Connected with a global programme on long-term monitoring of mountain species (www.gloria.ac.at), this project focuses on changes in plant species occurrence, community composition and on patterns across different organism groups from the alpine grassland zone to the limits of high mountain vegetation in the nival zone. It is based on the largest alpine-nival monitoring setting in the Alps (Schrankogel, part of the LTSER platform Tyrolean Alps), which was initiated in the year 1994.

The project targeted on

- detecting the magnitude as well as the pace of colonisations and disappearances of high mountain plant species and the transformation of the community composition;
- detecting if observed changes resulted in directional shifts which can be attributed to recent climate change;
- determining abundance patterns of different soil microbial organism groups along an alpine-nival gradient;
- assessing if abundance/activity of soil microorganisms, and abundance and diversity of soil mesofauna and surface-dwelling arthropods are related to the occurrence of high-elevation vegetation;
- discussing in the main implications arising from observed climate change impacts for the persistence of high mountain biodiversity.

Two additional targets evolved in the course of the project:

- assessment of observer variability in vegetation recording compared to changes over time;
- microbial diversity patterns in the root-zone of an exclusively high-elevation plant species along its entire vertical distribution gradient.

The methodologies employed represent state of the art approaches in vegetation monitoring, sampling of soil for microorganisms and mesofauna, sampling of surface-dwelling arthropods, lab analysis of soil samples and arthropod species identification. Statistical analyses were conducted along the most recent standards.

Key results

- Vascular plant species richness increased across the 20-years period, but slightly slower during the recent decade, owing to a slight drop of species colonisations and a concurrent sharp increase in species disappearances from the permanent plots.
- Composition of plant communities showed a directional transformation towards more warm-demanding (i.e. thermophilisation) and drought-tolerant vegetation. Both processes were significantly stronger during the recent decade.
- High-elevation species (subnival-nival) experienced the strongest decrease in cover and presence in the plots.
- Colonising species were predominantly those centred in treeline to alpine habitats.
- Species pseudo-turnover among pairs of observers was significantly lower than turnover over time on Schrankogel; the same applies to deviations in species cover estimates among observers compared to cover changes over time.
- Microbial activities and abundance declined with elevation, but even methane-producing Archaea were strikingly abundant in cold, but vegetated high-mountain soils.

- Among soil arthropods dwelling in cushion plants, Collembola were more diverse and abundant in the expanding plant species compared to the declining one. This was not the case for Oribatida.
- Collembola abundance diversity patterns strongly deviated from that of vascular plants along an alpin-nival gradient, whereas patterns of other organism groups were more similar to that of plants, with spiders and beetles showing the highest congruence.

Main conclusions

- Our findings are novel in not only confirming model projections of plant species declines and changes in species composition, but also in showing an acceleration in species disappearances, thermophilisation and the shift towards more drought-tolerant vegetation.
- Consistently, declines on the species level were stronger in high-elevation species, where substitute habitats towards higher altitudes are limited, whereas expanding species from lower elevations are expected to exert competition pressure on cold-adapted specialist plants.
- The observed changes, thus, are most likely increasingly progressing effects of climate warming.
- The presence of soil micro-organisms was, as expected, related to the occurrence of vegetation, but the remarkable presence of methan-producing microorganism in cold alpine soils might be relevant for additions in radiative forcing gas concentration, when considering large areas of changing soil and vegetation conditions in northern latitudes.
- Our findings may provide a first indication to which extent other organism groups concurrently come under pressure with vascular plants, given that their abundance and species diversity patterns are strongly linked to the occurrence of vegetation, which especially applies to surface-dwelling spiders and beetles, whereas Collembola represent a notable exception in occurring even at unvegetated high-elevation habitats.
- Our study, therefore, may also elucidate to which extent changes of plant patterns can be used as a proxy for other organism groups which are more difficult to sample and monitor.

Outlook and summary

Even though our findings were derived from a single, though prominent site in the high Alps, they undoubtedly indicated that efforts in long-term monitoring need to be strongly intensified. Most urgently, commitments supporting the continued operation of existing permanent plot sites in high mountain regions on national and international levels are required. Concurrently, capacity building for a young generation of observers and the filling of gaps in strongly underrepresented mountain regions is of particular importance, as is the expansion of monitoring activities to non-plant organism groups, where experts are available. Further, the measurement and compilation of climate-sensitive plant functional traits for as many of the monitored species as possible, and data sharing across international data bases is an upcoming priority task. In conjunction with these demands for long-term observation and research, our findings are to be considered in environmental and conservation policies and in the design and management of protected areas.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Der Klimawandel wird die Ökosysteme der Erde und ihre Artenzusammensetzung unabhängig von deren Distanz zu menschlichen Siedlungen und Landnutzungsintensitäten beeinflussen (Pecl *et al.*, 2017). Daher ist zu erwarten, dass sowohl anthropogen stark veränderte als auch natürliche oder naturnahe Ökosysteme zunehmend von einem sich verstärkenden Klimawandel betroffen sein werden, wobei das Ausmaß der Gefährdung der Biodiversität je nach Ökosystem, Biom und Klimazone variieren kann (Sala *et al.*, 2000). Hochgebirgsökosysteme werden als besonders klimawandelsensitiv eingestuft, weil ihre Biota von niedrigen Temperaturbedingungen bestimmt werden (Thuiller *et al.*, 2005; Grabherr *et al.*, 2010; Dullinger *et al.*, 2012). Darüber hinaus sind die Verbreitungsgebiete vieler Hochgebirgsarten fragmentiert, wodurch das Risiko von Habitatsverlusten für diese Arten mit zunehmendem Klimawandel steigt (Engler *et al.*, 2011).

Langzeitmonitoring ist daher essentiell für die Erfassung klimawandelinduzierter Auswirkungen auf die Biodiversität, sowie des Ausmaßes und der Geschwindigkeit von Änderungen in Biodiversitätsmustern. Darauf wurde bereits im späten 20. Jahrhundert nachdrücklich hingewiesen (Becker & Bugmann, 2001; Walther, 2004; Pauli *et al.*, 2005). Das Forschungsprogramm GLORIA (*Global Observation Research Initiative in Alpine Environments*) wurde um die Jahrhundertwende initiiert (Grabherr *et al.*, 2010; Pauli *et al.*, 2015), um dringend benötigte Dauerbeobachtungsflächen in kältegeprägten Habitaten aller Biome der Erde zu installieren. GLORIA ist heute das einzige implementierte Klimawandelbezogene Biodiversitätsmonitoringprogramm und –netzwerk mit einem standardisierten Dauerbeobachtungsflächendesign im Hochgebirge. Es umfasst Gebirgsregionen in allen Biomen der Erde, von den Tropen bis zu den Polarregionen. Die GLORIA-Koordinationsstelle befindet sich in Österreich und wird von ÖAW (IGF) und BOKU (ZgWN) getragen.

Bereits 1994 wurde als Vorläufer von GLORIA ein Netzwerk an Dauerbeobachtungsflächen in den Alpen eingerichtet, das sich über das alpin-nivale Ökoton des Schrankogels in den Stubai Alpen in Tirol erstreckt (Gottfried *et al.*, 1998; Pauli *et al.*, 2007). Der Schrankogel, als sogenannter GLORIA master site und Teil der LTSER Plattform Tyrolean Alps, ist die größte derartige Dauerbeobachtungsstation in den Alpen und erstreckt sich von der alpinen bis zur nivalen Zone (2900-3450 m). Basierend auf diesem umfassenden Monitoringansatz befasste sich das vorliegende Projekt mit der Pflanzenartenzusammensetzung und ihre Veränderungen über zwei Dekaden, die stark durch anthropogenen Klimawandel geprägt waren. Des Weiteren wurden Verbreitungs- und Aktivitätsmuster von Bodenmikroben und Bodenmesofauna analysiert und in Beziehung zu den Vegetationsmustern gesetzt. Das zentrale Ziel dieses Projekts war die Beurteilung des Einflusses des Klimawandels auf Biodiversitätsmuster von natürlichen bis naturnahen kältegeprägten Ökosystemen. Nachdem diese Ökosysteme weitestgehend von direkter anthropogener Landnutzung unberührt sind, eignen sie sich besonders gut für ökologische Klimawandelfolgenforschung. In Kombination mit der ausgeprägten Klimasensitivität kälteadaptierter Organismen stellen die Hochlagen

der Alpen daher ein ideales Modellsystem dar, um Klimawandelfolgen auf die Biosphäre zu untersuchen.

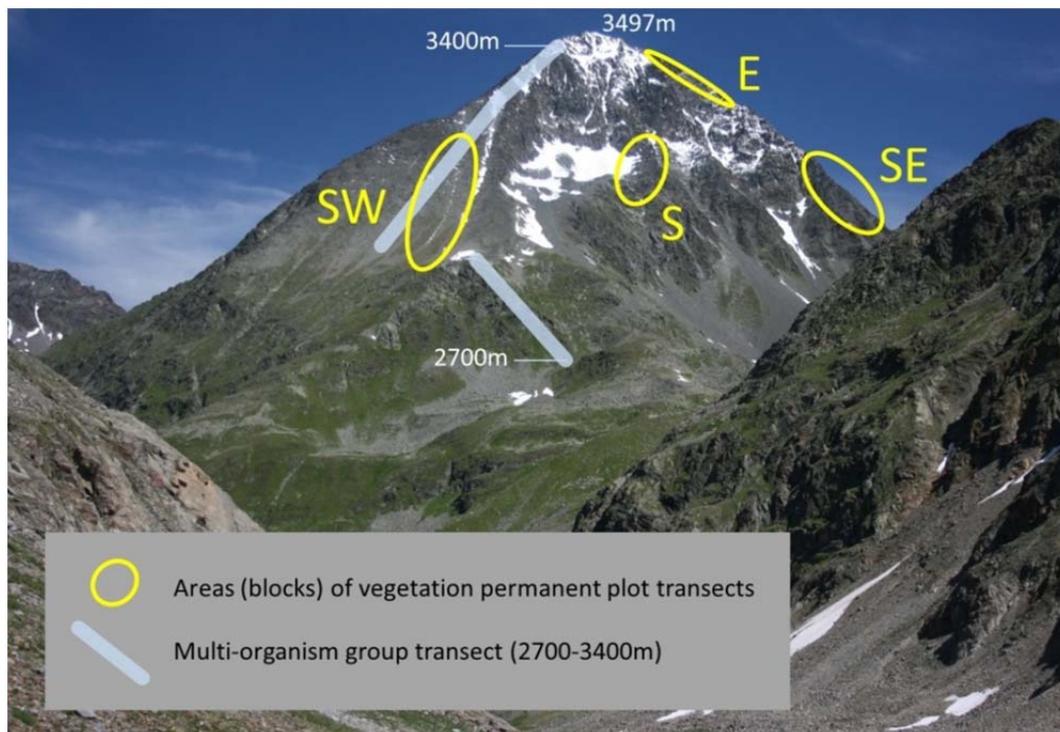


Abbildung 1: Südhang des Schrankogel mit den Positionen der Dauerbeobachtungsflächen (gelbe Kreise) und den Probetransekt für weitere Organismengruppen (graublau markierte Flächen). Der obere Bereich der grünen Rasenflächen kennzeichnet den alpin-nivalen Ökoton. Für genauere Details über das Erhebungsdesign siehe Kapitel 6 Methodik.



