

Die Arve – Portrait eines Gebirgswaldbaums

Felix Gugerli, Sabine Brodbeck, Peter Bebi, Kurt Bollmann, Benjamin Dauphin, Martin Gossner, Frank Krumm, Martina Peter, Valentin Queloz, Gabor Reiss, Christian Rellstab, Silvia Stofer, Georg von Arx, Ueli Wasem, Roman Zweifel

«Hier und dort steht noch so ein Recke treu auf seinem Posten, mit zerschmettertem Schaft, und streckt aus dem Felsengeröll wie eine Streitaxt kampfeslustig den Arm hervor oder kauert wie ein Greis, den der Sturm des Lebens auf die Krücken darniederbeugt hat.»

(Schnidrig 1935)



Abb. 1. Standhafte Arven in dynamischem Lebensraum: Lückiger, altersdurchmischter Bestand oberhalb des Aletschgletschers (Kanton Wallis).

Unter den föhrenartigen Waldbaumarten des Alpenraums genießt die Arve (*Pinus cembra* L.) eine herausragende Stellung (Abb. 1). Bereits ihre Höhenverbreitung im Bereich der Waldgrenze zeigt, weshalb sie als «Königin der Alpen» bezeichnet wird und der bewaldeten Höhenstufe sozusagen die Krone aufsetzt. Ebenso zeichnet sie sich durch verschiedene biologische Eigenschaften aus. Nebst physiologischen Anpassungen ist die Wechselwirkung mit dem Tannenhäher als Samenausbreiter hervorzuheben. Nicht zuletzt spielt die Arve als Hauptbaumart des Arven-Lärchenwalds insbesondere in den Alpen eine ökologisch und ökonomisch bedeutende Rolle. Allerdings stellt die rasante Klimaveränderung eine grosse Herausforderung dar. Die langlebige Arve kann dem zunehmenden Konkurrenzdruck von höher steigenden Baumarten nur langsam nach oben ausweichen.

Biologie und Ökologie der Arve

Viele der biologischen Eigenschaften und Merkmale der Arve (s. Steckbrief) stehen im Zusammenhang mit der Anpassung an ihren Lebensraum. Arven können ein hohes Alter erreichen und müssen daher auch lange Phasen mit unwirtlichen Witterungsverhältnissen überdauern. So können über die Jahre durch mechanische Schäden (Wind, Schneelast, Blitz) bizarre Wuchsformen entstehen, wie sie Schnidrig (1935) sehr bildhaft beschreibt (Abb. 2). Ebenso gibt es mehrstämmige Arven, wenn Jungbäume zusammenwachsen oder Wipfeltriebe sich aufspalten.

Die Arve lässt sich von den anderen Föhrenarten innerhalb ihres Areals durch die fünfzähligen Nadelbüschel und die geschlossenen Zapfen unterscheiden (Abb. 3a). Die einhäusigen Bäume breiten ihren Pollen durch den Wind aus, die Bestäubung kann somit über grosse Distanzen erfolgen. Dies fördert Auskreuzung, wobei Selbstbestäubung möglich ist (Salzer und Gugerli 2012). Die weiblichen Zapfen können über 100 grosse, nährstoffreiche und ungeflügelte Samen enthalten, denen wie bei allen Gymnospermen eine eigentliche Fruchtwand fehlt. Sie sind also trotz harter Schale keine «Nüsse» im botanischen Sinn. Die zweijährige Samenreife dürfte mit ein Grund sein, weshalb der Zapfenansatz über die Jahre stark schwankt; Samenzahljahre finden etwa jedes dritte Jahr statt, eine Vollmast gibt es nur alle 4–10 Jahre (Ulber *et al.* 2004).

Die Samen werden fast ausschliesslich durch den Tannenhäher ausgebreitet (Mattes 1982). Die im obersten Drittel der Krone wachsenden Zapfen werden vom Vogel weggetragen, der die Samen herauspickt. Die danach als Nahrungsreserve vergrabenen Samen können, wenn sie im Verlauf des Winters nicht gefressen werden, im folgenden Frühling keimen. Aus solchen Samenverstecken wachsen die häufig eng zusammenstehenden Gruppen von jungen Arven auf (siehe Abb. 6c).

Verbreitungsgebiet

Das aktuelle Verbreitungsgebiet der Arve umfasst den gesamten Alpenbogen, sie kommt zudem zerstreut und oft in klei-



Abb. 2. Teils bizarre Wuchsformen widerspiegeln die rauen Bedingungen, denen die Arven in den Hochlagenwäldern ausgesetzt sind und über Jahrzehnte trotzen.

nen Beständen in den Karpaten vor (Abb. 4, kleine Karte). Die Höhenverbreitung erstreckt sich in den Alpen von etwa 1500–2400 m ü. M., wobei junge Arven in Gunstlagen bis 2850 m ü. M. vorkommen können. Allerdings läge die natürliche Waldgrenze um 200–300 m höher, wurde aber durch Rodungen zugunsten der Alpwirtschaft vielerorts nach unten gedrückt. In den weniger hohen Karpaten liegt die Waldgrenze und somit das Arvenareal tiefer (1300–1700 m ü. M.).

In der Schweiz befinden sich die beiden Hauptareale der Arve im Engadin und im Wallis. In den Nordalpen gibt es



Abb. 3. a) Entwickelte Arvenzapfen mit weiblichen Blütenständen und b) männliche Blütenstände.

Arvenbestände hauptsächlich im St. Galler Oberland, Glarus, Berner Oberland, Freiburg und Waadtland, und alpensüdseitig bis ins mittlere Tessin.

Während der letzten Jahrhunderte wurde die Arve weiträumig intensiv genutzt, vielerorts übernutzt und zur Gewinnung von Alpweiden gerodet, wodurch ihr Vorkommen stark eingeschränkt oder gar zum Verschwinden gebracht wurden. Die historisch weitere Verbreitung zeigt sich anhand von Flurnamen mit Arven-Bezug, zum Beispiel Arvenbüel ob Amden (Rikli 1909). In den Schweizer Alpen dürfte dieser Arealverlust in Gebieten wie dem Oberhalbstein und der Surselva (Graubünden) oder dem Lötschental (Wallis), aber auch in den Nordalpen (z. B. Freiburg) bedeutend gewesen sein.

Besiedlungsgeschichte

Wie alle heute im Alpenraum vorkommenden Arten hat auch die Arve eine bewegte Geschichte. Durch wiederholtes eiszeitliches Ausdehnen und Zurückziehen der Gletscher in Zentraleuropa veränderte sich das verfügbare Areal der Arve ständig.

Fossile Pflanzenreste (Pollen, Makro-Reste) belegen, dass die Arve die letzte

Steckbrief Arve

Systematik: Nacktsamer (Gymnospermae) – Föhrengewächse (Familie Pinaceae) – Föhren (Gattung *Pinus*) – *Pinus cembra* L.; nächste Verwandte: *P. sibirica*

Verbreitung: Alpen, Karpaten

Lebensraum: (supra)subalpine Höhenstufe, mit Lärche (*Larix decidua*) und Fichte (*Picea abies*); zumeist gut wasserversorgte, saure Rohhumusböden, vorwiegend Nord- und West-exponiert; meidet Muldenlagen

Wuchsform: aufrecht, bis 25 m; oft mehrstämmig oder durch Schäden kandelaberförmig

Alter: meistens bis max. 400 Jahre, «Methusalem»-Arven anekdotisch über 1000-jährig

Fortpflanzung: einhäusig/getrenntgeschlechtig, mit weiblichen (Zapfen; Abb. 3a) und männlichen Blütenständen (Abb. 3b) auf derselben Pflanze; reproduktiv ab etwa 40 Jahren (in Kultur auch früher), Samenentwicklung zweijährig; reife Samen wiegen 150–270 mg

Ausbreitung: Pollen durch Wind, Samen hauptsächlich durch Tannenhäher

Erkennungsmerkmale: 5 Nadeln pro Büschel, die dreikantigen Nadeln auf 2 Seiten mit weisslichen Wachsstreifen, junge Triebe rotgelb filzig; geschlossene, violett überlaufene, selten grüne Zapfen mit ungeflügelten, hartschaligen Samen

Vorkommen in der Schweiz: 5,7 Mio. Bäume (>12 cm Stammdurchmesser), 1,2 % der Stammzahl landesweit; 2,9 Mio m³ (0,7 %) Holzvorrat; Zunahme beider Werte gegenüber LFI3 (2004–2006) um 9 % (Landesforstinventar LFI4, 2009–2017)

Namen deutsch: Arve, Arbe, Zirbe, Zirbelkiefer, Zir(b)m; französisch: arole, arolle, pin cembro, pin des Alpes; italienisch: cirmolo, pino cembro; romanisch: gembru, gembra, (d)schember; englisch: Swiss stone pine, arolla pine

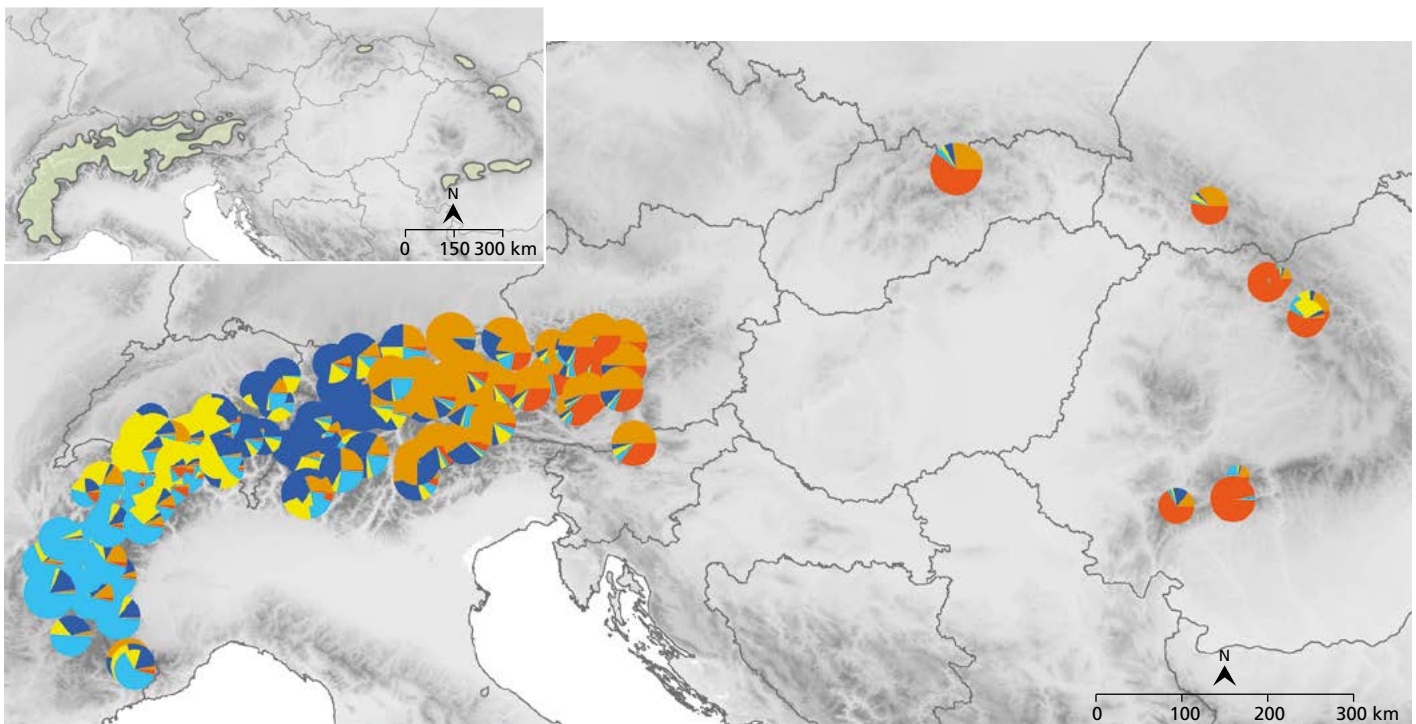


Abb. 4. Genetische Struktur der Arve in ihrem natürlichen Verbreitungsgebiet. Die Kreise markieren jeweils einen genetisch untersuchten Bestand, die Farben in den Kreisdiagrammen stellen die Zuordnungsanteile zu einer der fünf genetischen Verwandtschaftsgruppen dar. Kleine Karte: natürliches Verbreitungsgebiet der Arve in den Alpen und den Karpaten. Quelle: Gugerli *et al.* in review, kleine Karte: Euforgen.

