

Schutzwirkung und Resilienz von Gebirgswäldern nach natürlichen Störungen

Conference Paper**Author(s):**

Bebi, Peter; Piazza, Natalie; Ringenbach, Adrian; Caduff, Marion; Conedera, Marco; Krumm, Frank; [Rigling, Andreas](#) 

Publication date:

2023

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000655033>

Rights / license:

[Creative Commons Attribution 4.0 International](#)

Originally published in:

WSL Berichte 144, <https://doi.org/10.55419/wsl:35230>

Schutzwirkung und Resilienz von Gebirgswäldern nach natürlichen Störungen

Peter Bebi^{1,2}, Natalie Piazza³, Adrian Ringenbach^{1,2,4}, Marion Caduff^{1,2}, Marco Conedera⁵, Frank Krumm⁵ und Andreas Rigling⁴

¹ WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung, SLF Davos, Schweiz, bebi@slf.ch, adrian.ringenbach@slf.ch, marion.caduff@hotmail.com

² Climate Change, Extremes and Natural Hazards in Alpine Regions Research Centre CERC

³ DISAA, University of Milan, Italien, natalie.piazza@unimi.it

⁴ Departement Umweltsystemwissenschaften, ETH Zürich, andreas.rigling@usys.ethz.ch

⁵ Eidg. Forschungsanstalt WSL, Cadenazzo/Birmensdorf, Schweiz, marco.conedera@wsl.ch, frank.krumm@wsl.ch

Natürliche Störungen gehören zu den grössten Herausforderungen für die Erhaltung der Schutzfunktionen unserer Wälder. Die Förderung einer möglichst hohen Resilienz gegenüber solchen Störungen wurde in den letzten Jahrzehnten zu einem immer wichtigeren Bestandteil der Schutzwaldbewirtschaftung. In diesem Artikel geben wir einen Überblick zum Einfluss von natürlichen Störungen auf die Schutzfunktion gegenüber Naturgefahren, wobei wir Resultate aus kürzlich an der WSL und der ETH abgeschlossenen Dissertationen aufgreifen. Darauf aufbauend und vor dem Hintergrund der erwarteten weiteren Zunahme von Störungen und Extremereignissen diskutieren wir, wie die zukünftige Resilienz von Schutzwäldern gefördert werden kann.

1 Einleitung

Natürliche Störungen durch Windwurf, Borkenkäferbefall oder Feuer können die Schutzfunktion eines Waldes innert kurzer Zeit untergraben. Nutzungsgeschichtlich bedingt wurden die Schutzwälder der Schweiz in den letzten 150 Jahren zunehmend dichter und vorratsreicher (Brändli *et al.* 2020). Damit hat sich zwar die Schutzwirkung gegenüber Naturgefahren wie Stein- schlag oder Lawinen vielerorts verbessert, die Wälder sind aber auch anfälliger geworden gegenüber eingangs genannten Störungen (Bebi *et al.* 2017). Zusätzlich zur nutzungsgeschichtlich bedingten Disposition tragen der Klimawandel und damit verbundene klimatische Extreme wie Hitzewellen, Dürren, extreme Stürme oder Schneemangel zunehmend dazu bei, dass wir in Zukunft noch mehr mit grossflächigen Störungen rechnen müssen (Thom *et al.* 2022; Patacca *et al.* 2023). Deshalb erhalten Investitionen in die Resilienz von Schutzwäldern eine immer grössere Bedeutung (Seidl *et al.* 2016; Bebi *et al.* 2017). Resilienz wird in diesem Kontext als Fähigkeit eines Waldes verstanden, seine Schutzfunktion im Falle einer Störung so weit wie möglich aufrechtzuerhalten oder so rasch und nachhaltig wie möglich wieder

aufzubauen. Für die Praxis relevante Forschungsfragen sind in diesem Zusammenhang: (1) unter welchen Bedingungen erfolgen nach natürlichen Störungen entscheidende Einbussen in der Schutzwirkung und (2) wie kann die Resilienz von Schutzwäldern erhöht werden?

2 Schutzwirkung nach natürlichen Störungen

2.1 Lawinenschutz nach Windwurf am Beispiel der Windwurf- flächen von Vivian

Im Februar 1990 rief der Sturm Vivian eindrücklich in Erinnerung, wie anfällig der Wald gegenüber natürlichen Störungen sein kann (Walcher 1991, Abb. 1). In der Folge wurden an der WSL Experimente gestartet, um die Waldentwicklung und den langfristigen Verlauf der Schutzfunktion auf Windwurfflächen nach verschiedenen Behandlungsvarianten zu untersuchen (Schönenberger *et al.* 2002). Ergebnisse aus den ersten 10 Jahren nach dem Sturm deuteten bereits darauf hin, dass in den nicht geräumten Windwurf- flächen eine erhöhte Bodenrauhigkeit durch kreuz und quer liegende Stämme und Wurzelteller in einer ersten Phase

nach einem Windwurfereignis einen zuverlässigen Schutz gegen Lawinen- anrisse und Steinschlag darstellen kann (Schönenberger *et al.* 2005; Frei und Thee 2002). Auch zeigte die erste grössere Bewährungsprobe, nämlich der Lawinenwinter 1999, dass auch bei erheblichen Schneehöhen kaum Lawinen auf Störungsflächen mit grosser Bodenrauhigkeit anrissen (Frei und Thee, 2002). Allerdings nahmen Stabilität und Wirkhöhen der liegenden Stämme danach relativ rasch ab und insbesondere an steilen Hängen (> 40° Hang- neigung) verschoben sich Stämme um mehrere Meter nach unten (Putallaz 2010; Wohlgemuth *et al.* 2017).