Abbildung 2: Vegetationsaufnahme in den Dauerbeobachtungsflächen in Transekt 7 im Süd-Block (alpin-nivales Ökoton, 3090 m Seehöhe).

Das Projekt verfolgte die folgenden Hauptfragestellungen:

- Haben sich Diversität und Artenzusammensetzung in alpinen bis nivalen Habitaten in den vergangenen 20 Jahren verändert? Waren das Ausmaß und die Geschwindigkeit dieser Veränderungen im letzten Jahrzehnt größer als im Jahrzehnt davor?
- Können Veränderungen in der Artenzusammensetzung der alpinen bis nivalen Vegetation auf den Klimawandel zurückgeführt werden?
- Zeigen evolutionäre und funktionale Gruppen von Bodenmikroben divergierende Verbreitungsmuster von der alpinen Rasenzone bis zu deren oberen Höhenverbreitungsgrenzen?
- Stehen Biodiversitäts- und Aktivitätsmuster von Bodenmikroorganismen, Bodenmesofauna und epigäischen Arthropoden in Zusammenhang mit Höhenverbreitungsmustern von Hochlagenvegetation?
- Welche Implikationen ergeben sich aus den beobachteten Klimawandelfolgen für den Fortbestand der Hochgebirgsbiodiversität?

Im Laufe des Projekts ergaben sich folgende weitere Themen:

- Beobachtungsfehler bei der Aufnahme von Pflanzenarten: Unterschiede zwischen verschiedenen KartiererInnen in der Felderhebung kann das Signal gerichteter Vegetationsveränderungen überdecken. Um diesen Kartierungsfehler in Relation zu zeitlichen Veränderungen zu quantifizieren, wurde ein Teil der Dauerbeobachtungsflächen von allen KartiererInnen unabhängig voneinander erhoben. Die daraus resultierenden Daten wurden in eine größere GLORIA-Studie zu Beobachtungsfehlern und Feldmethodeevaluierung integriert.
- Mikrobielle Diversität im Wurzelraum: Zeigen Mikrobengemeinschaften, die mit dem Wurzelsystem der stark spezialisierten subnival-nivalen Pflanzenart *Ranunculus glacialis* assoziiert sind, Unterschiede in Diversitätsmustern entlang des Höhengradienten, in dem die Pflanze vorkommt (2800-3400 m)?

4 Projektinhalt und Ergebnisse

Die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Aktivitäten werden im Folgenden anhand der Arbeitspakete (WP) dargestellt:

WP 1: Aufbau eines Feldlagers. Vegetationskartierung an extremen Standorten der alpinen bis nivalen Höhenstufe erfordert präzise Planung, den Aufbau und den Betrieb eines professionellen Feldlagers. Das Camp am Südfuß des Schrankogel wurde in 2630m Höhen errichtet und war für maximal 20 Personen ausgelegt. Die Materialanlieferung und Abtransport erfolgte helikoptergestützt. Es diente vom 1.8. bis 25.8. 2014 als Unterkunft und Verpflegungsort des Kartierungsteams und als Servicezentrum für Messgerätewartung und den ersten Schritt der Datenverarbeitung. Nach Beendigung der Feldarbeit wurde das Lager wieder komplett abgebaut.

WP 2: Vegetationsaufnahme in Dauerbeobachtungsflächen. Mit Hilfe von 16 erfahrenen KartiererInnen mit Fachkenntnissen über die alpine Flora konnte die dritte Vegetationskartierung der Dauerbeobachtungsflächen am Schrankogel wie geplant im Sommer 2014 durchgeführt werden, nachdem 1994 die Basiserhebung und 2004 die erste Wiederholungskartierung stattgefunden hatten.

WP 3: Temperaturlogger. Seit 1997 messen Mini-Datenlogger stündlich die Temperatur (an der Oberfläche und in 10cm Tiefe). Die Auslesung erfolgt kabellos, was im Rahmen dieses Projektes in den Sommermonaten 2014 und 2015 bei 71 von insgesamt 77 Loggern problemlos funktionierte. Sechs kaputte Messgeräte mussten ausgetauscht werden.

WP 4: Bodenproben und Analysen mikrobieller und bodenchemischer Parameter. Entlang eines Höhengradienten am SW-Grat des Schrankogels zwischen 2700 und fast 3500m wurden im Sommer 2014 Bodenproben entnommen und angelehnt an ein Standardprotokoll von Schinner *et al.* (1996) aufbereitet. Analytische Bodenproben von diesen Höhenlagen sind rar und die Ergebnisse daher vielversprechend. Neben Beschreibungen der mikrobiellen Organismengruppen im Hochgebirge dienen die Proben vor allem der Untersuchung der Variabilität mikrobieller Aktivität und verschiedener bodenchemischer Parameter in unterschiedlichen Höhen.

WP 5: Sammeln und Identifizieren von Arthropoden und Bodenmesofauna.

Entlang desselben Höhengradienten wurden Anfang August 2014 weitere Bodenproben entnommen, um die im Boden lebende Mesofauna (Collembola and Oribatida, i.e., Springschwänze und Hornmilben) zu sammeln, und zusätzlich Barberfallen eingegraben, um an der Oberfläche lebende Arthropoden (Springschwänze, Spinnen, Weberknechte, epigäische Käfer) zu beproben.

Zusätzliche Bodenproben wurden aus dem Zentrum und am Rand von jeweils fünf Polstern der Hochgebirgsarten *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa*.

WP 6: Dateneingabe und Aufbereitung der Vegetationsdaten.

Nachdem die Kartierungsarbeiten im Feld abgeschlossen waren, wurden die Daten von den KartiererInnen in ein eigens dafür erstelltes Datenbank-Eingabetool eingegeben. Diese Daten wurden von der GLORIA Koordinationsstelle zusammengeführt und auf Konsistenz überprüft. Die Temperaturdaten wurden in die GLORIA Temperaturdatenbank übertragen.

WP 7: Analyse der Vegetationsdaten und der Daten einzelner Pflanzenarten.

Die Vegetationsdaten von drei Untersuchungsjahren (1994, 2004 und 2014) wurden für folgende Analysen herangezogen:

- (1) Ausmaß und Geschwindigkeit von Transformationen der Pflanzengesellschaften der Hochlagen
- (2) Artspezifische Veränderungen über 20 Jahre, mit besonderem Augenmerk auf die Unterschiede in den zwei Dekaden
- (3) Beurteilung der Variabilität zwischen den BeobachterInnen (als Zusatz zu den in diesem Projekt geplanten Fragestellungen, siehe 6.5.1)
- (4) Veränderungen der Polsterpflanzen *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* in Größe und Populationsdynamik

Im Folgenden werden die Projektergebnisse anhand der daraus resultierenden Publikationen dargestellt:

Ad **(1)** *Lamprecht et al. Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps*; in Begutachtung.

→ Die Anzahl der Gefäßpflanzenarten pro Dauerbeobachtungsfläche hat innerhalb von 20 Jahren tendenziell zugenommen, in der zweiten Dekade jedoch in einem geringeren Ausmaß.

→ Die Anzahl an kolonisierenden Arten pro Dauerbeobachtungsfläche (i.e. Arten, die in den Flächen neu auftraten) hat pro Fläche im Mittel leicht, aber signifikant von der ersten Dekade auf die zweite Dekade abgenommen.

→ Die Anzahl an Arten, die aus den Flächen verschwunden sind, ist im Gegensatz dazu von von der ersten auf die zweite Dekade deutlich und hochsignifikant gestiegen.

→ Die Artenzusammensetzung hat sich in Richtung einer wärmebedürftigeren und trockenheitstoleranteren Vegetation entwickelt.

→ Diese Veränderung der Artenzusammensetzung (Thermophilisierung und Aridisierung) war in der zweiten Dekade signifikant stärker, die Veränderungen erfahren eine Beschleunigung.

Ad **(2)** *Steinbauer et al. Climate change induces species-specific declines and increases in the central high Alps between 1994 and 2014*, in Fertigstellung.

- Arten mit einer signifikanten Zunahme an Deckung haben vorwiegend einen alpin-subnivalen Verbreitungsschwerpunkt.
- Arten mit einer signifikanten Abnahme an Deckung haben vorwiegend einen subnivalen-nivalen Verbreitungsschwerpunkt.
- Veränderungen im Vorkommen der Arten (Präsenz/Absenz): signifikante Abnahmen gab es fast ausschließlich bei subnivalen-nivalen Arten. Im Gegensatz dazu traten Zunahmen bei Arten mit unterschiedlicher Höhenpräferenz auf, so auch bei einigen typischen Schneebodenarten.
- Das Ordinationsdiagramm der NMDS-Analyse zeigt einen positiven Zusammenhang zwischen Höhenverbreitungen der Arten und Bodenfeuchtigkeit an und eine generelle Verschiebung zu trockeneren und wärmeren Bedingungen innerhalb der untersuchten 20 Jahre.
- Kolonisierungsereignisse zwischen der ersten und der zweiten Dekade nahmen überwiegend bei Arten mit niedrigerem Verbreitungsschwerpunkt (Baumgrenze-alpin) zu. Im Vergleich dazu verschwanden Arten der Hochlagen (alpin, subnival-nival) verstärkt aus den Dauerbeobachtungsflächen.

