

Schlussbericht des Projekts

Pflanzen auf Berggipfeln als Indikatoren für den Klimawandel

Wiederholungsaufnahmen der GLORIA Monitoring Gipfel in Graubünden und Wallis im Sommer 2022

Sonja Wipf (WI) und Raphael von Büren (RB), Bereich Forschung & Monitoring, Schweizerischer Nationalpark, CH-7530 Zernez

Christian Rixen (CR), Team Gebirgsökosysteme, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF Davos, CH-7260 Davos Dorf

Christophe Randin (CFR), Centre alpin de Phytogéographie, Fondation J.-M. Aubert, Champex-Lac; Université de Lausanne, Département d'écologie et d'évolution DEE, CH-1015 Lausanne

Jean-Paul Theurillat (JPT), emeritus Centre alpin de Phytogéographie, Fondation J.-M. Aubert, Champex-Lac; Section de Biologie, Université de Genève, 2 Chambésy

Pascal Vittoz (PV), Université de Lausanne, Institut des dynamiques de la surface terrestre IDYST, CH-1015 Lausanne

31. Januar 2023



Vegetationsaufnahmen am Piz Foraz. (Im Bild: Raphael von Büren, Foto: Corinna Romeikat)

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	3
Geleistete Arbeiten 2022.....	4
Vorarbeiten.....	4
Feldarbeiten des GLORIA Standard-Protokolls.....	4
Zusatz-Arbeiten wie in Antrag beschrieben bereits ausgeführt	4
Zukünftige Auswertungsarbeiten.....	5
Erste Resultate der Wiederholungsaufnahmen 2022.....	7
Erkenntnisse aufgrund von Wiederholungsaufnahmen bis und mit 2015.....	11
Medienecho	13
Methodik.....	14
Literatur.....	17

Einleitung

Die Welt erlebt derzeit eine rasche und noch nie dagewesene Klimaerwärmung. Aufgrund ihrer zentralen kontinentalen Lage in Europa weisen die Alpen eine besonders schnelle Erwärmung auf, mit Raten, die zwei- bis dreimal höher sind als im globalen Durchschnitt (Rebetez & Reinhard 2008, Pepin et al. 2015, Vitasse et al. 2021). Vor allem in höheren Lagen der Alpen, wo raue Umweltbedingungen für das Vorkommen und Überleben von Arten entscheidend sind, wird eine starke Erwärmung in den Alpen starke Auswirkungen auf die Ökosysteme haben.

Mit zunehmender Erwärmung des Klimas wandern Tier- und Pflanzenarten in immer höhere Lagen (Vittoz et al. 2009, Stöckli et al. 2011, Vitasse et al. 2021). Im Einklang mit den Erwärmungstrends der letzten Jahrzehnte haben die Vegetationsdecke und Pflanzenvielfalt in den hohen Lagen der Alpen zugenommen, wobei sich die Einwanderung neuer Arten parallel zur Intensivierung der Erwärmung beschleunigt (Walther et al. 2005, Wipf et al. 2013, Steinbauer et al. 2018, Rumpf et al. 2022). Da Pflanzenarten in tieferen Lagen (z. B. subalpine Wiesen, Weiden und Wälder) oft größer und wettbewerbsfähiger sind als kleinwüchsige alpine Spezialisten, könnten sie nach der Einwanderung in höhere Lagen dort ansässige alpine Spezialisten verdrängen (Körner 2003, Randin et al. 2009, Engler et al. 2011). Allerdings ist das lokale Verschwinden von Arten langsamer als die Einwanderung neuer Arten, was wahrscheinlich auf die Langlebigkeit vieler alpiner Arten sowie auf die topografische Heterogenität zurückzuführen ist, die mittelfristig kleinräumige Rückzugsgebiete für kältetolerante Arten bietet (Scherrer & Körner 2011, Dullinger et al. 2012). Es ist jedoch unklar, welche Arten spezifisch gefährdet sind und welche Maßnahmen dieser Gefährdung entgegenwirken können.

Die Alpen sind das markanteste Landschaftsmerkmal der Schweiz. Die grosse Vielfalt an abiotischen, mikroklimatischen und geologischen Bedingungen schafft eine grosse Vielfalt an Lebensräumen und damit Raum für eine grosse Artenvielfalt. Deshalb weisen die Alpen eine achtmal höhere Pflanzenvielfalt auf als der Rest des europäischen Kontinents (Körner 2000, Nagy et al. 2003a,b, Europäische Gemeinschaft 2009). Neben den Veränderungen in der landwirtschaftlichen Nutzung (Nutzungsaufgabe vs. Nutzungsintensivierung) und der Intensivierung der touristischen Nutzung sind die alpinen Lebensräume seit den 1980er Jahren zunehmend Veränderungen durch den Klimawandel ausgesetzt (Lachat et al. 2010). Aufgrund ihres hohen Anteils an alpinen Lebensräumen, ihrer Lage in den geologisch vielfältigen Zentralalpen und der Übergangszone zwischen West- und Ostalpen trägt die Schweiz eine besonders wichtige Verantwortung für die Erhaltung der alpinen Biodiversität. Zu verstehen, wie die alpine Vegetation auf den Klimawandel reagiert, ist daher ein dringendes globales Thema, da sie eine unverhältnismäßig große Artenvielfalt beherbergt.

Um die Veränderungen in diesen empfindlichen alpinen Lebensräumen und Pflanzengemeinschaften im sich ändernden Klima zu untersuchen, wurde 2001 das Netzwerk GLORIA (GLobal Observation Research Initiative in Alpine environments) ins Leben gerufen, und seitdem wurden weltweit Gipfel in jeweils verschiedenen Höhenlagen einer Region für Monitoring- und Forschungsarbeiten eingerichtet. Auf jedem Gipfel wird die Artenzusammensetzung der Pflanzendecke auf unterschiedlich großen, ineinander verschachtelten Parzellen aufgezeichnet, und diese Aufzeichnungen werden etwa alle 7 Jahre wiederholt. In der Schweiz wurde 2001 eine "Zielregion" (4 Gipfel entlang eines Höhengradienten) im Wallis (zwischen dem Val de Bagnes und dem Val d'Entremont) eingerichtet, und 2002 und 2003 wurden zwei "Zielregionen" (1 auf Kalkgestein, 1 auf Silikatgestein) in und um den Schweizerischen Nationalpark eingerichtet und insgesamt viermal aufgezeichnet zuletzt im Sommer 2022. Insgesamt fand die vierte Bestandsaufnahme

von Flora und Vegetation im Rahmen des internationalen Langzeitmonitoring-Projekts GLORIA fand im Sommer 2022 in 16 Gebieten in Europas Gebirgen statt. Diese werden innerhalb des internationalen Projekts namens ERC MICROCLIM unter Leitung von Stefan Dullinger (Universität Wien) miteinander in Beziehung gebracht und ausgewertet.

Geleistete Arbeiten 2022

Die GLORIA Monitoring Pflanzenaufnahmen in den Dauerbeobachtungsflächen auf den Berggipfeln dauerten in beiden Teilgebieten (Kt. GR; 9 Gipfel und VS; 4 Gipfel) vom 5. Juli bis zum 23. August 2022. Die Daten wurden im Anschluss an die Feldarbeiten nachbearbeitet und auf der Plattform des Koordinationsbüros von GLORIA in Wien eingegeben sowie an die Nationalen Datenzentren weitergegeben. Im Detail führten wir folgende Arbeiten durch:

Vorarbeiten

- Erfolgreiche Finanzierungssuche und damit verbundene Administration
- Auswahl und Personaladministration der Mitarbeitenden der Feldaufnahmen
- Einbinden von Studierenden, Erarbeitung von deren Abschluss-Themen in Absprache mit ihren Betreuenden an den jeweiligen Hochschulen (insgesamt 5 Ms Studierende über beide Regionen)
- Vermitteln von Methodik und Artenspektrum für neue Mitarbeitende
- Kommunikation mit dem GLORIA Leitungsbüro in Wien
- Zeitplanung und Logistik für die Feldsaison
- Bestellen und Bereitstellen von Feldmaterial, Aufnahmeblättern und digitalen Hilfsmitteln

