

ROLAND LUZIAN, PETER PINDUR, KURT NICOLUSSI, RUDOLF SAILER, JEAN-NICOLAS HAAS, PETER ZWERGER

## Holozänes Lawinengeschehen und „Global Warming“ Eine Analyse der 9000-jährigen Chronologie des Lawinengeschehens am Hang der Schwarzensteinalm in den Zillertaler Alpen, Österreich

### *Holocene avalanching and “Global Warming” An analysis of the 9000-year chronology of avalanche events on the slope of the Schwarzensteinalm in the Zillertal Alps, Austria*

#### Zusammenfassung:

Bei dendrochronologischen Untersuchungen zur Klimageschichte des alpinen Postglazials am ehemaligen Forschungsinstitut für Hochgebirgsforschung an der Universität Innsbruck konnten anhand von Analysen an subfossilen Moorhölzern prähistorische Lawinenereignisse nachgewiesen werden (PINDUR P. 2000, LUZIAN R. & PINDUR P. 2000).

Der Aspekt des Lawinengeschehens über diesen langen Zeitraum wurde am Institut für Naturgefahren und alpine Waldgrenzregionen beim BFW (Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft) aufgegriffen, um im Projekt „Neue Analysemöglichkeiten zur Bestimmung des Lawinengeschehens“ interdisziplinär der Frage nach der Lawinenaktivität während wärmerer Klimabedingungen, wie sie im Holozän über lange Zeiträume herrschten, nachzugehen. Auch über die anthropogene Beeinflussung und die Auswirkungen des Lawinengeschehens auf die subalpine Vegetation sowie die Rekonstruktion der höchstgelegenen, holozänen Waldgrenze wird berichtet. Eines der Ergebnisse zeigt, dass sich ein angenommenes 150-jähriges Ereignis als eine der Grundlagen für die Gefahrenzonenplanung und zur Dimensionierung von Verbauungsmaßnahmen als durchaus realistisch erweist.

Schlüsselwörter: Holozän, Lawinengeschehen, wärmere Klimabedingungen, anthropogene Beeinflussung, Waldgrenze

#### Summary:

*In connection with dendrochronological studies (subfossil bog-woods analysis) of the climate history of the Alpine postglacial era at the former department of high mountain research at the University of Innsbruck, pre-historic avalanche events were detected (PINDUR P. 2000, LUZIAN R. & PINDUR P. 2000).*

*In the department of Natural Hazards and Alpine Timberline (at the Federal Office and Research Centre for Forests), the aspect of avalanching over this long period of time was taken up. The aim was to answer the question of avalanche activity during warmer climate conditions, like those prevalent for long periods in the holocene. Additionally, the anthropogenic influence and the effects of avalanching on the subalpine vegetation, as well on the reconstruction of the highest holocene timberline-level is reported. The results of the interdisciplinary research project “New Possibilities for the Determination of Avalanching Processes” show that an assumed 150-year event as one of the key assumptions for hazard zoning and planning of avalanche control measures is realistic.*

*Keywords: holocene, avalanching, warmer climate conditions, anthropogenic impact, timberline*

#### Einleitung

Die Kenntnis über das Auftreten, die Frequenz und das Ausmaß von Lawinen in den Alpen beruht im Wesentlichen auf Beobachtungen sowie historischen Berichten und ist damit auf die letzten Jahrhunderte beschränkt (z.B.: LATERNSENER M. & PFISTER C. 1997, FLIRI F. 1998). Einen wesentlich tieferen Blick in die Vergangenheit, der weit über diese historische Dimension zurückreicht, erlauben naturwissenschaftliche Methoden wie die Jahrringanalyse an von Lawinen geschädigten oder zerstörten Resten und in Mooren konservierten Bäumen.

Von Lawinenabgängen betroffene Bäume zeigen bei mikroskopischer Analyse anhand anatomischer Merkmale wie Verletzungen, Druckholzbildung, abrupte Wachstumsstörungen und plötzliches Absterben im Winterhalbjahr solche Ereignisse an (z.B.: BURROWS C. J. & BURROWS V. L. 1976, CARRARA P. E. 1979, BUTLER D. R.

& MALANSON G. P. 1985, STÖCKLI V. 1998, ZROST D. 2004, KASBAUER D. 2006, STOFFEL M. et al. 2006, CASTELLER A. et al. 2007).

Für prähistorische Zeitabschnitte liegen nur wenige Untersuchungen zu Lawinenaktivitäten vor. Diese basieren vor allem auf der Analyse von mit Schneelawinen abgelagertem Schuttmaterial (BORTENSCHLAGER S. 1984, BLIKRA L. H. & NEMEC W. 1993, BLIKRA L. H. & NESJE A. 1997, NESJE A. et al. 2007) beziehungsweise Bäumen (SMITH D.J. et al. 1994). Die Datierung dieser Lawinenereignisse beruht dabei aber auf Radiokarbonaten, die methodenbedingt keine jahresscharfe Festlegung von Ereignissen ermöglicht.

Im Zuge des Projektes „Neue Analysemöglichkeiten zur Bestimmung des Lawinengeschehens“ wurde erstmals eine umfangreiche Chronologie von kalenderdatierten, waldzerstörenden Lawinenereignissen im Zeitraum der letzten 8000 Jahre vorgelegt (NICOLUSSI K. et al. 2007). Dieser Datensatz beruht auf der dendrochronologischen Analyse und Datierung von 177

Holzproben subfossiler Baumstämme (alle als Zirben, *Pinus cembra* L. identifiziert) aus einem Moor im Oberen Zemmgrund in den Zillertaler Alpen. Dieses Moor liegt in 2150 m Höhe und somit innerhalb des postglazialen Waldgrenz-Schwankungsbereiches. Die Umgebung des Moores ist derzeit nicht bewaldet. Und oberhalb der aktuellen Waldgrenze existieren nur einzelne, weit verteilte und durch relativ geringe Größe charakterisierte Zirben. Der Zirbenjungwuchs ist im Bereich der aktuellen Waldgrenze vorhanden und steigt im Schutze von Geländekanten bis auf 2250 m Höhe.

Blikra und Nesje verweisen auf eine Synchronizität von gehäuften Lawinereignissen mit Gletschervorstoßphasen kühl-feuchter Klimaperioden (BLIKRA L. H. & NESJE A. 1997).

Vor dem Hintergrund der aktuellen „Klimawandel“-Diskussion ist es aber von besonderem Interesse, Kenntnis über den Verlauf des Lawinengeschehens während im Holozän bereits stattgefundener längerer Warmphasen zu erlangen. Im Zuge des oben erwähnten interdisziplinären Forschungsprojektes HOLA (Kurzbezeichnung für holozänes Lawinengeschehen) wurden

