

Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz
Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering

Wildbach- und Lawinenverbau



Naturgefahren im Klimawandel

ISBN: 978-3-9504924-4-6
86. Jahrgang
Dezember 2022
Heft Nr. 190



Verein der Diplomingenieure der
Wildbach- und Lawinenverbauung
Österreichs



Impressum:

Herausgeber:
Verein der Diplomingenieure der
Wildbach- und Lawinerverbauung
Österreichs, A-6900 Bregenz

Schriftleitung:
Dipl.-Ing. Christian Pürstinger [Technischer Referent]
Wildbach und Lawinerverbauung,
Gebietsbauleitung Oberösterreich West
Traunreiterweg 5, 4820 Bad Ischl; +43 6132 232 32-21
christian.puerstinger@wlv-austria.at

Dipl.-Ing. Michael Weissensteiner
Wildbach- und Lawinerverbauung,
Sektion Steiermark
Statterger Straße 60 / 2. Stock, 8045 Graz; +43 316 42 58 17 306
michael.weissensteiner@die-wildbach.at

DI Dr. Johannes Kammerlander
Wildbach- und Lawinerverbauung
Gebietsbauleitung Außerfern
Buchenort 2A, 6600 Lechaschau; +43 5672 657 75 15
johannes.kammerlander@die-wildbach.at

Layout & graphische Gestaltung: Studio Kopfsache – Kommunikation & Design, A-5310 Mondsee

Druck & Versand: Gugler GmbH, A-3390 Melk/Donau

Titelbild: „Die Erde brennt“ [Studio Kopfsache]

Wildbach- und
Lawinerverbau

ISBN: 978-3-9504924-4-6
86. Jahrgang, Dezember 2022, Heft Nr. 190

Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz
Journal of Torrent, Avalanche, Landslide and Rock Fall Engineering



AS332 Super Puma



Bell 412



Ecureuil H 125/AS350B3e



SUPER PUMA

TRAGKRAFT
4,2 TONNEN



Heli Austria GmbH

A-5600 St. Johann im Pongau, Heliport
Tel. +43 (0)6462-4200 • fly@heli-austria.at



Heli Tirol GmbH

A-6462 Karres, Tiroler Bundesstraße 1
Tel. +43 (0)5412-61421 • fly@heli-tirol.at

Inhalt Heft 190

Editorial

Seite 10

Florian Rudolf-Miklau:
Klimawandel und Extremereignisse – Erwarte das Unerwartete!
Vorwort des Leiters der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs

Seite 12

Ricardo Mena:
Avalanche, landslide and rock fall disaster risk reduction

Seite 16

Ilan Kelman:
Disaster by Choice: Why Disasters are not Natural

Seite 24

Katharina Rieder, Arthur Schindelegger, Barbara Steinbrunner:
Klimaresiliente Raumplanung in den Alpen

Seite 30

Douglas Maraun, Martin Jury:
Der Klimawandel und Naturgefahren im Alpenraum

Seite 38

Roland Kaitna:
**Einfluss des Klimawandels auf
Wildbacheinzugsgebiete mit speziellem Fokus auf Muren**

Seite 50

Peter Andrecs, Karl Hagen, Matthias Plörer:
**Das Projekt RECIPE –
Ergebnisse für die Beurteilung des Risikos von Steinschlag**

Seite 58

Karl Hagen, Veronika Lechner, Christian Demmler:
**INADEF, Einsatz eines Frühwarnsystems als Anpassungsstrategie
für Muren unter veränderten Rahmenbedingungen**

Seite 68

Hauptbeiträge



Universell einsetzbar.

StarTec, die Mehrbereichsschalung

Sicher schalen. Sicher bauen.

Mit Teamwork sorgen wir am Dosierwerk Saugraben in Wagrain gemeinsam für eine sichere Zukunft: MEVA Schalungs-Systeme. Alzner Baumaschinen. Und die Wildbach- und Lawinenverbau, GBL Pongau, Flachgau und Tennengau.

Wir danken allen Beteiligten für Ihren Einsatz und die hervorragende Zusammenarbeit.



MEVA Schalungs-Systeme Ges. mbH
Tel. +43 2252 209000
www.meva.net

Alzner Baumaschinen G.m.b.H.
Tel. +43 6219 8065
www.alzner.at

Inhalt Heft 190

Markus Keuschnig, Markus Dörfler, Ingo Hartmeyer:
Satellitenbasierte Detektion von Bodenbewegungen für die Überwachung von Wildbacheinzugsgebieten und Schutzbauwerken

Seite 78

Yves Bühler, Peter Bebi, Marc Christen, Stefan Margreth, Andreas Stoffel, Lukas Stoffel, Christoph Marty, Perry Bartelt, Roderick Kühne:
Automatisch berechnete Gefahrenhinweiskarten für Lawinen

Seite 88

Bettina Fischer, Willy Loseries:
Naturgefahren im Klimawandel – Vorsorgecheck

Seite 96

Renate Mayer, Rosemarie Hieret, Jolanda Rexeis, Kathrin Blanzano:
Resilienz vor Naturkatastrophen am Beispiel der Gemeinden Perschling in Niederösterreich und Deutschlandsberg in der Steiermark

Seite 104

Christian Amberger, Stephan Vollsinger, Peter Lepkowicz:
Ablauf und Management des Waldbrandes Hirschwang in den Quellschutzforsten der Stadt Wien

Seite 112

Sandra Melzner, Marco Conedera, Gianni Boris Pezzatti:
Post Waldbrand Risiko in den schweizerischen Gebirgen

Seite 120

Catherine Berger, Maïke Schneider, Sandro Ritler, Markus Zimmermann, Eva Gertsch-Gautschi, Adrian Schertenleib:
Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen – Erfahrungen und Empfehlungen aus der Schweiz

Seite 132

Mona Mittelstädt, Sfc Energy:
Immer und überall zuverlässiger, umweltfreundlicher, wetterunabhängiger Strom: Netzferne Energieversorgung mit Brennstoffzellen für Frühwarnsysteme

Seite 144

Stefanie Pessenteiner, Paul Krenn, Sebastian Gegenleithner, Nicole Kamp, Wolfgang Schöner, Oliver Sass, Josef Schneider, Benjamin Schrei, Christoph Gaisberger:
Modellierung zukünftiger Abflüsse und Geschiebefrachten im Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Steiermark)

Seite 154



Das im Jahre 1948 durch Herrn Josef Rűf sen. **gegründete Unternehmen** wird heute in der dritten Generation durch Bruno, Christoph und Josef jun. geleitet.

Unsere höchst motivierten und bestens ausgebildeten Mitarbeiter, unterstützt durch den modernen und technisch auf neuestem Stand aufgestellten Fuhrpark, bieten Leistungen für Kunden im 3-Länder-Eck Deutschland, Österreich und Schweiz an.

Unser Leistungsspektrum reicht von Tiefbau, Spezialtiefbau, Erdbe- wegung, Sprengarbeiten, Abbruch- arbeiten über Rohstoffgewinnung und Transporte, Baustoffhandel bis

hin zur Deponierung von Boden- aushubmaterial.

Wir werden zum Partner für Ihr individuelles Projekt, von der Planung bis zur Ausführung unserer Leistungen mit bestem und transparentem Abschluss.

Rűf steht schon seit Generationen für Qualität, Vielseitigkeit, Inno- vation, Dynamik und Treue!

Mehr über uns: www.ruefbau.com



Inhalt Heft 190

Haupt-
beiträge

Thomas Zieher, Jan Pfeiffer, Veronika Lechner, Kent Von Maubeuge, Helge Hoyme, Helmut Hochreiter, Daniela Engl:
Einsatz einer Bentonitmatte mit biologisch abbaubaren Komponenten für die Abdichtung von Gerinnebetten

Seite 168

Markus Mayerl:
Sonnenstrom bei der Wildbach- und Lawinenverbauung in der GBL Steiermark Nord

Seite 182

Florian Ahammer, Roland Suchy:
Borkenkäferkalamitäten im Schutzwald – Exkursionsbericht des Vereins der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung

Seite 188

Johannes Hübl, Roland Kaitna:
50 Jahre Institut für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien

Seite 192

INTERPRAEVENT 2024
Natural hazards in a changing climate

Seite 198

Markus Mayerl, Raphaela Beer:
Wassererlebnis Öblarn feierlich eröffnet

Seite 200

Vorschau Heft 191

Seite 204

Inserentenverzeichnis

Seite 206

Aktuelles aus
Wissenschaft und Praxis

Editorial

Liebe Leserin, lieber Leser!

Klimawandel – dieser Begriff ist seit vielen Jahren allgegenwärtig und beschäftigt immer mehr Menschen auf unserem Planeten. Er schreitet stetig voran und wird immer spürbarer. Niemand kann sich vor dieser Entwicklung verschließen. In der Vergangenheit wurde noch spekuliert, ob es den Klimawandel überhaupt gibt. In den letzten Jahrzehnten wurde dieser jedoch durch zahlreiche Studien und Beobachtungen weltweit nachgewiesen. In vielen Regionen der Erde sind die fatalen Auswirkungen dieser Entwicklung bereits bittere Realität. Auf den Klimakonferenzen der UN wird jedes Jahr aufs Neue diskutiert, wie der Klimawandel gestoppt werden kann – bis dato jedoch ohne erkennbaren Erfolg. Dass für die globale Erderwärmung der exzessive CO₂-Ausstoß (vor allem) der Industriestaaten verantwortlich ist, steht außer Zweifel und der Mensch ist dringend zum Handeln aufgerufen.

Auch unser Alpenraum ist vom Klimawandel betroffen. Laut wissenschaftlichen Studien sind die Temperaturen in den Alpen in den vergangenen 120 Jahren um ca. 2 °C gestiegen, was etwa doppelt so hoch ist wie der weltweite Durchschnitt. Wissenschaftler prognostizieren für die nächsten 40–50 Jahre einen Temperaturanstieg im Alpenraum von weiteren 2 Grad Celsius. Dies dürfte massive Auswirkungen auf den hier vorliegenden Kultur- und Lebensraum haben. Die Gletscher des Alpenraumes schrumpfen im rasanten Tempo, sodass vermutlich unsere Enkel- oder Urenkelkinder dauerhafte Eisflächen in den Gebirgsregionen Europas nur mehr aus Büchern kennen werden.

Durch den Temperaturanstieg und den Rückgang des „Ewigen Eises“ erhitzt sich die Landmasse umso mehr, Permafrostböden tauen auf und infolge des Gletscherrückgangs treten vermehrt Hanginstabilitäten in Form von Steinschlägen, Fels- und Bergstürzen, Rutschungen und sogar Großhangbewegungen auf. Längere Trockenperioden werden vermutlich auch das Vegetationsbild im Alpenraum verändern. Viele Baumarten, allen voran die ohnehin durch Trockenheit und Borkenkäferkalamitäten gefährdete Fichte, werden künftig an ihre Grenze stoßen und durch andere, wärmeliebendere Baumarten ersetzt werden.

Vor allem Laubgehölze, wie die Rotbuche, dringen immer mehr in die Höhenregionen vor und verändern dadurch die Zusammensetzung der Schutzwälder. Durch den Rückgang der immergrünen Nadelwälder bzw. Nadelmischwälder kann ein negativer Einfluss auf die Lawinentätigkeit im Alpenraum nicht ausgeschlossen werden. Auch das Thema Waldbrand rückt im Alpenraum immer mehr in den Vordergrund. Die Hitzeperioden in den Sommermonaten der letzten Jahre verursachten bereits massive Waldbrände in den Wäldern Mitteleuropas. In Österreich sind vielen der Waldbrand von 2018 im extrem steilen Bannwald oberhalb von Hallstatt (Oberösterreich) bzw. der Waldbrand Hirschwang in den Quellsschutzforsten der Stadt Wien vom Oktober 2021 noch in Erinnerung.

Glaut man neuesten wissenschaftlichen Studien, dann werden in den Alpen die Niederschlagsmengen in den Wintermonaten zunehmen, in den Sommermonaten dagegen teilweise abnehmen bzw. die Niederschläge in gleicher Menge jedoch in kürzeren Perioden auftreten. Die Zunahme dieser Starkniederschläge hat wiederum massive Auswirkungen auf das Abflussgeschehen. Intensivere Hochwasser- und Murenereignisse sind hier zu befürchten. Einen kleinen Vorgeschmack darauf lieferte bereits das verheerende Hochwasser vom Juli 2021 in Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz (Deutschland). Bei dieser Flutkatastrophe mit Tagesniederschlagsmengen zwischen 200 mm und 300 mm, ganz besonders im Ahrtal, starben 189 Menschen und die dadurch verursachten, finanziellen Schäden können mit mehr als 29 Milliarden Euro beziffert werden. Auch ist noch vielen das Ereignis vom Juni 2022 in Kärnten, wo nach intensiven Niederschlägen in kürzester Zeit der Arriachbach, der Afritzer Bach und der Treffner Bach enorme Schäden verursachte, in Erinnerung. Auch zahlreiche Vermurungen waren hier die Folge.

Betrachtet man diese Entwicklung aus Sicht des Schutzes vor Naturgefahren, dann sieht vermutlich die Zukunft nicht sehr rosig aus und es gilt bereits jetzt, sich näher mit den „Naturgefahren im Klimawandel“ auseinanderzusetzen.

Aus diesem Grund wurde für die aktuelle Ausgabe der Fachzeitschrift Wildbach- und Lawinenverbau auch dieses Spezialthema gewählt. Die in diesem Journal zusammengestellten Beiträge liefern einen interessanten Überblick über mögliche Auswirkungen des Klimawandels und dessen Einfluss auf die im Alpenraum auftretenden Naturgefahren.

Neben den vielen Fachbeiträgen zum Klimawandel finden sich in der Rubrik „Aktuelles aus Wissenschaft und Praxis“ dieses Mal Innovationen zur Nutzung von Sonnenstrom auf Baustellen, ein Exkursionsbericht des Vereins der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung betreffend Borkenkäferkalamitäten im Schutzwald sowie eine Laudatio auf das Institut für Alpine Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien, welches in diesem Jahr sein 50-jährliches Bestehen feierte.

An dieser Stelle möchte ich mich wieder bei allen Autorinnen und Autoren für die sehr interessanten Fachbeiträge sowie bei meinen Kollegen DI Michael Weissensteiner und DI Dr. Johannes Kammerlander für die Schriftleitung sehr herzlich bedanken.

Ich wünsche Ihnen nun viel Freude beim Lesen. Wenn Sie Anregungen für uns haben, welche Themen besonders interessant wären, oder wie man ein Fachjournal noch besser gestalten könnte, so würde es mich freuen von Ihnen zu hören.

Dipl.-Ing. Christian Pürstinger
Technischer Referent / Schriftleitung

Klimawandel und Extremereignisse – Erwarte das Unerwartete!

Vorwort des Leiters der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreichs

Der Weltklimarat hat in seinem letzten Bericht einmal mehr klargelegt, dass durch die Globale Erwärmung mit einer deutlichen Zunahme von Naturkatastrophen nach Häufigkeit und Intensität zu rechnen ist. Diese Feststellung gilt inzwischen als wissenschaftlicher „State-of-the-Art“ und wird – anders als in früheren Jahren – auch öffentlich nicht mehr in Frage gestellt. Einfacher ausgedrückt, bedeutet dies, dass in allen Regionen der Welt – also auch in den Alpen – mit stärkeren und häufigeren Hochwasserereignissen, Waldbränden, Dürren, Murgängen oder Stürmen zu rechnen sein wird. Dieses in den Medien stark verbreitete Bild erzeugt im Denken von politischen Entscheidungsträgern die Wahrnehmung, dass bestehender Schutz nicht mehr ausreichen könnte und Schäden durch klimabedingte Katastrophen zunehmen werden.

Aus Sicht der Fachexperten/innen ist allerdings Vorsicht geboten. Schaut man nämlich ins Detail, gibt es kaum einen Bereich der Naturgefahrenvorsorge, in dem ohne Einschränkung aktuell und vorbehaltlos eine Zunahme der Extremereignisse bestätigt werden kann. Ganz im Gegenteil – Ereignis- und Schadensstatistiken weisen häufig keinen signifikanten Anstieg auf, zumindest bisher nicht. Zuletzt hat sich die wissenschaftliche Elite 2019 im der Frage der Extremereignisse in Österreich befasst (Extrema 2019; <https://www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com/themen-entdecken/sozial-rechts-und-wirtschaftswissenschaften/natur-landschaft/55101/extrema-2019?c=1824>) und es zeigt sich klar, dass nur in wenigen Bereichen ein gesicherter Zusammenhang zwischen der Erderwärmung und den regionalen Katastrophen hergestellt werden kann. Auch die Wildbach- und Lawinenverbauung kann aus ihren Beobachtungen bisher nicht gesichert ableiten, dass Muren, Lawinen, Sturzfluten, Rutschungen oder Steinschläge zunehmen, eine valide Prognose ist daher nicht möglich. Einzelne Phänomene, wie die Zunahme von Sedimenten aus hochalpinen Einzugsgebieten (Permafrost, Gletscherrückzug) oder bestimmter Südwestwetterlagen mit extremen Niederschlägen, sind zwar offensichtlich, können aber auch noch nicht als Trend interpretiert werden.

Diese scheinbare Lücke zwischen dem globalen Trend und der regionalen Wahrnehmung der Experten/innen ist tückisch, erzeugt doch das scheinbare Ausbleiben der Katastrophen, das zuvor als zentrales Argument für den Klimaschutz medial gepusht wurde, bei der alarmierten Bevölkerung das Gefühl, dass es „eh nicht so schlimm sei“. Selbst Expertinnen und Experten des Naturgefahrenmanagements neigen häufig zur Ansicht, dass es extreme Ereignisse auch in früheren Jahrzehnten oder Jahrhunderten gegeben hat, häufig in Dimensionen, die man sich heute gar nicht mehr vorstellen kann. Fast wäre man zur Schlussfolgerung verleitet, dass die alarmistisch vorgetragenen Szenarien für kommende Extremereignisse gar auch nur „Fake News“ seien.

Trotzdem hat sich die Führungsebene der WLW 2020 im Rahmen des Strategieprozesses dazu entschlossen, Klimawandelanpassung und Klimaschutz zum Kernthema zu machen. Damit folgt man ausdrücklich nicht dem Main Stream der Klimabewegung, sondern hat lange darüber diskutiert, wie sich eine Organisation des Naturkatastrophenmanagements – trotz aller Prognoseunsicherheiten – effizient für mögliche Szenarien der nächsten Jahrzehnte aufstellen kann. Leitend für die Überlegungen waren zwei wichtige Faktoren:

1. Katastrophale Extremereignisse (ob mit oder ohne Klima-Bezug) werden in erster Linie nicht an ihrer Prozessstärke oder Eintrittswahrscheinlichkeit gemessen, sondern am Ausmaß des Schadens. Für diesen Schaden sind wiederum zwei Einflüsse maßgeblich, einerseits die Wirkung realisierter Schutzmaßnahmen, andererseits die völlig veränderte Vulnerabilität des menschlichen Lebensraums und der kritischen Infrastruktur. Beide Einflüsse sind gegenläufig und machen im Grunde einen Vergleich mit Extremereignissen früherer Jahrzehnte und

Jahrhunderte unmöglich. Schon aus diesem Grund kann es gar keine statistisch gesicherte Zeitreihe von extremen Schadensereignissen geben, die regionale Aussagen für die Zukunft geben, weil diese Einflüsse die Statistik völlig überlagern.

2. Es gibt in der Klimaforschung ein paar außer Streit stehende Zusammenhänge mit dem Auftreten extremer Niederschläge oder Trockenheit, die langfristig zweifelsfreie Effekte für die Größe und Häufigkeit von Extremereignissen haben. Gleichzeitig ist die Wahrnehmung von Extremereignissen durch das seltene Auftreten ohnehin stark subjektiv und medial gesteuert. Es ist daher systematisch richtig, sich erst gar nicht an imperfekten Ereignisstatistiken zu orientieren, sondern sich systematisch, mittel und langfristig auf Veränderungen einzustellen und bestehende Schutzsysteme anzupassen – ungeachtet der Frage, wo die nächste Großlawine abgehen wird oder wann das nächste Donauhochwasser rollt.

Anpassungskonzepte in der Naturgefahrenprävention sind per Definition gesamtheitlich und nachhaltig. Der wesentliche Unterschied zu konservativen Schutzkonzepten der Gefahrenabwehr ist daher, dass es nicht um die Verstärkung einzelner Maßnahmen geht (z.B. höherer Damm oder stärkere Mauer), sondern um die Resilienz der Schutzsysteme sowie der betroffenen Gesellschaft insgesamt. Ziel ist es, Schäden möglichst gering zu halten. Die Mittel dazu beschränken sich aber nicht auf technischen Schutz, sondern schließen intakte Schutzwälder, konsequent umgesetzte Gefahrenzonenpläne, wirksame Frühwarnsysteme und effiziente Strukturen des Katastrophenmanagements mit ein. Im Sinne eines Gesamtsystemansatzes geht es daher um die Robustheit bestehender Strukturen, um die Redundanz in der Wirkung kombinierter Maß-

nahmen oder um die Flexibilität der Entscheider, Einsatzkräfte und Bevölkerung in der Reaktion auf Extremereignisse. Für solche gesamtheitlichen Schutzkonzepte gibt es ausgezeichnete Beispiele, auch im Bereich der Wildbach- und Lawinerverbauung – man denke beispielsweise an den integralen Lawinenschutz in Österreich. Den Führungskräften der WLV ist bewusst und klar, wie resiliente Schutzsysteme entwickelt werden müssen und welche Anpassungen für die Maßnahmen der WLV daraus resultieren. Daher gibt es dazu in der Strategie „die.wildbach 2023“ ein klar determiniertes Handlungsfeld.

Es reicht allerdings nicht aus, wenn die Expertinnen und Experten einen Weg finden, trotz großer Prognoseunsicherheiten mit dem Thema Klimaanpassung effizient und nachhaltig umzugehen. Schutz vor Naturgefahren ist letztendlich eine Leistung für die betroffene Bevölkerung. Bürgerinnen und Bürger müssen daher verstehen, was sich ändern wird und was daher zu tun oder zu akzeptieren ist. Wie schwierig die Diskussion über Extreme ist, zeigt das Beispiel des sog. „Restrisikos“. Der Begriff ist völlig abstrakt und kann daher dem Laien kaum schlüssig vermittelt werden. Der lapidare Hinweis, dass nach Herstellung von Schutzmaßnahmen oder auch außerhalb der Gefahrenzonen „Gefahren und Risiken nicht ausgeschlossen werden können“ stellt bestenfalls haftungssensible Behördenvertreter zufrieden. Die betroffene Bevölkerung denkt nicht in relativen Wahrscheinlichkeiten, sondern absolut in „sicher“ oder „nicht sicher“. Was ist also zu tun, zwischen dem Alarmismus extremer

Klimaszenarien und der Beschwichtigung „is eh bisher nichts passiert“? Ich glaube, es führt kein Weg an einem intensiven Dialog zwischen Experten/innen und der Bevölkerung vorbei, in dem Naturgefahrenprozesse, deren Folgen und die Auswirkung des Klimas wieder und immer wieder erklärt werden. Diese Kommunikation muss jedoch unaufgeregt und ohne Angstmache erfolgen – denn Angst ist der schlechteste Berater, wenn es um die Sicherheit der Menschen geht. Vor vielen Jahren hat mich ein Slogan im fernen Neuseeland inspiriert, der für Extremsportarten wie Bungy Jumping oder Speed Boat Fahren Werbung machte: „Expect the unexpected!“ Irgendwie wirkte dieser Satz angstlösend auf mich, geradezu als Aufforderung, es doch einfach zu probieren. So ist es auch mit der Kommunikation von Extremereignissen im Klimawandel: Wenn es gelingt, den Menschen die Angst vor den Folgen zu nehmen und ihnen klar zu machen, dass jeder etwas tun und beitragen kann, ist ein großer Teil der notwendigen Anpassung bereits gelungen. Das Thema ist unglaublich wichtig, die Wildbach- und Lawinerverbauung muss sich als Schlüssellakteur im Naturgefahrenmanagement ihrer Rolle bewusst sein. Großer Dank daher an die Verantwortlichen dieser Zeitschrift, dass das Thema im vorliegenden Heft angegangen und umfassend behandelt worden ist.

Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. Florian Rudolf-Miklau
*Leiter der Wildbach- und Lawinerverbauung
Österreichs*



Naturgefahrenschutz

Sicherheit ohne Kompromisse



RICARDO MENA

Avalanche, landslide and rock fall disaster risk reduction

Katastrophenvorsorge vor Lawinen, Rutschungen und Steinschlag

Abstract:

The number of disasters is increasing and so are their human and economic costs. The globally endorsed Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030 offers a guide to decision-makers on how to reduce disaster risks and losses. Two particular areas that should be of interest to hazard engineers are better understanding disaster risk and building disaster resilient infrastructure. Ultimate success in achieving the targets of the Sendai Framework will require greater global and national commitment, especially to finance the cost of risk reduction and climate change adaptation.

Zusammenfassung:

Katastrophen und deren wirtschaftliche Kosten und Einfluss auf die Gesellschaft nehmen rasant zu. Richtlinien für Management und Ingenieure bietet der weltweit anerkannte Leitfaden zur Katastrophenminimierung: „Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030“. Besonderer Fokus sollte dabei auf ein besseres Verständnis von Katastrophenrisiko und resilienter Infrastruktur gelegt werden. Eine erfolgreiche Klimawandelanpassung sowie eine Finanzierung der Risikoprävention kann nur mit intensiver nationaler und internationaler Zusammenarbeit erreicht werden – und somit auch die Ziele der „Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030“.

Keywords:

Disasters, Risk, Sendai, Climate, Infrastructure

Stichwörter:

Katastrophen, Risiko, Sendai, Klima, Infrastruktur

Introduction

Over the last twenty years, the frequency and costs of disasters have increased dramatically. Between the years 2000 and 2019, 7,348 disaster events were recorded worldwide. These disasters claimed approximately 1.23 million lives, an average of 60,000 per year, and led to approximately US\$ 2.97 trillion in economic losses (CRED and UNDRR, 2020). These numbers represent a sharp increase compared to recorded disasters between 1980 and 1999, much of it fuelled by climate change.

These disasters not only lead to the loss of life, displacement, and loss of income, but can have long-term effects on a country's development trajectory, especially among the least developed countries.

Over the same period, there has been a gradual shift in how the world perceives disasters towards a realization that there is no such thing as

“natural disasters”. Disasters are the by-products of decisions we make, thus, their impacts can be lessened and, in some cases, prevented.

How likely a disaster is to occur is determined by the level of disaster risk, which in turn is a function of the intensity of a hazard and the levels of vulnerability, exposure of people and economic asset. The goal of disaster risk reduction is to address these factors to reduce existing levels of risk and prevent the creation of new risks. However, the elements of risk are not static or confined.

Risk is dynamic in that it changes based on the effect of risk drivers. Major drivers include climate change, unplanned urban development, and environmental degradation. This is in addition to underlying social and economic drivers, namely poverty and inequality. Risk is also systemic in that there is often a confluence of connected risks and factors that come together to create a disaster.