Feldarbeiten des GLORIA Standard-Protokolls

- Wiederfinden von permanenten Flächen auf allen Gipfeln
- Ersatz/Auslesen von Temperaturloggern (Bodentemperaturen, 4 pro Gipfel, allerdings einige Verluste von Loggern oder Temperaturdaten)
- Fotodokumentation aller Eckpunkte und Plots auf allen Gipfeln, inkl. Umbenennung der Fotos nach von der GLORIA Koordination vorgegebenem System
- Aufnahmen aller Gefässpflanzenarten in denjenigen Flächen, welche bereits in der Vergangenheit aufgenommen wurden (8 grosse Gipfelflächen und zumeist 16 1 x 1 m Plots pro Gipfel, sowie im VS insgesamt 91 zusätzliche Plots). (Ausnahmen: zu steile Flächen auf Pte du Parc S und W und Pte de Boveire W, sowie wegerodierte Flächen auf Munt Chavagl E)
- 100 Punktaufnahmen pro Plot (Point Framing)
- Dateneingabe aller erhobenen Daten in Eingabetool von GLORIA Koordinationsstelle (abgeschlossen per Ende November)

Zusatz-Arbeiten wie in Antrag beschrieben bereits ausgeführt

- Aufnahmen aller Gefässpflanzenarten in 100 Teilflächen von 10 x 10 cm pro Plot
- Aufnahmen aller Moosarten in 16 1 x 1 m Plots pro Gipfel in beiden Zielregionen im Kt. GR (Ausnahmen: siehe oben, sowie zu steile Felswand Piz Plazèr W)
- Aufnahmen aller Moos- und Flechtenarten in 8 grossen Gipfelflächen und 16 1 x 1 m Plots pro Gipfel in Zielregion VS, einschliesslich Aufnahmen in 100 Teilflächen von 10 x 10 cm

- Auf 6 Gipfeln (3 VS, 3 GR): hochaufgelöste Drohnenaufnahmen (für Ms Arbeit über Mikrohabitate/Topographie)
- GR: Trait- (Pflanzeigenschaften-) Messungen verschiedener Arten, im Vergleich zur sie umgebenden Vegetation (für Ms Arbeit intraspezifische Trait-Muster von zu- und abnehmenden Arten)
- VS: Trait Messungen von 3 Flechtenarten entlang eines Höhengradienten.
- Auf allen 13 Gipfeln: Ausbringen von Regenmessern auf bzw. in der Nähe von allen Gipfeln als Ergänzung der Temperaturmessungen. Die Logger zeichneten den aktuellen (flüssigen) Niederschlag während drei Monaten von Juli bis September auf. Eine Messkampagne ist für 2023 geplant. Die Daten werden in Kooperation mit MeteoSchweiz an der Station Montagnier kalibriert und unter Einbezug umliegender Stationsdaten analysiert.
- Nachbestimmung und Dateneingabe der Moose und Flechten
- Erste Analysen der Daten (Artenzahlen, Veränderungen über die Zeit)
- Abrechnungen und Projektabschluss, Schlussbericht
- Erste Pressearbeiten über das Projekt



Fig. 1. UNIL-Masterstudent Aurélien Robadey bei einem Drohnenflug auf der Pointe du Parc (Wallis). Aus den Bildern der Drohne lässt sich ein Geländemodell mit einer Auflösung von wenigen Zentimetern ableiten. (Foto: C.Randin)

Zukünftige Auswertungsarbeiten

- Im Laufe der vergangenen Monate wurden Themen und Methodik für fünf studentische Abschluss-Arbeiten (s. unten) konzipiert und erarbeitet. Die Studierenden waren in die Datenerhebungen während des Sommers eingebunden und konnten nebenbei eigene Daten zusätzlich zu den oben erwähnten erheben. In den kommenden Monaten werden

sie an ihren Datenanalysen und -interpretationen arbeiten und zusätzliche Erkenntnisse über die Veränderungen der alpinen Gipfelvegetation und deren Prozesse und Treiber erlangen. Es handelt sich dabei um folgende Themen:

- 1 Bsc über Vegetationsveränderungen von Kryptogamen im Wallis (bereits abgeschlossen)
- 1 Ms über Vegetationsveränderungen von Gefäßpflanzen und deren Geschwindigkeit
- 1 Ms über intraspezifische Trait-Muster von zunehmenden und abnehmenden Pflanzenarten
- 1 Ms über intraspezifische Trait-Muster von 3 Flechtenarten über die Höhe
- 1 Ms über Mikrohabitate/Mikrotopografie und deren Zusammenspiel mit der Vegetation



Fig. 2. Ein Regenmesser mit einem Big-Drip-Sensor der Firma Goodsell System Ltd. auf dem Gipfel des Mont Brûlé (Wallis). (Foto: C.Randin)

- Unter Leitung von Prof. Stefan Dullinger werden die Europäischen GLORIA Daten im Rahmen seines ERC Grants für verschiedene Auswertungen bearbeitet.
- Diskussionen für weitere Projekte bzw. Forschungsanträge aufgrund der Daten laufen.

Erste Resultate der Wiederholungsaufnahmen 2022

Die Darstellungen und Aussagen sind noch preliminär. Weitere Auswertungen und Resultate werden im Laufe der kommenden Monate dazukommen.

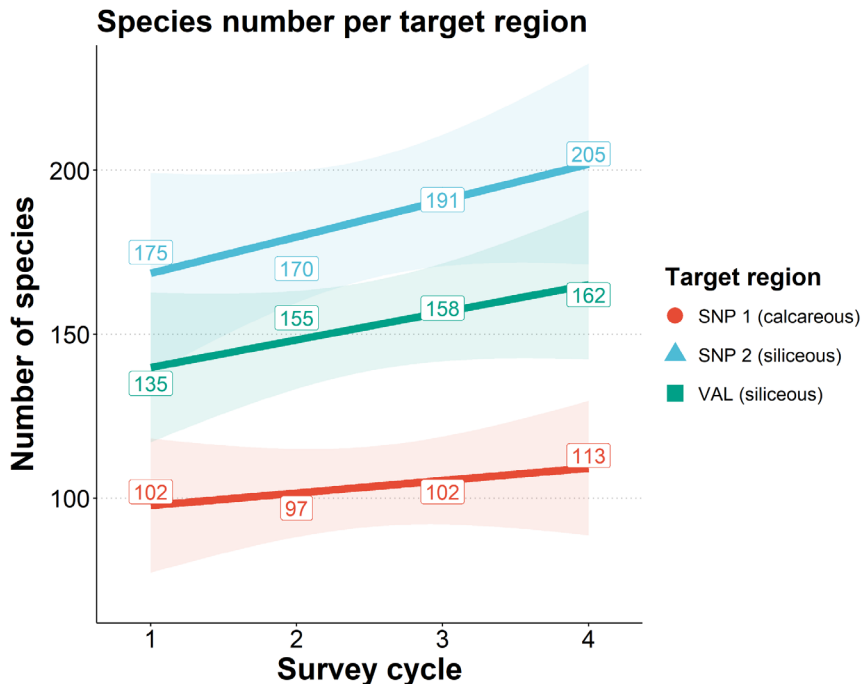


Fig. 3. Gamma-Diversität (Anzahl Arten über alle 4 Gipfel einer Zielregion) über die Zeit seit der ersten Aufnahme.

Die gesamte Artenzahl der Gefässpflanzen über alle 4 Gipfel einer Zielregion (Gamma-Diversität) hat sich über alle drei Zielregionen kontinuierlich vergrößert (Fig. 3). Im Wallis erfolgte die grösste Zunahme zwischen der ersten und zweiten Aufnahme (2001-2008). Auf den Bündner Gipfeln war zwischen erster und zweiter Aufnahme eine leichte Abnahme zu verzeichnen, aber seither ist die Zunahme an neuen Arten deutlich.

