

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 155 (2004)

Heft: 6

Artikel: Jahrringe als Indikatoren für extreme Standortsbedingungen im Gebirge : Schnee, Lawinen und Permafrost

Autor: Bebi, Peter / Casteller, Alejandro / Mayer, Andrea Corinna / Stöckli, Veronika

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098113>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 11.04.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Jahrringe als Indikatoren für extreme Standortsbedingungen im Gebirge: Schnee, Lawinen und Permafrost

PETER BEBI, ALEJANDRO CASTELLER, ANDREA CORINNA MAYER und VERONIKA STÖCKLI

Keywords: Snow; avalanches; dendroecology; permafrost. FDK 116.12 : 111.83 : 423.5 : 561.24

1. Einführung

In gemässigten und kalten Gebirgsregionen sind Schnee, Lawinen und Permafrost Umweltfaktoren, welche Wachstum und Überleben der Pflanzen entscheidend prägen (MARCHAND 1996; SCHWEINGRUBER 1996). Die Schneedecke ist einerseits ein Isolator gegen kalte Lufttemperaturen, andererseits aber auch eine schwerwiegende Belastung für Sträucher und Bäume (ROTTMANN 1985; BARTELT & STÖCKLI 2001) und gleichzeitig Lebensraum für pathogene Organismen wie Schneeschimmelpilze (SENN 1999) oder Wasserspeicher. Zudem wird die Strahlung über der Schneedecke verstärkt (CALDWELL 1968) und die Vegetationszeit verkürzt (BILLINGS & BLISS 1959). An Hängen wirkt die Schwerkraft auf die Schneedecke, welche sich langsam kriechend, gleitend oder mit grosser Geschwindigkeit als Fliess- oder Staublawine talwärts bewegt. Höhere Pflanzen werden dadurch talwärts zu Boden gedrückt oder mitgerissen (SCHÖNENBERGER 1978). In Zonen mit geringer Sonneneinstrahlung und anhaltender Schneebedeckung kann der Boden in tieferen Schichten das ganze Jahr über gefroren bleiben (Permafrost) und dadurch die biologische Aktivität und die Wasserverfügbarkeit im Wurzelraum minimieren, was Wachstum und Entwicklung der Pflanzen wiederum verlangsamt (JONASSON 1986; WAKONIGG 1996). Pflanzen schneereicher Lagen haben Anpassungsstrategien entwickelt, um unter diesen Herausforderungen zu bestehen: Dem Problem der knappen Zeit, welche zur Fortpflanzung zur Verfügung steht, wird beispielsweise durch vegetative Vermehrung abgeholfen (vgl. KUOCH & AMIET 1970), und die dynamische Belastung durch Lawinen wird durch elastische Wuchsformen minimiert (LENZ 1967; RICHARD 1990).

Allen Anpassungen zum Trotz wirkt die Schneedecke in ihren oben beschriebenen vielfältigen, jährlich stark schwankenden Eigenschaften auf Stoffwechsel und Gestalt der Pflanzen. Eine geringmächtige Schneedecke bewirkt tiefere Bodentemperaturen und kann zum Erliegen von Stoffwechsellvorgängen und zum Absterben von Pflanzenteilen führen. Grosse Schneefälle drücken Sträucher und junge Bäume unter ihrer Last zu Boden und provozieren Schneebewegungen, welche zu Schürfungen oder Brüchen von Ästen oder Stämmen führen (ROTTMANN 1985; VANOMSEN 2000). Eine verkürzte Vegetationszeit bei verspäteter Ausaperung vermindert den Energiegewinn und erlaubt nur geringes Wachstum. Dank des modulären Baus der Pflanzen sind diese weitgehend in der Lage, Verluste an Energie, Gewebe oder Gestalt zu ersetzen. Während nachfolgenden günstigeren Umweltbedingungen wird das Wachstum wieder gesteigert und Wunden werden allmählich verschlossen oder verlorene Äste ersetzt (vgl. SCHWEINGRUBER 1996). Im Jahrringbild können bestimmte Reaktionen von Bäumen und Sträuchern auf die Einwirkung von Schnee, Lawinen und Permafrost erkannt werden. So können beispielsweise vergangene Lawinenereignisse rekonstruiert werden (CASTELLER *et al.* 2004). Im Folgenden soll exemplarisch aufgezeigt werden, wie Schnee, Lawinen und Permafrost auf die Pflanzen wirken, und wie mit Hilfe von Jahrringanalysen Eigenschaften der auslösenden Faktoren auch noch Jahrzehnte nach dem Ereignis erkannt werden können.