Ad **(3)** *Futschik et al. Observer errors in alpine plant species and species cover recording in 1m² quadrats*; in Fertigstellung.

- Der durchschnittliche Pseudo-turnover zwischen den Artenlisten zweier KartiererInnen am Schrankogel lag bei 0.053 ± 0.012 (Mittelwert \pm Standardabweichung).
- Der zeitliche Turnover zwischen 1994 und 2014 lag in denselben Dauerbeobachtungsflächen bei 0.191. Der zeitliche Turnover war statistisch hochsignifikant größer als der Pseudo-Artenwechsel, es kann also von einem echten Turnover ausgegangen werden.
- Abweichungen in den Deckungsschätzungen der KartiererInnen lagen bei 0.049 ± 0.019 (Mittelwert \pm Standardabweichung). Die durchschnittliche Änderung der Deckungen der Arten zwischen 1994 und 2014 lag bei 0.083 und war damit signifikant höher, als die Schätzungsabweichungen der KartiererInnen untereinander.

Ad **(4)** *Veränderungen der Polsterpflanzen *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* in Größe und Populationsdynamik*.

- Die Daten werden derzeit im Rahmen einer Masterarbeit (Claudia Bergero, Universität für Bodenkultur) bearbeitet und analysiert. Die Ergebnisse sollen im Herbst 2017 vorliegen.

WP 8: Analyse der Bodenmikrobiologie und Arthropoden und Vergleich aller Organismengruppen mit den Vegetationsmustern

Im Folgenden werden die Projektergebnisse der Bodenmikrobiologie und Untersuchungen der Arthropoden anhand publizierter und vorbereiteter Veröffentlichungen dargestellt:

Bodenmikrobiologie:

(1) Hofmann et al. 2016. *Methane-cycling microorganisms in soils of a high-alpine altitudinal gradient. FEMS Microbiology Ecology, 92(3).*

- Aktivität und Abundanz von Mikroorganismen nahmen mit zunehmender Höhe ab.
- Methanogene Archaea (methanproduzierende Mikroorganismen) konnten in hochalpinen, kalten Böden nachgewiesen werden. Archaea wurden jedoch vom höhenmäßigen Rückgang der Vegetation stärker beeinflusst als methanotrophe Bakterien.
- Die potentielle Methanproduktion überstieg die potentielle Methanoxidation.

(2) Hofmann et al. 2016. *Distribution of prokaryotic abundance and microbial nutrient cycling across a high-alpine altitudinal gradient in the Austrian Central Alps is affected by vegetation, temperature, and soil nutrients. Microbial Ecology, 72(3): 704-716.*

- Aktivität und Abundanz der Mikroorganismen waren in alpinen Böden signifikant höher als in Böden der nivalen Zone. Der alpin-nivale Ökoton repräsentierte diesbezüglich eine intermediäre Übergangszone, was die Bedeutung des Vorhandenseins von Vegetation betont.
- Die Abundanz der methanproduzierenden Archaea zeigte eine stärkere Abnahme, was auf eine sensible Reaktion auf raue Umweltbedingungen schließen lässt.
- Kohlenstoff- und Stickstoffkonzentrationen im Boden konnten den Großteil der Varianz in der Aktivität von Enzymen erklären, welche an Kreisläufen von C, N, P und S beteiligt sind.

Mesofauna (Arthropoden):

(3) Fischer et al. 2016. *Ceratozetes spitsbergensis Thor, 1934: an Arctic mite new to continental Europe (Acari: Oribatida). Journal of Acarology, 42(2).*

- Diese Publikation beschreibt die Erstentdeckung der Hornmilbenart *Ceratozetes spitsbergensis* (Oribatida) außerhalb der Arktis. Die Art wurde ausschließlich in Höhen von 3300m am SW-Hang des Schrankogels gefunden.

(4) Querner et al. 2017. *Effect of climate change on high-alpine cushion plants and soil fauna (Collembola and Oribatida) in the Austrian Alps; in Fertigstellung.*

- Die Individuenzahlen von Collembolen waren in *Silene exscapa* (eine Polsterpflanze die im Untersuchungsgebiet zunimmt) höher als in *Saxifraga bryoides* (eine Polsterpflanze die im Untersuchungsgebiet abnimmt).

→ Die Collembolen-Diversität war in *Silene exscapa* ebenfalls signifikant höher als in *Saxifraga bryoides*.

→ Im Gegensatz dazu zeigten Oribatida keine signifikanten Unterschiede in Abundanz oder Diversität zwischen den beiden Polsterpflanzen.

Vergleich aller Organismengruppen mit den Vegetationsmustern

(1) Winkler et al. *Side by side? Vascular plant, invertebrate and microorganism distribution patterns along an alpine to nival elevation gradient*; in Fertigstellung.

→ Seehöhe hatte einen signifikanten Effekt auf die Abundanz von Archaeen, Bakterien und Spinnen, aber nicht auf die Abundanz von Collembola und Oribatida.

→ Die Abundanz von Collembolen und Oribatiden zeigte signifikante Abweichungen von den Abundanzmustern von Pflanzen entlang aller ökologischen Gradienten. Bakterien wichen von den Pflanzenmustern nur entlang des Höhengradienten ab. Alle anderen Organismengruppen zeigten dieselben Muster wie Pflanzen.

→ Seehöhe hatte einen signifikanten Effekt auf die Diversität aller Arthropodengruppen, mit Ausnahmen der Collembola, welche konstante Artenzahlen über den gesamten Gradienten zeigten. Alle ökologischen Faktoren hatten einen signifikanten Effekt auf die Diversitätsmuster der Spinnen und Käfer, aber keinen signifikanten Effekt auf die der Collembola und Oribatida.

→ Diversitätsmuster entlang aller Gradienten waren nur bei Spinnen und Pflanzen deckungsgleich, während sie zwischen Collembola und Pflanzen gegenläufig waren. Käfer und Oribatida zeigten hinsichtlich Seehöhe und Bodenfeuchtigkeit mit Pflanzen vergleichbare Diversitätsmuster.

WP 9: Dissemination.

Die im Rahmen dieses Projektes gewonnen Ergebnisse und Erkenntnisse wurden/werden begutachteten wissenschaftlichen Journalen veröffentlicht, aber auch für ein nichtwissenschaftliches Publikum dargestellt.

→ Der wissenschaftliche Output umfasst acht Studien, von denen drei bereits veröffentlicht sind, eine in Begutachtung steht und vier befinden sich im Endstadium der Vorbereitung.

→ Projektbezogene Präsentationen: 15 Präsentationen im Rahmen wissenschaftlicher Veranstaltungen, 5 Präsentationen für eine nichtwissenschaftliche Hörerschaft.

→ Newsletter und Medien: Umweltbundesamt: Newsletter 24 Klimawandelanpassung.at (042017), TV-Beitrag Bayerisches Fernsehen.

Für Details siehe unter Kapitel 8: Publikationen und Disseminierungsaktivitäten.

WP 10: Projektmanagement.

Die Projektadministration und das Projektmanagement erfolgte ohne nennenswerte Schwierigkeiten.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Schlussfolgerungen

Vegetation und Veränderungen der Artenzusammensetzungen während der letzten 20 Jahre

- Die Verfügbarkeit einer umfangreichen Einrichtung exakt verorteter Dauerbeobachtungsflächen, die über einen Zeitraum von 20 Jahren dreimal erhoben wurden, ermöglichte neue Erkenntnisse über die Dynamik klimawandelbedingter Vegetationsveränderungen.
- Wir zeigen eine Verschiebung von leicht abnehmender Neubesiedlung von Arten gegenüber einem beschleunigten Artenschwund. Dieses Rückgang bestimmter Arten aus den Beobachtungsflächen schien bislang durch die Langlebigkeit und Persistenz der meisten Hochlagenarten verzögert, setzt jetzt aber mit anhaltend starker Klimaerwärmung verstärkt ein.
- Die Zusammensetzung der Arten erfuhr eine gerichtete Änderung, die auf Thermophilisierung der Pflanzengesellschaften und eine Zunahme von Arten mit einer Präferenz für trockenere Bodenbedingungen hinweist. Beide Prozesse haben sich in der letzten Dekade beschleunigt. Der Anstieg dieser klimasensiblen Indikatoren lässt ein fortschreitendes Schwinden der Habitate für kälteangepasste Arten vermuten.
- Prozesse, die auf dem Niveau von Pflanzengesellschaften beobachtbar sind, werden durch artspezifische Reaktionen verdeutlicht: Kälteangepasste Arten der hohen Lagen zeigen sowohl Deckungs-Abnahmen als auch einen Rückgang ihrer Vorkommen in den Dauerflächen. Dies weist auf ein Zurückweichen der Arten ihrer unteren Verbreitungsgrenze hin. Insbesondere die beobachtete Beschleunigung dieses Prozesses ist in Hinblick auf die limitierte Verfügbarkeit von kalten Ersatzhabitaten kritisch zu beurteilen. Hinzu kommt der Konkurrenzdruck zunehmender Arten aus tieferen Lagen.

Bodenmikrobiologie entlang eines alpin-nivalen Gradienten

- Das Vorhandensein von methanproduzierenden Mikroorganismen (Archaea) in kalten, aber bewachsenen hochalpinen Böden lässt deren Zunahme bei expandierender Vegetation erwarten. Dies wird zwar bei der Größenordnung der Alpen von geringer Relevanz für eine Änderung des Strahlungsantriebs. Von größerer Bedeutung ist das jedoch bei Berücksichtigung großflächiger kälte-dominierten, aber sich rasch erwärmender Habitate des arktischen Raums.
- Die Abundanz von Archaea und Bakterien zeigte eine Abhängigkeit von der Temperatur sowie auch von gelöstem organischen Kohlenstoff, Bodenkohlenstoff und Stickstoff. Diese konnten einen Großteil der Varianz in der Enzymaktivität erklären. Höhere Temperaturen würden daher auch die Aktivität und Abundanz von Mikroorganismen, entweder direkt, oder indirekt, über eine Ausbreitung der alpinen Vegetation, steigern.

Boden-Mesofauna entlang des alpin-nivalen Gradienten

→ Die Boden-Mesofauna (i.e., die Mikroarthropoden Collembola und Oribatida) zählen, sind wenig bekannte Organismengruppen, die jedoch ökologisch eine sehr wichtige Rolle als Zersetzer (Destruenten) in alpinen Böden einnehmen, wo sie in großen Individuenzahlen und beträchtlicher Diversität vorkommen.