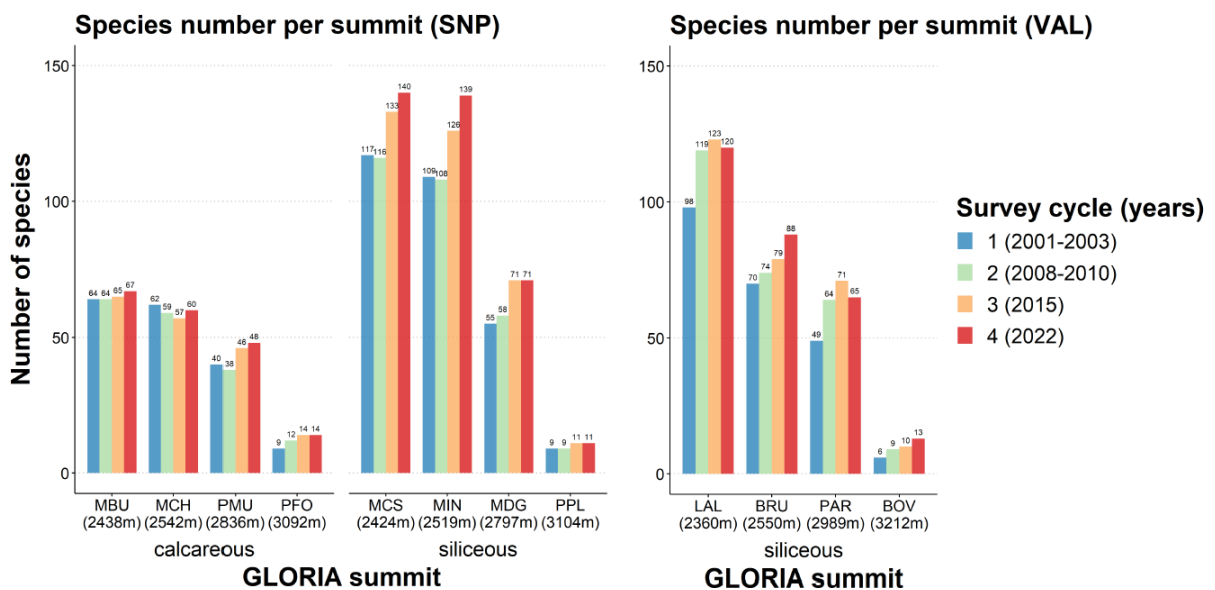


Fig. 4. Die Artenzahlen über die 4 Aufnahmen in Graubünden (SNP, 4 Gipfel auf Kalk auf der linken Seite, 5 Gipfel auf Silikat auf der rechten Seite) und im Wallis (VAL). Artenzahlen 2022 vom Gipfel Macun sind noch nicht enthalten, weil diese erst später eingelesen wurden.

Die Artenzahlen von Gefäßpflanzen pro Gipfel hatten zwischen den ersten und dritten Aufnahmen (2001-2015) fast überall zugenommen. Zwar zeigen 2022 einige Gipfel eine weitere Zunahme, aber das Bild ist weitaus weniger einheitliches (Fig. 4). Im Wallis war erstmals eine Abnahme auf zwei Gipfeln zu verzeichnen, auf dem niedrigsten und zweithöchsten, während die anderen zwei Gipfel wiederum starke Zunahmen des Artenreichtums verzeichneten.

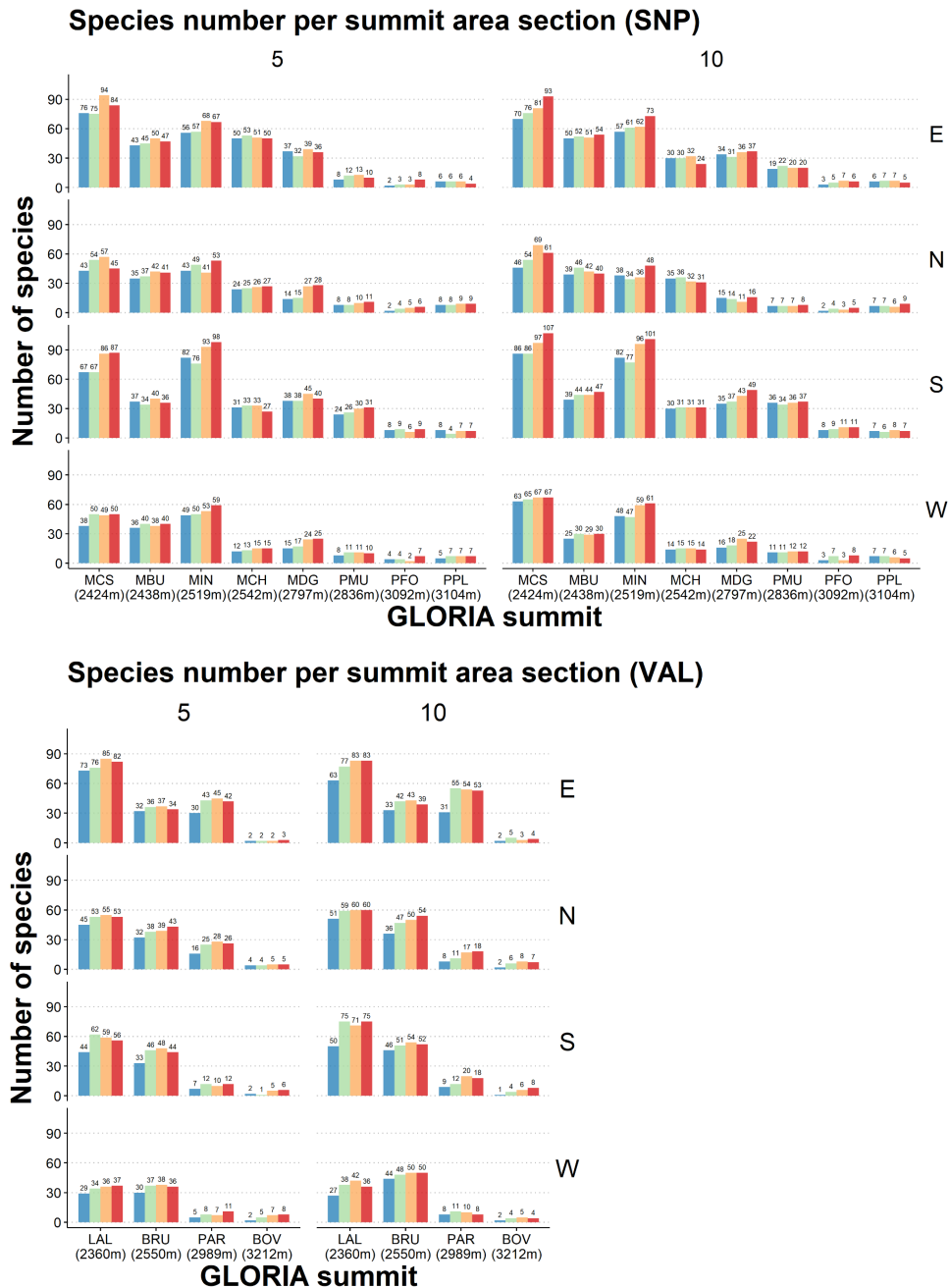


Fig. 5. Artenzahlen über die Zeit auf den verschiedenen Summit Area Sections (SAS) auf den Bündner (oben) und Walliser Gipfeln (unten). Die Gipfel sind von links nach rechts nach zunehmender Höhe sortiert, es fehlen noch die Daten 2022 vom Gipfel Macun.

Erste qualitative Eindrücke und Interpretationen sind, dass die Deckung mit Holzgewächsen auf den niedrigsten Gipfeln (La Ly und Mont Brûlé) weiter zunimmt. Auch auf der Pointe du Parc haben sich mittlerweile Wacholdersträucher angesiedelt. Einige alpine Arten beginnen zurückzugehen, auch auf den beiden höchsten Gipfeln (Pointe du Parc und Mont Brûlé).