2. Datengrundlagen und Methodik

Um die Wirkung von Schnee, Lawinen oder Permafrost auf die Vegetation zu bestimmen, ist neben geeignetem Pflanzenmaterial auch das Verständnis für die auslösenden Prozesse erforderlich und sind entsprechende Daten hilfreich. Schneedaten werden traditionell mit Schneepegeln, Schneeprofilen sowie mit Gegenhangaufnahmen und Luftbildern erhoben. Für den schweizerischen Alpenraum liefern heute zudem automatische Messstationen sowie Zeitreihen von Satellitenbildern räumlich wie auch zeitlich eine verlässliche Rekonstruktion der Schneedeckenentwicklung (vgl. LEHNING *et al.* 1999; DROZ 2002). Durch Interpolationen zwischen den Messwerten verfügen wir deshalb von jedem Punkt in den Alpen über Anhaltspunkte bezüglich Ausaperungsdatum und durchschnittliche Schneehöhe (LATERNSER 2002). Lawinenniedergänge, die Schäden an Gebäuden oder Infrastruktur verursacht bzw. Menschenleben gekostet haben, sind in Gegenden mit früher und dichter Besiedelung recht gut dokumentiert. In der Schweiz besitzt fast jede Gebirgsgemeinde einen Lawinenkataster, welcher auch zu Chroniken zusammengestellt wurde. In der Schadenlawinendatenbank des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) sind diese für die Zeit zurück bis ins Jahr 1500 AD aufgenommen (LATERNSER & PFISTER 1997). Kaum dokumentiert sind jedoch Lawinenereignisse, welche nur wenig oder keinen wirtschaftlichen Schaden verursacht haben. In diesem Fall gilt es, mit Lawinenausbreitungsmodellen (Aval2; Voellmy-Salm Modell VS-FL2D ZITAT) und Expertenwissen, Häufigkeiten und Dimensionen vergangener Lawinenereignisse abzuschätzen (BRUGGER 2003). Die Analyse der Jahrringe überlebender Bäume im Bereich der Lawinenrutschen kann hier wertvolle Informationen liefern (CASTELLER *et al.* 2004).

Das Vorkommen von Permafrost wird zunächst über Indizien festgelegt (PHILLIPS 2000). So handelt es sich bei ständig gefrorenen Böden in Höhenstufen über 2600 m meist um Permafrost. Zudem weisen Temperaturen von unter -2 °C bis -3 °C an der Basis einer Schneedecke sowie lange anhaltende Schneefelder auf das Vorkommen von Permafrost hin (HÖLZLE 1994). Zudem lässt sich die Verbreitung von Permafrost anhand der vorkommenden Pflanzenarten und deren Wuchsverhalten erkennen (SCHUDEL 2002).

Anhand des Vorkommens bestimmter Pflanzenarten, Besonderheiten in der Wuchsform, Grösse der Pflanzen, Höhen- bzw. Dickenwachstum oder Verletzungen kann somit bereits äusserlich auf den Einfluss von Schnee, Lawinen oder Permafrost geschlossen werden. Beispielsweise weisen Stämme mit säbelförmigem Wuchs oft auf die niederlegende Wirkung einer gleitenden Schneedecke und anschliessende Druck- bzw. Zugholzbildung hin (LENZ 1967).

Im Jahrringbild sind extreme Wirkungen der Schneedecke in allen möglichen Reaktionsformen des Holzes sichtbar: Druckholz, abrupte Zuwachsveränderungen, Überwallung von Verletzungen, Harzkanäle, Zelldeformationen (Frostringe), und Absterben (JOHNSON 1987; BRYANT *et al.* 1989; RAYBACK 1998). Diese Merkmale sind mit den herkömmlichen dendrochronologischen Methoden zu erheben (STOKES & SMILEY