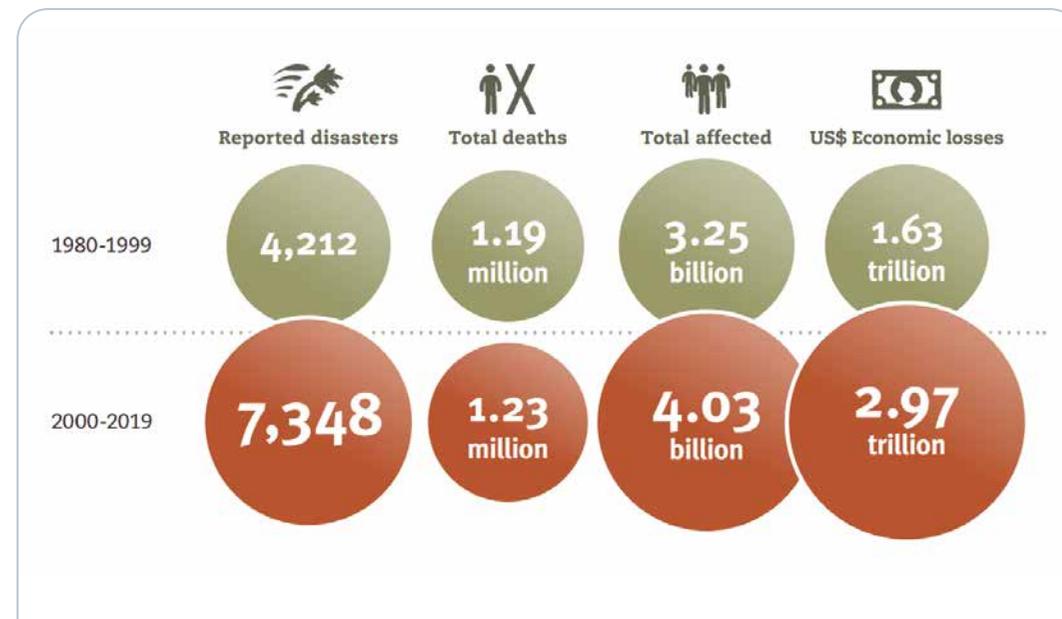


Figure 1: Disaster impacts: 1980-1999 vs 2000-2019 (Credit: CRED and UNDRR).

Abbildung 1: Auswirkung von Katastrophen: 1980-1999 zu 2000-2019 (Credit: CRED und UNDRR).

Enter the Sendai Framework

Addressing this complexity is possible through the implementation of an international agreement that 187 UN Member States adopted in 2015 called the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. The United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR) serves as the secretariat for the agreement and is the focal point within the UN system for disaster risk reduction.

The Sendai Framework aims to achieve a substantial reduction of disaster risk and losses by the year 2030 (United Nations, 2015). To that end, it outlines four priorities for action: (1) Under-

standing disaster risks; (2) Strengthening disaster risk governance to manage disaster risks; (3) Investing in disaster reduction for resilience and; (4) Enhancing disaster preparedness for effective response, and to "Build Back Better" in recovery, rehabilitation and reconstruction.

The Sendai Framework also sets seven global targets to be achieved by the year 2030:

- (a) Substantially reduce global disaster mortality by 2030, aiming to lower the average per 100,000 global mortality rate in the decade 2020–2030 compared to the period 2005–2015;

- (b) Substantially reduce the number of affected people globally by 2030, aiming to lower the average global figure per 100,000 in the decade 2020–2030 compared to the period 2005–2015;
- (c) Reduce direct disaster economic loss in relation to global gross domestic product (GDP) by 2030;
- (d) Substantially reduce disaster damage to critical infrastructure and disruption of basic services, among them health and educational facilities, including through developing their resilience by 2030;
- (e) Substantially increase the number of countries with national and local disaster risk reduction strategies by 2020;
- (f) Substantially enhance international cooperation to developing countries through adequate and sustainable support to complement their national actions for implementation of the present Framework by 2030;
- (g) Substantially increase the availability of and access to multi-hazard early warning systems and disaster risk information and assessments to people by 2030.

For natural hazard engineers and project managers in Austria and elsewhere, the Sendai Framework offers a roadmap to ensure their considerations of risk are holistic. For those who are focused on addressing the risks associated with torrents, avalanches, landslides and rock falls, the two particular areas of most relevance revolve around the understanding of risk and building disaster resilient infrastructure.

Understanding risk

Understanding risk is the first priority for action of the Sendai Framework because it underpins all other actions. Informed decision-making should

be based on understanding risk in all its dimensions of vulnerability, capacity, exposure of persons and assets, hazard characteristics, and the environment.

The most common method for conducting risk assessments is outlined in the international standards on risk management 'ISO 31000' (ISO, 2018) and on risk assessments 'IEC 31010' (IEC, 2019). When carried out at the national level, disaster risk assessments and risk management can become essential inputs for planning and policies. Resources include the European Commission's 'Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management' (European Commission, 2010) and UNDRR's 'Words into Action guidelines: National disaster risk assessment' (UNDRR, 2017).

That said, it is important to note that existing approaches to understand risk are often based on the largest and most historically obvious and tractable risks, rather than on the full topography of risks. The 2019 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction (GAR) challenges the traditional 'hazard-by hazard' approach of looking at risks in isolation by calling for an understanding of the systemic nature of risk (UNDRR, 2019). This means recognizing that a systemic failure that results in a disaster can arise from the effect of multiple types of stressors where risks interact across a system. In this evolving risk scenario, data are foundational to understand risk and tracking risk reduction progress. Therefore, it is critical to invest in competent, capacitated institutions and rigorous mechanisms for data collection and converting the data into knowledge that can be applied.

This systemic approach mirrors the reality that hazard engineers and project managers are likely to face in the real world. One relevant example is a 7 February 2021 disaster in Uttarakhand, India, where a glacier burst in the



Figure 2: Former United Nations Secretary-General, Ban Ki-Moon, at the opening ceremony of the third United Nations World Conference on Disaster Risk Reduction in Sendai, Japan, March 14, 2015, where the Sendai Framework was adopted after marathon negotiations (Credit: UNDRR)

Abbildung 2: Ehemaliger Generalsekretär der Vereinten Nationen, Ban Ki-Moon, auf der Eröffnungszeremonie der dritten Konferenz der Vereinten Nationen über die Reduktion von Katastrophen in Sendai, Japan am 14. März 2015; bei welcher die Sendai Rahmenrichtlinien nach langen Verhandlungen akzeptiert wurden. (Credit: UNDRR)

Himalayas caused the death of at least 72 people (ANI, 2021). The resulting flood also destroyed a bridge and damaged two hydropower projects. Initial reporting attributed the glacial lake outburst flood to the effects of the warming climate. However, further investigations found that additional factors contributed to the disaster, namely the clearing of trees and the blasting of mountainsides for the construction of the hydropower projects made the landscape unstable (Harper, 2021). In this case, as with most disasters, it took the combined influence of multiple risks, interacting within a system, to trigger the disaster, hence the need to understand systemic risk. The recent COVID-19 pandemic is another textbook example of the systemic nature of risk.

Resilient infrastructure

The second area of focus for hazard engineers should be ensuring that all development is risk-informed and that infrastructure is designed, built and maintained to be resilient to climate and disaster risks.

Ideally, every infrastructure or development project should seek to reduce existing disaster risk in the environment and avoid the creation of new risks. It is also prudent that steps be taken before, during, and after construction to ensure that the resulting infrastructure is climate and disaster resilient. This not only protects the initial investment but can help to minimize indirect costs from service disruptions. Frequent disruptions to critical infrastructure undermine livelihoods, reduce productivity, and damage businesses. That is why the Sendai Framework placed special emphasis on the need to build the resilience of infrastructure by designating it as Target D of the Sendai Framework.

As an amplifier of disaster risk, climate change is expected to increase the frequency and intensity of extreme climatic events impact-

ing infrastructure. According to a study by the EU Joint Research Centre, damage to infrastructure due to disasters and climate change in Europe (EU Members plus Switzerland, Norway, and Iceland) currently amounts to approximately € 9.3 billion annually (Forzieri, 2018). This is expected to soar to € 19.3 billion by 2050 and € 37 billion by 2080. The energy and transport sectors will be the most affected, with annual expected damages of € 8.2 billion in the energy sector by 2080 and € 0.8 billion by the end of the century in the transport sector. Austria has experienced some of this as snow, flooding, and mudslides disrupted train lines and caused an electricity blackout that affected 1,700 households in November 2019 (AP, 2019).

These losses and disruptions can be reduced through cost-effective investments in building climate and disaster resilience. The World Bank has estimated that investing in infrastructure resilience is beneficial in 96 % of scenarios of possible future socioeconomic and climate trends. In a median scenario, each \$ 1 investment could bring a \$ 4 benefit, amounting to US \$ 4.2 trillion in benefits for low and middle-income countries globally, while the cost of inaction for the 2020-2030 period may amount to around US \$ 1 trillion (Hallegatte, 2019).

Several organizations have dedicated considerable efforts to help the public and private sectors better understand and mitigate the risks to infrastructure investments, which could serve as a resource to engineers and project managers. Among them is the Coalition for Disaster Resilient Infrastructure, which was launched in 2019 under the leadership of India and with the support of UNDRR. The Coalition currently is composed of 31 countries and several international bodies, including the European Union and the European Investment Bank (CDRI, 2022).

UNDRR is dedicating more attention to help countries building and maintaining resilient infrastructure. Most recently, we developed a set of 'Principles for Resilient Infrastructure,' which offer a holistic approach to ensure that resilience is embedded into the planning and implementation of infrastructure projects (UNDRR, 2022). The Principles also introduce a new and innovative concept of 'net resilience gain' which is an important pillar in achieving net-zero for carbon emissions. At the heart of this concept is promoting an approach where all infrastructure investments demonstrate enhancing the systemic resilience of infrastructure.

Way forward

Looking into the future, the 2022 GAR estimates that if no action is taken to reduce disaster risks, then the world could face an increase in the number of medium to large-scale disasters from an average of around 400 per year in 2015 to 560 per year in 2030 – that is a 40% increase over 15 years (UNDRR, 2022).

One key opportunity to stop this spiral is the ongoing midterm review of the implementation of the Sendai Framework. This is a process by which national governments voluntarily review their progress against the goals and targets of the Sendai Framework, ideally, in an open and inclusive manner with the involvement of all stakeholders. As the only review that will be conducted during the lifetime of the Sendai Framework, it presents a unique chance for countries to identify areas for improvement and accelerate action in the remaining years of the agreement. We are glad that Austria is one of those countries that have expressed its intent to conduct a national review and we encourage you to become involved in the

process. The official outcomes of this global process will be discussed at a high-level meeting of the UN General Assembly in May 2023.

The biggest challenge we expect to be highlighted is the lack of direct funding to achieve the Sendai Framework and to reduce disaster risk. To date, the greater realization among countries that disasters can be prevented has not been matched by an equal increase in the funds dedicated to disaster risk reduction. According to one analysis by UNDRR, of the \$ 133 billion of disaster-related financing that has been made available by donors to developing countries between 2010-2019, only \$ 5.5 billion (4.1 %) was aimed at risk reduction measures before disasters strike, compared to \$ 119.8 billion spent on post-disaster response (UNDRR, 2021).

As we near the 2022 United Nations Climate Change Conference (COP27), which has been dubbed 'the implementation COP,' it is important that rich countries, which have historically been the largest emitters of greenhouse gasses, honour the commitments they made to increase their funding support to the least developed and most climate-vulnerable countries. Moreover, domestic sources of finance will also need to be mobilized to meet the targets of the Sendai Framework. This includes creating synergies between climate action and risk reduction as part of a comprehensive disaster risk management approach.

In summary, it will require greater collective human and material resources, and stronger political will than is currently in play, to achieve the goal and targets of the Sendai Framework, reduce risk and build resilience, and ultimately, achieve the Sustainable Development Goals by the year 2030. Action is needed now because we have less than 8 years to get there.

Author's address/Anschrift des Verfassers:

Mr Ricardo Mena
 United Nations Office for
 Disaster Risk Reduction (UNDRR)
 7bis Avenue de la Paix, CH1211 Geneva 2,
 Switzerland
 mailto: menar@un.org

References/Literatur:

ASIAN NEWS INTERNATIONAL (ANI) (2021).
 Uttarakhand glacier burst: Death toll rises to 72. Times of India. URL: <https://timesofindia.indiatimes.com/city/dehradun/uttarakhand-glacier-burst-death-toll-rises-to-72/articleshow/81241537.cms>

ASSOCIATED PRESS (AP) (2019).
 Snow, flooding, mudslides in Austria kill 1, injure 2. URL: <https://apnews.com/article/d7de9952183d4f7298fa54ec6418918b>

CENTRE FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS (CRED), UNITED NATIONS OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION (UNDRR) (2020).
 The human cost of disasters: an overview of the last 20 years (2000-2019): pages 6. URL: <https://www.undrr.org/publication/human-cost-disasters-overview-last-20-years-2000-2019>

COALITION FOR DISASTER RESILIENT INFRASTRUCTURE (CDRI) (2022).
 Members. UR: <https://www.cdri.world/members>

FORZIERI G., et al. (2018).
 Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. Global Environmental Change, Volume 48: pages 97-107. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959378017304077>

HALLEGATTE S., RENTSCHLER, J., ROZENBERG, J. (2019)
 Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity. Sustainable Infrastructure. World Bank. URL: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31805>

HARPER K. (2021).
 Miniature Satellites Reveal Cause of Deadly Uttarakhand Flood That Devastated Dams. Scientific American. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/miniature-satellites-reveal-cause-of-deadly-uttarakhand-flood-that-devastated-hydroelectric-dams/>

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) (2018).
 ISO 31000: 2018 Risk management – Guidelines. URL: <https://www.iso.org/standard/65694.html>

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC) AND ISO (2019).
 IEC 31010: 2019 Risk management - Risk assessment techniques. URL: <https://www.iso.org/standard/72140.html>

EUROPEAN COMMISSION STAFF WORKING PAPER (2010).
 Risk Assessment and Mapping Guidelines for Disaster Management. URL: https://ec.europa.eu/echo/files/about/COMM_PDF_SEC_2010_1626_F_staff_working_document_en.pdf

UNDRR (2017).
 Words into Action guidelines: National disaster risk assessment. URL: <https://www.undrr.org/publication/words-action-guidelines-national-disaster-risk-assessment>

UNDRR (2019).
 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: page IV. URL: <https://gar.undrr.org/report-2019.html>

UNDRR (2022).
 The Principles for Resilient Infrastructure. URL: <https://www.undrr.org/publication/principles-resilient-infrastructure>

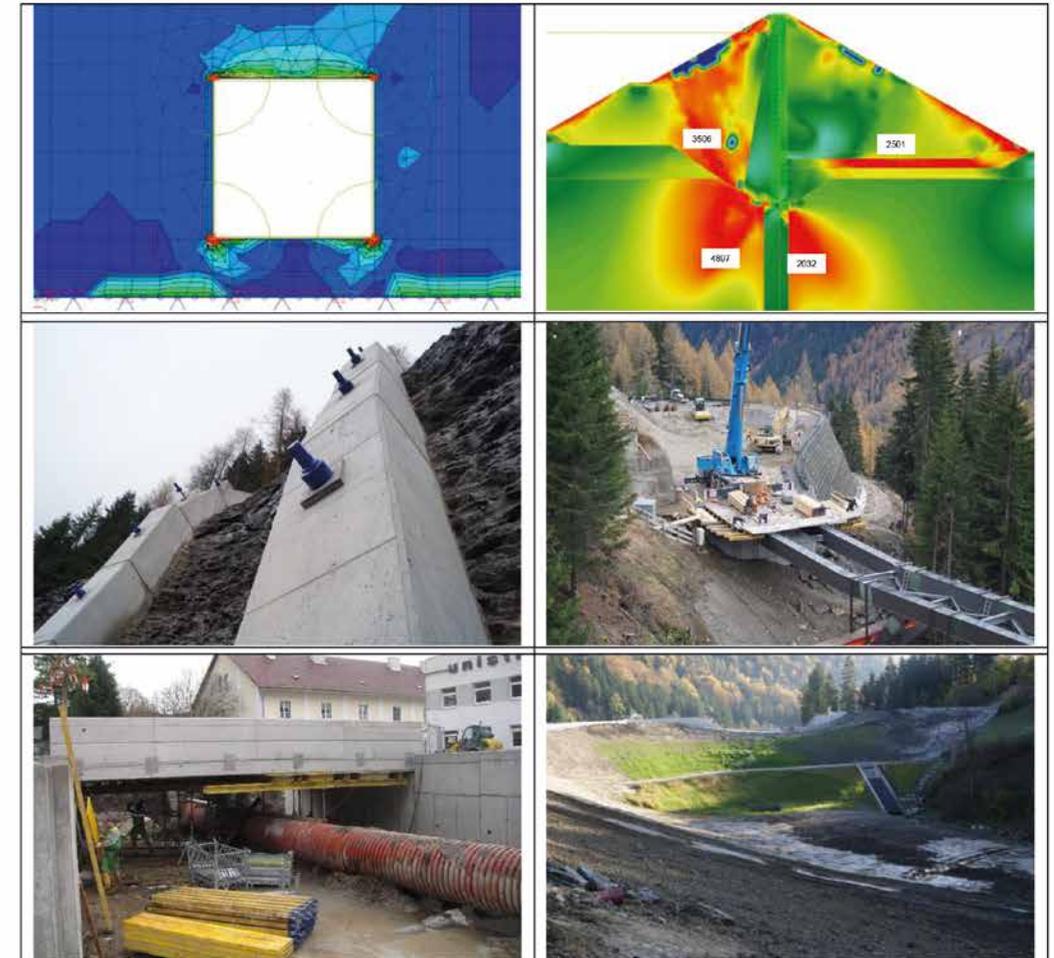
UNDRR (2022).
 Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction: page 17. URL: <https://www.undrr.org/gar2022-our-world-risk>

UNDRR (2021).
 International Cooperation in Disaster Risk Reduction: Target F: page 8. URL: <https://www.undrr.org/publication/international-cooperation-disaster-risk-reduction-target-f>

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY RESOLUTION 69/283 (2015).
 Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030. URL: https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_69_283.pdf

alpinfra consulting + engineering gmbh :: Internationale Ingenieurkompetenz**Innovative Lösungen und Baustellenführung im anspruchsvollen alpinen Umfeld**

- Statische und dynamische Strukturanalysen für Stahl- und Betonbauwerke
- Geotechnisch, grundbautechnische Sonderlösungen, Injektionstechnik
- Schutzwasserbau, Wildbach- und Lawinenverbauung
- Numerisch-Physikalische Modellierung von Lawinen, Muren und Felsstürzen



alpinfra consulting + engineering gmbh

Marktplatz 5 - 5163 Mattsee

office@alpinfra.com

www.alpinfra.com

+43 - 6217 - 20271

ILAN KELMAN

Disaster by Choice: Why Disasters Are Not Natural

Katastrophen hausgemacht: Wieso Katastrophen nicht natürlich sind

Abstract:

Disaster research is a long-established, detailed field, the science from which challenges many common assumptions, such as (i) climate change increases disasters and (ii) 'natural disasters' result from society fighting nature. In fact, decades-long disaster science provides a baseline indicating how disasters arise due to society choosing to create and support vulnerabilities, rather than from nature's behaviour or environmental changes. This article uses this science to challenge the concept of 'natural disaster', explaining why disasters are rarely natural. Then, the role of climate change is examined. Finally, explanations are given regarding choices for tackling disasters, irrespective of climate change.

Zusammenfassung:

Die Katastrophenforschung ist ein seit langem etablierter, detaillierter Bereich, dessen wissenschaftliche Erkenntnisse viele gängige Annahmen in Frage stellen, wie z. B., dass (i) der Klimawandel die Zahl der Katastrophen erhöht und (ii) dass "Naturkatastrophen" durch die Gesellschaft im Kampf gegen die Natur verursacht werden. Tatsächlich liefert die jahrzehntelange Katastrophenforschung einen Anhaltspunkt dafür, dass Katastrophen durch die Entscheidung der Gesellschaft entstehen, Schwachstellen zu schaffen und zu unterstützen, und nicht durch das Verhalten der Natur oder Umweltveränderungen. In diesem Artikel wird anhand dieser wissenschaftlichen Erkenntnisse das Konzept der "Naturkatastrophe" in Frage gestellt und erklärt, warum Katastrophen selten natürlich sind. In weiterer Folge wird die Rolle des Klimawandels sowie Möglichkeiten zur Katastrophenbewältigung, unabhängig vom Klimawandel, beschrieben.

Keywords:

Mitigation,
Preparedness,
Prevention, Readiness,
Risk Reduction

Stichwörter:

Abschwächung, Vorsorge,
Vorbeugung, Bereitschaft,
Risiko Reduktion

Introduction

Extensive rhetoric on disasters pervades academic journals and the media. Common assumptions are that climate change is increasing disasters and that society battles the environment to stop 'natural disasters'. Disaster research is a long-established, detailed field, not always supporting these bold statements and nuancing many others. This disaster science, providing a baseline to analyse contemporary trends, is often said to have started in the 1970s (Ball, 1975; O'Keefe, et al., 1976; Torry, 1979), although it goes back decades (e.g. Carr, 1932; Prince, 1920) and even centuries (e.g. Rousseau, 1756). This article summarises such work in a lightly referenced overview of why disasters occur and how to stop them, irrespective of contemporary climate change.

First, the concept of 'natural disaster' is challenged, explaining why disasters are rarely natural. Then, the role of climate change is examined. Finally, explanations are given in terms of choices for tackling disasters. A further reading list at the end points to summaries and resources to delve deeper into the baseline, references, and history of disaster research.

Natural disasters?

Nature always produces and always has produced environmental phenomena and processes such as landslides, rockfalls, storms, earthquakes, floods, volcanic eruptions, wildfires, droughts, avalanches, and mudslides. These environmental phenomena and processes are often termed "hazards", since they can be dangerous to society. Sometimes with hazards, people die, livelihoods are disrupted, and infrastructure is damaged, leading to emergency response and media headlines, calling it a "disaster"—which it is. At other

times, few impacts on society are witnessed, so there is no disaster and we can enquire whether the phenomenon or process was even a hazard. Why does this difference in human impacts occur, frequently with environmental phenomena and processes displaying similar parameters?

The reason is whether or not everyone encountering the environmental phenomenon or process can cope with it. If everyone can, then a flood is simply a lot of water, not a disaster, or the earth shakes, but buildings do not collapse. This aspect of coping, of how society deals or cannot deal with a potential hazard, determines the disaster or absence of one. Having or not having possibilities to deal with the environment refers to vulnerability, of being vulnerable to something, in this case a potential hazard. Being vulnerable to a hazard means not having the resources, opportunities, choices, or power to evacuate from a floodplain or to build or retrofit earthquake-resistant structures (Hewitt, 1983; Lewis, 1999). Societal actions have set up people and communities to be harmed by environmental phenomena and processes that then become hazards.

Vulnerability, no matter what nature does, could be poorly constructed buildings, breaking planning regulations, not having (or not being able to afford) insurance, poor communication of warnings, or fearing assault while evacuating or while in an evacuation shelter. People are frequently discriminated against or marginalised based on gender, sex, sexuality, disability, ethnicity, race, language(s), religion, or other personal factors. This situation reduces people's options, opportunities, resources, and societal power so that they are less able to choose where they live, how they live, and what they do day-to-day, including preparing for and responding to a typical environmental phenomenon such as a tornado or tsunami.

To improve this situation so that society lives with (rather than dies from) hazards, or more to the point, lives in such a way that the environment is less hazardous, the choice of those with power, resources, and opportunities ought to be to tackle the causes of vulnerabilities. For instance, for people with disabilities, everyone's needs could be met by ensuring that warnings are issued across multiple media and communication forms while evacuation routes and shelters remain suitable for access irrespective of a person's abilities, including mobility. Stopping everyday sexism, everyday racism, and everyday homophobia means that everyone participates in teaching, learning, and acting to build safer communities. Enacting and enforcing design, construction, and planning regulations that factor in nature's varieties keeps infrastructure functioning and reduces livelihood disruption.

One tagline demonstrating this approach is that earthquakes do not kill people, but collapsing infrastructure does. Earthquakes happen quickly, yet it takes a long time and amorphous societal processes for the urban planning, building codes, and construction to combine so that structures collapse and kill people. Therefore, the 400-year or 500-year earthquake does not refer to the geological return period, but to the time required to build a location and society that is devastated by an earthquake that was known must manifest some day (Oliver-Smith, 1979). In tandem, the specific accelerations and forces that a structure experiences during a tremor are determined not just by the earthquake's parameters, but also by how the ground around the building and the building itself are engineered (Spence and So, 2021). That is, the hazard parameters leading to problems are determined partly by infrastructure design.

People with power, opportunities, and resources make choices to create settlements,

structures, and societies that are vulnerable to nature, such as in burnable ecosystems without considering fires and on unstable slopes without considering landslides. They then force people to live there or give few options for moving or improving. They pass laws, formulate monitoring and enforcement mechanisms for those laws, decide who can go to school, and continue systems of employment with huge wage gaps. When those decisions, as they must, create vulnerabilities to hazards—or create or exacerbate hazards—then those with less power, opportunities, and resources end up suffering when their business burns, their home collapses, or public transit ceases to function. This is a disaster, with nature involved much less than society in the cause.

Thus, the phrase “natural disaster” is a misnomer. They are just “disasters”.

Climate change

Since disasters are not caused by the environment, does climate change matter? Climate, by definition, is weather parameters averaged over decades and so, by definition, climate change is weather statistics changing over decades (IPCC, 2021-2022). Human activity is affecting the climate rapidly and substantively (IPCC, 2021-2022) to the point that changes in specific weather can be attributed to humanity's influence on the climate (Herring et al., 2021). Does changing weather mean changing disasters?

Disasters are not natural, thus weather does not cause disasters, and hence different weather or changing weather does not cause disasters. Consequently, by definition, even though it affects the weather, climate change does not cause disasters. As an example, human-caused climate change is decreasing tropical cyclone frequency while increasing intensity (Chand et al., 2022). Even without a tropical cyclone, greater rainfall

intensity is appearing in many places, sometimes augmenting flooding. Yet neither storms, nor rain-fall, nor flooding becomes a problem unless people are vulnerable.

Some people cannot have access to knowledge about floodplains, cannot afford to move out of the floodplain, or lack the resources to implement flood risk reduction measures. Kick-backs might permit houses to be built in floodplains without factoring in possible flood damage or evacuation routes. In these instances, a flood transforms into a disaster because of human decisions, not because of the water or the changing water. Human-caused climate change affects none of these human decisions and actions. Irrespective of climate change, people with power, opportunities, and resources can decide to reduce vulnerabilities by incorporating flood resistance measures into infrastructure, by paying wages which give people choices for where they live, and by ensuring that hazard-related information is available and accessible—plus, people have the education, time, and resources to use it.

Heat-humidity is one major exception to the rule that climate change does not cause disasters. Human beings have physiological limits above which we cannot survive heat-humidity-time combinations, with those episodes increasing in recent years and being directly attributed to human-caused climate change (Marx et al., 2021). 24/7 cooling or moving far away are the main options to survive, yet many cannot afford either option while others such as agricultural and construction workers must be on-site and outdoors to earn money. Their choice is to risk their life or their livelihood. As always, the poor suffer the most. The only option to avoid these climate change caused disasters is to reduce greenhouse gas emissions and increase their uptake, so that we stop human-caused climate change.