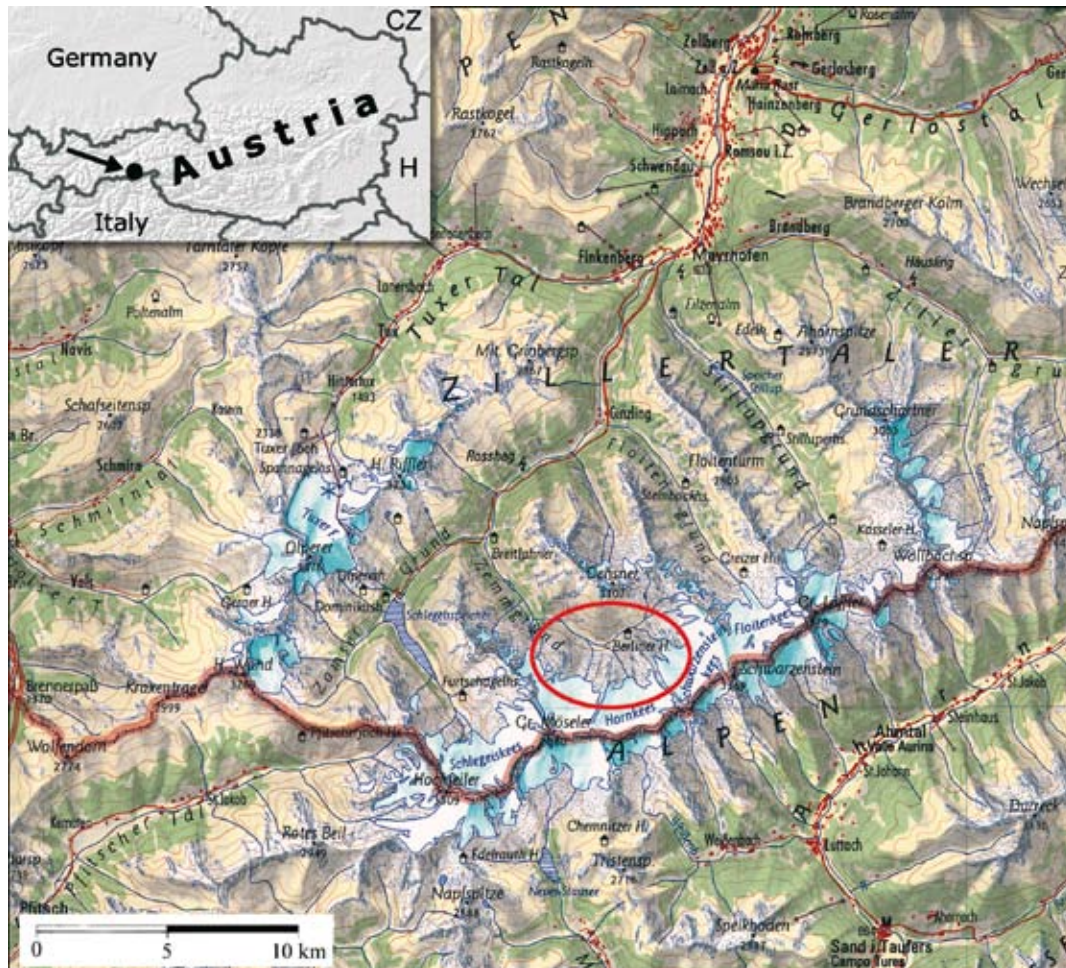


Abb. 1: Lage der Forschungslokalität: 47°01'40" N, 11°49'00" E

Fig. 1: Location of the research centre: 47°01'40" N, 11°49'00" E

zur Bewertung der aus den früheren Warmphasen stammenden stummen Zeugen aus dem „Schwarzensteinmoor“ (subfossile Hölzer und Pollen) Methoden der klimageschichtlichen Forschung (Dendrochronologie, Palynologie) mit dem Lawinensimulationsverfahren SAMOS (BRANDSTÄTTER, W. et al. 1992, SAMPL P. & ZWINGER T. 2004) erfolgreich kombiniert.

#### Forschungsfragen

1. Kam es auch unter den Bedingungen wärmerer klimatischer Verhältnisse (holozäne Warmphasen bzw. Optima) und einem damit verbundenen besseren Waldwachstum mit beträchtlichem Anstieg der Waldgrenze zu großen und extremen Lawinereignissen (Wirkungsbereich, Frequenz und Wiederkehrdauer, Schneemächtigkeiten)?
2. Sind daraus Hinweise auf das „Bemessungsereignis“ bzw. auf das naturgefahrenbedingte Risiko und dessen Bewertung ableitbar?
3. Inwieweit haben Menschen das Geschehen, z. B. durch Brandrodung, beeinflusst?

#### Material und Methoden

Um Antworten auf solche Fragen zu erlangen ist es erforderlich, die bei früheren Ereignissen ins Moor gelangten (z. B. von Lawinen transportierte Bäume) und über einen langen Zeitraum in der Natur erhalten gebliebenen Befunde (sogenannte „stumme Zeugen“) zu bewerten und diese Ereignisse retrospektiv zu betrachten. Die Möglichkeit dazu ist durch die Existenz der über die gesamte Nacheiszeit reichenden Ostalpen-Zirbenchronologie (NICOLUSSI K., et al. 2004), der im „Schwarzensteinmoor“ unter Luftabschluss seit Beginn des alpinen Postglazials erhalten gebliebenen stummen Zeugen sowie des Lawinensimulationsverfahrens SAMOS gegeben.

Folgende Hauptarbeitsschritte waren durchzuführen:

- Klärung der Topographie des Lawinenhanges „Schwarzensteinalm“ mittels trigonometrischer Aufnahme des unmittelbaren Moorbereiches sowie der Erzeugung eines hochaufgelösten dreidimensionalen, digitalen Höhenmodells (SCHMIDT R., 2007). Dazu war es notwendig, das digitale 10-m-Geländemodell des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen mithilfe geodätischer Verfahren zu verbessern.
- Ermittlung und Kartierung der gegenwärtigen Waldverbreitung, -struktur und -entwicklung mittels intensiver Geländearbeit und Vergleich mit bestehender Vegetationskartierung aus den 1950er-Jahren (PINDUR P. et al. 2007) sowie Rekonstruktion der Höhenlage der Waldgrenze während der wärmsten Phasen des Holozäns (ZWINGER P. & PINDUR P. 2007).
- Ortung, Feststellung der Lagerungsrichtung, Verortung und Bergung stummer Zeugen aus dem „Schwarzensteinmoor“ (Abb. 2) als Voraussetzung für die:
- Festlegung des Beginns und der Stärke des anthropogenen Einflusses auf das Waldwachstum. Entnahme und palynologische Analyse von je einem Sedimentbohrkern aus dem „Schwarzensteinmoor“ und zwei weiteren, kleineren, aber höher gelegenen Mooren (HAAS J.N. et al. 2007).
- Datierung der prähistorischen, waldzerstörenden und -schädigenden Lawinereignisse. Entnahme von 217 Stammscheiben aus dem „Schwarzensteinmoor“ deren, dendrochronologisch-mikroskopische Analyse und Synchronisierung mit der Ostalpen-Zirbenchronologie (NICOLUSSI K. et al. 2007, ZROST D. et al. 2007).

**Anmerkung:**

Weil sich Waldgrenzbäume am Rande ihrer Existenzmöglichkeit befinden reagieren sie sehr sensibel auf Umwelteinflüsse und speichern deshalb Klimasignale eindeutig. Die Ostalpen-Zirbenchronologie beruht durchweg auf Hölzern aus Waldgrenz- bzw. waldgrenznahen (über 2000 m Meereshöhe) Standorten. Dieser Umstand ermöglicht somit auch die Erfassung der holozänen Klimaschwankungen (z. B. Warmphasen).

- Nachrechnung großer, prähistorischer Lawineneignisse am Hang der Schwarzensteinalm mittels des Simulationsmodells SAMOS als Basis für die Rekonstruktion des holozänen Lawinengeschehens (SAILER R. et al. 2007). SAMOS (Snow Avalanche Modelling and Simulation) ist ein dreidimensionales, aus den Komponenten

granulares Fließmodell + gasdynamisches Staubmodell + Resuspensionsmodell gekoppeltes Lawinensimulationsmodell, das vor allem zur Berechnung großer Lawinen geeignet ist. Es wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (BMLFUW) gemeinsam mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLW), dem Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) und der Firma AVL-List entwickelt und wird seit Jahren erfolgreich operativ eingesetzt (SAMPL P. et al. 2000).