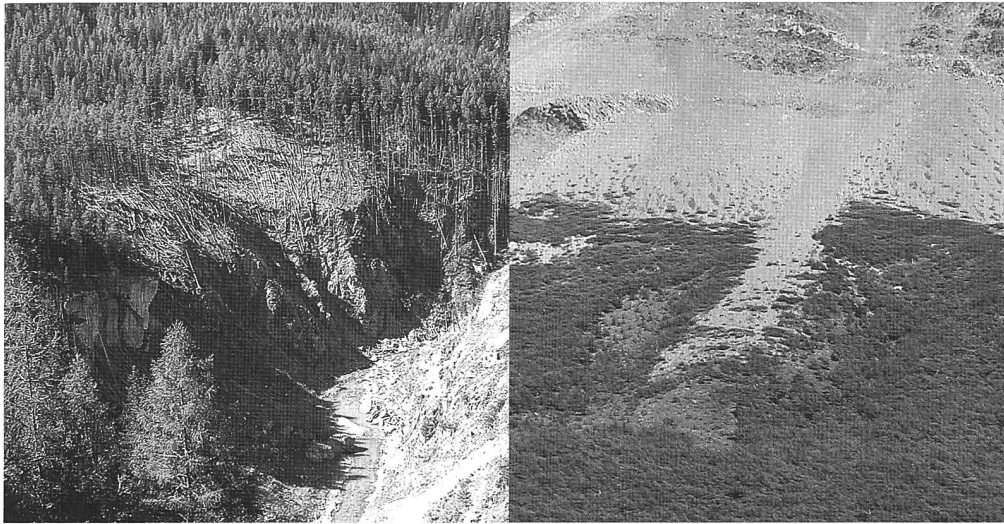


Abbildung 1: Lawinenzug in den Schweizer Alpen (Ofenpass 1999; links) und in den Argentinischen Anden (rechts).

Jahrringanalysen in gut dokumentierten Lawinenzügen der Alpen tragen auch zur Erforschung der Lawinenwirkung in benachbarten Gebieten bei (Fotos: A. Casteller).

1996). Veränderungen auf zellulärer Ebene oder in Pflanzen mit sehr geringem radialem Wachstum bedürfen der holzatomischen Präparation (SCHWEINGRUBER 1978, 2001). Bei dieser werden mit Hilfe des Mikrotoms Schnitte von Holzproben (radial, tangential, lateral) mit bestimmter Dicke (abhängig vom Probenmaterial) angefertigt. Die Dünnschnitte werden auf ein Deckglas gebracht und chemisch behandelt, um Wasser und Stärke aus den Zellen zu entfernen. Zuletzt wird die Probe gefärbt und mit Balsam und einem Deckglas verschlossen. Zum Studium der Holzanatomie kann nicht nur Holz von Bäumen, sondern können auch verholzte Stämmchen, Rhizome oder Wurzeln von Kräutern verwendet werden.

3. Rekonstruktion extremer Winterereignisse

Im Jahr 1975 wurden am Stillberg, an der alpinen Waldgrenze im Dischmatal bei Davos, rund 90 000 Bäume gepflanzt und nachfolgend einem intensiven Monitoring unterzogen (SCHÖNENBERGER & FREY 1988). Diese Bäume widerspiegeln eindrücklich alle pflanzenrelevanten Wirkungen der Schneedecke: Lawinenniedergänge, verspätete Ausaperung, Befall mit Schneeschimmelpilzen, kalte Böden, Spät- und Frühfröste. In den folgenden Beispielen zeigen wir, ausgehend von aktuellen Forschungsaktivitäten auf der Hochlagenversuchsfläche Stillberg und deren unmittelbarer Umgebung, wie dendroökologische Methoden zur Rekonstruktion von extremen Schnee-, Kälte- und Lawinenereignissen eingesetzt werden können.

3.1 Lawinenniedergänge im Jahrringbild erkennbar

Die Auswirkungen von Lawinenniedergängen auf Bäume sind je nach Art, Alter und Gestalt sehr verschieden. Frisch gepflanzte Bäume können beispielsweise ausgerissen werden, wie in der Versuchspflanzung Stillberg geschehen (VANOMSEN 2000). Bereits gut verwurzelte, aber noch elastische Jungbäume überstehen Lawinenniedergänge meist unbeschadet: sie werden lediglich vorübergehend durch die Lawine niedergelegt und entwickeln in der Folge meist eine säbelförmige Stammform. Sobald die Bäume eine gewisse Stärke erreicht haben und an Elastizität verlieren, werden sie verletzbarer und brechen häufig im unteren Stammbereich ab. Als Indikatoren für Häufigkeit, Reichweite und Intensität von Lawinenniedergängen können verschiedene dendroökologische und populationsbiologische Merkmale verwendet werden: Ab-

sterbe- und Keimungszeitpunkt, Verletzungen von Stamm und Ästen, Druckholz- bzw. Zugholzausbildung, abrupte Veränderungen im radialen Zuwachs. Diese Merkmale wurden verschiedentlich zur Datierung vergangener Ereignisse verwendet (JOHNSON 1987; BRYANT *et al.* 1989; VELEN *et al.* 1994; RAYBACK 1998). Drei Aspekte erschweren die exakte Datierung und Charakterisierung der Lawinenniedergänge: a) Bäume reagieren alters-, art- und gestaltspezifisch sehr unterschiedlich sensitiv gegenüber Lawinen; b) das Jahrringbild widerspiegelt Ereignisse unspezifisch; c) quantitative Angaben zur Dosis (Lawinenintensität) – Wirkung (Baumreaktion) fehlen.

