

Einfluss der Höhenlage auf Zusammensetzung und Vielfalt der Gliederfüßer

Thomas Kudernatsch, Markus Blaschke, Mareike Kortmann

Die Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft untersucht in einem aktuellen Projekt die Auswirkungen des Klimawandels auf die Struktur und Artenzusammensetzung der Bergwälder im Bayerischen Alpenraum. 2021 wurde entlang zweier Höhengradienten zunächst die Waldstruktur erfasst. Im Projektjahr 2022 folgte die Untersuchung ausgewählter Artengruppen, wozu auch die Gliederfüßer (Arthropoden) zählten.

Arthropoden, zu denen Insekten, Tausendfüßer sowie Krebs- und Spinnentiere zählen, besetzen die unterschiedlichsten ökologischen Nischen. Deshalb spielen sie für die Diversität und Funktionalität unserer Wälder eine herausragende Rolle. Obwohl Arthropoden als die »erfolgreichste« Tiergruppe der Erde gelten, sind auch sie von den gegenwärtigen, teils rasanten Änderungen der Umweltbedingungen betroffen. Inwieweit sich der Klimawandel und insbesondere die damit einhergehende Temperaturerhöhung auf die Vielfalt und Zusammensetzung der Arthropoden in unseren Wäldern auswirkt, ist allerdings noch wenig bekannt. Aussagen hierzu werden nicht selten dadurch erschwert, dass neben den klimatischen Veränderungen auch weitere Faktoren die Lebensgemeinschaften beeinflussen. Hierzu zählen beispielsweise Stoffeinträge oder die menschliche Landnutzung. Insofern bieten Naturwaldreservate für derartige Untersuchungen gute Voraussetzungen, da dort zumindest die Bewirtschaftung als weiterer Wirkfaktor ausgeschlossen werden kann (Siemsmeier et al. 2019).

Projekt Höhengradient

Die Bergwälder im Alpenraum sind vom Klimawandel besonders stark betroffen (Hipp et al. 2015). Daher sind massive Auswirkungen auf die Ökosysteme und Lebensgemeinschaften der Bergwälder zu erwarten. Um die Folgen für die dort beheimateten Arten und Artengemeinschaften abzuschätzen, wurden im Werdenfelser Land zwei Höhengradienten eingerichtet, die jeweils von der montanen bis in die (hoch)subalpine Stufe reichen (Kortmann et al. 2022). Ein Höhengradient repräsentiert die südexpo-

nierten und damit wärmebegünstigten Lagen; er befindet sich im Naturwaldreservat Jakelberg und den darüber befindlichen Naturwaldflächen. Der zweite Gradient umfasst die überwiegend nordexponierten Hänge der Reservate Schrofen und Wettersteinwald sowie dazwischenliegender Naturwaldflächen. Entlang des Sonnseiten-Gradienten wurden zwischen 850 und 1.640 m ü. NHN insgesamt 20 Probeflächen eingerichtet. Auf den Schattseiten befinden sich 28 Probeflächen mit einer Höhererstreckung von 900 bis 1.800 m ü. NHN. Auf diesen 48 Flächen fanden in den Jahren 2021 und 2022 Erhebungen zur Waldstruktur sowie zur Artenzusammensetzung ausgewählter Indikatorgruppen (Insekten/Arthropoden, Bodenvegetation, Vögel) statt. Auf jeder Versuchsfläche installierte Temperaturlogger ergänzten den Datensatz zudem um wertvolle Informationen zum Mikroklima. Diese Kartierungen geben Aufschluss darüber, inwieweit die Temperaturbedingungen oder andere Faktoren das Vorkommen der Arten bzw. Artengemeinschaften über die Höhe beeinflussen. Sind diese Zusammenhänge bekannt, lassen sich die Anpassungen verschiedener Arten/Artengruppen bzw. Lebensgemeinschaften an künftige Klimabedingungen einschätzen. Ob diese Prognosen tatsächlich zutreffen, kann künftig durch ein längerfristiges Monitoring der Lebensgemeinschaften auf den Probeflächen überprüft werden.