Eiszeit vermutlich entlang des zentralen und östlichen Südrands der Alpen, in der Ungarischen Tiefebene und rund um die Karpaten überdauerte (Gugerli *et al.* in review). Die Rückkehr in die Alpen erfolgte hauptsächlich westwärts in die Ostalpen und nord-/westwärts in die Zentral- und Westalpen. Die Karpaten wurden zumeist aus den nahegelegenen Vorkommen besiedelt.

Diese Aus- und Einwanderungsgeschichte widerspiegelt sich auch in der räumlichen genetischen Struktur, welche fünf genetische Verwandtschaftslinien entlang der Ost–West-Achse der Karpaten und Alpen erkennen lässt (Abb. 4). Die östliche Gruppe ist vor allem in den Karpaten dominant und dürfte hauptsächlich aus den karpaten-nahen Refugien entstanden sein; sie lässt eine genetische Verbindung zu den Ostalpen erkennen. Die drei genetischen Gruppen in den Westalpen differenzieren sich während der Rückwanderung nach der letzten maximalen Vergletscherung. In der Schweiz dominieren zwei genetische Gruppen, die jeweils den beiden Hauptarealen im Osten und Westen (Engadin, Wallis) entsprechen. Die Kenntnisse über dieses räumliche Muster ermöglichen beispielsweise, weiträumigen Saatguttransfer nachzuweisen oder passendes Saatgut (Herkunft) auszuwählen.

Standortansprüche

In den Hochlagen-Wäldern der Alpen kommen nebst der Arve auch Lärche und Fichte mit unterschiedlichen Anteilen vor. Dabei gilt die Lärche als Pionier-Baumart, während die Arve im Verlauf der Sukzession dominant wird (Klimax-Baumart). Arven und Lärchen herrschen vor allem in den zentralalpinen, kontinental geprägten Regionen der Alpen vor, die durch grosse Temperaturunterschiede im Tages- und Jahresverlauf sowie eher geringe Niederschläge geprägt sind. Unter ozeanischen, niederschlags-reicheren Bedingungen sind der Arve meist Fichten beigemischt.

Arven wachsen hauptsächlich an Standorten mit mittlerer Bodenfeuchte (Ott *et al.* 1997). Wohl deshalb findet man sie vorwiegend auf nord-, nord-west- und nordost-exponierten Standorten. Vorteilhaft sind gleichmässig feuchte, tonhaltige Böden. Lange lie-



Abb. 5. Winterliche Verhältnisse stellen besondere Anforderungen dar, mit denen die Arve zurechtkommen muss.

gender Schnee wirkt sich wegen des vermehrten Pilzbefalls negativ aus (Senn und Schönenberger 2001). Wichtig ist eine gute Rohhumus-Auflage, wodurch der Boden-pH auch bei kalkhaltiger Unterlage sauer ist. Gelegentlich findet man Arven auf exponierten Felsen; dank ihrer tief wachsenden Wurzeln vermögen sie dennoch Wasser und Nährstoffe zu erschliessen.

Aber nicht nur wegen ihrer spezifischen Standortansprüche zeigt die Arve eine gegenüber ihrem Potenzial eingeschränkte Verbreitung. Auch die Konkurrenz durch die schattentolerante, schneller wachsende Fichte und die einstige Übernutzung haben vielerorts zu Arealverlusten beigetragen.

Physiologische Anpassungen

Die Arve als alpine Baumart, die bis an die Baumgrenze wächst, kommt kaum als reiner Bestand vor, sondern tritt fast immer zusammen mit der Lärche und der Fichte auf. Es bietet sich deshalb an, die physiologischen Eigenheiten der Arve mit diesen beiden Baumarten zu vergleichen, die mindestens zum Teil die gleiche ökologische Nische besetzen.

Die Arve wächst an den bioklimatischen Extremen, wo man in Europa überhaupt noch Bäume findet (Casalegno *et al.* 2010). Grundsätzlich wird das Aufkommen und Überleben der Art durch tiefe Temperaturen, die Länge der

Wachstumsaison, Sommertemperaturen und Sommerniederschläge begrenzt (dies gilt für alle an der Baumgrenze vorkommenden Baumarten). Zu diesen Einschränkungen gehört, dass das Wachstum unter 5–7 °C nur noch sehr reduziert möglich ist (Körner 2012) und das Zeitfenster dafür durch die Tageslänge bestimmt ist (Etzold *et al.* 2021). Die Arve erträgt sehr kalte Wintertemperaturen bis unter –40 °C fast noch besser als die Fichte und die Lärche. Im Gegensatz zu letzteren gilt die Arve jedoch in trockener Umgebung als nicht konkurrenzfähig und scheint mehr als andere Baumarten auf einen ausgeglichenen Wasserhaushalt angewiesen zu sein (Casalegno *et al.* 2010).

Wichtig für das Vorkommen von Arven sind insbesondere die Winterniederschläge (Oberhuber 2004), welche die Schneemenge und damit die Dauer der Schneebedeckung beeinflussen (Abb. 5) – ein wichtiger Faktor im Zusammenhang mit Schäden durch das *Gremmeniella*-Triebsterben (s. unten). Auf Frosttrocknis, wenn also Wasser aus den Nadeln verdunstet und kein Nachschub aus dem gefrorenen Boden kommt, reagiert die Arve hingegen weniger empfindlich als die Lärche und insbesondere die Fichte (Christersson und Fircks 1990).

Die Arve gilt als sehr Ozon-empfindlich (Buchholcerová *et al.* 2021; Dalstein *et al.* 2002). Zusammen mit ihrer geringen Trockentoleranz könnte unter den prognostizierten Klimaveränderungen

Ohne Tannenhäher keine Arven

Mit seinem schwarz-braunen, weiss getüpfelten Federkleid, dem schwarzen Schwanz mit weisser Endbinde, den weissen Unterschwanzdecken und dem charakteristischen, langen und meisselartigen Schnabel (Abb. 6a) ist der 32–35 cm grosse Tannenhäher (*Nucifraga caryocatactes*) ein unverkennbarer und nicht zu überhörender Bewohner des Nadelwaldes. Er kommt im borealen Gürtel Eurasiens in verschiedenen Unterarten bis nach Japan vor und besiedelt die Gebirgswälder Mittel- und Südosteuropas (Glutz von Blotzheim und Bauer 1993). In der Schweiz befindet sich das Brutgebiet in den Alpen und im westlichen Jura (Knaus *et al.* 2018). Die einheimische Unterart *N.c. caryocatactes* ist ein ausgesprochener Standvogel mit einer hoch entwickelten Vorratswirtschaft.

Arvensamen sind die Hauptnahrung des Tannenhähers. Da die samentragenden Zapfen im obersten Drittel der Krone wachsen, sind sie für den Vogel gut zugänglich. Er sammelt die Arvensamen ab dem Spätsommer und versteckt sie als Wintervorrat im Boden. Dazu klaubt er die Arvensamen aus den Zapfen: entweder direkt in der Baumkrone, aus den in einer sogenannten «Schmiede» (Astgabel, Baumstumpf; Abb. 6b) eingeklemmten Zapfen oder am Boden. Der starke Schnabel zur Bearbeitung der Zapfen, der Kehlsack für den Transport der Samen und das gute Flugvermögen verschaffen dem Tannenhäher gegenüber

Konkurrenten wie Eichhörnchen, Wühlmäusen, Buntspecht und Kleiber einen grossen Vorteil bei der Ernte. Mattes 1982; 1978 wies in seinen Studien im Oberengadiner Stazerwald nach, dass der Tannenhäher ausserhalb der Brutzeit bis 15 km weite Nahrungsflüge macht. Dabei werden im Kehlsack durchschnittlich 41 Arvensamen transportiert, es können aber auch über 100 sein.

Die angelegten Vorräte sind für die Überwinterung und das Brutgeschäft von entscheidender Bedeutung. Abhängig vom Zapfenangebot versteckt jeder Vogel zwischen 45 000 und 100 000 Arvensamen im Jahr, im Durchschnitt 5,7 Samen pro Versteck (Mattes 1982). Diese müssen im Winter unter dem Schnee gefunden und oft aufwändig ausgegraben werden. Umso erstaunlicher ist die Wiederfundrate von rund 80 % – die übrigen Samen sind für den Fortbestand der Arve enorm wichtig.

Für den Stazerwald hat Mattes (1982) errechnet, dass vom vergrabenen Jahresvorrat eines Tannenhäherpaars mit zwei Jungvögeln in einer Saison mit durchschnittlicher Zapfenproduktion rund 8400–15 600 Samen pro Hektare Waldfläche für die Arvenverjüngung verbleiben. Diese können im folgenden Frühling keimen. Da jeweils mehrere Samen pro Versteck vergraben werden, findet man oft Ansammlungen von Keimlingen (Abb. 6c), von denen aber meistens nur ein Baum aufwächst.

Mit seiner ausgeprägten Nahrungsspezialisierung leistet der Tannenhäher einen wichtigen Beitrag für den Fortbestand des Arvenwaldes. Deshalb wird er auch «gefiederter Förster» genannt. Neue Studien zeigen aber, dass die Verstecke entgegen der verbreiteten Ansicht meistens nicht an Standorten angelegt werden, die für die Keimung vorteilhaft sind. Tannenhäher vergraben die Samen bevorzugt an Orten, an denen die Verderblichkeit der Samen gering ist und die Etablierungsbedingungen für Arvenkeimlinge reduziert sind (Neuschulz *et al.* 2015). Für die Entwicklung der Keimlinge spielen biotische Faktoren (Bodenvegetation, Samenfrass durch Nager und andere Vögel) eine wichtigere Rolle als die Standortbedingungen (Neuschulz *et al.* 2018). Zudem wurde in der Landschaft Davos nachgewiesen, dass die Mehrheit der Samenverstecke in Brutrevieren unterhalb des aktuellen Verbreitungsgebiets der Arve im subalpinen Fichtenwald liegt, wo die Verjüngungsgunst für die Arve schlecht ist (Sorensen *et al.* 2022).

