

Projekt 021

Auswirkung zukünftiger Waldveränderungen auf Naturgefahrenrisiken

Schlussbericht



Projektziel

Erhöhung der Einschätzbarkeit von Risiken bei sich änderndem Schutzwald auf darunterliegende Objekte, um Prioritäten in der Schadenprävention gezielter setzen zu können



Auftragnehmer

• WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF



Projektbegleitung

• Markus Feltscher, GVG
• Josef Eberli, BAFU
• Martin Jordi, Präventionsstiftung



Nutzen / ROI

• Risikomanagement-Grundlagen
• Aufbau / Stärkung des Netzwerks
• Präventivwirkung des Waldes im alpinen Raum erhalten



Schlussbericht WANAG-Projekt:

15. Februar 2023

Auswirkung zukünftiger Waldveränderungen auf Naturgefahrenrisiken und mögliche Folgerungen für Gebäudeversicherungen

Auftraggeber:

Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherungen
Bundesgasse 20, 3011 Bern
Schweiz

Auftragnehmer:

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF
CERC – Climate Change, Extremes and Natural Hazards in Alpine Regions Research Center
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf
Schweiz

Autoren:

Peter Bebi, Kevin Helzel, Adrian Ringenbach, Alexander Bast, Natalie Brožová, Frank Krumm,
Linda Zaugg

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	2
1. Einleitung und Zielsetzung	3
2. Natürliche Störungen im Wald und Bedeutung für Gebäuderisiken	3
2.1. <i>Datengrundlagen.....</i>	3
2.2 <i>Disposition gegenüber natürlichen Störungen.....</i>	4
2.3 <i>Zeitliche Entwicklung auf Störungsflächen.....</i>	4
2.4 <i>Naturgefahrenprozesse auf Störungsflächen.....</i>	5
2.5 <i>Erfassung der Schutzwirkung mit Fernerkundung und Modellen.....</i>	6
<i>Prozess Lawine.....</i>	6
<i>Prozess Steinschlag</i>	7
3. Risikoberechnung mit EconoMe und GIS.....	9
3.1. <i>Konzept und Methodische Grundlagen</i>	9
3.2 <i>Beispiel Schatzalp für den Prozess Lawine.....</i>	10
3.3 <i>Beispiel Schmitten für den Prozess Steinschlag</i>	11
4. Interaktive Karten mit Anwendungspotential für Gebäudeversicherungen	12
4.1 <i>Maps.wsl.ch als Plattform für den Wissenstransfer</i>	12
4.2. <i>Weiterentwicklung der interaktiven Karten.....</i>	13
5. „Lessons learnt“: Folgerungen für KGV, Grundeigentümer oder Gemeinden	15
Dank:	17
Zitierte Literatur:.....	17

Zusammenfassung

Wald schützt Siedlungen und Verkehrswege grossflächig vor gravitativen Naturgefahren. In Zukunft erwarten wir starke Veränderungen des Waldes und seiner Schutzfunktion – insbesondere durch ein Ansteigen der Waldgrenze und eine Zunahme von natürlichen Störungen wie Borkenkäfer, Waldbrand und Windwurf. Im Projekt «WANAG» wurde erforscht, wie sich ein veränderter Schutzwald auf Gebäuderisiken auswirkt, und wie solche Risikoveränderungen quantifiziert und veranschaulicht werden können.

Unsere Untersuchungen auf Störungsflächen und Daten von Naturgefahrenereignissen zeigen, dass nach Windwurf und Borkenkäferbefall die Schutzwirkung gegenüber Rutschungen und Murgang abnimmt. Langfristig gesehen wirkt sich aber ein Belassen von Holz in solchen Flächen häufig nicht negativ auf den Naturgefahrenschutz gegenüber Lawinen und Steinschlag/Sturz aus. Insbesondere beim Prozess Steinschlag zeigte sich, dass kreuz und quer liegende Stämme zunächst sogar eine höhere Schutzwirkung erzielen als stehende Bäume. Dieser Effekt liess im Laufe der Zeit nach und erreichte in unseren Untersuchungsgebieten nach rund 10 bis 15 Jahren ein Minimum. Danach nahm die Schutzwirkung meistens wieder zu. Wie sich die Schutzwirkung nach einem Windwurf oder Borkenkäferbefall entwickelt, ist jedoch je nach Struktur des Ausgangsbestandes vor der Störung verschieden und hängt auch stark von der Steilheit und Standortsunterschieden ab. Ausserdem müssen für Steinschlag/Sturz auch mögliche Sekundäreignisse durch lose Steine berücksichtigt werden

Dank verbessertem Prozesswissen, hochaufgelösten Fernerkundungsdaten und Naturgefahren-Simulationsmodellen ist es heute möglich, Gefahrenhinweiskarten und verschiedene Waldszenarien für die Naturgefahrenprozesse «Lawinen» und «Steinschlag/Sturz» grossflächig zu erstellen. Solche Karten können mit räumlichen Gebäudeinformationen kombiniert werden. Dies wurde in zwei Fallbeispielen (eines für Steinschlag in Schmitten und eines für Lawinen in Davos) durchgeführt, wobei wir auf verschiedene methodische Optionen und Darstellungsvarianten eingehen. Dabei zeigte sich, dass nach einem Windwurf nur im Fall von extremen Lawinenereignissen (300-jährlich) Lawinen aus den neuen Störungsflächen den Siedlungsraum erreichen. Bei den häufigen Szenarien (30-jährlich) mit entsprechend geringeren Schneemengen war der Auslauf der simulierten Lawinen zu gering, um Gebäude zu gefährden. Für den Prozess «Steinschlag» wurden beim Wald mit frischem Totholz deutlich geringere kinetische Energien festgestellt als beim Wald ohne Störung. Die Gebäuderisiken unterschieden sich bei den beiden Wäldern ((oder Szenarien)) jedoch nur unwesentlich.

Mit Risikohinweiskarten lässt sich darstellen, wie sich ein verändernder Wald auf Naturgefahrenrisiken auswirkt. In einem WANAG-Nachfolgeprojekt und in Kooperation mit dem WSL-Forschungsprogramm CCAMM werden solche Risikohinweiskarten zurzeit in Richtung einer interaktiven Web-Applikation weiterentwickelt. Mit dieser Applikation lässt sich für diverse Schutzgüter und Waldzustände erstmals flexibel berechnen, wie sich das Risiko bei neu vorliegenden oder sich durch den Klimawandel abzeichnenden Gefahrensituationen verhält. Eine solche Risikoabschätzung liesse sich nicht nur verwenden, um Massnahmen im Naturgefahren- und Waldmanagement zu priorisieren. Auch Gebäudeversicherungen, Gemeinden oder Grundeigentümer könnten sie zur Abschätzung und Visualisierung von zukünftigen Risikoveränderungen einsetzen.

1. Einleitung und Zielsetzung

In der Schweiz sind etwa 15 % der Gebäude durch Naturgefahren bedroht. Als flächenmässig wichtigste Massnahme schützt der Schweizer Wald auf rund der Hälfte seiner Fläche vor gravitativen Naturgefahren, wobei 71 % der Schutzwälder Gebäude schützen (Hess et al. 2014). Die grosse Herausforderung bei diesem natürlichen Naturgefahrenschutz besteht darin, dass Wald sich dauernd ändert. Da sich dies insbesondere als Folge des Klimawandels und vermehrt auftretender natürlicher Störungen wie Windwurf oder Käferbefall verstärken dürften, ist auch mit sich ändernden Risiken durch Naturgefahren zu rechnen (Bebi et al. 2016).

Das Ziel des Projektes «WANAG» (Auswirkung zukünftiger **W**aldveränderungen auf **N**aturgefahrenrisiken und mögliche Folgerungen für **G**ebäudeversicherungen) bestand darin, Risiken bei sich änderndem Schutzwald auf darunterliegende Objekte besser einschätzen zu können, damit sich Prioritäten in der Schadensprävention gezielter setzen lassen.

Im Rahmen des WANAG-Projektes wurde der Lohn einer Doktorandin (zu 50% während den Jahren 2018-2021) bezahlt. Zudem wurde ein wissenschaftlicher Mitarbeiter/Kartograph zur Entwicklung von interaktiven Karten während einem Jahr mitfinanziert. Dadurch konnte die Thematik von WANAG in das WSL-Forschungsprogramm CCAMM (Climate Change and Mass Movements) integriert werden und es ergaben sich wichtige Schnittstellen zu anderen Projekten. Dieser Bericht fasst im Sinn einer Synthese die bedeutendsten Aspekte dieser Arbeiten zusammen, wobei der Fokus auf Erkenntnissen liegen soll, welche für die Kantonalen Gebäudeversicherungen (KGV) relevant sind.

2. Natürliche Störungen im Wald und Bedeutung für Gebäuderisiken

2.1. Datengrundlagen

Schon vor Jahrzehnten wurde darauf hingewiesen, dass sich natürliche Störungen gravierend auf die Schutzwirkung des Waldes auswirken. Aber erst seit den grossflächigen Sturmschäden durch Vivian im Jahr 1990 (Abb. 1) gibt es dazu bedeutende Forschungsarbeiten und langfristige Datenreihen (Schönenberger 2002, Bebi et al. 2015).