- Synthese der Einzelergebnisse sowie deren Interpretation und Diskussion

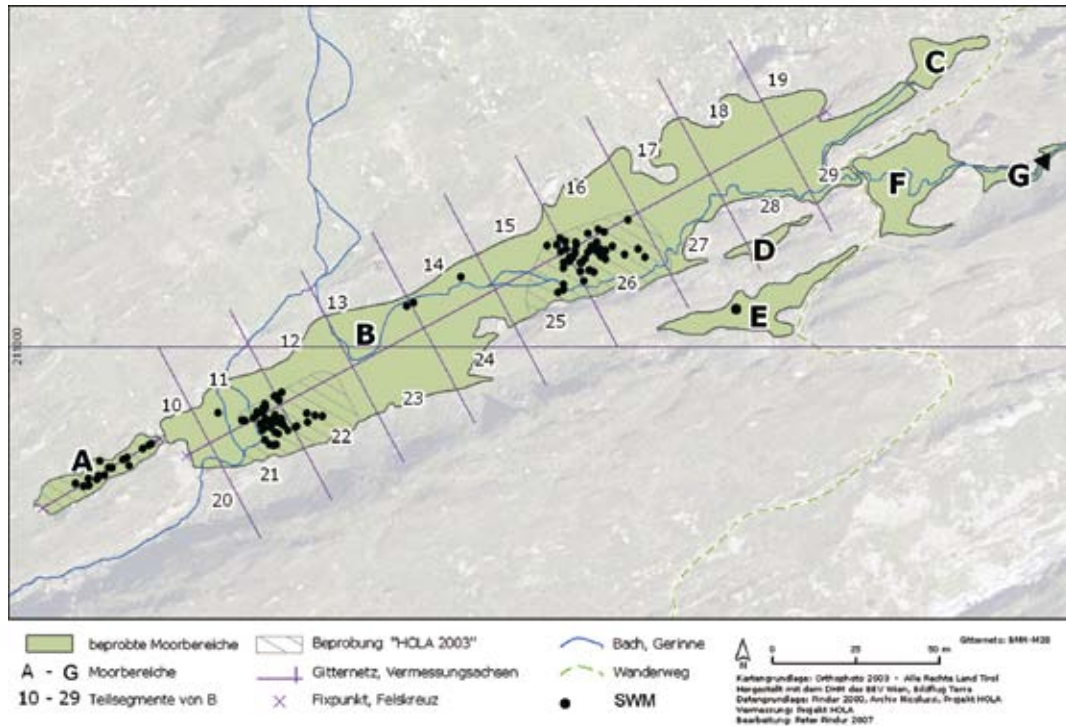


Abb. 2: Lokalisierung von Entnahmestellen der in den Jahren 2002 und 2003 aus dem Schwarzensteinmoor geborgenen stummen Zeugen

Fig. 2: Localisation of removal locations for the silent witnesses removed from the Schwarzensteinmoor in the years 2002 and 2003.

**Ergebnisse**

Chronologie des Lawinengeschehens am Hang der Schwarzensteinalm

Von insgesamt 217 subfossilen Holzproben konnten 177 auf Lawineneinwirkung analysiert und datiert werden. Bei drei weiteren Proben, die wegen zu geringen Wuchsalters keine eindeutige Synchronposition zuließen, wurde eine Radio-Carbon-Datierung vorgenommen. Die datierten Moorhölzer weisen eine zeitliche Bandbreite von 7050 BC bis 1300 AD auf. (Abb. 3).

An 53 Proben blieb eine voll entwickelte Waldkante erhalten, die jeweils ein Absterben der Bäume im Winterhalbjahr belegen. Darauf basierend und unter Berücksichtigung nachfolgend angeführter Kriterien konnten 21 waldzerstörende Lawineneignisse jahresscharf datiert werden (Tab. 1). Weitere sechs wurden nach Häufungen von Proben mit nahezu übereinstimmenden Endjahren abgeleitet (Tab. 1).

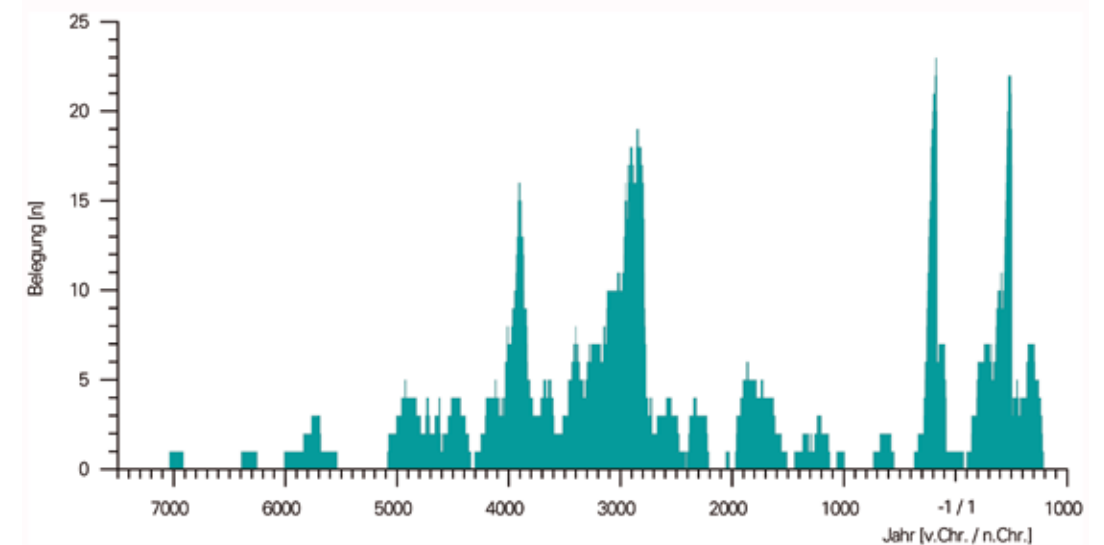


Abb. 3: zeitliche Verteilung der subfossilen Proben aus dem Schwarzensteinmoor für den Zeitraum der letzten 9000 Jahre.

Fig. 3: Temporal distribution of the sub-fossil probes from the Schwarzensteinmoor for the period covering the last 9000 years.

Das älteste bis jetzt datierte Lawineneignis im Oberen Zemmgrund geschah im Winter 6255/54 BC (NICOLUSSI K. et al. 2007).

**Weitere Kriterien zur Identifizierung eines Ereignisses als lawinenbedingt:**

1. uferferne und hangferne Lage der subfossilen Hölzer im Moor,
2. sowohl normal, als auch parallel und quer zur Moorhauptachse orientierte Lagerung der beprobten Stämme,
3. kollektives, plötzliches Absterben unterschiedlich alter Bäume zum selben Zeitpunkt und nach vollständiger Ausbildung des Spätholzes.

Über die durch Absterbedaten der Lawinenhölzer datierten Ereignisse hinausgehend wurde das Probenmaterial auf jahrringinterne Merkmale, die auf baumschädigende Lawinenabgänge schließen lassen, analysiert. Aufgrund dieser anatomischen Merkmale wurden weitere 64 wald- bzw. baum-

schädigende Lawinenereignisse identifiziert. Diese bereits vorgeschädigten Bäume gelangten erst bei einem späteren, größeren Ereignis ins Moor (ZROST D. et al. 2007).

Die Periode des alpinen Klimaoptimums, etwa das Jahrtausend um 5000 BC, gekennzeich-

net durch eine sehr hohe Baum- und Waldgrenze, sowie weit zurückgezogene Alpengletscher (NICOLUSSI K. et al. 2005, JÖRIN U. E. Et al. 2006) ist im Schwarzensteinmoor durch vergleichsweise wenige Proben belegt. Trotzdem sind vereinzelte Lawinenabgänge (und damit eine entsprechen-