Letztlich ist es für die Arve entscheidend, wie viele Samen an Standorten zurückbleiben, die für die Keimlingsetablierung günstig sind. Verstecke in Lichtungen innerhalb bestehender Waldflächen und oberhalb der Baumgrenze, wie sie gelegentlich vorkommen, können für die Arve in Zeiten des Klimawandels von grosser Bedeutung sein.

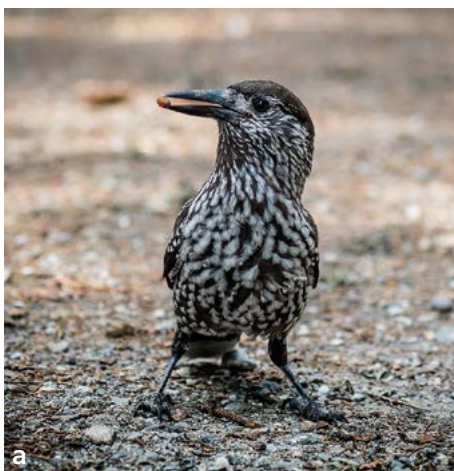


Abb. 6. a) Tannenhäher (*Nucifraga caryocatactes*) mit einem Arvensamen im Schnabel. b) Überreste von Tannenhäher-bearbeiteten Arvenzapfen in einer «Arvenschmiede». c) Büschelweise aufwachsende Jungarven aus einem Vorratsversteck des Tannenhähers.

die Konkurrenzfähigkeit der Arve gegenüber Fichte und Lärche regional abnehmen.

Holzstruktur und Jahrringe

Das Holz der Arve ist im Vergleich zu anderen Nadelhölzern eher hell. Grund dafür ist das ab Mai gebildete Frühholz, welches bei der Arve den grössten Teil der Jahrringe ausmacht (Abb. 7). Die einzelnen Zellen im Frühholz, deren Entstehung bereits bei Bodentemperaturen um 1,5 °C einsetzt (Gruber *et al.* 2009), sind verhältnismässig gross und dünnwandig und erscheinen dadurch heller. Demgegenüber sind die ab Ende Juli, Anfang August gebildeten Spätholzzellen kleiner und haben dickere Zellwände, wodurch das Spätholz dunkler erscheint. Im Vergleich zu anderen Nadelholzarten wie der Lärche sind die Spätholzzellen jedoch immer noch dünnwandig. Insgesamt führt diese Holzstruktur zu einem Holz von geringer Dichte, das weich und gut zu bearbeiten ist.

Beachtenswert ist der frühe Beginn des Wachstums, 20–30 Tage bevor dieses bei Fichte und Lärche einsetzt (Rossi *et al.* 2014). Das eigentliche Zellausdehnungswachstum beginnt jedoch bei allen drei Baumarten an der Waldgrenze fast zeitgleich um Mitte Mai. Es endet bei der Arve ähnlich wie bei der Lärche im Frühherbst, früher als bei der Fichte (Rossi *et al.* 2014).

Die Holzzellen der Arve machen etwa 90% des Holzkörpers aus, der Rest wird durch Markstrahlen und Harzkanäle gebildet (Abb. 7). Harzkanäle sind bei Vertreterinnen der Gattung *Pinus* und somit auch bei Arven üblich. Die Harzkanäle werden von Epithelzellen gebildet, die das Harz in den inneren Hohlraum absondern.

Die heute vorhandenen Arven sind bis zu 400 Jahre alt (Nicolussi *et al.* 2009), doch weisen die ältesten Exemplare ein Alter von 800–1000 Jahren auf und deuten damit ihr Potenzial für Langlebigkeit an (Carella 2022; Nicolussi *et al.* 2009; Carrer *et al.* 2007). Meist sind alte Bäume im Stammzentrum jedoch verrottet, wodurch die innersten Jahrringe nicht erhalten sind und das Maximalalter unterschätzt wird. Die kurze Wachstumsperiode an der oberen Baumgrenze schränkt die Produktivität so stark ein, dass die Jahrringe im Mittel lediglich

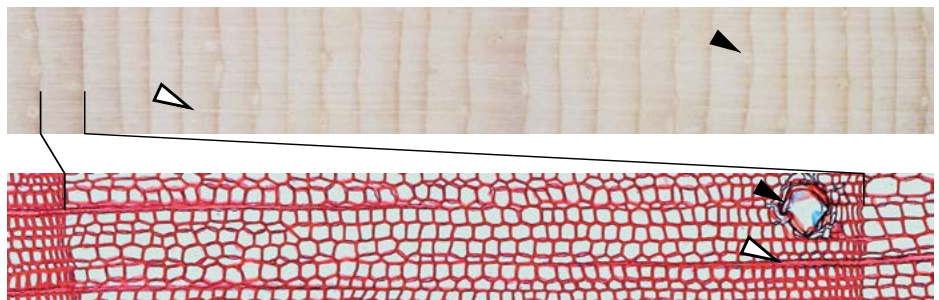


Abb. 7. Oben: Ansicht von Jahrringen auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene, mit Wuchsrichtung von links nach rechts. Die geschliffene, aufgehellte Oberfläche eines Stamm-Bohrkerns macht das Spätholz als schmalen dunkleren Streifen sichtbar. Unten: Ein gefärbter Dünnschnitt mit den typischen Zellstrukturen eines einzelnen Jahrrings. Schwarze Linien: Jahrringgrenzen; schwarzer Pfeil: Harzkanal; weisser Pfeil: Markstrahl. Quelle: Dendrowissenschaften WSL.

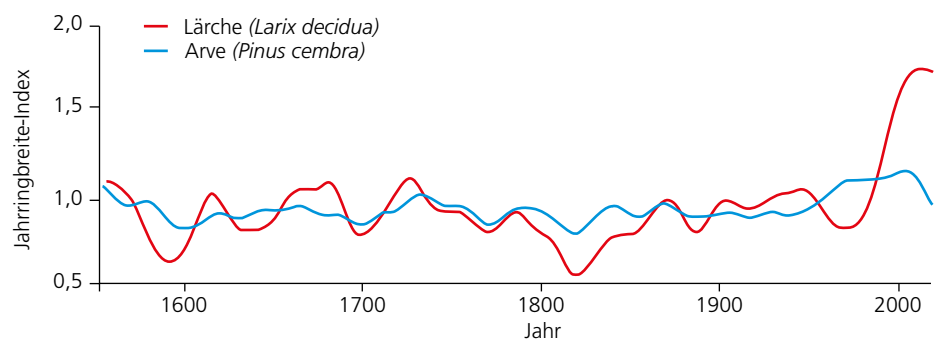


Abb. 8. Einfluss des Klimawandels auf das Baumwachstum, dargestellt als über 32 Jahre gemittelter Jahrringbreite-Index. Die Erwärmung der letzten Jahre geht bei der Arve einher mit einer Wachstumsabnahme, nicht aber bei der Lärche. Quelle: Carella (2022).

etwa 1 mm breit werden (Carrer *et al.* 2007). Das Wachstum selbst wird durch wärmere Temperaturen im Juli/August und im vorhergehenden Herbst sowie durch hohe Winterniederschläge begünstigt (Carella 2022; Carrer *et al.* 2007; Oberhuber 2004). Aber auch lokale Standortbedingungen wie Nährstoffe, konkurrenzierende Bodenvegetationen und mikroklimatische Bedingungen beeinflussen das Baumwachstum, insbesondere an der Baumgrenze (Gruber *et al.* 2018, 2009). Eine Fallstudie im Aversal (Kanton Graubünden) zeigt, dass die Arven in tieferen Lagen seit den 1980er Jahren weniger gut wachsen. Dies im Gegensatz zur Lärche, die offenbar von der Klimaerwärmung profitiert (Abb. 8; Carella 2022). Nebst veränderten Umweltbedingungen könnten auch die heutige Nutzung und eine dadurch verdichtete Bestandesstruktur (verstärkte Konkurrenz insbesondere für die Arve) diesen Trend verursachen, weshalb dieses Resultat durch weitere Studien erhärtet werden muss.

Nutzung

Früheste Nachweise für die Verwendung von Arvenholz stammen aus einer Quellfassung in St. Moritz aus der Bronzezeit (1400 v. Chr.). Ab dem 16. Jahrhundert sind nebst der Verwendung als Brennholz, zum Beispiel in Salinen, vielfältige Nutzungen bekannt. Aus dem leicht zu verarbeitenden, weichen Holz wurden Gebrauchsgegenstände für die Berglandwirtschaft wie Schalen, Milchgeschirre und Löffel angefertigt. Aufgrund der antibakteriellen und insektenabwehrenden Eigenschaften war Arvenholz beliebt für Möbel zur Lagerung von Gütern (Schränke, Mehltruhen). Bis heute wird das Holz im Möbel- und im Innenausbau verwendet, wie bei den im Engadin häufig anzutreffenden getäfelten Arvenstuben. Lange wurde das Arvenholz als weniger wertvoll angesehen als Lärche und Fichte, weshalb die Preise tiefer waren. Während mit dem Bauboom in den 1970er-Jahren die Nachfrage nach Arvenholz zunahm, kam in den 1990er-Jahren eine Wende: «Hei-

melige» Arvenstuben waren nicht mehr gefragt, und die gesamte Wertschöpfungskette litt unter der schwindenden Nachfrage (Bisaz 2004). Aus dieser Krise heraus entstand eine Initiative zur Erforschung des gesundheitlichen Nutzens des Arvenholzes. Das Hauptresultat aus dieser Studie war, dass dank Arvenholz im Schlafzimmer das Herz täglich 3500 Schläge, also eine Stunde Herzarbeit, einspart und man sich ausgeruhter fühlt (Grote *et al.* 2003). Für diese Wirkung verantwortlich sind Terpene, allen voran Pinen. So wurden auch Holzspäne in Kopfkissen abgefüllt, um für einen erholsamen Schlaf zu sorgen. Diese Image- und Marketingaktion für ein Naturprodukt machte die gesunden und positiven Eigenschaften der Arve und ihres Holzes allgemein bekannt. Zwar hat sich der Absatz von Arvenholz in den letzten 20 Jahren erholt, bleibt aber mit rund 0,7 % Anteil am schweizweit verarbeiteten Volumen nur regional bedeutend.

Nebst Holz wurde in gewissen Regionen auch Waldstreu für Tierfutter und Einstreu bis Mitte des 20. Jahrhunderts verwendet. Dies mit schwerwiegenden Auswirkungen auf die Verjüngung der Arve: Weil die Rohhumusaufgabe entfernt wurde, verschwand nicht nur das Keimbett, sondern oft auch die sich darin entwickelnden Keimlinge. Aus Sorge um die Waldverjüngung wurde ab 1900 in vielen Gebieten die Streu- und Zap-

fennutzung eingeschränkt oder verboten. Nebst der Streunutzung erschwerte die regional bis ins 20. Jahrhundert finanziell abgoltene Tannenhäherjagd die Naturverjüngung: Der Vogel wurde fälschlicherweise als Schädling beurteilt, weil er zu viele Arvensamen fresse (Hess 1916).