Flächenhafte GIS-Daten liegen von den hierzulande bedeutendsten beiden Windwurfereignissen (Vivian im Jahr 1990 und Lothar im Jahr 1999) schweizweit in hoher räumlicher Auflösung vor (Usbeck et al. 2012). Weitere Störungsdaten wurden von Senf und Seidl (2020) auf der Basis von Landsat-Satelliten-Zeitserien für die Periode von 1986–2018 extrahiert. Da diese Daten nicht nur natürliche Störungen, sondern auch Holz- und Verjüngungsschläge beinhalten, wurden sie (zunächst für das Gebiet des Kantons Graubünden) mit räumlichen Informationen zu forstlichen Eingriffen überlagert (AWN 2019, Stritih et al. 2021a). Diese Datenkombination haben wir genutzt, um Störungen nach ihrer Ursache zu charakterisieren und die Störungsdisposition bezüglich Windwurf, Feuer, Borkenkäfer und Schneebruch zu quantifizieren.

Gesamtschweizerische Daten von Naturgefahrenereignissen wurden aus dem Naturereigniskataster StorMe (BAFU, 2020) extrahiert (Bebi et al., 2019, Bleiker 2020). Zusätzliche Daten über Naturgefahrenereignisse in Störungsflächen haben wir in Fallstudien erhoben, wo wir die Waldentwicklung aufgrund von Wiederholungsaufnahmen rekonstruiert und die Schutzwirkung nach natürlichen Störungen modelliert haben.



Abb. 1: Windwurf­fläche in Curaglia (GR) direkt nach dem Sturm im Jahr 1990 (Bild links), im Jahr 1991 nach Räumung und temporärem Lawinenverbau aber erheblicher Steinschlag- und Rutschungsaktivität (Bild mitte) und im Jahr 2020 nach Aufforstung (Bild rechts). Nach gängiger Praxis wurde das Holz nach dem Sturm geräumt, danach wurde aufgeforstet und verbaut (Foto: C. Flepp, W. Gerber, P. Bebi)

2.2 Disposition gegenüber natürlichen Störungen

Gemäss den zur Verfügung stehenden Daten ist die Disposition gegenüber natürlichen Störungen stark von topografischen Faktoren abhängig. Windwurfschäden und Käferkalamitäten traten weniger häufig in höheren Lagen (oberhalb ca. 1500 m ü. M.) und in komplexem Gelände (sowohl Mulden wie auch Kuppen) auf. Süd- und ostexponierte Lagen waren im Vergleich zu nord- und westexponierten Lagen stärker betroffen.

Nebst der Topografie beeinflussten insbesondere die Waldstruktur und die Bewirtschaftungsgeschichte, wie anfällig Wäldern gegenüber natürlichen Störungen sind. Bestände mit grösseren Bäumen und einem hohen Fichtenanteil wiesen eine grössere Anfälligkeit auf. Ebenfalls störungsanfällig waren relativ junge Wälder, die nach 1920 als Sekundärwälder auf landwirtschaftlich genutzten Flächen entstanden sind. Alte Siegfried-Karten, die vor 100 Jahren erstellt wurden, beweisen, dass jene Flächen damals noch nicht bewaldet waren. Mithilfe dieser Daten sowie Daten über das Schadenspotential (Gebäude und Verkehrsinfrastruktur) konnten wir für ein Gebiet im Kanton Graubünden Risiken für die Schutzfunktion von Wäldern räumlich modellieren (Stritih et al. 2021b).

2.3 Zeitliche Entwicklung auf Störungsflächen

Im Rahmen der durch das WANAG-Projekt mitfinanzierten Dissertation von Natalie Brožová und der Masterarbeit von Marion Caduff wurden in den Jahren 2019–2021 Daten auf verschiedenen, früher bereits untersuchten Windwurf- und Borkenkäferflächen gesammelt und zusammen mit früheren Erhebungen analysiert. Wir fokussierten dabei auf nicht geräumte Windwurf­flächen (Brožová 2022) und belassene Borkenkäferbestände (Kupferschmid 2003, Caduff et al. 2022). Für Windwurf­flächen konnte so eine Zeitserie von Ereignissen aus den Jahren 1990 (Vivian), 2007 (Kyrrill) und 2018 (Vaia) erstellt werden.

Die Analysen zeigen, dass sich der Schutzwald bereits 30 Jahre nach dem Sturm meist recht gut erholt hatte. Die Baumkronen bedeckten dann im Durchschnitt 50 % der Flächen. Die Anzahl der vorhandenen Baumarten war grösser als vor dem Sturm, was darauf hinweist, dass der zukünftige Bestand vielfältiger (resilienter), klimaangepasster und damit längerfristig wahrscheinlich schutzwirksamer sein wird. Durch den allmählichen Abbau der Oberflächenrauigkeit von Totholz und Wurzeltellern und der gleichzeitig zunehmenden Wiederbewaldung ergab sich ein Minimum der Gesamt-Schutzwirkung nach etwa 15 Jahren. Danach erhöhte sich der Naturgefahrenschutz eher wieder.

Die Entwicklung nach einer Borkenkäferkalamität in unserem Untersuchungsgebiet «Gandberg» (Kt. Glarus) verlief nicht wesentlich anders als in den analysierten Windwurf­flächen (Abb. 2–3). Da die abgestorbenen Bäume nach Käferbefall meist noch einige Jahre stehen blieben, baute sich das Totholz aber vergleichsweise langsamer ab. Ausserdem wurden auf den Käferflächen weniger Bäume entwurzelt und

mehr Bäume gebrochen. Ähnlich wie bei der Wiederbewaldung nach Windwurf war auf den Käferflächen eine grössere Vielfalt an Baumarten und Waldstrukturen zu finden als vor dem Käferausbruch, wobei starker Wildverbiss den Verjüngungsprozess und damit auch die Baumartenvielfalt und die Anpassung an den Klimawandel deutlich verlangsamte.



Abb. 2: Borkenkäferbestand Gandberg (GL) im Jahr 1999: Links Übersichtsbild, rechts Bestandesaufnahme mit dem damaligen Forschungsleiter Walter Schönenberger) (Fotos: U. Wasem, WSL)



Abb. 3: Borkenkäferbestand Gandberg (GL) im Jahr 2020: Links Übersichtsbild, gleicher Ausschnitt wie Abb. 2 links (Foto M. Caduff), rechts Bestandesaufnahme mit Wiederbewaldung (Foto: P. Bebi)

2.4 Naturgefahrenprozesse auf Störungsflächen

Um mehr über den Einfluss von Störungsflächen auf Naturgefahren zu erfahren, wurden Naturgefahren-Katasterdaten mit Störungsdaten kombiniert und räumlich analysiert. Dabei zeigte sich, dass flachgründige Rutschungen und Hangmuren auf Störungsflächen eher auftreten als im ungestörten Schutzwald. Auf Windwurfflächen errechneten wir während den ersten drei bis 17 Jahren nach einem Windwurfereignis eine rund viermal grössere Disposition für flachgründige Rutschungen und Hangmuren als im übrigen Wald. Insgesamt ereigneten sich Rutschungen innerhalb des Waldes vor allem in steilem Gelände ($> 35^\circ$), wobei Nadelwald häufiger betroffen war als Laubwald. Ebenso waren Rutschungen in nach 1880 sekundär entstandenen Wäldern häufiger als in Flächen, die schon früher bewaldet waren. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass waldbauliche Eingriffe die Schutzwirkung langfristig dann verbessern, wenn sie entsprechend vorsichtig ausgeführt werden und darauf zielen, die Anpassungsfähigkeit des Waldes gegenüber natürlichen Störungen zu erhöhen (Bebi et al. 2019).

Für andere gravitative Naturgefahren waren die Zusammenhänge zwischen natürlichen Störungen und nachfolgenden Naturgefahrenereignissen weniger deutlich, was zumindest teilweise auf die relativ

geringe Anzahl von erfassten Naturgefahrenereignissen zurückzuführen war. Zumindest für Murgänge deuten die Resultate ebenfalls darauf hin, dass sie nach natürlichen Störungen eher auftraten (Bleiker 2020), was aufgrund der innert weniger Jahre nachlassenden Wirkung des Wurzelwerks ausgewachsener Bäume auch plausibel ist. Für Sturz- und Steinschlagprozesse sind die Zusammenhänge zwischen Störungsereignissen und nachfolgenden Naturgefahrenereignissen komplexer. Zumindest während den ersten Jahren nach einem Windwurf können geworfene Stämme und Wurzelteller Steine und teilweise auch grössere Blöcke aufhalten (vgl. Kapitel 3.2). Die insgesamt 43 aufgezeichneten Sturzereignisse im Bereich der Sturmflächen von Vivian und Lothar zeigen eine im Vergleich zu intakten Wäldern leicht erhöhte Dichte von Sturz- und Steinschlagereignissen. Beim Naturgefahrenprozess «Lawine» waren seit dem Jahr 1990 nur sechs Schaden-Lawinenereignisse auf ehemaligen Windwurfflächen (Vivian und Lothar) registriert, im Vergleich zu 344 registrierten Lawinen aus dem Waldgebiet. Diese wenigen Ereignisse bestätigen Modellergebnisse, gemäss denen die Oberflächenrauigkeit dank liegendem Holz und Wurzeltellern wahrscheinlich häufig höher ist als bisher angenommen (vgl. Kapitel 3).