Reducing vulnerability

Irrespective of heat-humidity-time combinations and other lethal factors from human-caused climate change, the Earth still has weather, tectonic motion, and other environmental phenomena and processes. They have been linked to human-caused disasters since humanity has existed. From Mount Vesuvius' 79 AD eruption to Algeria's 2022 wildfires, those who suffer the most tend to have the fewest options for countering their vulnerability which was mostly created by others. It takes a long time to build these settlements and societies, meaning that it takes a long time to make or counter the vulnerabilities which cause disasters.

As Rousseau speculated in a letter to Voltaire regarding Lisbon's 1755 earthquake and tsunami (Rousseau, 1756), if a city does not exist where nature rumbles, would people suffer? If the city had been built differently, would fewer people have died? When people reacted improperly after the initial shaking, why would nature be blamed for human decisions? Today, we ask and answer: What can and should we do to avert these adverse consequences? The key is making choices—notably those with the power, opportunities, and resources to do so, to reduce everyone's vulnerabilities.

This approach is a long-haul journey. We must choose to improve equity so that people have the time, money, knowledge, and impetus to improve their location's and livelihood's resistance to hazards. We must choose to reduce prejudice so that anyone can lead their community's risk mapping, no matter what their personal characteristics. Due to the time required to enact these changes once the choices are made, all disasters occur slowly. Fast-onset disasters are as imaginary as natural disasters—even where environmental events appear rapidly, such as tornadoes and tsunamis.

This is true at the planetary scale. For possible near-Earth object strikes, we know exactly what to do and how to do it. A field called 'planetary defence' explains the options for monitoring for and responding to threats (Schmidt, 2019), so they are still not 'natural disasters'. Yet there are limits, since other phenomena are less amenable to human actions. A supernova or gamma-ray burst from a nearby star offers little warning and little option for Earth-wide vulnerability reduction. Human extinction would be likely. These phenomena, and many others, are inescapable hazards leading to truly 'natural' (and rapid-onset) disasters.

Aside from these few, yet ever-present and cataclysmic, exceptions, society can and should choose to act to reduce vulnerabilities in order to stop disasters. Since the process of generating and maintaining vulnerabilities takes a long time, disasters are long-term processes. Since this disaster process always takes a long time to build up, disasters are not extreme, unusual, or unpredictable events originating in nature or the environment (Hewitt, 1983). Fundamentally, disasters are not events. They are the common, everyday, often unadmitted vulnerability conditions in which we all live and are often powerless to stop. By accepting that disasters are not natural, but are caused by society, we can avoid making disastrous choices.

Author's address/Anschrift des Verfassers:

Ilan Kelman
University College London
and University of Agder
London, U.K. and Kristiansand, Norway
ilan_kelman@hotmail.com

References/Literatur:

- BALL, N. (1975).
The myth of the natural disaster. *The Ecologist* 5: 368-369.
- CARR, L.J. (1932).
Disaster and the sequence-pattern concept of social change. *American Journal of Sociology* 38: 207-218.
- CHAND, S.S., WALSH, K.J.E., CAMARGO, S.J., KOSSIN, J.P., TORY, K.J., WEHNER, M.F., CHAN, J.C.L., KLOTZBACH, P.J., DOWDY, A.J., BELL, S.S., RAMSAY, H.A., MURAKAMI, H. (2022).
Declining tropical cyclone frequency under global warming. *Nature Climate Change* 12: 655-661.
- HERRING, S.C., CHRISTIDIS, N., HOELL, A., HOERLING, M.P., STOTT, P.A. (EDS.) (2021).
Observations of the rate and acceleration of global mean sea level change. Explaining extreme events in 2019 from a Climate Perspective. *Bulletin of the American Meteorological Society* 102: S1-S112.
- HEWITT, K. (Ed.). (1983).
Interpretations of Calamity from the Viewpoint of Human Ecology. London: Allen & Unwin.
- IPCC (2021-2022).
Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).
- LEWIS, J. (1999).
Development in disaster-prone places: Studies of vulnerability. London: Intermediate Technology Publications.
- MARX, W., HAUNSCHILD, R. BORNMANN, L. (2021).
Heat waves: a hot topic in climate change research. *Theoretical and Applied Climatology* 146: 781-800.
- O'KEEFE, P., WESTGATE, K., WISNER, B. (1976).
Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature* 260: 566-567.
- OLIVER-SMITH, T. (1979).
Post Disaster Consensus and Conflict in a Traditional Society: The 1970 Avalanche of Yungay, Peru. *Mass Emergencies* 4: 39-52.
- PRINCE, S.H. (1920).
Catastrophe and Social Change. Doctoral Dissertation, Columbia University, U.S.A.
- ROUSSEAU, J.-J. (1756).
Rousseau à François-Marie Arouet de Voltaire. *Lettre 424*, le 18 août 1756.
- SCHMIDT, N. (Ed.) (2019).
Planetary defense: global collaboration for defending Earth from asteroids and comets. Switzerland: Springer.
- SPENCE, R., SO, E. (2021).
Why Do Buildings Collapse in Earthquakes? Building for Safety in Seismic Areas, Chichester: John Wiley & Sons.
- TORRY, W.I. (1979).
Hazards, hazes and holes: a critique of The Environment as Hazard and general reflections on disaster research. *Canadian Geographer* 23: 368-383.

Further reading

- Disaster Research Archives <https://ilankelman.org/disasterarchives.html>
- KELMAN, I. (2022). *Disaster by Choice*. Oxford: Oxford University Press.
- KELMAN, I. (Ed.) (2022).
Disaster Anti-Lexicon. Version 5, 26 July 2022 (Version 1 was 7 November 2019). Downloaded from <http://www.ilankelman.org/miscellany/Disaster-AntiLexicon.doc>
- KELMAN, I. (Ed.) (2020).
Disaster Lexicon. Version 9, 8 June 2020 (Version 1 was 10 January 2007). Downloaded from <http://www.ilankelman.org/miscellany/DisasterLexicon.doc>
- KELMAN, I., GAILLARD, J.C., MERCER, J. (2015).
Climate Change's Role in Disaster Risk Reduction's Future: Beyond Vulnerability and Resilience. *International Journal of Disaster Risk Science* 6: 21-27.

KELMAN, I., GAILLARD, J.C., LEWIS J., MERCER, J. (2016).
Learning from the history of disaster vulnerability and resilience research and practice for climate change. *Natural Hazards* 82: S129-S143.

UNDRR (2022).
DRR Early Days Interviews. Geneva: UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction), https://www.youtube.com/watch?v=PvIHSn-vDyl&list=PLBDwPnveHho-jPY_1mzmOMpIV13gdtG4

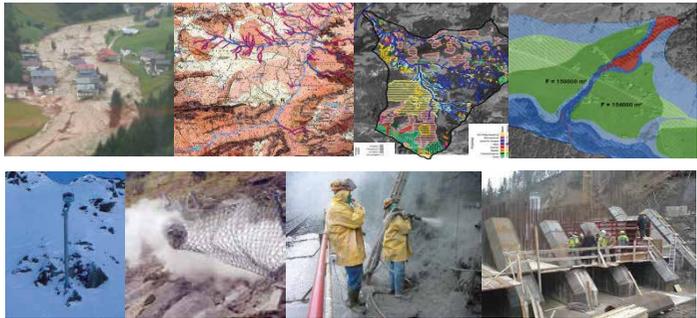
UNDRR (2022).
The early engagement of the United Nations in disaster risk reduction (1970-2000): a brief history. Geneva: UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction).

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). <https://www.undrr.org>



ingenieurgesellschaft
für naturraum - management
GmbH & Co KG

- **Unsere Leistungen im Naturgefahren – Management:**
Regional- u. Gefahrenzonenplanungen, Schutzkonzepte, Gutachten, Einreichplanungen, Ausschreibungen, Umsetzungsbegleitung /-kontrolle
- **Weitere Bereiche:**
Umwelttechnik, Rohstoff- u. Deponieprojekte, Freizeitinfrastruktur- u. Sportstättenplanungen



Maria-Theresien-Straße 42a, A - 6020 Innsbruck
Tel.: ++43(0)512/342725-0 Mail: office@inn.co.at Web: www.inn.co.at

Klimaresiliente Raumplanung in den Alpen

An analysis of the integration of climate change adaptation and climate resilience in spatial planning systems and practice in the Alpine region

Zusammenfassung:

Die Raumplanung nimmt eine Schlüsselrolle bei der Klimawandelanpassung ein. Sie unterstützt eine klimaresiliente Entwicklung und trägt damit wesentlich zur Risikoprävention bei. Im Rahmen der EU-Strategie für die Alpenregion (EUSALP) hat die Aktionsgruppe 8 gemeinsam mit der Technischen Universität Wien eine Gesamtanalyse des Status Quo der klimaresilienten Raumplanung erarbeitet. Das Projekt beinhaltet eine Sekundäranalyse der Klimasignale im Alpenraum, identifiziert die Rolle der Raumplanung zur Klimawandelanpassung und analysiert die Umsetzung der klimaresilienten Raumplanung in Forschungsprojekten und Strategiedokumenten. Im Ergebnis kristallisieren sich drei übergeordnete Handlungsfelder heraus: Entwicklung von Anpassungspfaden sowie Verbesserung der sektoralen Kooperation, Abhängigkeiten von ‚nature-based solutions‘ identifizieren und Etablieren eines iterativen Lernprozesses.

Abstract:

Spatial planning is a key sector in climate change adaptation that supports a climate resilient development, which is an essential component of hazard prevention. Under the EU-Strategy for the Alpine Region (EUSALP), action group 8 developed together with the Technical University of Vienna an overall analysis of the status quo of climate resilient spatial planning. The project contains a secondary analysis of the climate signals in the Alps, identifies the role of spatial planning for climate change adaptation and analyses the implementation of climate resilient spatial planning in research projects and policy documents. As a result, three overall fields of action emerge: developing adaptation pathways and improving sectoral cooperation, identifying dependencies on nature-based solutions and establishing an iterative learning process.

Stichwörter:

Raumplanung,
Klimawandel,
Klimawandelanpassung,
Alpen

Keywords:

spatial planning, climate change,
climate change adaptation, Alps

Einleitung

Die Alpen sind eine besonders klimasensible und vulnerable Region Europas (Jacob et al. 2014). Die Auswirkungen des Klimawandels sind deutlich spür- und messbar, die Durchschnittstemperaturen steigen rasch und die Gletscher schmelzen schneller als in anderen Gebieten (Gobiet et al, 2014). Gleichzeitig sind die Menschen in den Alpen bereits jetzt einer Vielzahl an Naturgefahrenprozessen ausgesetzt. Diese werden durch den Klimawandel weitgehend nachteilig beeinflusst. Das Naturgefahrenmanagement ist daher gefordert Dynamiken im Zusammen-

hang mit dem Klimawandel zu integrieren und die Raumplanung wird hier gemeinhin als ein Schlüsselbereich angesehen, um eine klimaresiliente räumliche Entwicklung zu erreichen.

Die Europäische Strategie für die Alpenregion (EUSALP) ist sich dieser Tatsache bewusst und hat die Raumplanung zu einem ihrer Schwerpunkte gemacht. Die Entwicklung einer gemeinsamen Raumplanungsperspektive für den Alpenraum wurde dafür als übergeordnetes Ziel festgelegt, wobei Raumplanung in den einzelnen Mitgliedsländern der EUSALP sowohl in der Gesetzgebung als auch im Vollzug stark fragmentiert ist. Die Europäische Union hat hier formell



Abbildung 1: Bereich der Europäischen Strategie für die Alpenregion, Quelle: EUSALP (2022).

Figure 1: Area of the EU Strategy for the Alpine Region, source: EUSALP (2022).

keine Zuständigkeit und unterstützt daher in erster Linie Initiativen zur territorialen Kohäsion und Koordination durch Finanzierungsmechanismen. Eine freiwillige Kooperation in der Raumentwicklung innerhalb der EUSALP kann einerseits zu einem prosperierenden Alpenraum beitragen und andererseits eine klimaresiliente Entwicklung forcieren.

Im Rahmen des INTERREG Alpine Space Programm „AlpGov2“ hat sich die EUSALP Aktionsgruppe 8 „Risk Governance“ mit dem Thema Raumplanung und Klimawandel auseinandergesetzt. Dazu hat die AG8 eine Gesamtanalyse des Status Quo der klimaresilienten Raumplanung in den Alpen, unter der Leitung der Technischen Universität Wien, in Auftrag gegeben. Das Projekt soll den Austausch von Wissen und Lösungsansätzen zur Integration von Anpassungsmaßnahmen in der Raumplanung zwischen den EUSALP Mitgliedern fördern.

Methodik

Das Projekt zielt auf den EUSALP Raum insgesamt ab und deckt daher nicht die einzelnen nationalen Planungssysteme und spezifischen Planungspraktiken hinsichtlich einer resilienten Raumentwicklung im Detail ab. Ziel ist es vielmehr, den allgemeinen Status Quo zwischen der Verbindung von Klimawandelanpassung sowie Naturgefahrenmanagement und Raumplanung zu evaluieren. Diese Betrachtung orientiert sich an fünf Leitfragen:

- Welche Klimasignale in den Alpen sind relevant für die Raumplanung und erfordern Anpassungen der Planungsstrategien und -instrumente?
- Wie kann die Raumplanung in den einzelnen Alpenländern die übergeordneten

Ziele der Klimawandelanpassung mit den bestehenden Planungsinstrumenten und -verfahren umsetzen?

- Welche Planungsinstrumente und Entscheidungsgrundlagen sind bezüglich einer klimaresilienten Raumplanung besonders von Bedeutung?
- Welche Planungsinstrumente können in welchem Umfang und in welchem räumlichen Kontext Klimaresilienz verbessern?
- Welche Best-Practice Beispiele gibt es im Alpenraum, die die Integration von Klimawandelanpassung und Klimaresilienz in der Raumplanung zeigen?

Die Studie erläutert zu Beginn in einer Sekundäranalyse die erwarteten und beobachteten Klimasignale im Alpenraum und identifiziert die Relevanz und Rolle der Raumplanung zur Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels. Basierend auf diesen Ergebnissen, analysiert die Studie die aktuelle Umsetzung der Klimawandelanpassung, im Sinn einer klimaresilienten Raumplanung, in nationalen und internationalen Forschungsprojekten und Strategiedokumenten. Hier sind vor allem die nationalen Anpassungsstrategien und Aktionsprogramme der Alpenstaaten Deutschland, Frankreich, Italien, Lichtenstein, Österreich, Slowenien und der Schweiz von Bedeutung. Um die Umsetzungsaktivitäten in der Praxis besser verstehen zu können wurden Interviews mit Planer:innen auf nationaler, regionaler und lokaler Ebene sowie mit Expert:innen für die Koordinierung von Anpassungsmaßnahmen durchgeführt. Zusätzlich wurde im Oktober 2021 ein Workshop in der Region Walgau in Vorarlberg organisiert, um näher auf die lokale und regionale Perspektive der Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen eingehen zu können. Im Zuge des Workshops

diskutierten lokale und regionale Akteur:innen der Klimawandelanpassung sowie Vertreter:innen der Politik und bestehender Initiativen gemeinsam mit den Teilnehmer:innen, welche Ansatzpunkte für eine klimaresiliente Raumentwicklung praktikabel und vielversprechend sind.

Ergebnisse

Die Untersuchung der relevanten Klimasignale und der Auswirkungen des Klimawandels auf die Alpenregion, legt die Handlungsfelder für die Raumplanung auf den verschiedenen staatlichen Ebenen dar. Zudem zeigt sich, dass eine Differenzierung der Anpassungsansätze nach räumlichen, sozialen und wirtschaftlichen Kriterien besser geeignet ist, als uniforme Maßnahmen auf gesamtstaatlicher Ebene.

Sowohl die Analyse der Forschungsprojekte und Strategiedokumente als auch die Interviews ergeben klar, dass das Naturgefahrenmanagement mittlerweile umfassend in den nationalen Planungssystemen verankert ist und diffizile, rechtliche Mechanismen bestehen (Widmungsverbote, bauliche Entwicklung unter Auflagen etc.). Der Klimawandel bringt hier eine dynamische Entwicklung was die Naturgefahrenexposition betrifft mit sich, wobei durch den Prognosecharakter nur bedingt konkrete Aussagen getroffen werden können. Diese Veränderung der Grundlagen für ein Naturgefahrenmanagement in der Planung wird de facto nicht explizit angesprochen. Die Raumplanung ist hier aber keineswegs allein mit dieser Herausforderung. Unsicherheiten bei der Beurteilung von Gefahrenbereichen und Ereignisjährlichkeiten, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel stehen, werden kaum in Gefahrenzonenplänen und anderen Grundlagenkarten dargestellt. Das erschwert sowohl die Planung wie Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen, die

immer sachlich zu argumentieren sind und natürlich auch kosteneffizient im Hinblick auf ihre Wirkung sein sollen.

Klimaresilienz als Fähigkeit der Strukturen, die durch die Raumplanung etabliert werden, klima-bedingte Umweltveränderung abzufedern ist in planerischen Konzepten und Strategien de facto noch nicht integriert. Auch die Klimawandelanpassung – ihres Zeichens essentieller Baustein einer klimaresilienten Raumentwicklung – ist kaum explizit in der Raumplanung verankert. Ebenso wird kaum Bezug auf die sich verstärkenden Nutzungskonflikte Bezug genommen (z.B. Flächen für Hochwasserretention, Sicherung von Freiflächen etc.). Auch transnationale Perspektiven der Raumentwicklung werden hier bisher kaum forciert und im Allgemeinen herrschen nach wie vor etablierte sektorale Sichtweisen vor.

Raumplanung im Sinn der Siedlungsentwicklung ist in allen Alpenstaaten in erster Linie eine Aufgabe der Kommunen und oft der regionalen Ebene (Länder, Kantone). Obwohl Anpassungsziele und -maßnahmen auf den nationalen Ebenen etabliert sind, erreichen diese die regionale und lokale Umsetzungsebene nur bedingt. Auch werden Planungsinstrumente zunehmend zur Sicherung von Klimadienleistungen eingesetzt, ihre Wirksamkeit ist aber in den meisten Alpenländern aktuell in Diskussion und Überprüfung. Die Notwendigkeit von Anpassungsstrategien wird von den verantwortlichen, politischen und fachlichen Akteur:innen bereits erkannt, die Umsetzung der Klimawandelanpassung ist aber gerade im Planungsumfeld aufgrund der vielfältigen Interessen und Verwaltungsebenen besonders komplex. Initiativen bestehen in allen Alpenstaaten und vor allem viele Städte sind hier als „Forerunner“ zu bezeichnen und setzen sich nachdrücklich für eine klimaresiliente Raumentwicklung ein.

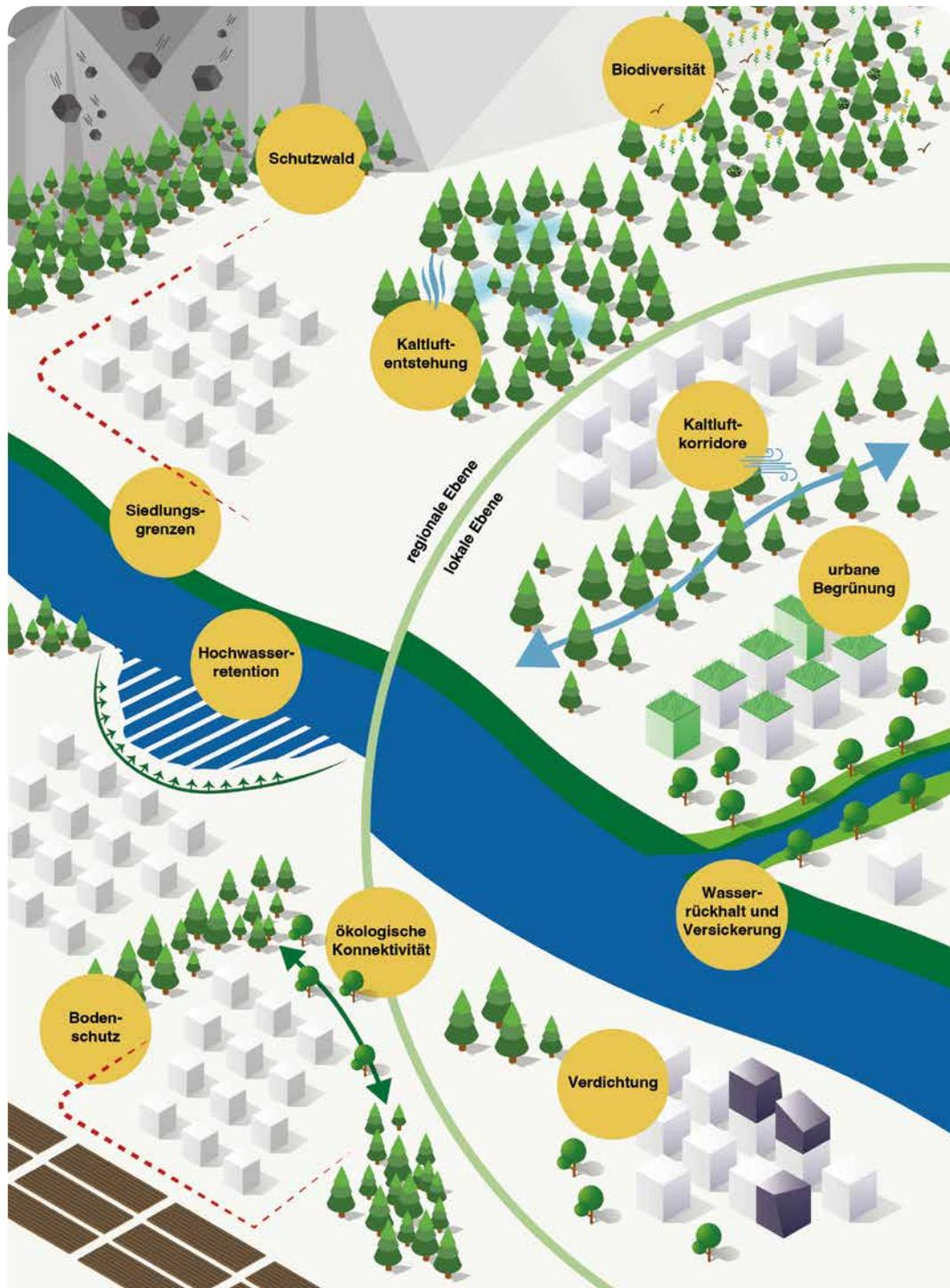


Abbildung 2: Auswahl an Maßnahmen für eine klimaresiliente Raumentwicklung, Quelle: Schindelegger et al. (2022)

Figure 2: Selection of measures for a climate resilient spatial development, source: Schindelegger et al. (2022)

Fallbeispiel Walgau/Vorarlberg

Um näher auf die lokale und regionale Perspektive eingehen zu können, wurde ein Workshop in der Region Walgau in Vorarlberg organisiert. Die Region wurde als Fallbeispiel ausgewählt, da sie einerseits bereits unmittelbar mit den Folgen des Klimawandels konfrontiert ist und andererseits sich aktiv um eine klimasensible Raumplanung bemüht.

Die Zunahme an Hitzetagen und die Veränderung der saisonalen Niederschlagsmengen trägt aktuell zu einem Anstieg an Dürren, Starkregenereignissen und Schneefallereignissen bei. Die Situation wird sich entsprechend der Prognosen verschärfen, Anpassungsmaßnahmen sind somit unabdingbar. Im Walgau haben sich daher 13 Gemeinden zu einem Regionalverband „IM WALGAU“ zusammengeschlossen und koordinieren ihre Siedlungsentwicklung und Infrastrukturbereitstellung. Mit der Teilnahme des Regionalverbands am KLAR!-Projekt (Klimawandel-Anpassungs-Modellregionen) wird diese Kooperation nunmehr auch um den Bereich der Klimawandelanpassung erweitert.

Teil des Workshops war neben der Präsentation der regionalen Zusammenarbeit der Gemeinden auch die Diskussion von lokalen und regionalen Akteur:innen, die für die Umsetzung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen zuständig sind, mit den nationalen und internationalen Teilnehmer:innen. Dabei hat sich herausgestellt, dass im Alpenraum ähnliche Herausforderungen für die Umsetzung bestehen und dass Lernen voneinander – insbesondere auf lokaler Ebene – als wesentlicher Schritt angesehen wird.

In allen Alpenstaaten nehmen Gemeinden eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung der räumlichen Entwicklung ein und sind damit auch zentrale Akteure der Klimawandelanpassung. Die nationale bzw. transnationale

Ebene hat bisher kaum formale Kompetenzen. Zudem fehlen abgestimmte Vorgangsweisen und klare Verantwortlichkeiten im Umgang mit den Klimawandelfolgen. Die Maßnahmen und Aktivitäten hängen bisher oft von (freiwilligen) lokalen Initiativen ab, da es kaum koordinierte Klimawandelanpassungs-Ansätze zwischen den verschiedenen sektoralen Bereichen gibt. Gleichzeitig erfordert die Erarbeitung und Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen Fachwissen, Zeit und regionale Zusammenarbeit, denn isolierte lokale Lösungen alleine reichen naturgemäß nicht aus.

Das Fallbeispiel Walgau zeigt, dass eine etablierte, regionale Kooperation sehr förderlich ist, um Anpassungsmaßnahmen in die Raumplanung zu integrieren. Zusätzlich unterstützt das Land Vorarlberg die Region durch Beratung und Information über die Einflüsse und Auswirkungen des Klimawandels. Dadurch sind im Walgau übergreifende Klimawandelanpassungsziele vorhanden und in einem regionalen Strategiedokument festgehalten, aber eine konsequente Umsetzung steht noch aus. Das liegt aber in der Natur solcher Zielsetzungen, die nicht einem abgeschlossenen Projekt, sondern vielmehr einem kontinuierlichen Prozess entsprechen.

Empfehlungen

Die Studie stellt einerseits die bestehenden Schwachstellen der Integration von Klimaresilienz in die Raumplanung im Alpenraum, andererseits die vielfältigen, existierenden Initiativen dar. Dabei wird deutlich, dass hier noch viele Aspekte fachlich zu klären, sind aber gleichzeitig bereits eine Umsetzung von Maßnahmen erforderlich ist. Derzeit ist eine klimaresiliente Raumentwicklung eher ein Nebenprodukt zahlreicher Initiativen und Bemühungen, welche vor allem durch lokale Akteur:innen aus Politik, Verwaltung und Wissen-

schaft getragen werden. Aus diesen erfolgreichen Ansätzen sollte ein sogenanntes „scaling-up“ erfolgen, um ein institutionelles Lernen nach oben zu ermöglichen.

