

Die Alpenflora im Anthropozän

Sabine Rumpf

Zusammenfassung

Die Alpenflora wird nicht nur vom Klimawandel beeinflusst, sondern unterliegt vielfältigen menschengemachten Stressoren des Anthropozäns. Besonders bedeutend sind zusätzlich der übermäßige Stickstoffeintrag durch Landwirtschaft, Industrie und Verkehr, der über atmosphärische Depositionen auch das Hochgebirge erreicht, sowie die Landnutzungsänderung. Das hat vom Weltall aus sichtbare Folgen: Die Alpen ergrünen durch eine Zunahme an pflanzlicher Biomasse. Diese Entwicklung lässt sich auf drei Mechanismen zurückführen: erhöhtes Wachstum bestehender Arten, zunehmende Dominanz größerwüchsiger Arten und die Besiedelung neuer Standorte in höheren Lagen. Gewinner sind meist Arten aus tieferen Lagen, die durch längere Vegetationszeiten und eine bessere Nährstoffnutzung profitieren. Arten aus höheren Lagen – spezialisiert und konkurrenzschwach – gehören zu den Verlierern. Ihre Populationen schrumpfen. Zudem reagieren alpine Pflanzen verzögert auf Umweltveränderungen und sind im Ungleichgewicht mit den aktuellen Umweltbedingungen, was Prognosen erschwert. Sich ausbreitende gebietsfremde Arten könnten dieses Ungleichgewicht weiter verstärken. Die derzeit sichtbaren Veränderungen sind daher nur ein Teil der Konsequenzen bereits erfolgter Umweltveränderungen.

Summary

The flora of the European Alps in the Anthropocene

The Alpine flora is not only affected by climate change but is also subject to a variety of human-made stressors characteristic of the Anthropocene. Particularly significant are in addition the excessive nitrogen input from agriculture, industry, and transportation, which reach even high mountain regions through atmospheric depositions, as well as land use changes. These impacts have consequences visible from space: the Alps have become greener due to an increase in plant biomass. This development can be attributed to three mechanisms: enhanced growth of existing species, increasing dominance of larger species, and the colonization of new sites at higher elevations. The winners are species from lower elevations, which benefit from longer growing seasons and improved nutrient availability. Species native to higher elevations – specialized and less competitive – are among the losers, with their populations decreasing. Moreover, alpine plants react only slowly to environmental changes and are in disequilibrium with current conditions, making predictions difficult. Newly arriving non-native species could further exacerbate this disequilibrium. Further consequences of already occurred environmental changes can therefore be expected.

Der Beitrag basiert auf einem von der Autorin überarbeiteten Transkript ihres Vortrags vom 25. März 2025 in der Bayerischen Akademie der Wissenschaften.

✉ Prof. Dr. Sabine Rumpf, Universität Basel, Departement Umweltwissenschaften, Bernoullistrasse 32, 4056 Basel, Schweiz; sabine.rumpf@unibas.ch

Einführung

Die Alpenflora ist nicht nur dem Stressor Klimawandel unterworfen, sondern unterliegt vielen verschiedenen Stressoren. Daher handelt dieser Beitrag nicht nur von der Alpenflora in Zeiten des Klimawandels wie ursprünglich angekündigt, sondern von der Alpenflora im Anthropozän. Der Begriff Anthropozän ist mittlerweile weit verbreitet, obwohl er nach wie vor nicht genau definiert ist (Zalasiewicz et al. 2024). In der Ökologie wird er verwendet, um grundlegende Veränderungen der Form und Funktion der Biosphäre zu beschreiben, die maßgeblich durch den Menschen verursacht wurden und die Erde grundlegend verändert haben. Spätestens seit der Erfindung der Dampfmaschine und dem Beginn der industriellen Revolution in der Mitte des 18. Jahrhunderts nimmt die menschliche Bevölkerung exponentiell zu. Gleichzeitig nahm auch der Ressourcenverbrauch der menschlichen Bevölkerung exponentiell zu – vom Wasserverbrauch über den Düngemiteleinsatz bis hin zum Papierverbrauch, dem internationalen Tourismus und der Zahl an Kraftfahrzeugen oder McDonalds-Restaurants (Steffen et al. 2007). Dieser Ressourcenverbrauch hat dazu geführt, dass sich der direkte Einfluss des Menschen mittlerweile über alle ertragreichen Gebiete unseres Planeten erstreckt. Weniger als ein Drittel der Landoberfläche ist nur minimal genutzt, v. a. in den Polargebieten, in den Wüstengebieten, aber auch in den Hochgebirgen (IPCC 2019a). Die Folgen dieses menschlichen Ressourcenverbrauchs sind ebenfalls exponentiell. Sie reichen von atmosphärischen Folgen wie z. B. der Zunahme von Treibhausgaskonzentrationen, marinen Folgen wie der Überfischung der Ozeane zu terrestrischen Folgen wie dem Verlust der Biodiversität (Steffen et al. 2011). Der einzige Faktor, der gemäß der Veröffentlichung von Steffen et al. (2011) erst seit ca. 1970 exponentiell ansteigt und vorher kleinere Maxima und Minima aufwies (z. B. nach dem Ausbruch des Mt. Pinatobu 1990), sind die Anomalien in der durchschnittlichen Oberflächentemperatur der nördlichen Hemisphäre. Obwohl der Klimawandel Bergregionen stärker betrifft und er ein anerkannter Hauptfaktor für die Veränderungen der Alpenflora im Anthropozän ist, deutet dies bereits darauf hin, dass er wahrscheinlich nicht der einzige ausschlaggebende Faktor ist.

Stickstoffeinträge und planetare Belastbarkeitsgrenzen

Aus ökologischer Sicht war eine der ausschlaggebendsten Erfindungen des letzten Jahrhunderts das Haber-Bosch-Verfahren, durch das nicht-reaktiver, atmosphärischer Stickstoff zu synthetischem Stickstoffdünger umgewandelt werden kann. Im Jahr 1909 titelten die Zeitungen »Deutsche Chemiker besiegen den Hunger der Welt«, da die landwirtschaftliche Produktion deutlich gesteigert werden konnte. Der technische Fortschritt hat dazu geführt, dass dieses Verfahren kostengünstig geworden ist und weitläufig etabliert ist – mittlerweile wird etwa die Hälfte der Weltbevölkerung durch die Verfügbarkeit dieses Düngers ernährt (Erisman et al. 2008). Die Schattenseite ist jedoch, dass der Umgang mit der Ressource Dünger verschwenderisch geworden ist. Nur 17 % des als Dünger eingesetzten synthetischen Stickstoffs wird durch den Menschen in Form von Nahrungsmitteln konsumiert, die Hälfte gelangt hingegen in die Umwelt, z. B. durch eine Verringerung der Nutzungseffizienz. Dies betrifft allerdings nicht nur jene Gebiete, in denen synthetischer Stickstoff ausgebracht wird. Stickstoff aus der Landwirtschaft wird als Ammonium emittiert und gelangt zusammen mit Stickoxiden und Schwefeldioxyden aus dem Verkehr und der Industrie in die Atmosphäre. Durch die Klima- und Wettersysteme werden diese Emissionen verfrachtet und gelangen vor allem durch sogenannte nasse Depositionen, also durch Niederschläge, die an Bergketten gehäuft auftreten, in das Hochgebirge. Durch ihren Ressourcenverbrauch und die Nutzungsineffizienz führt die Menschheit daher ein gigantisches Düngeexperiment in den Bergen durch.