Um diese Verständnislücke zu schliessen, werden in einem Projekt am SLF in Zusammenarbeit mit dem Instituto Argentino de Nivologia, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA) in Mendoza, Argentinien, dendroökologische Methoden zur Rekonstruktion von Lawinenereignissen in den Alpen und in den Anden evaluiert (CASTELLER *et al.* 2004; *Abbildung 1*). So wurden in Monbiel bei Klosters Lawinenzüge ausgewählt, von denen schriftliche Informationen vergangener Lawinenereignisse vorliegen. Der Vergleich zwischen diesen historisch gut dokumentierten Lawinenereignissen mit Jahrringmerkmalen ermöglicht die Entwicklung einer verlässlichen Methode zur Rekonstruktion von Zeitpunkt, Ausdehnung und Intensität vergangener Lawinenniedergänge. Diese Methode wird dann in den argentinischen Anden angewendet, wo Informationen über vergangene Lawinenereignisse weitgehend fehlen. Gute Übereinstimmungen zwischen Datierungen von Baumverletzungen geben in Kombination mit dem Vorhandensein von Zug- bzw. Druckholz und exzentrischem radialem Wachstum erste Hinweise darauf, dass die Rekonstruktionsmethode erfolgreich in den Anden angewendet werden kann. Es zeigt sich aber auch, dass spezifische anatomische Eigenschaften und artspezifische Wachstumsmuster in einer solchen Analyse sorgfältig berücksichtigt werden müssen (CASTELLER *et al.* 2003).

3.2 Verspätete Ausaperung im Jahrringbild erkennbar

Einer der wichtigsten erklärenden Faktoren, der über das Überleben von Bäumen in der Versuchsfläche bestimmt hat, ist der Ausaperungstermin im Frühjahr. Insbesondere nördlich exponierte, an strahlungsarmen Standorten stehende Bäume sind von verspäteter Ausaperung betroffen. Die jungen Bäume immergrüner Baumarten werden dort stärker von den Schneepilzen *Phacidium infestans* (Schneeschnitte) und *Gremmeniella abietina* (Triebsterben) befallen (FREY RAY & SCHWEINGRUBER 1993; SENN 1999). In Versuchen auf dem Stillberg be-



Abbildung 2: Rund achtzigjährige Fichten (*Picea abies* Karst.) (Häxewäldli) an einem tiefliegenden Permafroststandort im Brüeltobel (Al) (Foto: M. Phillips).

stätigten sich die unterschiedlichen Befallsmuster dieser beiden Schneepilzarten im Jahrringbild. *Phacidium infestans*, das nur an der Arve (*Pinus cembra* L.) vorkam, kann während eines Winters fast alle Nadeln von kleineren, ganz vom Schnee bedeckten Bäumchen zum Absterben bringen. Die betroffenen Pflanzen zeigen dann einen abrupten Stopp des radialen Wachstums zu Beginn des folgenden Sommers nach der Bildung von nur wenigen Frühholzzellen (FREY RAY & SCHWEINGRUBER 1993). Im Gegensatz dazu befällt *Gremmeniella abietina* bei kühlen und nassen Bedingungen zunächst einzelne Knospen der Bäume, und das Absterben der Bäume vollzieht sich über eine Dauer von mehreren Jahren (FREY RAY & SCHWEINGRUBER 1993). In der Jahrringsequenz zeigt sich diese Schädigung in einer abrupten Wachstumsreduktion, welche nach ein paar Jahren zum Absterben der Bäume führt.

3.3 Jahrringbild von Bäumen auf unterkühlten Böden

Rund um Kuppen zeigten Bodentemperaturmessungen am Stillberg gegenüber anderen Kleinstandorten deutlich reduzierte Werte (TURNER 1988). Grund dafür ist eine vom Wind verfrachtete, geringmächtige und wenig isolierende Schneedecke (vgl. RYCHETNIK 1988). An diesen Standorten zeigen die Bäume gedrungene Wuchsformen.