Ereignis	Datierung	mWK	oWK	Baumalter	WorstC
WLE-1	6255/54 BC	1	-	141	-
WLE-2	5691/90 BC	1	-	84	-
WLE-3	4616/15 BC	2	-	48-131	-
WLE-4	4433/32 BC	1	-	162	-
WLE-5	4055/54 BC	1	-	251	+
WLE-6	3834/33 BC	2	7	77-251	+
WLE-7	3812/11 BC	1	-	143	-
aWLE-1	~ 3597 BC	-	3	119-262	-
WLE-8	3380/79 BC	1	1	120-466	-
WLE-9	3082/81 BC	1	-	202	-
aWLE-2	~ 2944 BC	-	4	57-347	-
aWLE-3	~ 2871 BC	-	4	99-233	(+)
WLE-10	2787/86 BC	2	8	74-370	-
WLE-11	2774/73 BC	3	3	69-368	-
aWLE-4	~ 2210 BC	-	3	124-200	(+)
WLE-12	1827/26 BC	1	1	100-107	+
WLE-13	1740-1530 BC*	1	-	60	-
WLE-14	1560/59 BC	1	-	227	-
WLE-15	995/94 BC	1	-	72	-
WLE-16	168/67 BC	12	5	48-205	-
WLE-17	85/84 BC	2	5	65-151	-
aWLE-5	~ 353 AD	-	4	142-182	-
WLE-18	411/12 AD	1	-	150	-
WLE-19	505/06 AD	16	5	32-183	-
WLE-20	743/44 AD	1	-	107	+
aWLE-6	~ 788 AD	-	4	171-321	-
WLE-21	1230-1285 AD*	1	-	81	-

Tab. 1 (nach NICOLUSSI K. et al. 2007, leicht verändert und ergänzt): Zusammenstellung der waldzerstörenden Lawinenereignisse (WLE) und der abgeleiteten waldzerstörenden Lawinenereignisse (aWLE); mWK = Probe mit Waldkante, oWK = Probe ohne Waldkante, WorstC = „Worst-Case“-Ereignis; \* = Radio-Carbon-Datierung

Tab. 1 (based on NICOLUSSI K. et al. 2007, slightly modified and supplemented): Composition of the forest-destroying avalanche events (WLE) and the derived forest-destroying avalanche events (aWLE); mWK= Probe with forest edge, oWK= Probe without forest edge, WorstC= "Worst Case" event; \*=Radio carbon dating

de Winterschneemenge) auch in diesem Zeitabschnitt nachweisbar.

Im bearbeiteten Zeitraum (7050 BC bis 1300 AD) geschahen 64 Ereignisse, deren Folge Schäden am Baumbestand waren (ZROST D. et al. 2007). 21 weitere Ereignisse führten zur Waldzerstörung und zum Transport der Stämme bzw. deren Bruchstücke (auch der bereits vorgeschädigten) in das Moor (NICOLUSSI K. et al. 2007).

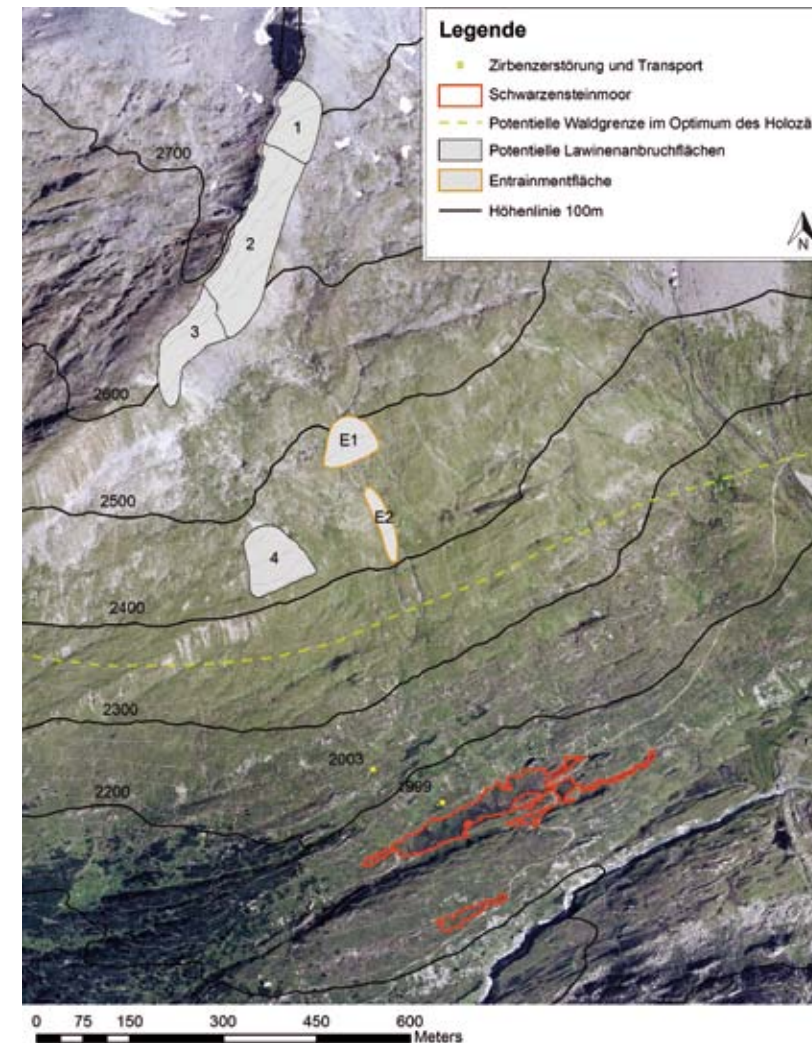


Abb. 4: Übersichtskarte mit Anrissgebieten und Entrainmentflächen. Orthofoto: BEV, 2003; bearbeitet von Pindur, 2004 und Wiatr, 2007

Fig. 4: Survey map with release areas and entrainment surfaces. Ortho photo: BEV, 2003; processed by Pindur, 2004 and Wiatr, 2007

Beobachtete aktuelle Lawinenereignisse (1999, 2003)

Die Geländesituation zeigt, dass es sich beim Schwarzensteinmoor um ein Auffangbecken für alle abgehenden Lawinen handelt. Der aufkommende Jungwuchs wird, vor allem in einer Hauptlawinenbahn, von kurzfristig wiederkehrenden Lawinenereignissen zerstört.

Diese Lawinentätigkeit bezeugt auch ein dendrochronologisch untersuchter Wipfelabschnitt einer Zirbe mit 33 Jahringen und dem Endjahr 1998, das als Lawinenholz aus dem Winter 1998/99 bei den Feldarbeiten im Sommer 1999 auf der Mooroberfläche liegend gefunden wurde. Bei einem weiteren Lawinenabgang im Winter 2002/03 wurde ein noch jüngeres Bäumchen (geschätzt ca. 12 – 17 Jahre alt) auf der Mooroberfläche abgelagert (NICOLUSSI K. et al. 2007).

Dieser Umstand erwies sich für die Abgrenzung der Lawinenanbruchgebiete (Abb. 4) und zur Überprüfung der Plausibilität der Simulation als sehr hilfreich.

Simulation des Lawinengeschehens am Lawinengang Schwarzensteinalm

Umfangreiche Erhebungen und Untersuchungen im Gelände ermöglichten die Rekonstruktion der höchsten holozänen Waldgrenzlage (ZWERGER P. & PINDUR P. 2007, ZWERGER P. & PINDUR P. 2009, WIESER, G. et al. 2009). Die für die Simula-

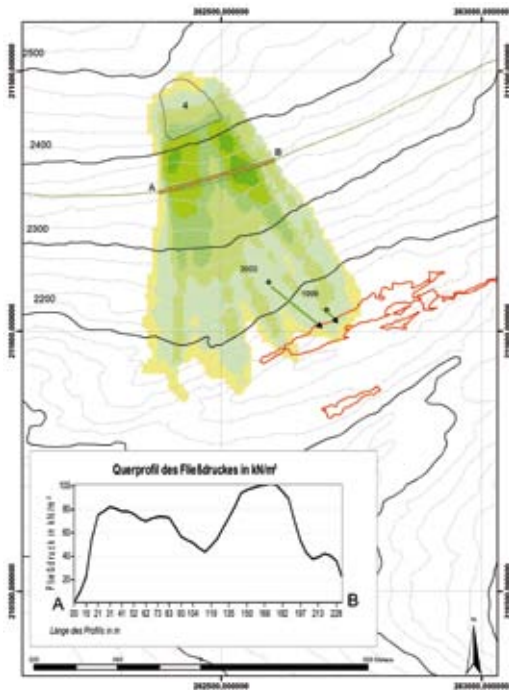


Abb. 5: Fließdruck unter Berücksichtigung der Anbruchfläche 4 bei einer angenommenen Anrisshöhe von 1,0 m. Druckverteilungsklassen siehe Legende, Abb. 7

Fig. 5: Flow pressure under consideration of the break surface 4 with an assumed release height of 1.0 m. Pressure distribution classes, see legend, figure 7

tion ausgeschiedenen Anbruch- und Entrainmentgebiete liegen alle oberhalb dieser rekonstruierten, gegenüber heute deutlich höher gelegenen, Waldgrenze.