In den Jahren 2019–2021, also rund 30 Jahre nach dem Sturm Vivian, wurden die Daten von belassenen Langzeitbeobachtungsflächen in Disentis, Schwanden und Zweisimmen mit Feldaufnahmen auf weiteren nicht geräumten Windwurfereignissen aus den Jahren 1990 (Vivian), 2007 (Kyrill) und 2018 (Vaia) ergänzt (Brožová 2022). Diese Zeitreihen zeigen, dass sich die Schutzleistung auf nicht geräumten Windwurfflächen der montanen und subalpinen Höhenstufe häufig bereits 30 Jahre nach dem Sturm wieder erholt hatte und die Baumkronen im Durchschnitt schon wieder 50 % der Flächen bedeckten. Auch wurden zu diesem Zeitpunkt erstmals erhebliche Dichten an Moderholzverjüngung auf sich zersetzenden Stämmen festgestellt. Dies hatte in diesem Stadium zwar noch keinen Einfluss auf die aktuelle Schutzleistung, ermöglicht aber einen zweiten Verjüngungsschub und erhöht damit die Vielfalt bezüglich Struktur- und Baumalter (Tsvetanov *et al.* 2018). Ausserdem kann liegendes Totholz die Beschattung und Feuchtigkeit der Mikrostandorte sowie den Schutz gegenüber

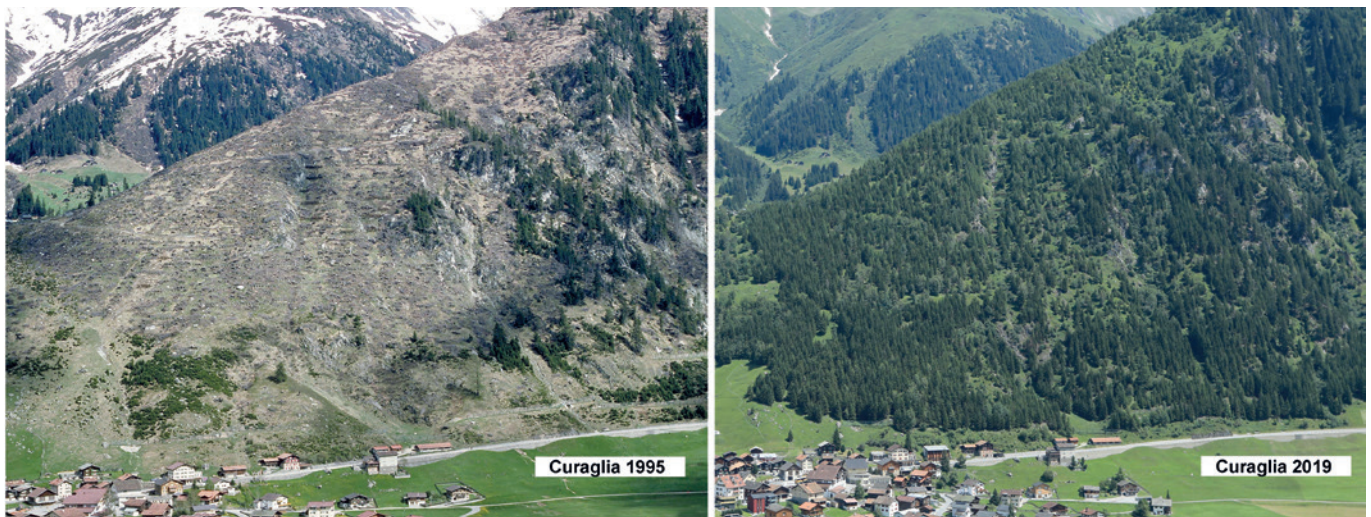


Abb 1. Windwurffläche in Curaglia (GR) 5 Jahre (links) und 29 Jahre (rechts) nach dem Sturm Vivian (Fotos: Ulrich Wasem, WSL)

Verbiss erhöhen, wovon etablierte Verjüngung profitieren kann (Marangon *et al.* 2021). Durch den allmählichen Abbau der von totem Holz und Wurzeltellern erzeugten Oberflächenrauigkeit und die gleichzeitig zunehmende Etablierung der Verjüngung ergab sich ein Minimum der Gesamtschutzwirkung nach etwa 10–15 Jahren (Brožová 2022; Baggio *et al.*, 2022).

2.2 Lawinenschutz nach Käferbefall am Gandberg

Wie die Langzeituntersuchungen auf Windwurfflächen lassen auch die Wiederholungsaufnahmen auf der nicht geräumten Käferfläche «Gandberg» (GL) Rückschlüsse zu auf die langfristige Entwicklung und Schutzfunktion nach grossflächigem Borkenkäferbefall. Dafür wurde der Verlauf der natürlichen Entwicklung von Feld- und Fernerkundungsdaten erfasst. Ergänzend dazu wurden für verschiedene Waldentwicklungsphasen nach dem Käferbefall Lawinensimulationen durchgeführt (Kupferschmid *et al.* 2002; Caduff *et al.* 2022).

Die Entwicklung nach grossflächigem Borkenkäferbefall am Gandberg (1992–1997) verlief nicht wesentlich anders als auf Windwurfflächen (Abb. 2). Der Abbau des Totholzes erfolgte aber vergleichsweise langsamer, weil die abgestorbenen Bäume nach Käferbefall meist noch einige Jahre stehen blieben (Caduff *et al.* 2022). An-



Abb. 2. Borkenkäferbestand Gandberg (GL): Links oben: Übersichtsbild im Jahr 1999, rechts oben: Bestandesaufnahme mit dem damaligen Forschungsleiter Walter Schönenberger (Fotos: U. Wasem, WSL), links unten: Übersichtsbild im Jahr 2020 (Foto M. Caduff), rechts unten: Bestandesaufnahme nach Wiederbewaldung (Foto: P. Bebi).

dererseits bleiben auf Käferflächen deutlich weniger Wurzelteller zurück, was im Vergleich zu Windwurfflächen für die Restschutzwirkung nach Käferbefall ein Nachteil ist (Ilisson *et al.* 2007; Bače *et al.* 2012; Brožová *et al.* 2022).