Die niedrigeren Gipfel in Graubünden zeigten einen moderaten Anstieg der Artenzahlen auf Kalk und einen starken Anstieg auf Silikat. Bei den Gipfeln auf Kalk gilt anzumerken, dass der Munt Buffalora (MBU, Westseite) und Munt Chavagl (MCH, Ostseite) starker Erosion ausgesetzt sind. Speziell auf letzterem wirkt sich diese stark auf die Artenzusammensetzung aus, da sich eine Murgangrinne in die vegetations- und artenreichste Zone des Gipfels hineinfrisst (siehe Fig. 5 für MCH Ost/E). Inzwischen ist der ganze Ost-Cluster der weg erodiert. Auf den höheren Silikat- und dem höchsten Kalkgipfel stagnierten die Artenzahlen.

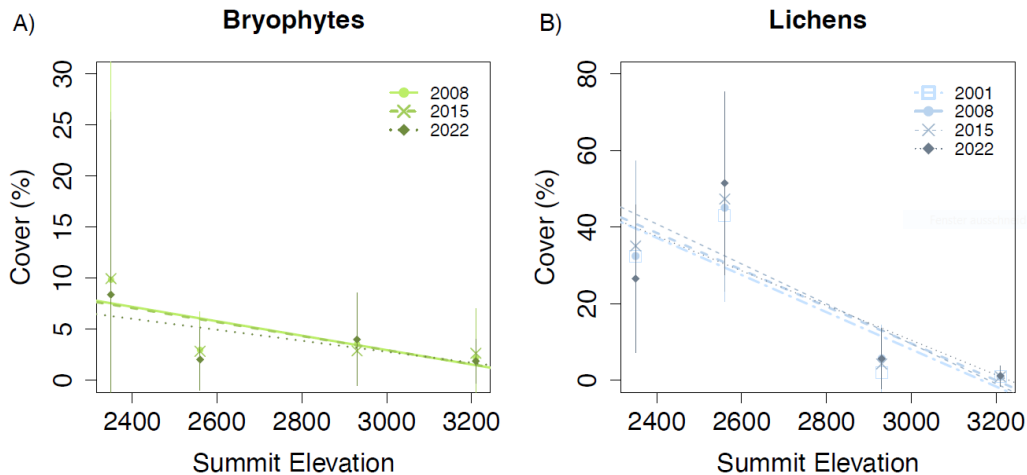


Fig. 6. Durchschnittliche Deckungsgrade von Moosen (A links) und Flechten (B rechts) in den permanenten Plots auf den Walliser Gipfeln.

Die Analysen der Kryptogamenflora auf den Walliser Gipfeln (Studienarbeit von R. Mayo De La Iglesia, Universität Lausanne, 2022; Fig. 6) ergab, dass sich die Deckung von Moosen und Flechten sowie der Vegetation (von Gefäßpflanzen) sich über die Zeit nicht signifikant veränderte. Es gab einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Deckung der Gefäßpflanzen und derjenigen der Flechten. Je dichter die Vegetation, desto weniger Flechten sind präsent. Von 21 relativ häufigen Flechtenarten gingen 3 zurück, 3 nahmen zu in ihrer Abundanz. Von 18 relativ häufigen Moosarten gingen 6 in ihrer Abundanz zurück und keine nahm zu. Letzteres könnte eine Folge der zunehmenden Trockenheit sein.



Fig. 7. Die erst seit kurzem aus Mitteleuropa bekannte, vorher (verständlicherweise?) übersehene Glazialrelikt-Art *Carex glacialis* (Gletscher-Segge) auf dem Munt Chavagl (links, Foto S. Wipf) und dem Munt Buffalora (dort nicht auf dem Gloria Gipfel, rechts, Foto C. Rixen)

Überraschend wurde auf dem Munt Chavagl (MCH) die Seggenart *Carex glacialis* entdeckt (Fig. 7). Diese vorwiegend arktische Art wurde erst 2019 in den Schweizer Alpen festgestellt und war bisher in Mitteleuropa wohl verkannt. Einer der in der Schweiz entdeckten Fundorte liegt nahe des Gipfels des Munt Buffalora. Die Art wurde mit grösster Wahrscheinlichkeit schon 2015 auf MCH gesehen, aber da die Individuen damals nicht blühten und die Art nicht auf dem Radar der Schweizer Botanik war, wurde sie damals wohl als *C. humilis* bestimmt.

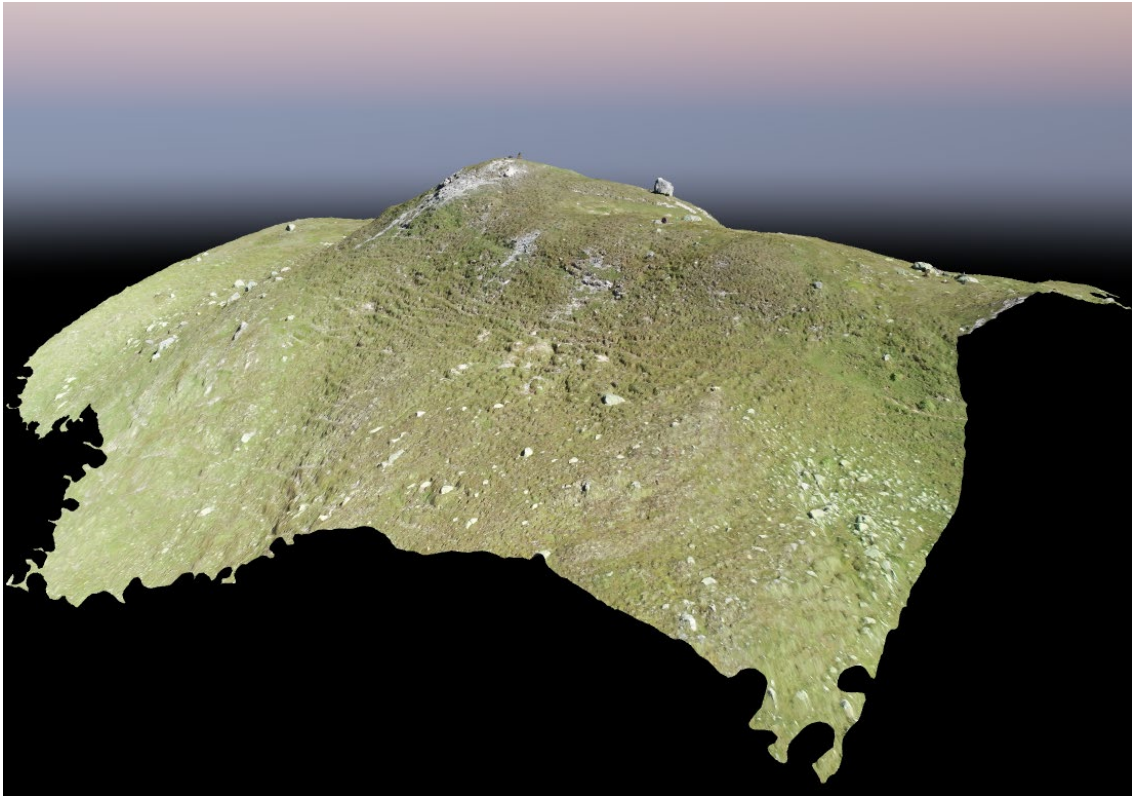


Fig. 8. 3D-Darstellung des Gipfels "Munt sper la Chamonna Sesvenna (MSC)" (GR). Fotogrammetrische Analysen auf der Grundlage der Drohnenbilder ermöglichen die Ableitung eines zentimetergenauen Geländemodells und topographischer Parameter, die mit den Veränderungen der Biodiversität zwischen 2001 und 2022 in Beziehung gesetzt werden. (Robadey A., UNIL-Masterarbeit)

Drohnenflüge über 5 der Schweizer GLORIA-Gipfel beider Gebieten ermöglichten die Erstellung digitaler Geländemodelle mit einer Auflösung von wenigen Zentimetern. Ein mikrotopografischer Diversitätsindex (Terrain Roughness Index TRI; Abb. 8 und 9) wurde mit der Anzahl neuer Arten in den SAS (Summit Area Sections) in Beziehung gesetzt. Die Anzahl neuer Arten ist höher, wenn die Topographie nicht zu komplex ist (Abb. 9).