2.5 Erfassung der Schutzwirkung mit Fernerkundung und Modellen

In Ergänzung zu den retrospektiven Untersuchungen über Naturgefahrenprozesse und der Entwicklung auf Störungsflächen haben wir evaluiert, wie die Schutzfunktion auf Störungsflächen mittels Fernerkundung und Simulationsmodellen besser erfasst werden kann. Dabei wurde die bisher vernachlässigte Wirkung der sich zeitlich stark verändernden Oberflächenrauigkeit besser quantifiziert.

Prozess Lawine

In ihrer Dissertation testete Natalie Brožová verschiedene Algorithmen zur Bestimmung von Waldparametern, die dann in Lawinensimulationen eingesetzt wurden (Brožová et al. 2019). LiDAR-basierte Vegetationshöhenmodelle zur Schätzung von Waldparametern (wie Baumhöhe oder Kronendeckungsgrad) erwiesen sich dabei als geeigneter Input. Es zeigte sich, dass insbesondere ein erhöhter Deckungsgrad des Waldes in Anrissgebieten und die dort vorhandene Oberflächenrauigkeit die Auslaufstrecke von Lawinen reduzieren. Um die Wirkung von Oberflächenrauigkeit in vertikalen Strukturen (Rinnen, Mulden) von anderen Rauigkeitselementen zu unterscheiden, entwickelten wir in der Folge einen Algorithmus, der auf den Resultaten von Brožová et al. (2021) aufbaute und zwischen vertikaler und horizontaler Rauigkeit besser differenzieren konnte.

Die Ergebnisse aus der Dissertation von Brožová wurden zusammen mit Beobachtungen von Lawinen in und ausserhalb des Waldgebietes dazu verwendet, Lawinenschutzwald mithilfe von modernen Fernerkundungsdaten und GIS grossflächig zu erfassen (Bebi et al. 2021). Dies war wiederum eine Grundlage für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten für den Prozess «Lawinen», wie sie in den letzten Jahren für den Kanton Graubünden und das Land Liechtenstein bereits erarbeitet wurden (Abb. 4. Bühler et al. 2022).

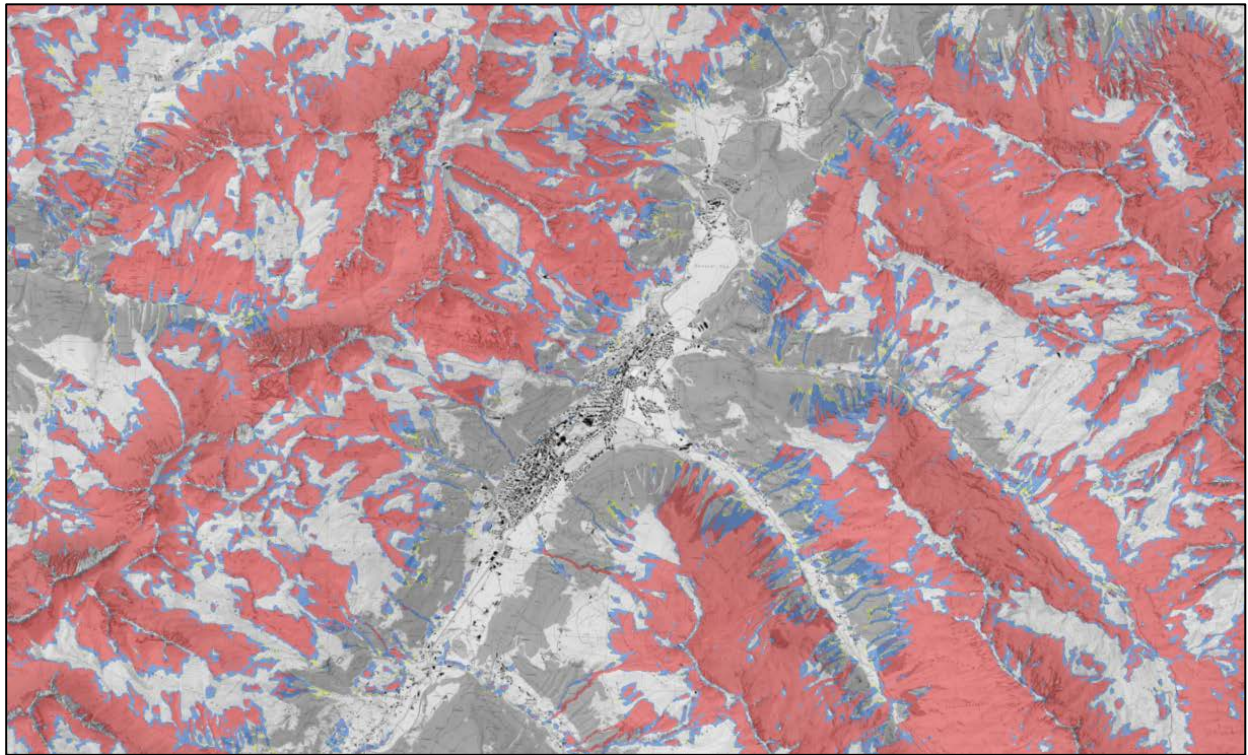


Abb. 4: Simulierte Lawindrücke in Davos für ein häufiges Lawinenszenario (entspricht Lawinenereignissen mit einer Wiederkehrperiode von 10–30 Jahren). Rot eingefärbt sind Lawindrücke > 30 kPa (entsprechend der roten Zone). Kartographie K. Helzel.

Der gleiche Algorithmus wurde auch genutzt, um die Entwicklung der Schutzfunktion nach der Borkenkäferkalamität am Gandberg (GL) zu rekonstruieren (Caduff et al. 2022). Direkt nach Käferbefall (1997) konnten nur wenige potenzielle Lawinanrissflächen identifiziert werden. Befallene Bäume standen dann oft noch oder waren erst wenig zersetzt und trugen so zur Verhinderung von Lawinen bei. Einige der simulierten Lawinen wurden innerhalb des Waldes gestoppt. Die grösste Anzahl von Anrissflächen wurde für das Jahr 2007 ermittelt, 14 Jahre nach Höhepunkt des Käferbefalls. Dann waren die meisten befallenen Bäume gebrochen, und in den Beständen waren an mehreren Orten neue Öffnungen entstanden. Im häufigen Szenario (30-jährliche Lawinensituationen) gab es viele Lawinen, aber keine davon erreichte den Talboden. Im Extremszenario (300-jährliche Lawinen) hingegen zeigten viele der simulierten Lawinen lange Auslaufstrecken und erreichten das Tal. Dank der fortschreitenden Wiederbewaldung nahm die Anzahl der potenziellen Anrissflächen bis ins Jahr 2014 im Vergleich zu 2007 ab. Der Effekt des sich erholenden Waldes kann gut im häufigen Szenario von 2019 beobachtet werden, wo noch weniger potenzielle Lawinanrissflächen identifiziert wurden als 2014. Dies führte zu weniger simulierten Lawinen und kürzeren Auslaufstrecken. Ein Minimum an Schutzkapazität wurde etwa 10 bis 15 Jahre nach der Störung beobachtet, als die Schutzwirkung toter Bäume am Boden oder der Wurzelteller am geringsten und die Verjüngung noch nicht ausreichend entwickelt war.

Prozess Steinschlag

Adrian Ringenbach untersuchte im Rahmen seiner Dissertation mittels Steinschlag-Experimenten im Wald, Fernerkundungsdaten und Simulationsmodellen, wie sich verschiedene Waldtypen und insbesondere liegendes Totholz auf die Steinschlaggefährdung auswirken (Ringenbach 2022).

Die Steinschlag-Experimente zeigten, dass liegendes Totholz eine bisher oft stark unterschätzte abbremsende Wirkung haben kann. In einem Experiment in Surava (GR) wurden instrumentierte, 45 kg schwere Steine in drei verschiedenen Stadien eines steilen Fichten-Lärchen-Versuchswalds losgelassen: (a) Vor einem Verjüngungs- und Holzschlag, (b) direkt nach dem waldbaulichen Eingriff, aber noch vor der Räumung

des liegenden Holzes, und (c) nach der Räumung des liegenden Holzes. Dabei resultierte im Waldstadium b (mit liegenden Stämmen) die mit Abstand beste Schutzwirkung (Ringebach et al, 2022a).

Die Bedeutung von liegendem Holz und umgekippten Wurzeltellern wurde im Versuchswald in Schiers (GR) noch eindrücklicher quantifiziert, wo zum Teil auch grössere Blöcke zum Stoppen kamen (Ringebach, 2022). In diesem Buchen-Fichtenwald mit Windwurf war es möglich, Experimente mit grösseren Blockmassen (bis 3.2 t) und unterschiedlichen Blockformen durchzuführen. Insbesondere bei würfelförmigen 800-kg-Blöcken war das Resultat deutlich: Während mit Totholz nur 40 % der Steine den Hangfuss erreichten, waren es ohne Totholz etwa 90 %.