Die in 29 Varianten durchgeführte Simulation stattgefundenen, auf Lawineneinwirkung zurückzuführende Waldzerstörungen war ein wesentlicher methodischer Bestandteil des gegen-

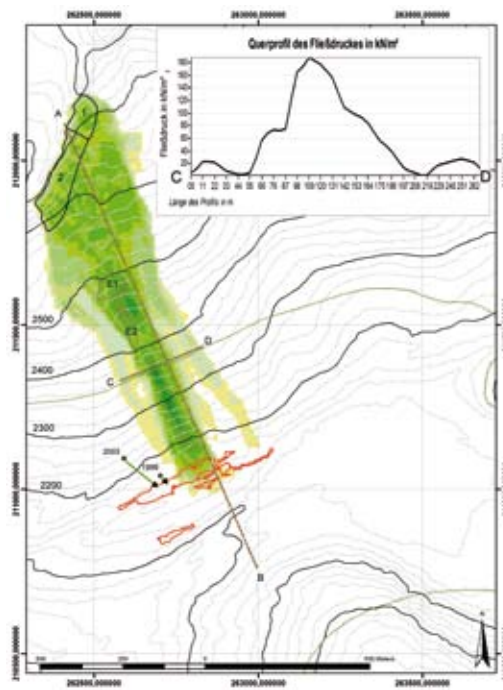


Abb. 6: Fließdruck unter Berücksichtigung der Anbruchflächen 1 und 2 mit den Entrainmentflächen e1 und e2 (Hauptlawinenzug) bei einer angenommenen Anrisshöhe von 1,0 m. Druckverteilungsklassen siehe Legende, Abb. 7

Fig. 6: Flow pressure under consideration of the break surfaces 1 and 2 with entrainment surfaces e1 and e2 (main avalanche flow) with an assumed release height of 1.0 m. Pressure distribution classes, see legend, figure 7

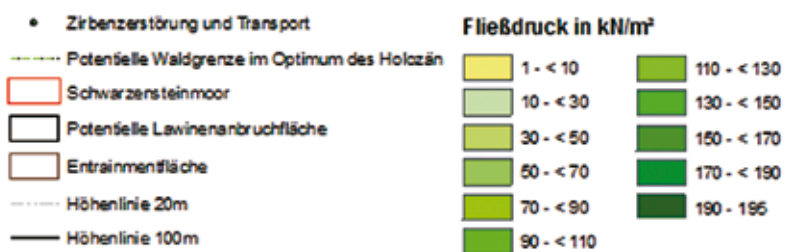


Abb. 7: Legende zu den Abbildungen 5 und 6

Fig. 7: Legend for figures 5 and 6

ständlichen Projektes und zeigt, dass ab bestimmten Schneemächtigkeiten auch aus relativ kleinen Anbruchgebieten (Anbruchfläche 4, Abb. 4) Lawinenabgänge mit weitreichender Wirkung möglich sind (Abb. 5). Die Ermittlung der dynamischen Lawinendruckwerte ergab, dass diese ab 1m Anrisshöhe hoch genug waren, um den damaligen Waldbestand zu zerstören und die Baumstämme in uferferne Lagen des Moores zu transportieren (SAILER R. et al. 2007).

Die Modellierung des Lawinengeschehens ergab auch die Übereinstimmung von Anbruchgebiet, Lawinenbahn und Ablagerung mit den Fundstellen der Baumstämme im Moor. Zudem zeigte sich, dass eine Überschneidung der Hauptlawinenbahn aus den Anbruchgebieten 1 und 2 (und den Entrainmentflächen 1 und 2) mit jener des Anbruchgebietes 4 ab einer Anbruchhöhe von 1,5 m möglich ist. Im Extremfall können also der gesamte Lawinengang und somit alle Moorbereiche bei einem einzigen Ereignis betroffen sein. Bei solch einem Ereignis überströmt der Staubanteil der Lawine den Gegenhang des Schwarzensteinmoores (SAILER R. et al. 2007).

Rekonstruktion der höchstgelegenen holozänen Waldgrenze

Forstbiometrische Analysen und die Ermittlung der rezenten Verbreitung von Keimlingen, Jungpflanzen und Zwergsträuchern im Gelände – unter Einbezug der topographischen und morphologischen Verhältnisse sowie zusätzlicher Berücksichtigung der Beweidung bzw. deren Rückgang – führten zum Entwurf einer Linie, welche die Obergrenze der Waldausbreitung während der wärmsten holozänen Klimaphasen (Optimalphasen) markiert. Die maximale Höhengrenze lag damals im Bereich der Schwarzensteinalm bei etwa 2350 m; das ist noch rund 100 m höher, als Waldwachstum bei den derzeit gegebenen Verhältnissen möglich ist. Damit war die Waldwuchsfläche während des

holozänen Klimaoptimums in der subalpinen Stufe mehr als doppelt so groß wie heute. Die gegenwärtige Waldverbreitung, -struktur und -entwicklung wurde kartiert (ZWERGER P. & PINDUR P. 2007, ZWERGER P. & PINDUR P. 2009, WIESER, G. et al. 2009) und konnte mit der bestehenden, bisher nicht publizierten Vegetationskartierung von Helmut Friedel aus den 1950er-Jahren verglichen werden (PINDUR P. et al. 2007).

Palynologische Befunde aus dem „Schwarzensteinmoor“

Neben den klimatischen Bedingungen für das Waldwachstum war auch die Frage nach dem menschlichen Einfluss auf den Waldbestand im Bereich der Schwarzensteinalm zu klären. Aus dem Schwarzensteinmoor und zwei weiteren, kleineren, aber höher gelegenen Moores, wurden zur Beantwortung dieser Frage Sedimentbohrkerne entnommen und palynologisch analysiert. Daraus ließ sich die Geschichte der Vegetation, des Klimas, der anthropogenen Nutzung und des Groß-Lawinengeschehens der Schwarzensteinalm im Oberen Zemmgrund für den Zeitraum der letzten 10 000 Jahre in vielen Details beschreiben.

Im Neolithikum (ab ca. 4100 BC) zeigen sich die ersten anthropogenen Eingriffe im Pollenprofil des Schwarzensteinmoores, die sich mithilfe typischer Zeigerpflanzen wie Spitzwegerich (*Plantago lanceolata*), Ampfer (*Rumex spec.*, *Rumex acetosella*), Beifuß, Brennnesselgewächsen (*Urticaceae*) u. a. nachweisen lassen. (HAAS J. N. et al. 2007). Während der Bronzezeit, ab ca. 2200 BC, erfolgte eine Intensivierung des menschlichen Eingriffes in den Waldbestand durch Brandrodung. Über diese verstärkte Nutzung gibt auch ein zeitgleicher archäologischer Befund aus unmittelbarer Nähe zum Schwarzensteinmoor Aufschluss (PINDUR P. et al. 2007). Bis ins Mittelalter herauf schwankte aber der menschliche Einfluss stark, sodass Waldwachstum oberhalb des Schwarzen-

steinmoores nicht nur klimatisch bedingt, sondern auch durch Nachlassen der Weidenutzung immer wieder möglich war.