→ Eine für die Alpen neu entdeckte Oribatida-Art war bislang nur aus der Arktis bekannt. Dies deutet darauf hin, dass die Art in den unvergletscherten Hochlagen während und nach dem Pleistozän überdauert hat. Gleichzeitig zeigt dieser, neben weiteren Neufunden, den unbefriedigenden Kenntnisstand, der in einer extrem begrenzten Zahl von ExpertInnen und von Förderungsmöglichkeiten begründet liegt.

→ Die gegensätzlichen Muster in Abundanz und Diversität zwischen Collembolen und Oribatiden in zwei kontrastierenden Polsterpflanzenarten (eine Art, deren Deckung zunimmt und eine Art, deren Deckung abnimmt) lassen nicht nur eine hohe Habitatspezifität vermuten, sondern verweisen auch eine hohe Sensitivität gegenüber Veränderungen der Artenzusammensetzung der Vegetation.

Vergleich aller Organismengruppen mit den Vegetationsmustern

→ Unsere Ergebnisse könnten erste Hinweise liefern, inwieweit auch andere Organismengruppen gleichzeitig mit Gefäßpflanzen einem zunehmenden Druck durch einen voranschreitenden Klimawandel ausgesetzt sind.

→ Analysen über mehrere Organismengruppen entlang eines klimatischen Gradienten könnten helfen, das Risiko und die Größenordnung des Biodiversitätsverlustes für das gesamte Ökosystem abzuschätzen.

→ Unsere Studie verdeutlicht ebenfalls, inwieweit Muster der Gefäßpflanzen stellvertretend für andere Organismengruppen herangezogen werden können, die wesentlich schwieriger zu erheben sind. Das gilt vor allem für Spinnen, in geringerem Umfang auch für Käfer und Oribatiden, aber auch für Mikroorganismen.

→ Collembolen zeigten eine auffällige Abweichung von den Mustern der Gefäßpflanzen, mit hoher Abundanz und Diversität auch in den vegetationslosen Hochlagen. Dies veranschaulicht, dass Persistenz auch in Abwesenheit von Primärproduzenten möglich ist, z.B. durch Nährstoffeintrag von weiter entfernten Quellen, wie es auch von Collembola-Arten auf Gletscher- und Schneeoberflächen bekannt ist. Unsere Detailstudie zeigt jedoch auch die Spezifität der Zusammensetzungen von Collembola-Gemeinschaften auf Pflanzenarten und deren Veränderung.

Zukunftsperspektiven

Unsere Ergebnisse deuten in keiner Weise auf eine Abschwächung der Effekte des Klimawandels auf die Biodiversität in Hochgebirgen hin. Ganz im Gegenteil bestätigen sie die Modellvorhersagen von Biodiversitätsverlusten durch aktuelle, direkte Freilandbeobachtungen. Daher verdeutlichen sie den dringenden Bedarf für dauerhafte und intensiviertere Biodiversitätsforschung sowie nachhaltige Anstrengungen im Bereich der Langzeitbeobachtungen.

Ein essentieller und dringlicher Schritt liegt in der Schaffung von Verbindlichkeiten im Langzeitmonitoring und der Biodiversitätsforschung auf nationaler und internationaler Ebene, um fortlaufende Wiederholungsuntersuchungen zu gewährleisten. Dies kann kaum ausschließlich durch ökologische Forschungsprojekte abgedeckt werden.

Die Daten unserer Dauerbeobachtungsflächen sollen auch anderen Wissenschaftlern über existierende internationale Datenbanken zur Verfügung gestellt werden, wie etwa GrassPlot (https://www.bayceer.uni-bayreuth.de/ecoinformatics/en/grassplot/gru/html.php?id_obj=139267), European Vegetation Database (EVA; <http://euroveg.org/eva-database>) und der Alps Vegetation Database (Lenoir *et al.*, 2012).

Mit GLORIA ist ein etabliertes internationales Langzeitbeobachtungsnetzwerk bereits auf weltweiter Ebene installiert. Die im Zuge dieses Projekts erhobenen Ergebnisse werden für die internationale GLORIA-Gemeinschaft von hoher Relevanz sein, insbesondere im Kontext von Vergleichsstudien über unterschiedliche Biome und Klimazonen. Dafür sind klimasensitive funktionelle Pflanzenmerkmale von großer Bedeutung.

Demzufolge ist die Messung und Kompilierung funktioneller Merkmalsdaten für die vollständige Artengarnitur der Dauerbeobachtungsflächen eine prioritäre Aufgabe, die nicht nur die großräumige Vergleichbarkeit, sondern auch die Aussagekraft beobachteter Veränderungen sowohl für einzelnen Arten als auch für Pflanzengesellschaften stärkt.

Unsere Ergebnisse gehen weit über die Bedeutung für spezielle Hochgebirgsökosysteme hinaus, in dem sie fundamentale Änderungen in der natürlichen und naturnahen Vegetation und deren Artenzusammensetzungen indizieren. Hochgebirgssysteme sind mit ihrer Verbreitung über alle Klimazonen dabei als globales ‚Modellsystem‘ und als ‚Frühwarnsystem‘ für kritische Biodiversitätsverluste zu verstehen. Gleichzeitig sind Hochgebirge zukünftige Refugialgebiet für Arten, die eine Verschiebung ihres derzeitigen Verbreitungsareals erfahren werden. Unsere Ergebnisse sind daher weitreichend für die Biodiversitäts- und Klimafolgenforschung von Relevanz.

Die beobachteten Veränderungen und gerichteten Abnahmen von hoch spezialisierten Arten sind auch von unmittelbarer Bedeutung für künftige Naturschutzstrategien und naturschutzpolitische Zielsetzungen für Design und Management von Schutzgebieten.

Empfehlungen

Langzeitbeobachtung/Monitoring

- Commitments für die nachhaltige Unterstützung des Langzeitbetriebes existierender Monitoringstationen der Biodiversitäts-/Klimafolgenforschung sind auf nationaler und internationaler Ebene dringlich erforderlich (sehr hohe Priorität).
- Capacity building für die nachfolgende ÖkologInnen-Generation zur Aufrechterhaltung des Monitoringbetriebs einschließlich Expertise-Vermittlung für unterschiedliche Organismengruppen.
- Implementierung neuer Monitoringstationen in stark unterrepräsentierten Gebirgsregionen.
- Effektive Datenbank-Strukturen zur Absicherung der Datenverfügbarkeit über Generationen hinweg.

Forschung

- Messung und Kompilierung klimasensitiver funktioneller Pflanzenmerkmale aller Arten in den Monitoringflächen zur Stärkung des Indikatorwerts von Arten und Pflanzengesellschaften und der Aussagekraft von Vergleichen unterschiedlicher Biome und Klimazonen.
- Datenaustausch zwischen internationalen Datenbanken.
- Gezielte Projekte (etwas zu starken Veränderungen unterliegenden Schlüsselarten) zur Aufklärung ökologischer, ökophysiologischer und evolutionärer Prozesse hinter den beobachteten Veränderungen.
- Beurteilung der Dimension von Landnutzungseinflüssen im Vergleich zu Impakten des Klimawandels; am Projektstandort zwar von untergeordneter Bedeutung, in vielen Gebirgen aber durchaus relevant.

Umwelt- und Naturschutzpolitik

- Berücksichtigung und verstärkte Implementierung klimainduzierter Biodiversitätsveränderungen in die internationale Umwelt- und Naturschutzpolitik.
- Berücksichtigung von Arealverschiebungen und Transformation Habitaten und Ökosystemen für das künftige Design und Management von Schutzgebieten.
- Stärkung der Zusammenarbeit und wechselseitigen Unterstützung von Schutzgebietsverwaltungen und der ökologischen Klimafolgenforschung.

C) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Vegetation

6.1.1 Vegetationsaufnahme in Dauerbeobachtungsflächen.

Im Sommer 2014 wurden am Schrankogel 661 Dauerbeobachtungsflächen (jeweils 1x1m, gruppiert in 18 Transekten innerhalb vier Blocks) zwischen 2900 und 2450m wiederholt erfasst (Abbildung 1). Die standardisierten Aufnahmen folgten der Methodenbeschreibung in Kapitel 4.1.1 des *GLORIA field manual* (Pauli *et al.*, 2015, online verfügbar unter: http://www.gloria.ac.at/methods_manual.html) und umfassten eine vollständige Liste aller vorhandenen Gefäßpflanzen pro Fläche, eine Deckungsschätzung jeder Art in Prozent, sowie die Abschätzung aller Oberflächentypen in Prozent (Vegetation, Fels, Schutt, Offener Boden, Streu).

Jede Dauerbeobachtungsfläche wurde erneut fotodokumentiert.

Für den Vergleich verschiedener Organismengruppen wurden zusätzliche Flächen kartiert, die am SW-Grat des Schrankogels den Transekt zwischen 2700 und 3400m vervollständigen sollten (siehe 6.4.1).

Für die Beurteilung einer Variabilität zwischen Beobachtern wurden zusätzlich zehn ausgewählte 1x1m- Dauerbeobachtungsflächen von jedem/jeder der involvierten KartiererInnen unabhängig voneinander erhoben (siehe 6.5.1).

6.1.2 Datenanalyse der Vegetation und einzelner Pflanzenarten.

Zur Analyse wurden Vegetationsdaten von insgesamt 20 Jahren herangezogen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Datensätze analysiert: einmal der gemeinsame Nenner aller Dauerbeobachtungsflächen aus der ersten (1994) und dritten (2014) Kartierung (*dataset-2s* mit 645 Dauerbeobachtungsflächen) und einmal der gemeinsame Nenner von allen drei Aufnahmen (1994, 2004, 2014) mit nur 355 Dauerbeobachtungsflächen (*dataset-3s*), da im Jahr 2004 eine geringere Anzahl an Flächen kartiert werden konnte.

Zudem wurden die Größenveränderungen der beiden Polsterpflanzen untersucht.

Im Folgenden sollen die einzelnen Methoden im Rahmen der jeweils daraus resultierenden Publikationen dargestellt werden:

(1) *Lamprecht et al. Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps.* In Begutachtung.