Heute werden vermehrt nicht-forstliche Produkte hergestellt (Abb. 9). Diese kommerzielle Nutzung der Arve ist in der Schweiz kantonal geregelt und bedarf gewöhnlich einer Bewilligung. Zunehmende Bedeutung erfahren die schmackhaften und nahrhaften Arvensamen (oft als Zedernkerne bezeichnet), allerdings stammen diese gewöhnlich von der Sibirischen Arve (*P. sibirica*). Als weiteres nicht-forstliches Produkt wird aus Nadeln und Ästen ätherisches Öl destilliert. Solche Aromaöle mit typischem Arvenduft werden unverarbeitet eingesetzt, oder als Zugabe in Seifen, Crèmes, Desinfektionssprays, Raumduft, aber auch zum Aromatisieren von Käse verwendet. Nadeln werden als Zusatz in Würsten, Tees, Gewürzen und sogar Eiscrème konsumiert. Aus unreifen Zapfen wird der tiefrote Arven- oder Zirbenlikör hergestellt. Farblose Arvenbrände können mit Zapfen, Samen oder aus Nadeln angesetzt werden.

Nebst diesen Arvenprodukten, über deren Wertschöpfung keine Zahlen verfügbar sind, hat die Arve auch einen

ideellen und vor allem ästhetischen Wert. Die jahrhundertealten, von Wind und Wetter gezeichneten Symbolbäume werden bewundert und die reich strukturierten Arven- oder Arvenmischwälder geschätzt. Diese Landschaftsqualität gilt als wichtiges Argument für die Attraktivität einer touristischen Destination und somit für die lokale Wertschöpfung.

Samenernte, Aufzucht und Aufforstung

Für die Nachzucht werden die Arvenzapfen ab Mitte August am stehenden Baum geerntet. Bevor die Samen keimfähig sind, benötigen sie eine Nachreifung (Stratifikation). Die geernteten Zapfen werden in feuchtem Sand bei wechselnden Temperaturen zwischen 5 und 25 °C acht bis zehn Wochen gelagert, bis sie zerfallen. Danach werden die Samen aus den Zapfen gerieben und gereinigt. Anschliessend werden sie nochmals zwölf Wochen in Torf/Sand-Substrat stratifiziert (warm-kalt-warm), bis man sie bei 3 bis –5 °C für drei bis sieben Jahre einlagern kann.

Das Substrat des Saatbeetes im Freiland sollte einen pH-Wert von 4,5–6,0 haben. Bei erfolgreicher Keimung verbleiben die Sämlinge für zwei bis drei Vegetationsperioden im Saatbeet. Wenn die Jungpflanzen 8–10 cm erreicht haben, können sie in einen Topf umgepflanzt werden. Dies darf nur in der Vegetationspause erfolgen. Die Topfgrösse sollte schrittweise erhöht werden. Es ist wichtig, dass die Arven nicht zu nass kultiviert werden, weil sie durchlässige Böden bevorzugen.

Die Forschungsanstalt WSL untersucht schon seit über 50 Jahren Möglichkeiten, die Arve im Gebirgswald zu fördern. Zu diesem Thema wurden viele Aufforstungen realisiert und über Jahrzehnte wissenschaftlich betreut. Wenn immer möglich sollte die Arve jedoch natürlich verjüngt werden, auch wenn dies Jahrzehnte dauert. Dabei spielt der Kleinstandort eine entscheidende Rolle für den Verjüngungserfolg.

Aufforstungen mit Arven sind in der Regel mit hohen Kosten verbunden, da bereits die Pflanzennachzucht bis zu fünf Jahre dauert. Auch ist der Transport im Gebirgswald und die Verteilung im Gelände bis zum Pflanzloch aufwändig.



Abb. 9. Eine vielfältige Produktpalette aus Arven trägt zur regionalen Wertschöpfung bei.



Abb. 10. a) Wiedehopfhau im Einsatz für die Lochpflanzung. b) Kleinterrassen zum Schutz der Jungpflanzen vor gleitendem Schnee.

Die Versuche mit Arven haben gezeigt, dass Topfpflanzen gegenüber wurzelackten Pflanzen deutliche Vorteile haben. Der bessere Anwuchserfolg von Topfpflanzen kompensiert die höheren Kosten gegenüber wurzelackten Pflanzen. Die im Substrat mitgegebenen Nährstoffe bei Pflanzen im Container (Quickpot) bewirken eine kontinuierliche Versorgung, auch mit Wasser. So erreichen die im Container geschützten Wurzeln das Pflanzloch frisch, was den Pflanzschock deutlich reduziert.

Im oft steilen Gelände mit steinigten Böden ist das Ausheben der Pflanzlöcher

aufwändig. Eine klassische Lochpflanzung mit der Wiedehopfhau hat sich bewährt (Abb. 10a). An Südhängen mit winterlicher Schneebewegung (Schneegleiten) helfen Kleinterrassen (Tellerbermen; Abb. 10b), die mechanischen Beschädigungen an der Pflanzung zu reduzieren. Die ausgegrabenen Steine der Pflanzlöcher finden Platz auf den kleinen Terrassen und schirmen den Boden ab. Am Südhang reduzieren sie die Austrocknung, am Nordhang wirken die Steine als Wärmespeicher.

Als Pflanzstellen sollten nur ausgewählte Kleinstandorte mit kleinen

Gruppen (drei bis fünf Arven) bepflanzt werden. Günstige Kleinstandorte sind Geländeerhöhungen und Bereiche um alte Baumstrünke oder liegengelassenes, zum Hang quer gefälltes Baumholz. Ungeeignet sind nasse, kühle und krautreiche Geländevertiefungen (Mulden) mit später Ausaperung. Auch Vegetationskonkurrenz durch Hochstauden und dichtes Reitgras sind problematisch, da dort mit häufigen Pilzkrankungen zu rechnen ist. In den ersten 20 Jahren sind die Arven anfällig auf Pilzkrankungen (v. a. *Gremmeniella*-Triebsterben), die sich unter lang andauernder Schneebe-

Aufforstung und Herkunftsnachweis

In der Vergangenheit wurden die Schweizer Wälder stark übernutzt. Schadenergebnisse wie Bodenrutschungen, Murgänge und Lawinen nahmen zu. In der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts gelangte man zur Einsicht, als Gegenmassnahme teils grossräumig Waldflächen aufzuforsten. Dies war nicht immer erfolgreich, wie das Beispiel des Kantons Freiburg zeigt (Fraginière *et al.* 2022). Dort wurden gemäss Forstarchiven zwischen 1885 und 1952 mindestens 450 000 Arven angepflanzt. Trotz umfassender Nachsuche konnten 2020 nur noch etwa 650 Arven gefunden werden (0,15 %). Dieser enorme Misserfolg dürfte damit zusammenhängen, dass die Arven an ungeeigneten Standorten gepflanzt

wurden. Vermutlich wurden zumeist wurzelackte Jungpflanzen verwendet (Abb. 11), die bereits auf dem Transport Trockenschäden erlitten oder am Pflanzort schlecht anwachsen konnten.

Genetische Untersuchungen der Arvenbestände im Kanton Freiburg liessen eine klare Unterscheidung von lokalen, natürlich aufgewachsenen und angepflanzten Beständen erkennen (Sonnenwyl 2021). Die in den gepflanzten Beständen noch vorhandenen Bäume stammten aus der Ostschweiz, teils von noch weiter im Osten (vermutlich Südtirol). Solche Nachweise fremder Herkunft sind dank der Kenntnis der genetischen Struktur der Arve in den Alpen möglich (vgl. Abb. 4).



Abb. 11. Bauer mit Hutte voller wurzelackter junger Fichten für die Aufforstung des Schwybergs, 1943. Auch Arven dürften zumeist so transportiert und angepflanzt worden sein. Quelle: BCU Fribourg.

deckung ausbreiten (Merges *et al.* 2020). Dies wurde in der Hochlagenaufforstung am Stillberg (Davos, Kanton Graubünden) sehr deutlich, wo in Muldenlagen und zwischen Lawinenverbauungen mit langer Schneebedeckung praktisch alle Arven wegen *Gremmeniella*-Triebsterben eingingen (Barbeito *et al.* 2013). Gepflanzte Arven sind anfällig auf Wildschäden und werden gerne durch das Schalenwild gefegt, geschlagen und verbissen (Abb. 12). Besonders in Gebieten, wo keine Altbäume vorhanden sind, ist der Wilddruck auf diese Baumart enorm. Eine Aufforstung ohne Wildschutzmassnahmen ist daher kaum erfolgreich.

Genetische Vielfalt

Die genetische Vielfalt ist ein wichtiger Bestandteil der Biodiversität und beschreibt die Vielfalt innerhalb von Arten. Sie kann mit molekulargenetischen Methoden bestimmt werden. Ihre Beschreibung abhängig von geographischer Lage und Umweltbedingungen hilft, ökologische und evolutionäre Prozesse besser zu verstehen. Genetische Analysen von Nadelbäumen wie der Arve sind aber oft eine finanziell grosse Herausforderung, weil das Erbgut der Arve fast



Abb. 12. Feg- und Schälschäden durch Paarhufer führen gewöhnlich zum Absterben der Jungbäume.

Habitateignung
höchst geeignet
nicht geeignet

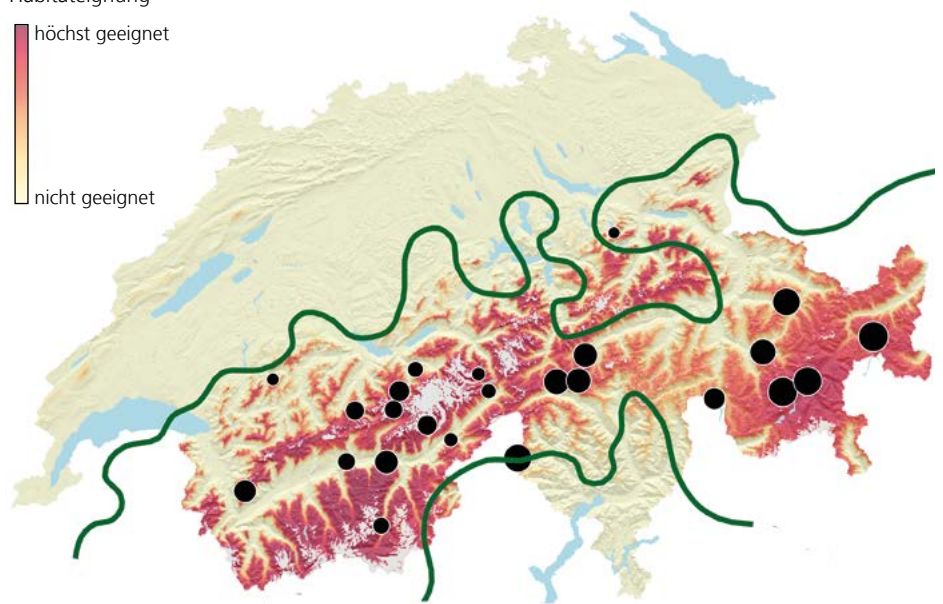


Abb. 13. Neutrale genetische Vielfalt von 24 Schweizer Arvenbeständen in Abhängigkeit der geographischen Lage und der Habitateignung. Der Rotanteil der Karte zeigt den Grad der Habitateignung, die grüne Linie markiert die nördliche und südliche Verbreitungsgrenze. Je grösser der Kreis ist, desto höher ist die genetische Vielfalt. Die neutrale genetische Vielfalt korreliert mit der Randlage, nicht aber mit der Habitateignung der Bestände. Verändert aus Dauphin *et al.* (2020).

zehnmal so gross ist wie das des Menschen. Die genetische Vielfalt wird in zwei Kategorien eingeteilt:

Neutrale genetische Vielfalt: Die Vielfalt der Gene, die keinen Einfluss auf die Fitness haben. Beeinflusst wird sie durch Genfluss, Änderungen in Bestandsgrössen und zufällige genetische Veränderungen (= genetische Drift). Diese sogenannten neutralen Prozesse wirken auf das ganze Erbgut. Muster der neutralen genetischen Vielfalt geben auch Auskunft über Verwandtschaftsbeziehungen (z. B. für Herkunftsnachweise).