Noch stärker wirkt die Kälte im Boden in unterkühlten Schutthalden unterhalb der Waldgrenze (RIST 2002; SCHUDEL

2002). Hier wachsen insbesondere Fichten (*Picea abies* Karst.) extrem langsam, was zu natürlichen Bonsai-Formen und zur entsprechenden Bezeichnung «Häxewäldli» (BAECHLER 1946) führte (Abbildung 2). Wie die Bäume auf Permafrost in der nördlichsten Taiga, die «drunken forests», zeigen die Individuen der Häxewäldli extrem geringen radialen Zuwachs und Druckholz als Reaktion auf Schiefstellung eines ungleichmäßig auftauenden Bodens. Da der kalte Boden das Wachstum limitiert, kann in der Dynamik des Wachstums auch Erwärmen und Abkühlen des Bodens rekonstruiert werden (SCHUDEL 2002).

3.4 Folgen von Spät- und Frühfrösten widerspiegelt im Jahrringbild

Viele junge Lärchen (*Larix decidua* Mill.) am Stillberg zeigen eine vor mehreren Jahren abgestorbene Triebspitze. Dieses Phänomen ist das Resultat extremer Witterungsverhältnisse Ende August 1996: Auf Schneefall und eine ungewöhnlich kalte Nacht mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt folgte ein klarer und sonniger Morgen. Wahrscheinlich hat noch gefrorenes Xylemwasser zu einem Abriss des Wasserfadens in den Zellen geführt, während die sonnenerwärmten Nadeln bereits wie gewohnt transpirierten. Es ist anzunehmen, dass die vom liegenden Schnee reflektierte Strahlung diesen Effekt noch zusätzlich verstärkte. Solche Witterungsbedingungen führen nicht nur zum Absterben von Triebspitzen und Zweigen, sondern auch zu Deformationen der in Bildung begriffenen Holzzellen und zur Ausbildung von Frostringen (STÖCKLI 1996). Im Holz der Bäume am Stillberg sind diese typischen Zelldeformationen sehr häufig (Abbildung 3). Sie treten besonders häufig in den der Morgensonne ausgesetzten Osthängen auf (KNUFINKE 1998). Die Frostringe stellen Zelldeformationen innerhalb der Jahrringe dar. Sie ermöglichen die Datierung von Frostereignissen auf Monate genau.

3.5 Einfluss von Kunstschnee auf das Jahrringbild

An Standorten, welche im Winter als Kunstschnee-Skipisten genutzt werden, erleben die Pflanzen eine längere Schneeliegedauer und eine nährstoffreichere, dichtere und mächtigere Schneedecke als unter natürlichen Bedingungen. Die dendroökologische Analyse des radialen Stammzuwachses von Heidelbeersträuchern (*Vaccinium myrtillus* L.) zeigte verlangsamtes Wachstum und geringeres Alter bei Individuen von Pistenstandorten. Ausserhalb der Pisten zählte das älteste ge-

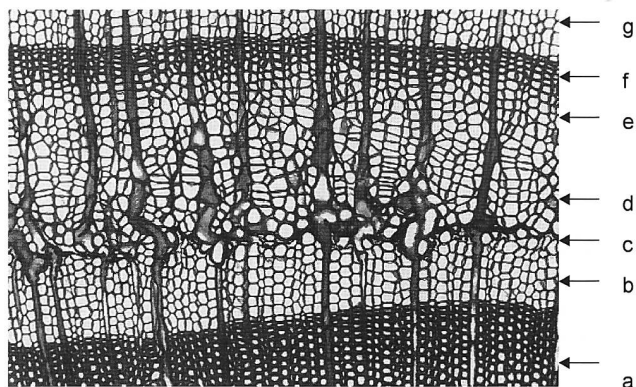


Abbildung 3: Frostring einer Lärche (*Larix decidua* Mill.) am Stillberg.

Chronologische Abfolge der Strukturen: Spätholz des Vorjahres (a); Frühholz (b); quer verlaufende, dunkle Linie aus kollabierten Zellen (c); deformierte Holzstrahlen und Kalluszellen (d); Regeneration und Übergang zu gleichmässiger Gewebestruktur (e); Spätholz (f); Frühholz des folgenden Jahres (g). Aus KNUFINKE (1998).

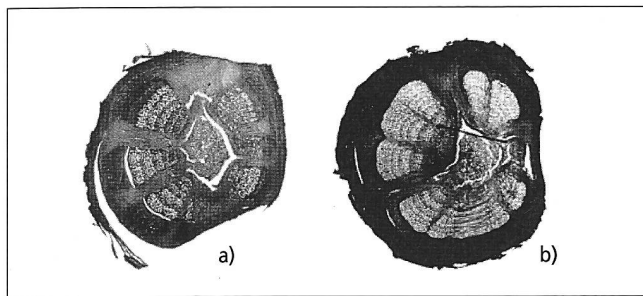


Abbildung 4: Querschnitte von Goldfingerkraut (*Potentilla aurea* L.), die auf Skipisten unter Kunstsnee gewachsen sind.