Auch global gesehen hat dies bereits dazu geführt, dass die planetare Belastbarkeitsgrenze des biogeochemischen Kreislaufs von Stickstoff deutlich überschritten ist (Richardson et al. 2023). Werden solche Belastbarkeitsgrenzen überschritten, erhöht sich das Risiko großräumiger, abrupter und irreversibler Umweltveränderungen. Mittlerweile sind sechs der neun planetaren Belastbarkeitsgrenzen überschritten (Abb. 1, Richardson et al. 2023). Zum Vergleich: 2009 waren nur drei von den damals sieben bewerteten Grenzen überschritten (biogeochemische Kreisläufe, Integrität der Biosphäre, Klimawan-

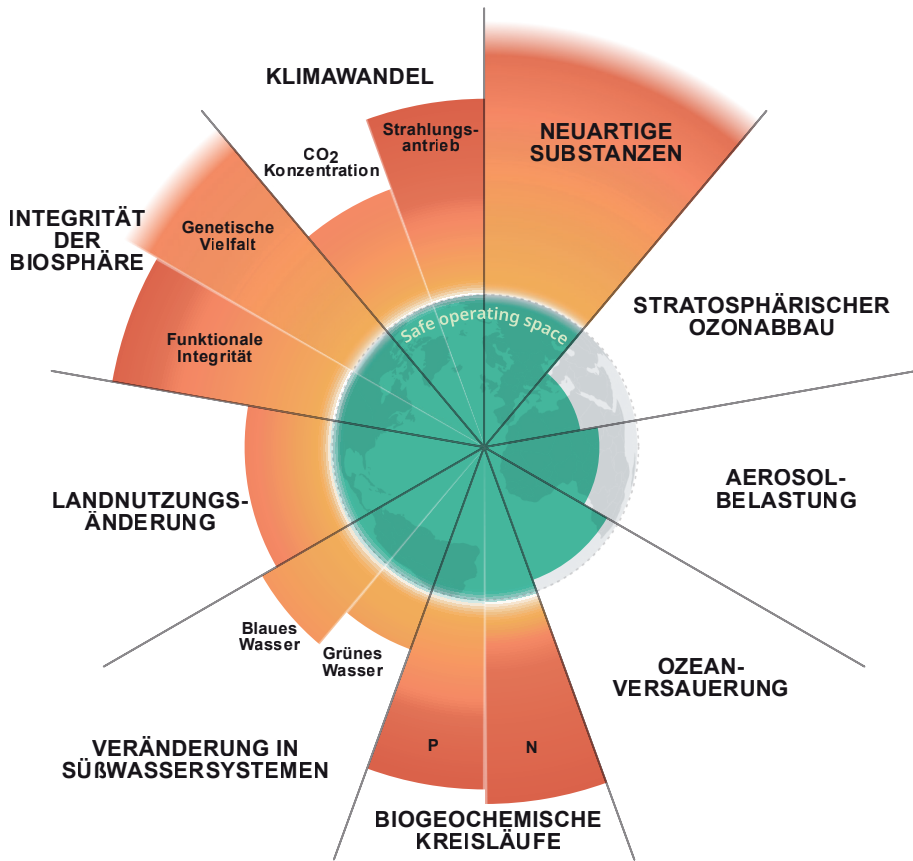


Abb. 1. Zustand der planetaren Belastbarkeitsgrenzen im Jahr 2023. Der innere, grüne Kreis zeigt den sicheren Handlungsraum an. Wird dieser überschritten, besteht ein erhöhtes (orange) bis hohes (rot) Risiko großräumiger, abrupter und irreversibler Umweltveränderungen. – Azote for Stockholm Resilience Centre, basierend auf Richardson et al. (2023), CC BY-NC-ND 3.0; dt. Übersetzung: DeWikiMan, CC BY-SA 4.0.

del; Steffen et al. 2015), doch bereits 2015 kam die Landnutzungsänderung als vierte überschrittene Grenze hinzu (Rockström et al. 2009).

Die Folgen sind vom Weltall aus sichtbar: Die Alpen ergrünen

Obwohl Bergregionen weniger direkten menschlichen Einflüssen unterliegen als das Flachland, haben die gravierenden Umweltveränderungen im Laufe des Anthropozäns auch markante Auswirkungen auf die Ökologie und Vegetation der Alpen. Bereits bei der Entstehung der Forschungsdisziplin Ökologie zu der Zeit von Alexander von Humboldt im 19. Jahrhundert wurde festgehalten, dass die Form, Funktion und Zusammensetzung von Pflanzen aufgrund

der abnehmenden Temperatur entlang des Höhengradienten stratifiziert ist (Abb. 2). Die Vegetation ist in den tieferen Lagen üppiger und wird mit zunehmender Höhe kleinwüchsiger und spärlicher. Dies liegt jedoch nicht nur an der Temperatur. Auch die Böden sind in höheren Lagen nährstoffärmer, woran die Alpenflora angepasst ist. Die traditionelle Landnutzung in diesen vergleichsweise ertragsarmen Gebieten besteht daher aus Wiesen und Weiden. Diese drei Umweltfaktoren veränderten sich jedoch im Laufe des Anthropozäns. Die Alpen erwärmen sich deutlich schneller als der globale Durchschnitt, der zusätzliche Stickstoffeintrag erhöht die Nährstoffverfügbarkeit und die traditionelle Landnutzung wird in höheren Lagen zunehmend aufgegeben, gekoppelt mit der Erschließung des

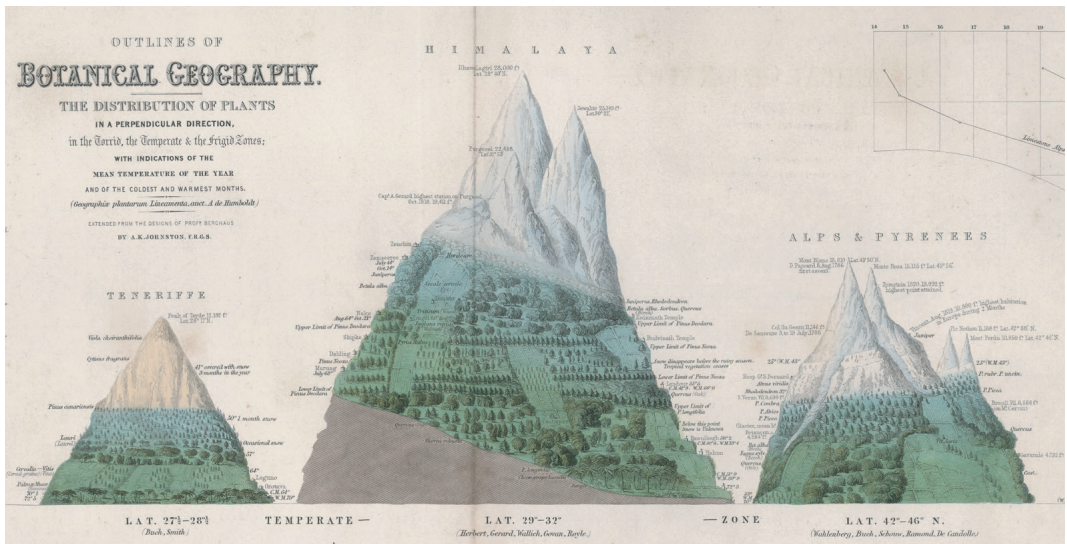


Abb. 2. Ausschnitt aus der Karte von A. K. Johnston: The Geographical Distribution of Plants. Outlines of Botanical Geography, The Distribution of Plants in a Perpendicular Direction (1848). – David Rumsey Map Collection, David Rumsey Map Center, Stanford Libraries; CC BY-NC-SA 3.0.

alpinen Raums für den Tourismus, wobei sie in den niederen Lagen zunimmt (IPCC 2019b). Die Folgen sind vom Weltall aus sichtbar. In den letzten 40 Jahren hat zwar die permanente Schneebedeckung nur auf 9 % der Fläche oberhalb der Baumgrenze abgenommen, die pflanzliche Biomasse jedoch auf 77 % zugenommen – die Alpen ergrünen zunehmend (Abb. 3, Rumpf et al. 2022).