Lawinensimulationen unter Berücksichtigung des Waldzustandes kurz nach dem Käferbefall (1997) resultierten in nur wenigen Lawinenanrissen, und viele der simulierten Lawinen stoppten bereits innerhalb des Waldes

(Abb. 3). Das Minimum der Schutzkapazität wurde ähnlich wie auf der Windwurffläche auf etwa 10 bis 15 Jahre nach der Störung geschätzt. Zu diesem Zeitpunkt waren die Wirkhöhen des Totholzes bereits stark reduziert und die Verjüngung war meist noch zu wenig entwickelt für eine vollständige Übernahme der Schutzfunktion im Falle eines alle 300 Jahre wiederkehrenden Ereignisses (Caduff *et al.* 2022). Dank der fortschreitenden Wiederbewaldung in den Folgejahren nahm die Schutzwirkung

dann bis zum Jahr 2019 wieder deutlich zu, was sich in den Lawinensimulationen dadurch zeigte, dass die Grösse der Anrissflächen abnahm und weniger Lawinen das Tal erreichten (Abb. 3).

Die Resultate auf Windwurf- und Käferflächen bestätigen somit frühere Untersuchungen, welche auf die positive Lawinenschutzwirkung von erhöhter Oberflächenrauigkeit dank liegendem Holz und Wurzeltellern auf Störungflächen hinwiesen (Schönenberger *et al.* 2005; Teich *et al.* 2019). Bestätigt wird dies auch dadurch, dass auf Windwurfflächen mit vorhandener Restrauigkeit seit 1990 kaum Lawinanrisse registriert wurden (Bebi *et al.* 2015). Dennoch sollte jede Situation differenziert betrachtet werden, insbesondere für Störungflächen (i) mit sehr geringer Restrauigkeit (z.B. nach konsequenter Räumung von Totholz), (ii) mit ausgesprochen verzögerter Wiederbewaldung und (iii) in Steilhängen oder im Bereich von Gerinneprozessen, wo die Gefährdung durch sich bewegendes Totholz höher ist als dessen positive Restwirkung.

2.3 Schutz gegenüber Steinschlag

Im Vergleich zum Lawinenschutz wirkt Wald gegen Steinschlag vor allem im Transit- und Ablagerungsgebiet, indem Steine aufgehalten werden oder deren Reichweite reduziert wird. Die Schutzwirksamkeit von liegendem Holz gegenüber Steinschlag wurde zwar bereits in früheren Untersuchungen erkannt (Schönenberger *et al.* 2005; Fuhr *et al.* 2015; Olmedo *et al.* 2015) und auch einzelne Feldexperimente wurden durchgeführt (Bourrier 2012). Umfangreiche und systematische Feldversuche mit verschiedenen Steinformen, Steingrößen und Waldtypen erfolgten aber erst in den letzten Jahren (Ringebach 2022).

Diese Experimente zeigten, dass die abbremsende Wirkung von liegendem Totholz bisher stark unterschätzt wurde. In Surava (GR) wurden Feldexperimente mit instrumentierten, 45 kg schweren Steinen in drei verschiedenen Behandlungsphasen eines steilen Fichten-Lärchen-Versuchswaldes durchgeführt: (a) vor einem Verjüngungsschlag, (b) direkt nach dem Eingriff, aber vor der Räumung des liegenden Holzes,