Das Lawinengeschehen hat die subalpine Vegetation der Schwarzensteinalm stark beeinflusst. Aufgrund der Veränderungen im Pollenbild müssen die ab 6255 BC in relativ unregelmäßigen Abständen aufgetretenen und dendrochronologisch erfassten Großlawineneignisse (NICOLUSSI K. et al. 2007) nicht nur kurzzeitige Rückschläge in den Zirbenpopulationen (*Pinus cembra*) bewirkt haben, sondern teilweise – je nach Lawinentyp – auch die als lawinentolerant geltenden Grünerlen (*Alnus viridis*) und Latschen (*Pinus mugo*) zumindest kurzfristig in ihrer Blühfähigkeit und Populationsdichte getroffen haben (HAAS J. N. et al. 2007).

Die Ergebnisse der Pollenanalyse erbrachten auch Kenntnis über die mehrmals erfolgten Wechsel der ökologischen Verhältnisse in der Umgebung des Moores. Untersuchungen von in den Bohrkernen enthaltenen Käfern und Milben ergänzten und bestätigten diese Ergebnisse (WILD V. et al. 2007).

Verallgemeinerungen und Konsequenzen

### Klima

Die Ergebnisse der Rekonstruktion der paläoökologischen Verhältnisse der vergangenen 8300 Jahre im Untersuchungsgebiet bleiben nicht allein auf den Oberen Zemmgrund beschränkt. Da es sich um klimatisch gesteuerte Prozesse handelte, muss angenommen werden, dass diese Ergebnisse zumindest auf den Ostalpenraum bzw. Mitteleuropa übertragen werden können (siehe auch PATZELT G. 1995, 1999, 2000).

Die dendrochronologisch und palynologisch nachgewiesenen Temperatur- (und Niederschlags-)Schwankungen hatten größere Amplituden als sie seit Beginn der Instrumenten-

beobachtung (z.B. Hohenpeißenberg 1781, Sonnblick 1886) erfasst werden.

Häufige, längerfristige Perioden mit einer deutlichen Verschiebung der Waldgrenze nach oben (etwa noch 100 m höher als unter der gegenwärtigen Erwärmungsphase potenziell möglich) wurden von zeitweiligen Klimaverschlechterungen (massive Gletschervorstöße, z. B.: PATZELT G. & BORTENSCHLAGER S. 1973, SCHWENDINGER G. & PINDUR P. 2007, PINDUR P. & HEUBERGER H. 2010) unterbrochen. Wie wir heute im Untersuchungsgebiet (Waxeggalm) beobachten können, hat klimatische Erwärmung auch durchaus positive Folgen: Es bilden sich in den Gletschervorfeldern „Weideflächen aus Steinwüsten“ und es breitet sich Wald aus, mit all seinen günstigen, vermindernden Wirkungen, das Naturgefahrenrisiko betreffend.

### Wald

Alle dendrochronologisch analysierten Proben, über den gesamten, untersuchten Zeitraum, wurden als Zirben (*Pinus cembra* L.) identifiziert (PINDUR P. 2000, NICOLUSSI K. et al. 2007). Somit bildet die Zirbe seit über 8000 Jahren die Hauptbaumart der Waldbestände in der subalpinen Stufe des Oberen Zemmgrundes. Das bedeutet, dass sich auch während der stark ausgeprägten, holozänen Warmphasen keine Änderung der Baumartenzusammensetzung im Bereich der subalpinen Höhenstufe bzw. innerhalb der alpinen Waldgrenzregion entwickelte. Daher ist trotz der zu beobachtenden Anhebung der Wachstumshöhengrenzen eine Entwicklung hin zu anderen Baumarten in dieser, für das Naturgefahrengeschehen besonders relevanten, Höhenstufe nicht zu erwarten!

Die anthropogene Einflussnahme an und oberhalb der Waldgrenze ab der späten Jungsteinzeit ist eindeutig nachweisbar, doch war ihre Intensität sehr verschieden und bewirk-

te während der Klimagunstphasen eher nur eine geringfügige Beeinflussung des Waldwachstums. Beweidung und Rodung haben sich allenfalls auf das Wuchsalter der Baumindividuen ausgewirkt (HAAS J. N. et al. 2007).

Die Lawinenanbruchgebiete blieben auch während der holozänen klimatischen Optimalphasen unbewaldet und die Bestände darunter konnten aufgrund der Hangmorphologie nicht sehr dicht gewesen sein (ZWERGER P. & PINDUR P. 2007, ZWERGER P. & PINDUR P. 2009, WIESER, G. et al. 2009).

### Lawine

Bei genügend Abstand (etwa 100 Höhenmeter sind ausreichend), entsprechender Topographie bzw. Hangmorphologie eines Anbruchgebietes zur gegebenen Waldgrenze sind waldschädigende und waldzerstörende Lawineneignisse möglich. Die für solche Ereignisse notwendigen Schneemengen fielen auch während der häufigen bzw. langfristigen holozänen Warmphasen. Die nachgewiesenen und abgeleiteten Lawinenschäden (Lawineneinfluss auf die lokale Vegetation – NICOLUSSI K. et al. 2007, ZROST D. et al. 2007, HAAS J. N. et al. 2007) bestätigen diese Annahme. Die Ergebnisse der Modellierung von Lawinenabgängen am Hang der Schwarzensteinalm stimmen mit der Fundsituation der stummen Zeugen überein und zeigen, dass sowohl eine seitliche Überbordung des zentralen Lawinenzuges als auch ein Überströmen des natürlichen Dammes möglich ist (SAILER R. et al. 2007).

Es ist anzunehmen, dass Lawinenbahnen wie der zentrale Bereich der Hauptlawinenbahn der Schwarzensteinmoor-Lawine aufgrund häufiger Kleinereignisse (ZROST D. et al. 2007) ohne Baumwuchs bleiben. Die in Bezug auf die Hauptstoßrichtung der Lawine dezentrale Konzentration von Fundobjekten lässt diesen Schluss zu.

Diese Hypothese, wie auch die Lage der

Fundobjekte und deren Ausrichtung im Moor, schließen Steinschlag und Windwurf aus. Die Schneisen werden fallweise durch Großereignisse aufgeweitet.

Die Ergebnisse der Simulationen mit SAMOS bestätigen diese Annahmen. Weiters lassen die Simulationsergebnisse aufgrund der sehr hohen Fließspitzendruckwerte auf einen bodennahen Bruch von Bäumen, deren Entwurzelung und auch der Zerstörung von Krummholzbewuchs schließen. Die Simulationen erklären zudem – durch Berührung und Überschneidung der Sturzbahn- und Ablagerungsbereiche der Haupt- und Nebenlawinenbahnen – die Streuung (mit Konzentration seitlich der Hauptsturzbahn) der Fundobjekte über den gesamten Moorbereich.

Katastrophale Lawinnenniedergänge (Anrisshöhe min. 1,5 m) mit Zerstörung des nahezu gesamten Waldbestandes am Lawinenhang „Schwarzensteinmoor“ müssen ebenfalls stattgefunden haben. Das kann auf Basis der Simulationsergebnisse – Überschneidung der Sturz- und Ablagerungsbereiche bzw. der Überströmung des natürlichen Geländerückens – und der Lage einzelner Fundobjekte im Sektor 15 des Moorbereiches B angenommen werden (SAILER R. et al. 2007).

Die zeitliche Verteilung der Lawinenabgänge, bestimmt nach jahringinternen Faktoren, lässt keine einfache Zuordnung zu bekannt klimagünstigen beziehungsweise -ungünstigen Perioden des Holozäns, unterteilt nach Waldgrenz- und Gletscherbefunden (NICOLUSSI K. & PATZELT G. 2001, NICOLUSSI K. & PATZELT G. 2006, NICOLUSSI K. et al. 2005, JÖRIN U. E. et al. 2006) zu. Allerdings deutet sich durch die Analyse der möglichen Lawinenabgänge, unterstützt auch durch die synchrone, auffallende Verkürzung der Lebensdauer der betroffenen Bäume im jüngeren Holozän, eine erhöhte Zahl von Lawinen in bereits wieder klimaugünstigeren, feucht-kühler werdenden Abschnitten des Holozäns an (NICOLUSSI K. et al. 2007).