Die Studie identifiziert daher drei allgemeine Handlungsfelder zur besseren Einbindung der Klimawandelanpassung in die Raumplanung und zur Förderung einer klimaresilienten Raumentwicklung in den Alpen:

1. Entwicklung von sogenannten Anpassungspfaden, die die Raumplanung als wesentliches Aktivitätsfeld neben anderen Sektoren miteinbeziehen und auf einer umfassenden Koordinierung planungsrelevanter Fachstellen beruhen: Die Raumplanung muss in eine problemorientierte Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen integriert werden, die auf sektorübergreifender Kooperation basiert.
2. Identifizierung der Abhängigkeiten von sogenannten „nature-based-solutions“, um Frei- und Naturräume, die wichtige Anpassungsleistungen erfüllen, in Planungsentscheidungen integrieren zu können: Die Raumplanung muss Freiflächen und naturnahe Flächen, die einen Schutz vor Naturgefahren gewährleisten bzw. Klimaservices erbringen (das sind vor allem Bergwälder) besser in ihren kartographischen Instrumenten darstellen und sicherstellen, dass Schutzfunktionen in Planungsentscheidungen berücksichtigt werden.
3. Etablieren eines iterativen Lernprozesses, um resiliente Entwicklung zu fördern: Umsetzungsprozesse müssen überwacht und evaluiert werden, um institutionelles Lernen zu ermöglichen und die Klimawandelanpassung insgesamt zu fördern und zu verbessern.

Weitere Informationen und Details

Weiterführende Informationen und Details zum Projekt können über die EUSALP Webseite abgerufen werden: <https://www.alpine-region.eu/results/climate-resilient-spatial-planning-alps>. Des Weiteren stehen unter diesem Link auch folgende Publikationen kostenlos zur Verfügung:

- Studie „Climate-Resilient Spatial Planning in the Alps – An analysis of the integration of climate change adaptation and climate resilience in spatial planning systems and practice in the Alpine region“
- Policy brief „Climate resilient development – Foster adaptation through spatial planning in the EUSALP area“
- Video-Clip zur Perspektive aus der Region Walgau „Regional actions in climate change adaptation“

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Katharina Rieder
BML – Abt. III/4 Wildbach- und Lawinverbauung und Schutzwaldpolitik
Marxergasse 2, 1030 Wien
katharina.rieder@bml.gv.at

Dr. Arthur Schindelegger
TU Wien
Forschungsbereich Bodenpolitik und Bodenmanagement
Karlgasse 13, 1040 Wien
arthur.schindelegger@tuwien.ac.at

DIⁱⁿ Barbara Steinbrunner, MSc
TU Wien
Forschungsbereich Bodenpolitik und Bodenmanagement
Karlgasse 13, 1040 Wien
barbara.steinbrunner@tuwien.ac.at

Literatur/References:

- EUSALP EU Strategy for the Alpine Region (2022). Platform of Knowledge, <https://www.alpine-region.eu/p/dashboard>.
- GOBIET, A., KOTLARSKI, S., BENISTON, M., HEINRICH, G., RAJCAK, J., AND STOFFEL, M. (2014). 21st Century Climate Change in the European Alps - A Review. *The Science of the Total Environment* 493: 138-151.
- JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., BÖSSING CHRISTENSEN, O., BOUWER, L.M., BRAUN, A., COLETTE, A., DE'QUE', M., GEORGIEVSKI, G., GEORGOPOULOU, E., GOBIET, A., MENUT, L., NIKULIN, G., HAENSLER A., HEMPELMANN, N., JONES, C., KEULER, K., KOVATS, S., KRÖNER, N., KOTLARSKI, S., KRIEGSMANN, A., MARTIN, E., MEIJGAARD, VAN E., MOSELEY, C., PFEIFER, S., PREUSCHMANN, S., RADERMACHER, C., RADTKE, K., RECHID, D., ROUNSEVELL, M., SAMUELSON, P., SOMOT, S., SOUSSANA, J., TEICHMANN, C., VALENTINI, R., VAUTARD, R., WEBER, B., YIOU, P. (2014). EURO-CORDEX: New High-Resolution Climate Change Projections for European Impact Research. *Regional Environmental Change* 14(2): 563-78.
- SCHINDELEGGGER, A., ERTL, M. (2022). Climate Resilient Development. Foster adaptation through spatial planning in the EUSALP area. Policy brief June 2022.
- SCHINDELEGGGER, A., STEINBRUNNER, B., ERTL, M. (2022). Climate-Resilient Spatial Planning in the Alps. EUSALP, Action Group 8. Im Internet unter: https://www.alpine-region.eu/sites/default/files/uploads/result/2544/attachments/clisp-alp_report_final.pdf.



Gunz ZT GmbH
Ziviltechniker für Forst- und Holzwirtschaft,
Wildbach-, Lawinen- und Erosionsschutz,
allg. beeid. und gerichtl. zert. Sachverständiger

4400 Steyr, Brucknerplatz 2

Tel.: 07252/42484 E-Mail: office@gunz.at Homepage: <http://www.gunz.at>

DOUGLAS MARAUN, MARTIN JURY

Der Klimawandel und Naturgefahren im Alpenraum

Climate Change and Natural Hazards in the Alpine Region

Zusammenfassung:

Der Klimawandel wird auch im Alpenraum voranschreiten. Der Temperaturanstieg wird am stärksten in den Höhenlagen sein. Im Winter werden Niederschlagsmengen zunehmen, im Sommer tendenziell abnehmen. Infolge des Klimawandels werden Hitzewellen häufiger, heißer und länger, Starkniederschläge intensiver, Dürren trockener und länger. Gletscher werden weiter stark schrumpfen, der Permafrost tauen. Diese klimatischen Änderungen wirken sich auch auf Naturgefahren aus. Bei Felsstürzen, Steinschlag und Waldbränden kann von einer Zunahme ausgegangen werden. Bei Hochwasser, Muren und Hangrutschungen sind die Zusammenhänge komplexer, die tatsächlichen Auswirkungen können je nach Region, Zeithorizont und Typ variieren. Compound Ereignisse und kaskadierende Risiken stellen eine besondere Herausforderung dar.

Abstract:

Climate change will continue in the Alpine region. Temperature increases will be strongest at high elevation. During winter, precipitation amounts will increase, and decrease during summer. Along with these changes, heatwaves will become more frequent, hotter and longer, heavy precipitation more intense, droughts drier and longer. Glaciers will continue to shrink, permafrost will melt. These climatic changes also affect natural hazards. For rockfalls and wildfires, we expect an increase. For flooding, debris flow and landslides, the relationships are more complex, the actual impacts can vary depending on region, time horizon and type. Compound events and cascading risks pose particular challenges.

Stichwörter:

Klimawandel,
Extremereignisse,
Alpen, Naturgefahren

Keywords:

*climate change, extreme events,
alps, natural hazards*

Einleitung

Viele Studien aus dem Alpenraum zeigen für die letzten Jahrzehnte Veränderungen im Auftreten von Naturgefahren (Hock et al. 2019). Gleichzeitig hat sich das Klima im Alpenraum spürbar gewandelt (Auer et al. 2007). Es drängen sich die Fragen auf, ob der Klimawandel die Ursache dieser Änderungen ist, und wie sich das Auftreten von Naturgefahren in Zukunft verändern wird.

Der Klimawandel ist eine Tatsache (Masson-Delmotte et al. 2021). Es gilt als gesicherter Fakt, dass hauptsächlich der Mensch für den globalen Temperaturanstieg seit den 1970er Jahren verantwortlich ist (Eyring et al. 2021). Wie dieser Klimawandel fortschreitet, hängt stark von den zukünftigen Treibhausgasemissionen des Menschen ab (Lee et al. 2021). Mit den steigenden Temperaturen gehen starke Änderungen im Wasserkreislauf einher (Douville et al. 2021), viele Extremereignisse werden intensiver und/oder häufiger (S.I. Seneviratne et al. 2021). Im Alpenraum reagieren besonders Gletscher und Permafrost sensitiv auf diese Änderungen (Hock et al. 2019) und der Klimawandel hat gravierende Auswirkungen (Bednar-Friedl et al. 2022; Hock et al. 2019).

Auch das Auftreten vieler Naturgefahren wird durch klimatische Bedingungen beeinflusst oder direkt durch extreme Wetterereignisse getriggert (Beniston et al. 2018). Es ist deshalb keine Frage, ob der Klimawandel einen Einfluss auf Naturgefahren hat, sondern welchen.

Einen kausalen Zusammenhang zwischen Klimawandel und Naturgefahren herzustellen ist schwierig. Zwei Punkte müssen dabei untersucht werden: wie beeinflusst der Klimawandel regionale Trends hin zu Bedingungen, die das Auftreten von Naturgefahren ändern können? Und wie beeinflussen diese Klimaänderungen die

Naturgefahren tatsächlich? Gerade die Beantwortung der letzten Frage ist herausfordernd, da der Klimawandel nur einer von vielen Faktoren ist, die das Auftreten von Naturgefahren beeinflussen können. Reine Trendvergleiche sind deshalb in der Regel nicht geeignet, Kausalität herzustellen, sondern müssen immer durch physikalische Überlegungen oder Modellierungen untermauert werden.

Das Ziel dieses Beitrages ist es darzulegen, wie der Klimawandel sich auf das regionale Klima der Alpen, insbesondere auf Extremwetterereignisse, auswirkt, und wie diese regionalen Klimaänderungen das Auftreten von Naturgefahren beeinflussen. Besonderes Augenmerk wird dabei auf physikalische Plausibilisierung gelegt, insbesondere dort, wo es noch große Unsicherheiten gibt.

Klima und Extremwetter im Alpenraum

Regionale Klimaprojektionen, also Simulationen möglicher Klimaänderungen unter bestimmten Szenarien von Treibhausgasemissionen, Aerosolbelastungen und Landnutzungsänderungen, sind noch mit substantiellen Unsicherheiten behaftet, insbesondere bezüglich der Änderungen von Extremereignissen (Doblas-Reyes et al. 2021). Um die Ursachen dieser Unsicherheiten zu verstehen und zu bewerten, soll deshalb zunächst skizziert werden, was eigentlich das Klima im Alpenraum und insbesondere Extremereignisse im heutigen Klima bestimmt.

Das Klima der Alpen wird zunächst durch die Sonneneinstrahlung im Jahresverlauf, die Lage in der Westwindzone und der Position relativ zum Atlantik und Mittelmeer bestimmt. Das Klima ist gemäßigt mit stark ausgeprägten Jahreszeiten, im Westen mit maritimen, im Osten

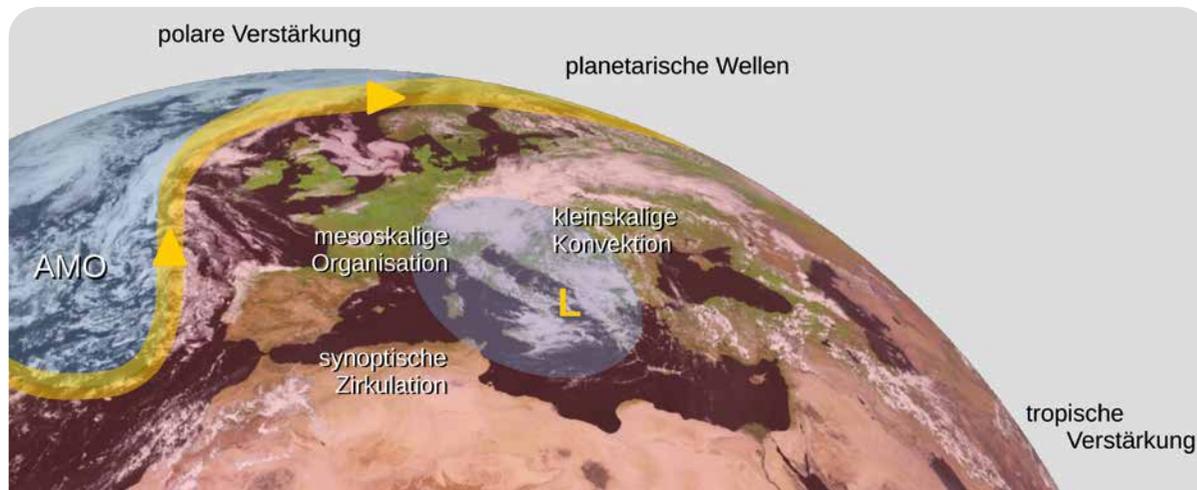


Abbildung 1: Extremwetter entsteht durch meteorologische Prozesse über viele Skalen. Beispiel: Starkniederschläge in der Südoststeiermark, 20. Juni 2009. Foto ©EUMETSAT.

Figure 1: Extreme weather is caused by meteorological processes across many scales. Example: heavy precipitation in southeastern Styria, 20 June 2009. Credit ©EUMETSAT.

kontinentalen, im Süden mediterranen Einfluss. Die Lage in der Westwindzone ist gleichbedeutend mit einem starken Einfluss des polaren und subtropischen Jetstreams. Das komplexe Relief der Alpen erzeugt zum einen eine starke Höhenabhängigkeit des Klimas, zum anderen ausgeprägte Mikroklimata wie z.B. Regenschatten und inneralpine Trockentäler. Die Topographie beeinflusst aber auch das großskalige Wetter selbst. So bewirkt die Lee-Zyklogenese die Entstehung von Genuatiefs im Lee der Südfranzösischen Alpen. Mehr Details finden sich in Schär et al. (1998).

Die Entstehung von Extremwetterereignissen spiegelt diese Komplexität wieder, wie in Abbildung 1 illustriert (siehe Woollings, 2010 für eine umfassende Darstellung). Dargestellt ist die Wetterlage im Spätjuni 2009, als ein abgeschnürtes Höhentief tagelangen Starkregen über dem Osten Österreichs verursachte, der wiederum in der Südoststeiermark mehr als 3000 Hangrutschungen ausgelöst hat (Hornich and Adelwöhrer 2010; Knevels et al. 2020; Maraun et al. 2022). Die loka-

len Gewitter wurden durch die örtliche Topographie begünstigt, die hohe Luftfeuchte setzte in den Aufwinden der Gewitter viel latente Wärme frei, die wiederum die Gewitter antrieb. Die einzelnen Gewitter waren in einem mesoskaligen Muster organisiert, das wiederum durch das abgeschnittene Höhentief bestimmt wurde. Dieses Tief hat sich aus einem Mäander des Jetstreams gebildet, der so eng nach Süden und zurück nach Norden verlaufen ist, dass er vom eigentlichen Jet abgeschnürt wurde. Die Entstehung solcher Mäander, als Teil großer Wellen, die den ganzen Planeten umlaufen, wird schließlich durch die großskaligen Temperaturmuster bestimmt, der Temperatur- und Meereisverteilung im Nordatlantik und insbesondere der Temperaturunterschiede zwischen Arktis und Subtropen, also der Lage und Ausprägung der Polarfront. Gerade die Temperatur des Nordatlantiks ändert sich im Rhythmus der Atlantischen Multidekadischen Oszillation (AMO) und wechselt etwa alle 30 Jahre zwischen einer wärmeren und kälteren Phase. Ist der Ozean käl-

ter, stabilisiert dies die Atmosphäre und kann so Starkniederschläge unterdrücken. Ähnlich sieht es bei anderen Extremereignissen aus. Hitzewellen werden zum Beispiel durch anhaltende blockierende Wetterlagen bestimmt, also ebenfalls große Mäander des Jetstreams und damit verbunden einem stabilen Hochdruckgebiet (Woollings et al. 2018). Lokale Boden-Temperatur-Rückkopplungen verstärken diese: wenn die Hitze den Boden austrocknen lässt, wird weniger Energie zur Verdunstung verbraucht, der Boden und die unteren Luftschichten heizen sich noch stärker auf (Seneviratne et al. 2010).

Unsicherheiten in regionalen Klimaprojektionen

Um regionale Klimaänderungen, insbesondere von Extremereignissen realistisch darzustellen, müssen all diese Prozesse von der globalen Zirkulation bis zu lokalen Rückkopplungen und ihre Änderungen realistisch von Klimamodellen simuliert werden. Um zu beurteilen, welche dieser Änderungen robust sind und wo es noch große Unsicherheiten gibt, ist eine Einteilung in thermodynamische und dynamische Prozesse (Shepherd 2014) sinnvoll. Thermodynamische Prozesse sind dabei alle, die direkt an die Temperatur gekoppelt sind: Schnee schmilzt bei höheren Temperaturen, warme Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen. Dynamische Prozesse beschreiben die atmosphärische Zirkulation, also die Lage, Häufigkeit und Stabilität von Wetterlagen. Auch wenn dynamische und thermodynamische Prozesse sich gegenseitig beeinflussen (Bony et al. 2015; Marotzke et al. 2017), ist zumindest eine grobe Einteilung konzeptionell hilfreich, denn: dominieren thermodynamische Prozesse, können wir in der Regel robuste Aussagen über Klimaänderungen treffen. Dominieren jedoch dynamische Prozesse, sind Klimaprojektionen sehr unsicher.

Warum Projektionen von Wetterlagen

für die mittleren Breiten unsicher sind, lässt sich am Beispiel des Jetstreams skizzieren: die Stärke des Jetstreams und seine Wellenform werden stark vom Temperaturunterschied zwischen der kalten Arktis und den heißen Subtropen bestimmt (Woollings 2010). Im Klimawandel erwärmt sich die Arktis vor allem durch den Verlust des Meereseises, deutlich schneller als die niedrigen Breiten (Lee et al. 2021). Isoliert würde diese Änderung zu einer Abschwächung des Jetstreams und zu stärkeren Mäandern führen (Mann et al. 2018). Allerdings gilt diese Betrachtung nur für die untere Atmosphäre. In der oberen Troposphäre (am Nordpol in etwa 8km Höhe, am Äquator in etwa 15 km Höhe) erwärmen sich jedoch die Tropen deutlich stärker, weil die Gewitter in der innertropischen Konvergenzzone stärker werden und mehr Wärme in die obere Atmosphäre transportieren (Lee et al. 2021). Diese Änderung allein würde zu einer Verstärkung des Jetstreams und zu weniger Mäandern führen. Beide Effekte sind ähnlich stark. Wie der Jetstream sich verändern wird hängt deshalb sehr stark davon ab, welcher dieser Effekte das „Tauziehen“ (Tug of Wars, Barnes and Screen, 2015) gewinnen wird. Wie sich die Wetterlagen der mittleren Breiten im Klimawandel ändern, ist eine der Kernfragen der aktuellen Klimaforschung (Shepherd 2014).

Extremereignisse sind meist durch thermodynamische und dynamische Prozesse bestimmt: die europäische Hitzewelle vom August 2003 entstand durch eine stabile, blockierende Wetterlage (dynamisch), die hohen Temperaturen wurden erreicht, weil der Boden schon zu Beginn der Hitzewelle sehr trocken (thermodynamisch) war (Fischer et al. 2007). Die Starkniederschläge vom Juli 2021 im Westen Deutschlands entstanden durch ein abgeschnürtes Höhentief (dynamisch), die Regenmengen wurden durch die feuchtwarme Luft (thermodynamisch) bestimmt (Kreienkamp et al. 2021).

Vereinfacht gesagt lässt sich also folgendes über solche Hitzewellen und Starkniederschläge im Klimawandel sagen: wie häufig es Wetterlagen wie die von 2003 oder 2021 in der Zukunft geben wird, lässt sich noch ungenau abschätzen. Wenn eine Hitzewelle wie die von 2003 aber im Jahr 2050 auftreten sollte, wäre sie deutlich heißer und trockener; die Starkniederschläge von 2021 wären dann wahrscheinlich deutlich intensiver.

Um quantitative Aussagen über den regionalen Klimawandel treffen zu können, sind Klimamodelle unabdingbar (Chen et al. 2021). Diese nutzen Hochleistungsrechenzentren, um die physikalischen Grundgleichungen von Atmosphäre und Ozean sowie die Wechselwirkungen mit anderen Komponenten des Klimasystems (insbesondere des Bodens) und kleinskalige Prozesse wie Gewitter numerisch zu integrieren (ibid.). Klimamodelle sind dabei angepasste Wettervorhersagemodelle, die bei sich ändernden Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen sowie Landnutzungsänderungen mögliche Wetterentwicklungen über lange Zeiträume simulieren.

Globale Erdsystemmodelle arbeiten auf einem horizontalen Gitter von etwa 100 km. Regionale Klimamodelle erhöhen regional die Auflösung von globalen Modellen. Aktuelle Modelle haben typischerweise eine Auflösung von 10 km bis 25 km. Um Gewitter und die regionale Topographie von Gebirgen darstellen zu können, gibt es seit kurzem Regionalmodelle mit einer Auflösung von ca. 3 km (Prein et al. 2015; Coppola et al. 2020; Ban et al. 2021).

Um epistemische Unsicherheiten – also unser unvollständiges Wissen – in Klimaprojektionen abzubilden, werden Ensembles von mehreren Klimamodellen betrachtet, die möglichst die ganze Spannweite möglicher Änderungen simulieren sollen (Tebaldi und Knutti 2007). Zu den epistemischen Unsicherheiten – die sich durch besseres Verständnis und eine Weiterentwicklung der Klimamodelle verringern lassen – kommen Unsicherheiten durch interne Klimaschwankungen, die sich auf Prognosehorizonten jenseits von etwa 30 Jahren prinzipiell nicht verringern lassen (Hawkins und Sutton 2009). Ins-

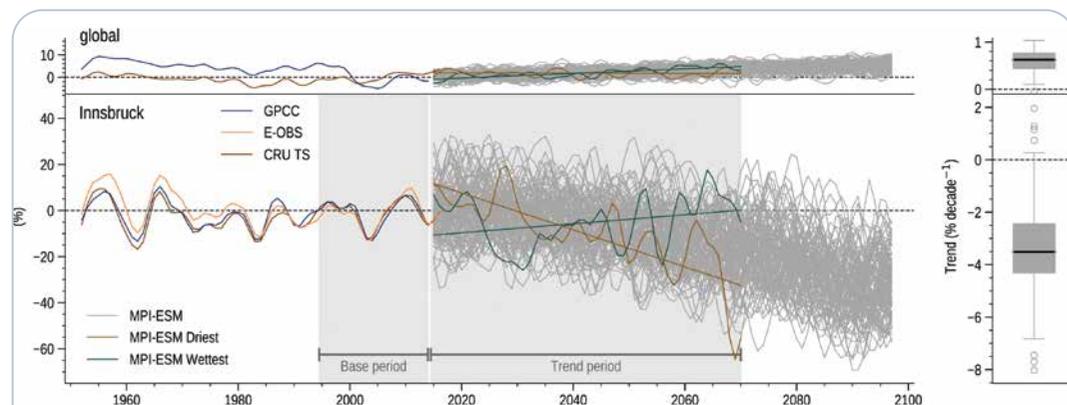


Abbildung 2: Bedeutung von internen Klimaschwankungen für regionale Klimaänderungen am Beispiel von Innsbruck. Graue Linien zeigen einzelne Simulationen mit verschiedenen zufälligen Ausprägungen interner Klimavariabilität. Die grüne und braune Linie zeigen die stärksten positiven und negativen Trends über 50 Jahre. Basierend auf dem MPI large ensemble (Maher et al. 2019).

Figure 2: Relevance of internal climate variability for regional climate change using the example of Innsbruck. Grey lines indicate individual simulations with different random realisations of internal climate variability. The green and brown lines depict the strongest positive and negative trends over 50 years. Based on the MPI large ensemble (Maher et al., 2019).

besondere auf der regionalen Skala sind solche Schwankungen stark ausgeprägt (Maraun 2013). Abbildung 2 verdeutlicht dieses Problem: gezeigt sind 100 Simulationen von Niederschlagsänderungen, die sich nur in der zufälligen Ausprägung interner Klimaschwankungen unterscheiden. Änderungen der global gemittelten Niederschläge sind (thermodynamisch) direkt an die Stärke des Treibhauseffekts gekoppelt (Manabe und Wetherald 1967) und sehr genau zu projizieren. Regional spielen interne Schwankungen eine große Rolle und können erwartete Klimawandeltrends für mehrere Jahrzehnte verstärken (braune Linie) oder sogar umkehren (grüne Linie). Dieser Punkt verdeutlicht auch, dass man beobachtete Klimatrends keinesfalls in die Zukunft extrapolieren sollte. Ebenso bedeutet ein Ausbleiben von Trends über einen längeren Zeitraum nicht, dass es keinen Klimawandel gäbe.

Erwartete Klimaänderungen im Alpenraum

Vor diesem Hintergrund lassen sich Klimaprojektionen für den Alpenraum verstehen und einordnen. Ein wichtiger Teil der im folgenden gezeigten Unsicherheiten lässt sich dabei durch Unsicherheiten in Zirkulationsänderungen, allen voran

im Jetstream erklären. Manche Klimamodelle simulieren eine Änderung hin zu einem stärkeren und zonalen (geraderem) Jetstream, manche eine gegenteilige Änderung. Im Mittel projizieren aktuelle Klimamodelle eine leichte Verschiebung des Jetstreams nach Norden, eine leichte Intensivierung und damit einhergehend zum Beispiel eine Abnahme an blockierenden Wetterlagen in Europa (Lee et al. 2021).

Alle zukünftigen Klimaänderungen hängen stark vom Verhalten des Menschen ab. Im Folgenden wird das Szenario RCP8.5 für das Ende des 21. Jahrhunderts betrachtet. Dieses Szenario stellt einen Worst-case dar, der eintreten könnte, wenn aktuelle Klimaschutzmaßnahmen nicht eingehalten werden und die CO₂-Emissionen bis zum Ende des Jahrhunderts deutlich steigen (van Vuuren et al. 2011). Weltweit wird für dieses Szenario eine Temperaturerhöhung um ca. 5 Grad gegenüber der vorindustriellen Zeit, bzw. um etwa 4 Grad gegenüber der Gegenwart projiziert. Die gezeigten Ergebnisse lassen sich aber für Temperatur und Niederschläge annähernd auf jedes andere Szenario umskalieren (Chen et al. 2021). Für eine Erwärmung um 2 Grad gegenüber heute muss man also regionale Temperatur- und Niederschlagsänderungen entsprechend halbieren.

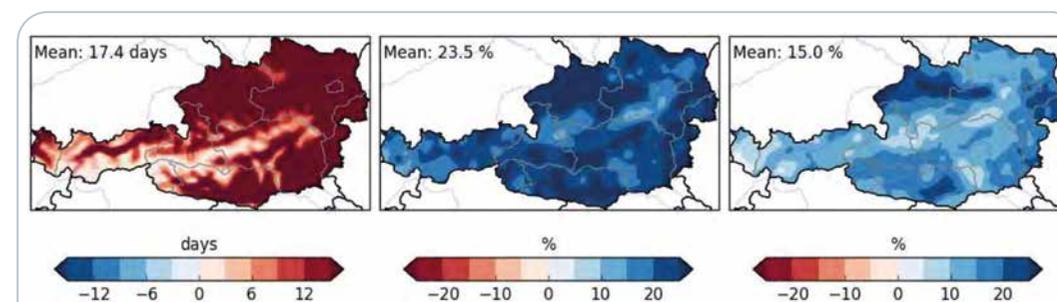


Abbildung 3: Projizierte Änderungen in Hitzetagen ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), jährlichem Maximum der Tagesniederschläge und jährlichem Maximum der 5-Tagesniederschläge. RCP8.5, 2071-2100 relativ zu 1971-2000. Nach Chimani et al. (2016).

Figure 3: Projected changes in heat days ($T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$), annual maxima of daily precipitation and annual maxima of 5-day rainfall. RCP8.5, 2071-2100 relative to 1971-2000. After Chimani et al. (2016).