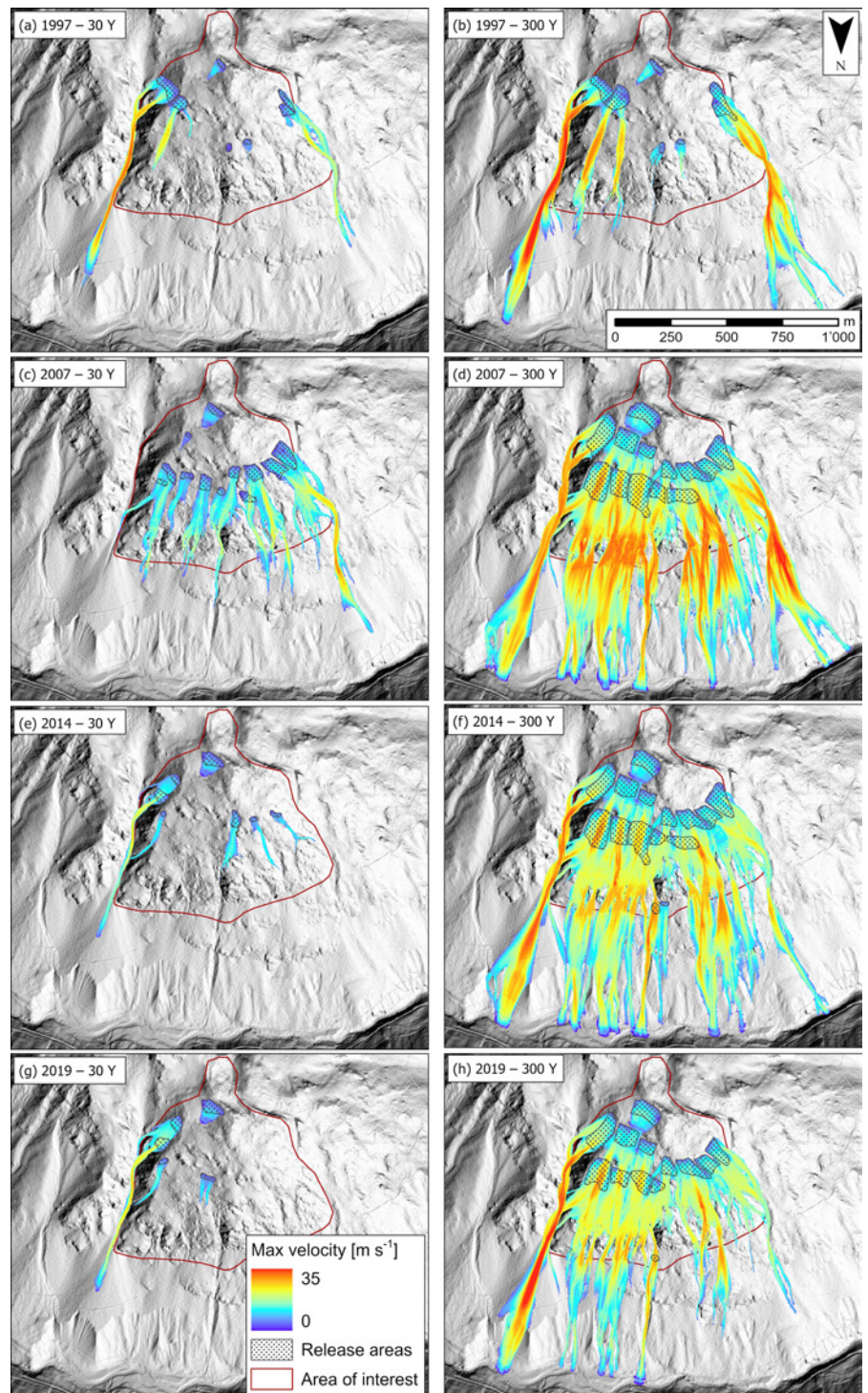


Abb. 3. Lawinensimulation mit RAMMS EXTENDED, in der Forschungsfläche Gandberg für verschiedene Zeitschritte von 1997 bis 2019 und für verschiedene Lawinenszenarien: ein alle 30 Jahre auftretendes Ereignis (Zeitserie links) sowie ein alle 300 Jahre wiederkehrendes Szenario (Zeitserie rechts) (Abbildungen aus Caduff *et al.* 2022, map © swisstopo).

und (c) nach der Räumung des liegenden Holzes. Die Resultate zeigen, dass im Waldzustand mit liegenden Stämmen die mit Abstand beste Schutzwirkung erzielt wird (Ringebach *et al.* 2022a).

Darauf aufbauend wurde die Bedeutung von liegendem Holz und um-

gekippten Wurzeltellern für die Schutzwirkung in Experimenten mit unterschiedlichen Stein- und Blockmassen (bis 3.2 t) und unterschiedlichen Blockformen in einem durch Windwurf gestörten Buchen-Fichtenwald bei Schiers (GR) untersucht. Diese Experimente zeigten, dass zum Teil auch grössere

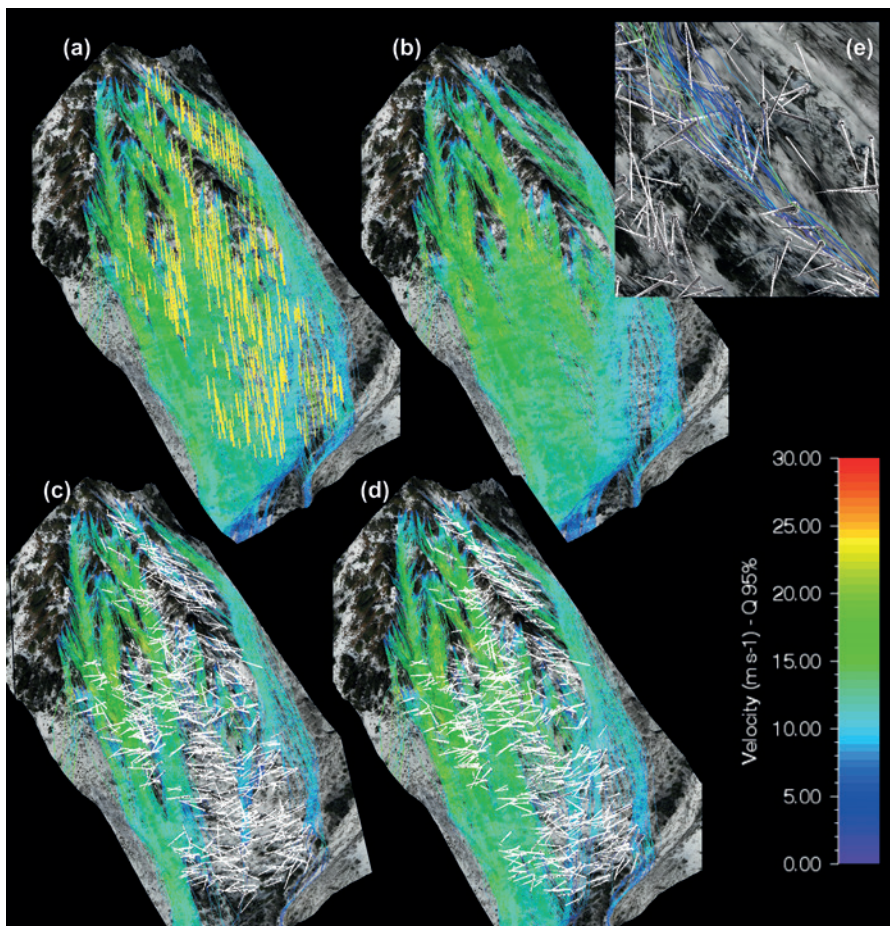


Abb. 4. Simulierte Geschwindigkeit von Steinschlagtrajektorien durch eine Windwurffläche im Klöntal (GL) in vier verschiedenen Zuständen: A) Ursprünglicher Wald vor dem Windwurf, B) geräumte Windwurffläche ohne Totholz, C) Windwurffläche mit frischem Totholz, D) Windwurffläche nach 10 Jahren mit teilweise zersetztem Totholz, E) Detailausschnitt von ausgewählten, dreidimensional dargestellten Steinschlagtrajektorien, die mit liegendem Totholz und Wurzeltellern interagieren (abgeändert nach Ringenbach *et al.* 2022b).



Abb. 5. Vom Feuer herausgelöster Stein nach Waldbrand im Centovalli (Foto: M. Conedera)

Blöcke durch Totholz zum Stoppen kamen (Ringenbach *et al.* 2023). Das Resultat war bei würfelförmigen 800-kg-Blöcken besonders deutlich: Während mit Totholz nur 40 % der Steine den Hangfuss erreichten, waren es nach Entfernen des Totholzes etwa 90 %. Bei plattigen Blöcken wirkten stehende Bäume bereits sehr gut, denn nach einem Baumtreffer rollen diese nicht weiter, sondern gleiten auf ihrer flachen Seite den Hang entlang. Ist es lokal nicht steil genug, kommen sie reibungsbedingt oftmals komplett zum Stillstand.