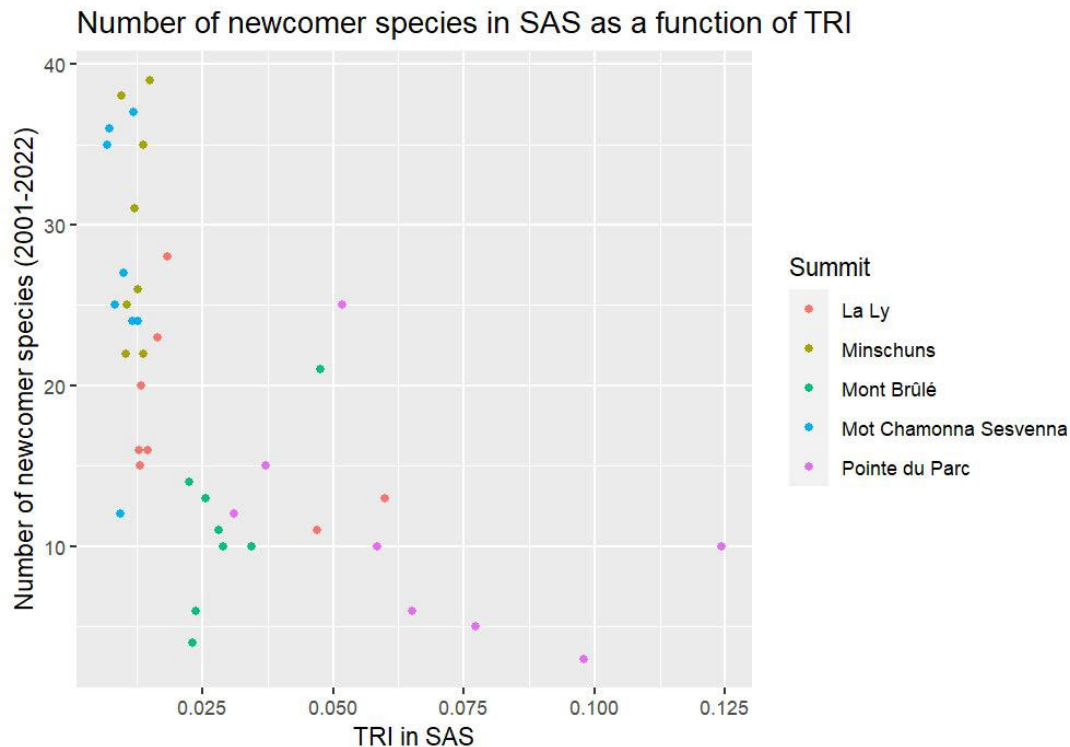


Fig. 9. Beziehung zwischen dem topografischen Komplexitätsindex TRI und der Anzahl neuer Arten seit der ersten Bestandsaufnahme (2001) und 2022 in den SAS (Summit Area Sections). (Robadey A., UNIL-Masterarbeit)

Im heissen und trockenen Sommer 2022 wurden auf verschiedenen Gipfeln starke physiologische Auswirkungen auf die Pflanzen festgestellt. Es war so heiss und trocken, dass die oberirdische Vegetation teilweise ausgedörrt war. Dies ist allerdings durchaus vergleichbar mit der Situation im Jahr 2015.

Erkenntnisse aufgrund von Wiederholungsaufnahmen bis und mit 2015

Die Schweizerischen GLORIA Gipfel gehören zu den am besten und konstantesten untersuchten des GLORIA Netzwerkes, u.a. dank der Einbindung in einer Reihe anderer Forschungsinitiativen, sowie der parallelen Forschungsaktivitäten der Konsortiumsmitglieder auf weiteren Gipfeln Europas und der Arktis. Auch waren verschiedene Konsortiumsmitglieder führend oder wesentlich beteiligt in verschiedenen internationalen Arbeitsgruppen, welche länderübergreifende Analysen vorwärts getrieben haben. Daneben wurden verschiedene Analysen auf regionaler Basis erstellt.

Die Auswertungen des ersten Monitoring-Intervalls (2001-2008) haben aufgezeigt, dass sich in den temperaten und borealen Bergregionen, ähnlich wie in den oben zitierten Studien, die Artenvielfalt der Gipfflora mehrheitlich vergrössert hat (Pauli et al. 2012). Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass Pflanzenarten aus tieferen Lagen, welche an wärmere Temperaturen angepasst sind, zugenommen haben oder eingewandert sind (Gottfried et al. 2012). Allerdings zeigen südliche, mediterrane Berggebiete einen gegenteiligen Trend zur Abnahme der Artenvielfalt – vielleicht ein Effekt zunehmender Trockenheit (Pauli et al. 2012).

Aufgrund des zweiten Monitoring-Intervalls 2015 sind mit Beteiligung unserer beiden Konsortien und den Daten der Schweizer GLORIA Gipfel eine ganze Reihe weiterer

Forschungsprojekte und -publikationen entstanden, welche allenfalls für die Strategie Biodiversität Schweiz und deren Aktionsplan relevant sind:

Weitere Zunahme der Artenzahlen auf fast allen Gipfeln, analog zu den europaweiten Trends (Wipf 2016, Steinbauer et al. 2018)

Beschleunigung der Zunahme von Artenzahlen, synchron zur verstärkten Erwärmung; Korrelation von Artenzunahme und Erwärmung auf europäischen Gipfeln (Steinbauer et al. 2018)

Thermophilisierung der Vegetation durch Einwanderung von wärmeliebenderen Pflanzenarten (Wild 2016, Rogora et al. 2018) und Kryptogamen (Moose und Flechten; Carron 2019).

Grösserer Turnover in der Artenzusammensetzung in wärmeren Mikrohabitaten (Winkler et al. 2016, Wipf & Rixen 2018)

Temperatur-Abhängigkeit der Grenze des geschlossenen Graslandes und Bestimmung dessen thermaler Bedingungen, analog zu ähnlichen Werten für die Waldgrenze (Bürli et al. 2021)

Charakterisierung der Bodentemperaturen und Integration in ein weltweites Netzwerk von Bodentemperatur-Messpunkten (Lembrechts et al. 2020)

Charakterisierung des Bodenmikrobioms mit der Erkenntnis, dass Bodenbakterien stark mit der Höhe variierten, während Pilze praktisch nicht mit Umwelt-Gradienten in Beziehung standen (Adamczyk et al. 2019)

Unterschiede zwischen Kalk- und Silikatvegetation bei der Entwicklung der Artenzahlen. Eine Abnahme der Artenzahlen in 1 m² Plots mit höchster Vegetationsdeckung weist auf zunehmenden Konkurrenzdruck innerhalb der Vegetation hin (Nicklas et al. 2021).

Arten mit grösseren Verbreitungsgebieten sind häufiger Gewinner, solche mit kleineren Verbreitungsgebieten häufiger Verlierer (aus Plots verschwunden) (Staude et al. 2022).

Beide Regionen waren Teil eines Streu-Abbau-Experimentes, das weltweit klimatische und Streu-spezifische Treiber des Abbaus untersucht (Djukic et al. 2018, Kwon et al. 2021).

Die Walliser Gruppe beteiligte sich an der Entwicklung von neuen hochaufgelösten Bildverarbeitungsmethoden zur Studie von Vegetationsveränderungen in Mikrohabitaten (Niederheiser et al. 2021).

Diese Erkenntnisse haben nicht nur in wissenschaftlichen Kreisen (durch Publikationen, Konferenzbeiträge wie z.B. oben zitiert), sondern auch in der breiteren Bevölkerung (dutzende Zeitungsberichte z.B. nach Publikation Steinbauer et al. 2018), grosses Interesse ausgelöst. Sie haben wesentlich dazu beigetragen, dass die Veränderung der alpinen Lebensräume als Folge des Klimawandels zunehmend bekannt sind in der Bevölkerung, sowie auch in nationalen und internationalen Berichten erwähnt werden (IPBES 2018, IPCC 2019, Berichte Amt für Natur- und Umwelt Graubünden zum Zustand der Biodiversität (in Bearbeitung)).