Generell wird für den Alpenraum im RCP8.5 Szenario eine weitere Erwärmung um ca. 4 bis 5 Grad gegenüber heute erwartet (Gobiet et al. 2014; Jacob et al. 2014). Dieser Temperaturanstieg ist am stärksten in höheren Lagen ausgeprägt (Pepin et al. 2015; Kotlarski et al. 2015). Damit einher geht eine Erhöhung des Niederschlags im Winter, im Frühling in den Nordalpen, um 15 bis 25 %. Im Sommer wird eine Reduktion des Niederschlags um ca. 20% erwartet, im Herbst ist die Änderung nicht robust (Jacob et al. 2014).

Auswirkungen auf ausgewählte Extremereignisse sind für Österreich in Abbildung 3 gezeigt. Es wird mehr Hitzetage geben. Infolgedessen werden Hitzewellen häufiger, heißer und länger. Starkniederschläge werden ebenfalls intensiver, sowohl kurze als auch langanhaltende Ereignisse. Dürren sind im Alpenraum doppelt vom Klimawandel betroffen: Einerseits nehmen die Niederschläge im Sommer generell ab. Andererseits steigt mit dem allgemeinen Temperaturanstieg die Verdunstung, so dass Dürren länger und trockener werden (Samaniego et al. 2018). Zusätzlich wird eine Verschiebung in der Wasserbilanz von Abfluss zu Verdunstung erwartet (Mastrotheodoros et al. 2020).

Infolge dieses Klimawandels werden starke Änderungen in der Kryosphäre erwartet. Im RCP8.5 Szenario wird der Schneefall vor allem in niedrigen Lagen zum Ende des 21. Jahrhunderts um etwa 80 % abnehmen (Frei et al. 2018), alpine Gletscher werden bis auf etwa 10 % ihrer heutigen Fläche geschrumpft sein (Zekollari et al., 2019). Der hochalpine Permafrost hat heute Temperaturen von nur leicht unter Null Grad. Geringe Temperaturerhöhungen können deshalb schon ein großflächiges Auftauen des Permafrosts bewirken (Harris et al. 2009). Projektionen für sechs Orte der Schweiz auf Höhen zwischen ca. 2000 m und 3400 m zeigen alle ein Auftauen des Permafrostbodens bis in Tiefen von 10m oder sogar mehr (Marmy et al. 2016).

Alpine Naturgefahren im Klimawandel

Die oben vorgestellten Klimaänderungen wirken sich auf Naturgefahren aus – weil sie das Auftreten begünstigen, weil sie direkt als Auslöser wirken, oder weil sie die Stärke eines Ereignisses verändern. Dies soll an ausgewählten Beispielen diskutiert werden.

Änderungen im Niederschlag werden sicher Änderungen im Abflussverhalten von Wildbächen und Flüssen verursachen (Hanus et al. 2021). Durch den Gletscherschwund sinkt der Anteil von Gletscherschmelzwasser im Sommer, allmählich wird auch der Beitrag der Schneeschmelze sinken, so dass der Abfluss schließlich vor allem durch Niederschlag bestimmt werden wird und sich die Saisonalität verschiebt (Beniston et al. 2018; Hanus et al. 2021). Für den Sommer bedeutet dies generell weniger Abfluss, aber eine steigende Gefahr von Hochwasser und Sedimenttransport in kleinen Einzugsgebieten, ausgelöst durch intensivere Gewitter (Zander et al. 2022). Für die größeren Alpenflüsse wird jedoch eine Abnahme des Hochwasserrisikos erwartet (Thober et al. 2018). Eine zusätzliche Hochwassergefahr besteht durch sogenannte Gletscherseeausbrüche (Glacier Outbursts). Durch die klimawandelbedingte Gletscherschmelze entstehen neue Gletscherseen, die – wenn die begrenzenden Moränen brechen – plötzlich abfließen und Hochwasser oder Muren auslösen (Carrivick and Tweed 2016; Chiarle et al. 2007).

Massenbewegungen wie Muren können generell durch den Klimawandel beeinflusst werden. Dazu tragen sowohl steigende Temperaturen als auch sich ändernde Niederschläge bei. Ein Überblick findet sich z.B. in Beniston et al. (2018) oder Chiarle et al. (2021). Auftauender Permafrost und sich zurückziehende Gletscher destabilisieren steile Hänge und erhöhen so die Gefahr von Felsstürzen und Steinschlag (Haerberli et al.

1997; Huggel et al. 2010). Tatsächlich hätte sich die Zahl dieser Ereignisse in den letzten Jahrzehnten in den Alpen erhöht, wenn keine technischen Maßnahmen getroffen worden wären (Schlögl et al. 2021). Besonders starke Ereignisse waren immer mit ungewöhnlich hohen Temperaturen verknüpft (Huggel et al. 2010), wie zum Beispiel den Hitzewellen von 2003 und 2015 (Gruber and Haerberli 2007; Ravelin et al. 2017). Felsstürze können auch durch Starkregen-Ereignisse ausgelöst werden (Schneuwly und Stoffel 2008), die sich wie erläutert im Klimawandel ändern.

Der Einfluss des Klimawandels auf Muren hängt stark vom jeweiligen Kontext ab. Im Hochgebirge wird Geröll durch den Rückzug der Gletscher freigelegt und durch das Auftauen des Permafrosts stärkerer Erosion ausgesetzt, so dass mehr Material für Muren zur Verfügung steht (Zimmermann und Haerberli 1992). Stoffel et al. (2014) finden für acht hochalpine Einzugsgebiete, dass sich die Häufigkeit von Muren in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts nur unwesentlich ändern sollte, deren Stärke aber durch größere Sedimentverfügbarkeit und intensivere Starkniederschläge aber zunehmen sollte. In der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts sollten abnehmende Niederschläge vor allem im Sommer aber die Zahl an Muren reduzieren. Für das Illgraben-Tal ergeben sich laut Hirschberg et al. (2021) in der Zukunft zwar mehr Wettersituationen, die Muren auslösen können. Da es aber weniger Frost geben wird, entsteht weniger Sediment durch Verwitterung, so dass letztendlich sowohl weniger als auch schwächere Muren erwartet werden.

Schließlich werden auch Hangrutschungen durch den Klimawandel beeinflusst (Crozier 2010; Gariano and Guzzetti 2016). In hochalpinen Lagen steigt durch das Auftauen des Permafrosts die Gefahr von tiefgründigen Hangrutschungen (Harris et al. 2009). Auch Änderungen im Niederschlag sind von großer Bedeutung.

So finden Meusburger und Alewell (2008) im Schweizer Urserental eine Vergrößerung der von flachen Hangrutschungen betroffenen Fläche zwischen 1959 und 2004 um 92 %, und führen stärkere Niederschläge und intensivere Beweudung als wichtigste Ursachen an. Im Juni 2009 löste tagelanger Starkregen etwa 3000 Hangrutschungen in der Südoststeiermark aus (Hornich und Adelwöhrer 2010). Durch die Intensivierung von Starkregen im Klimawandel dürfte ein vergleichbares Ereignis in Zukunft eine bis zu 45 % größere Fläche betreffen und somit deutlich mehr Hangrutschungen auslösen (Maraun et al. 2022). Allerdings wirkt – aufgrund der steigenden Temperaturen – die Abnahme der Bodenfeuchte dem Anstieg dieser Gefahr entgegen (ibid.). Welche dieser Klimawandeleffekte im konkreten Fall überwiegen, dürfte stark von der Region und Jahreszeit abhängen.

Abschließend sollen noch Waldbrände betrachtet werden. Diese werden oft vom Menschen ausgelöst, und Waldmanagement kann die Bedingungen für Waldbrände stark beeinflussen. Nichtsdestotrotz werden auch Waldbrände wesentlich vom Klimawandel beeinflusst: zum einen erhöhen steigende Temperaturen und ein infolgedessen austrocknender Boden die Waldbrandgefahr. Zum anderen können sich ändernde Winde Waldbrände beeinflussen, weil sie einerseits den Boden austrocknen und andererseits ein bestehendes Feuer anfachen können. So geht man davon aus, dass allein der Klimawandel die Waldbrandfläche von 1984–2015 in den westlichen USA verdoppelt hat (andere Faktoren kommen noch dazu; Abatzoglou und Williams, 2016). Weltweit hat sich die Waldbrandsaison zwischen 1979 und 2013 um etwa 19% verlängert (Jolly et al. 2015). Für die französischen Alpen finden (Dupire et al. 2017) einen starken Kontrast zwischen dem Norden und Süden: während die Waldbrandgefahr im Süden zwischen 1959 und

2015 sowieso hoch war und überall gestiegen ist, war sie im Norden moderat und ist nur in den unteren Höhenlagen gestiegen. In Zukunft muss in vielen Weltregionen – insbesondere auch in Europa – mit einem Anstieg der Waldbrandgefahr gerechnet werden (Moritz et al. 2012; Flannigan et al. 2013; Abatzoglou et al. 2019).

Compound Ereignisse und kaskadierende Risiken

Seit einiger Zeit gerät die Tatsache in den Fokus der Forschung, dass viele Katastrophen durch das Zusammenspiel und Kaskaden von Ereignissen entstehen (Zscheischler et al. 2020; Agha-Kouchak et al. 2018). Beispiele für sogenannte Compound Events sind das gemeinsame Auftreten von Trockenheit und Hitze (Zscheischler und Seneviratne 2017), von Niederschlag und Starkwind (Zscheischler et al. 2018) oder von fluvialem Hochwasser, das durch eine Sturmflut nicht abfließen kann (Emanuele Bevacqua et al. 2017). Oft sind die beitragenden Ereignisse nicht unabhängig voneinander, so dass die Gefahr eines gemeinsamen Auftretens deutlich erhöht ist, als man rein zufällig erwarten würde (Zscheischler et al. 2020). Durch den Klimawandel verändern sich die Auftrittswahrscheinlichkeiten vieler Compound Ereignisse (Zscheischler und Seneviratne 2017; Manning et al. 2019; Bevacqua et al. 2019; Bevacqua et al. 2020). Oft ist das Zusammenspiel sehr subtil, indem ein langsamer Prozess die Auftrittswahrscheinlichkeit erhöht und ein schneller Prozess das eigentliche Ereignis auslöst (Zscheischler et al. 2020). Ein wichtiger Faktor für die Stärke der Dürre in Europa 2018 war zum Beispiel ein sehr warmer Frühling, infolgedessen die Vegetation stark wuchs und viel Bodenfeuchte verdunstete. Dies schuf die Bedingungen für eine starke Dürre, die dann durch stabile Hochdruckwetterlagen ausgelöst wurde (Bastos et al. 2020). In der Südoststeiermark hätte es im Juni 2009 nicht zahlrei-

che Hangrutschungen gegeben, wäre der Boden nicht schon vor dem eigentlichen Starkregen sehr feucht gewesen (Maraun et al. 2022). Von kaskadierenden Effekten spricht man, wenn das Auftreten einer Naturgefahr ein weiteres Ereignis auslöst (AghaKouchak et al. 2018). Für den Alpenraum finden sich viele Beispiele (Beniston et al. 2018). So erhöhen Waldbrände die Gefahr für Steinschlag (Melzner et al. 2019), Muren (Tiranti et al. 2021) und Hangrutschungen (Rengers et al. 2020). Ebenso können Felsstürze Gletscherseeausbrüche auslösen (Huggel et al. 2010). Diese Zusammenhänge sind häufig noch nicht in Klimawandelabschätzungen berücksichtigt, und erfordern neue Ansätze zur Planung von Klimawandelanpassungsmaßnahmen (Terzi et al. 2019).

Zusammenfassung

Der Klimawandel ist eine Tatsache. Selbst wenn Unsicherheiten in den Projektionen von regionalem Klima und Extremereignissen noch recht groß sind, können in vielen Fällen schon robuste Änderungen identifiziert werden. Diese Klimaänderungen beeinflussen das Auftreten vieler Naturgefahren, insbesondere auch im Alpenraum. In manchen Fällen – wie bei Felsstürzen, Steinschlag und Waldbränden – sind diese Auswirkungen eindeutig und negativ. In anderen Fällen – wie bei Hochwasser und Muren – ist das Zusammenspiel mehrerer Einflussfaktoren so komplex, dass die tatsächlichen Auswirkungen von der Region, dem betrachteten Zeithorizont und dem genauen Typ des Ereignisses abhängen. Vor allem sollte berücksichtigt werden, dass nicht nur der Klimawandel, sondern auch Landnutzungsänderungen und Landmanagement das Auftreten von Naturgefahren beeinflussen. Oft übertreffen diese den Einfluss des Klimawandels, und oft bieten sie auch eine Möglichkeit, sich an den Klimawandel anzupassen.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Assoz. Prof. Dr. Douglas Maraun
Universität Graz
Wegener Center für Klima und Globalen Wandel
Brandhofgasse 5, A-8010 Graz
douglas.maraun@uni-graz.at

Dr. Martin W. Jury
Universität Graz
Wegener Center für Klima und Globalen Wandel
Brandhofgasse 5, A-8010 Graz
martin.jury@uni-graz.at

Literatur/References:

- ABATZOGLOU, J. T., & WILLIAMS, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., & Barbero, R. (2019). Global Emergence of Anthropogenic Climate Change in Fire Weather Indices. *Geophysical Research Letters*, 46(1), 326–336. <https://doi.org/10.1029/2018GL080959>
- AGHAKOUCHAK, A., HUNING, L. S., CHIANG, F., SADEGH, M., VAHEDI-FARD, F., MAZDIYASNI, O., ... MALLAKPOUR, I. (2018). How do natural hazards cascade to cause disasters? *Nature*, 561(7724), 458–460. <https://doi.org/10.1038/d41586-018-06783-6>
- AUER, I., BÖHM, R., JURKOVIC, A., LIPA, W., ORLIK, A., POTZMANN, R., ... NIEPLOVA, E. (2007). HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1), 17–46. <https://doi.org/10.1002/joc.1377>
- BAN, N., CAILLAUD, C., COPPOLA, E., PICHELLI, E., SOBOLOWSKI, S., ADINOLFI, M., ... ZANDER, M. J. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, part I: evaluation of precipitation (Q6850, trans.). *Climate Dynamics*, 57(1–2), 275–302. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05708-w>
- BARNES, E. A., & SCREEN, J. A. (2015). The impact of Arctic warming on the midlatitude jet-stream: Can it? Will it? *WIREs Climate Change*, 6(3), 277–286. <https://doi.org/10.1002/wcc.337>
- BASTOS, A., CIAIS, P., FRIEDLINGSTEIN, P., SITCH, S., PONGRATZ, J., FAN, L., ... ZAEHLE, S. (2020). Direct and seasonal legacy effects of the 2018 heat wave and drought on European ecosystem productivity. *Science Advances*, 6(24), eaba2724. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aba2724>
- BEDNAR-FRIEDL, B., BIESBROEK, R., SCHMIDT, D. N., ALEXANDER, P., BÖRSHEIM, K. Y., CARNICER, J., ... WHITMARSH, L. (2022). Europe. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Minnenbeck, A. Alegria, ... B. Rama (Eds.), *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1817–1927). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- BENISTON, M., FARINOTTI, D., STOFFEL, M., ANDREASSEN, L. M., COPPOLA, E., ECKERT, N., ... VINCENT, C. (2018). The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), 759–794. <https://doi.org/10.5194/tc-12-759-2018>
- BEVACQUA, E., MARAUN, D., HOBÆK HAF, I., WIDMANN, M., & VRAC, M. (2017). Multivariate statistical modelling of compound events via pair-copula constructions: analysis of floods in Ravenna (Italy). *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(6), 2701–2723. <https://doi.org/10.5194/hess-21-2701-2017>
- BEVACQUA, E., MARAUN, D., VOUSDOKAS, M. I., VOUKOUVALAS, E., VRAC, M., MENTASCHI, L., & WIDMANN, M. (2019). Higher probability of compound flooding from precipitation and storm surge in Europe under anthropogenic climate change. *Science Advances*, 5(9). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aaw5531>
- BEVACQUA, E., VOUSDOKAS, M. I., ZAPPA, G., HODGES, K., SHEPHERD, T. G., MARAUN, D., ... FEYEN, L. (2020). More meteorological events that drive compound coastal flooding are projected under climate change. *Communications Earth & Environment*, 1(1), 47. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-00044-z>
- BONY, S., STEVENS, B., FRIERSON, D. M. W., JAKOB, C., KAGEYAMA, M., PINCUS, R., ... WEBB, M. J. (2015). Clouds, circulation and climate sensitivity. *Nature Geoscience*, 8(4), 261. <https://doi.org/10.1038/ngeo2398>
- CARRIVICK, J. L., & TWEED, F. S. (2016). A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.07.001>
- CHEN, D., ROJAS, M., SAMSET, B. H., COBB, K., DIONGUE NIANG, A., EDWARDS, P., ... TRÉGUIER, A.-M. (2021). Framing, Context, and Methods. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 147–286). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- CHIARLE, M., GEERTSEMA, M., MORTARA, G., & CLAGUE, J. J. (2021). Relations between climate change and mass movement: Perspectives from the Canadian Cordillera and the European Alps. *Global and Planetary Change*, 202, 103499. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2021.103499>
- CHIARLE, M., IANNOTTI, S., MORTARA, G., & DELINE, P. (2007). Recent debris flow occurrences associated with glaciers in the Alps. *Global and Planetary Change*, 56(1–2), 123–136. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.07.003>
- CHIMANI, B., HEINRICH, G., HOFSTÄTTER, M., KERSCHBAUMER, M., KIENBERGER, S., LEUPRECHT, A., & TRUHETZ, H. (2016). ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Retrieved from <https://data.ccca.ac.at/dataset/%0Aendbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01>
- COPPOLA, E., SOBOLOWSKI, S., PICHELLI, E., RAFFAELE, F., AHRENS, B., ANDERS, I., ... WARRACH-SAGI, K. (2020). A first-of-its-kind multi-model convection permitting ensemble for investigating convective phenomena over Europe and the Mediterranean. *Climate Dynamics*, 55(1–2), 3–34. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4521-8>
- CROZIER, M. J. (2010). Deciphering the effect of climate change on landslide activity: A review. *Geomorphology*, 124(3–4), 260–267. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.04.009>
- DOBLAS-REYES, F. J., SÖRENSEN, A. A., ALMAZROUI, M., DOSIO, A., GUTOWSKI, W., HAARMA, R., ... ZUO, Z. (2021). Linking global to regional climate change. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press.
- DOUVILLE, H., RAGHAVAN, K., RENWICK, J., ALLAN, R. P., ARIAS, P. A., BARLOW, M., ... ZOLINA, O. (2021). Water Cycle Changes. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1055–1210). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>
- DUPIRE, S., CURT, T., & BIGOT, S. (2017). Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of the Total Environment*, 595, 801–817. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.027>

EYRING, V., GILLET, N. P., RAO, K. M. A., BARIMALALA, R., PARRILLO, M. B., BELLOUIN, N., ... SUN, Y. (2021). Human Influence on the Climate System. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 423–552). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

FISCHER, E. M., SENEVIRATNE, S. I., VIDALE, P. L., LÜTHI, D., & SCHÄR, C. (2007). Soil Moisture–Atmosphere Interactions during the 2003 European Summer Heat Wave. *Journal of Climate*, 20(20), 5081–5099. <https://doi.org/10.1175/JCLI4288.1>

FLANNIGAN, M., CANTIN, A. S., DE GROOT, W. J., WOTTON, M., NEWBERRY, A., & GOWMAN, L. M. (2013). Global wildland fire season severity in the 21st century. *Forest Ecology and Management*, 294, 54–61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.10.022>

FREI, P., KOTLARSKI, S., LINIGER, M. A., & SCHÄR, C. (2018). Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12(1), 1–24. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1-2018>

GARIANO, S. L., & GUZZETTI, F. (2016). Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews*, 162, 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>

GOBIET, A., KOTLARSKI, S., BENISTON, M., HEINRICH, G., RAJCAK, J., & STOFFEL, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>

GRUBER, S., & HAEBERLI, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112(F2), F02S18. <https://doi.org/10.1029/2006JF000547>

Haeberli, W., Wegmann, M., & Vonder Mühl, D. (1997). Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90(3), 407–414. <https://doi.org/10.5169/seals-168172>

HANUS, S., HRACHOWITZ, M., ZEKOLLARI, H., SCHOUPS, G., VIZCAINO, M., & KAITNA, R. (2021). Future changes in annual, seasonal and monthly runoff signatures in contrasting Alpine catchments in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(6), 3429–3453. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3429-2021>

HARRIS, C., ARENSON, L. U., CHRISTIANSEN, H. H., ETZELMÜLLER, B., FRAUENFELDER, R., GRUBER, S., ... VONDER MÜHLL, D. (2009). Permafrost and climate in Europe: Monitoring and modelling thermal, geomorphological and geotechnical responses. *Earth-Science Reviews*, 92(3–4), 117–171. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.12.002>

HAWKINS, E., & SUTTON, R. (2009). The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8), 1095–1108. <https://doi.org/10.1175/2009BAMS2607.1>

Hirschberg, J., Faticchi, S., Bennett, G. L., McArdell, B. W., Peleg, N., Lane, S. N., ... Molnar, P. (2021). Climate Change Impacts on Sediment Yield and Debris-Flow Activity in an Alpine Catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 126(1). <https://doi.org/10.1029/2020JF005739>

HOCK, R., RASUL, G., ADLER, C., CÁCERES, B., GRUBER, S., HIRABAYSHI, Y., ... STELTZER, H. (2019). High Mountain Areas. In H.-O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, ... N. M. Weyer (Eds.), & Rt13 (Trans.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* (pp. 131–202). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-2>

HÖRNICH, R., & ADELWÖHRER, R. (2010). Landslides in Styria in 2009 / Hangrutschungsereignisse 2009 in der Steiermark. *Geomechanics and Tunneling*, 3(5), 455–461. <https://doi.org/10.1002/geot.201000042>

HUGGEL, C., SALZMANN, N., ALLEN, S., CAPLAN-AUERBACH, J., FISCHER, L., HAEBERLI, W., ... WESSELS, R. (2010). Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability.

Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 368(1919), 2435–2459. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0078>

JACOB, D., PETERSEN, J., EGGERT, B., ALIAS, A., CHRISTENSEN, O. B., BOUWER, L. M., ... YIOU, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563–578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>

JOLLY, W. M., COCHRANE, M. A., FREEBORN, P. H., HOLDEN, Z. A., BROWN, T. J., WILLIAMSON, G. J., & BOWMAN, D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6(1), 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

Kaitna, R. (2022)

JOLLY, W. M., COCHRANE, M. A., FREEBORN, P. H., HOLDEN, Z. A., BROWN, T. J., WILLIAMSON, G. J., & BOWMAN, D. M. J. S. (2015). Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. *Nature Communications*, 6(1), 7537. <https://doi.org/10.1038/ncomms8537>

KNEVELS, R., PETSCHKO, H., PROSKE, H., LEOPOLD, P., MARAUN, D., & BRENNING, A. (2020). Event-Based Landslide Modeling in the Styrian Basin, Austria: Accounting for Time-Varying Rainfall and Land Cover. *Geosciences*, 10(6), 217. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060217>

KOTLARSKI, S., LÜTHI, D., & SCHÄR, C. (2015). The elevation dependency of 21st century European climate change: an RCM ensemble perspective (Q7832, trans.). *International Journal of Climatology*, 35(13), 3902–3920. <https://doi.org/10.1002/joc.4254>

KREIENKAMP, F., PHILIP, S. Y., TRADOWSKY, J. S., KEW, S. F., LORENZ, P., ARRIGHI, J., ... WANDERS, N. (2021). Rapid attribution of heavy rainfall events leading to the severe flooding in Western Europe during July 2021.

LEE, J.-Y., MAROTZKE, J., BALA, G., CAO, L., CORTI, S., DUNNE, J. P., ... ZHOU, T. (2021). Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 553–672). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

MAHER, N., MILINSKI, S., SUAREZ-GUTIERREZ, L., BOTZET, M., DOBRYNIN, M., KORNBLUEH, L., ... MAROTZKE, J. (2019). The Max Planck Institute Grand Ensemble: Enabling the Exploration of Climate System Variability. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(7), 2050–2069. <https://doi.org/10.1029/2019MS001639>

MANABE, S., & WETHERALD, R. T. (1967). Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 24(3), 241–259.

MANN, M. E., RAHMSTORF, S., KORNHUBER, K., STEINMAN, B. A., MILLER, S. K., PETRI, S., & COUMOU, D. (2018). Projected changes in persistent extreme summer weather events: The role of quasi-resonant amplification. *Science Advances*, 4(10). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aat3272>

MANNING, C., WIDMANN, M., BEVACQUA, E., VAN LOON, A. F., MARAUN, D., & VRAC, M. (2019). Increased probability of compound long-duration dry and hot events in Europe during summer (1950–2013). *Environmental Research Letters*, 14(9), 094006. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab23bf>

MARAUN, D. (2013). When will trends in European mean and heavy daily precipitation emerge? *Environmental Research Letters*, 8(1), 014004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/014004>

MARAUN, D., KNEVELS, R., MISHRA, A. N., TRUHETZ, H., BEVACQUA, E., PROSKE, H., ... PUXLEY, B. L. (2022). A severe landslide event in the Alpine foreland under possible future climate and land-use changes. *Communications Earth & Environment*, 3(1), 87. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00408-7>

MARMY, A., RAJCAK, J., DELALOYE, R., HILBICH, C., HOELZLE, M., KOTLARSKI, S., ... HAUCK, C. (2016). Semi-automated calibration method for modelling of mountain permafrost evolution in Switzerland. *The Cryosphere*, 10(6), 2693–2719. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2693-2016>

MAROTZKE, J., JAKOB, C., BONY, S., DIRMEYER, P. A., O’GORMAN, P. A.,

HAWKINS, E., ... TUMA, M. (2017). Climate research must sharpen its view. *Nature Climate Change*, 7(2), 89–91. <https://doi.org/10.1038/nclimate3206>

MASSON-DELMOTTE, V., ZHAI, P., PIRANI, A., CONNORS, S. L., PÉAN, C., BERGER, S., ... (EDS.). (2021). IPCC, 2021: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. In Cambridge University Press. In Press.

MASTROTHEODOROS, T., PAPPAS, C., MOLNAR, P., BURLANDO, P., MANOLI, G., PARAJKA, J., ... FATICHI, S. (2020). More green and less blue water in the Alps during warmer summers. *Nature Climate Change*, 10(2), 155–161. <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0676-5>

MELZNER, S., SHTOBER-ZISU, N., KATZ, O., & WITTENBERG, L. (2019). Brief communication: Post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12), 2879–2885. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2879-2019>

MEUSBURGER, K., & ALEWELL, C. (2008). Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment (Useren Valley, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(3), 509–520. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-509-2008>

MORITZ, M. A., PARISIEU, M.-A., BATLLORI, E., KRAWCHUK, M. A., VAN DORN, J., GANZ, D. J., & HAYHOE, K. (2012). Climate change and disruptions to global fire activity. *Ecosphere*, 3(6), ar49. <https://doi.org/10.1890/ES11-00345.1>

PEPIN, N., BRADLEY, R. S., DIAZ, H. F., BARAER, M., CACERES, E. B., FORSYTHE, N., ... YANG, D. Q. (2015). Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, Vol. 5, pp. 424–430. <https://doi.org/10.1038/nclimate2563>

PREIN, A. F., LANGHANS, W., FOSSER, G., FERRONE, A., BAN, N., GOERGEN, K., ... LEUNG, R. (2015). A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53(2), 323–361. <https://doi.org/10.1002/2014RG000475>

RAVEL, L., MAGNIN, F., & DELINE, P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of The Total Environment*, 609, 132–143. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.055>

RENGERS, F. K., MCGUIRE, L. A., OAKLEY, N. S., KEAN, J. W., STALEY, D. M., & TANG, H. (2020). Landslides after wildfire: initiation, magnitude, and mobility. *Landslides*, 17(11), 2631–2641. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01506-3>

SAMANIEGO, L., THOBER, S., KUMAR, R., WANDERS, N., RAKOVEC, O., PAN, M., ... MARX, A. (2018). Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change*, 8(5), 421–426. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0138-5>

SCHÄR, C., DAVIES, T. D., FREI, C., WANNER, H., M., W., M., W., & DAVIES, H. C. (1998). Current Alpine Climate. In P. Cebon, U. Dahinden, H. C. Davies, D. M. Imboden, & C. Jäger (Eds.), *Views from the Alps: Regional perspectives on climate change*. (pp. 21–72). Boston MA, USA: MIT Press.