Die beobachteten Flugbahnen und Ablagerungsorte aus den Steinschlagexperimenten wurden anschliessend verwendet, um die Steinschlagsimulation im Wald zu eichen und Steinschlagintensitäten unterhalb von bewaldeten, steinschlaggefährdeten Hängen zu ermitteln. Um dabei auch natürli-

che Störungen und deren Einfluss auf den Steinschlag grossflächig simulieren zu können, wurde ein virtueller Totholzgenerator programmiert und basierend auf Drohnen-Luftbildern validiert (Ringenbach *et al.*, 2022a). Um auch den Schutzeffekt von gealtertem Totholz abzuschätzen, wurde einerseits ein verdichteter Totholzstapel und andererseits eine um 45 % geringere Absorptionsenergie pro Totholzstamm angenommen, abgeleitet von experimentellen Ergebnissen an 8–10-jährigen Stürzeln vom Gandberg (Ammann 2006). Bei einem Drittel des Totholzbestandes wurde zudem eine Braunfäule angenommen, was die Energieabsorption gemäss Ammann (2006) um 90 % reduziert. Basierend auf den experimentellen Resultaten erstaunt es nicht, dass frisches, liegendes Totholz unter den betrachteten Szenarien den besten Schutzeffekt für die simulierten

400 kg schweren Blöcke bietet: Bloss ein Viertel aller Steine kam bei diesem Szenario bis zur Evaluationslinie im Vergleich mit dem komplett geräumten Hang. Hingegen überraschte, dass gemäss den Modellen selbst 10-jähriges, bereits teilweise zersetztes Totholz besser vor Steinschlag schützt als der ursprüngliche Wald. Die Wirksamkeit von Totholz ist, wie auch jene von stehendem Wald, abhängig von der Totholzdichte und der Steinschlagenergie. Wenn aus topographischen Gründen höhere Energien zu erwarten sind, wirken stehende Bäume trotz geringerer Trefferchancen aufgrund der höheren Energieabsorption im Verhältnis besser.

Nach Waldbränden ist die Restschutzwirkung noch mehr als nach Windwurf oder Käferbefall von der Intensität der Störungsereignisse abhän-

gig. Während ein geringer Schweregrad des Feuers die Schutzwirkung gegen Steinschlag kaum beeinflusst, wird diese durch hohe Mortalitätsraten von betroffenen Bäumen bei einem hohen Schweregrad signifikant reduziert (Maringer *et al.* 2016).

Obwohl gegenüber Steinschlag in den ersten Jahren nach einer Störung sogar eine erhöhte Schutzkapazität von gestörten Wäldern vorliegen kann (zumindest im Fall von Windwurf), sind die Auswirkungen in Steinschlagschutzwäldern länger zu spüren als in Lawinenschutzwäldern. Die für die Wiederherstellung der Schutzwirkung effektiv benötigte Zeit ist abhängig von lokalen Faktoren wie erwartete Steinschlagenergie, Hanglänge, Höhenlage, vorhandene Verjüngung und Wilddruck (Ringebach 2022a). Da die ma-

ximal absorbierte Steinschlagenergie von Bäumen stark von deren Durchmesser abhängt, sind meist (dichte) Stangenholzbestände nötig, um überhaupt eine Schutzfunktion zu erzielen. Somit kann das Schutzdefizit auch länger als 30 Jahre bestehen bleiben (Maringer *et al.* 2016).

Wie bei den Lawinen ist auch bei Steinschlagprozessen Vorsicht geboten, wenn es darum geht, die bisherigen Forschungsergebnisse zu verallgemeinern. Die Restschutzwirkung auf Störungsfelder ist zwangsläufig in besonders steilen Hängen, bei grossen Blockgrößen und bei kurzen Transitstrecken zum Schadenpotential am geringsten. Dabei sind auch Sekundär-Steinschlagprozesse bei losen Steinen hinter sich zersetzendem Totholz zu beachten (Ringebach *et al.* 2022a). Besonders heikle



Abb. 6. Grabenerosion nach Waldbrand in Visp (Foto: M. Conedera)

Situationen können sich bei Waldbrand ergeben, wenn sich Steine aus den Felswänden lösen (primärer Steinschlag) oder «sekundäre» Steinschläge durch umfallende Bäume herausgelöst werden (Abb. 5, Melzner *et al.* 2022).

2.4 Rutschungen, Murgänge und Erosion

Schon wenige Jahre nach dem Absterben von Bäumen nimmt die stabilisierende Wirkung ihrer Wurzeln rasch ab (Vergani *et al.* 2017). Da gegenüber Rutschungen und Murgängen auch kaum ein positiver Effekt einer erhöhten Bodenrauigkeit durch Totholz zu erwarten ist, müssen wir auf über 30° geneigten Hängen nach natürlichen Störungen wie Windwurf (McDonald 2011), Insektenkalamitäten oder schweres Feuer (Vergani *et al.* 2017; Rengers *et al.* 2020) mit einer deutlichen Abnahme der Bodenstabilität und damit auch der Schutzwirkung rechnen (Ammann *et al.* 2009; Vergani *et al.* 2017; Rengers *et al.* 2020). Dies wurde auch durch Katasterdaten bestätigt, wo auf Windwurfflächen während den Jahren 3 bis 17 nach einem Störungsereignis eine deutlich grössere Disposition für flachgründige Rutschungen und Hangmuren als im übrigen Wald festgestellt wurde (Bebi *et al.* 2019).

Besonders gravierend können sich flächige Waldbrände auf die Gefährdung durch Erosion, Oberflächenabfluss und Murgänge auswirken (Conedera *et al.* 2003; Gerold 2019). Unmittelbar nach einem Waldbrand vergrössern sich die Gefahren durch wasserabstossende Bodenoberflächen, ausgetrocknete Böden und die fehlende Interzeption der Kraut- und Baumvegetation, was verstärkt zu Bodenerosion, Murgängen und flachgründigen Rutschungen führen kann (Conedera *et al.* 2003; Melzner *et al.* 2022, Abb. 6).

3 Förderung der Resilienz

Die bisherigen Betrachtungen zur Schutzwirkung von Wäldern nach natürlichen Störungen zeigen, dass es nicht zwangsweise zu einer Reduktion der Schutzwirkung kommt. Entscheidend dabei sind: 1) die Hangneigung und andere topografisch-naturräumli-

che Rahmenbedingungen; (2) die Art der natürlichen Störung und die dort relevanten Naturgefahrenprozesse; (3) die Struktur und Artzusammensetzung des Ausgangsbestandes; und (4) die erhobenen Massnahmen nach der Störung. Die topografisch-naturräumlichen Rahmenbedingungen und die Art der Naturgefahr liegen dabei weitgehend ausserhalb unseres Einflussbereichs, stellen aber wichtige Planungsgrundlagen für die Priorisierung von Massnahmen dar.