Erfassung der Arthropoden

Die Erfassung der Arthropoden auf den 48 Probeflächen fand zwischen Anfang Mai und Mitte August 2022 statt. Flugaktive Arthropoden wurden dabei mittels Kreuzfensterfallen (zwei je Fläche; Abbil-



1 Kreuzfensterfalle zum Fang flugfähiger Arthropoden im Naturwaldreservat Jakelberg. Foto: Thomas Kudernatsch, LWF

dung 1), überwiegend auf der Bodenoberfläche lebende Insekten wie Laufkäfer oder Spinnen mittels Bodenfallen (drei je Fläche) gefangen.

Für die Auswertung und Bestimmung des Insektenmaterials führte man – mit Ausnahme der Laufkäfer – eine automatische Gensequenzierung der gewonnenen Sammelproben (*Next Generation Sequencing*, vgl. z. B. Moriniere et al. 2016, Kühbandner & Blaschke 2022) durch. Diese Methode ist sehr effizient und im Vergleich zur üblichen händischen Bearbeitung schnell und vergleichsweise kostengünstig. Zudem ermöglicht das *Next Generation Sequencing*, alle gefangenen Insekten (darunter auch weniger bekannte, aber möglicherweise ökologisch sehr bedeutsame Insektengruppen) in die Untersuchungen mit einzubeziehen. Aussagen zur Häufigkeit der einzelnen Arten(äquivalente) sind bei diesem Verfahren allerdings nicht möglich. In die weiteren Analysen gingen nur Sequenzcluster ein, die einer Art mit einer Tref-

ferwahrscheinlichkeit von mindestens 97% zugewiesen werden konnten.

Um zumindest für eine Arthropoden-Gruppe auch Aussagen zur Häufigkeit der Arten auf den Probeflächen zu treffen, wurden vor der genetischen Sequenzierung alle Laufkäferindividuen aus den Proben heraussortiert und anhand ihrer optischen Merkmale bestimmt.

Temperaturbedingungen auf den Probeflächen

Mittels der auf den Probeflächen ausgebrachten Temperaturlogger zeichnete sich ein sehr genaues Bild der Temperaturbedingungen entlang der zwei Höhengradienten ab. So korrelierte die mittlere Temperatur auf den Versuchsfeldern während des Erfassungszeitraums erwartungsgemäß sehr stark mit der Höhenlage (Korrelationskoeffizient = 0,94), wobei sich eine lineare Abnahme der Temperatur um circa 0,5°C je 100 Höhenmeter ergibt. Die Flächen der Nordhänge waren bei gegebener Höhenlage zudem um durchschnittlich etwa 1,2 Grad kühler als die Flächen der Südhänge.

Um bei den Analysen auch Temperatureffekte abzubilden, die über die reine Beziehung zur Höhenlage hinausgehen und zum Beispiel durch unterschiedliche Waldstrukturen oder kleinklimatische Besonderheiten verursacht werden, ermittelte man für jede Probefläche die Abweichungen (Residuen) der tatsächlich gemessenen Temperaturen von den vom Modell vorhergesagten Temperaturen. Diese Unterschiede wurden im Rahmen der weiteren Auswertungen als erklärender Faktor berücksichtigt.

Diversität der Arthropoden

Insgesamt ließen sich im Rahmen des Projekts 1.177 Gensequenz-Cluster einer bestimmten Arthropodenart zuweisen. Die größte Gruppe waren dabei die Käfer mit 407 Arten, gefolgt von den Zweiflüglern (z. B. Fliegen und Mücken; 290 Arten), Schmetterlingen (177 Arten) und Hautflüglern wie Ameisen, Bienen und

Wespen mit 99 Arten. Die Artenzahl je Probefläche lag im Mittel bei 139 ($\pm 18,3$) Arten. Grundlegende Unterschiede zwischen Nord- und Südhängen waren hierbei nicht festzustellen.