Die abgebildeten Fingerkräuter sind sechs (a) und ungefähr sieben (b) Jahre alt. AUS RIXEN (2002).

fundene Exemplar immerhin 45 Jahre. Demgegenüber zeigte das Fingerkraut (*Potentilla aurea* L.) keine Unterschiede in Altersstruktur und Zuwachs zwischen Kunstsnee und natürlicher Schneedecke (RIXEN 2003) (Abbildung 4).

Obwohl in gemässigten Klimaregionen fast alle verholzten dikotyledonen Pflanzen Jahrringe ausbilden, sind dendroökologische Studien zu Schneeeinflüssen auf krautige Pflanzen selten. Es hat sich jedoch gezeigt, dass das Jahrringbild von Kräutern und Zwergsträuchern gerade für Forschungsarbeiten oberhalb der Waldgrenze sehr wertvoll ist.

4. Schlussfolgerungen

Die Jahrringanalyse ist ein geeignetes Mittel, um die Reaktion von Pflanzen auf bestimmte Ereignisse (z.B. Lawinen) und extreme Standortsbedingungen zu analysieren. Dadurch können auch vergangene Ereignisse rekonstruiert werden.

Abgesehen von gewissen Unsicherheiten der exakten Zuordnung von auslösendem Faktor und Reaktion der Pflanzen hat sich gezeigt, dass die Jahrringanalyse nicht nur das Verständnis der Wirkung von Schnee, Lawinen und Permafrost auf Wachstum und Überleben von Pflanzen verbessern hilft. Jahrringe können als Indizien für die Dynamik dieser in unseren Gebirgen wichtigen Umweltparameter herbeigezogen werden. Damit eröffnet sich, wie im Fall der Lawinen, die Möglichkeit, die zeitliche Dynamik einer Naturgefahr über Jahrzehnte bis Jahrhunderte kalendergenau zu rekonstruieren und nötigenfalls Massnahmen im Umgang mit dieser Gefahr zu treffen.

Zusammenfassung

Schnee, Lawinen und Permafrost bedeuten für Pflanzen häufig extreme Standortsbedingungen. Reaktionen und Anpassungen an solche Bedingungen können mit Hilfe von Jahrringanalysen rekonstruiert und mit entsprechenden Klima- und Ereignisdaten in Zusammenhang gebracht werden. Anhand von fünf Forschungsbeispielen, welche auf oder in unmittelbarer Umgebung der Forschungsfläche Stillberg in Davos durchgeführt wurden, zeigen wir Möglichkeiten und Grenzen von Jahrringen als Indikatoren für extreme Standortsbedingungen. Trotz verschiedenster Unsicherheiten der exakten Zuordnung von Pflanzenreaktionen bieten Jahrringanalysen einen wichtigen Beitrag zum besseren Verständnis der Wirkung von extremen Standortsbedingungen auf das Überleben und Wachstum von Pflanzen. Dies kann insbesondere im Fall der Lawinen zur Verbesserung von angepassten Massnahmen im Umgang mit extremen Naturereignissen beitragen.

Summary

Growth rings as indicators of extreme site conditions in the mountains: snow, avalanches and permafrost

Snow, avalanches, and permafrost are extreme site conditions for plants. Reactions and adaptations to such extreme conditions can be reconstructed with growth ring analysis and linked with corresponding climate and disturbance data. On the basis of five case studies in and around the long-term research site Stillberg, near Davos, we discuss both the potential and the limits of dendroecology to understand the effect of such extreme site conditions. Despite some uncertainties in reliably assigning plant reactions, growth ring analysis is a valuable addition to better understand the effects of extreme site conditions on the survival and growth of plants. This can lead to improved management strategies associated with natural hazards, especially in the case of avalanches.

Résumé

Utilisation des cernes comme indicateurs de conditions stationnelles extrêmes en montagne: neige, avalanches et permafrost

La neige, les avalanches et le permafrost constituent souvent des conditions stationnelles extrêmes pour les plantes. Les réactions et les adaptations à ces contraintes peuvent être reconstituées à l'aide de l'analyse des cernes et mises en rapport avec les données climatiques ou les événements correspondants. Cinq travaux de recherche, entrepris à proximité de la surface de recherche de Stillberg à Davos, montrent les possibilités et les limites de l'utilisation des cernes comme indicateurs de conditions stationnelles extrêmes. Malgré certaines inexactitudes de classement des réactions des végétaux, l'analyse des cernes permet de mieux comprendre l'effet des conditions stationnelles extrêmes sur la survie et la croissance des plantes. De plus, elle peut servir à améliorer les mesures relatives aux catastrophes naturelles (avalanches notamment).