Der Ausgangszustand vor dem Ereignis ist zumindest bei Störungen durch Windwurf und Käferbefall mitentscheidend dafür, ob die verschiedenen Ökosystemleistungen nach einem Störungsereignis schnell wiederhergestellt und kontinuierlich aufrechterhalten werden können. Je strukturreicher ein Bestand ist und je mehr Verjüngung bereits vor einem Ereignis vorhanden ist, desto rascher verläuft die Wiederbewaldung und desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit eines Defizits der Schutzwirksamkeit nach einem Ereignis (Wohlgemuth *et al.* 2017). Dies ist ein zentrales Argument für eine präventive Schutzwaldbewirtschaftung (Frehner *et al.* 2005) und unterstreicht nochmals die Bedeutung einer vorhandenen (Vor)-Verjüngung. Je mehr wir den Klimawandel und die damit verbundenen Gefährdungen einzelner Baumarten sowie Unsicherheiten bezüglich ihrer Anpassungsfähigkeit betrachten, desto wichtiger erscheint es, die Vielfalt der Arten zu fördern. Störungen können sogar als Chance betrachtet werden, um das Baumartenspektrum schneller an den Klimawandel anzupassen und dadurch die Resilienz der Schutzwälder zu erhöhen (Seidl *et al.* 2016; Scherrer *et al.* 2022; Seidl 2023 in diesem Band; Scherrer *et al.* 2023 in diesem Band).

Nach einer Störung können Resilienz und zukünftige Schutzleistungen vor allem durch die Art des Totholzmanagements sowie ergänzende Pflanzungen und Wildtiermanagement beeinflusst werden. Ein zumindest teilweises Belassen von Totholz kann nicht nur einen wesentlichen Beitrag zum Schutz gegenüber Steinschlag und Lawinen leisten, sondern im Sinne einer umfassenden Resilienz-Betrachtung auch zur Förderung der Biodiversität (Lachat *et al.* 2013; Thorn *et al.* 2018), zur Erhaltung von Elementen der System-

innerung (z.B. Altbäume, Totholz) sowie zur Förderung von Moderholz-Habitaten, welche im späteren Verlauf der Bestandesentwicklung wertvoll für einen zweiten Verjüngungsschub sind und damit wesentlich zur Alters- und Strukturdiversifizierung beitragen (Bače *et al.* 2012; Tsvetanov *et al.* 2018; Caduff *et al.* 2022). Ergänzende Pflanzungen sowohl auf geräumten Störungsflächen wie auch zwischen Totholzelementen können dazu beitragen, dass Schutzleistung und Anpassung an den Klimawandel gezielt dort gefördert werden, wo dies besonders wichtig ist (Schwitter *et al.* 2015; Bebi *et al.* 2016).

4 Grenzen des passiven Managements

Die bisherigen Betrachtungen zur Schutzwirkung und Resilienz nach natürlichen Störungen liefern gewichtige Argumente für ein zurückhaltendes, beobachtendes und trotzdem sehr effizientes Management auf der Basis von natürlichen Prozessen und speziell von Störungen. Der Vollständigkeit halber muss aber auch auf Situationen hingewiesen werden, in denen es klare Gründe dafür gibt, aktiv in den Sukzessionsprozess nach Störungen einzugreifen. Dabei stehen fünf Situationen im Vordergrund:

1. Wenn die Sicherheit des Menschen durch zerfallendes Totholz gefährdet ist, also beispielsweise direkt entlang von offiziellen Wander- und Verkehrswegen.
2. Wenn das Gelände so steil ist, dass tote Bäume und Baumteile ins Rutschen geraten können und eine erhebliche Gefahr durch Sekundärschäden (inklusive lose Steine hinter sich zersetzendem Totholz) besteht.
3. Wenn aufgrund der aktuellen Zusammensetzung und Dynamik des Waldes inklusive übermässigem Wilddruck eine zeitlich stark verzögerte oder ungenügend klimaanangepasste Wiederbewaldung zu erwarten ist, sodass künstliche Pflanzungen und eine Anpassung der Huftierbestände erforderlich sind.
4. Wenn erhebliche Risiken durch die Ausbreitung von Borkenkäfern und andere biotische Störungen entstehen und diese durch ein rechtzeitiges Eingreifen entscheidend

vermindert werden können (sofern die regionalen Kapazitäten der Forstbetriebe dafür überhaupt ausreichen).

5. Wenn eine nachhaltige Waldbewirtschaftung nur mittels Räumung oder zumindest Teilräumung nach einer Störung erreicht werden kann.

Die Unterschiedlichkeit nur schon dieser fünf Situationen macht deutlich, dass generelle Handlungsempfehlungen wenig zielführend sind. Zwar liefern neue Forschungsergebnisse wichtige Argumente für ein effizientes Totholzmanagement und ein Abstützen auf und Gewähren von natürlichen Entwicklungen in Schutzwäldern. Das Herleiten von Handlungsempfehlungen, die Planung und Priorisierung von Eingriffen in solchen Flächen bleibt anspruchsvoll und verlangt ein Miteinander von Forschung und Praxis und eine gemeinsame Diskussion an konkreten Objekten unter Einbezug von gezielter angewandter Forschung (vgl. Bottero *et al.*, Beitrag zum Projekt Mountex in diesem Tagungsband).