## Risiko

Zielsetzung des Projektes HOLA war es unter anderem, ein realistisches Worst-Case-Szenario für das rezente Lawinengeschehen unter Berücksichtigung von im Holozän bereits stattgefundenen Warmphasen und möglicher weiterer Klimaschwankungen zu entwickeln.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden:

- Erwärmung bewirkt besseres Waldwachstum und ein Höhersteigen der Waldgrenze. Damit wird die absolute Zahl potenzieller Lawinenanbruchgebiete verringert, bei gleichzeitig stark positiver Wirkung auf den Gebietsabfluss (GUGGENBERGER H. 1980, KRONFUSS H. 1997, MARKART G. et al. 2006, WIESER G. et al. 2008, MATYSSEK R. et al. 2009).

Das Naturgefahrenrisiko kann daher, potenziell, in vielen alpinen Bereichen abnehmen. Das bedeutet aber nicht, dass der punktuell zweifellos gegebenen Zunahme des Risikos im Hochgebirgsraum (Schlagwort Permafrost) kein Augenmerk zu leisten wäre!

- Lawineneignisse mit katastrophalem Ausmaß („worst case“) sind trotzdem möglich, aber extrem selten (etwa alle 2000 Jahre) und auch die Wiederholwahrscheinlichkeit von Großlawinen (etwa alle 500 Jahre) ist gering. Relativ häufig aber (etwa alle 130 Jahre) kommt es zu „kleineren“ Ereignissen. Diese können selbstverständlich auch katastrophale Wirkung haben, wenn davon Menschen und ihre immer sensibleren bzw. anfälligeren Einrichtungen betroffen werden! Die fiktive Annahme eines 150-jährigen Ereignisses (als das Bemessungs-

ereignis) für die Gefahrenzonenplanung und die Dimensionierung von Bauwerken dürfte daher auch für eine wärmer(?) Zukunft sehr gut gewählt sein.

- Situationen, die zu Großereignissen führen, werden nicht nur lokal beschränkt bleiben. Das muss bei raumplanerischen und sonstigen risikorelevanten Überlegungen bzw. Entscheidungen berücksichtigt werden (LUZIAN R. 2007).

## Perspektive

Aufgrund der hier vorgestellten Ergebnisse können darauf aufbauende Projekte, Studien und Auswertungen – bei Ausschöpfung des noch im Schwarzensteinmoor und im Bereich des Untersuchungsgebietes vorhandenen Forschungspotenzials – weitere, wichtige und hochaktuelle (Klima-Anpassungsstrategien) Beiträge sowohl zur anwendungsorientierten Lawinen- als auch zur gebirgsökologischen Forschung leisten.

## Dank

Dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol und Gebietsbauleitung Westliches Unterinntal **für maßgebliche Unterstützung** vor Ort.

Herrn Univ. Prof. Dr. G. Rabeder, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Quartärforschung, **für die sehr gelungene Kooperation** bei der Herausgabe des Projekts-Sammelbandes „Prähistorische Lawinen“.

**Für direkte, unentbehrliche finanzielle Zuwendungen:** Dem Land Tirol – Abteilung Umwelt, der Arbeitsgemeinschaft für Hochgebirgsforschung München und einer Privatperson aus Innsbruck.

## Anschrift der Verfasser / Authors' addresses:

Mag. Roland Luzian

Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft A - 6020 Innsbruck

Ing. Mag. Peter Pindur

Institut für Stadt- und Regionalforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften A – 1010 Wien

A. Univ. Prof. Dr. Kurt Nicolussi

Institut für Geographie, Universität Innsbruck A - 6020 Innsbruck

A. Univ. Prof. Dr. Jean-Nicolas Haas

Institut für Botanik, Universität Innsbruck A - 6020 Innsbruck

Mag. Dr. Rudolf Sailer

Institut für Geographie, Universität Innsbruck A - 6020 Innsbruck

Ing. Peter Zwerger

Institut für Naturgefahren und Waldgrenzregionen, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft A - 6020 Innsbruck

## Literatur / References:

BLIKRA L. H. & NEMEC W. (1993): Postglacial avalanche activity in western Norway: depositional facies sequences, chronostratigraphy and palaeo-climatic implications. In: Frenzel B., Matthews J.A., Gläser B. (eds.): Solifluction and climatic variations in the Holocene. Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research 11: 143-162.

BLIKRA L.H. & NESJE A. (1997): Holocene avalanche activity in western Norway: chronostratigraphy and palaeoclimatic implications. In: Matthews J.A., Brunsden D., Frenzel B., Gläser B., Weiss M.M. (eds.): Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene. Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research 19: 299-312.

BORTENSCHLAGER S. (1984): Beiträge zur Vegetationsgeschichte Tirols I. Inneres Ötztal und unteres Inntal. Berichte des Naturwiss.-Medizin. Vereins in Innsbruck 71: 19-56.

BRANDSTÄTTER, W., HAGEN, F., SAMPL, P., SCHAFFHAUSER, H. (1992): Dreidimensionale Simulation von Staublawinen unter Berücksichtigung realer Geländeformen, in Wildbach- und Lawinenverbau 120.

BURROWS C. J. & BURROWS V. L. (1976): Procedures for the study of snow avalanche chronology using growth layers of woody plants. Institute of Arctic and Alpine Research, Occasional Paper no. 23, University of Colorado, 13-24.

BUTLER D.R. & MALANSON G. P. (1985): A history of high-magnitude snow avalanches, southern Glacier National Park, Montana, U.S.A. Mountain Research and Development 5(2): 175-182.

CARRARA P. E. (1979): The determination of snow avalanche frequency through tree-ring analysis and historical records at Ophir, Colorado. Geological Society of America Bulletin, 90: 773-780.

CASTELLER A., STÖCKLI V., VILLALBA R., MAYER A. C. (2007): An Evaluation of Dendroecological Indicators of Snow Avalanches in the Swiss Alps. Alpine, Arctic and Antarctic Research 39(2): 218-228.

FLIRI F. (1998):

Naturchronik von Tirol. Beiträge zur Klimatographie von Tirol. Innsbruck (Universitätsverlag Wagner), 370 S.

GUGGENBERGER H. (1980): Untersuchungen zum Wasserhaushalt der alpinen Zwergstrauchheide Patscherkofel. Ph.D. thesis botany, University Innsbruck, 229 S.

HAAS J. N., WALDE C., WILD V. (2007): Holozäne Schneelawinen und prähistorische Almwirtschaft und ihr Einfluss auf die subalpine Flora und Vegetation der Schwarzensteinalm im Zemmgrund, Zillertal, Tirol, Österreich. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawineneignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 191-226.

JÖRIN U. E., STOCKER T. F., SCHLÜCHTER C. (2006): Multicentury glacier fluctuations in the Swiss Alps during the Holocene. The Holocene 16(5): 697-704.

KASBAUER D. (2006): Rekonstruktion von Lawineneignissen durch die Kombination von Lawinensimulation und dendrogeomorphologischen Methoden. Das Beispiel Hüttentobel-Lawine 1999. Geographische Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 110 S.

KRONFUSS H. (1997): Das Klima einer Hochlagenaufforstung in der subalpinen Stufe. Berichte der Forstlichen Bundesanstalt, Nr. 100, 331 S., Wien

LATERNSER M. & PFISTER C. (1997): Avalanches in Switzerland 1500 – 1990. In: Frenzel B., Matthews J. A., Gläser B., Weiss M. M. (eds.): Rapid mass movement as a source of climatic evidence for the Holocene. Paläoklimaforschung/Palaeoclimate Research 19: 241-266.

LUZIAN R. (2007): Diskussion, Schlussfolgerungen und Ausblick. Holozänes Lawinengeschehen im Lichte der Klimageschichte und des „Klimawandels“. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawineneignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 241-247.

LUZIAN R. & PINDUR P. (2000): Klimageschichtliche Forschung und Lawinengeschehen. In: Wildbach- und Lawinenverbau, 64, 142, S. 85-92.