Die Analyse umfasste die Anzahl aller Gefäßpflanzen pro Dauerbeobachtungsfläche (*species richness*) und deren Veränderung, Kolonialisierungsevents durch neu etablierte Arten (*colonisations*), Verschwinden von Arten aus den Flächen (*disappearances*), sowie

qualitative Veränderungen der Pflanzengesellschaften, gemessen anhand thermischer bzw. hygri-scher Präferenzen der Arten und den über die Pflanzengemeinschaften gewichteten Mittelwerten.

Auf Grund der speziellen Anordnung der Dauerbeobachtungsflächen in Transekten, die wiederum in Blöcken (SW, S, SE, E) gruppiert sind, sowie der zeitlichen Dimension der Datenaufnahme in einem Intervall von 10 Jahren, wurden Intercept-Modelle angewandt. Alle statistischen Analysen wurden in R version 3.1.3 durchgeführt (R Core Team, 2016). Die annuellen Arten (2 von insgesamt 70 Arten) wurden aufgrund ihrer hohen inter-annuellen Variabilität aus den Datensätzen entfernt.

Für die Berechnung der geeigneten Verteilungsmuster der abhängigen Variablen *species richness*, *colonisation* und *disappearance* wurden zwei Verallgemeinerte lineare gemischte Modelle (generalized mixed effects models, GLMMs) herangezogen, einmal eine Poisson-Verteilung annehmend, einmal eine Negative Binomialverteilung, welche besser für eine große Anzahl an Nullwerten geeignet ist.

Species richness wurde als Anzahl der Arten pro Fläche und Untersuchungs-jahr berechnet und als Poisson-Verteilung mit Untersuchungs-jahr als Prädiktor analysiert. Da für die *species richness* innerhalb der Blöcke eine Overdispersion vorliegt (Parameter der Overdispersion des glmer Modells > 1.2), wurde die Funktion glmmPQL (package MASS, Venables & Ripley, 2002) verwendet.

Als *Colonisations* wurden die Arten angenommen, welche in einer bestimmten Fläche zum Zeitpunkt der Wiederholungskartierung vorgekommen sind, nicht aber in der vorhergehenden Aufnahme. *Disappearances* hingegen umfassen jene Arten, die zum Zeitpunkt der Wiederholungskartierung nicht in einer bestimmten Fläche wiedergefunden wurden, dort aber in der vorhergehenden Aufnahme vorhanden waren. Diese Anzahlen wurden mit GLMMs mit einer Negative Binomialverteilung analysiert, wobei der Typ (*colonisation* oder *disappearance*) und für *dataset-3s* auch die Dekade als Fixed-Effekt angenommen wurden.

Zur Untersuchung der gerichteten Änderungen der Pflanzengesellschaften verwendeten wir ökologische Indikatoren: Für die thermische Präferenz der Art (*thermic indicator*) wurde eine Einstufung nach ihrer Höhenverbreitung (*altitudinal rank*) herangezogen (nach Gottfried *et al.*, 2012). Der Indikator für Bodenfeuchte wurde für jede Art von Landolt *et al.* (2010) übernommen.

Die Indikatorwerte wurden nach Überprüfung der Normalverteilung mit *Untersuchungs-jahr* als Prädiktor mit einer lmer Funktion analysiert (package lme4, Bates *et al.*, 2015) und innerhalb der Pflanzengemeinschaften gewichtete ökologische Indikatorwerte für jedes Untersuchungs-jahr errechnet. Um die gerichteten Veränderungen zwischen den Jahren zu erhalten, wurden Effektgrößen als Δ Indikator berechnet. Signifikanzen wurden mit der lsmeans Funktion (multcomp package, Tukey's HSD, Hothorn *et al.*, 2008) getestet.

(2) Steinbauer et al. *Climate change induces species-specific declines and increases in the central high Alps between 1994 and 2014*. In Fertigstellung.

Diese Studie geht davon aus, dass Pflanzenarten auf rezente Klimaveränderungen unterschiedlich reagieren. Dazu werden Veränderungen der Deckungen und der Presence/Absence in Dauerbeobachtungsflächen, basierend auf Erhebungen in den Jahren 1994, 2004 und 2014 untersucht.

Für die Analyse pro Art verwendeten wir alle Dauerbeobachtungsflächen, in denen die Art zumindest in einem der drei Erhebungsjahre vorgekommen ist. Dies führte zu einem unterschiedlichen N für jedes Jahr pro Art.

Für die Deckungsdaten berechneten wir GLMMs und nahmen eine Negative Binomialverteilung an (glmer.nb, package lme4), weil in allen Fällen Null-Werte vorhanden waren. In Fällen mit Under- oder Overdispersion (dispersal Parameter unter 0.8 oder über 1.3), verwendeten wir ein glmm.PQL mit Poisson-Verteilung (glmm.PQL). Jede Art, Block (SW, S, SE, E) und Jahr Kombination (d.h. alle drei Jahre und das erste und letzte Jahr) wurden getrennt analysiert.

Die presence/absence Daten wurde mittels eines binomialen GLMMs analysiert (glmer). In Fällen mit Overdispersion wurde ein glmm.PQL verwendet.

Konfidenz Intervalle (Cis) und p-Werte wurden nach Tukeys HSD angepasst (glht). Die Tendenz jeder Art (als auch Block und Jahr Kombination) wurde anhand von Unterschieden der Mittelwerte und Cis in den unterschiedlichen Jahren definiert als (a) zunehmend (*increasing*), wenn eines der Folgejahre eine signifikante Zunahme zeigte, (b) abnehmend (*decreasing*), wenn eines der Folgejahre eine signifikante Abnahme zeigte, oder (c) neutral, wenn das Folgejahr keinen signifikanten Unterschied aufwies.

Für Arten, die in einem der Jahre nicht vorkamen, war es nicht möglich ein Modell zu erstellen, weil ein Jahr dann nur Null-Werte enthielt. Solche Arten wurden ohne statistischen Test einer Gruppe zugeordnet, aber nur wenn sie insgesamt in mehr als zehn Dauerbeobachtungsflächen vorkamen.

Die gesamte Veränderung der Artengemeinschaft und der Deckungen jeder Art in den Erhebungsjahren wurden entlang eines Feuchtigkeits- und Temperaturgradienten durch non-metric multidimensional scaling (NMDS) veranschaulicht. Dazu wurde ein Bray-Curtis Distanzmaß und 1000 Wiederholungen verwendet (package vegan, Oksanen et al., 2015). Mithilfe der Funktion ordihull wurde für jedes Jahr ein Polygon erstellt, welches Veränderungen entlang der Gradienten zwischen den Erhebungsjahren wiedergibt.

Jede Art wurde hinsichtlich ihres Verhaltens bzgl. Kolonisierung (*colonisation*) und Verschwinden (*disappearance*) pro Dauerbeobachtungsfläche und Jahr analysiert. Dazu wurde das Vorhandensein/nicht-Vorhandensein jeder Art pro Dauerbeobachtungsfläche im jeweiligen Folgejahr im Bezug zum vorhergehenden Jahr untersucht. Um Artengruppen hinsichtlich ihrer Raten der Kolonisierung und des Verschwindens zu untersuchen, verwendeten wir die bevorzugten Höhenstufen der Arten nach Gottfried et al. (2012), Landolt Zeigerwerte (Landolt et al., 2010, Feuchtigkeit), funktionelle Typen (Wuchsformen,

Ausbreitungstyp) und funktionelle Pflanzenmerkmale (*Specific leaf area*, SLA und *Plant height*, PH). Zur Analyse verwendeten wir ein glmm.PQL mit Poisson-Verteilung.

(3) Veränderungen der Polsterpflanzen *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* in Größe und Populationsdynamik

Die leichte Erkennbarkeit von Polsterpflanzen ermöglicht die Messung der Oberfläche auch auf Fotomaterial und bietet so eine Alternative zur visuellen Deckungsschätzung.

Die ausgewählten Arten *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* kommen in sehr vielen Dauerbeobachtungsflächen vor und bieten daher eine gute Grundlage für den Fotovergleichsansatz via Arc-GIS 10.2.2.

Die in diese Analyse einfließenden Flächen folgen folgenden Kriterien: (1) hochqualitative Fotos mit in allen drei Jahren sichtbarem Messband, das zur Abgrenzung der Flächen dient, sowie (2) zumindest eine der beiden Arten muss in zumindest einem der drei Untersuchungsjahren vorhanden sein.

Die Fotos werden innerhalb eines Scheinkoordinatensystems georeferenziert, indem man 0/0 für die linkere untere Ecke und 100/100 für die rechte obere Ecke angibt. Um den Abbildungsfehler zu minimieren benötigt man mindestens sechs Referenzpunkte für eine non-lineare polynomiale Transformation. Alle klar unterscheidbaren Individuen von *Silene exscapa* und *Saxifraga bryoides* werden digitalisiert, ihre Oberflächengröße gemessen und deren Fertilitätszustand (fertil/vegetativ) dokumentiert.

Um Wachstumsraten der Population sowie demographische Parameter wie Mortalität, Fertilität und Wachstum in Verbindung mit ökologischen Flächencharakteristika bringen zu können, werden Integrale Projektionsmodelle (integral projection models, IMPs; Ellner & Rees, 2006) verwendet.

Derzeit wird im Rahmen einer Masterarbeit (Claudia Bergero) an dieser Analyse gearbeitet. Ein Abschluss ist mit Sommer 2017 geplant und steht in Verbindung mit einer Publikation in einem peer-reviewed Journal.