SCHLÖGL, M., FUCHS, S., SCHEIDL, C., & HEISER, M. (2021). Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. *Climate Risk Management*, 32, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>

SCHNEUWLY, D. M., & STOFFEL, M. (2008). Tree-ring based reconstruction of the seasonal timing, major events and origin of rockfall on a case-study slope in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(2), 203–211. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-203-2008>

SENEVIRATNE, S. I., CORTI, T., DAVIN, E. L., HIRSCH, M., JAEGER, E. B., LEHNER, I., ... TEULING, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3–4), 125–161. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>

SENEVIRATNE, S. I., ZHANG, X., ADNAN, M., BADI, W., DERECZYNSKI, C., DI LUCA, A., ... ZHOU, B. (2021). Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou

(Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1513–1766). Cambridge, UK and New York, NY, USA: Cambridge University Press.

SHEPHERD, T. G. (2014). Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections (Q3664, Trans.). *Nature Geoscience*, 7(10), 703–708. <https://doi.org/10.1038/ngeo2253>

STOFFEL, M., MENDELIK, T., SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER, M., & GOBIET, A. (2014). Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change*, 122(1–2), 141–155. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0993-z>

TEBALDI, C., & KNUTTI, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1857), 2053–2075. <https://doi.org/10.1098/rsta.2007.2076>

TERZI, S., TORRESAN, S., SCHNEIDERBAUER, S., CRITTO, A., ZEBISCH, M., & MARCOMINI, A. (2019). Multi-risk assessment in mountain regions: A review of modelling approaches for climate change adaptation. *Journal of Environmental Management*, 232, 759–771. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.100>

THOBER, S., KUMAR, R., WANDERS, N., MARX, A., PAN, M., RAKOVEC, O., ... ZINK, M. (2018). Multi-model ensemble projections of European river floods and high flows at 1.5, 2, and 3 degrees global warming. *Environmental Research Letters*, 13(1), 014003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa9e35>

TIRANTI, D., CREMONINI, R., & SANMARTINO, D. (2021). Wildfires Effect on Debris Flow Occurrence in Italian Western Alps: Preliminary Considerations to Refine Debris Flow Early Warnings System Criteria. *Geosciences*, 11(10), 422. <https://doi.org/10.3390/geosciences11100422>

VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M., RIAHI, K., THOMSON, A., HIBBARD, K., ... ROSE, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

WOOLLINGS, T. (2010). Dynamical influences on European climate: an uncertain future. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1924), 3733–3756. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0040>

WOOLLINGS, T., BARRIOPEDRO, D., METHVEN, J., SON, S.-W., MARTIUS, O., HARVEY, B., ... SENEVIRATNE, S. (2018). Blocking and its response to Climate Change. *Current Climate Change Reports*, 4(3), 287–300. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0108-z>

ZANDER, M. J., VIGUURS, P. J., SPERNA WEILAND, F. C., & WEERTS, A. H. (2022). Future changes in flash flood frequency and magnitude over the European Alps. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. <https://doi.org/10.5194/hess-2022-207>

ZEKOLLARI, H., HUSS, M., & FARINOTTI, D. (2019). Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble. *The Cryosphere*, 13(4), 1125–1146. <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>

ZIMMERMANN, M., & HAEBERLI, W. (1992). *Climatic Change and Debris Flow Activity High-Mountain Areas - A Case Study in the Swiss Alps*. *Catena Supplement*, 22, 59–72.

ZSCHEISCHLER, J., MARTIUS, O., WESTRA, S., BEVACQUA, E., RAYMOND, C., HORTON, R. M., ... VIGNOTTO, E. (2020). A typology of compound weather and climate events. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(7), 333–347. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0060-z>

ZSCHEISCHLER, J., & SENEVIRATNE, S. I. (2017). Dependence of drivers affects risks associated with compound events. *Science Advances*, 3(6). <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700263>

ZSCHEISCHLER, J., WESTRA, S., VAN DEN HURK, B. J. J. M., SENEVIRATNE, S. I., WARD, P. J., PITMAN, A., ... ZHANG, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469–477. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0156-3>

ROLAND KAITNA

Einfluss des Klimawandels auf Wildbacheinzugsgebiete mit speziellem Fokus auf Muren

Climate change impact on torrential catchments with special focus on debris flows

Zusammenfassung:

Es ist zu erwarten, dass die Aktivität von Wildbachprozessen, wie intensiver Sedimenttransport oder Muren, sich in einem zukünftigen Klima ändern wird. Dieser Beitrag soll einen Überblick über mögliche Auswirkungen auf die Auslösung sowie auf die Disposition von Wildbachgefahren geben. Neben internationalen Studien werden die Ergebnisse eines rezenten Forschungsprojekts zu Änderungen der hydro-meteorologischen Auslösebedingungen von Muren in sechs Regionen in den österreichischen Alpen zusammengefasst. Die Ergebnisse dieser Studie sollen zur Entwicklung von Anpassungsstrategien für ein zukünftiges Risikomanagement beitragen.

Abstract:

It is expected that the activity of torrential processes such as intensive sediment transport or debris flows will change in a future climate. This paper gives an overview of possible effects on the triggering as well as on the disposition of torrential hazards. In addition to international studies, the results of a recent research project on changes in hydro-meteorological triggering conditions of debris flows in six regions in the Austrian Alps are summarized. The results of this study shall contribute for the development of adaptation strategies for future risk management.

Stichwörter:

Klimawandel, Muren,
Wildbacheinzugsgebiete

Keywords:

*climate change,
debris flows,
torrential catchments*

Einleitung

Im Zusammenhang mit dem Klimawandel stellt sich die Frage, ob veränderte Temperaturen und Niederschlagsmuster die Häufigkeit und/oder die Magnitude von Wildbachgefahren und im Speziellen Muren verändern und sich dadurch ein gesellschaftlicher Anpassungsbedarf ergibt. Für einige alpine Einzugsgebiete gibt es Hinweise auf eine erhöhte Murgangaktivität in den letzten Jahrzehnten (z.B. Dietrich & Krautblatter, 2017, für die Region Plansee), für andere Standorte zeigt sich keine Zunahme in jüngster Zeit (z.B. Stoffel et al., 2005, für den Rittigraben in der Schweiz). Trotz eines zunehmenden Trends bei den meteorologischen Indikatoren für kritische Auslösebedingungen wurde in einer aktuellen Datenbankstudie kein eindeutiger Trend für schadenverursachende Wildbachprozesse (einschließlich Murgänge) in den österreichischen Alpen festgestellt (Schlögl et al., 2021). Die Autoren führen dies auf die kompensierende Wirkung der zunehmenden Zahl technischer Schutzmaßnahmen zurück.

Ein immer wiederkehrendes Thema bei der vorausschauenden Bewertung von Wildbachgefahren ist, dass ein zukünftiges Klima mit erhöhten Temperaturen mehr Wasserdampf in der Atmosphäre aufnehmen kann, was zu intensiveren Niederschlagsereignissen führt (Berg et al., 2013). Allen Klimasimulationen gemein ist die Erwartung, dass die Temperatur in den Alpen deutlich steigen wird und dass es Veränderungen des saisonalen Niederschlagsmusters geben wird (z. B. Gobiet et al., 2013). Klar ist auch, dass in niedrigen bis mittleren Höhenlagen erhöhte Temperaturen zu einer Abnahme des Schnee-Niederschlags-Verhältnisses im Winter führen werden

(APCC, 2014). Es gibt Anzeichen dafür, dass wiederholte Regen-auf-Schnee-Ereignissen wie im ungewöhnlich warmen und nassen Januar 2018 bis zum Ende des 21. Jahrhunderts in den europäischen Alpen häufiger auftreten könnten (Stoffel & Corona, 2018).

Welche Folge das für die Muren-Aktivität hat, haben bisher wenige Studien untersucht. Für die Auslösung von Muren braucht es eine kritische Kombination von Neigung, Lockermaterial und Wasser. Der Wasserinput erfolgt in den meisten Fällen in Form von konvektiven Gewitterniederschlägen oder langanhaltenden Tiefdruck-Niederschlägen. Manchmal spielen auch intensive Schneeschmelze oder Regen-auf-Schnee-Situationen eine wichtige Rolle bei der Auslösung (Mostbauer et al., 2018). Durch die Auswertung von Niederschlag-Proxies (konvektiv verfügbare potenzielle Energie und die spezifische Luftfeuchtigkeit) erwarten Turkington et al. (2016) wenig Veränderung der Murgang Aktivität für zwei Regionen in Frankreich und Italien. Jomelli et al. (2009) kamen für das Massif des Écrins (französische Alpen) zu dem Schluss, dass die Zahl von Hangmuren nach 2070 aufgrund einer generellen Abnahme der Niederschlagsereignisse sowie der Abnahme der potenziellen Startflächen zurückgehen könnte. Für die Schweiz erwarten Stoffel et al. (2014) eine Verlagerung der Murgang Aktivität vom Sommer in die "Randsaisonen" (März, April, November und Dezember). Die abnehmende Niederschlagshäufigkeit in zukünftigen Sommern könnte die Sedimentakkumulation in manchen Gerinnen erleichtern und die Murgang-Wahrscheinlichkeit im späteren Verlauf der Saison erhöhen. Für das gut überwachte Einzugsgebiet des Illgrabens (CH) soll die prognostizierte Erhö-

hung der Lufttemperatur jedoch zu einer Verringerung der Sedimentproduktion durch physikalische Verwitterung (weniger Frosttage) und damit des Auftretens von Murgängen um mehr als 20 % bis zum Ende des Jahrhunderts führen (Hirschberg et al., 2020). Eine prospektive Einschätzung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wildbachgefahren und im Speziellen Muren in den österreichischen Alpen wurde im ACRP Projekt Deucalion II versucht.

Studie zur Veränderung der hydro-meteorologischen Auslösebedingungen für Wildbachgefahren in Österreich

Im Rahmen des Projekts „Deucalion II“ wurden die hydro-meteorologischen Auslösebedingungen von Muren und anderen Wildbachgefahren für sechs Regionen in Österreich untersucht.

Für jede dieser Regionen wurde ein konzeptionelles hydrologisches Modell entwickelt und über einen Zeitraum von 40+ Jahre auf Tagesbasis kalibriert. Anschließend wurde untersucht, welche hydro-meteorologischen Bedingungen an Tagen vorherrschten, an denen Muren und andere Wildbachprozesse aufgezeichnet wurden. Dabei wurde zwischen den Auslösetypen "Langanhaltender Niederschlag", "Gewitter", "Schneeschmelze" und "Regen-auf-Schnee" unterschieden und ein probabilistisches Auslösemodell entwickelt (Prenner et al., 2018). Unter anderem zeigte sich, dass im Mittel 2/3 aller Muren durch intensive Gewitterniederschläge ausgelöst wurden, etwa 1/4 durch langanhaltende Niederschläge und der Rest stark von der Schneeschmelze beeinflusst waren. Weiters konnte kein Zusammenhang zwischen den hydrologischen Vorbedingungen und des Typs des Wildbachprozesses gefunden werden (Prenner et al., 2019).

In weiterer Folge wurde das kalibrierte Modell mit 28 Klimawandelprojektionen auf Tagesbasis (implizierte Modellierung des konvektiven Prozesses) bis zum Jahr 2100 (Switanek et al., 2022) verschnitten. Die Auswirkungen für die jeweiligen Talflüsse sind in Hanus et al. (2021) im Detail beschrieben. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse auf eine erhebliche Verschiebung der jährlichen Höchstabflüsse um 9 bis 31 Tage früher im Jahr und eine Verlängerung der potenziellen Hochwassersaison um 1 bis 3 Monate für hoch gelegene Einzugsgebiete (Montafon, Pitztal, Defereggental) hindeuten. Für Einzugsgebiete in niedrigeren Lagen (Paltental, Feistritztal) sind die Veränderungen im zeitlichen Ablauf der jährlichen Höchstabflüsse weniger ausgeprägt. Die Erhöhung des mittleren maximalen jährlichen Abflusses ist mit 2–18 % bei einem moderaten CO₂-Emissionsszenario (RCP 4.5) am stärksten ausgeprägt.

Um auch Aussagen über mögliche Veränderungen in den Wildbacheinzugsgebieten der sechs Untersuchungsregionen zu machen, wurde quantifiziert, wie sich die Häufigkeit der Tage mit den vorher erwähnten Auslösetypen für Muren, verändert (Prenner, 2018). Wichtig zu betonen ist, dass (1) eine Änderung der geomorphologischen Suszeptibilität (z.B. Sedimentverfügbarkeit) sowie Änderungen der Landnutzung und Landbedeckung in dieser Studie nicht in Betracht gezogen worden sind und (2) das Auslösemodell Gewitterniederschläge nur indirekt über hydro-meteorologische Kriterien, die typisch für Tage mit Gewittern und Muren sind, abbildet. Die Ergebnisse zeigen – gemittelt über alle Regionen und Auslösetypen – nur eine geringe Änderung der Auslösewahrscheinlichkeiten. Allerdings finden wir deutliche saisonale und regionale Unterschiede. Die hydro-meteorologischen Bedingungen die auf eine Gewitter-Auslösung hindeuten,

werden in Zukunft häufig auch im Frühjahr auftreten. In den Regionen südlich des Alpenhauptkamms, insbesondere im Gailtal, treten Gewitter-Auslöser bereits von Januar bis März auf. Die Auslösung durch lang-anhaltende Niederschläge zeigt ein ähnliches Muster, d. h. eine Verlagerung auf frühere Zeiträume im Jahr, jedoch mit einer allgemeinen Tendenz zu abnehmenden Wahrscheinlichkeiten im Sommer. Für die östlichen Regionen (Paltental, Feistritztal) finden wir generell eine abnehmende oder durchgehend niedrige Häufigkeit von Muren-Tagen während der Sommerzeit. Die Veränderungen im Herbst sind recht unterschiedlich, mit niedriger bis leicht erhöhte Häufigkeit für diesen Auslösetyp je nach Region. Die Auslösebedingungen in Zusammenhang mit Schneeschmelze werden durch den Klimawandel stark verändert. Die Regen-auf-Schnee Situationen werden sich auf eine längere Periode erstrecken, während sich die Schneeschmelz-Perioden verkürzen und auf frühere Zeiten im Jahr verschieben. In Abb. 2 sind beispielhaft die Ergebnisse für die Region Montafon gezeigt. Bei der Interpretation ist zu beachten, dass Veränderungen der relativen Werte (Abb. 2a) und der absoluten Tage pro Jahr (Abb.2b) unterschiedliche Ausprägung haben können. Das heißt, dass z.B. der starke prozentuelle Anstieg kritischer Auslösebedingungen im März nur einer geringen absoluten Zunahme der Anzahl der Tage entspricht, da in der Vergangenheit nur sehr selten Muren im März registriert wurden. Wichtig ist auch zu betonen, dass diese Aussagen sich nur auf die Häufigkeit und nicht auf die Intensität der Prozesse (sowohl Niederschlagsintensität als auch Wildbachprozess) beziehen. Es ist also durchaus möglich, dass im Sommer zwar seltener, aber dafür mit heftigeren Gewittern zu rechnen ist (Pichelli et al., 2021; siehe auch den Beitrag von Maraun und Jury in dieser Ausgabe).

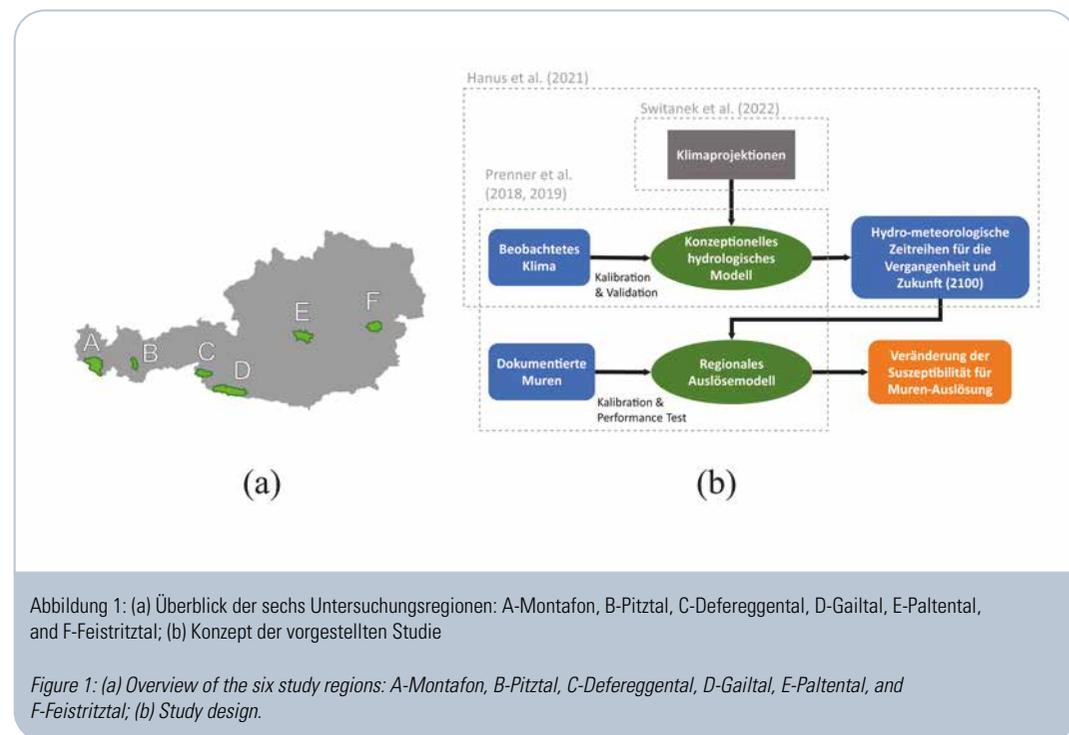


Abbildung 1: (a) Überblick der sechs Untersuchungsregionen: A-Montafon, B-Pitztal, C-Defereggental, D-Gailtal, E-Paltental, and F-Feistritztal; (b) Konzept der vorgestellten Studie

Figure 1: (a) Overview of the six study regions: A-Montafon, B-Pitztal, C-Defereggental, D-Gailtal, E-Paltental, and F-Feistritztal; (b) Study design.

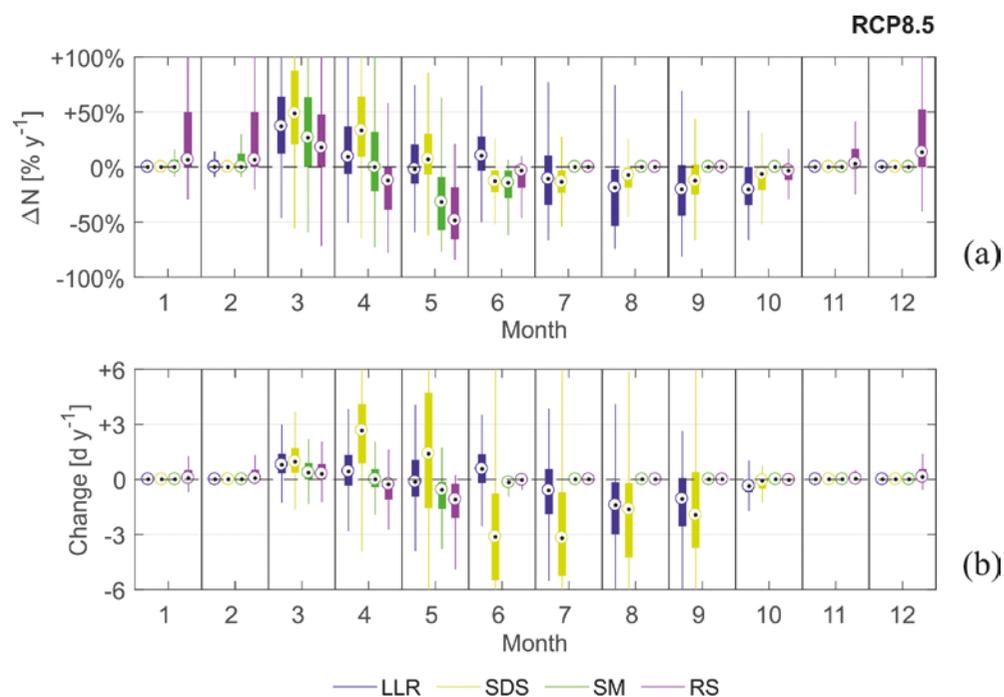


Abbildung 2: Saisonale Änderung der Häufigkeit verschiedener Auslösetypen (LLR=langanhaltender Regen, SDS=Gewitterniederschlag, SM=Schneesmelze, RS=Regen-auf-Schnee) beispielhaft dargestellt für die Region Montafon für den Zeitraum 2071–2100 und das Emissionsszenario RCP 8.5 in (a) relativen Werten und (b) Veränderung der Tage pro Jahr.

Figure 2: Seasonal change of trigger type frequency (LLR=long-lasting rain, SDS=short-duration storm, SM=snow melt, RS=rain-on-snow) exemplarily shown for the region Montafon for the period 2071–2100 and emission scenario RCP 8.5 in (a) relative units and (b) changes of days per year.

Auswirkung auf Wildbachprozesse

Aus derzeitiger Sicht wird es durch den Klimawandel zu zeitlichen und räumlichen Veränderungen des Prozessgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten in Österreich kommen. Wie im APCC Report (2014) ausgeführt, wird es bis Mitte des 21. Jahrhunderts zu einer Temperaturerhöhung von zumindest 1.4°C kommen, wobei die weitere Entwicklung an die vom Menschen ver-

ursachten CO₂-Emissionen gekoppelt ist. Gleichzeitig kommt es mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Veränderung des Niederschlagsgeschehens. Die Auswirkungen auf Wildbachprozesse ergeben sich daher direkt über die Auslösung und indirekt über die Veränderung der Disposition. Basierend auf den vorgestellten Studien soll die folgende Liste einen groben Überblick geben:

- Auslösung
 - Die Wahrscheinlichkeit kritischer Auslösebedingungen für Muren und anderer Wildbachprozesse verändert sich sowohl regional als auch saisonal.
 - Muren sind schon früher im Jahr möglich.
 - Massenverlagerungen infolge von Regen-auf-Schnee Ereignissen werden im Winter besonders in mittleren Lagen häufiger.
 - Durch die starken Veränderungen in der alpinen Kryosphäre sind Prozesstransformation und Ereigniskaskaden (z.B. Muren ohne Regen-Auslösung) wie am Piz Cengalo 2017 (Walter et al., 2020) in Hochgebirgslagen nicht auszuschließen.
- Geomorphologische Disposition
 - In hochalpinen Lagen ist durch Gletscherrückgang, Abschmelzen von Permafrost und stärkerer physikalischer Verwitterung mit einer erhöhten Sedimentverfügbarkeit zu rechnen. Das anfallende Sediment wird durch das Gerinnesystem in tiefere Lagen weiter transportiert.
 - In mittleren Lagen kann es zu einer Verringerung der Sedimentproduktion durch physikalische Verwitterung kommen, was in Sediment-limitierten Einzugsgebieten zu einer Abnahme der Murgang-Aktivität führen könnte. In Einzugsgebieten mit einer großen Menge eiszeitlicher Ablagerungen („Altschuttwildbäche“) ändert sich dadurch wahrscheinlich weniger.
 - Infolge generell trockenerer Sommer kann es zu vermehrter Sedimentakkumulation im Gerinne kommen, wodurch bei starken Einzelniederschlägen die Magnitude der Ereignisse möglicherweise höher werden kann (Stoffel et al., 2014).

Anschrift des Verfassers/Author's address:

Dr. Roland Kaitna
 Institut für Alpine Naturgefahren,
 Universität für Bodenkultur Wien
 Peter Jordan Strasse 82, 1190 Wien
 roland.kaitna@boku.ac.at

Literatur/References:

- APCC (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2.
- BERG, P., MOSELEY, C., & HAERTER, J. O. (2013). Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures. *Nature Geoscience*, 6(3), 181–185. <https://doi.org/10.1038/ngeo1731>.
- DIETRICH A., KRAUTBLATTER, M. (2017). Evidence for enhanced debris-flow activity in the Northern Calcareous Alps since the 1980s (Plansee, Austria). *Geomorphology* 287: 144–158. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.01.013>.
- GIORGI F., TORMA C., COPPOLA E., BAN N., SCHÄR C., SOMOT, S. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience* 9(8): 584–589. <https://doi.org/10.1038/ngeo2761>.
- GOBIET A., KOTLARSKI S., BENISTON M., HEINRICH G., RAJCAK J., STOFFEL, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps - a review. *Science of the Total Environment* 493: 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.
- HANUS S., HRACHOWITZ M., ZEKOLLARI H., SCHOUPS G., VIZCAINO M., KAITNA, R. (2021). Future changes in annual, seasonal and monthly runoff signatures in contrasting Alpine catchments in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(6): 3429–3453. <https://doi.org/10.5194/hess-25-3429-2021>.
- HIRSCHBERG J., FATICHI S., BENNETT G. L., MCARDLELL B. W., PELEG N., LANE S. N., et al. (2020). Climate Change Impacts on Sediment Yield and Debris-Flow Activity in an Alpine Catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, e2020JF005739. <https://doi.org/10.1029/2020JF005739>.
- JOMELLI V., BRUNSTEIN D., DÉQUÉ M., VRAC M., & GRANCHER D. (2009). Impacts of future climatic change (2070–2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change* 97(1): 171–191. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9616-0>.
- MOSTBAUER K., KAITNA R., PRENNER D., HRACHOWITZ, M. (2018). The temporally varying roles of rainfall, snowmelt and soil moisture for debris flow initiation in a snow-dominated system. *Hydrology and Earth System Sciences* 22(6): 3493–3513. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3493-2018>.
- PICHELLI E., COPPOLA E., SOBOLOWSKI S., BAN N., GIORGI F., STOCCHI P., et al. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Climate Dynamics*, 56(11), 3581–3602. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05657-4>.
- PRENNER D. (2018). The influence of climate change on debris flow trigger conditions from a hydro-meteorological perspective. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 2018. <https://permalink.obvsg.at/bok/AC15223906>.



www.geobruigg.com/de/rocco

PRENNER D., KAITNA R., MOSTBAUER K., HRACHOWITZ M. (2018). The Value of Using Multiple Hydrometeorological Variables to Predict Temporal Debris Flow Susceptibility in an Alpine Environment. *Water Resources Research* 54(9): 6822–6843. <https://doi.org/10.1029/2018WR022985>.