Mechanismen der Ergrünung

Die Zunahme der pflanzlichen Biomasse im alpinen Raum kann man in drei Mechanismen gliedern. Erstens wurde in einer groß angelegten Untersuchung in polaren und alpinen Ökosystemen festgestellt, dass Individuen ein- und derselben Pflanzenart an Standorten mit höheren Sommertemperaturen höherwüchsig sind (Bjorkman et al. 2018). Das bedeutet, dass durch die Klimaerwärmung mehr Biomasse produziert wird – auch ohne eine Veränderung der Vegetationszusammensetzung. Zweitens gibt es Arten, die von Natur aus höherwüchsig sind als andere. Auch wenn sich die Artenzusammensetzung nicht ändert, erhöht sich daher ihre Biomasse, wenn die Häufigkeit dieser Arten innerhalb einer Pflanzengesellschaft zunimmt. Eine Mög-

lichkeit, derartige Häufigkeitsveränderungen zu analysieren, bietet der Gini-Koeffizient. Er wurde ursprünglich in den Wirtschaftswissenschaften entwickelt, um die Einkommensverteilung – oder anders ausgedrückt, die soziale Ungleichheit – und ihre Entwicklung in der Bevölkerung eines Landes zu erfassen. Wenn man die Häufigkeit einer Art als ihr Kapital betrachtet, erlaubt es der Gini-Koeffizient, die Entwicklung der »sozialen Ungleichheit« von Pflanzengesellschaften zu berechnen. So wurde nachgewiesen, dass die soziale Ungleichheit von Pflanzenarten im Laufe des letzten Jahrhunderts in ganz Deutschland zugenommen hat (Jandt et al. 2022). Wenige Arten haben stark an Häufigkeit zugenommen und könnten als »superreiche« Gewinner bezeichnet werden, wohingegen die Mehrheit relativ einheitlich weniger häufig geworden ist und somit zu den Verlierern zählt.

Drittens kann sich die Artenzusammensetzung verändern. Wenn Pflanzen ehemals vegetationsfreie Standorte besiedeln oder höherwüchsige Arten an einem Standort einwandern, führt dies ebenfalls zu einer Zunahme der Biomasse. Das gängigste Beispiel für solche Verbreitungsverschiebungen von Pflanzen ist der Anstieg der Baumgrenze, da die frühere Position der Baumgrenze relativ leicht durch historische

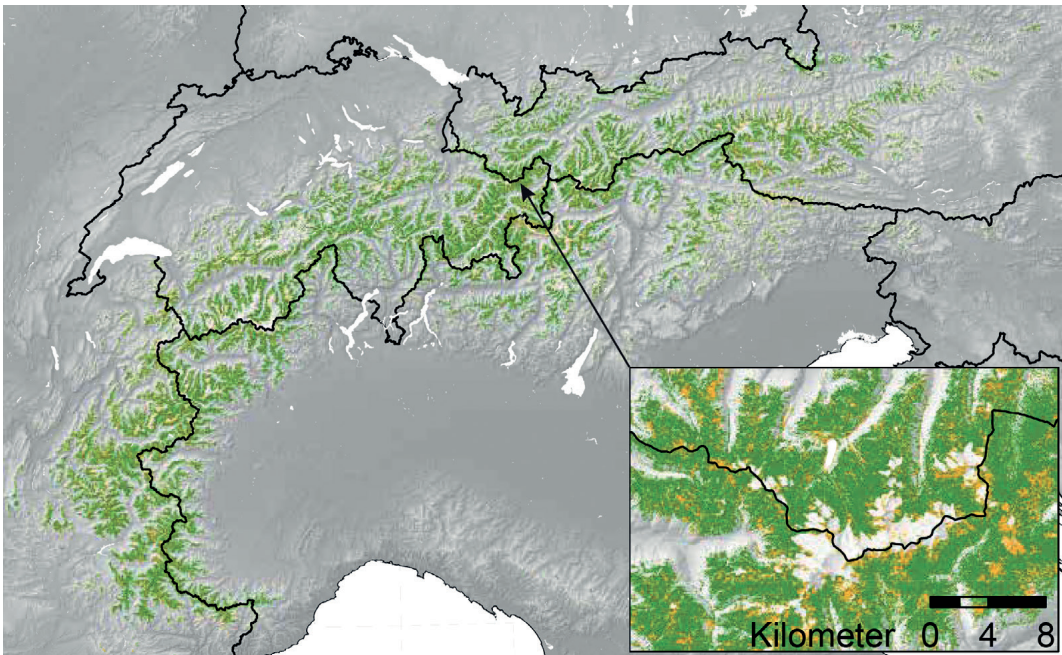


Abb. 3. Veränderungen der pflanzlichen Biomasse in den Alpen. Pflanzliche Biomasse oberhalb der Baumgrenze wurde mit Fernerkundungsdaten als normalisierter differenzierter Vegetationsindex (NDVI) von 1984 bis 2021 erhoben. Grüne Bereiche erfuhren eine Ergrünung (d.h. Zunahme der pflanzlichen Biomasse), gelbe Bereiche keine signifikante Veränderung und braune Bereiche eine Erbraunung (d.h. Abnahme). – Basierend auf Rumpf et al. (2022).

Fotografien oder Fernerkundungsdaten verortet werden kann (z.B. dokumentiert von Moiseev & Shiyatov [2003] im Südsural im Zeitraum 1929–1999). Auch in den Alpen wandert die Baumgrenze nach oben, allerdings ist hier der entscheidendste Faktor die menschliche Landnutzungsänderung und nicht der Klimawandel (Gehrig-Fasel et al. 2007). Veränderungen der Artenzusammensetzung statt nur der dominanten Wuchsform im Verlaufe des Anthropozäns zu ermitteln ist hingegen weitaus schwieriger, da dies detaillierte, historische Vegetationsaufnahmen erfordert. In den Alpen gibt es zwar eine Fülle an solchen historischen Daten, z.B. von Josias Braun-Blanquet (1884–1980) und Eduard Rübel (1867–1960), jedoch wurden sie vor der Erfindung des GPS erhoben und sind daher nicht räumlich verortet. Eine Ausnahme stellen Berggipfel dar, da sie auch ohne Koordinaten wieder aufzufinden sind, und die zeitliche Entwicklung der Gipflora wurde daher im Laufe der letzten drei Jahrzehnte eingehend untersucht (z.B. Grabherr et al. 1994, Steinbauer et al. 2018). Es hat sich gezeigt, dass

der pflanzliche Artenreichtum auf Berggipfeln seit ca. 1870 bis gegen Ende des 20. Jahrhunderts relativ konstant zugenommen hat. Danach hat sich die Zunahme des Artenreichtums jedoch sprunghaft beschleunigt und war zwischen 2007 und 2016 etwa fünfmal so hoch wie zwischen 1957 und 1966 (Steinbauer et al. 2018). Das heißt, nicht nur die Baumgrenze verschiebt sich nach oben, sondern auch die oberen Verbreitungsgrenzen alpiner Pflanzenarten – und dies mit zunehmender Geschwindigkeit.