Um wichtige Einflussgrößen auf die Diversität der Arthropoden zu identifizieren, wurden lineare Modelle der Artenzahlen gerechnet. In die Analysen gingen die Höhenlage und verschiedene andere Parameter (Temperaturresiduen, Kronenschlussgrad, mittlerer Brusthöhendurchmesser der stärksten Bäume, Anzahl Baumarten und Exposition) mit ein. Dabei zeigte sich, dass einige wenige Flächen mit sehr geringem Kronenschlussgrad die Ergebnisse unverhältnismäßig stark beeinflussten. Diese Flächen wurden aus den Modellen deshalb ausgeschlossen. Nach Bereinigung der Daten um diese Flächen blieben letztlich 43 der 48 Flächen für weitere Auswertungen. Die linearen Modelle ergaben, dass die Artenzahlen der Arthropoden mit zunehmender Höhe (und damit sinkenden Temperaturen) signifikant abnehmen, während sich die Temperaturresiduen signifikant positiv auf die Artenzahl der Arthropoden auswirken (Abbildung 2). Für alle anderen Faktoren waren keine signifikanten Effekte auf die Artenzahlen nachweisbar.

Eine beispielhafte Betrachtung der Käfer als artenreichste Gruppe bestätigt diese Ergebnisse. Auch hier nehmen die Artenzahlen mit zunehmender Höhe signifikant ab, während sie mit zunehmenden Temperaturresiduen ansteigen. Insgesamt zeigte sich im Rahmen der Untersuchungen, dass weniger die Waldstrukturen als vielmehr die Temperaturbedingungen die Diversität der Arthropoden steuern. Unterschiede in der Tempe-

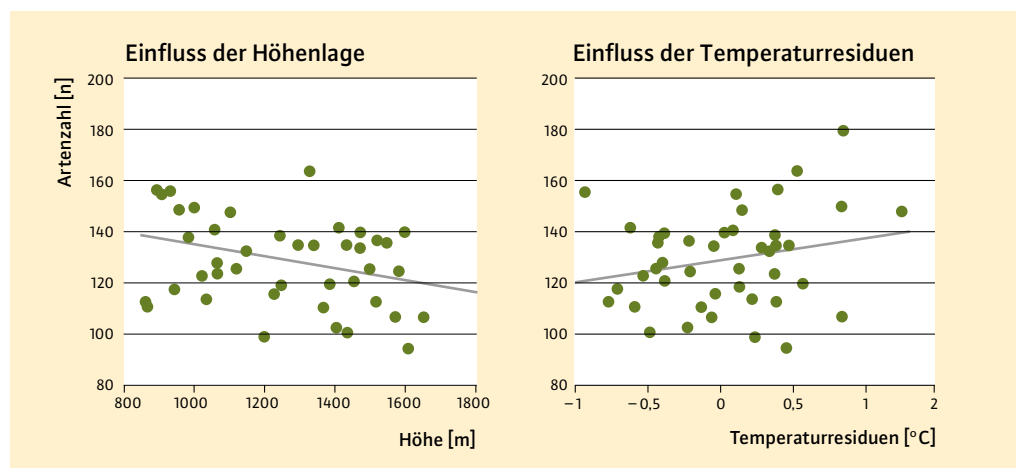
ratur resultieren dabei im Wesentlichen aus der jeweiligen Höhenlage sowie der Exposition. Daneben spielen aber offensichtlich kleinklimatische Unterschiede, die z. B. aus dem Mikrorelief resultieren, ebenso eine Rolle.

Positive Zusammenhänge zwischen der Temperatur und der Artenvielfalt der Arthropoden stellen auch andere Untersuchungen fest (z. B. Uhler et al. 2021). Als Ursachen wurden unter anderem die hohe Temperaturabhängigkeit des Stoffwechsels genannt (Arthropoden sind ektotherm, d. h. wechselwarm), wodurch es bei höheren Temperaturen beispielsweise zu einer verbesserten Reproduktion, erhöhten Überlebensraten und somit auch zu einer Ausweitung der Populationen kommen kann.