Die beobachteten Flugbahnen und Ablagerungspunkte aus den Steinschlag-Experimenten wurden anschliessend verwendet, um die Steinschlagsimulation im Wald zu eichen. Somit sind zukünftig realistische Steinschlagintensitäts- und Risikoabschätzungen unterhalb von bewaldeten, steinschlaggefährdeten Hängen bis hin zu gesamten Talschaften möglich. Um dabei auch natürliche Störungen und deren Einfluss auf den Steinschlag grossflächig simulieren zu können, wurde ein virtueller Totholzgenerator programmiert und basierend auf Drohnen-Luftbildern validiert (Ringebach et al., 2022b, Abb. 5). 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 (Ammann, 2006). Bei einem Drittel des Bestandes wurde zudem eine Braunfäule angenommen, was die Energieabsorption um 90 % reduziert. Basierend auf den experimentellen Resultaten erstaunt es nicht, dass frisches Totholz in allen betrachtenden Evaluationskriterien den besten Schutzeffekt für die simulierten 400 kg schweren Blöcke bietet. Hingegen überraschte, dass gemäss den Modellen selbst 10-jähriges, bereits 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 oder aufgrund grösserer Steinmassen höhere Energien zu erwarten sind, wirken stehende Bäume im Verhältnis besser. In einem Szenario ohne Bäume kamen unterhalb des Untersuchungsgebiet viermal so viele Steine an im Vergleich mit einem Totholzscenario nach dem Windwurf.

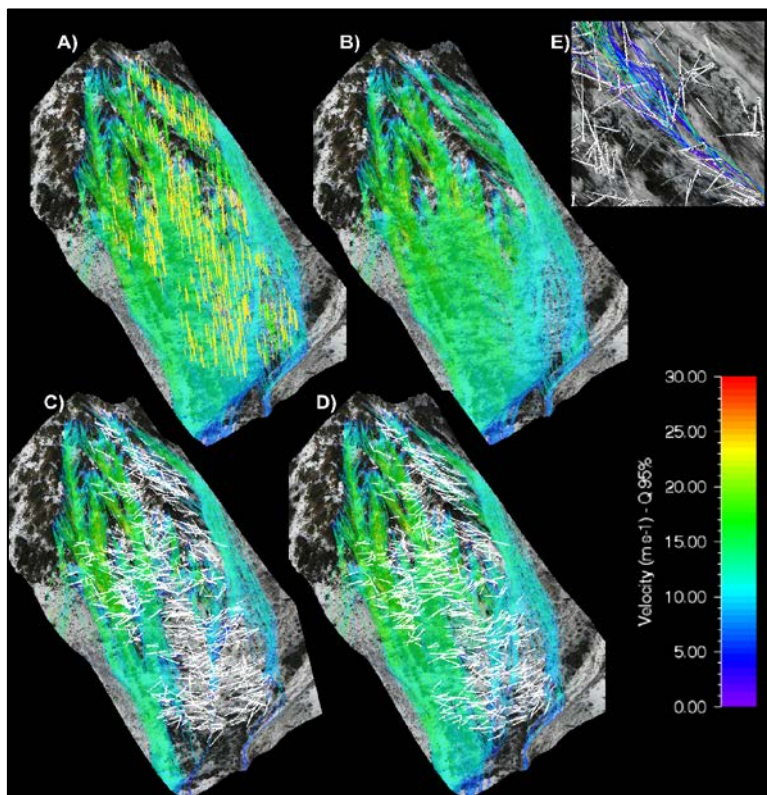


Abb. 5: Simulierte Geschwindigkeit von Steinschlagtrajektorien durch eine Windwurffläche im Klöntal (GL) in vier verschiedenen Zuständen: A) Ursprünglicher Wald vor dem Windwurf, B) geräumte Windwurffläche ohne Totholz, C) Windwurffläche mit frischem Totholz, D) Windwurffläche nach 10 Jahre mit teilweise zersetztem Totholz, E) Detailausschnitt von ausgewählten, dreidimensional dargestellten Steinschlagtrajektorien die mit liegendem Totholz und Wurzeltellern interagieren. (abgeändert nach Ringebach et al. 2022b.)

Fazit zu Kapitel 2: Natürliche Störungen im Wald und Bedeutung für Gebäuderisiken

- Schutzwälder werden in Zukunft häufiger von natürlichen Störungen wie Windwurf, Käferbefall oder Waldbrand betroffen sein, wobei ihre Anfälligkeit je nach Topografie, Waldtyp, Waldstruktur und Bewirtschaftungsgeschichte stark variiert. Dies sollte in Risikobetrachtungen einbezogen werden.
- Von Windwurf und Borkenkäfer befallene Wälder haben auch längerfristig eine bessere Schutzwirkung gegenüber Steinschlag und Lawinen als bisher angenommen. Die Wirkung muss aber je nach Situation (Naturgefahrenprozess, Topografie, Waldtyp, Schadenpotential) und im zeitlichen Verlauf differenziert beurteilt werden.
- Räumliche Modelle, welche die unterschiedliche Disposition für natürliche Störungen und Rest-Schutzwirkung nach einem Ereignis berücksichtigen, können helfen, Naturgefahrenrisiken für Gebäude in Zukunft besser zu quantifizieren.

3. Risikoberechnung mit EconoMe und GIS

3.1. Konzept und Methodische Grundlagen

Die nachfolgenden Risikoberechnungen basieren auf den methodischen Konzepten der Pilotstudie FORISK (Helzel et al., 2022) und waren Teil des Forschungsprogramms CCAMM. Diese hatte zum Ziel, die bestehenden Gefahrenhinweiskarten im Zusammenhang mit Lawinen (Bühler et al., 2022) zu Risikohinweiskarten für die Schutzgüter Gebäude, Strasse und Schiene weiterzuentwickeln. In der Studie wurde die Berechnungsmethodik «EconoMe» (Bründl und Zaugg, 2019) zur Risikoabschätzung verwendet, und es wurden anwenderfreundliche Abfrage- und Visualisierungsfunktionen für Risiken entwickelt. Die Pilotstudie wurde in engem Austausch mit dem Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden (AWN) durchgeführt.

Das entwickelte Resultat ist ein GIS-basiertes Jupyter-Notebook (Project Jupyter, 2023), das alle benötigten Informationen für die Risikoberechnungen einlesen, verarbeiten und gebündelt an die «EconoMe»-API-Schnittstelle schicken kann. Anschliessend werden die berechneten Risikokennzahlen wieder in räumlicher Form als Layer im GIS ausgegeben und können visualisiert werden.

Für eine hochwertige Risikoanalyse einzelner Gebäude müssen verschiedene Datenquellen einerseits hinsichtlich der Gefahrensituation und andererseits in der Form von sensiblen Objektinformationen zusammengetragen und miteinander verknüpft werden. Folgende Daten wurden für das WANAG-Projekt aufbereitet und verwendet:

- Gebäudeumrisse (Swisstopo, 2022)
- Informationen der Gebäudeversicherung Graubünden zu Einzelobjekten (GVG, 2023) wie z.B.
 - Versicherungswert in CHF
 - Gebäudetyp (Wohnhaus, Stall etc.)
- Daten über die Wohn- und Arbeitsbevölkerung (BfS, 2020)
- Steinschlag-Simulationen für Schmitzen (RAMMS::ROCKFALL)
- Lawinen-Simulationen für Schatzalp (RAMMS::AVALANCHE)

Ein Gebäude wird in dieser Pilotstudie durch seinen Grundriss repräsentiert. Im Falle eines nicht vorhandenen Grundrisses und bei gleichzeitigem Vorliegen einer räumlichen Objektinformation der Gebäudeversicherung wird um den Informationspunkt ein Kreispuffer mit 5m-Radius herumgelegt. Die RAMMS-Simulationen für 30-, 100- und 300-jährliche Szenarien werden mit den Gebäudeumrissen und Kreispuffern verschnitten. Die simulierten Intensitäten werden gemäss EconoMe in drei Intensitätsklassen (schwach, mittel, stark – Grenzwerte und Einheit je nach Prozessart) eingeteilt. Da, wo ein Gebäude von verschiedenen Intensitätsklassen betroffen ist, fliesst immer die höchste verzeichnete Intensitätsklasse in die Risikoberechnung ein (Annahme Maximalschaden). Weiterhin werden verschiedene Präsenzwahrscheinlichkeiten für die Wohn- und Arbeitsbevölkerung angenommen. Pro Szenario und Gebäude wird

jeweils das kollektive Personenrisiko, das Sachrisiko, das Gesamtrisiko und das individuelle Todesfallrisiko berechnet. Darüber hinaus werden aufsummierte Werte (z.B. das komplementär-kumulative Gesamtrisiko und das individuelle Todesfallrisiko) über alle Szenarien ausgegeben. Aus Datenschutzgründen werden die für das WANAG-Projekt berechneten Gebäuderisiken in den nächsten beiden Kapiteln mithilfe von aggregierenden Visualisierungen zusammengefasst und verschleiert, um keinen Rückschluss auf ein einzelnes Gebäude zu ermöglichen.