Veränderungen der Verbreitung und Häufigkeit der Alpenflora: Gewinner und Verlierer

Eine Zunahme des Artenreichtums auf Gipfeln scheint auf den ersten Blick eine gute Nachricht für den Fortbestand der Artenvielfalt zu sein. Jedoch entsteht er durch die Verschiebung der Obergrenzen von Arten und lässt keine Rückschlüsse über die Gefährdung von Arten und damit dem Fortbestand der Artenvielfalt zu. Die

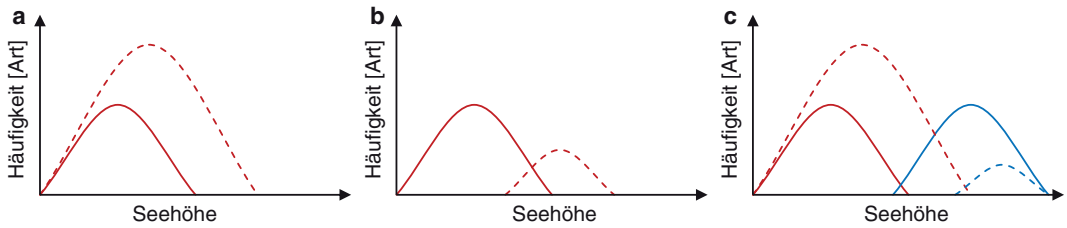


Abb. 4. Veränderungen des Verbreitungsgebietes und der Häufigkeit der Alpenflora in Abhängigkeit der Seehöhe; **a:** Gewinner zeichnen sich durch eine Vergrößerung des Verbreitungsgebietes und eine Zunahme der Häufigkeit aus; **b:** Verlierer zeichnen sich durch eine Verkleinerung des Verbreitungsgebietes und eine Abnahme der Häufigkeit aus; **c:** Gewinner der rezenten Umweltveränderungen stammen aus niederen Lagen, Verlierer aus höheren.

Gefährdung einer Art sollte sich davon ableiten, wie sich ihre Häufigkeit und die Größe ihres Verbreitungsgebietes über die Zeit verändern. Die entscheidende Frage ist daher, was an den unteren Verbreitungsgrenzen der Arten passiert und wie sich ihre Häufigkeiten verändern. Einerseits könnte die Untergrenze stabil sein und in Kombination mit dem Höherwandern der Obergrenze zu einer Vergrößerung des Verbreitungsgebietes führen. Wenn dies zusätzlich gekoppelt wäre mit einer Zunahme der Häufigkeit, wäre eine solche Art ein klarer Gewinner der Umweltveränderungen (Abb. 4a). Andererseits könnte sich die Untergrenze schneller nach oben verschieben als die Obergrenze, damit zu einer Verkleinerung des Verbreitungsgebietes führen und zusätzlich mit einer Abnahme der Häufigkeit auftreten, was solche Arten als klare Verlierer identifizieren würde (Abb. 4b). Um diese kombinierten Veränderungen zu eruieren, wurden über 1500 historische Vegetationsaufnahmen in den Alpen über die angegebenen topografischen Parameter und Ortsbeschreibungen statt über die fehlenden GPS-Koordinaten lokalisiert und erneut erhoben (Rumpf et al. 2018). Diese Vegetationsaufnahmen stammen aus dem Zeitraum 1911–1970 und erstrecken sich über einen Höhengradienten von fast 3000 Metern. Die Daten zeigten, dass Arten aus ursprünglich tieferen Lagen schneller nach oben wandern, vergrößerte Verbreitungsgebiete einnehmen und abundanter geworden sind und somit zu den Gewinnern gehören. Arten aus höheren Lagen wanderten hingegen langsamer nach oben, hatten kleinere Verbreitungsgebiete und Häufigkeiten und gehören somit zu den Verlierern (Abb. 4c).

Diese ungleichen Veränderungen könnten mehrere Gründe haben. So sind z.B. die Vegetationsperioden in den tieferen Lagen aufgrund der höheren Temperaturen länger. Das kann dazu führen, dass die Arten in jenen Gebieten aufgrund des längeren Zeitfensters eine höhere Wahrscheinlichkeit haben, sich sexuell und asexuell zu vermehren. Arten in höheren Lagen sind hingegen an tiefe Temperaturen angepasst, sind nicht allzu konkurrenzstark und reagieren nur langsam auf Veränderungen. Zusätzlich hat sich jedoch gezeigt, dass die Nährstoffverfügbarkeit bzw. die Anpassung der Arten daran eine große Rolle spielt. Arten aus tieferen Lagen können die zusätzlichen Nährstoffe tendenziell besser nutzen und in ein gesteigertes Wachstum umsetzen und sie gehören somit zu den Gewinnern (Rumpf et al. 2018), wie die Alpen-Kratzdistel (*Cirsium spinosissimum*), die Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), das Eberraute-Greiskraut (*Senecio abrotanifolius*), der Salzburger Augentrost (*Euphrasia salisburgensis*), die Nacktstängelige Kugelblume (*Globularia nudicaulis*) und das Alpen-Vergissmeinnicht (*Myosotis alpestris*) (Abb. 5). Im Gegensatz dazu sind Arten aus höheren Lagen an Nährstoffmangel angepasst und gehören somit zu den Verlierern, deren lokales Aussterberisiko gesteigert sein könnte, wie das Alpen-Edelweiß (*Leontopodium alpinum*), der Maßlieb-Ehrenpreis (*Veronica bellidioides*), das Quirlblättrige Läusekraut (*Pedicularis verticillata*), der Westalpen-Klee (*Trifolium alpinum*), der Schnee-Enzian (*Gentiana nivalis*) und der Blaigrüne Steinbrech (*Saxifraga caesia*) (Rumpf et al. 2018; Abb. 6). Die schnellere Ausbreitung konkurrenzstärkerer Arten aus tieferen Lagen, die von den Umweltveränderungen profitie-