5 Folgerungen

Die aus den gezeigten Ergebnissen und Gedanken zur Schutzwirkung auf Störungsflächen ableitbaren Folgerungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

1. Natürlichen Störungen stellen zwar eine sehr grosse Herausforderung für die Erhaltung der Schutzfunktionen von Wäldern dar, können aber vielfach auch als Chancen gesehen werden im Hinblick auf eine raschere Klimaanpassung.
2. Die rechtzeitige Förderung von Vorverjüngung, Struktur- und Artenvielfalt erhöht die mittel- und langfristige Resilienz gegenüber zukünftigen natürlichen Störungen.
3. Liegendes Totholz und umgestürzte Wurzellager können einen entscheidenden positiven Beitrag zum Schutz vor Lawinen und Steinschlag leisten, insbesondere ausserhalb von sehr steilen Hängen (>~40°). Dieser wurde bis anhin häufig unterschätzt und sollte in Zukunft im Sinne einer räumlich differenzierten Priorisierung von Massnahmen auf Störungsflächen konsequent mitberücksichtigt werden.

4. Die Herausforderungen für den Schutzwald und die Wichtigkeit der Priorisierung von Massnahmen zur Erhöhung von Resilienz und nachhaltigem Naturgefahrenschutz nehmen durch den Klimawandel drastisch zu und verlangen nach einer synergistischen, problemlösungsorientierten Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis.

6 Dank

An dem Zustandekommen dieses Artikels haben verschiedenste Personen aus Forschung und Praxis mitgewirkt, denen wir an dieser Stelle herzlich danken möchten. Besonders zu erwähnen sind Walter Schönenberger, Werner Frei, Andrea Kupferschmid, Tom Wohlgemuth und Ueli Wasem, die wichtige Grundlagen für die Langzeitbetrachtungen auf Windwurfflächen lieferten, sowie Samuel Zürcher und Janine Schweizer für die Durchsicht und wertvolle Hinweise zu einer früheren Version des Manuskripts.

7 Literatur

- Allgaier Leuch B., Fischer C., Brändli U.B. (2021) Momentan schützt der Schutzwald besser. *Wald Holz*. 30–34.
- Ammann M. (2006) Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL. 228 S. ISBN 3-905621-34-7
- Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 228 S.
- Bače R., Svoboda, M., Pouska, V., Janda, P., Červenka, J. (2012) Natural regeneration in Central-European subalpine spruce forests: Which logs are suitable for seedling recruitment? *For. Ecol. Manage.* 266: 254–262. doi.org/10.1016/j.foreco.2011.11.025
- Baggio T., Brožová N., Bast A., Bebi P., D'Agostino V. (2022) Novel indices for snow avalanche protection assessment and monitoring of wind-disturbed forests. *Ecol. Eng.* 181: 106677 (12 S.). doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106677
- Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B., Brang P. (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (Eds.) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern, Haupt Verlag, 269–285.
- Bebi P., Putallaz J.M., Fankhauser M., Schmid U., Schwitter R., Gerber W. (2015) Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 166, 3: 168–176.
- Bebi P., Seidl R., Motta R., Fuhr M., Firm D., Krumm F., ... (2017) Changes of forest cover and disturbance regimes in the mountain forests of the Alps. *For. Ecol. Manag.* 388: 43–56. doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.028
- Bebi P., Bast A., Ginzler C., Rickli C., Schöngrundner K., Graf F. (2019) Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. *Schweiz. Z. Forstwes.* 170, 6: 318–325. doi.org/10.3188/szf.2019.0318
- Bourrier F., Dorren L.K.A., Berger F. (2012) Full scale field tests on rockfall impacting trees felled transverse to the slope. In: Koboltschnig, Huebl (Ed.) 2012 – Conference proceedings 12th Congress Interpraevent, Grenoble. 643–650.
- Brändli U.-B., Abegg M., Allgaier Leuch B. (Red.) (2020) Schweizerisches Landesforstinventar. Ergebnisse der vierten Erhebung 2009–2017. Birmensdorf: Eidgenössische Forschungsanstalt WSL; Bern: Bundesamt für Umwelt. 341 S.
- Brožová N. (2022) Avalanche protection capacity and disturbance dynamics of mountain forests. DISS. ETH NO. 28207. Ph.D thesis ETH Zürich and SLF Davos. 144 S.
- Caduff M.E., Brožová, N., Kupferschmid A.D., Krumm F., Bebi P. (2022) How large-scale bark beetle infestations influence the protective effects of forest stands against avalanches: a case study in the Swiss Alps. *For. Ecol. Manage.* 514, 120201: 13. doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120201
- Conedera M., Peter L., Marxer P., Forster F., Rickenmann D., Re L. (2003) Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: A case study of the Riale Buffago, Ticino, Switzerland. *Earth Surf. Process. Landf.* 28: 117–129.
- Gerold P. (2019) Waldbrandmanagement im Kanton Wallis und Lehren aus dem Brand von Visp im Jahr 2011. *Schweiz. Z. Forstwes.* 170, 5: 251–257.
- Frehner M., Wasser B., Schwitter R. (2005) Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bern: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. 564 S.
- Frey W., Thee P. (2002) Avalanche protection of windthrow areas: A ten year comparison of cleared and uncleared starting zones. *For. Snow Landsc. Res.* 77: 89–107.
- Fuhr M., Bourrier F., Cordonnier T. (2015) Protection against rockfall along a maturity gradient in mountain forests. *For. Ecol. Manage.* 354: 224–231. doi.org/10.1016/j.foreco.2015.06.012
- Ilisson T., Köster K., Vodde F., Jogiste K. (2007) Regeneration development 4–5 years after a storm in Norway spruce dominated forests, Estonia. *For. Ecol. Manag.* 250: 17–24.
- Kupferschmid A.D., Schönenberger W., Wasem U. (2002) Tree regeneration in a Norway spruce snag stand after die-back caused by *Ips typographus*. *For. Snow Landsc. Res.* 77, 1–2: 149–160.
- Lachat T., Bouget C., Büttler R., Müller J. (2013) Deadwood: quantitative and qualitative requirements for the conservation of saproxylic biodiversity. In: Kraus D., Krumm F. (Eds.), *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity*. *Eur. For. Ins.* 92–102.
- Maringer J., Ascoli D., Dorren L., Bebi P., Conedera M. (2016) Temporal trends in the protective capacity of burnt beech forests (*Fagus sylvatica* L.) against rockfall. *Eur. J. For. Res.* 135, 4: 657–673. doi.org/10.1007/s10342-016-0962-y
- Marangon D, Pilotti M, Zancanaro F, Costa M, Lingua E. (2021) Is deadwood helping regeneration? Natural regeneration dynamics in a stand replacing windthrow area. In *Proceedings of EGU General Assembly 2021: 19–30, Apr 2021*. EGU General Assembly 2021. doi.org/10.5194/egusphere-egu21-14348
- Melzner S., Conedera M., Pezzatti G.B. (2022) Post Waldbrand Risiko in den schweizerischen Gebirgen. *Wildbach- und Lawinenverbau* 86. 190: 120–130.
- Olmedo I.M. (2015) Etude expérimentale et numérique de l'efficacité d'ouvrages ligneux de génie biologique pare-pierre. Diss. N°ISAL 0060, IRSTEA and INSA.
- Patacca M., Lindner M., Lucas-Borja M.E., Cordonnier T., Fidej G., Gardiner B., ... (2023) Significant increase in natural disturbance impacts on European forests since 1950. *Glob. Chang. Biol.* 29, 5: 1359–1376.
- Putallaz J.M. (2010) Protection à long terme contre les avalanches sur les surfaces de chablis; Etude sur l'efficacité mécanique des arbres au sol. Davos: Institut pour l'Etude de la neige et des avalanches, Travail de Master. 116 S.