Traduction: CLAUDE GASSMANN

Literatur

- BÄCHLER, E. 1946: Der verwünschte oder verhexte Wald im Brülertobel. Clubnachrichten der Sektion St. Gallen des SAC. 18. Jahrgang (8).
- BARTELT, P.; STÖCKLI, V. 2001: The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology* 32: 209–216.
- BILLINGS, W. D.; BLISS, L. C. 1959: An alpine snowbank environment and its effects on vegetation, plant development, and productivity. *Ecology* 40: 388–397.
- BRUGGER, S. 2003: Auswirkungen von Lawinen auf die Vegetation: Eine Studie im Dischmatal. Diplomarbeit am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos und am Geographischen Institut der Universität Zürich, 65 S.
- BRYANT, C.L.; BUTLER, D.R.; VITEK, J.D. 1989: A statistical analysis of tree-ring dating in conjunction with snow avalanches: comparison of on-path versus off-path responses. *Environmental Geology and Water Sciences* 14: 53–59.
- CALDWELL, M.M. 1968: Solar ultraviolet radiation as an ecological factor for alpine plants. *Ecol. Monogr.* 38: 243–268.
- CASTELLER, A.; STÖCKLI, V.; VILLALBA, R. 2003. Reconstruction of past avalanche occurrence with dendroecological methods in undocumented mountainous areas. Poster presentation at IGS Symposium, Davos.