PRENNER D., HRACHOWITZ M., KAITNA, R. (2019). Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of The Total Environment*, 658, 958–972. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.206>.

SCHLÖGL M., FUCHS S., SCHEIDL C., HEISER, M. (2021). Trends in torrential flooding in the Austrian Alps: A combination of climate change, exposure dynamics, and mitigation measures. *Climate Risk Management* 32, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100294>

STOFFEL M., CORONA C. (2018). Future winters glimpsed in the Alps. *Nature Geoscience*, 11(7), 458–460. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0177-6>.

STOFFEL M., LIÈVRE I., CONUS D., GRICHTING M. A., RAETZO H., GÄRTNER H. W., MONBARON, M. (2005). 400 Years of Debris-Flow Activity and Triggering Weather Conditions: Riti-graben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 37(3): 387–395. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0387:YODAAAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0387:YODAAAT]2.0.CO;2).

SWITANEK M., MARAUN D., BEVACQUA E. (2022). Stochastic downscaling of gridded precipitation to spatially coherent sub-grid precipitation fields using a transformed Gaussian model. *International Journal of Climatology*, n/a(n/a), 22. <https://doi.org/10.1002/joc.7581>.

TURKINGTON T., REMAÎTRE A., ETTEMA J., HUSSIN H., WESTEN, C. (2016). Assessing debris flow activity in a changing climate. *Climatic Change*, 1, 1–13. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1657-6>.

WALTER F., AMANN F., KOS A., KENNER R., PHILLIPS M., DE PREUX A., et al. (2020). Direct observations of a three million cubic meter rock-slope collapse with almost immediate initiation of ensuing debris flows. *Geomorphology*, 351, 106933. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106933>.



ROCCO® Steinschlagbarrieren

AUSGELEGT UND GETESTET
AUF EINFELD TREFFER

PETER ANDRECS, KARL HAGEN, MATTHIAS PLÖRER

Das Projekt RECIPE – Ergebnisse für die Beurteilung des Risikos von Steinschlag

The RECIPE Project – Results for Rockfall Risk Assessment

Zusammenfassung:

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf Intensität, Häufigkeit und räumliche Verteilung von Naturgefahrenprozessen. Gleichzeitig bestehen Unsicherheiten bezüglich der konkret zu erwartenden Effekte. Vom BFW wurde im Rahmen des Projekts RECIPE ein Prototyp für die Beurteilung der Zunahme des Steinschlagrisikos aufgrund der Permafrostdegradation entwickelt. Die für die Anwendung notwendigen Datengrundlagen sind für den gesamten Alpenraum verfügbar, wodurch eine flächenhafte Implementierung möglich ist. In dem Prototyp wird zunächst die mögliche Zunahme potenzieller Steinschlagbereiche infolge höherer Jahresdurchschnittstemperaturen dargestellt. Die anschließende Ausbreitungs- und Reichweitenmodellierung lässt in Verschneidung mit Infrastrukturinformationen eine Abschätzung möglicher Auswirkungen des Steinschlagrisikos aufgrund des Klimawandels zu.

Abstract:

Climate change has an impact on the intensity, frequency and spatial distribution of natural hazard processes. At the same time, there are uncertainties regarding the specific effects to be expected. Within the framework of the RECIPE project, BFW has developed a prototype for assessing the increase of rockfall risk due to permafrost degradation. The data basis, necessary for the application, is available for the entire Alpine region, which enables an area-wide implementation. The prototype first determines new potential initial areas due to rising temperatures. The subsequent spread and range modelling allows, when intersected with infrastructure information, an estimation of possible impacts of rockfall risk caused by climate change.

Stichwörter:

Steinschlag, Risiko-
beurteilung, Klima-
wandel, Permafrost

Keywords:

Rock fall, risk assessment, climate
change, permafrost

Einleitung

Der Klimawandel hat Auswirkungen auf das Auftreten und den Ablauf von Naturgefahrenprozessen. Intensität, Häufigkeit und Verteilung dieser Prozesse können sich regional ändern bzw. zunehmen (IPCC, 2021). Gleichzeitig bestehen erhebliche Unsicherheiten bezüglich der konkret zu erwartenden Effekte. Die für den Katastrophenschutz zuständigen Institutionen stehen vor der Herausforderung, ihre Bewältigungsstrategien an die sich ändernden Risikoszenarien (mit all ihren Unsicherheiten) anzupassen. Dies erfordert den Einsatz neuer Planungsansätze, die komplexe Zusammenhänge im Naturgefahrenmanagement verstärkt berücksichtigen können.

Im Rahmen des Projekts “RECIPE – Reinforcing civil protection capabilities into multi-hazard risk assessment under climate change”, das vom Europäischen Amt für humanitäre Hilfe und Katastrophenschutz (DG ECHO) gefördert wurde, stellten sich acht Institutionen in fünf EU-Ländern (Deutschland, Italien, Portugal, Spanien und Österreich) der Aufgabe, den diesbezüglichen Bedarf zu identifizieren und darauf aufbauend Instrumente und Werkzeuge für die Unterstützung des angewandten Katastrophenschutzes, des Krisenmanagements und der Risikobeurteilung zu entwickeln.

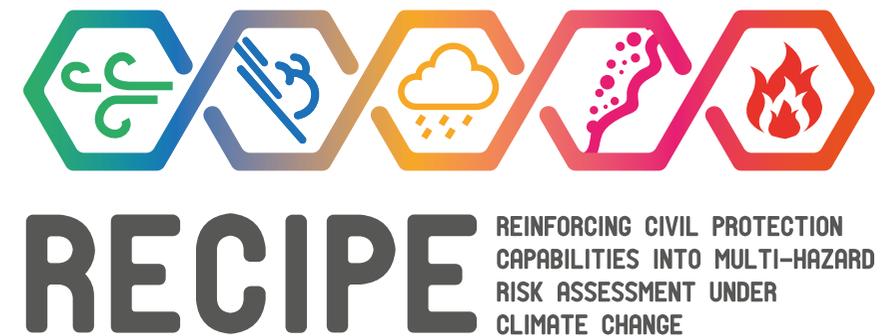


Abbildung 1: Logo des Projekts RECIPE

Figure 1: RECIPE project logo

Planungsgrundlagen

In Österreich bestehen bezüglich geeigneter flächendeckender Datengrundlagen zur Steinschlagmodellierung ebenso Defizite wie bei der klaren Regelung der Zuständigkeiten in der Beurteilung der Risikosituation und der eigentlichen Schadensprävention. Neben bundes- oder landesweit bestehenden Datenquellen (geologischen Karten, digitale, regionale Karten zu Waldstandorten sowie digitalen Geländemodellen) sind wichtige Zusatzinformationen (wie z.B. Daten bisheriger Schadensereignisse oder Gefahren-Index-Karten) häufig nur regional oder lokal verfügbar und variieren bezüglich Maßstab, Informationsgehalt und Interpretierbarkeit. Für Risikoanalysen wichtige Informationen zu Frequenz und Magnitude von Steinschlagereignissen sind nur selten vorhanden.

Für den Prototyp einer verbesserten Entscheidungshilfe müssen die bestehenden, auf die derzeitige statische Risikoplanung ausgelegten Unterlagen um eine dynamische Komponente der im Zuge des Klimawandels veränderlichen Einflussparameter (wie Temperaturanstieg oder mögliche Änderungen des Niederschlagsregimes) erweitert werden. Der Unsicherheit dieser künftigen Rahmenbedingungen kann mit dem Ansatz begegnet werden, dass mehrere, wahrscheinliche Szenarien von Entwicklungen berücksichtigt und deren Auswirkungen auf das Auftreten von Naturgefahren, die Exposition und Vulnerabilität modelliert werden.

Dynamische Risikobewertung unter Berücksichtigung möglicher Auswirkungen des Klimawandels

Folgende Auswirkungen des Temperaturanstiegs auf das Steinschlaggeschehen wurden vom BFW im Rahmen von RECIPE näher untersucht:

- Anstieg der Permafrostgrenze: Dieser erfolgt parallel zum Anstieg der durch-

schnittlichen Jahrestemperatur um ca. 150 m/°C (Schrott et al., 2012). Das Auftauen beeinflusst die Stabilität von Felswänden und Schuttkörpern. Von den dadurch bedingten Auswirkungen auf das Steinschlagrisiko sind insbesondere Infrastruktureinrichtungen in Ski gebieten, unter Umständen aber auch Verkehrsanlagen und Siedlungsraum in tieferen Lagen, betroffen.

- Veränderte Waldbestände (durch Trockenperioden, Schädlinge, Waldbrände, Windwürfe etc.) und damit verbundene Beeinträchtigungen der Schutzwirkung des Waldes.

Bei der Entwicklung des nachstehend vorgestellten Prototyps wurden die Auswirkungen des Anstiegs der Permafrostgrenze auf Steinschlag in Betracht genommen.

Als eine wichtige Datengrundlage wurde dabei die „APIM - Alpine Permafrost Index Map“ herangezogen. Diese wurde im Rahmen des Projekts „PermaNET – Permafrost Long-term Monitoring Network“ (Schoeneich et al., 2011) erarbeitet (Boeckli et al. 2012). Diese Karte zeigt einen für den gesamten Alpenraum einheitlichen, farblich abgestuften, modellierten „Permafrostindex“, der qualitativ die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Permafrost angibt. Die räumliche Auflösung beträgt ca. 30 m, daher ist die APIM auch für eine Anwendung auf lokaler Ebene geeignet. Die Karte steht als Web Map Service (WMS)-Layer online frei zur Verfügung (Abb. 2) und kann als Planungsgrundlage mit der URL <https://geoserver.geo.uzh.ch/cryogis/wms> in jedes übliche GIS-Programm eingebunden werden. Im Rahmen des PermaNet Projekts wurden zusätzlich auch Handbücher, Richtlinien, Anpassungsstrategien und Handlungsempfehlungen im Umgang mit Permafrost erarbeitet (Mair et al. 2011).

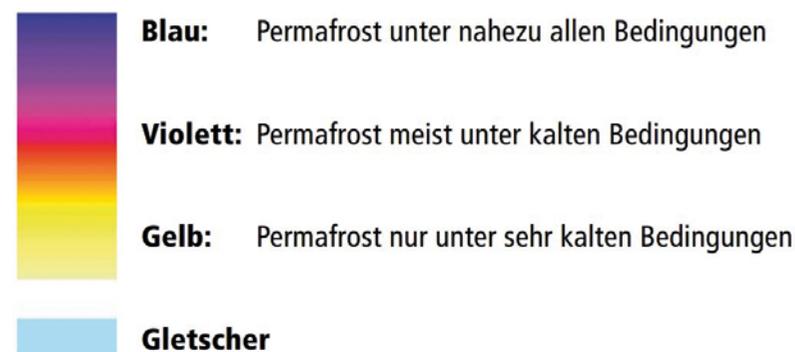
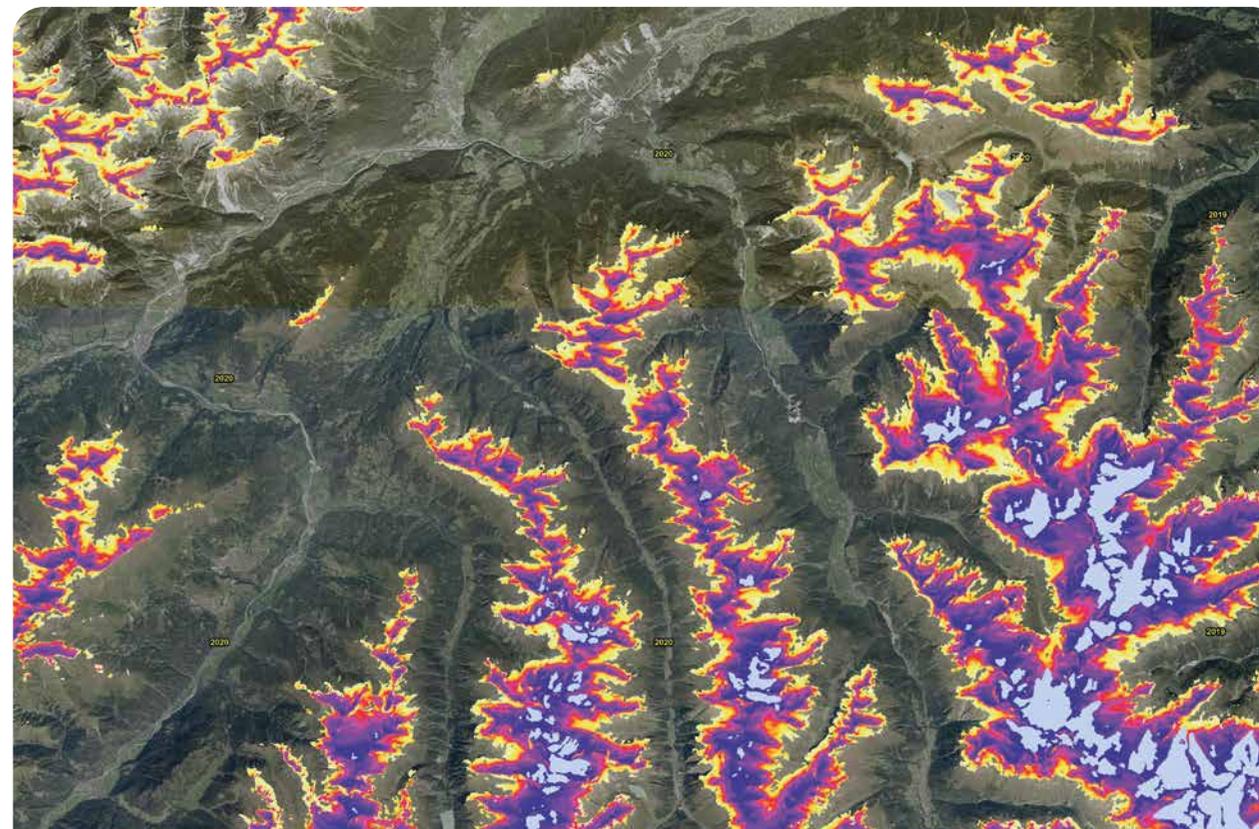


Abbildung 2:
„APIM - Alpine Permafrost Index Map“ als online frei verfügbarer WMS-layer

Figure 2:
„APIM - Alpine Permafrost Index Map“ as a WMS-layer freely available online

Kleinflächige Parameter wie z.B. Untergrundverhältnisse (anstehender Fels, Lockermaterial, organischer Boden) oder Schneeeverhältnisse konnten bei der Erstellung der Karte kaum berücksichtigt werden. Daher liegt der Legende für eine gezieltere Ersteinschätzung ein Interpretationsschlüssel bei. Den Planer:innen wird aufgrund der metho-

disch bedingten Unschärfen empfohlen, im Falle von durch die APIM indiziertem, möglichem Permafrostvorkommen, die Verhältnisse vor Ort mittels direkter (z.B. Bohrung) oder indirekter Methoden (z.B. Geophysik) durch Experten noch im Detail zu erkunden.

Beispiel für eine Steinschlagrisikoeinschätzung im Schigebiet Gaislachkogel (Sölden, Tirol)

Felswände und Schuttkörper mit Permafrost im Untergrund befinden sich normalerweise in einem stabilen Gleichgewicht. Vereinzelt traten in solchen Bereichen jedoch auch schon in der Vergangenheit Steinschläge auf. Aufgrund der allgemeinen fels- und bodenmechanischen Stabilität jedoch mit untergeordneter Frequenz und Magnitude. Bei Ansatz des Klimaszenarios RCP 8.5

erfolgt ein Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis zum Jahr 2100 um 4 °C gegenüber der Vergleichsperiode 1986-2005. Unter Annahme einer linearen Beziehung zwischen Permafrost-Untergrenze und Lufttemperatur, steigt die Permafrost-Untergrenze somit um 600–800 Meter (Schrott et al., 2012). Bisher stabile Bereiche werden zunehmend instabil. Das Trennflächengefüge lockert sich auf, die interne Reibung wird herabgesetzt. Zuvor in Kluffüllungen stabilisierend wirkendes Eis kann als Wasser in prädisponierte Kluftsysteme

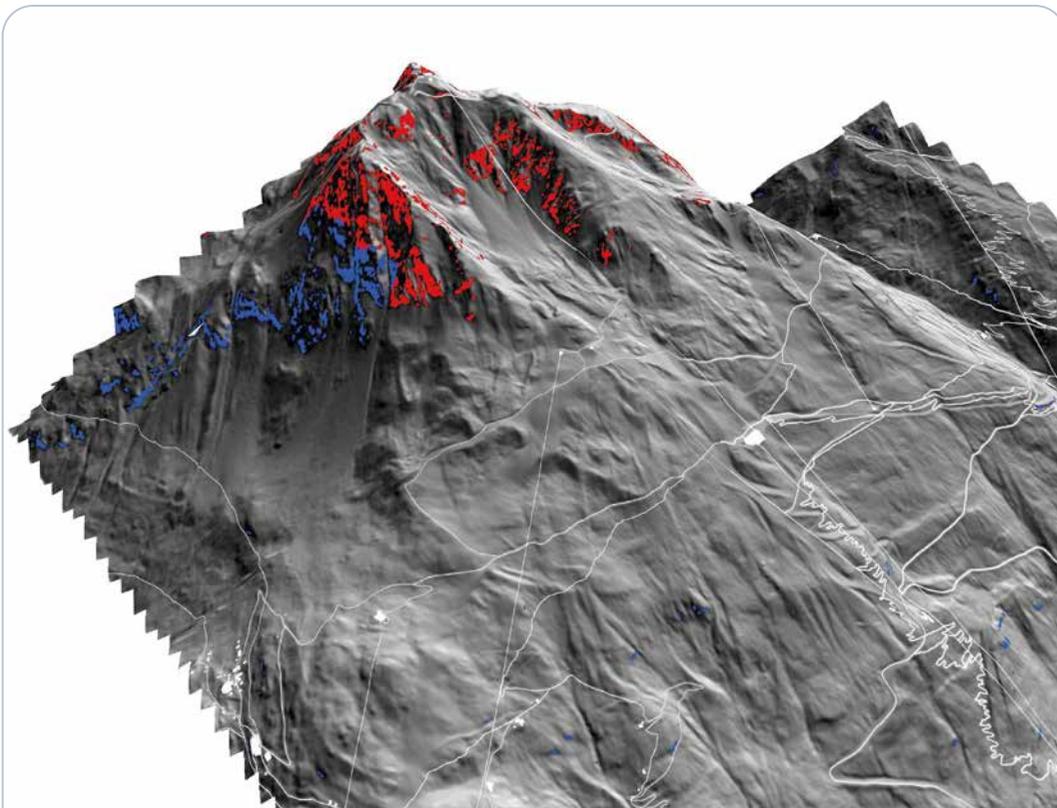


Abbildung 3: Geländemodell vom Schigebiet Gaislachkogel (Sölden). Blaue Flächen: derzeit bestehende, potenzielle Steinschlagabbruchgebiete (unterhalb der Permafrostgrenze); rote Flächen: potenzielle Abbruchgebiete nach dem klimawandelbedingten Anstieg der Permafrostgrenze

Figure 3: Terrain model of the ski area Gaislachkogel (Sölden). Blue areas: predominant rockfall areas before significant permafrost melt (below the current permafrost boundary); red areas: additional potential rockfall release areas after a climate change-induced rise of the permafrost boundary

eindringen und lockert diese durch Frost-Tau-Wechsel auf. Durch die Permafrostdegradation ist somit mit einer Intensivierung bzw. vermehrten Auslösung von Steinschlag zu rechnen (Schoeneich et al., 2011).

Für die Modellierung ist es notwendig, die Permafrostkarte, das Geländemodell sowie Informationen zur Infrastruktur in ein GIS zu importieren. Derzeit gibt es aber keine Unterlagen, in denen die potenziellen Ablösebereiche von Steinschlägen flächendeckend dargestellt sind. Für nachstehendes Beispiel werden daher in einem heuristischen Ansatz alle Flächen, die eine Neigung von über 50° aufweisen, im Geländemodell als potenzielle Steinschlagabbruchgebiete angenommen. Dieser Wert basiert auf Empfehlungen des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT, 2020).

Die initialen Steinschlagabbruchgebiete werden dabei in Bereiche ober- bzw. unterhalb

der Permafrostgrenze unterteilt. In diesem Beispiel wird angenommen, dass die potenziellen Steinschlagabbruchgebiete ohne Einfluss des Klimawandels nur unterhalb der Permafrostgrenze aktiv werden (Abb. 3, blaue Bereiche).

Bei dem gewählten Klima-Szenario RCP 8.5 steigt die Permafrostgrenze nun bis in den obersten Gipfelbereich, wodurch auch zusätzliche, potenzielle Steinschlagabbruchgebiete oberhalb der aktuellen Permafrostgrenze aktiv werden (Abb. 3, rote Bereiche).

Für die Bestimmung der Prozessbereiche wurde ein α -Winkelansatz zur Abschätzung der maximalen Reichweiten gewählt (D'Amboise, 2021). Der Alpha-Winkel ist dabei der Winkel, den die direkte Verbindungslinie zwischen dem obersten Abbruchsbereich des Steinschlags und der am weitesten entfernten Ablagerung des Prozesses mit der Horizontalen einschließt (Abb. 4).

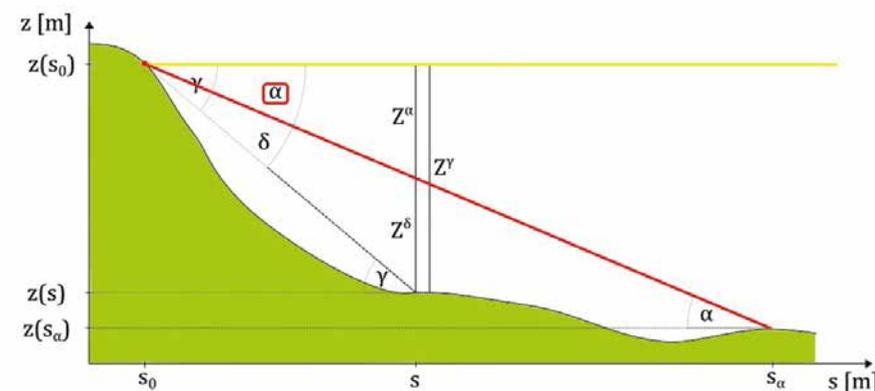


Abbildung 4: Alpha-Winkel (rote Linie) zur Bestimmung der maximalen Auslauflänge eines Steinschlagprozesses (D'Amboise, 2021)

Figure 4: Alpha angle (red line) for determining the maximum runout length of a rockfall process (D'Amboise, 2021)

Im Beispielsfall wurden Ausbreitung und Reichweiten der Steinschlagprozesse mit dem am BFW entwickelten Modell „Flow-Py“, einem open source Modell, berechnet. Der Modell-Code kann unter <https://github.com/avaframe/FlowPy> git heruntergeladen und erweitert werden. Für die Anwendung dieses Modells sind folgende Inputdaten erforderlich: Ein Rasterdatensatz, der die Abbruchbereiche definiert (Release Layer), sowie ein digitales Geländemodell (DEM). Die wichtigsten Parameter zur Beschreibung des Prozesses sind „alpha“ und „exp“. „Alpha“ beschreibt den Alphawinkel (s. auch Abb. 4), während „exp“ die laterale Ausbreitung eines Naturgefahrenprozesses definiert. Beide Parameter sollten von Experten auf Basis dokumentierter Ereignisse in der Region bestimmt werden.

Die Modelloutputs werden in Form von Rasterdatensätzen (TIFF/ASC) ausgegeben. Der Parameter „Cell counts“ beschreibt dabei, wie oft eine Rasterzelle von irgendeiner Trajektorie aus einem Ablöse-Rasterpixel getroffen wurde, d.h. je dunkler die Rotfärbung, umso konzentrierter sind hier die Steinschlag-Trajektorien. Informationen zur Interpretation der Modell-Outputs sind ebenfalls unter dem o.a. Link abrufbar.

Auswirkungen auf die Infrastruktur

Für das Bundesland Tirol sind u.a. folgende Unterlagen zu Infrastruktureinrichtungen (Risiko-elemente) als freier Download, parzellenscharf verfügbar:

- „Verkehrsinfrastruktur (GIP) Tirol“: Gesamtes Straßen- und Wegenetz von Tirol inkl. Bahnlinien der ÖBB und Privatbahnen oder alternativ: „Hochrangiges Straßennetz“ (Bundes- und Landesstraßen, ASFINAG – Netz)
- „Gebäude Tirol“: Gebäudebestand (Dachflächen als Polygon), manuell erfasst aus Fernerkundungsdaten
- Katalog Aufstiegshilfen in Tirol“: Auflistung aller Aufstiegshilfen mit Verortung des Landes Tirol aus dem Tiroler Sport-Informationssystem

Diese drei Datenquellen decken die gegenüber Naturgefahren potenziell exponierten Infrastrukturen im raumrelevanten Bereich (insbesondere Siedlungen) sowie auch außerhalb (alpine, touristische Infrastrukturen) weitgehend ab und können somit für eine erste Risikoanalyse auf lokalem Maßstab herangezogen werden.