- Rengers F.K., Oakley N.S., Kean J.W., Staley D.M., Tang H. (2020) Landslides after wildfire: initiation, magnitude, and mobility. *Landslides* 17: 2631–2641.
- Ringebach A. (2022a) Experimental quantification of deadwood influence on rockfall dynamics and its incorporation into regional-scale rockfall models. Diss. ETH NO 28688. Ph.D thesis ETH and SLF Davos, 96 S.
- Ringebach A.E., Stihl Y., Bühler P., Bebi P., Bartelt A., Rigling M., ... (2022) Full-scale experiments to examine the role of deadwood in rockfall dynamics in forests. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 22, 7: 2433–2443, 202.
- Ringebach A., Bebi P., Bartelt P., Rigling A., Christen M., Bühler Y., ... (2022b). Modeling deadwood for rockfall mitigation assessments in windthrow areas. *Earth Surf. Dyn.* 10, 6: 1303–1319. doi.org/10.5194/esurf-10-1303-2022
- Ringebach A., Bebi P., Bartelt P., Rigling A., Christen M., Bühler Y., ... (2023) Shape still matters – rockfall experiments with deadwood reveal a new facet of rock shape relevance. *Earth Surf. Dyn.*
- Scherrer D., Ascoli D., Conedera M., Fischer C., Maringer J., Moser B., ... (2022). Canopy disturbances catalyse tree species shifts in Swiss Forests. *Ecosyst.* 25: 199–214. doi.org/10.1007/s10021-021-00649-1
- Seidl R., Spiess T.A., Peterson D.L., Stephens S.L., Hicke J.A. (2016) Searching for resilience: addressing the impacts of changing disturbance regimes on forest ecosystem services. *J. Appl. Ecol.* 53: 120–129.
- Schönenberger W. (2002) Windthrow research after the 1990storm Vivian in Switzerland: objectives, study sites, and projects. *For. Snow Landsc. Res.* 77, 1/2: 9–16.
- Schönenberger W., Noack A., Thee P. (2005) Effect of timber removal from windthrow slopes on the risk of snow avalanches and rockfall. *For. Ecol. Manage.* 213, 1–3: 197–208. doi.org/10.1016/j.foreco.2005.03.062
- Schwitter R., Sandri A., Bebi P., Wohlgemuth T., Brang P. (2015) Lehren aus Vivian für den Gebirgswald – im Hinblick auf den nächsten Sturm. *Schweiz. Z. Forstwes.* 166, 3: 159–167. doi.org/10.3188/szf.2015.0159
- Teich M., Giunta A.D., Hagenmüller P., Bebi P., Schneebeli M., Jenkins M.J. (2019) Effects of bark beetle attacks on forest snowpack and avalanche formation – implications for protection forest management. *For. Ecol. Manage.* 438: 186–203. doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.052
- Thom D., Rammer W., Laux P., Smiattek G., Kunstmann H., Seibold S., ... (2022) Will forest dynamics continue to accelerate throughout the 21st century in the Northern Alps? *Glob. Chang. Biol.* 28: 3260–3274.
- Thorn S., Bässler C., Brandl R., Burton P.J., Cahall R., Campbell J.L., ... (2018) Impacts of salvage logging on biodiversity: a meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* 55, 1: 279–289. doi.org/10.1111/1365-2664.12945
- Tsvetanov N., Dountchev A., Panayotov M., Zhelev P., Bebi P., Yurukov S. (2018) Short- and long-term natural regeneration after windthrow disturbances in Norway spruce forests in Bulgaria. *iForest* 11, 5: 675–684. doi.org/10.3832/ifor2754-011
- Vergani C., Werlen M., Conedera M., Cohen D., Schwarz M. (2017) Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest. *For. Ecol. Manage.* 400: 339–352. doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.005
- Walcher J. (1991) Sturmschäden 1990: eine Lagebeurteilung aus der Sicht der Praxis: Beispiele aus dem Kanton Glarus. *Schweiz. Z. Forstwes.* 142: 463–469.
- Wohlgemuth T., Schwitter R., Bebi P., Sutter F., Brang P. (2017) Post-windthrow management in protection forests of the Swiss Alps. *Eur. J. For. Res.* 136, 5-6: 1029–1040. doi.org/10.1007/s10342-017-1031-x

Abstract

Protective effect and resilience of mountain forests after natural disturbances

Natural disturbances are among the greatest challenges for the management of forests with a protective role against natural hazards. Promoting the highest possible resilience related to natural disturbances has thus become an increasingly important part of mountain forest management in recent decades. In this article, we present results of recently finalized PhD dissertations and provide an overview on the effect of natural disturbances on the protective function against natural hazards. Based on this overview and an expected further increase in the frequency and intensity of extreme events and natural disturbances in mountain forests, we discuss how the resilience of protective forests to future extreme events may be promoted.

Keywords: windthrow, forest fire, bark beetle infestations, natural hazards, snow avalanches, rockfall



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.