- CASTELLER, A.; VILLALBA, R.; MAYER, A.C. 2004: Valuable morphological and anatomical features of trees used for dating and reconstructing snow avalanches in the Swiss Alps and the Argentinian Andes. Zusammenfassung des Beitrags für die Tagung Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology, 22.–24. April 2004, Birmensdorf.
- DROZ, M. 2002: Analyse der Schneegrenze im Alpenraum basierend auf NOAA-AVHRR Daten. Zeitliche und räumliche Charakteristika für die Jahre 1990, 1996 und 1999. Diplomarbeit Universität Bern, 95 S.
- FREY RAY, S.; SCHWEINGRUBER, F.H. 1993: A dendrochronological study on the dying-off of young conifers in an afforestation at the Alpine Timberline. *Dendroecologia* 11: 159–164.
- HÖLZLE, M. 1994: Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Nr. 32.
- JOHNSON, E.A. 1987: The relative importance of snow avalanche disturbance and thinning on canopy plant populations. *Ecology* 68: 43–53.
- JONASSON, S. 1986: Influence of frost heaving on soil chemistry and on the distribution of plant growth forms. *Geogr. Ann.* 68 A: 185–195.
- KNUFINKE, A. 1998: Frostringe in Lärchen und deren Beziehung zu Wetter und Standort dargestellt an Material aus der Waldgrenzaufforstung Stillberg, Davos, Schweiz. Diplomarbeit am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos und an der Universität Bielefeld, Fakultät für Biologie, 112 S.
- KUOCH, R.; AMIET, R. 1970: Die Verjüngung im Bereich der oberen Waldgrenze der Alpen mit Berücksichtigung von Vegetation und Ablegerbildung. *Mitt. Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes.* 46: 165–313.
- LATERNER, M. 2002: Snow and avalanche climatology of Switzerland. Diss. Nr. 14493, ETH Zürich, Zürich, 137 S.
- LATERNER, M.; PFISTER, C. 1997: Avalanches in Switzerland 1500–1990. In: Frenzel, B.; Matthews, J.; Gläser, A.; Weiss, M. (Eds.): Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene. *Palaecol. Res.* 19: 241–266.
- LEHNING, M.; BARTELT, P.; BROWN, R.L.; RUSSI, T.; STÖCKLI, U.; ZIMMERLI, M. 1999: Snowpack model calculations for avalanche warning based upon a new network of weather and snow stations. *Cold Region Science and Technology* 30, 1–3: 145–157.
- LENZ, O. 1967: Action de la neige et du gel sur les arbres de montagne, en particulier sur leur forme et l'anatomie de la tige. *Mitt. Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes.* 43, 3: 293–330.
- MARCHAND P.J. 1996: Life in the cold: an introduction to winter ecology. University Press of New England, Hanover, NH, 304 p.
- PHILLIPS, M. 2000: Influences of snow-supporting structures on the thermal regime in Alpine permafrost terrain. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung. Davos, Lausanne, 146 p.
- RAYBACK, S.A. 1998: A dendrogeomorphological analysis of snow avalanches in the Colorado Front Range, USA. *Physical Geography* 19: 502–515.
- RICHARD, L. 1990: Ecologie des mégaphorbiaies subalpines à aulne vert de la Vanoise et des régions environnantes (première partie) – compréhension de la répartition actuelle des aulnaies. *Travaux Scientifiques du Parc National de la Vanoise* 17: 127–158.
- RIST, A. 2002: Unterkühlte Blockschutthalden mit Hexenwäldli. Abiotische Faktoren zur Charakterisierung des Phänomens: Diplomarbeit am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) Davos und an der Technischen Universität München (TUM), 65 S.
- RIXEN, C. 2003: Artificial Snow and Snow Additives on Ski Pistes: Interactions between Snow Cover, Soil and Vegetation. Dissertation der Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Zürich. 162 S.
- ROTTMANN, M. 1985: Waldbauliche Konsequenzen aus Schneebruchkatastrophen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 136, 3: 167–184.
- RYCHETNIK, J. 1988: Schneedecke und Lawinen im Versuchsgelände Stillberg. *Schweiz. Z. Forstwes.* 139, 9: 762–767.
- SCHÖNENBERGER, W. 1978: Ökologie der natürlichen Verjüngung von Fichte und Bergföhre in Lawinenzügen der nördlichen Voralpen. *Mitt. Eidgenöss. Anst. forstl. Vers.wes.* 54, 3: 215–361.
- SCHÖNENBERGER, W.; FREY, W. 1988: Untersuchungen zur Ökologie und Technik der Hochlagenaufforstung – Forschungsergebnisse aus dem Lawinenanrissgebiet Stillberg. *Schweiz. Z. Forstwes.* 139, 9: 735–820.
- SCHUDEL, K. 2002: Hexenwäldli. Dendroökologie von Kümmerfichtenbeständen auf unterkühlten Schutthalden. Diplomarbeit am Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos und am Departement für Umweltnaturwissenschaften, ETH Zürich, 64 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 2001: Dendroökologische Holzanatomie. Anatomische Grundlagen der Dendrochronologie. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, (Hrsg.), Haupt, Bern, 472 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1996: Tree rings and environment. *Dendroecology*. Haupt, Bern, 609 S.
- SCHWEINGRUBER, F.H. 1978: Mikroskopische Holzanatomie. Formspektren mitteleuropäischer Stamm- und Zweighölzer zur Bestimmung von rezemem und subfossilem Material. Birmensdorf, Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen, 226 S.
- SENN, J. 1999: Tree mortality caused by *Gremmeniella abietina* in a subalpine afforestation in the central Alps and its relationship with duration of snow cover. *European Journal of Forest Pathology* 29: 64–74.
- STOKES, M.A.; SMILEY, T.L. 1996: An introduction to Tree-Ring-Dating. Chicago, IL, University of Chicago Press.
- STÖCKLI, V. 1996: Tree rings as indicators of ecological processes: the influence of competition, frost and water stress on tree growth, size, and survival. Dissertation Universität Basel, 92 S.
- TURNER, H. 1988: Das Klima der Versuchsfläche Stillberg. *Schweiz. Z. Forstwes.* 139, 9: 743–750.
- VANOMSEN, P. 2000: Vergleichende Untersuchung der Stabilität junger Arven (*Pinus cembra* L.) und Lärchen (*Larix decidua* L.): Stammbrüche und -spaltungen in Lawinenanrissgebieten in der Versuchsaufforstung Stillberg (GR) nach einem schneereichen Winter. Diplomarbeit, ETH Zürich, Professur für Waldbau, 109 S.
- VEBLEN, T.T.; HADLEY, K.E.; NEL, E.M.; KITZBERGER, T.; REID, M.; VILLALBA, R. 1994: Disturbance regime and disturbance interaction in a Rocky Mountain subalpine forest. *Journal of Ecology* 82: 125–135.
- Wakonigg, H. 1996: Unterkühlte Schutthalden. Arbeiten aus dem Institut für Geographie der Karl-Franzens-Universität Graz. Beiträge zur Permafrostforschung 33: 209–223.

Dank

Wir danken Daniela Kasbauer für wertvolle Kommentare zum Manuskript.

Autorinnen und Autoren

Dr. PETER BEBI*, ALEJANDRO CASTELLER, Dr. ANDREA CORINNA MAYER, Dr. VERONIKA STÖCKLI, WSL, Abteilung Lebensraum Alpen, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, 7260 Davos. *Korrespondenz, E-Mail: bebi@slf.ch.