3.2 Beispiel Schatzalp für den Prozess Lawine

Im Gebiet unterhalb der Schatzalp (Davos) wurden die möglichen Auswirkungen von Windwurfflächen und das neu entstehende Lawinenrisiko für Gebäude untersucht. Auf den Sturmflächen von Vivian (Abb. 6, weiss schraffiert) wurden nach einer Untersuchung von Topografie und Hangneigung potenzielle Anrissgebiete (Abb. 6, hellgrün umrandet) definiert und mit der Software RAMMS die daraus resultierenden Lawinen für eine Wiederkehrperiode von 30 und 300 Jahren simuliert. Bei den 30-jährlichen Lawinen war die Anrissmächtigkeit in der Simulation zu gering, um ins Tal zu gelangen und dementsprechend war hier kein Gebäude betroffen. Für 300-jährliche Lawinen (Abb. 6, blaue Umrisse), die sich aus den Windwurfflächen lösen, wurde hingegen ein Gesamtrisiko von 142'500 CHF pro Jahr berechnet. Dabei liegt das individuelle Todesfallrisiko in 8 Gebäuden über dem von Naturgefahrenfachleuten anerkannten Grenzwert von 10^{-5} (PLANAT 2015). Somit ergibt sich für die besagten Objekte durch die Windwurffläche ein entsprechendes Schutzdefizit. Bei der Berechnung des Risikos wurden keine kaskadierenden Effekte in Kombination mit Lawinenausläufen von oberhalb der Windwurfflächen berücksichtigt.

Abbildung 6 zeigt in der linken Hälfte die Verteilung des kollektiven Personenrisikos und auf der rechten Seite die Verteilung des Sachrisikos bei 300-jährlichen Lawinen, welche in den Windwurfflächen ihren Ursprung haben. In der gewählten Darstellung zeigen sich unterschiedliche Muster hinsichtlich der räumlichen Struktur der jeweiligen Risiken. Bei dieser sogenannten «Heatmap» Visualisierung werden in der Regel Punktinformationen als repräsentative Oberfläche ihrer Dichte dargestellt (Słomska-Przech et al. 2021). Bei den «Heatmaps» in Abb. 6 wurden alle Einzelobjekte (= Gebäudegrundrisse) in Punkte umgewandelt und zusätzlich mit den verknüpften Personen- bzw. Sachrisiken gewichtet. Durch diese Gewichtung fließt ein Gebäude umso mehr in die «Heatmap» mit ein, je höher dessen Risiko ist.

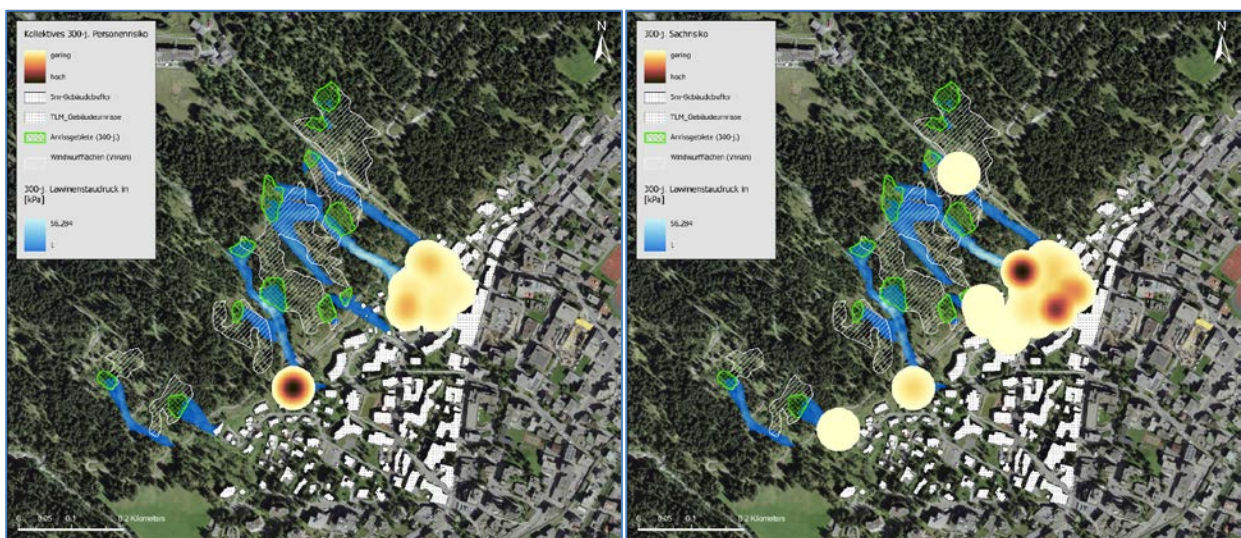


Abb. 6: «Heatmaps» (gelb-braun) des berechneten kollektiven Personenrisikos (links) und des Sachrisikos (rechts), resultierend aus den simulierten Lawinendrücken (blau), die sich aus den potenziellen Lawinanrissgebieten (grün) innerhalb der kartierten Windwurfflächen (weiss schraffiert) im Gebiet unterhalb der Schatzalp lösen (Grundkarte: Swissimage, swisstopo 2023, Kartografie K. Helzel)

3.3 Beispiel Schmitten für den Prozess Steinschlag

Für die Steinschlagsimulationen wurden die Ausbruchgebiete basierend auf einer Hangneigungsanalyse durchgeführt (Ringebach et al., 2022c) und die verwendeten Ausbruchsvolumina vom Bericht «Gefahrenkarte Sturzprozesse» (Krummenacher et al., 2009) übernommen. Diese sind für das 30-jährliche Ereignis (0.1 m^3 , 270 kg), für das 100-jährliche Ereignis (0.5 m^3 , 1425 kg) und für das 300-jährliche Ereignis (bis zu 12.0 m^3 , 32'400 kg), wobei hier räumlich nach geologischen Gegebenheiten unterschieden wurde und an gewissen Stellen auch von 0.5 m^3 (1'425 kg) und 2.5 m^3 (14300 kg) ausgegangen wird. Die bestehenden Steinschlagnetze wurden nicht in die Simulationen miteinbezogen. Dafür definierten wir **drei unterschiedliche Waldzustände**: **a)** Ist-Zustand des aktuellen Waldes, welcher durch Einzelbäume (x/y-Koordinaten, Baumhöhe und Baumdurchmesser repräsentiert wird. Diese Derivate basieren auf Airborne LiDAR-Daten (SwissSURFACE-3D, Swisstopo (2021)) sowie auf statistischen Zusammenhängen zwischen Baumhöhen und Baumdurchmesser (Bast et al., in Vorbereitung); **b)** Windwurf, bei dem 70% aller Bäume gelegt werden und infolgedessen als frisches Totholz im Wald liegt; **c)** Windwurfszenario mit ebenfalls 70% Totholz, welches jedoch ca. 10 Jahre alt und deshalb teilweise vermodert ist. Die 30-, 100- und 300-jährlichen Steinschlag-Szenarien wurden jeweils mit allen drei Waldzuständen simuliert. Die berechnete kinetische Steinenergie [kJ] floss in die Risikoberechnung als eine von drei möglichen Prozessintensitäten (schwach < 30 kJ, mittel 30 kJ – 300 kJ, stark > 300 kJ) ein.

Das errechnete komplementär-kumulative Gesamtrisiko (mit aktuellem Wald im Ist-Zustand) betrug CHF 9'500 CHF pro Jahr. Eine Erklärung für das allgemein eher tiefe Gesamtrisiko ist die kleine räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit, welche in EconoMe standardmässig für den Prozess Steinschlag hinterlegt ist (z.B. 1% beim 30-jährlichen Szenario). Für die Simulation mit frischem Totholz reduziert sich das Gesamtrisiko um ca. 5 % auf CHF 9'000 pro Jahr (Abb. 7). Das Gesamtrisiko steigt beim Wald mit altem Totholz erwartungsgemäss wieder etwas an, sodass die Risikoabnahme nur noch 2,5% im Vergleich zum Ist-Zustand beträgt. Die Reduktion des Risikos durch Totholz ist in diesem Beispiel also relativ gering. Dies lässt sich mit den verwendeten grossen Blockmassen und bloss drei Intensitätsklassen begründen: Obwohl die stürzenden Steine durch das Totholz gebremst werden (geringere kinetische Energie), reicht die Reduktion in vielen Fällen nicht für ein Wechsel der Intensitätsklasse aus. Somit sind viele Gebäude auch mit Totholz nominell gleich stark betroffen wie ohne. Das individuelle Todesfallrisiko pro Jahr (Abb. 8) wurde mit Totholz im Vergleich zum aktuellen Waldzustand nur wenig reduziert.