Anpassungsrelevante genetische Vielfalt: Die Vielfalt der Gene, die einen Einfluss auf die Fitness haben. Sie spielt daher bei der Anpassung an die Umwelt eine Rolle und ist geprägt von der natürlichen Selektion, die auf einzelne Genregionen wirkt und über viele Generationen hinweg zu angepassten Beständen führt.

In 24 Schweizer Arvenbeständen war die neutrale genetische Vielfalt in grossen Beständen im Zentrum des Verbreitungsgebiets generell höher als in kleinen Beständen nahe der nördlichen und südlichen Verbreitungsgrenze (Abb. 13; Dauphin *et al.* 2020). Die anpas-

sungsrelevante genetische Vielfalt hingegen variierte unabhängig von der geographischen Lage. Sie korrelierte aber teilweise mit der Habitateignung: Bestände in geeigneten Habitaten hatten eine kleinere anpassungsrelevante genetische Vielfalt als Bestände am Rande der ökologischen Nische. Dies ist kein Widerspruch. Die natürliche Selektion in geeigneten, beständigen Habitaten führt nämlich zu einer Reduktion der anpassungsrelevanten genetischen Vielfalt, während Bestände am Rand der Nische noch nicht optimal angepasst sind und deshalb noch unangepasste Gen-Varianten aufweisen. Diese Erkenntnisse können helfen, genetisch vielfältige Bestände zu schützen, fördern und bewirtschaften, zum Beispiel indem passende Saatgutquellen ausgewählt werden.

Lebensraum Arvenwald

Die Arven und der Arven-Lärchen-Wald sind im Übergang von der bewaldeten zur baumlosen alpinen Stufe ein artenreicher Lebensraum. Arvenbestände sind wegen den kargen Keim- und Aufwuchsbedingungen oft lückig. Wo das Alpvieh nicht intensiv weidet, bedecken moosreiche Zwergstrauchheiden mit

Alpenrose, Heidelbeere, Preiselbeere und Bärentraube den Boden. Unter den Kronen findet sich oft nur eine dicke Schicht Rohhumus. Diese Wälder bieten auch Lebensraum für zahlreiche Insekten und werden nebst dem Tannenhäher von anderen samenfressenden Wirbeltieren besiedelt. Die lockeren Bestände begünstigen das Vorkommen von sich am Boden ernährenden Vogelarten wie Buchfink, Mistel-, Sing- und Ringdrossel, Baumpieper, Zitronengirlitz, Berglauh- sänger, Gartenrotschwanz, Grünspecht und Birkhuhn. Ebenso profitieren Rothirsch, Gämse und Schneehase von der lockeren Bestandsstruktur. Seltene Arten wie das Moosglöckchen (*Linnaea borealis*) oder die Alpen-Waldrebe (*Clematis alpina*) haben im Arvenwald ihr ökologisches Optimum (Delarze et al. 2015).

Obwohl Arven bezüglich Flechtenvielfalt nicht unter den Top-Baumarten figurieren, wurden auf dieser Baumart in der Schweiz schon mehr als 100 Flechtenarten beobachtet (Stofer et al. 2019). Dabei sind die augenfälligen Bart-, Strauch- und Blattflechtenarten mit einem Anteil von rund 40 % in der Minderheit gegenüber den Krustenflechten. Sechs Arten sind gemäss der Roten Liste gefährdet (Scheidegger et al. 2002). Häufig anzutreffen ist die Wolfsflechte (*Letharia vulpina*; Abb. 14b), die durch ihre leuchtend gelbe Farbe auffällt. Die farbgebende, toxische Vulpinsäure schützt sie vor Frassfeinden; sie wurde früher sogar verwendet, um Wölfe zu vergiften.

Die Arve bietet nicht nur Auflage für Flechten, sie lebt selbst in obligater Symbiose mit Mykorrhizapilzen wie Röhrlingen (Abb. 14a), Täublingen und Schleierlingen. Die Feinwurzeln der Arven sind vollständig von Pilzfäden umspinnen (Abb. 14d). Dies ermöglicht den Austausch von Nährstoffen und Zucker zwischen Pilz und Wirtsbaum und ist insbesondere an den Grenzstandorten des Arvenvorkommens wichtig, wo stickstoffarme Rohhumusböden und felsige Lagen vorherrschen. Die Vielfalt der Mykorrhizapilz-Partner wächst mit dem Alter der Arven und ihre Art-Zusammensetzung variiert je nach Ort und Exposition (Mandolini et al. 2022). Häufig zu finden ist der Arvenröhrling (*Suillus plorans*; Abb. 14c), der ausschliesslich mit der Arve vorkommt.

Auch hinsichtlich Pilzkrankheiten gilt die Arve nicht als Hotspot (Dubach et al.



Abb. 14. Typische Pilze (a, c, d; Schmierröhrlinge, *Suillus* spp.) und Flechten (b; Wolfsflechte, *Letharia vulpina*), die mit und auf Arve wachsen. a) Mykorrhizen und Fruchtkörper des Moor-Röhrlings (*S. flavidus*) an einem Pflanzgarten-Arvensämling. Der Arvenröhrling (c; *S. plorans*) bildet typische Knöllchenmykorrhizen aus (d) und produziert ein weitreichendes Netzwerk aus dicken Myzelsträngen, die den Wasser- und Nährstofftransport über weite Distanzen gewährleisten.

2022). Sie wird vor allem in der Verjüngungsphase befallen. Dabei spielen zwei Arten eine wesentliche Rolle (Nierhaus-Wunderwald 1996): der Arvenschneepilz (*Gremmenia infestans*, syn. *Phacidium infestans*) und das *Gremmeniella*-Triebsterben (*Gremmeniella abietina*; Abb. 15). Diese Pilze wachsen unbemerkt während der Vegetationsruhe, weshalb das Pilzwachstum kaum durch die Abwehrreaktionen der betroffenen Bäume gestört wird. Beim Arvenschneepilz verfärben sich anfangs die toten Nadeln oliv-grau. Nach der Schneeschmelze trocknen sie rasch aus, verfärben sich braun, bleichen während des Sommers aus und werden brüchig. Abgestorbene Nadeln bleiben lange in weissen Büscheln an den Trieben hängen. Beim *Gremmeniella*-Triebsterben ist zuerst eine braunrote Verfärbung der Nadelbasis sichtbar, später fallen einjährige, verkahlte und tote Triebe auf.

Ein anderer Pilz, der Schäden an der Arve hervorruft, ist *Cenangium ferruginosum*, der Erreger des Triebschwindens der Föhre. Er wächst in der Regel saprophytisch auf der Rinde von verschiedenen Föhrenarten (*Pinus* sp.). Wenn Bäume durch Trockenheit, Frost oder Insekten-schäden geschwächt sind, kann der Pilz auch parasitisch auftreten. Zahlreiche Arven und Waldföhren mit Schadsymptomen wurden 1992 und 2010 in den Kantonen Graubünden und Wallis infolge Trockenstress beobachtet. Solche Ereignisse dürften unter zukünftig erwarteten Klimaverhältnissen vermehrt auftreten.

Zwei invasive Föhrennadelkrankheiten stellen eine weitere Gefahr für die Arve dar: die Rotband- und die Braunfleckenkrankheit (Dubach et al. 2022). Beide pathogenen Pilze wurden in der Schweiz bisher nicht im natürlichen Verbreitungsgebiet der Arve beobachtet.



Abb. 15. Beispiele von Schadbildern an der Arve durch Pilzbefall: a) *Gremmeniella*-Triebsterben und b) Arvenschneepilz.

Oft wird die physiologische Nadelschütte als Symptom einer Pilzerkrankung angesehen. Es handelt sich dabei jedoch um einen natürlichen Alterungsprozess der Nadeln, der zumeist bei älteren Nadeljährgängen auftritt und durch Stress, zum Beispiel Trockenheit, gefördert wird.

Die Gattung *Pinus* weist unter den Koniferen die höchste Anzahl herbivorer Insekten und auch den höchsten Spezi-

alistenanteil auf (Abb. 16). Innerhalb der Föhren ist die Zahl der auf der Arve gefundenen Insekten allerdings deutlich geringer als bei der Waldföhre, der Schwarz- und der Bergföhre (*P. sylvestris*, *P. nigra* und *P. mugo*). Zwei Arten gelten als Spezialisten für die Arve, die Rindenlaus *Cinara cembrae* und die Pflanzenwespe *Xyela alpigena* (Abb. 16).

Eine ganze Reihe von Insekten hat in der Schweiz bereits zu Schäden an der

Arve geführt, darunter verschiedene Läuse, Blattwespen, Rüsselkäfer, Bockkäfer, Borkenkäfer, sowie Motten, Wickler und Zünsler (Abb. 17). Bei allen Gruppen kam es auch zu flächigem Befall. Die Arvenminiermotte (*Ocnerostoma piniariella*), der Kleine achtzählige Fichtenborkenkäfer (*Ips amitinus*), der Kleine Arvenborkenkäfer (*Pityogenes conjunctus*) und die Arvenlaus (*Pineus cembrae*) sind die Arten mit den häufigsten Meldungen von Schäden an Arven in der Schweiz (Abb. 17).