Einflussfaktoren auf die Artenzusammensetzung

Die Einflüsse verschiedener Umweltparameter auf die Artenzusammensetzung wurden mittels des sogenannten DCA- (*detrended correspondence analysis*)-Ordinationsverfahrens analysiert. Bei der Korrespondenzanalyse berechnet man anhand der Arten, die auf den jeweiligen Probeflächen vorkommen, die Aufnahme-Positionen im mehrdimensionalen Raum und stellt sie in einem zweidimensionalen Diagramm dar. Dabei weisen Aufnahmen mit ähnlichem Arteninventar eine benachbarte Positionierung auf, Aufnahmen mit unähnlichem Arteninventar liegen dagegen weit voneinander entfernt. Daraus ergab sich, dass die Temperaturbedingungen offenbar nicht nur die Artenvielfalt, sondern auch die Artenzusammensetzung der Arthropoden auf den Probeflächen entscheidend beeinflussen (Abbildung 3). Flächen in den wärmebe-

2 Die Höhenlage der Probeflächen sowie die Temperaturresiduen sind die Faktoren, welche die Artenzahlen der Arthropoden auf den Probeflächen am stärksten beeinflussen.



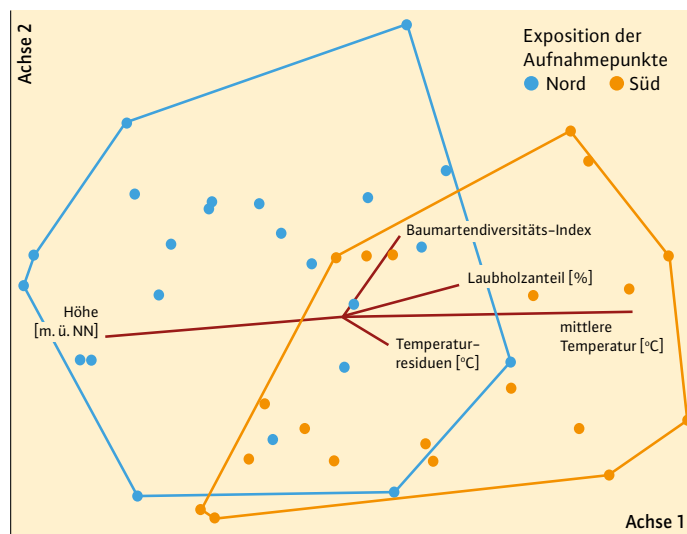
günstigen Tieflagen beherbergen demnach deutlich andere Artengemeinschaften als Flächen in den kühleren Hochlagen. Dies gilt sowohl für die Probestellen auf den Nord- als auch für die auf den Südhängen. Insgesamt weisen die »Ordinationsräume« des Sonnseiten- und des Schattseiten-Gradienten (im Diagramm begrenzt durch die jeweils durchgezogenen Linien in blau bzw. orange) nur einen vergleichsweise geringen Überlappungsbereich auf. Dies lässt den Schluss zu, dass die Artenzusammensetzungen nicht nur maßgeblich durch die Höhenlage, sondern auch durch die Exposition bestimmt werden. Daneben scheinen zudem Unterschiede in der Bestandesstruktur (vor allem Baumartenvielfalt) eine gewisse Rolle zu spielen.

Was passiert, wenn es wärmer wird?

Da sowohl die Artenvielfalt als auch die Artenzusammensetzung der Arthropoden entlang der zwei untersuchten Gradienten klar durch die Temperaturbedingungen bestimmt wird, ist davon auszugehen, dass eine weitere klimawandelbedingte Erwärmung zu Änderungen der Diversität und der Artenzusammensetzung führen wird. Sofern sich die Erwärmung nicht zu tiefgreifend auf die Bergwald-Ökosysteme auswirkt, ist vorerst von einer Zunahme der Artenzahlen auszugehen. Aufgrund des linearen Zusammenhangs ist dabei ein Anstieg der Diversität mehr oder minder über den gesamten untersuchten Höhengradienten zu erwarten. Die größten Effekte sollten dabei auf Standorten auftreten, die durch ein überdurchschnittlich warmes Lokalklima gekennzeichnet sind.