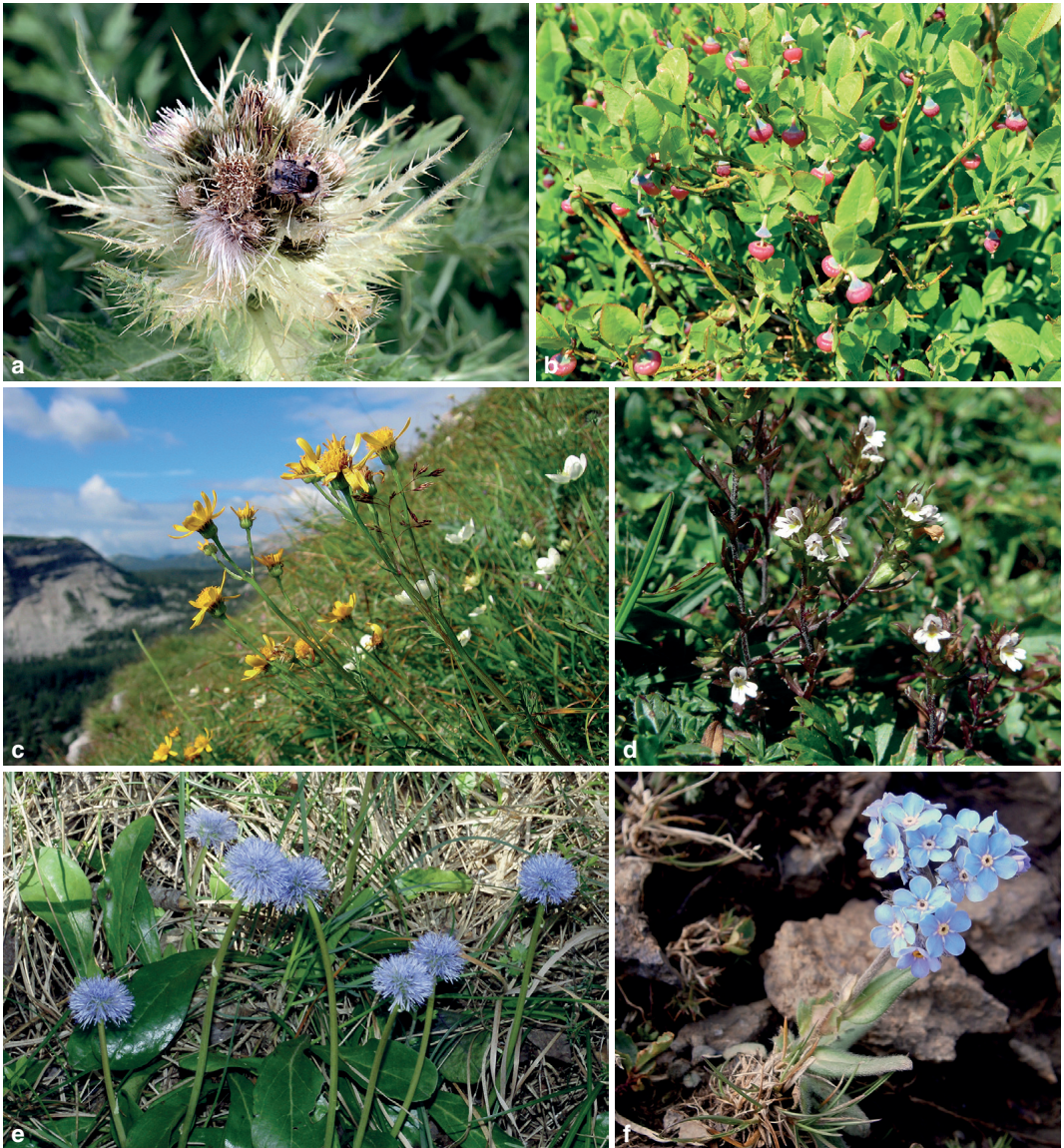


Abb. 5. Beispiele für Gewinner in der Alpenflora; **a:** Alpen-Kratzdistel (*Cirsium spinosissimum*), **b:** Heidelbeere (*Vaccinium myrtillus*), **c:** Eberraute-Greiskraut (*Senecio abrotanifolius*), **d:** Salzburger Augentrost (*Euphrasia salisburgensis*), **e:** Nackstängelige Kugelblume (*Globularia nudicaulis*), **f:** Alpen-Vergissmeinnicht (*Myosotis alpestris*). – Fotos: gemeinfrei; a: Hedwig Storch, CC BY-SA 3.0; b: Rosa-Maria Rinkl, CC BY-SA 4.0; c: Tigerente, CC BY-SA 3.0; d: Bernd Haynold, CC BY-SA 3.0; e: Robert Flogaus-Faust, CC BY 4.0; f: Meneerke bloem, CC BY 3.0.

ren, erhöht daher zusätzlich den Druck auf die abnehmenden Populationen von Arten aus höheren Lagen.



Abb. 6. Beispiele für Verlierer in der Alpenflora; **a:** Alpen-Edelweiß (*Leontopodium alpinum*), **b:** Maßlieb-Ehrenpreis (*Veronica bellidioides*), **c:** Quirlblättriges Läusekraut (*Pedicularis verticillata*), **d:** Westalpen-Klee (*Trifolium alpinum*), **e:** Schnee-Enzian (*Gentiana nivalis*), **f:** Blaugrüner Steinbrech (*Saxifraga caesia*). – Fotos: gemeinfrei; a: Wolfgang Moroder, GFDL and CC-BY 2.5; b,d: Meneerke bloem, CC BY-SA 4.0; c: Daniel Ballmer, CC BY-SA 4.0; e: Robert Flogaus-Faust, CC BY 4.0; f: Udo Schmidt, CC BA-SA 2.0.

Zukünftige Konsequenzen vergangener Umweltveränderungen

Die Berechnung zukünftiger Artverbreitungen anhand von Modellen erfordert Informationen darüber, wo und unter welchen Bedingungen

welche Arten vorkommen. Hierfür werden typischerweise die heutigen Vorkommen von Arten verwendet. Das kann für alpine Pflanzenarten jedoch problematisch sein, da sie relativ langlebig sind und die kurzen Vegetationsperioden dazu führen, dass viele Jahre ohne

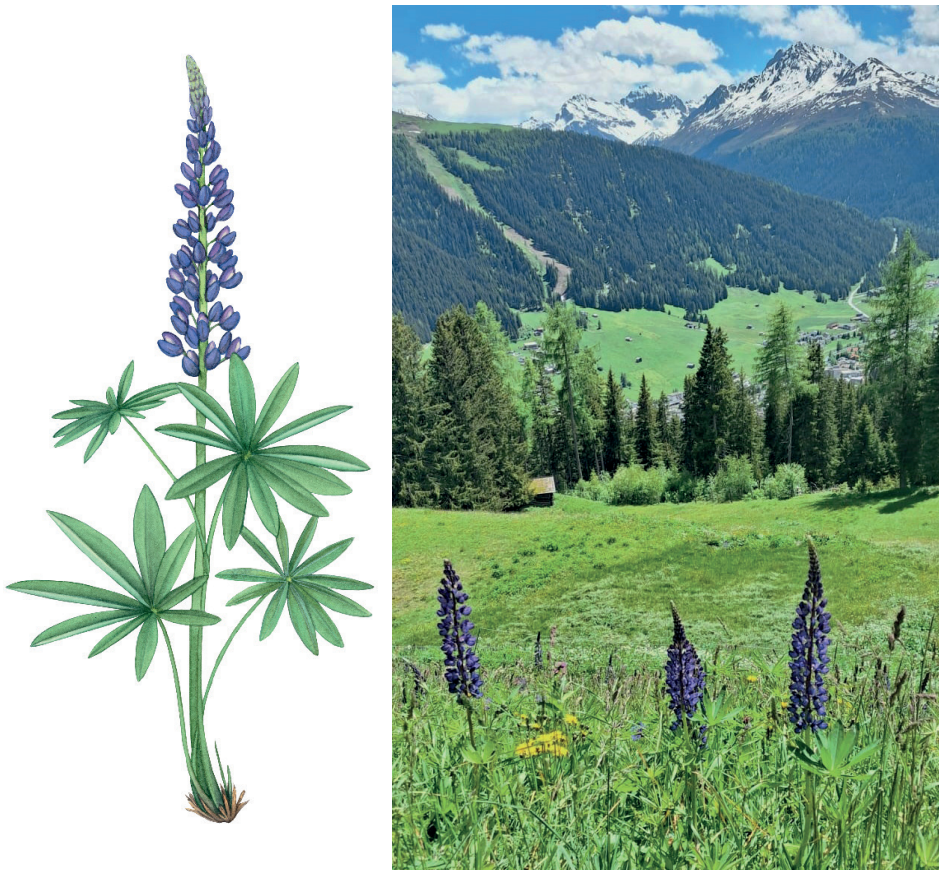


Abb. 7. Beispiel einer gebietsfremden Pflanzenart in den Alpen. Die vielblättrige Lupine (*Lupinus polyphyllus*) stammt ursprünglich aus Nordamerika und wurde als Zierpflanze eingeführt. Mittlerweile breitet sie sich in Bergwiesen aus (Foto: oberhalb von Davos, Schweiz). Sie enthält für Weidevieh giftige Substanzen und verdrängt einheimische Pflanzenarten. – Zeichnung: Julie Johnson, Foto: Anibal Pauchard.