Arve im Klimawandel

Der Klimawandel führt dazu, dass die meisten Waldhabitate wärmer und im Sommer trockener werden. Damit Bestände deswegen nicht eine reduzierte Fitness haben oder gar lokal aussterben, sind vier verschiedene Arten von Reaktionen möglich (Abb. 18): Einzelne Bäume vermögen Umweltveränderungen ohne genetische Veränderungen zu tolerieren (phänotypische Plastizität), Bestände können sich durch Samenausbreitung hangaufwärts in kühlere Lagen verschieben (Migration), durch genetischen Austausch (Genfluss) Genvarianten erwerben, die für wärmere Be-

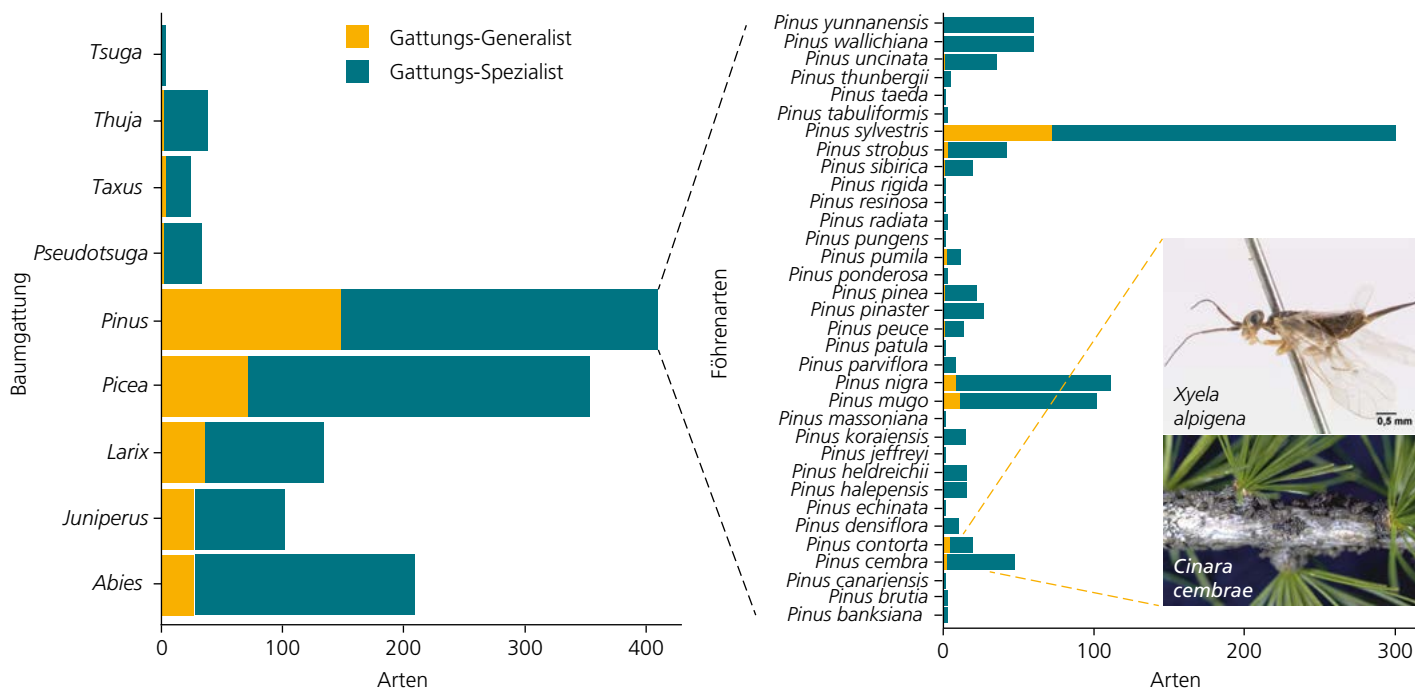


Abb. 16. Anzahl Arten pflanzenfressender Gliederfüßer (Insekten und Spinnentiere), die auf verschiedenen Koniferengattungen und Föhrenarten nachgewiesen sind (Bezugsraum Deutschland, nach Brändle und Gossner unpubl.). Es ist jeweils nach Wirts-Spezialisten und -Generalisten einer Baumgattung (links) oder Föhrenart (rechts) unterschieden. Die Bilder rechts zeigen die beiden Arvenspezialisten *Xyela alpigena* und *Cinara cembrae*.

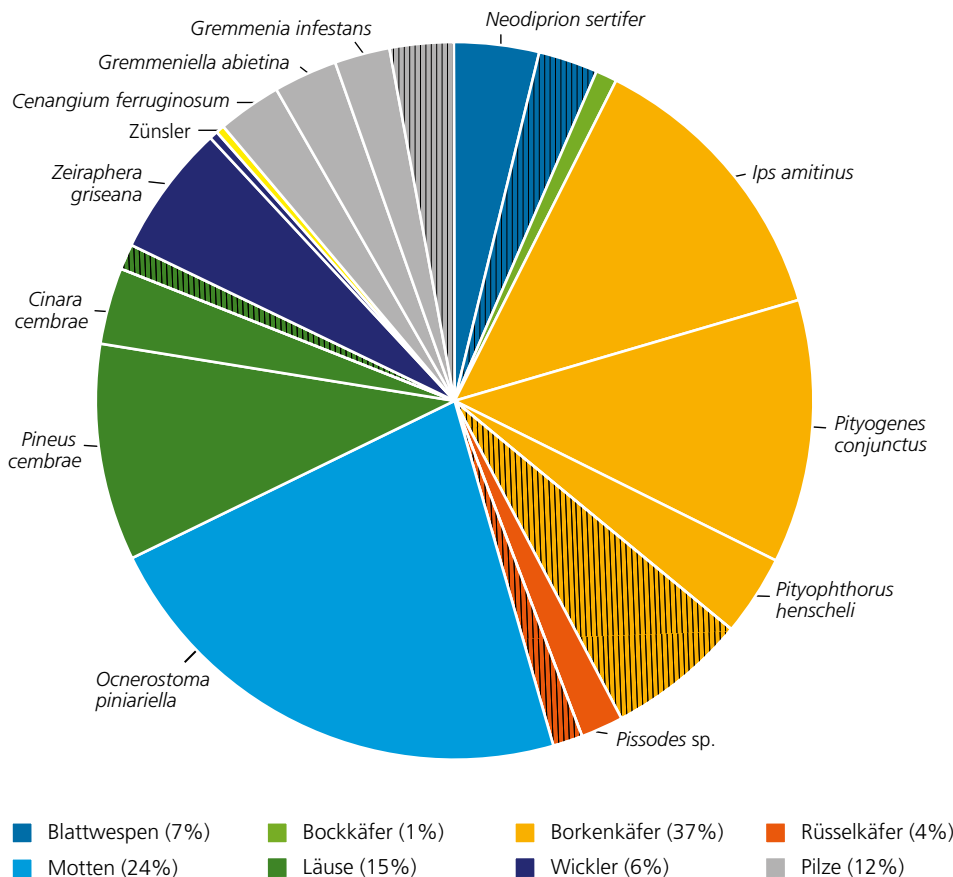


Abb. 17. Prozentuale Anteile der Meldungen von Schäden an Arve, die durch Insekten oder Pilze verursacht wurden (1984–2021). Erwähnte Arten(gruppen) wurden mindestens zehnmal gemeldet, schraffierte Farben fassen restliche Arten einer Insektengruppe oder Pilzen zusammen.
Quelle: Waldschutz Schweiz.

dingungen vorteilhaft sind, oder sich genetisch durch natürliche Selektion von fitten Individuen über viele Generationen hinweg an die neuen Bedingungen anpassen (Adaptation).

Dauphin *et al.* (2021) rekonstruierten die historischen klimatischen Bedingungen und bestimmten die genetische Zusammensetzung in sieben Schweizer Arvenbeständen. In den letzten 150–250 Jahren ist es in allen Beständen leicht trockener und deutlich wärmer geworden. In der gleichen Zeitperiode konnten wichtige genetische Veränderungen nachgewiesen werden. Diese waren allerdings erheblich kleiner als sie für die Arve nötig wären, um sich an die schnellen vorhergesagten Klimaveränderungen anzupassen. Um dem vielerorts zunehmenden Konkurrenzdruck durch andere Baumarten auszuweichen und somit die Arvenflächen zu erhalten, müsste sich die Arve in höhere Lagen ausbreiten, wo die zukünftigen Standortbedingungen den Ansprüchen der Arve entsprechen. Dies ist aber schwierig, weil der Tannenhäher die Arvensamen bevorzugt im bereits bestehenden Wald vergräbt (Neuschulz *et al.* 2018) und die Lebensbedingungen bezüglich Topographie und Boden mit zunehmender Höhe ungünstiger werden (fehlen-

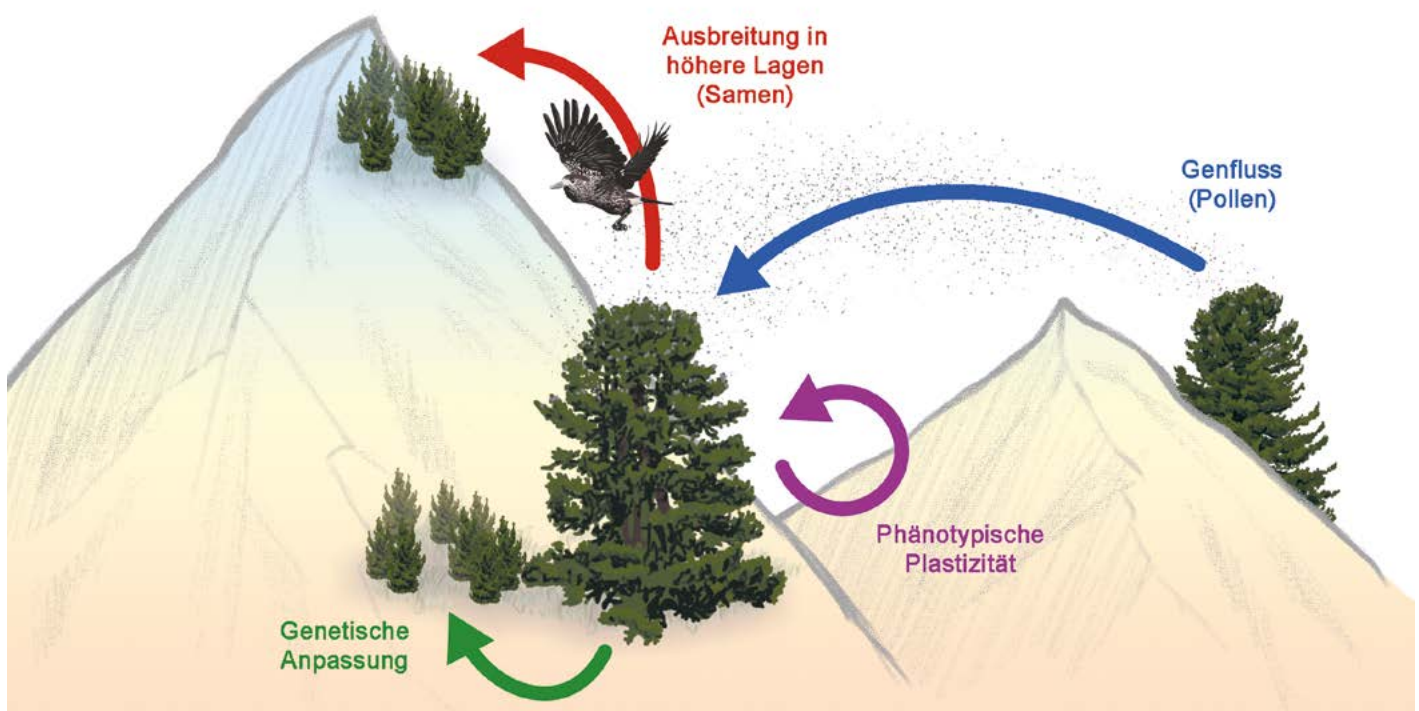


Abb. 18. Die vier Möglichkeiten, wie die Arve auf die Klimaänderung reagieren kann. Phänotypische Plastizität (violett), Ausbreitung in höhere Lagen (rot), Genfluss durch Pollen aus tiefer gelegenen Beständen (blau) und genetische Anpassung (grün).

der Rohhumus). Weil Arven langlebig sind, eine sehr lange Generationszeit haben und genetische Anpassung über viele Generationen erfolgt, kann dieser Prozess kaum mit dem schnellen Klimawandel mithalten. Es besteht also die Gefahr, dass gewisse Arvenbestände kleiner werden oder sogar lokal verschwinden.