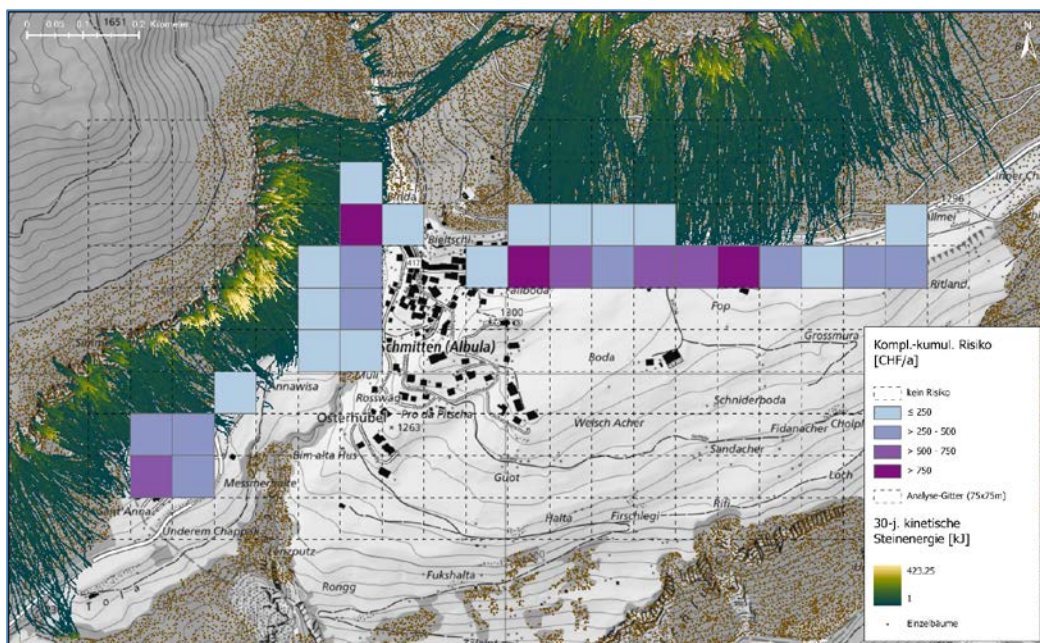


Abb. 7: Das gerasterte Steinschlag-Risiko bei Schmitten in [CHF/a] für den frisch gestörten Waldzustand mit Totholz, kurz nach einem Windwurfereignis. Entsprechend simulierte Steinschlagintensitäten für das erwartete 30-jährliche Ausbruchsvolumen ($0,1 \text{ m}^3$) und die detektierten Einzelbäume sind hinterlegt. (Grundkarte: Landeskarte, swisstopo 2023). Kartografie K. Helzel

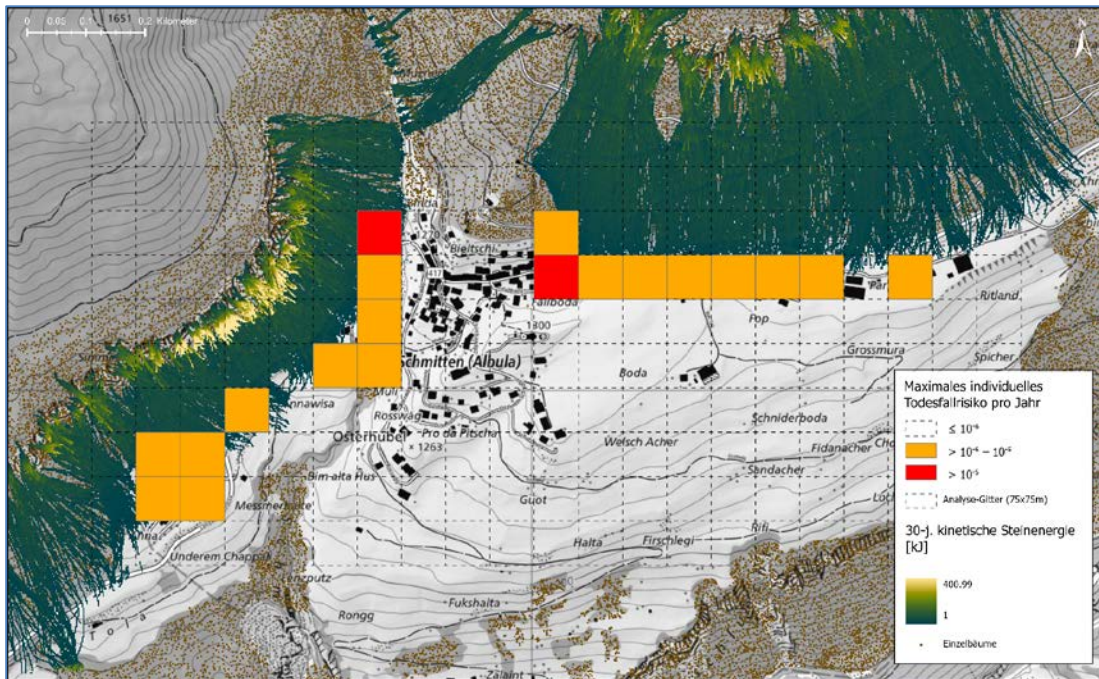


Abb. 8: Gerastertes maximales individuelles Todesfallrisiko bei Schmitten pro Jahr mit Wald im Ist-Zustand (Grundkarte: Graue Landeskarte, swisstopo 2023), Kartografie K. Helzel

Fazit zu Kapitel 3: Risikoberechnung mit EconoMe und GIS

- Natürliche Störungen können im Vergleich zum aktuellen Waldzustand die Risiken für Gebäude stark beeinflussen.
- Mithilfe des in der FORISK-Pilotstudie entwickelten Jupyter-Notebooks und des Risikoberechnungstools EconoMe lassen sich Gefahrenhinweiskarten zu Risikohinweiskarten für unterschiedliche Waldzustände weiterentwickeln. Risikohinweiskarten bieten eine Entscheidungshilfe für Schutzmassnahmen.
- Risikohinweiskarten eignen sich gut zur Identifikation und Darstellung von «Hotspots». Bei der Interpretation sind absolute Werte jedoch immer mit Vorsicht zu betrachten, da sie sehr stark von Annahmen der gewählten Methodik abhängen.

4. Interaktive Karten mit Anwendungspotential für Gebäudeversicherungen

4.1 Maps.wsl.ch als Plattform für den Wissenstransfer

Eines der wichtigsten Ziele des WANAG-Projektes war es, räumliche Daten im Zusammenhang mit Naturgefahren und Umweltveränderung mittels interaktiver Web-Kartographie sichtbar zu machen und praxisnah für verschiedene Anwender aufzubereiten. In Zusammenarbeit mit anderen Projekten wurde die Plattform «maps.wsl.ch» aufgebaut, welche im November 2021 gestartet wurde. Zurzeit verfügt maps.wsl.ch über vier Applikationen in der Entwicklungs- und Testphase (Abb. 9): (i) Schutzwald und flachgründige Rutschungen, (ii) Schutzwald und Lawinen, (iii) Permafrost und (iv) WSL-Drohnen Logbuch. Im Großteil der Karten liegt der Fokus auf den Themen Schutzwald und Naturgefahren. Für WANAG wurde die Applikation Schutzwald und Lawinen entwickelt.

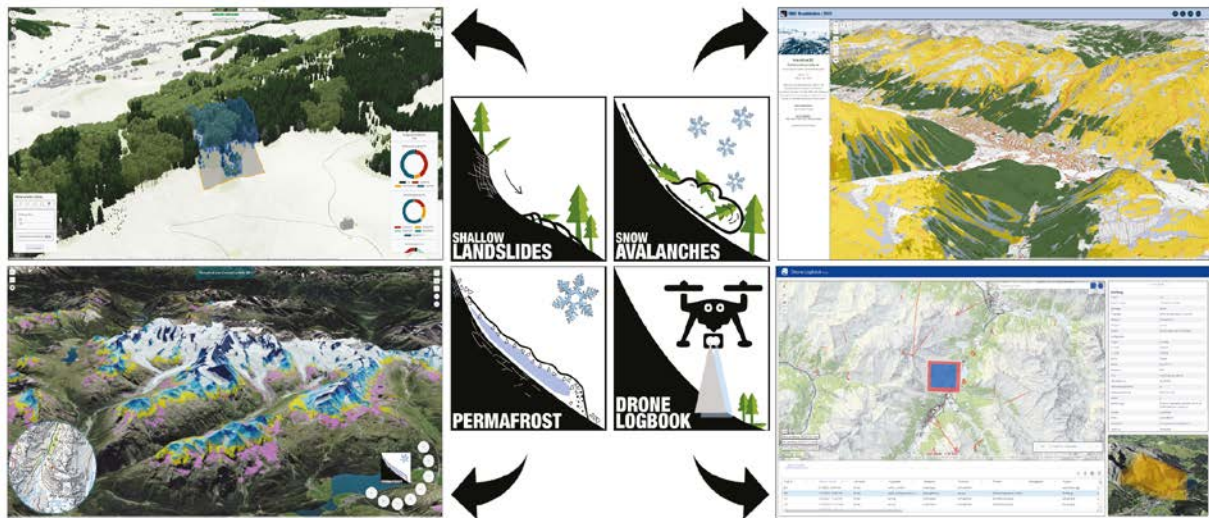


Abb. 9: Vier Web-Applikationen mit dem Fokus auf interaktiven Karten in der Entwicklungs- und Testphase auf maps.wsl.ch. Aus rechtlichen können noch nicht alle Inhalte zur Verfügung gestellt werden (Grafik A. Bast)

Im Rahmen der WSL Forschungsprogramme CCAMM und EXTREMES werden aktuell Veränderungen des Schutzwaldes im Kontext des Klimawandels erforscht. Waldlandschaftsmodelle werden mit RAMMS-Simulationen und dem Risikowerkzeug EconoMe gekoppelt, um Wald- und Naturgefahrenmanagement in der Planung und Umsetzung via maps.wsl.ch und neuen Applikationen zu unterstützen.