Im Zuge des Klimawandels ist in den Bergwäldern mittelfristig aber nicht nur mit einem Anstieg der Arthropodendiversität zu rechnen, vielmehr sind auch Änderungen in der Artenzusammensetzung der Lebensgemeinschaften sehr wahrscheinlich. Darauf deuten die festgestellten, überwiegend temperaturinduzierten Unterschiede in der Artenzusammensetzung zwischen Tief- und Hochlagen bzw. Süd- und Nordhängen hin. Während also viele wärmeliebende Arten durch einen Temperaturanstieg voraussichtlich begünstigt werden und ihr Verbreitungsgebiet gegebenenfalls ausweiten können, dürften an niedrige Temperaturen adaptierte Arten wohl eher zu den Verlierern zählen. Ein Beispiel hierfür ist der Lauf-

Einflussfaktoren auf die Arthropodengemeinschaften



3 DCA-Ordinationsdiagramm der Arthropodenaufnahmen des Nordseiten- (blau) bzw. Südseiten-Gradienten (orange). Um Achse 1 und 2 interpretieren zu können, wurden zur Verfügung stehende Umwelt- bzw. Strukturparameter als bi-plot über das Ordinationsdiagramm gelegt (rote Vektoren).

käfer *Pterostichus unctulatus* (Abbildung 4), der im Rahmen unserer Untersuchungen schwerpunktmäßig in Lagen zwischen 1.300 und 1.700 m ü. NN nachgewiesen wurde, also eine enge Bindung an die kühlen, nadelholzgeprägten Hochlagenwälder zeigt. Bei einem weiteren Temperaturanstieg, der möglicherweise mittel- bis langfristig zu einem Rückgang der subalpinen Nadelwälder führt, wäre entsprechend auch mit negativen Auswirkungen auf die Populationen dieser »kühlpräferenten Bergwaldart« zu

4 Ist eng an kühle, nadelholzgeprägte Hochlagenwälder gebunden: der Laufkäfer *Pterostichus unctulatus*

Foto: Ortwin Bleich



rechnen, für die Deutschland eine hohe Schutzverantwortung trägt. Zu einer vergleichbaren Einschätzung dieser Art kamen auch Müller-Kroehling et al. (2014).

Zusammenfassung

Das Projekt zeigte, dass sowohl die Diversität als auch die Artenzusammensetzung der Arthropoden in den Bergwäldern der Bayerischen Alpen sehr stark durch die Temperaturbedingungen gesteuert werden. Bei einem weiteren klimawandelbedingten Temperaturanstieg ist daher einerseits mit einer vorläufigen Zunahme der Arthropoden-Diversität zu rechnen, da die vergleichsweise niedrigen Temperaturen im Alpenraum für viele Arten bislang offensichtlich einen begrenzenden Faktor darstellen. Andererseits wird es voraussichtlich auch zu Änderungen der Artengemeinschaften kommen, wobei es sowohl »Gewinner« als auch »Verlierer« geben wird. Zu letzter Gruppe dürften insbesondere Arten zählen, die an niedrige Temperaturen angepasst sind. Um diese Prognosen zu prüfen, ist ein langfristiges Monitoring erforderlich.

Literatur

Das Literaturverzeichnis finden Sie unter www.lwf.bayern.de in der Rubrik »Publikationen«.

Projekt

Das Projekt »Auswirkungen des Klimawandels auf Diversität und Struktur von Gebirgswäldern im Bayerischen Alpenraum (klifWoo7)« (Laufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024) wird vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten finanziert.

Link

www.lwf.bayern.de/biodiversitaet/biologische-vielfalt/265499/index.php

Autoren

Dr. Thomas Kudernatsch und Markus Blaschke sind wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung »Biodiversität und Naturschutz« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft und für die Leitung des Projekts klifWoo7 verantwortlich. Dr. Mareike Kortmann bearbeitete das Projekt als wissenschaftliche Mitarbeiterin.

Kontakt: Thomas.Kudernatsch@lwf.bayern.de