sexuelle Reproduktion auftreten, die nötig ist, um neue Standorte zu besiedeln. Wenn sich die Umweltbedingungen nun verändern, bedeutet das, dass sie nur verzögert darauf reagieren (Rumpf et al. 2019). Für die Besiedlung neu geeigneter Flächen, meist in höheren Lagen, muss eine Art zunächst auf ihrem bisherigen Standort eine ausreichende Menge an Samen produzieren und diese müssen auf die neu geeigneten Flächen gelangen. Sind die Samen in ausreichender Menge auf der neuen Fläche angekommen, müssen sie keimen und die Keimlinge sich etablieren. Durch ein klimatisch ungünstiges, z. B. zu trockenes oder kaltes Jahr oder sogar nur Zeitfenster innerhalb kritischer Entwicklungsstadien kann die Ansiedlung den-

noch verhindert werden. Das bedeutet, dass Jahre vergehen können, bis Arten an neuen Standorten vorkommen – sie haben daher einen sogenannten Besiedelungskredit. Auch an den unteren Verbreitungsgrenzen kann es zu Verzögerungen kommen. Da alpine Arten relativ langlebig sind, bleiben Individuen an einem bereits ungeeigneten Standort bestehen, obwohl sie sich nicht mehr reproduzieren können und weisen eine sogenannte Aussterbeschuld auf. Populationen dieser Arten können zwar immer noch beobachtet werden, aber nach Ablauf ihrer Lebenszeit dort nicht weiter fortbestehen. Durch diese Mechanismen können die Verbreitungen von 93 % der alpinen Flora bereits nicht mehr mit den rapiden Umweltveränderungen Schritt

halten und sind im Ungleichgewicht mit den derzeitigen Umweltbedingungen (Rumpf et al. 2019).

Das hat wesentliche Konsequenzen in Bezug auf Zukunftsvoraussagen. Selbst wenn – in einem utopischen Gedankenspiel – die Umweltveränderungen sofort gestoppt würden, hielten ihre Auswirkungen aufgrund der Verzögerungen bei Ausbreitung, Ansiedelung und Aussterben der alpinen Arten weiterhin an. Das bedeutet aber auch, dass die derzeitigen, modellbasierten Vorhersagen wahrscheinlich zu optimistisch sind, da sie die heutigen Artverbreitungen als Ausgangswerte verwenden und das bereits bestehende Ungleichgewicht daher nicht berücksichtigen. Hinzu kommt, dass nicht alle Arten das gleiche Ausmaß an Verzögerungen aufweisen. Gebietsfremde Pflanzenarten, sogenannte Neophyten, zeichnen sich durch ihre schnelle Ausbreitung aus und dringen immer mehr in Gebirgsökosysteme vor (Iseli et al. 2023; Abb. 7). In von Menschen gestörten Bergregionen wie in Norditalien, breiten sie sich bereits deutlich schneller in höhere Lagen aus als einheimische Arten (Dainese et al. 2017), was deren Ungleichgewicht weiter verstärken könnte.

Fazit

Die Alpen sind überdurchschnittlich vom Klimawandel betroffen und gleichzeitig einem Landnutzungswandel und zusätzlichen Nährstoffeinträgen ausgesetzt. Das führte zu einem verstärkten Wachstum von Pflanzen, zum Häufigerwerden großwüchsiger Pflanzen, zur Besiedelung ehemals vegetationsfreier Standorte und zum Einwandern von großwüchsigeren Arten aus tieferen Lagen. Die Konsequenzen sind vom Weltall aus sichtbar: Die Alpen ergrünen. Es profitieren jedoch nicht alle Arten von diesen Veränderungen. Arten aus höheren Lagen reagieren langsamer, weisen verzögerte Reaktionen auf Umweltveränderungen auf und sind konkurrenzschwächer als die sich schneller ausbreitenden Arten aus tieferen Lagen. Die verzögerten Reaktionen führen zudem dazu, dass die Konsequenzen bereits vergangener Umweltveränderungen noch bevorstehen, während sich gebietsfremde Arten zunehmend in Gebirgsökosystemen ausbreiten und das Gleichgewicht weiter stören könnten.

Literatur

- Bjorkman, A. D., I. H. Myers-Smith, S. C. Elmendorf, S. Normand, N. Rüger, P. S. A. Beck, A. Blach-Overgaard, D. Blok, J. H. C. Cornelissen, B. C. Forbes, ... & E. Weiher. 2018. Plant functional trait change across a warming tundra biome. – *Nature*, 562 (7725): 57–62. DOI: [10.1038/s41586-018-0563-7](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0563-7)
- Dainese, M., S. Aikio, P. Hulme, A. Bertolli, F. Prosser & L. Marini. 2017. Human disturbance and upward expansion of plants in a warming climate. – *Nature Climate Change*, 7: 577–580. DOI: [10.1038/nclimate3337](https://doi.org/10.1038/nclimate3337)
- Erismann, J. W., M. A. Sutton, J. Galloway, Z. Klimont & W. Winiwarter. 2008. How a century of ammonia synthesis changed the world. – *Nature Geoscience*, 1: 636–639. DOI: [10.1038/ngeo325](https://doi.org/10.1038/ngeo325)
- Gehrig-Fasel, J., A. Guisan & N. E. Zimmermann. 2007. Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? – *Journal of Vegetation Science*, 18: 571–582. DOI: [10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x](https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x)
- Grabherr, G., M. Gottfried & H. Pauli. 1994. Climate effects on mountain plants. – *Nature*, 369 (6480): 448. DOI: [10.1038/369448a0](https://doi.org/10.1038/369448a0)
- IPCC. 2019a. Summary for Policymakers. – In: Shukla, P. R., J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi & J. Malley (eds.): *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*. Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/> [abgerufen 20.06.2025]
- IPCC. 2019b. Summary for Policymakers. – In: Pörtner, H.-O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama & N. M. Weyer (eds.): *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*. Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/> [abgerufen 20.06.2025]
- Iseli, E., C. Chisholm, J. Lenoir, S. Haider, T. Seipel, A. Barros, A. L. Hargreaves, P. Kardol, J. J. Lembrechts, K. McDougall, I. Rashid, S. B. Rumpf, J. Ramón Arévalo, L. Cavieres, C. Daehler, P. A. Dar, B. Endress, G. Jakobs, A. Jiménez, C. Küffer, M. Mihoc, A. Milbau, J. W. Morgan, B. J. Naylor, A. Pauchard, A. Ratier Backes, Z. A. Reshi, L. J. Rew, D. Righetti, J. M. Shannon, G. Valencia, N. Walsh, G. T. Wright & J. M. Alexander. 2023. Rapid upwards spread of non-native plants in mountains