6.2 Mikrobiologie

6.2.1 Bodenproben und Aufbereitung mikrobieller und bodenchemischer Parameter.

Am SW-Grat des Schrankogels wurden entlang eines Höhengradienten zwischen 2700 und fast 3500m in 100m-Schritten Bodenproben entnommen und angelehnt an ein Standardprotokoll von Schinner *et al.* (1996) aufbereitet:

Die Bodentrockenmasse (Soil dry mass, DM) wurde gravimetrisch gemessen, indem 10g gesiebter Boden bei 105°C über Nacht getrocknet worden ist. Die Wasserspeicherkapazität (Maximum water holding capacity, MWHC) wurde ebenfalls gravimetrisch bestimmt. Der pH Wert des Bodens wurde in 10mM CaCl₂ in einem Mischverhältnis 1:2.5 (w/v) nach zwei Stunden Inkubation bei Raumtemperatur ermittelt. Die organische Substanz (organic matter,

OM) wurde anhand des Glühverlusts bei 430°C bestimmt. Der Gesamtgehalt an Kohlenstoff (total C, Ct) und Stickstoff (Nt) wurde mithilfe eines CHN Analysers gemessen (Truspec CHN, Leco, MI, USA). Gelöster organischer Kohlenstoff (dissolved organic carbon, DOC) wurde nach Extraktion (Mischverhältnis Boden zu destilliertem Wasser 1:5 (w/v)) mithilfe eines TOC-L Analysers (Shimadzu Co, Japan) quantifiziert. NH₄⁺-N and NO₃⁻-N wurden mit 2 M KCl aus Frischboden extrahiert und anhand Photometrie bei 660 nm und 210 nm bestimmt. Der Gesamtgehalt an Phosphor (total phosphorus, Pt) wurde nach einer Extraktion mit 0.5 M NaHCO₃ und Einfärbung bei 882 nm gemessen.

DNA Extraktion, Spiking und quantitative real-time PCR (qPCR): Genomic DNA wurde von 0.25g gesiebttem und unbehandeltem Boden mithilfe eines handelsüblichen Bausatzes (NucleoSpin® Soil, Macherey-Nagel, Germany) isoliert. Die Quantifizierung der archaealen 16S rRNA Genkopien wurde an einem Corbett Life Science (Quiagen, Netherlands) Rotor-Gene Q System durchgeführt. Dabei wurden die Primer 787 F und 1059 R benutzt (nach Hofmann *et al.*, 2013). Die Gesamtanzahl aller Bakterien wurde mit Hilfe des Primerpaares 338 F und 518 R bestimmt (nach Fierer *et al.*, 2005). Zur Bestimmung der exakten Anzahl verschiedener Gruppen von Archaeen (Methanosarcinales Methanobacteriales, Methanococcales, Methanomicrobiales and Methanocellales) verwendeten wir die spiking Methode (Hofmann *et al.*, 2016).

6.2.2 Datenanalyse der mikrobiellen und bodenchemischen Parameter.

Zur statistischen Analyse der mikrobiellen und bodenchemischen Parameter wurde das Programm STATISTICA version 9 herangezogen. Zur Untersuchung eines signifikanten Einflusses von Höhengürtel (alpin, alpin-nival, nival) auf die Häufigkeit von methanogenen Archaeen und methanotrophen Bakterien, sowie auf das jeweilige Aktivitätenpotential, verwendeten wir einfache Varianzanalysen. Anhand 'Tukey's Honestly Significant Difference Test' wurden Unterschiede zwischen den Gruppen auf Signifikanzen untersucht. Weiters verwendeten wir Korrelationsanalysen, basierend auf den Pearson-Korrelationskoeffizient, um einen Überblick über die räumliche Verteilung der methanogenen und methanotrophen Abundanzen und Aktivitäten zu erhalten.

Mit Hilfe von multiplen linearen Regressionsanalysen wurden Zusammenhänge zwischen Häufigkeit und Aktivität mit möglichen Umweltfaktoren (abiotische Bodeneigenschaften und mittlere jährliche Bodentemperatur), sowie deren relativen Bedeutung untersucht.

Für weitere Details ist auf die folgenden Publikationen verwiesen:

(1) Hofmann *et al.* 2016. *Methane-cycling microorganisms in soils of a high-alpine altitudinal gradient. FEMS Microbiology Ecology*, 92(3).

(2) Hofmann *et al.* 2016. *Distribution of prokaryotic abundance and microbial nutrient cycling across a high-alpine altitudinal gradient in the Austrian Central Alps is affected by vegetation, temperature, and soil nutrients. Microbial Ecology*, 72(3): 704-716.

6.3 Arthropoden und Bodenmesofauna

6.3.1 Probennahme und Identifizieren von Arthropoden und Bodenmesofauna.

Entlang desselben Höhengradienten wie für die mikrobiologischen Untersuchungen am SW-Grat des Schrankogels wurden abermals in 100m-Schritten zwischen 2700 und fast 3500m einerseits weitere Bodenproben entnommen, um die im Boden lebende Mesofauna (Springschwänze und Hornmilben) zu sammeln, und andererseits Barberfallen eingegraben, um an der Oberfläche lebende Arthropoden (Springschwänze, Hornmilben, Spinnen, Weberknechte, epigäische Käfer) abzusammeln.

Für ersteres wurden Anfang August 2014 in jeder Höhenstufe sieben Bodenproben in Abstand von 10m zueinander entnommen. Dazu wurde ein Stahlrohr (57 x 57mm) 100mm tief in den Boden eingeführt und der entnommene Inhalt in einem Plastikbeutel aufbewahrt und bis zur Extraktion kühl gehalten. Entnahmestellen wurden innerhalb und außerhalb von Vegetation gewählt. Zusätzliche Bodenproben wurden aus dem Zentrum und am Rand der Polsterpflanzen *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* entnommen (aus jeweils fünf Polster jeder Art).

Die Proben wurden sieben Tage in gesättigter Salzlösung in einem modifizierten Berlese-Tullgren-Trichter extrahiert, Springschwänze und Hornmilben herausortiert, in 70%igem Ethanol eingelegt und auf Artniveau identifiziert.

In jeder Höhenstufe wurden des weiteren sieben Barberfallen mit je 6cm Durchmesser und einem Abstand von 10m zueinander eingegraben und mit einem Glykol-Ethanol-Gemisch (50:50), sowie einem Tropfen eines geruchlosen Reinigungsmittels gefüllt. Nach vier Wochen wurden die Barberfallen wieder eingesammelt, die enthaltenen Arthropoden in 70%igem Ethanol eingelegt und auf Artniveau identifiziert. Die Identifizierung erfolgte durch unterschiedliche ExpertInnengruppen, geleitet durch: P. Querner: Springschwänze (*Collembolen*); B.M. Fischer: Hornmilben (*Oribatiden*), und J. Schied: andere Taxa.

6.3.2 Datenanalyse der Arthropoden und Bodenmesofauna.

Bei der Identifizierung konnte ein erstaunlicher Fund gemacht werden: *Ceratozetes spitsbergensis*, eine arktischen Art nun erstmals ein Vorkommen in den Alpen dokumentiert. In der Veröffentlichung dieser Entdeckung wurden deskriptive Ansätze im Kontext einer globalen Verbreitung der Art gewählt.

Für weitere Details ist auf die folgende Publikation verwiesen:

(1) Fischer et al. 2016. *Ceratozetes spitsbergensis* Thor, 1934: an Arctic mite new to continental Europe (Acari: Oribatida). *International Journal of Acarology*, 42(2): 135-139.

Aus den Bodenproben der Polsterpflanzen *Saxifraga bryoides* und *Silene exscapa* wurden Springschwänze (*Collembolen*) und Hornmilben (*Oribatiden*) extrahiert und ihre Häufigkeiten sowie Artenanzahlen bestimmt. Die Effekte der Faktoren Pflanzenart (*S. bryoides* und *S. exscapa*), Position (innerhalb oder außerhalb der Polster) und deren Interaktionen wurden anhand allgemeiner linearer Modelle (GLMs, procedure glm() in stats 3.3.1) getestet (für die

Gesamtmasse der *Collembolen* and *Oribatiden*: "quasipoisson" family mit log link aufgrund von Overdispersion; F als Teststatistik. Für Artenanzahlen: "poisson" family mit log link; χ^2 als Teststatistik).

Der Faktor Ähnlichkeit zwischen *Collembolen* und *Oribatiden* wurden über den Einsatz von Hauptkomponentenanalysen (PCA, rda() in vegan 2.4.0) untersucht. Vor der Analyse wurden die Daten Hellinger transformiert, um den Einfluss von dominanten Arten sowie das verbreitete *double-zero-Problem* zu reduzieren und die Daten für die PCA verwendet werden können (Legendre & Legendre, 2012). Die Signifikanzen wurden mit einem vergleichbaren Analogon einer multivariaten ANOVA (adonis() in vegan, 999 permutations of a Bray-Curtis dissimilarity matrix) getestet. Alle statistischen Analysen wurden in R version 3.1.3 durchgeführt.

Ein Manuskript ist in Fertigstellung:

(2) *Querner et al. 2017. Effect of climate change on high-alpine cushion plants and soil fauna (Collembola and Oribatida) in the Austrian Alps.*

6.4 Vergleich aller Organismengruppen

In dieser Studie wurden Verbreitungsmuster von Arthropodengruppen (Diversität und Abundanz) und Mikroorganismengruppen (Abundanz) in Relation zu Vegetationsmustern (Diversität und Abundanz) und ökologischen Standorteigenschaften entlang des Höhengradienten (2700-3400 m) verglichen. Ein Manuskript mit den gemeinsamen Auswertungen ist in Fertigstellung:

Winkler et al. Side by side? Vascular plant, invertebrate and microorganism distribution patterns along an alpine to nival elevation gradient.

Dafür wurden folgende ökologische Standorteigenschaften erhoben: die aus den ökologischen Ansprüchen der Gefäßpflanzen abgeleiteten thermischen Vegetationsindices (*thermic vegetation indicator*) und Bodenfeuchteindikatoren, sowie die Bodenparameter C-Gehalt, N-Gehalt, maximales Wasserhaltevermögen, organische Substanz und pH. Die Bodenparameter wurden in WP 4 gemessen. Der thermische Vegetationsindikator basiert auf der Höhenverbreitung der Gefäßpflanzenarten und steht in engem Zusammenhang mit dem Temperaturregime eines Standorts: Temperatursummen abgeleitet aus Bodentemperaturmessungen am SW-Hang des Schrankogel zwischen 2900 und 3400 m (Schwellenwert 2°C, August 2013 – Juli 2014) waren hochkorreliert mit dem thermischen Vegetationsindikator (Pearson-Korrelation, $R^2 = 0.914$). Als Maß für die Bodenfeuchte eines Standorts wurde der Bodenfeuchteindikator nach Landolt *et al.* (2010; 1 = sehr trocken bis 4 = sehr feucht) herangezogen.