Zukunftsaussichten

Die kommenden Jahrzehnte lassen vielfältige Änderungen der Umwelt erwarten: wärmere Temperaturen, eher weniger Niederschlag und längere Trockenperioden. Somit ist anzunehmen, dass sich die Vegetationsstufen und damit auch der Lebensraum der Arven nach oben verschieben. Dabei hat die Arve einen schweren Stand: Sie ist gegenüber den von unten vordringenden Baumarten konkurrenzschwach und wächst langsam. Hinzu kommt, dass die Arve fast nur durch den Tannenhäher weiter nach oben gelangt, dieser aber vorwiegend im bereits bewaldeten Bereich seine Samenverstecke anlegt. Ebenso fehlt oberhalb der Waldgrenze zumeist die Rohhumusaufgabe, welche der Arve günstige Keimungs- und Etablierungsbedingungen bietet. Immerhin scheinen die für das Wachstum wichtigen Mykorrhiza-Pilze dort bereits vorhanden zu sein (Merges *et al.* 2018), was die Etablierung der Jungpflanzen erleichtern sollte. Erschwerend dürften hingegen die wärmeren Temperaturen im Frühling sein, sodass Schäden durch Pilze zunehmen und dadurch vermehrt Arven absterben werden. Dies ist in erster Linie davon abhängig, wie viel Schnee liegt und wie lange die Ausaperung dauert. Auch neu eingeschleppte Schädlinge können zu weiträumigen Schäden führen, wie dies bei der nahe verwandten *Pinus albicaulis* in Nordamerika der Fall ist (Shanahan *et al.* 2016).

Nebst dem Klima wird sich die Nutzung in den Arven-Lebensräumen weiter verändern: Wo Wiesen und Weiden



Abb. 19. Auch in Zukunft werden Arven die alpine Landschaft zieren, auch wenn ihre Verbreitung im wärmeren, trockeneren Klima eingeschränkt wird.

aufgegeben werden, kann sich Wald entwickeln, was der Arve zugutekommt. Dabei ist zu beachten, dass die Rückgewinnung von Waldfläche oberhalb der heutigen Waldgrenze einer Wiederbewaldung entspricht, da durch Alpnutzung die natürliche Waldgrenze oft um 200–300 m nach unten gedrückt wurde. Andernorts können intensivierte Aktivitäten (z. B. Tourismus, Berglandwirtschaft) und hoher Wilddruck negative Auswirkungen auf die natürliche Verjüngung haben.

Schließlich könnte auch die Langlebigkeit zum genetischen Stolperstein werden: Alte Bäume, die sich in ihrer Jugendzeit vor etwa 150 Jahren unter feuchteren und deutlich kühleren Bedingungen erfolgreich durchgesetzt haben, weil sie damals gut angepasst waren, werden weiterhin ihre Gene an den Jungwuchs vererben, der in einer trockeneren und wärmeren Umwelt erfolgreich sein muss (Dauphin *et al.* 2021).

Diese Einschätzung bedeutet aber nicht, dass die Arve kurz vor dem Aus-

sterben steht und der Arvenwald verschwinden wird, wovor bereits Schnidrig (1935) gewarnt hat (Zitat unten). Arven bleiben uns noch lange erhalten, wie sie das schon über Millionen von Jahren geschafft haben (Abb. 19). Zum Beispiel könnte in tieferen Lagen des Arvenvorkommens die Konkurrenz insbesondere durch die Fichte abnehmen, falls diese durch Trockenheit und Borkenkäfer vermehrt unter Druck gerät. Das Arvenareal könnte sich aber verkleinern. Vor allem in Randvorkommen, wo das Klima bereits jetzt sehr ozeanisch geprägt ist, dürfte die Arve über die nächsten ein- bis zweihundert Jahre Mühe bekunden oder gar lokal verschwinden. Demgegenüber steht das vermehrte Interesse an Arvenprodukten und damit auch an der waldbaulichen Förderung der Arve. Diese sollte sich angesichts der Klimaerwärmung auf die hohen Lagen fokussieren, wo auch in Zukunft Arven-taugliche Bedingungen herrschen werden.

«Ungestillt bliebe dann des Wanderers stille Sehnsucht nach dem Wipfelrauschen des weihrauchduftenden Arvenwaldes, und zu spät käme des Naturfreundes reuige Beteuerung: es ist schade um den herrlichen Arvenwald, die Zierde unseres Gebirges.»

(Schnidrig 1935)

Empfehlungen für die Praxis

Damit Arvenwälder als vielfältige Lebensräume am Übergang zur alpinen Stufe unter zukünftigen Klimabedingungen erhalten bleiben, bedarf es eines integrativen Ansatzes zugunsten der Biodiversität und verschiedener Waldfunktionen und -leistungen wie Schutz, Nutzung und Erholung.

Bei **Arvenpflanzungen** ist auf folgende Aspekte zu achten:

- geeignete Kleinstandorte auswählen, Runsen und schnee-reiche Muldenlagen meiden
- in kleinen Gruppen mit Abständen dazwischen
- gemischt mit anderen Hochlagen-Baumarten (z.B. Berg-föhre, Lärche)
- regionales Pflanzmaterial in Töpfen verwenden, dabei eine mögliche Höhenverschiebung unter zukünftigen Klimabe-dingungen einbeziehen
- wo möglich, Pflanzen bereits in hohen Lagen aufziehen (Prä-Adaptation)
- Pflanzungen auch oberhalb der heutigen Waldgrenze in Betracht ziehen

Lokale Gegebenheiten und die waldbauliche **Geschichte** sind bedeutend bei der Beurteilung, wo und wie die Arve gefördert werden soll. In manchen Gebieten zeigt sich die Arve sehr vital und wüchsig. Dort kann sie zur Förderung der Biodiversität oder um die Landschaft offen zu halten – etwa zur Beweidung oder für touristische Zwecke – auch eingedämmt werden. Andernorts kann die Arve unter Konkurrenzdruck geraten und sollte waldbaulich gefördert werden.

Die beiden **Pilzpathogene** Arvenschneepilz (*Gremmenia infestans*, Abb. 20b) und *Gremmeniella*-Triebsterben (*Grem-*

meniella abietina) spielen eine entscheidende Rolle in der Verjüngungsdynamik der Arve und beeinflussen deren räumliche Verteilung. Hohe und lange Schneebedeckung fördert Pilzbefall, zudem verbreiten sich Schneepilze über direkt benachbarte Bäume.

Die Arve bevorzugt offene Waldstrukturen (Abb. 20a). Sie ist zwar gut an Gebirgsstandorte angepasst, bekundet aber Mühe bei hoher Stammzahl, insbesondere im Schatten von schneller wachsenden Baumarten wie der Fichte. Um die Arve auch bei zunehmender Konkurrenz zu erhalten, sollte sie möglichst frühzeitig durch gezielte **Jungwaldpflege** oder später durch die Entnahme von konkurrierenden Arten gefördert werden. Damit kann die Arve auch ausserhalb des für sie in Zukunft prognostizierten Verbreitungsgebiets als wertvolle Mischbaumart Funktionen übernehmen, sollte die Fichte dort durch Käferschäden zunehmend unter Druck geraten.

Da Landnutzung und die Höhe der **Wildbestände** einen grossen Einfluss darauf haben, wo sich das Areal der Arve in höhere Lagen ausdehnen kann, lassen sich potenziell die Waldfunktionen zukünftiger Arvenwälder mitbestimmen.

Die Nutzung von Biomasseprodukten der Arve hat Tradition, und lokal verarbeitete Nischenprodukte sind von grossem Wert. Eine angepasste Nutzung erhöht die Wertschätzung der Arve und trägt somit zu ihrer Erhaltung und damit zu den Ökosystemleistungen der Gebirgswälder bei. Arvenwälder haben einen hohen landschaftlichen Wert. Tourismus, Forstbetriebe und Waldbesitzerinnen und -besitzer sollten sich deshalb auf **verträgliche Nutzungen** einigen und so den Fortbestand dieser sensiblen Lebensräume sichern.



Abb. 20. a) Aufgelockerter Arvenbestand im Karstgebiet Rautalp (Kanton Glarus). b) Vom Arvenschneepilz (*Gremmenia infestans*) befallene Arven nahe der Waldgrenze. Der grössere Baum links wird den Befall verkräften. Der kleinere Baum rechts ist so stark befallen, dass er vermutlich in den nächsten Jahren eingehen wird.