- across continents. – *Nature Ecology & Evolution*, 7: 405–413. DOI: [10.1038/s41559-022-01979-6](https://doi.org/10.1038/s41559-022-01979-6)
- Jandt, U., H. Bruelheide, F. Jansen, A. Bonn, V. Gresscho, R. A. Klenke, F. M. Sabatini, M. Bernhardt-Römermann, V. Blüml, J. Dengler, M. Diekmann, I. Doerfler, U. Döring, S. Dullinger, S. Haider, T. Heinken, P. Horschler, G. Kuhn, M. Lindner, K. Metzger, N. Müller, T. Naaf, C. Peppeler-Lisbach, P. Poschlod, C. Roscher, G. Rosenthal, S. B. Rumpf, W. Schmidt, J. Schrautzer, A. Schwabe, P. Schwartz, T. Sperle, N. Stanik, C. Storm, W. Voigt, U. Wegener, K. Wesche, B. Wittig & M. Wulf. 2022. More losses than gains during one century of plant biodiversity change in Germany. – *Nature*, 611 (7936): 512–518. DOI: [10.1038/s41586-022-05320-w](https://doi.org/10.1038/s41586-022-05320-w)
- Moiseev, P. & S. G. Shiyatov. 2003. Vegetation dynamics at the tree-line ecotone in the Ural highlands, Russia. – In: Nagy, L., G. Grabherr, C. Körner & D. B. A. Thompson (eds.): *Alpine Biodiversity in Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg. *Ecological Studies*, 167: 423–435.
- Richardson, K., W. Steffen, W. Lucht, J. Bendtsen, S. E. Cornell, J. F. Donges, M. Drüke, I. Fetzer, G. Bala, W. von Bloh, G. Feulner, S. Fiedler, D. Gerten, T. Gleeson, M. Hofmann, W. Huiskamp, M. Kummu, C. Mohan, D. Nogués-Bravo, S. Petri, M. Porkka, S. Rahmstorf, S. Schaphoff, K. Thonicke, A. Tobian, V. Virkki, L. Wang-Erlandsson, L. Weber & J. Rockström. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries. – *Science Advances*, 9: eadh2458. DOI: [10.1126/sciadv.adh2458](https://doi.org/10.1126/sciadv.adh2458)
- Rockström, J., W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F. S. Chapin III, E. F. Lambin, T. M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H. J. Schellnhuber, B. Nykvist, C. A. de Wit, T. Hughes, S. van der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P. K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R. W. Corell, V. J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen & J. A. Foley. 2009. A safe operating space for humanity. – *Nature*, 461: 472–475. DOI: [10.1038/461472a](https://doi.org/10.1038/461472a)
- Rumpf, S. B., K. Hülber, G. Klonner, D. Moser, M. Schütz, J. Wessely, W. Willner, N. E. Zimmermann & S. Dullinger. 2018. Range dynamics of mountain plants decrease with elevation. – *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 115: 1848–1853. DOI: [10.1073/pnas.1713936115](https://doi.org/10.1073/pnas.1713936115)
- Rumpf, S. B., K. Hülber, J. Wessely, W. Willner, D. Moser, A. Gattringer, G. Klonner, N. E. Zimmermann & S. Dullinger. 2019. Extinction debts and colonization credits of non-forest plants in the European Alps. – *Nature Communications*, 10: 4293. DOI: [10.1038/s41467-019-12343-x](https://doi.org/10.1038/s41467-019-12343-x)
- Rumpf, S. B., M. Gravey, O. Brönnimann, M. Luoto, C. Cianfrani, G. Mariethoz & A. Guisan. 2022. From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. – *Science*, 376 (6597): 1119–1122. DOI: [10.1126/science.abn6697](https://doi.org/10.1126/science.abn6697)
- Steffen, W., P. J. Crutzen & J. R. McNeill. 2007. The Anthropocene: are humans now overwhelming the great forces of nature? – *Ambio*, 36: 614–621. DOI: [10.1579/0044-7447\(2007\)36\[614:TA-AHNO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1579/0044-7447(2007)36[614:TA-AHNO]2.0.CO;2)
- Steffen, W., J. Grinevald, P. Crutzen & J. McNeill. 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. – *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369: 842–867. DOI: [10.1098/rsta.2010.0327](https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0327)
- Steffen, W., K. Richardson, J. Rockström, S. E. Cornell, I. Fetzer, E. M. Bennett, R. Biggs, S. R. Carpenter, W. de Vries, C. A. de Wit, C. Folke, D. Gerten, J. Heinke, G. M. Mace, L. M. Persson, V. Ramanathan, B. Reyers & S. Sörlin. 2015. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. – *Science*, 34: 1259855. DOI: [10.1126/science.1259855](https://doi.org/10.1126/science.1259855)
- Steinbauer, M. J., J. A. Grytnes, G. Jurasinski, A. Kulonen, J. Lenoir, H. Pauli, C. Rixen, M. Winkler, M. Bardy-Durchhalter, E. Barni, ... & S. Wipf. 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. – *Nature*, 556 (7700): 231–234. DOI: [10.1038/s41586-018-0005-6](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0005-6)
- Zalasiewicz, J., J. Adeney Thomas, C. N. Waters, S. Turner & M. J. Head. 2024. The meaning of the Anthropocene: why it matters even without a formal geological definition. – *Nature*, 632 (8027): 980–984. DOI: [10.1038/d41586-024-02712-y](https://doi.org/10.1038/d41586-024-02712-y)

Diskussion

S. Rösler: Im Rahmen des Forschungsprojekts BAYSICS habe ich mich an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf mit dem Höhersteigen von Baumarten in den Bayerischen Alpen beschäftigt. Dank dem Münchner Botaniker Otto Sendtner, der 1854 die »Vegetations-Verhältnisse Südbayerns« veröffentlichte,¹ gibt es dazu hervorragende historische Referenzdaten. Sendtner hatte damals schon sehr genaue barometrische Höhenmessungen durchgeführt – wie man an seinen Höhenangaben für die Berggipfel sieht – und im Auftrag des Königs Maximilian II. in den gesamten Bayerischen Alpen die damalige Höhenverbreitung von Pflanzenarten dokumentiert. Sendtner hatte dabei auch festgehalten, in welchem Gebiet er die höchstgelegenen Vorposten von Zirbe, Buche usw. gefunden hat. In unserem Projekt haben wir nun die rezenten Vorposten mithilfe von Citizen Science erfasst, um herauszufinden, ob sich die obere Höhengrenzen der einzelnen Baumarten in diesen rund 170 Jahren verändert haben.² An der Baumgrenze selbst hat sich dabei sehr wenig getan – bei den Arten des Baumgrenzökotons wie Zirbe und Lärche ist die obere Höhengrenze kaum oder nur wenig gestiegen. Aber weiter unten – im Bergwald – gab es massive Veränderungen: Die Laubbaumarten kommen heute im Bergwald deutlich höher vor als noch vor 170 Jahren. Die Fichte ist ebenfalls deutlich höhergestiegen und dringt in das Areal

der Zirbe vor, die sich jedoch kaum weiter nach oben ausbreitet. Wir konnten relativ ausschließen, dass diese Veränderungen eine Folge von Almwirtschaft sind, da wir Vorposten untersucht haben, d.h., wir haben nicht die Baumgrenze erfasst, sondern – wie Sendtner – die jeweils höchsten Vorkommen einer Art.

E. Grill: Sie haben gezeigt, dass die Stickstoffdüngung zu einer Zunahme der Biomasse und der Häufigkeit von Arten beitragen wird. Inwieweit ist hier auch die gestiegene CO₂-Konzentration in der Atmosphäre ein Faktor?