Der Einfluss von Seehöhe und ökologischen Standortcharakteristika auf Abundanz und Alpha-Diversität der Organismengruppen wurde mit Hilfe von generalisierten gemischten Modellen mit penalized quasi-likelihood Schätzung und Poisson-Verteilung (GLMMs, Funktion glmm.PQL) untersucht. Da die meisten ökologischen Standorteigenschaften mit der

Seehöhe hochkorreliert waren, wurde separat für jede Organismengruppe und für jeden ökologischen Faktor ein Modell mit dem jeweiligen Faktor als Fixed Effekt und Seehöhe als Random Effekt angepasst. Um Alphafehler-Kumulierung zu vermeiden, wurden die p-Werte mit dem von Benjamini und Hochberg (1995) vorgeschlagenen Algorithmus (R-Funktion `p.adjust`, Paket `stats`) korrigiert. Der Effekt der Seehöhe wurde mit Hilfe von linearen gemischten Modellen (LMMs, Funktion `lm`, R-Paket `stats`) getestet.

Übereinstimmungen zwischen Organismengruppen in Abundanz- und Diversitätsmustern entlang von ökologischen Gradienten wurden mit GLMMs mit ökologischen Standortfaktoren, Organismengruppe (Basislevel = Gefäßpflanzen) und deren Interaktion als Fixed Effekte und Seehöhe als Random Effekte getestet. Da die Absolutwerte der Abundanzen in den einzelnen Organismengruppen um einen Faktor von 10^9 divergierten, wurden die Werte zwischen 0 und 100 reskaliert.

Paarweise Bray-Curtis Distanzen zwischen Arten wurden mit Hilfe von nicht-metrischer multidimensionaler Skalierung (NMDS) graphisch dargestellt (Funktion `metaMDS`, R-Paket `vegan`; Oksanen *et al.*, 2015). Die Distanzen wurden mit der Funktion `vegdist` des Pakets `vegan` berechnet, wobei die Abundanzen für jede Organismengruppe separat auf Werte zwischen 0 und 1 reskaliert wurden. Ökologische Vektoren wurden mit der Funktion `envfit` (Paket `vegan`) an die Ordination angepasst.

Die beste Kombination ökologischer Standortfaktoren, die die Rangkorrelation der Euklidischen Distanzen der skalierten ökologischen Variablen mit den Bray-Curtis Gemeinschaftsdistanzen aller Gefäßpflanzen- und Tierarten maximiert, wurde mit der Funktion `bioenv` (Paket `vegan`) ermittelt. Ein Mantel-Test wurde durchgeführt, um die Korrelation zwischen den beiden o.a. Distanzmatrizen zu testen (Funktion `mantel`, R-Paket `ecodist`; Goslee & Urban, 2007).

6.5 Weitere Forschungsansätze zusätzlich zu den geplanten Aufgaben im Projektantrag.

6.5.1 Beobachterfehler (*Observer error*) bei Vegetationsaufnahmen.

Zehn der 1x1m-Dauerbeobachtungsflächen wurden von jedem/jeder der involvierten KartiererInnen erhoben (Artenlisten und Deckung). Für jede dieser Flächen sind auch historische Aufnahmen aus den Jahren 1994 und 2004 verfügbar.

Der Artenwechsel (species turnover nach Nilsson & Nilsson, 1985) wurde als Maß für den Unterschied zwischen zwei Artenlisten berechnet: $T = (A + B)/(SA + SB)$; wobei A und B die Anzahl der Arten, die ausschließlich in Aufnahme 1 bzw. 2 gefunden wurden, und SA und SB die Gesamtzahl der Arten in Aufnahme 1 bzw. 2 repräsentieren. Im Falle von zeitlichem Artenwechsel wurden die Aufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt, während beim Pseudo-Artenwechsel (pseudo-turnover) die Aufnahmen von unterschiedlichen KartiererInnen durchgeführt wurden. Der Artenwechsel kann Werte zwischen 0 (Artenlisten stimmen nicht überein) und 1 (Artenlisten stimmen völlig überein) annehmen.

Für die Artdeckungen betreffende Analysen wurden nur Datensätze (Art/Flächenkombinationen) herangezogen, die von einer Mehrheit der KartiererInnen erfasst wurden. Als beste Schätzung für den wahren Wert der Artdeckungen wurde der Mittelwert der von allen KartiererInnen geschätzten Deckungen herangezogen.

Um zu testen, ob Änderungen in der Artenzusammensetzung und von Artdeckungen im Zeitraum 1994-2014 über die durch Fehler der BeobachterInnen verursachte Variation hinausgehen, wurde ein Bootstrapping-Ansatz gewählt: für jeden Plot wurden zufällig zwei verschiedene KartiererInnen gezogen und die entsprechenden Artenwechselwerte sowie die Quadratwurzel des mittleren quadratischen Gesamtfehlers der Artdeckungen berechnet. Dieser Vorgang wurde 1000 x wiederholt, um eine Bootstrap-Verteilung der BeobachterInnenfehler zu erhalten, die anschließend in Relation zu den historischen Veränderungen gesetzt wurde. Alle statistische Analysen wurden unter Verwendung der Software R (R Core Team, 2016) durchgeführt.

Ein Manuskript ist in Fertigstellung:

Futschik et al. Observer errors in alpine plant species and species cover recording in 1m² quadrats.

6.5.2 Mikrobielle Diversitätsmuster auf den Wurzeln von *Ranunculus glacialis*.

Als zusätzlichen Ansatz wurden die mikrobiellen Gesellschaften im Wurzelraum von *Ranunculus glacialis* und *Poa laxa*, zwei Hochgebirgsspezialisten, mit Hilfe einer DGGE (Denaturing Gradient Gel Electrophoresis) untersucht.

Die vielversprechenden Ergebnisse führten zu einer zweiten Besammlung von *Ranunculus glacialis* über den gesamten Höhengradienten des SW (2088-3400m). Enthaltene Bakterien, Archaeen and Pilze sollen nun detailliert mit der Next-Generation-Sequencing-Technologie überprüft werden.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Publizierte wissenschaftliche Artikel in peer-reviewed Journalen

Fischer, BM.; Schatz, H.; Querner, P.; Pauli, H. (2016). *Ceratozetes spitsbergensis* Thor, 1934: an Arctic mite new to continental Europe (Acari: Oribatida). *International Journal of Acarology* 42(2): 135-139.

Hofmann, K.; Pauli, H.; Praeg, N.; Wagner, AO.; Illmer, P. (2016). Methane-cycling microorganisms in soils of a high-alpine altitudinal gradient. *FEMS Microbiology Ecology* 92(3).

Hofmann, K; Lamprecht, A; Pauli, H; Illmer, P (2016). Distribution of prokaryotic abundance and microbial nutrient cycling across a high-alpine altitudinal gradient in the Austrian Central Alps is affected by vegetation, temperature, and soil nutrients. *Microbial Ecology* 72(3): 704-716.

Wissenschaftliche Artikel in review in peer-reviewed Journalen

Lamprecht, A; Semenchuk, PR; Steinbauer, K; Winkler, M; Pauli, H. Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps. In Begutachtung.

Wissenschaftliche Artikel in Vorbereitung für peer-reviewed Journale

Winkler, M; Illmer, P; Querner, P; Steinbauer, K; Lamprecht, A; Fischer, BM; Schied, J; Pauli, H. Side by side? Vascular plant, invertebrate and microorganism distribution patterns along an alpine to nival elevation gradient. In Fertigstellung.

Futschik, A*; Winkler, M*; Steinbauer, K; Lamprecht, A; Rumpf, S; Gottfried, M; Pauli, H. Observer errors at alpine plant species and species cover recording in 1m² quadrats. (*equally contributing to the paper). In Fertigstellung.

Querner, P; Fischer, BM; Bruckner, A; Steinbauer, K; Pauli, H. Effect of climate change on high alpine cushion plants and soil fauna (Collembola and Oribatida) in the Austrian Alps. In Fertigstellung.

Steinbauer, K.; Semenchuk, PR; Lamprecht, A; Winkler, M; Pauli, H. Climate change induces species-specific declines and increases in the central high Alps between 1994 and 2014. In Fertigstellung.

Andere Publikationen und öffentliche Medien

TV-Beitrag: Faszination Klimawandel. Bayerisches Fernsehen (15.12.2014).

As during the previous survey in 2004, the field team was visited on Schrankogel by the internationally regarded climate change chronicler Gary Braasch, Portland, USA (08 2014).

GLORIA – Langzeitbeobachtung von alpinen Ökosystemen: 20 Jahre Schrankogel. *Klima, Wandel, Anpassung: Newsletter* 24 (04 2017). Umweltbundesamt, Vienna/Austria.

Präsentationen auf wissenschaftlichen Tagungen

Querner, P., Fischer, BM, Pauli, H (17.07.2014) Sampling design for soil mesofauna at the GLORIA master site Schrankogel, Austria. *Mountain Observatories 2014, Reno/USA* (poster).

Querner, P et al. (09 2014). Soil and surface-dwelling arthropods along an alpine-nival gradient. *9th International Seminar on Aperygota, Görlitz, GERMANY* (oral presentation).