4.2. Weiterentwicklung der interaktiven Karten

Eine wichtige Komponente des WANAG-Projektes war von Anfang an, die Brückenfunktion zu anderen Projekten. Diese Brückenfunktion ergab sich nur schon daraus, dass es im WSL-Forschungsprogramm CCAMM (Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements; ccomm.slf.ch) integriert war, welches wiederum starke Links zu anderen Projekten und Programmen hat. Für die zukünftige Weiterentwicklung von Risikohinweiskarten für Gebäude (Kap. 3) sind ein starker Bezug zur täglichen Praxis der Gebäudeversicherungen und deren Prioritäten erforderlich. Das in der Pilotstudie «Von Gefahren- zu Risikohinweiskarten (FORISK)» entwickelte interaktive Python-Notebook mit der Verknüpfung zu EconoMe und deren zugrunde liegende Methodik bilden ein Grundgerüst für weiterführende Arbeiten. Die interaktive Web-Applikation zur flexiblen Berechnung von Gebäuderisiken unter verschiedenen Klima- und Störungsszenarien könnte ein sehr nützliches Produkt für die Gebäudeversicherungen darstellen und den Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis aktiv fördern.

Das WSL-Forschungsprogramm CCAMM, zielt darauf hin, (i) Auswirkungen des Klimawandels auf alpine Massenbewegungen dank Verbunds-Projekten zu untersuchen, (ii) die daraus resultierenden Risiken besser abzuschätzen und (iii) Anpassungsstrategien für die Gesellschaft zu entwickeln. Die erste CCAMM-Phase stützte auf mehreren Dissertationen zu den Themen (1) Gefahrendisposition, (2) Dynamik von Naturgefahren und (3) Risiko. Dazu gehörten auch die in diesem Bericht bereits zusammengefassten eth-Dissertation von Natalie Brožová (Februar 2022) und Adrian Ringenbach (August 2022). Basierend auf dieser ersten Phase von CCAMM wurde eine zweite Phase gestartet, welche auf die Synthese und Umsetzung hinzielt. Dabei wurde das WANAG-Nachfolgeprojekt «FORISK» gestartet, durch welches die interaktiven Karten folgendermassen weitentwickelt werden: (1) Ausweitung von Gefahrenhinweiskarten Steinschlag gemäss Kap. 3.2 für grössere Regionen und Kombination mit den Gefahrenhinweiskarten Lawinen; (2) Modellierung von realistischen Waldszenarien bis zum Jahr 2080 unter dem Einfluss des Klimawandels mit Hilfe einer Weiterentwicklung des an der ETH entwickelten Programmes LandClim (Petter et al. 2021) und Evaluation der Resultate in der Landschaft Davos; (3) Kombination dieser Waldszenarien mit den Gefahrenhinweiskarten Lawinen und Steinschlag; (4) Weiterentwicklung der Gefahrenhinweiskarten in Risikohinweiskarten (gemäss Kap. 3) und (5) Weitere Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit zusammen mit Umsetzungspartnern. Die Anstrengungen innerhalb des Projektes WANAG werden somit innerhalb

dieser zweiten Phase des CCAMM Forschungsprogramms bis zu deren Abschluss im Jahr 2024 weiter in Wert gesetzt.

Fazit zu Kapitel 4: Interaktive Karten mit Anwendungspotenzial für Gebäudeversicherungen

- Innerhalb des Forschungsprogramms CCAMM werden zurzeit die hier dargestellten interaktiven Karten weiterentwickelt. Für Anwendungen von Gebäudeversicherungen erscheint insbesondere die Verknüpfung von Gefahren- und Risikohinweiskarten innerhalb einer interaktiven Web-Applikation vielversprechend. Zudem wäre es in einem nächsten Entwicklungsschritt wertvoll, Risikokarten für grössere Gebiete und für verschiedene Naturgefahrenprozesse (Steinschlag, Lawinen, Rutschungen) zu erstellen.
- Es gibt dabei noch offene Detail-Fragen, die im Dialog bzw. allenfalls in einem Workshop zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer angegangen werden müssten.

5. „Lessons learnt“: Folgerungen für KGV, Grundeigentümer oder Gemeinden

1. Da sich der Klimawandel allgemein sehr stark auf den Wald und dessen Schutzfunktion auswirkt, wird es in Zukunft noch wichtiger, den Wald als dynamisches System zu betrachten. **Werden beispielsweise Bauvorhaben unterhalb eines Schutzwaldes geplant oder Naturgefahrenrisiken auf bestehende Gebäude beurteilt, sollte berücksichtigt werden, dass sich die Wachstumsbedingungen für den Schutzwald in den nächsten 50 bis 100 Jahren deutlich verändern können, und verschiedene Baumarten an die Grenzen ihrer Anpassungsfähigkeit kommen werden.**
2. **Natürliche Störungen wie Käferbefall, Windwurf und Waldbrand verdienen besondere Beachtung, da solche Extremereignisse die Struktur und Funktion eines Waldes rasch und drastisch verändern. Unsere Resultate bestätigen, dass sich dadurch auch Naturgefahrenrisiken für Gebäude unterhalb eines betroffenen Waldgebietes stark ändern, diese Änderungen aber je nach Situation sehr unterschiedlich zu bewerten und nicht immer negativ sind.** Besonders bemerkenswert ist, dass liegendes Holz nach Windwurf- und Käferbefall in den ersten Jahren das Risiko gegenüber Steinschlag und Sturzprozessen unter Umständen sogar eher reduziert. Nebst dem Waldtyp und der zu erwarteten Restschutzwirkung nach einer natürlichen Störung müssen dabei insbesondere auch die topografische Situation, die vorherrschende Naturgefahr, die Art des zu schützenden Gebäudes und die Nähe eines Gebäudes relativ zu einer neuen Störungsfläche beachtet werden.
3. **Wie sich ein verändernder Wald auf darunterliegende Gebäude auswirkt, lässt sich mittels dynamischen Gefahren- und Risikohinweiskarten quantifizieren und darstellen.** Unsere Entwicklungsarbeiten haben gezeigt, dass **interaktive Gefahrenkarten und Risikokarten vor allem dann ein grosses Anwendungspotenzial haben, wenn der Einfluss von potenziellen Störungen und anderen Waldveränderungen schon zum Voraus abgeschätzt werden kann** (im Sinn: Was wäre, wenn? Welche Ereignisse hätten eine relevante Risikoerhöhung zur Folge?). Ausserdem wäre es sehr wertvoll, **wenn interaktive Risikokarten über grössere regionale Skalen und unter Einbezug von verschiedene Naturgefahrenprozessen** (Sturz/Steinschlag, Lawinen, Rutschungen, Murgang, Hochwasser) erstellt werden. Die **Erfahrungen der WANAG-Fallstudien** in Davos und Schmitten **zeigen, dass sich dies in den nächsten Jahren realisieren liesse, dafür aber noch methodische Detailfragen geklärt werden müssen** (z. B. im Vergleich der Bewertung von Steinschlagrisiken mit Risiken von anderen Naturgefahren).
4. Eine **interaktive Web-Applikation zur flexiblen Berechnung von Gebäuderisiken unter verschiedenen Klima- und Störungsszenarien kann ein sehr nützliches Produkt für die Gebäudeversicherungen** sein und den Wissenstransfer von der Forschung in die Praxis aktiv fördern. **Wichtig ist, dass ein solches Produkt in engem Austausch zwischen Forschung, Entwicklung und praktischer Anwendung entsteht.**

Dank:

Wir bedanken uns herzlich bei allen, die zum Zustandekommen dieses Berichts beigetragen haben. In erster Linie bedanken wir uns bei der Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherung (KGV) für die Finanzierung des WANAG-Projektes und die konstruktive Projektbegleitung. Insbesondere die wertvollen Hinweise von Martin Jordi und Markus Feltscher haben sehr geholfen, die Qualität des Berichtes zu verbessern und den Inhalt zu fokussieren. Weitere, sehr wertvolle Anregungen zum Projekt kamen durch Mitglieder der WANAG-Begleitgruppe, insbesondere durch Josef Eberli (BAFU) und Roderick Kühne (AWN GR). Die Co-Finanzierung der im WANAG-Projekt geleisteten Forschungsarbeiten wurden durch das WSL-Forschungsprogramm CCAMM - *Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements* geleistet. Wir möchten deshalb der CCAMM-Programmleitung (Michael Bründl und Alexander Bast) danken sowie die in der Betreuung der beiden Doktorierenden (Natalie Brožová und Adrian Ringenbach) involvierten Personen Andreas Rigling, Andrin Caviezel, Andrea Kupferschmid, Harald Bugmann und Perry Bartelt. Eine Teilfinanzierung der Dissertation von Natalie Brožová erfolgte zudem durch das WSL-Programm SwissForestLab. Die Dissertation von A. Ringenbach wurde durch das Projekt DIVES des Schweizerischen Nationalfonds mitfinanziert (Projektleiter Roland Olschewski, WSL). Die Fallbeispiele in Kapitel 3 und die entsprechenden Risikoberechnungen bauten sehr stark auf dem Projekt FORISK auf, welches ebenfalls durch das WSL-Programm CCAMM sowie durch das Amt für Wald und Naturgefahren (AWN) des Kanton Graubünden finanziert wurde. Für die Zurverfügungstellung von Objektdaten und wertvollen methodischen Hinweisen im Zusammenhang mit den Fallbeispielen bedanken wir uns bei Reto Stockmann (Gebäudeversicherung Graubünden). Die hier dargestellten Entwicklungen der Interaktiven Karten maps.wsl.ch wurden in erster Linie durch Alexander Bast, Kevin Helzel und Frank Graf initiiert und umgesetzt. Für die sprachliche Überarbeitung des Berichts bedanken wir uns sehr bei Christine Huovinen (dinatum).