Medienecho

In beiden Regionen wurde in den Medien über die Thematik der alpinen Pflanzen im Klimawandel und die Aufnahmen der GLORIA Gipfel berichtet:

- Couleurs locales. 10 octobre 2022. <https://www.rts.ch/play/tv/couleurs-locales/video/entretien-avec-christopherandin-directeur-jardin-botanique-alpin-flore-alpe?urn=urn:rts:video:13444679>
- Le Nouvelliste. Réchauffement: comment en 20 ans la flore alpine de l'Entremont s'est modifiée. Sophie Dorsaz. 12septembre 2022. <https://www.lenouvelliste.ch/valais/bas-valais/entremont-district/rechauffement-comment-en-20-ans-la-flore-alpine-de-lentremont-sest-modifiee-1212436>
- Canal 9. Climat: des scientifiques au sommet pour étudier la flore alpine. Marion Police. 22 juillet 2022. <https://canal9.ch/fr/climat-des-scientifiques-au-sommet-pour-etudier-la-flore-alpine/>
- Couleurs locales. 10 juin 2022. <https://www.rts.ch/play/tv/couleurs-locales/video/entretien-avec-christophe-randindirecteur-du-jardin-botanique-flore-alpe?urn=urn:rts:video:13164090>
- Engadiner Post. 3 August 2022. Bis dass der höchste Punkt erreicht ist. <https://www.engadinerpost.ch/2022/08/03/Bis-dass-der-hoechste-Punkt-erreicht-ist>

Methodik

Die Methodik der GLORIA Aufnahmen richtet sich nach dem GLORIA field manual (Pauli et al. 2015) von der Koordinationsstelle in Wien, welches alle Details von Feldarbeit bis Datenmanagement einheitlich regelt.

Bei den Wiederholungsaufnahmen aller drei Regionen (SNP-Kalk, SNP-Silikat und Wallis) mit insgesamt 13 Gipfeln wurden folgende, nach GLORIA „standard recording methods“ (STAM) vorgeschriebenen Aufnahmen und Methoden durchgeführt (siehe Kapitel 4 des GLORIA field manuals)

- Wieder-Einmessen, markieren, und fotografisch dokumentieren der Flächen und Markierungspunkte (die 2015 eingemessenen D-GPS Punkte im SNP wurden neu markiert)
- Auslesen, Batteriewechsel und neu Platzieren von Temperaturloggern (*Data logger* bzw. *Temperature measurement* in Fig. S1)
- Aufnahmen aller Pflanzenarten in den Gipfelsegmenten (je 8 Flächen pro Gipfel; *5m summit area sections* und *10m summit area sections* in Fig. S1). In GR wurde dies mit der App von Info Flora gemacht, womit wir auch über mit den Funden assoziierten Koordinaten verfügen.
- Aufnahmen und Abundanzen aller Gefäßpflanzenarten und Bodenoberflächenstruktur der 1m² Dauerflächen (je 16 Plots pro Gipfel in vier 3 x 3 m Blöcken von jeweils 4 Plots; *3m x 3m quadrat cluster with four permanent corner quadrats* in Fig. S1)
- Point framing aller 1m² Dauerflächen (je 16 Plots pro Gipfel), wo an 100 Stichpunkten pro Plot die Arten, welche eine in den Plot gesenkte Nadel berühren, aufgenommen wurden
- Aufarbeiten und Einreichen der Daten und Fotodokumentation

Diese Arbeiten nahmen zwischen einem (nivale Gipfel) und acht Tagen (tiefere Gipfel) für zwei bis fünf Botaniker*innen plus Helfer*innen in Anspruch.

Zusatz-Arbeiten: Mikroklimatische Messungen (Wallis und GR)

Auf allen Gipfeln sind in alle vier Himmelsrichtungen Temperaturlogger installiert, welche kontinuierlich Bodentemperaturen auf 10 cm Tiefe messen. Somit kann analysiert werden, wie sich die tatsächlichen Temperaturdaten von grossräumigen Modellen und Interpolationen (basierend auf Wetterstationen) unterscheiden, und wie gross die kleinräumigen Unterschiede sind. Für Niederschlagsdaten gibt es hingegen keine solch kleinräumigen Daten, und Modelle und Interpolationen funktionieren in komplexem alpinem Terrain und mit konvektivem Sommerwetter wesentlich schlechter als für Temperatur.

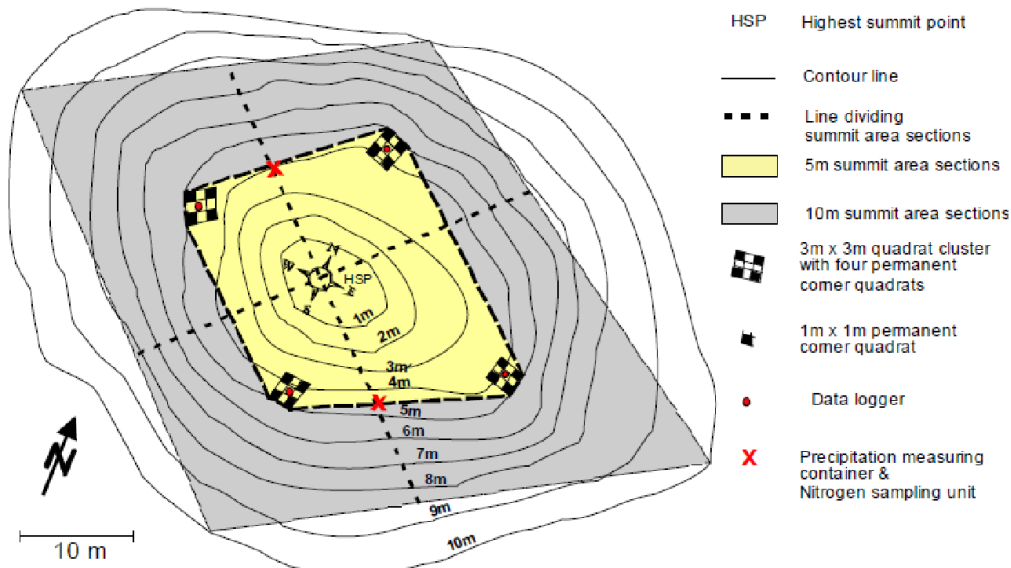
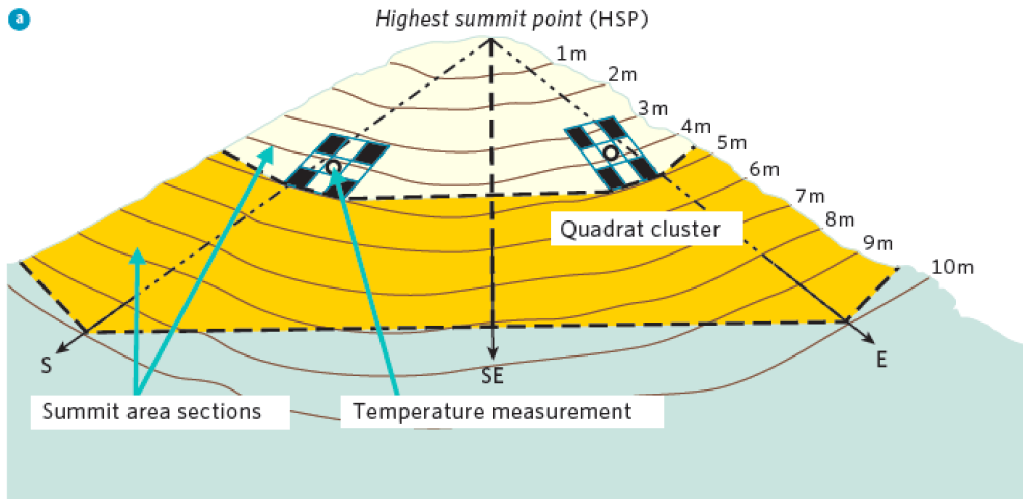


Fig. S1. Schematische Darstellung eines GLORIA Gipfels und Lage der Monitoringflächen (Winkler & Pauli 2014, Pauli et al., 2015).