S. Rumpf: Forschende der Universität Basel haben das im Alpenraum mehrmals experimentell getestet, da es die Annahme gab, dass, je höher die CO₂-Konzentration ist, die Photosynthese umso optimaler abläuft und zu mehr Biomasse führt.³ Wenn man nur eine CO₂-Begasungsanlage verwendet, eine sog. Mini-FACE-Anlage für alpine Rasen, passiert nichts. Gibt man zusätzlich mehr Stickstoff hinzu, als derzeit in der Atmosphäre ist, gibt es einen kleinen Effekt, der aber wieder verschwindet, da dann der nächste Nährstoff limitierend wirkt. Wir sehen hier also Liebigs Gesetz vom Minimum. Obwohl wir also insgesamt eine Zunahme der Biomasse in den Alpen beobachten, würde ich sagen das findet eher auf dem Artniveau als auf dem Niveau der Pflanzengesellschaft statt. Das heißt, manche Arten können den Stickstoff besser verstoffwechseln und andere Arten nicht so sehr.

K. Ramskogler: Wurde in dem Biodiversitätsmodell auch die Landnutzungsänderung mit einbezogen? Sie hat neben dem Klimawandel einen maßgeblichen Einfluss auf die Artenverbreitung der Zukunft.

S. Rumpf: Ja, sie wird mit einbezogen. Aber das Problem ist, dass die Modelle für den Klimawandel mittlerweile sehr gut und sehr robust

1 Sendtner, O. 1854. Die Vegetations-Verhältnisse Südbayerns nach den Grundzügen der Pflanzengeographie und mit Bezugnahme auf Landescultur. – Literarisch-artistische Anstalt, München, 910 S., 18 Holzschnitte, 9 Tafeln, 1 Karte.

2 Rösler, S., M. Olleck & J. Ewald. 2020. Klimafor-schung auf Otto Sendtners Spuren – mit Citizen Science die Baumgrenzen in den Bayerischen Alpen untersuchen. – Jahrbuch des Vereins zum Schutz der Bergwelt, 85: 159–172. https://www.zobodat.at/pdf/Jb-Verein-Schutz-Bergwelt_85_2020_0159-0172.pdf [abgerufen 23.04.2025].

Rösler, S., M. Olleck, K. H. Mellert & J. Ewald. 2024. Slow and diverse: Upslope expansion of tree species since 1854 in the Bavarian Alps (Germany) detected by citizen science. – Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 56: 2419690. DOI: [10.1080/15230430.2024.2419690](https://doi.org/10.1080/15230430.2024.2419690)

3 Universität Basel, Departement Umweltwissen-schaften: Increasing CO₂ concentration – an overview on diverse projects. <https://duw.unibas.ch/de/koerner/forschung/increasing-co2-concentration/> [abgerufen 18.06.2025].

sind, aber die Szenarien für die Landnutzungsveränderung noch nicht ganz so robust sind. Sie unterscheiden sich viel mehr, je nachdem, welche Forschungsgruppe die Modelle entwickelt. Wir sehen uns im Moment auch nicht nur die Landwirtschaft an, sondern versuchen, sie im Zusammenspiel mit dem Klimawandel und der Wirtschaft zu sehen. Wenn sich das Klima erwärmt, können beispielsweise andere Kulturen angebaut werden, auch an anderen Orten. Dazu kommen Subventionen, wenn in einem bestimmten Gebiet zum Beispiel der Weizen sehr wichtig ist. Nimmt man alle diese Einflussgrößen, lassen sich bereits Vorhersagen treffen, wo wann welche Landwirtschaft stattfinden kann. Das Problem daran ist, dass dieses Modell im Moment noch entkoppelt ist von der Biodiversität. Glücklicherweise habe ich einen Doktoranden gefunden, der diese Frage auch spannend findet und der versucht, in das Modell eine dynamische Biodiversitätsentwicklung einzubinden. Auf diese Weise wollen wir zum Beispiel sehen, in welchen Gebieten in der Zukunft die großen Interessenskonflikte zwischen Landwirtschaft, dem Naturschutz, der Ökonomie und dem sozialen Umfeld entstehen werden.

F. Kellermeier: Haben die Ergebnisse, die Sie gezeigt haben, praktische Auswirkungen auf den Naturschutz? Sollte man zum Beispiel versuchen, Saatgut von einer Wiese an einem Berghang zu ernten, um es hundert Meter höher wieder anzusiedeln, um dem Verzögerungseffekt entgegenzusteuern?

S. Rumpf: Diese sogenannte assistierte Migration wird seit mehr als zehn Jahren sehr kontrovers diskutiert. Sollten wir »Gott spielen« und noch mehr in ein System eingreifen, das ohnehin bereits im Ungleichgewicht ist? Oder sollten wir argumentieren, dass das Ökosystem schon so verändert ist, dass wir eine Verantwortung haben, einzugreifen und die Schäden, die wir hervorgerufen haben, zu beheben? Die Bandbreite der Antworten darauf ist groß. Meine Meinung war bisher, wir sollten nicht eingreifen, aber mittlerweile bin ich etwas in die Mitte gerückt, da wir ohnehin schon seit langer Zeit in Ökosysteme eingreifen. In der Forstwirtschaft werden zum Beispiel jene Bäume angebaut, die auch künftig voraussichtlich ertragreich und resilient sein wer-

den. Wieso sollten wir das in einem Ökosystem wie einer Wiese nicht auch tun? Ich hoffe, dass sich der Schweizerische Nationalfonds dazu bereit erklärt, ein Projekt zu finanzieren, mit dem wir dies für seltene, gefährdete Pflanzenarten tun wollen, die nicht kompetitiv sind und die nicht »ausbüchsen« und sich massenhaft verbreiten werden. Das ist gerade erst im Kommen, es gibt noch keine Gesetze und Übereinkünfte dazu und dabei sind nicht nur die Naturwissenschaften und der Naturschutz, sondern auch Wertesysteme eine wichtige Komponente.

S. Rösler: Bei der Ergrünung der Alpen spielt auch die Besiedelung der Gletschervorfelder eine Rolle. Große Verlierer beim Klimawandel sind zum Beispiel Schneebodengesellschaften, die auf eine bestimmte Bodenfeuchte im Sommer angewiesen sind. Ich kann mir gut vorstellen, dass auf den Gletschervorfeldern die Trockenheit eine bedeutende Rolle spielt. Können Sie dazu mehr sagen?

S. Rumpf: Es gibt zum einen die Schneetälchen, die erst spät ausapern. Die Pflanzen sind daran angepasst, sie haben nur eine sehr kurze Vegetationsperiode und nutzen anschließend die vorhandene Flüssigkeit und die vielen Nährstoffe. Schneetälchen entstehen immer dort, wo eine Depression im Gelände ist. Bei einem Gletschervorfeld handelt es sich dagegen eher um einen Hang mit Moränen mit einem Gletscherbach an der tiefsten Stelle. Beide Ökosysteme stellen Sonderstandorte dar, sind sehr gefährdet und werden sich in der Zukunft stark verändern. Für den großen Trend, den ich in meinem Beitrag gezeigt habe, spielen sie aber eigentlich keine große Rolle, da die Flächen, die sie einnehmen, relativ gering sind.

C. Mayer: Da möchte ich etwas widersprechen. Die Flächen, die künftig von den Gletschern frei gelegt werden, sind immens.

S. Rumpf: Ja, für die Zukunft stimmt das. Man muss aber auch bedenken, dass zum Beispiel im Vorfeld des Rhonegletschers inzwischen Wald ist und kein eigentliches Gletschervorfeld mehr. Der Sonderstandort »Gletschervorfeld« hängt von der pflanzlichen Entwicklung ab und ist daher – zumindest heutzutage – ein kleiner Raum.