Zitierte Literatur:

- Ammann, M. (2006). Schutzwirkung abgestorbener Bäume gegen Naturgefahren. Birmensdorf, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. 228 S.
- AWN (Kantonales Amt für Wald und Naturgefahren des Kanton Graubündens), (2019). LeiNa – Waldmanagement und Kontroll-Instrument.
- Bast, A., Bührle L. Graf, F. (in prep): Forest Structure Mas for Mountain Forests of different altitudinal zones derived from Nation-wide LiDAR-Data.
- BAFU (2020). Bundesamt für Umwelt. Erfassungshandbuch StorMe 3.0 - Leitfaden zur Erfassung von Naturereignissen, Bern.
- Bebi, P., Putallaz, J.-M., Fankhauser, M., Schmid, U., Schwitter, R. and Gerber, W. 2015. Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 166 (3), 168-176. 10.3188/szf.2015.0168.
- Bebi, P., Bugmann, H., Lüscher, P., Lange, B., & Brang, P. (2016). Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In A. R. Pluess, S. Augustin, P. Brang, Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf (Eds.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien (pp. 269-285). Haupt.
- Bebi, P., Bast, A., Ginzler, C., Rickli, C., Schöngrundner, K., & Graf, F. (2019). Waldentwicklung und flachgründige Rutschungen: eine grossflächige GIS-Analyse. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 170(6), 318-325. <https://doi.org/10.3188/szf.2019.0318>
- Bebi, P., Bast, A., Helzel, K., Schmucki, G., Brozova, N., and Bühler, Y. (2021). Avalanche Protection Forest: From Process Knowledge to Interactive Maps, in: Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction, 2021.
- BfS, Bundesamt für Statistik (2020): Daten zur Wohn- und Arbeitsbevölkerung in Davos und Schmiten (Format: Excel-Tabellen mit Koordinaten).
- Bleiker J. (2020). Analyse der Lawinen-, Felssturz- und Murgangereignisse in der StorME-Datenbank. Interner Bericht SLF Davos. 54 S
- Brožová, N. (2022). Avalanche protection capacity and disturbance dynamics of mountain forests. DISS. ETH NO. 28207 PhD-thesis ETH Zürich. 144 pp.
- Brožová, N., Fischer, J. T., Bühler, Y., Bartelt, P., & Bebi, P. (2020). Determining forest parameters for avalanche simulation using remote sensing data. Cold Regions Science and Technology, 172, 102976 (11 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2019.102976>
- Brožová, N., Baggio, T., D'agostino, V., Bühler, Y., & Bebi, P. (2021). Multiscale analysis of surface roughness for the improvement of natural hazard modelling. Natural Hazards and Earth System Science, 21(11), 3539-3562. <https://doi.org/10.5194/nhess-21-3539-2021>.
- Bründl, M., & Zaugg, L. (2019). Risk management of gravitational driven processes in Switzerland. In: International Symposium on Mitigation Measures against Snow Avalanches and other Rapid Gravity Mass Flows.–Reykjavík (pp. 3-11).
- Bühler, Y., Bebi, P., Christen, M., Margreth, S., Stoffel, L., Stoffel, A., ... Bartelt, P. (2022). Automated avalanche hazard indication mapping on a statewide scale. Natural Hazards and Earth System Sciences, 22(6), 1825-1843. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-1825-2022>
- 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. Forest Ecology and Management, 514, 120201 (13 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120201>
- GVG, Gebäudeversicherung Graubünden (2023): Objektdaten für Einzelgebäude in Davos und Schmiten (Format: Excel-Tabelle mit Koordinaten).
- Hess, J.; Schwitter, R.; Denzler, L. (2014): Newsletter Schutzwald Schweiz Nr. 8. www.schutzwald-schweiz.ch.
- Helzel, K., Bründl, M., Bast, A., Graf, F., Zaugg, L. (2022). FORISK - Von Gefahren- zu Risikohinweiskarten: Pilotstudie Davos. Projektbericht 36 S.

- Huber, M., Brang, P., & Sandri, A. (2015). Schutz vor Naturgefahren. In A. Rigling & H. P. Schaffer (Eds.), *Waldbericht 2015. Zustand und Nutzung des Schweizer Waldes* (pp. 94-97). Bundesamt für Umwelt BAFU; Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL.
- Kenner, R.; Noetzi, J.; Hoelzle, M.; Raetzo, H.; Phillips, M., (2019). Distinguishing ice-rich and ice-poor permafrost to map ground temperatures and ground ice occurrence in the Swiss Alps. *Cryosphere*, 13, 7: 1925-1941. doi: 10.5194/tc-13-1925-2019
- Kupferschmid, A. D. (2003). Zerfall und Verjüngung eines Schutzwaldes nach dem Absterben der Fichten durch Buchdruckerbefall. *GAIA: Ecological Perspectives for Science and Society*, 12(4), 271-274. <https://doi.org/10.14512/gaia.12.4.11>
- PLANAT (2015). Sicherheitsniveau für Naturgefahren - Materialien. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 68 S.
- PERMOS (2015). Swiss Permafrost Monitoring Network. URL: <http://permos.ch> (aufgerufen am 10.03.2022).
- Petter, G., Mairota, P., Albrich, K., Bebi, P., Brūna, J., Bugmann, H., Haffenden, A., Scheller, R.M., Schmatz, D.R., Seidl, R., (2020). How robust are future projections of forest landscape dynamics? Insights from a systematic comparison of four forest landscape models. *Environ. Model. Softw.* 134, 104844.
- Project Jupyter (2023). JupyterLab (3.4.8) [Software]. URL: <https://jupyterlab.readthedocs.io/> (31.01.2023).
- Ringenbach, A. 2022a. Experimental quantification of deadwood influence on rockfall dynamics and its incorporation into regional-scale rockfall models. Dissertation ETH Zürich und SLF Davos. 95 S.
- Ringenbach, A. E. Stihl, Y. Bühler, P. Bebi, P. Bartelt, A. Rigling, M. Christen, G. Lu, A. Stoffel, M. Kistler, S. Degonda, K. Simmler, D. Mader, and A. Caviezel. (2022b) Full-scale experiments to examine the role of deadwood in rockfall dynamics in forests. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(7):2433–2443, 202
- Ringenbach, A., Bebi, P., Bartelt, P. Rigling, A. Bühler, Y., Stoffel, A., Christen, M., Caviezel, A. 2022b. Modelling deadwood for rockfall mitigation assessments in windthrow areas. *Earth Surface Dynamics*. in press. <https://doi.org/10.5194/esurf-2022-21>
- Schönenberger, W. (2002). "Windthrow research after the 1990 storm Vivian in Switzerland: Objectives, study sites, and projects." *Forest Snow and Landscape Research* 77(1-2): 9-16.
- Seidl, R.; Schelhaas, M.J.; Rammer, W.; Verkerk, P.J., (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage *Nat. Clim. Chang.* 4, 806–810.
- Słomska-Przech K, Panecki T, Pokojski W. Heat Maps: Perfect Maps for Quick Reading? Comparing Usability of Heat Maps with Different Levels of Generalization. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2021; 10(8):562.
- Swisstopo (2021): Swiss SURFACE 3D. Die klassifizierte Punktwolke der Schweiz. Swisstopo, Wabern 10 S.
- Swisstopo (2022). TLM_GEBAEUDE_FOOTPRINTS [Vektorielle Geodaten]. swissTLM3D. URL: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html> (März 2022)
- Stritih, A., Senf, C., Seidl, R., Grêt-Regamey, A., & Bebi, P. (2021a). The impact of land-use legacies and recent management on natural disturbance susceptibility in mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 484, 118950 (10 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118950>
- Stritih, A., Bebi, P., Rossi, C., & Grêt-Regamey, A. (2021). Addressing disturbance risk to mountain forest ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 296, 113188 (11 pp.). <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113188>
- Usbeck T, Walder P, Dobbertin, M, Ginzler C, Hoffmann C et al. (2012). Relating remotely sensed forest damage data to wind data: storms Lothar (1999) and Vivian (1990) in Switzerland. *Theor Appl Climatol* 108: 451–46.