Wir installierten daher während des Sommers 2022 neuartige Niederschlagsmessgeräten, welche die tatsächlichen Niederschläge auf jedem Gipfel messen. Die neuartigen low-tech Messgeräte (big-drip logger) bestehen aus einem Gehäuse und einem akustischen Sensor, der das Aufschlagen einzelner Tropfen bestimmbarer Grösse misst. Die Logger wurden leider etwas spät geliefert und konnten nicht schon im Juni, sondern erst im Juli bzw. am Datum der tatsächlichen Vegetationsaufnahmen installiert werden. Am Ende der Vegetationsperiode wurden sie im VS ausgelesen, im GR allerdings nur auf einem Gipfel, auf den anderen wird das Auslesen im kommenden Sommer erfolgen. Die Messungen werden uns Einblick in die Wasserversorgung der Vegetation sowie in die Vergleichbarkeit der gemessenen mit den intrapolierten Niederschlagsdaten von Stationen geben.

Subplot-Frequenzen in den 1m² Plots (Wallis und GR)

In den bisherigen GLORIA Aufnahmen wurden die Frequenzen jeder Art in den 16 1 m² Plots pro Gipfel erhoben, indem in 100 Subquadraten die Anwesenheit jeder Art aufgenommen wurde. Diese Aufnahmen sind im neuen Protokoll der GLORIA Initiative zwar als „nicht obligatorisch“ angegeben, wurden auf unseren Gipfeln jedoch ebenfalls wiederholt, da sie neben der Zusammensetzung der Vegetation ein noch genaueres Bild von den dynamischen Prozessen der hochalpinen Vegetation ergeben. Darüber hinaus entdeckt man bei längerer Arbeit an artenreichen Quadraten manchmal weitere Arten, welche mit sehr kleiner Deckung in der Vegetation versteckt waren, und bei kürzerer Beobachtungszeit für nur die eine Methode verloren gingen. Die Arbeiten dafür nahmen 1-3 Tage für mehrere Personen pro Gipfel in Anspruch nehmen (1/2 Tag auf nivalen, 3 Tage auf tiefen Gipfeln für zwei bis drei Botaniker*innen plus Helfer*innen).

Zusätzliche 1m² Plots (Wallis)

Analysen von zwei Testregionen haben gezeigt, dass 16 Plots à 1 m² möglicherweise nicht ausreichen, um kleine Veränderungen statistisch signifikant festzustellen (Vittoz et al. 2010a). Aus diesem Grund wurden im Jahr 2008 auf den Walliser GLORIA Gipfeln weitere 12 bis 32 (total 91) 1m² Plots angelegt. Auf diesen wurden im 2022 ebenfalls Aufnahmen der Artenzusammensetzung und der Artdeckung gemacht. Während des Projekts MEDIALP (2015) wurden 48 zusätzliche 1m² Plots an den Abhängen der 3 höchsten Gipfel eingerichtet. In Blöcken von jeweils 4 1m² Plots sind diese auf 3 Höhenstufen verteilt, jeweils 25 m, 45 m und 65 m unterhalb des Gipfels in allen vier Himmelsrichtungen. Die Aufnahmen konnten aus Zeitgründen im Jahr 2022 nicht wiederholt werden, sondern werden 2023 aufgenommen (ca. 19 Personentage Arbeit).

Moose und Flechten (Wallis und GR)

Moose und Flechten sind ausgezeichnete Bioindikatoren, aber in grossen Höhen wenig untersucht. Wie bereits in den vorherigen Aufnahmen wurden auf den vier Walliser Gipfeln neben den Gefässpflanzen auch Moose und Flechten inventarisiert. Die Inventare wurden in den standardisierten GLORIA Flächen erstellt (d.h. 16 Plots à 1m² und 8 Gipfelsegmente pro Gipfel) durch Luca Miserere (Bryologe) und Mathias Vust (Lichenologe), welche bereits ab 2001 bzw. ab 2008 die Aufnahmen durchführten.

Im SNP fehlten bisher Aufnahmen der Kryptogamenflora, was ein grosses Manko ist im Hinblick auf mögliche Klimawandel-Auswirkungen innerhalb des Lebensraumes, und auch auf die Vergleichbarkeit zwischen den zwei Schweizerischen GLORIA-Regionen. Ab 2022 wird diese Lücke nun teilweise geschlossen, da wie im Antrag festgehalten, Bryolog:innen des Büros FUB AG die Moosflora in allen permanenten Plots (16 Plots à 1m² pro Gipfel) auf allen 9 Bündner Gipfeln erhoben haben.

Dateneingabe, Auswertungen, Veröffentlichungen und studentische Arbeiten

Ende November 2022 wurden alle Daten der Gefässpflanzen mittels der Eingabetools der GLORIA Koordinationsstelle eingegeben und eingereicht. Die Daten für die Kryptogamen liegen vor und werden nach Abstimmung der Taxonomie ebenfalls eingereicht. Gleichzeitig wurden die Daten auch an die jeweiligen nationalen Datenzentren übermittelt (d.h.

Gefässpflanzen an Info Flora, Moose an Swissbryophytes, und Flechten an SwissLichens). Pdfs der Datenblätter werden ebenfalls an die Koordinationsstelle in Wien übermittelt.

Die Datenreihe der GLORIA Gipfel über die vergangenen ~20 Jahre wird als Grundlage zur Beantwortung verschiedener Fragestellungen dienen. Diese werden teilweise im Rahmen von Master Projekten bearbeitet, teilweise durch die Antragstellenden selbst. Darüber hinaus planen wir, eine Synthese über alle drei Schweizer GLORIA-Zielregionen zu verfassen, um Übereinstimmungen und Gegensätze zu analysieren und Rückschlüsse von allgemeinerer Gültigkeit zu erhalten. Diese Arbeiten werden in Zusammenarbeit der Hauptantragssteller über die folgenden 1-2 Jahre ausgeführt.

Literatur

Adamczyk, M., Hagedorn, F., Wipf, S., Donhauser, J., Vittoz, P., Rixen, C., Frossard, A., Theurillat, J. P., & Frey, B. (2019). The Soil Microbiome of GLORIA Mountain Summits in the Swiss Alps. *Frontiers in Microbiology* 10.

Bürli, S., Theurillat, J. P., Winkler, M., Lamprecht, A., Pauli, H., Rixen, C., Steinbauer, K., Wipf, S., ... & Vittoz, P. (2021). A common soil temperature threshold for the upper limit of alpine grasslands in European mountains. *Alpine Botany* 131, 41-42.

Carron, M. (2019). Impacts du changement climatique sur les bryophytes et lichens dans les Alpes suisses (Val d'Entremont, Valais). Thèse de Bachelor, Université de Lausanne.

Djukic, I., Kepfer-Rojas, S., Schmidt, I.K., Larsen, K.S., Beier C., et al. (2018). Early stage litter decomposition across biomes. *Science of The Total Environment* 628-629, 1369-1394.

Dullinger, S., Kleinbauer, I., ... Theurillat, J.P., Vittoz, P. & Grabherr, G. (2007) Weak and variable relationships between environmental severity and small-scale co-occurrence in alpine plant communities. *Journal of Ecology* 95, 1284-1295.

Dullinger, S., Gattringer, A., Thuiller, W., Moser, D., Zimmermann, N. E., Guisan, A., Willner, W., Plutzer, C., Leitner, M., Mang, T., Caccianiga, M., Dirnböck, T., Ertl, S., , . . . , & Hülber, K. (2012). Climate warming, dispersal limitation and extinction debt of European mountain plants. *Nature Climate Change* 2, 619-622.

European Commission: Environment Directorate General (2009) Natura 2000 in the Alpine region. Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.

Gottfried, M., Pauli, H., ..., Theurillat, J.-P., ..., 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. (1994) Climate effects on mountain plants. *Nature* 369, 448.

IPBES (2018) The IPBES regional assessment report on biodiversity and ecosystem services for Europe and Central Asia. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.

IPCC (2019) IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. IPCC Report.

Körner, C. (2000) Why are there global gradients in species richness? Mountains may hold the answer. *TREE* 15, 513.