- Winkler, M. et al. (11.02.2015) Kalte Ökosysteme im Klimawandel: Hochgebirgspflanzen in den wärmsten Dekaden. Research Symposium, Department of Integrative Biology and Biodiversity, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna/AUSTRIA. (oral presentation).
- Pauli, H, et al. (18.02.2015) Long-term research at the limits of plant life: The Schrankogel-GLORIA site of LTSER Tyrolean Alps. LTER Austria conference, Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Steinbauer, K, et al. (30.04.2015) Zwanzig Jahre Biodiversitätsmonitoring an den Grenzen alpiner Vegetation: Klimawandeleffekte auf Hochgebirgspflanzen und Bodenorganismen. 16. Österreichischer Klimatag, Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Hofmann, K, Pauli, H; Wagner, AO; Praeg, N; Farbmacher, S; Illmer, P (06-09.2015) Spatial patterns of methane-cycling microorganisms in soils of a high-alpine altitudinal gradient. Sixth International Conference on Polar and Alpine Microbiology, Ceske Budejovice/CZECH REP (oral presentation).
- Lamprecht, A, et al. (07.10.2015) Two decades of biodiversity monitoring: Transformation of vegetation composition and soil biota gradients at the limits of plant life in the Alps. Perth III: Mountains of Our Future Earth, Perth/UK (oral presentation).
- Pauli, H (03.12.2015) Past and recent changes in European alpine plant diversity: increases, declines, stagnations and accelerations driven by climate change. BayCeer-Kolloquium, Bayreuth/GERMANY (oral presentation).
- Pauli, H; Lamprecht, A; Steinbauer, K, Semenchuk, PR (14.01.2016) Shady and cold, sunny and dry or browsed and trampled – what do mountain dwellers like most? Seminar at the Division of Conservation Biology, Vegetation Ecology and Landscape Ecology, University of Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Pauli, H (07.03.2016) Biodiversity monitoring along the fundamental climatic gradients. Global Biodiversity Assessment and Monitoring – Science, Data and Infrastructure Needs for IPBES and Beyond, Ascona/SWITZERLAND (oral presentation).
- Pauli, H, et al. (10.05.2016) Veränderung alpiner Vegetation und ihrer Artenzusammensetzung im 20. und 21. Jahrhundert: Zunahmen, Abnahmen und die Beschleunigung des Wandels. Seminar of the Department of Integrative Biology and Biodiversity, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Winkler, M, et al. (17.06.2016) Two decades of biodiversity monitoring: transformation of plant species composition at the limits of plant life in the European Alps. 59th Annual Symposium of the International Association for Vegetation Science, Pirenopolis/BRAZIL (oral presentation).
- Lamprecht, A, et al. (23.09.2016) Accelerated transformation of species composition at the limits of plant life in the Alps. Treffen der Österreichischen Botanikerinnen und Botaniker, Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Steinbauer, K, et al. (23.09.2016) "Retreat of the cryophils" - 2 Dekaden Biodiversitätsmonitoring am Schrankogel. Treffen der Österreichischen Botanikerinnen und Botaniker, Vienna/AUSTRIA (oral presentation).
- Pauli, H, et al. (01.03.2017) Alpin-nivales Ökoton (Zentralalpen, Schrankogel). Jahrestreffen der LTSER platform Tyrolean Alps, Innsbruck/AUSTRIA (oral presentation).

Nicht-wissenschaftliche Präsentationen

- Pauli, H. (15.11.2014) Mehr Arten und weniger Hochgebirge: Das Monitoring-Programm GLORIA verfolgt die laufende Transformation der alpinen Vegetation. Jahrestagung des

Naturwissenschaftlichen Vereins für Kärnten Fachgruppe Botanik, Klagenfurt/AUSTRIA (oral presentation).

Pauli, H. (04.12.2014) Wenn Europas Berge grüner werden: alpine Pflanzenvielfalt durch die Lupe der Langzeitbeobachtung. Vortragsreihe der Geographischen Gesellschaft Hamburg /GERMANY (oral presentation).

Pauli, Harald (06.03.2015) Folgen des Klimawandels im Hochgebirge - Werden die Alpen ein Waldgebirge? 20. Naturwissenschaftlicher Tag am Gymnasium 19, Vienna/AUSTRIA. (oral presentation).

Lamprecht, A; Pauli, H (15.03.2016) GLORIA – Biodiversity and climate change. Sixth Consus training on environmental sustainability, climate change and the challenge of alternative energy production. University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna/AUSTRIA (oral presentation).

Pauli, H; Lamprecht A (24.11.2016) Modul Klimawandel. Rangerausbildung für Gebirgs-Nationalparks. Admont/AUSTRIA.

Zitierte Literatur

Bates, D., Maechler, M., Bolker, B.M. & Walker, S. (2015) lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. *Journal of Statistical Software*, **67**, 1-48.

Becker, A. & Bugmann, H. (2001) *Global Change and Mountain Regions. The Mountain Research Initiative*. IGBP Report 49, Stockholm.

Benjamini, Y. & Hochberg, Y. (1995) Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, **289**-300.

Dullinger, S., Gattlinger, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N.E., Guisan, A., Willner, W., Plutzer, 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*, **2**, 619-622.

Ellner, S.P. & Rees, M. (2006) Integral projection models for species with complex demography. *The American Naturalist*, **167**, 410-428.

Engler, R., Randin, C.F., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N.E., Araujo, M.B., Pearman, P.B., Le Lay, G., Piedallu, C., Albert, C.H., Choler, P., Coldea, G., De Lamo, X., Dirnböck, T., Gegout, J.C., Gomez-Garcia, D., Grytnes, J.A., Heegaard, E., Hoistad, F., Nogues-Bravo, D., Normand, S., Puscas, M., Sebastia, M.T., Stanisci, A., Theurillat, J.P., Trivedi, M.R., Vittoz, P. & Guisan, A. (2011) 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Global Change Biology*, **17**, 2330-2341.

Fierer, N., Jackson, J.A., Vilgalys, R. & Jackson, R.B. (2005) Assessment of soil microbial community structure by use of taxon-specific quantitative PCR assays. *Applied and Environmental Microbiology*, **71**, 4117-4120.

Goslee, S.C. & Urban, D.L. (2007) The ecodist package for dissimilarity-based analysis of ecological data. *Journal of Statistical Software*, **22**, 1-19.

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*, **30**, 207-221.

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., Pedersen, 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., Gottfried, M. & Pauli, H. (2010) Climate change impacts in alpine environments. *Geography Compass*, **4**, 1133–1153.
- Hofmann, K., Reitschuler, C. & Illmer, P. (2013) Aerobic and anaerobic microbial activities in the foreland of a receding glacier. *Soil Biology and Biochemistry*, **57**, 418-426.
- Hofmann, K., Praeg, N., Mutschlechner, M., Wagner, A.O. & Illmer, P. (2016) Abundance and potential metabolic activity of methanogens in well-aerated forest and grassland soils of an alpine region. *FEMS microbiology ecology*, **92**, fiv171.
- Hothorn, T., Bretz, F. & Westfall, P. (2008) Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal*, **50**, 346-363.
- Landolt, E., Bäumler, B., Erhardt, A., Hegg, O., Klötzli, F., Lämmli, W., Nobis, M., Rudmann-Maurer, K., Schweingruber, F. & Theurillat, J. (2010) *Flora Indicativa: Ecological Indicator Values and Biological Attributes of the Flora of Switzerland and the Alps*. Haupt, Bern.
- Legendre, P. & Legendre, L.F. (2012) *Numerical ecology*, 3rd edn. Elsevier, Amsterdam.
- Lenoir, J., Svenning, J.-C., Dullinger, S., Pauli, H., Willner, W., Guisan, A., Vittoz, P., Wohlgemuth, T., Zimmermann, N. & Gégout, J.-C. (2012) The Alps Vegetation Database – a geo-referenced community-level archive of all terrestrial plants occurring in the Alps. In: J. Dengler, J. Oldeland, F. Jansen, M. Chytrý, J. Ewald, M. Finckh, F. Glöckler, G. Lopez-Gonzalez, R.K. Peet and J.H.J. Schaminée. *Vegetation databases for the 21st century*, pp. 331-332. *Biodiversity & Ecology*, **4**.
- Nilsson, I.N. & Nilsson, S.G. (1985) Experimental estimates of census efficiency and pseudoturnover on islands: error trend and between-observer variation when recording vascular plants. *The Journal of Ecology*, 65-70.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P.R., O'Hara, B., Simpson, G.L., Solymos, P. & Wagner, H. (2015) *vegan: Community Ecology Package. R package version 2.3-0*. Available at: <https://CRAN.R-project.org/package=vegan> (accessed 2016).
- Pauli, H., Gottfried, M., Hohenwallner, D., Reiter, K. & Grabherr, G. (2005) Ecological climate impact research in high mountain environments: GLORIA (Global Observation Research Initiative in Alpine Environments) - its roots, its purpose and the long-term perspectives. In: *Global change in mountain regions: an overview of current knowledge* (ed. by U.M. Huber, H.K. Bugmann and M.A. Reasoner), pp. 383-391. Springer, Dordrecht.
- Pauli, H., Gottfried, M., Reiter, K., Klettner, C. & 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., Lamprecht, A., Niessner, S., Rumpf, S., Winkler, M., Steinbauer, K., Grabherr, G. (coordinating authors & editors), (2015) *The GLORIA field manual – standard Multi-Summit approach, supplementary methods and extra approaches, 5th edn*. GLORIA-Coordination, Austrian Academy of Sciences & University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Vienna.
- Pecl, G.T., Araujo, M.B., Bell, J.D., Blanchard, J., Bonebrake, T.C., Chen, I.C., Clark, T.D., Colwell, R.K., Danielsen, F., Evengard, B., Falconi, L., Ferrier, S., Frusher, S., Garcia, R.A., Griffis, R.B., Hobday, A.J., Janion-Scheepers, C., Jarzyna, M.A., Jennings, S., Lenoir, J., Linnetved, H.I., Martin, V.Y., McCormack, P.C., McDonald, J., Mitchell, N.J., Mustonen, T., Pandolfi, J.M., Pettoirelli, N., Popova, E., Robinson, S.A., Scheffers, B.R., Shaw, J.D., Sorte, C.J.B., Strugnell, J.M., Sunday, J.M., Tuanmu, M.N., Verges, A., Villanueva, C., Wernberg, T., Wapstra, E. & Williams, S.E. (2017) Biodiversity redistribution under climate change: Impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, **355**, doi: 10.1126/science.aai9214.
- R Core Team (2016) *R: A language and environment for statistical computing*. Available at: <http://www.R-project.org/> (accessed 2016).
- Sala, O.E., Chapin, F.S., Armesto, J.J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., Huber-Sanwald, E., Huenneke, L.F., Jackson, R.B., Kinzig, A., Leemans, R., Lodge, D.M., Mooney, H.A., Oesterheld, M., Poff, N.L., Sykes, M.T., Walker, B.H., Walker, M. & Wall, D.H. (2000) Biodiversity - Global biodiversity scenarios for the year 2100. *Science*, **287**, 1770-1774.
- Schinner, F., Öhlinger, R., Kandeler, E. & Margesin, R. (1996) *Methods in Soil Biology*. Springer, Heidelberg.

- Thuiller, W., Lavorel, S., Araujo, M.B., Sykes, M.T. & Prentice, I.C. (2005) Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **102**, 8245-8250.
- Venables, W.N. & Ripley, B.D. (2002) *Modern Applied Statistics with S. Fourth Edition*. Springer, New York.
- Walther, G.R. (2004) Plants in a warmer world. *Perspectives in Plant Ecology Evolution and Systematics*, **6**, 169-185.

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin / der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechthinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin / der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.