Literatur

- Barbeito I., Brückner R., Rixen C., Bebi P. (2013) Snow fungi-induced mortality of *Pinus cembra* at the alpine treeline: evidence from plantations. *Arct. Antarct. Alp. Res.* 45: 455–470.
- Bisaz J.A. (2004) Die Bedeutung des Arvenholzes in Graubünden. *Bündner Wald* 57: 43–45.
- Buchholcerová A., Fleischer P., Štefánik D., Bičárová S., Lukášová V. (2021) Specification of modified Jarvis model parameterization for *Pinus cembra*. *Atmosphere* 12: 1388, DOI: 10.3390/atmos12111388.
- Carella A. (2022) 500 years of forest growth dynamics in the high mountain valley of Avers, Switzerland. MSc thesis, ETH Zürich.
- Carrer M., Nola P., Eduard J.L., Motta R., Urbinati C. (2007) Regional variability of climate-growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *J. Ecol.* 95: 1072–1083.
- Casalegno S., Amatulli G., Camia A., Nelson A., Pekkarinen A. (2010) Vulnerability of *Pinus cembra* L. in the Alps and the Carpathian mountains under present and future climates. *Forest Ecol. Manag.* 259: 750–761.
- Christersson L., Fircks H. (1990) Frost and winter desiccation as stress factors. *Aquilo Ser. Botanica* 29: 13–19.
- Dalstein L., Torti X., Le Thiec D., Dizengremel P. (2002) Physiological study of declining *Pinus cembra* (L.) trees in southern France. *Trees* 16: 299–305.
- Dauphin B., Rellstab C., Schmid M., Zoller S., Karger D.N., Brodbeck S., ... (2021) Genomic vulnerability to rapid climate warming in a tree species with a long generation time. *Global Change Biol.* 27: 1181–1195.
- Dauphin B., Wüest R.O., Brodbeck S., Zoller S., Fischer M.C., Holderegger R. ... (2020) Disentangling the effects of geographic peripherality and habitat suitability on neutral and adaptive genetic variation in Swiss stone pine. *Mol. Ecol.* 29: 1972–1989.
- Delarze R., Gonseth Y., Eggenberger S., Vust M. (2015) Lebensräume der Schweiz. Bern, Ott.
- Dubach V., Queloz V., Stroheker S. (2022) Nadel- und Triebkrankheiten der Föhre. *Merkbl. Prax.* 70. 12 S.
- Etzold S., Sterck F., Bose A.K., Braun S., Buchmann N., Eugster W., ... (2021) Number of growth days and not length of the growth period determines radial stem growth of temperate trees. *Ecol. Lett.* 25: 427–439.
- Fraginière Y., Sonnenwyl V., Clément B., Kozłowski G. (2022) Large-scale historical afforestation failure with *Pinus cembra* in the Swiss Prealps. *New Forests* 53: 533–553.
- Glutz von Blotzheim U.N., Bauer K.M. (1993) *Handbuch der Vögel Mitteleuropas*. Wiesbaden, Aula.
- Grote V., Lackner H., Muhry F., Trapp M., Moser M. (2003) Evaluation der Auswirkungen eines Zirbenholzumfeldes auf Kreislauf, Schlaf, Befinden und vegetative Regulation. Graz, Joanneum Research.
- Gruber A., Baumgartner D., Zimmermann J., Oberhuber W. (2009) Temporal dynamic of wood formation in *Pinus cembra* along the alpine treeline ecotone and the effect of climate variables. *Trees* 23: 623–635.
- Gruber A., Oberhuber W., Wieser G. (2018) Nitrogen addition and understory removal but not soil warming increased radial growth of *Pinus cembra* at treeline in the Central Austrian Alps. *Frontiers Pl. Sci.* 9: 711, DOI: 10.3389/fpls.2018.00711.
- Gugerli F., Brodbeck S., Lendvay B., Dauphin B., Bagnoli F., Tinner W., ... in review: A range-wide postglacial history of Swiss stone pine based on molecular markers and palaeoecological evidence. *J. Biogeogr.*
- Hess A. (1916) Der Tannenhäher als Arvenschädling. *Ornithol. Beob.* 13: 145–148.
- Knaus P., Antoniazza S., Wechsler S., Guélat J., Kéry M., Strebel N., ... (2018) Schweizer Brutvogelatlas 2013–2016. Verbreitung und Bestandsentwicklung der Vögel in der Schweiz und im Fürstentum Liechtenstein. Sempach, Schweizerische Vogelwarte.
- Körner C. (2012) Alpine Treelines. *Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits*. Basel, Springer.
- Mandolini E., Bacher M., Peintner U. (2022) Ectomycorrhizal fungal communities of Swiss stone pine (*Pinus cembra*) depend on climate and tree age in natural forests of the Alps. *Plant Soil* in press. DOI: 10.1007/s11104-022-05497-z
- Mattes H. (1978) Der Tannenhäher im Engadin. *Studien zu seiner Ökologie und Funktion im Arvenwald*. Münstersche Geographische Arbeiten 2: 1–87.
- Mattes H. (1982) Die Lebensgemeinschaft von Tannenhäher und Arve. *Ber. Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes.* 241: 1–74.
- Merges D., Bálint M., Schmitt I., Böhning-Gaese K., Neuschulz E.L. (2018) Spatial patterns of pathogenic and mutualistic fungi across the elevational range of a host plant. *J. Ecol.* 106: 1545–1557.
- Merges D., Bálint M., Schmitt I., Manning P., Neuschulz E.L. (2020) High throughput sequencing combined with null model tests reveals specific plant–fungi associations linked to seedling establishment and survival. *J. Ecol.* 108: 574–585.
- Neuschulz E.L., Merges D., Bollmann K., Gugerli F., Böhning-Gaese K. (2018) Biotic interactions and seed deposition rather than abiotic factors determine recruitment at elevational range limits of an alpine tree. *J. Ecol.* 106: 948–959.
- Neuschulz E.L., Mueller T., Bollmann K., Gugerli F., Böhning-Gaese K. (2015) Seed perishability determines the caching behaviour of a food-hoarding bird. *J. Anim. Ecol.* 84: 71–78.
- Nicolussi K., Kaufmann M., Melvin T.M., Van Der Plicht J., Schiessling P., Thurner A. (2009) A 9111 year long conifer tree-ring chronology for the European Alps: a base for environmental and climatic investigations. *Holocene* 19: 909–920.
- Nierhaus-Wunderwald D. (1996) Pilzkrankheiten in Hochlagen. *Merkbl. Prax.* 27. 8 S.
- Oberhuber W. (2004) Influence of climate on radial growth of *Pinus cembra* within the alpine timberline ecotone. *Tree Physiol.* 24: 291–301.
- Ott E., Fehrer M., Frey H.-U., Lüscher P.U. (1997) *Gebirgswälder*. Bern, Haupt.
- Rikli M. (1909) Die Arve in der Schweiz. *Neue Denkschr. Schweiz. Naturforsch. Ges.* 44: 1–455.
- Rossi S., Deslauriers A., Lupi C., Morin H. (2014) Control over growth in cold climates. In: Tausz M., Grulke N. (Red.) *Trees in a Changing Environment: Ecophysiology, Adaptation, and Future Survival*. Dordrecht, Springer.
- Salzer K., Gugerli F. (2012) Reduced fitness at early life stages in peripheral versus core populations of Swiss stone pine (*Pinus cembra*) is not reflected by levels of inbreeding in seed families. *Alp. Bot.* 122: 75–85.
- Schidegger C., Clerc P., Dietrich M., Frei M., Groner U., Keller C., ... (2002) Rote Liste der gefährdeten Arten der Schweiz. *Vollzug Umwelt*. Bern, Birmensdorf: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL; Eidgenössische Forschungsanstalt WSL.
- Schmidrig A.L. (1935) Vom Arvenwalde. *Die Alpen* 1935: 62–66.
- Senn J., Schönenberger W. (2001) Zwanzig Jahre Versuchsaufforstung Stillberg: Überleben und Wachstum einer subalpinen Aufforstung in Abhängigkeit vom Standort. *Schweiz. Z. Forstwesen* 6: 226–246.
- Shanahan E., Irvine K.M., Thoma D. et al. (2016) Whitebark pine mortality related to white pine blister rust, mountain pine beetle outbreak, and water availability. *Ecosphere* 7: e1610, DOI: 10.1002/ecs2.1610.
- Sonnenwyl V., 2021: History, distribution and genetic diversity of natural populations and planted stands of *Pinus cembra* (Pinaceae) in Western Prealps: conservation

and silvicultural implications. MSc thesis, University of Fribourg.

Sorensen M.C., Müller T., Donoso I., Graf V., Merges D., Vanoni M., ... (2022) Scatterhoarding birds disperse seeds to sites unfavorable for plant regeneration. *Movement Ecology* 10: 28. DOI 10.1186/s40462-022-00338-1.

Stofer S., Scheidegger C., Clerc P., Dietrich M., Frei M., Groner U., ... (2019) Swiss-Lichens – Webatlas der Flechten der Schweiz (Version 3, 15.06.2022). www.swisslichens.ch.

Ulber M., Gugerli F., Bozic G. (2004) EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Swiss stone pine (*Pinus cembra*). Rome, International Plant Genetic Resources Institute.

Weiterführende Informationen

www.wsl.ch/arve

Illustrationen

F. Gugerli (Abb. 1, 2, 3a, 6c, 15b), S. Brodbeck (Abb. 3b, 5, 6b, 9, 12, 19), E.-L. Neuschulz (Abb. 6a), U. Wasem (Abb. 10, 16 unten), BCU Fribourg, Fonds Mülhauser JOMU_40103 (Abb. 11), S. Egli (Abb. 14a), C. Scheidegger (Abb. 14b), G. Martinelli (Abb. 14c), A. Liston (Abb. 16 oben), I. Kälin (Abb. 14d), V. Queloz (Abb. 15a), S. Wölflle (Abb. 18), Chr. Rellstab (Abb. 20a), F. Krumm (Abb. 20b)

Kontakt

Felix Gugerli
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
8903 Birmensdorf
felix.gugerli@wsl.ch

Zitierung

Gugerli F., Brodbeck S., Bebi P., Bollmann K., Dauphin B., Gossner M., Krumm F., Peter M., Queloz V., Reiss G., Rellstab C., Stofer S., von Arx G., Wasem U., Zweifel R. (2022) Die Arve – Portrait eines Gebirgswaldbaums. *Merkbl. Prax.* 72. 16 S.

Merkblatt für die Praxis ISSN 1422-2876 gedruckt / 2296-4428 elektronisch

Konzept

Im **Merkblatt für die Praxis** werden Forschungsergebnisse zu Wissenskonzentraten und Handlungsanleitungen für Praktikerinnen und Praktiker aufbereitet. Die Reihe richtet sich an Forst- und Naturschutzkreise, Behörden, Schulen und interessierte Laien.

Französische Ausgaben erscheinen in der Schriftenreihe **Notice pour le praticien** (ISSN 1012-6554). Italienische Ausgaben erscheinen in loser Folge in der Schriftenreihe **Notizie per la pratica** (ISSN 1422-2914).

Die neuesten Ausgaben (siehe www.wsl.ch/merkblatt)

- Nr. 71: Der Eichenprozessionsspinner. Hintergrundwissen und Handlungsempfehlungen. Blaser, S. *et al.* (2022). 8 S.
- Nr. 70: Nadel- und Triebkrankheiten der Föhre. J. Dubach *et al.* (2022). 12 S.
- Nr. 69: Eingeschleppte Pilze in der Schweiz. J. Brännhage *et al.* (2021). 12 S.
- Nr. 68: Den Waldboden verstehen – Vielfalt und Funktion der Waldböden in der Schweiz. M. Walser *et al.* (2021). 12 S.
- Nr. 67: Natürliche Feinde von Borkenkäfern. B. Wermelinger *et al.* (2021). 12 S.
- Nr. 66: Der Götterbaum in Schweizer Wäldern – Ökologie und Managementoptionen. S. Knüsel *et al.* (2020). 12 S.
- Nr. 65: Feuerökologie montaner Buchenwälder. Waldleistungen und waldbauliche Massnahmen nach Waldbrand. J. Maringer *et al.* (2020). 12 S.
- Nr. 64: Habitatbäume kennen, schützen und fördern. R. BÜTLER *et al.* 2019. 12 S.
- Nr. 63: Die Roten Waldameisen – Biologie und Verbreitung in der Schweiz. B. Wermelinger *et al.* 2019. 12 S.



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.

Managing Editor

Martin Moritz
Eidg. Forschungsanstalt WSL
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
martin.moritz@wsl.ch
www.wsl.ch/merkblatt

Die WSL ist ein Forschungsinstitut des ETH-Bereichs.

Layout: Jacqueline Annen, WSL

Druck: Rüegg Media AG



klimaneutral
powered by ClimatePartner®

Druck | ID 11726-1503-1001



Mix
Produktgruppe aus vorbildlicher
Waldwirtschaft und anderen kontrollierten
Herkünften
www.fsc.org Cert no. SCS-COC-100271
©1996 Forest Stewardship Council