- Kwon, T., H. Shibata, S. Kepfer-Rojas, I. K. Schmidt, K. S. Larsen, C. Beier, et al. (2021). Effects of climate and atmospheric nitrogen deposition on early to mid-term stage litter decomposition across biomes. *Frontiers in Forests and Global Change* 4(90), 678480.
- Lachat, T., Pauli, D., Gonseth, Y., Klaus, G., Scheidegger, C., Vittoz, P. & Walter, T. (2010) Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Haupt Verlag, Bern.
- Lembrechts, J.J., Aalto, J., Ashcroft, M.B., De Frenne, P., Kopecký, M., Lenoir, J., ... Nijs, I. (2020). SoilTemp: a global database of near-surface temperature. *Global Change Biology* 26(11), 6616-6629.
- Matteodo, M., Wipf, S., Stöckli, V., Rixen, C. & Vittoz, P. (2013) Elevation gradient of successful plant traits for colonizing alpine summits under climate change. *Environmental Research Letters* 8, 024043.
- Nagy, L., Thompson, D. B. A., Grabherr, G. & Körner, C. (2003a) Alpine Biodiversity in Europe: an introduction. Joint Nature Conservation Committee, Report: 1-10. 2003. Peterborough.
- Nagy, L., Grabherr, G., Körner, C., & Thompson, D. B. A. 2003b. Alpine biodiversity in space and time: a synthesis. *In: Nagy, L., Grabherr, G., Körner, C. & Thompson, D. B. A. (eds). Alpine biodiversity in Europe. Springer, Heidelberg. pp. 453-464.*
- Nicklas, L., Walde, J., Wipf, S., ..., Rixen, C., Steinbauer, K., Theurillat, J.-P., Unterluggauer, P., Vittoz, P., ... & Erschbamer, B. (2021). Climate change affects vegetation differently on siliceous and calcareous summits of the European Alps. *Frontiers in Ecology and Evolution* 9(642309), 1-15.
- Niederheiser, R., Winkler, M., Di Cecco, V., Erschbamer, B., ..., Theurillat, J.-P., Vittoz, P. & Rutzinger, M. (2021). Using automated vegetation cover estimation from close-range photogrammetric point clouds to compare vegetation location properties in mountain terrain. *GIScience & Remote Sensing* 58(1), 120-137.
- Pauli, H., Gottfried, M., Dullinger, S., ..., Theurillat, J.-P., ..., Vittoz, P. & Grabherr, G. (2012). Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits. *Science* 336(6079), 353-355.
- Pauli, H., Gottfried, M., Lamprecht, A., Niessner, S., Rumpf, S., Winkler, M., Steinbauer, K., & Grabherr, G. (2015) The GLORIA field manual – standard Multi-Summit approach, supplementary methods and extra approaches (5th ed.). GLORIA-Coordination, Austrian Academy of Sciences & Boku Wien.
- Pepin, N., Bradley, R. S., Diaz, H. F., Baraër, M., ... & Mountain Research Initiative EDW Working Group (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature climate change* 5(5), 424-430.
- Raible, C.C. & Strassmann, K.M. (eds.) (2014) CH2014-Impacts: toward quantitative scenarios of climate change impacts in Switzerland. Bern, Federal Office for the Environment (FOEN/ BAFU).
- Randin, C. F., Engler, R., Normand, S., Zappa, M., Zimmermann, N. E., Pearman, P. B., Vittoz, P., Thuiller, W., & Guisan, A. (2009). Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology* 15(6), 1557-1569.
- Rebetez, M. & Reinhard, M. (2008). Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. *Theoretical and Applied Climatology* 91(1), 27-34.

- Rogora, M., Frate, L., Carranza, M.L., Freppaz, M., . . . Matteucci, G. (2018). Assessment of climate change effects on mountain ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines. *Science of The Total Environment* 624, 1429-1442.
- Rumpf, S. B., Gravey, M., Brönnimann, O., Luoto, M., Cianfrani, C., Mariéthoz, G. & Guisan, A. (2022). From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science* 376, 1119-1122.
- Scherrer, D. & Körner, C. (2011) Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against warming. *Journal of Biogeography* 38, 406-416.
- Stade, I., Pereira, H., Daskalova, G. N., ..., Wipf, S. ..., Rixen, C., ..., Theurillat, J.-P., ..., Vittoz, P., ... & Baeten, L. (2022). Directional turnover towards larger-ranged plants over time and across habitats. *Ecology Letters*, 10.1111/ele.13937
- Steinbauer, M. J., Grytnes, J.-A., Jurasinski, G., Kulonen, A., Lenoir, J., Pauli, H., Rixen, C., ..., Theurillat, J.-P., Vittoz, P., ... & Wipf, S. (2018). Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature* 556(7700), 231-234.
- Stöckli, V., Wipf, S., Nilsson, C. & Rixen, C. (2011) Using historical plant surveys to track biodiversity on mountain summits. *Plant Ecology & Diversity* 4, 415-425.
- Vitasse, Y., Ursenbacher, S., ..., Rixen, C., ..., Wipf, S., ... & Lenoir, J. (2021). Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps. *Biological Reviews* 96(5), 1816-1835.
- Vittoz, P., Bayfield, N., Brooker, R., Elston, D., Duff, B., Theurillat, J.-P. & Guisan, A. (2010a) Reproducibility of species lists, visual cover estimates and frequency methods for recording high mountain vegetation. *Journal of Vegetation Science* 21, 1035-1047.
- Vittoz, P., Camenisch, M., ... Miserere, L., Vust, M. & Theurillat, J.-P. (2010b) Subalpine-nival gradient of species richness for vascular plants, bryophytes and lichens in the Swiss Inner Alps. *Botanica Helvetica* 120, 139-149.
- Vittoz, P., Dussex, N., Wassef, J. & Guisan, A. (2009) Diaspore traits discriminate good from weak colonisers on high-elevation summits. *Basic and Applied Ecology* 10, 508-515.
- Walther, G.-R., Beissner, S. & Burga, C.A. (2005) Trends in the upward shift of alpine plants. *Journal of Vegetation Science* 16, 541-548.
- Wild, R. (2016) Richness increase and thermophilization of alpine vegetation on Swiss mountain summits - Analysis of plant trait changes over the last 14 years on 12 GLORIA summits. Ms Thesis, ETH Zürich.
- Winkler, M., Lamprecht, A., Steinbauer, K., Hülber, K., Theurillat, J.-P., ..., Rixen, C.,... & Pauli, H. (2016). The rich sides of mountain summits – a pan-European view on aspect preferences of alpine plants. *Journal of Biogeography*, 43, 2261-2273.
- Wipf, S., Stöckli, V., Herz, K. & Rixen, C. (2013) The oldest monitoring site of the Alps revisited: Accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835. *Plant Ecology & Diversity* 6, 447-455.
- Wipf, S. (2016). Ergebnisse GLORIA SNP 2015. Cratschla: Informationen aus dem Schweizerischen Nationalpark, 2016-1, 12-13.
- Wipf, S. & Rixen, C. (2018) Long-term changes in summit plant diversity in the Swiss National Park. Extended abstract. In K. Bauch (Ed.), 6th symposium for research in protected areas (pp. 741-744). Salzburger Nationalparkfonds.



Team GLORIA SNP auf dem letzten Gipfel 2022 (Piz Murtèr). Im Bild oben v.l.: Corinna Romeikat (Praktikantin/Ms Studentin), Hakim Schepis (wiss. MA), Larysa Borovyk (wiss. MA), Tobias Moser (Moos-Aufnahmen, FUB AG), Nahuel Ozan (Gast, IT SNP). Unten v.l. Sandra Djabarow (Praktikantin/Ms Studentin), Sonja Wipf (PI/Projektleiterin), Joshua King (Praktikant). Es fehlen: Raphael von Büren (wiss. MA), Christian Rixen (Co-PI, SLF).

Wir bedanken uns herzlich für die Finanzierung bei:

Bundesamt für Umwelt Bafu, Forschungskommission SNP, Legat Dr. Joachim de Giacomo/SCNat, Amt für Umwelt Kanton Graubünden, ERC Microclim grant von Prof. Stefan Dulling (Universität Wien), Universität Lausanne, Gemeinde Val de Bagne, Stiftung Ignace Mariétan, SNFP Kanton Wallis