MARKART G., KOHL B., PERZL F. 2006:

Der Bergwald und seine hydrologische Wirkung – eine unterschätzte Größe? In: LWF-Wissen, Berichte der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, 55.

MATYSSEK R., WIESER G., PATZNER K., BLASCHKE H., HÄBERLE K.H. (2009):

Transpiration of forest trees and stands at different altitude: consistencies rather than contrasts? In: European Journal of Forest Research, 128, S. 579-596.

NESJE A., BAKKE J., DAHL S.O., LIE O., BOE A.-G. (2007):

A continuous, high-resolution 8500-yr snow-avalanche record from western Norway. The Holocene 17(2): 269-277.

NICOLUSSI K. & PATZELT G. (2001):

Untersuchungen zur holozänen Gletscherentwicklung von Pasterze und Gepatschferner ( Ostalpen ). Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 36: 1-87.

NICOLUSSI K., LUMASSEGGER G., PATZELT G., PINDUR P., SCHIESSLING P. (2004):

Aufbau einer holozänen Hochlagen-Jahring-Chronologie für die zentralen Ostalpen: Möglichkeiten und erste Ergebnisse. In: Innsbrucker Geographische Gesellschaft (Hrsg.): Innsbrucker Jahresbericht 2001/2002, 16: 114-136.

NICOLUSSI K., KAUFMANN M., PATZELT G., VAN DER PLICHT J., THURNER A. (2005):

Holocene tree-line variability in the Kauner Valley, Central Eastern Alps, indicated by dendrochronological analysis of living trees and subfossil logs. Vegetation History and Archaeobotany 14(3): 221-234.

NICOLUSSI K. & PATZELT G. (2006):

Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze – aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. BFW-Praxisinformation 2006/10, 3-5.

NICOLUSSI K., PINDUR P., SCHIESSLING P., KAUFMANN M., THURNER A., LUZIAN R. (2007):

Waldzerstörende Lawinenereignisse während der letzten 9000 Jahre im Oberen Zemmgrund, Zillertaler Alpen, Tirol. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 157-176.

PATZELT G. & BORTENSCHLAGER S. (1973):

Die postglazialen Gletscher- und Klimaschwankungen in der Venedigergruppe (Hohe Tauern, Ostalpen). In: Zeitschrift für Geomorphologie N.F., Suppl. Bd. 16, S. 25-72.

PATZELT G. (1995):

Holocene Glacier and Climate Variations. In: Schirmer (Hrsg.) Quaternary field trips in Central Europe, München.

PATZELT G. (1999):

„Global Warming“ im Lichte der Klimageschichte. In: Löffler, H. u. E. W. Streissler (Hrsg.): Sozialpolitik und Ökologie – Probleme der Zukunft, S. 395 – 406.

PATZELT G. (2000):

Natürliche und anthropogene Umweltveränderungen im Holozän der Alpen. In : Entwicklung der Umwelt seit der letzten Eiszeit. Rundgespräche der Kommission für Ökologie. Kommission für Ökologie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (Hrsg.), 18, S. 119-125.

PINDUR P. (2000):

Dendrochronologische Untersuchungen im Oberen Zemmgrund, Zillertaler Alpen. Eine Analyse rezenter Zirben (Pinus Cembra L.) und subfossiler Moorböden aus dem Waldgrenzbereich und deren klimageschichtliche Interpretation. Diplomarbeit, Universität Innsbruck. Unveröffentlicht.

PINDUR P., ZWERGER P., LUZIAN R., STERN R. (2007):

Die Vegetationskartierung im Zemmgrund aus den 1950er Jahren – Grundlage für aktuelle Vergleichsstudien. Ein Ergebnis der Vegetationskartierung von Helmut Friedel in den Zillertaler Alpen. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 109-115.

PINDUR P., SCHÄFER D., LUZIAN R. (2007):

Der Nachweis einer bronzezeitlichen Feuerstelle bei der Schwarzensteinalm im Oberen Zemmgrund. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 143-154.

PINDUR P. & HEUBERGER H. (2010):

Zur holozänen Gletschergeschichte im Zemmgrund in den Zillertaler Alpen, Tirol/Österreich (Ostalpen). In: Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 42(2) (2008), S. 21-89.

SAILER R., LUZIAN R., WIATR T. (2007):

Simulation als Basis für die Rekonstruktion holozäner Lawinenereignisse. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 227-238.

SAMPL P., ZWINGER T., SCHAFFHAUSER H. (2000):

Evaluation of Avalanche Defense Structures with the simulation Model SAMOS. In: Rock and Soil Engineering, 1/2000, S. 41-46.

SAMPL P. & ZWINGER T. (2004): Avalanche Simulation with SAMOS. In: Annals of Glaciology, 38, S. 393-398.

SCHMIDT R. (2007):

Erzeugung von Geodaten des Lawinenhanges „Schwarzensteinmoor“. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 43-52.

SCHWENDINGER G. & PINDUR P. (2007):

Die Entwicklung der Gletscher im Zemmgrund seit 1850. Längenänderung, Flächen- und Volumenverlust, Schneegrenzanstieg. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 53-68.

SMITH D.J., MC CARTHY D.P., LUCKMAN B.H. (1994):

Snow avalanche impact pools in the Canadian Rocky Mountains. In: Arctic and Alpine Research Nr. 26(2), S. 116-127.

STÖCKLI V. (1998):

Physical interaction between snow and trees: dendroecology as a valuable tool for their interpretation. In: Urbinati, C.; Carrer, M. (eds.): Dendroecologia - una scienza per l'ambiente fra passato e presente. Corso di Cultura in Ecologia, S. Vito di Cadore/Italia, 1-5 Sept. 1997. Padova, 79-85.

STOFFEL M., BOLLSCHWEILER M., HASSLER G. R. (2006):

Differentiating events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. In: Earth Surface Processes and Landforms Nr. 31 (11), S. 1424-1437.

WIESER G., HAMMERLE A., WOLFAHRT G. (2008):

The water balance of grassland ecosystems in the Austrian Alps. In: Arctic, Antarctic and Alpine Research, 40, S. 439-445.

WIESER, G., MATYSSEK, R., LUZIAN, R., ZWERGER, P., PINDUR, P., OBERHUBER, W., GRUBER, A. (2009):

Effects of atmospheric and climate change at the timberline of the Central European Alps. In: Annals of Forest Science, Paris, 66(4): 402-412.

WILD V., SCHATZ L., SCHATZ H. (2007):

Subfossile Arthropodenfunde (Acari: Oribatida, Insecta: Coleoptera) in Mooren bei der Schwarzensteinalm im Oberen Zemmgrund in den Zillertaler Alpen (Österreich). In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 117-131.

ZROST D. (2004):

Lawinenereignisse des späten und mittleren Holozäns in den zentralen Ostalpen : dendrochronologische Untersuchungen rezenter und subfossiler Zirbenhölzer im Kaunertal und Zillertal. Geographische Diplomarbeit, Universität Innsbruck, 126 S.

ZROST D., NICOLUSSI K., THURNER A. (2007):

Holozäne Lawinenereignisse im Jahrbild der subfossilen Hölzer des Schwarzensteinmoores, Zillertaler Alpen. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 177-189.

ZWERGER P. & PINDUR P. (2007):

Waldverbreitung und Waldentwicklung im Oberen Zemmgrund. Aktueller Bestand, Strukturanalysen und Entwicklungsdynamik. In: Luzian R. & Pindur P. (2007) Prähistorische Lawinen. Nachweis und Analyse holozäner Lawinenereignisse in den Zillertaler Alpen, Österreich. Der Blick zurück als Schlüssel für die Zukunft. Mitteilungen der Kommission für Quartärforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Band 16 und Berichte des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft Nr. 141, S. 69-97.

ZWERGER P. & PINDUR P. (2009):

Veränderungen der Waldgrenze. In: Forstzeitung 120. Jahrgang, 05/09, S. 10-12.