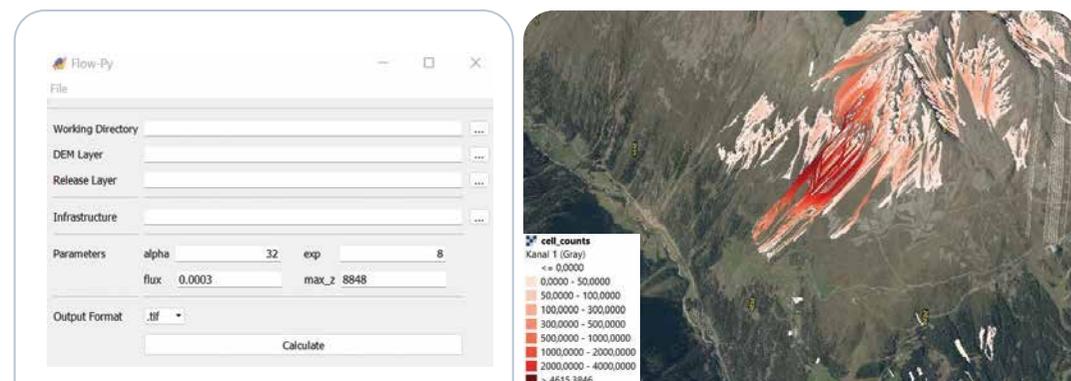


Abbildung 5: Eingabemaske des Modells „Flow-Py“ und Visualisierung der Outputs in einem GIS (D'Amboise et al., 2022)

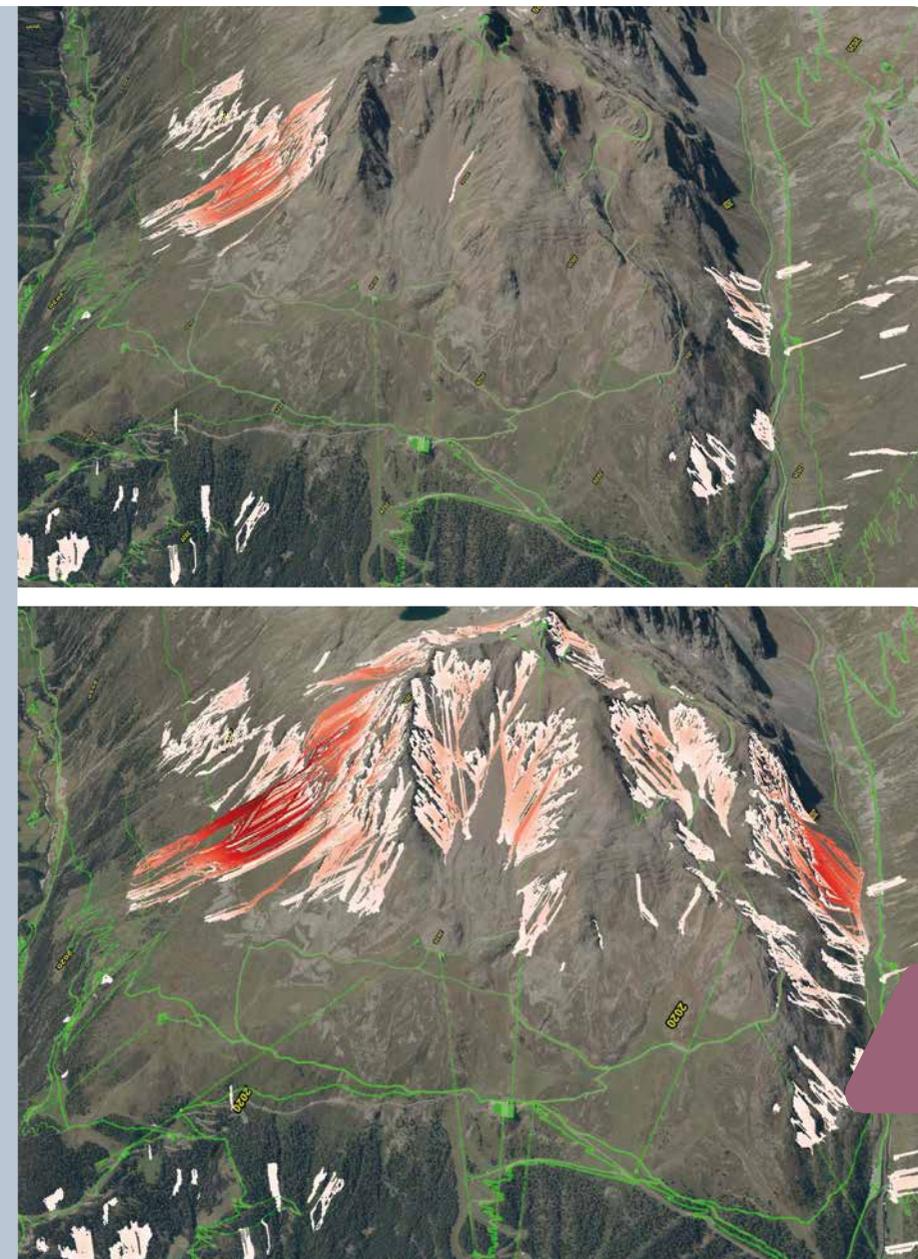
Figure 5: Input mask of the model "Flow-Py" and visualization of the outputs in a GIS (D'Amboise et al., 2022)

Die Verschneidung der mit Flow-Py modellierten Gefahrenkarte mit den Infrastrukturdaten erlaubt eine Steinschlag-Risikoanalyse des Istzustandes (Abb. 6 oben). Im unteren Bild in Abb. 6 wurden die Abbruchgebiete im Bereich der Permafrostdegradation miteinbezogen. Sie weisen daher (kün-

tige) Gefahren- und Risikobereiche unter Berücksichtigung des RCP 8.5 Klimawandelszenarios aus. Aufgrund der stark erweiterten, potenziellen Steinschlagprozessbereiche verschärft sich die Risikosituation unter den getroffenen Annahmen deutlich.

Abbildung 6: Vereinfachte Darstellung der Steinschlag-Prozessausbreitung. Oben: vor der Permafrostdegradation; unten nach dem Anstieg der Permafrostgrenze (RCP 8.5 Klimawandelszenario)

Figure 6: Predominantly areas affected by rockfall, above: before potential permafrost degradation, below: after the predicted permafrost boundary rise (RCP 8.5 climate change scenario).



Conclusio

Die vorgestellte Methode kann – in Abhängigkeit der Verfügbarkeit der entsprechenden Datengrundlagen – auch in anderen Ländern eingesetzt werden. Mit der „APIM – Alpine Permafrost Index Map“ (APIM, Boeckli et al., 2012) ist eine adäquate Datengrundlage zur Einschätzung der potenziellen Permafrost-Verbreitung für den gesamten Alpenraum verfügbar, deren räumliche Auflösung auch eine Anwendung auf lokaler Ebene erlaubt.

Die mögliche Integration der APIM in jedes standardisierte GIS ist die Grundlage für weiterführende Berechnungen der Ausläuflängen gravitativer Massenbewegungsprozesse aus Permafrostgebieten. Für den Prototyp wurde dafür das open source Modell Flow-Py eingesetzt, welches im Rahmen des Projekts „GreenRisk4Alps“ (Teich et al., 2018) vom BFW (D'Amboise et al., 2022) entwickelt und getestet wurde.

Die Verschneidung von berechneten Permafroststrückzugsgebieten und Geländemodellen, sowie die daran anschließenden Modellierungen der Ausläuflängen ermöglicht die Abschätzung der durch Steinschlag gefährdeten Bereiche unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien des Klimawandels. Die Verknüpfung mit Informationen zu Infrastruktureinrichtungen und Landnutzungen münden in die Abschätzung des bestehenden und des künftig zu erwartenden Risikos als Basis der Entwicklung adaptierter Schutzstrategien. Auch die Auswirkungen geplanter (zukünftiger) Infrastrukturprojekte hinsichtlich ihres Risikopotenzials kann dadurch überprüft werden.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Dr. Peter Andrecs
Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1130 Wien
peter.andreacs@bfw.gv.at

DI Karl Hagen
Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1130 Wien
karl.hagen@bfw.gv.at

Matthias Plörer B.Sc.
Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1, 6020 Innsbruck
matthias.ploerer@bfw.gv.at

Literatur/References:

- BMLRT (2020). Rock 'n' Roll am Berghang – Steinschlagschutz in Österreich; Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.
- BOECKLI, L., BRENNING, A., GRUBER A., NOETZLI, J. (2012). Alpine permafrost index map. PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.784450>
- D'AMBOISE C., NEUHAUSER M., TEICH M., HORMES A., ADAMS M., PLÖRER M., FISCHER J.T. (2021). Using the open-source gravity mass flow runoff model Flow-Py to identify and quantify protective forest
- D'AMBOISE, C. J. L., NEUHAUSER, M., TEICH, M., HUBER, A., KOFLER, A., PERZL, F., FROMM, R., KLEEMAYR, K., AND FISCHER, J.-T. (2022). Flow-Py v1.0: A customizable, open-source simulation tool to estimate runoff and intensity of gravitational mass flows. *Geosci. Model Dev.*, 15: 2423–2439. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-2423-2022>
- IPCC (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

MAIR V., ZISCHG A., LANG K., TONIDANDEL D., KRAINER K., KELLERER-PIRKLBAUER A., DELINE P., SCHOENEICH P., CREMONESE E., POGGIOTTI P., GRUBER S., BÖCKLI L., (2011). PermaNET - Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesebericht. INTERPRAEVENT Schriftenreihe 1, Report 3. Klagenfurt.

NEUHAUSER, M., D'AMBOISE, C., TEICH, M., KOFLER, A., HUBER, A., FROMM, R., FISCHER, J.-T. (2021). Flow-Py: routing and stopping of gravitational mass flows (1.0). Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5027275>

SCHROTT L., OTTO J.C., KELLER F. (2012). Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria; *Austrian journal of earth sciences*, volume 105/2, 169-183

SCHOENEICH P., DALL'AMICO M., DELINE P., ZISCHG A., EDS (2011). Hazards related to permafrost and to permafrost degradation. PermaNET project, state-of-the-art report 6.2. Online publication ISBN 978-2-903095-59-8.

TEICH M. (2018). INTERREG-ALPINE SPACE project GreenRisk4ALPs, Development of ecosystem-based risk governance concepts with respect to natural hazards and climate impacts – from ecosystem-based solutions to integrated risk assessment. Im Internet unter: <https://www.alpine-space.eu/news-events/>



INADEF, Einsatz eines Frühwarnsystems als Anpassungsstrategie für Muren unter veränderten Rahmenbedingungen

INADEF, application of an early warning system as adaption strategy for debris flow under changed frame conditions

Zusammenfassung:

Im Zuge des Klimawandels ist mit intensiveren Niederschlägen und dadurch vermehrten Murgängen zu rechnen. Dadurch können bestehende technische Schutzmaßnahmen unzureichend werden. Frühwarnsysteme wie der INADEF-Prototyp stellen eine kostengünstige Alternative oder Ergänzung bestehender Schutzmaßnahmen dar. Bei dem vorgestellten Prototyp werden in einer Modellkaskade ein Kurzfrist-Niederschlagsprognosesystem mit einem Niederschlags-Abfluss- und einem Mur-Modell gekoppelt, was Vorwarnzeiten im Stundenbereich ermöglicht. Die Evaluierung in fünf Testgebieten in Italien und Österreich ergab erhebliche Unterschiede der Prognosequalität. Die für die erfolgreiche Anwendung notwendigen Voraussetzungen konnten weitgehend identifiziert werden.

Abstract:

Due to climate change, more heavy rainfall events and thus an increase of debris flow events is expected. Thus, existing technical protection measures may no longer be sufficient. Early warning systems like the presented INADEF prototype can be a cost-effective alternative or supplement of existing structures. Here, a model cascade consisting of a short-term precipitation forecast-system, a precipitation-runoff model and a mudflow model are linked, providing alert-times in the range of hours. The evaluation in five test areas in Italy and Austria showed considerable differences in the forecast quality. The requirements for the successful application could be mostly identified.

Stichwörter:

Mure,
Frühwarnsystem,
Klimawandel,
optische
Überwachung

Keywords:

Debris flow, early warning system, climate change, optical monitoring

Einleitung

Durch den vom Menschen verursachten Klimawandel ist mit häufigeren und intensiveren Extremereignissen zu rechnen, deren Auswirkungen über die durch die natürliche Klimavariabilität verursachten, möglichen Schäden hinausgehen (IPCC, 2022). Auch wenn die Prognosen für kurze konvektive Niederschlagsereignisse besonders unsicher sind, ist doch davon auszugehen, dass diese zunehmend intensiver werden (IPCC, 2021). Hosseinzadehtalaei et al. (2020) fanden, dass die Intensitäten besonders mit zunehmender Jährlichkeit stärker steigen werden. Für 100 jährliche Niederschlagsereignisse kurzer Dauer (RCP 8.5 Szenario, 2071–2100) ist demnach in Europa mit einer Erhöhung von etwa 25 % zu rechnen.

Technische Schutzmaßnahmen, die auf Bemessungsereignisse und Erfahrungen (Wildbachchroniken) beruhen, werden dadurch in vielen Bereichen zwangsläufig nicht mehr ausreichend dimensioniert sein. Eine Erweiterung der Durchflussprofile oder Rückhalteräume ist aber aufgrund eingeschränkter Platzverhältnisse häufig kaum möglich beziehungsweise in Zeiten knapper Ressourcen aus wirtschaftlichen Gründen auch nicht in großem Umfang realisierbar. Eine Alternative können kostengünstige, temporäre Schutzmaßnahmen sein (Sättele et al., 2015), die allerdings möglichst verlässliche und rechtzeitige Warnungen voraussetzen.

Für die Frühwarnung von Murgängen gibt es zwei maßgebliche Funktionstypen:

- Aktivierung von Sensoren (Stolperdrähte, Geophone, Pegelsensoren) im oberen Einzugsgebiet durch einen bereits ausgelösten Murgang. Diese weisen hohe Treffsicherheit aber nur kurze Vorwarnzeiten (im Minutenbereich) auf. Genügend Zeit, um zum Beispiel Ampelschaltungen zu steuern, zu wenig, um temporäre Schutzeinrichtungen zu errichten oder Personen zu evakuieren.
- Aktivierung einer Warnung bei Überschreiten bestimmter Schwellwerte für die Niederschlagsintensität. Diese Systeme können sowohl mit Messdaten (Niederschlagswaagen, Wetterradar) als auch mit prognostizierten Niederschlagsmengen gespeist werden. Letzteres erlaubt, je nach Prognosezeitraum, längere Vorwarnzeiten, allerdings bei abnehmender Treffsicherheit. Auch sind die Warnungen solcher Frühwarnsysteme bisher hinsichtlich Ort und Art recht allgemein gehalten.

Der in INADEF (Innovative Nowcasting based early wArning system for DEbris Flow events, INTERREG ITAT3035, 2019–2022) entwickelte Frühwarnsystem-Prototyp greift auf Niederschlagsprognosen zurück. Dabei erfolgt die Alarmierung aber nicht bei Überschreiten eines Niederschlagsgrenzwertes sondern auf Basis einer komplexen Modellkette.

Aufbau und Funktion des Prototyps

Die Grundidee von INADEF basiert auf der Kombination von bereits bestehenden, unabhängigen Modellen, die adaptiert und auf einer WEB-GIS Plattform miteinander gekoppelt werden (Abb.1,

Abb. 2). Die einzelnen Modellkomponenten sind im Heft 187 (Hagen und Lechner, 2021) beschrieben.

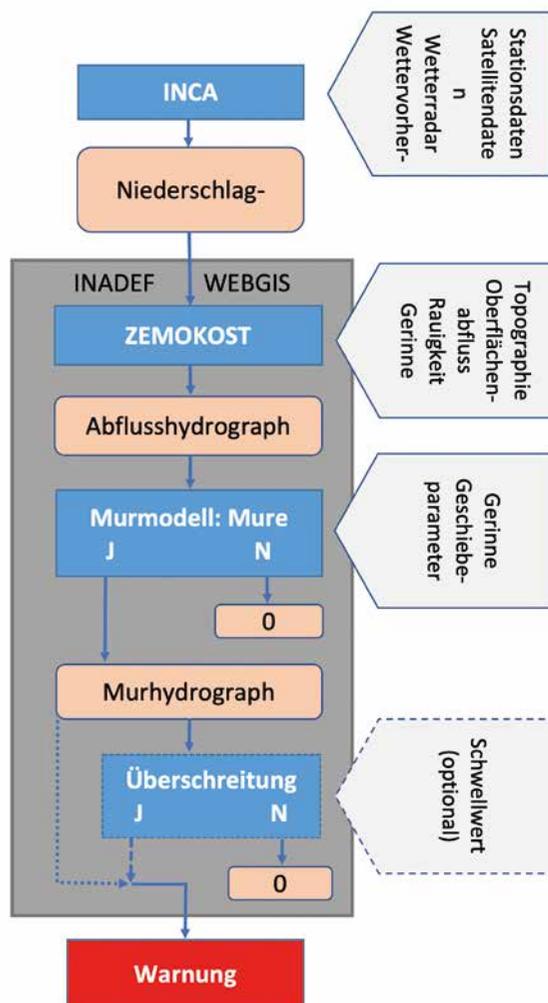


Abbildung 1: Schema des in INADEF entwickelten Frühwarnsystem-Prototyps; in blau das Modell, in orange der Modelloutput

Figure 1: Scheme of the early warning system prototype developed within INADEF; in blue the model in orange the model output

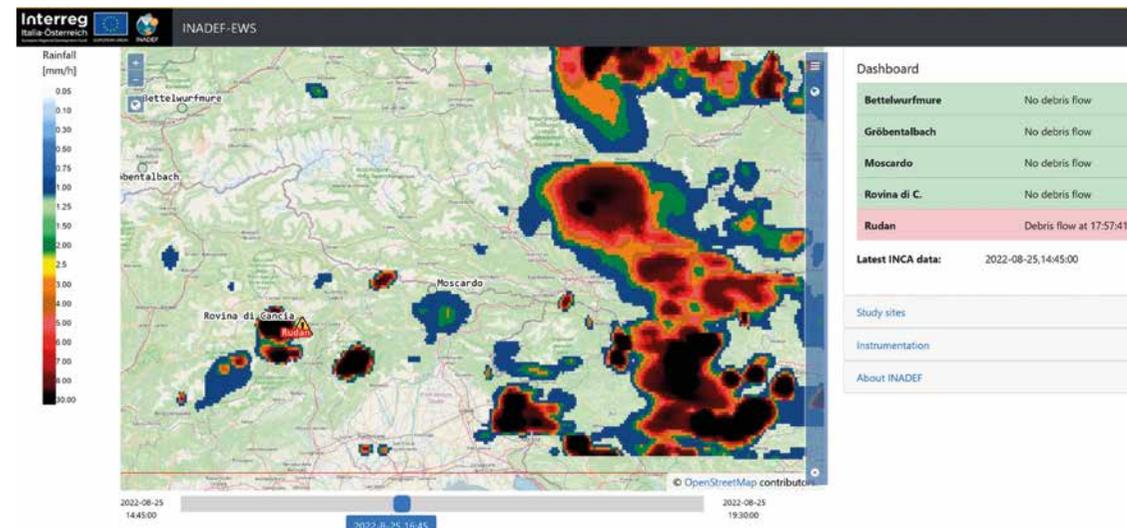


Abbildung 2: GUI (Benutzeroberfläche) der WebGIS Applikation, 25.8.2022: Echtzeitbetrieb - Alarm für den Rio Rudan. Tatsächlich wurde vor Ort ein heftiges, konvektives Ereignis beobachtet, dass jedoch keine Mure auslöste

Figure 2: GUI (user interface) of the WebGIS application, 25.8.2022: Real-time operation - alarm for Rio Rudan. In fact, a strong convective event was observed on site, which however, did not trigger a debris flow

Muren werden im Alpenraum überwiegend von intensiven, oft kleinräumigen (konvektiven) Niederschlagsereignissen ausgelöst (Prenner et al. 2020). Deren räumliche und zeitliche Prognose liefert ein externes Kurzfristprognosemodell (z.B. INCA der ZAMG). Gemeinsam mit spezifischen Gebietsinformationen, wie Infiltrationseigenschaften des Bodens und Oberflächenrauigkeit, sind sie Input für die Niederschlags-Abflussmodellierung. Diese erfolgt mit einer, in ein WebGIS implementierten, adaptierten Version des am BFW entwickelten, praxiserprobten Modelles ZEMOKOST (Kohl, 2011).

Im Echtzeitbetrieb hat sich gezeigt, dass der adaptierte ZEMOKOST-Ansatz sowohl für Teileinzugsgebiete als auch für das gesamte Gebiet in Sekundenschnelle Abflusshydrogra-

phen ermitteln kann. Diese speisen gemeinsam mit zusätzlichen Informationen zum Gerinne ein numerisches Modell der Universität Padua, das in weniger als einer Minute berechnet, ob mit einem Murgang zu rechnen ist (Bernard, 2019). Ist dies der Fall, so werden auch der Murhydrograph und das Volumen des Murgangs abgeschätzt. Verständigungen via E-Mail oder SMS können für den Fall einer prognostizierten Mure, oder ab Überschreitung eines vorab festzulegenden Grenzwertes für Geschiebevolumen oder Abflussspitze, versandt werden.

INADEF ist modular aufgebaut, um den Austausch einzelner Modelle beziehungsweise die Adaption des Ansatzes (anderes Prognosemodell, zusätzliche Geschiebetransportfunktionen etc.) mit überschaubarem Aufwand zu ermöglichen.

Niederschlags-Szenarien

Da die INCA-Daten erfahrungsgemäß eine gewisse Unschärfe der räumlichen Verteilung der Intensitäten aufweisen, wurde die Einzugsgebietsfläche nicht parzellenscharf mit dem Niederschlagsraster verschnitten, sondern vereinfacht alle Rasterzellen, die Teile des Einzugsgebietes abdecken, herangezogen (m0). Der Niederschlag wird dabei aufgrund der geringen Gebietsgrößen als gleichverteilt angenommen, die Rasterzellen gehen ungewichtet in die Ermittlung des Gebietsniederschlags ein. Ergänzend wurde dieser Betrachtungsraum für jedes Einzugsgebiet zunächst um einen (m1) und dann um zwei Kilometer (m2) erweitert (Abb. 3), um zu testen, ob damit die in den INCA-Daten enthaltenen Lageungenauigkeiten abgefedert werden können.

Um die Auswirkungen der Ungenauigkeiten bei den prognostizierten Niederschlagsintensitäten zu verringern, wurden drei Berechnungsmethoden der Gebietsniederschlagsermittlung getestet:

- Max.: das Maximum aus allen Rasterzellen, die dem Einzugsgebiet zugewiesen sind
- Mean: der Mittelwert aus allen Rasterzellen
- Percentile: das 90. Perzentil aus allen Rasterzellen

Durch die drei Betrachtungsräume und die drei Berechnungsmethoden ergeben sich für jedes Testgebiet neun Niederschlagsszenarien, die in der Folge alle modelliert und evaluiert wurden (Tab. 1).

Für das in Abb. 3 gezeigte Beispiel ergibt sich z.B. für das Maximalszenario bei der Wahl des m1 Betrachtungsraums statt des m0 Betrachtungsraums eine deutliche Steigerung des Gebietsniederschlags. Die Wahl des m2 Betrachtungsraums würde dagegen zu keiner weiteren Erhöhung führen. Sinngemäß gilt dies auch für die Berechnungsmethode mittels Perzentile und Mittelwert.

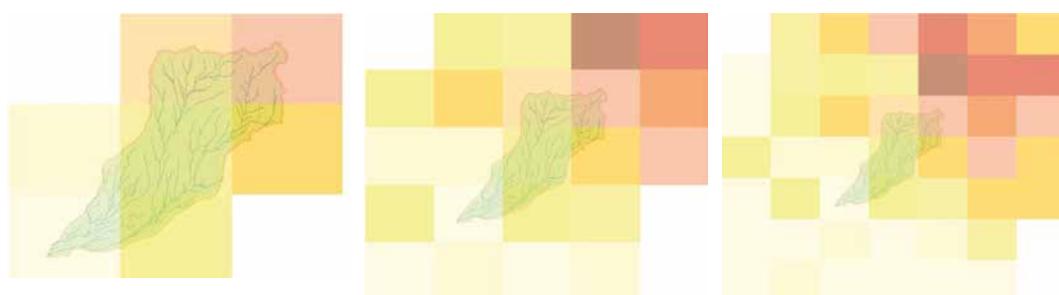


Abbildung 3: Betrachtungsräume des Einzugsgebietsniederschlags, von links nach rechts: m0, m1, m2; Legende: hellgelb geringe, dunkelrot hohe Niederschlagsintensitäten

Figure 3: Calculation of the catchment precipitation, masks from left to right: m0, m1, m2; color legend: light yellow low, dark red high precipitation intensities

Die Testgebiete

Die Testung und Bewertung des Prototyps erfolgte im Rahmen des Projektes auf Basis aufgezeichneter oder dokumentierter Ereignisse in fünf Testgebieten in Italien (Rio Moscardo – Friaul-Julisch Venetien, Rovina di Cancia – Belluno, Rio Rudan – Belluno) und Österreich (Bettelwurfgraben – Halltal, Gröbentalbach – Stubaital, beide Tirol). Detaillierte Angaben zu den Gebieten finden sich bei Hagen und Lechner (2021). Die Überprüfung der Funktionalität wurde im Echtzeitbetrieb vorgenommen. Die Überwachung der Muraktivität erfolgte im Rahmen des Projektes in den Testgebieten mittels (kostengünstiger) optischer Zeitrafferkameras. Ergänzend wurden Wildkameras

installiert, welche täglich ein Nachtbild übermitteln, auf dem im Murkanal situierte Reflektoren mit eingebauten IR-LEDs sichtbar sind. Werden diese Reflektoren im Zuge eines Ereignisses mitgerissen, sind sie nicht mehr am täglichen Bild sichtbar und eine automatisierte Meldung via E-Mail wird abgesetzt (Abb. 4).

Mit dem System konnte ein kleineres Ereignis (Bettelwurf, 11.7.2021) schnell identifiziert und analysiert werden, während die Unwetterfront, die Ende Juli 2022 das Stubaital überquerte, im nächstgelegenen Testgebiet Gröbentalbach kein Mureignis zur Folge hatte.

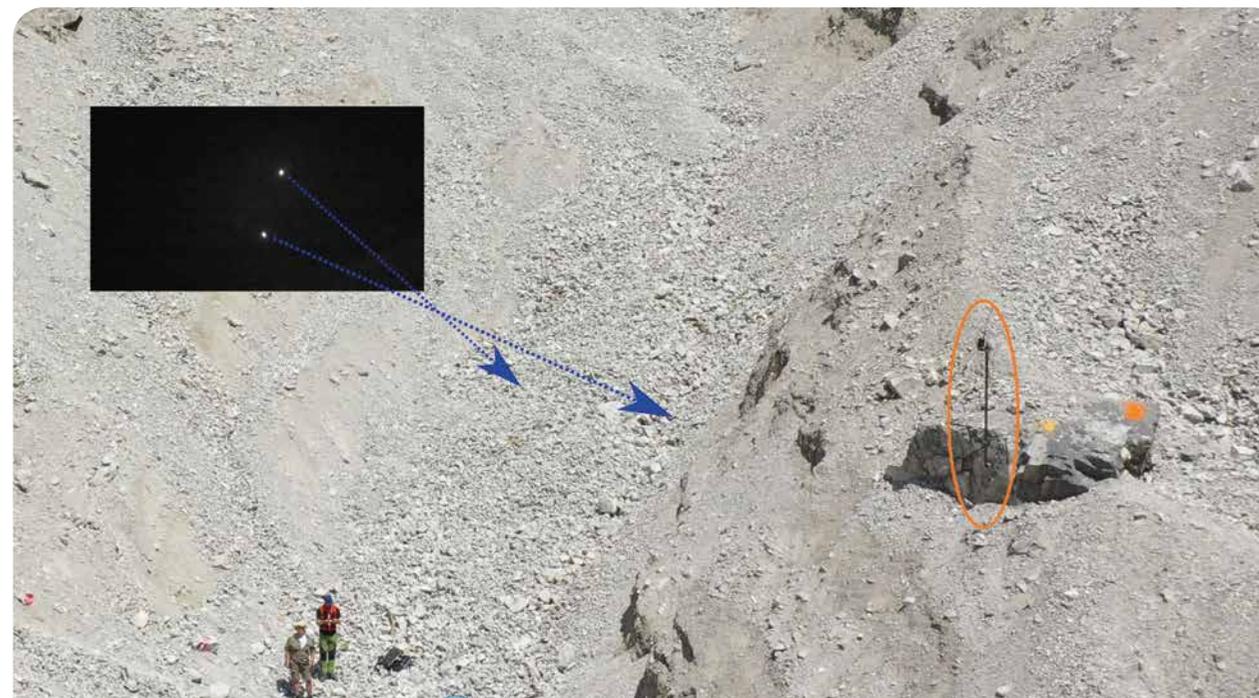


Abbildung 4: Optische Murüberwachung (orange markiert) mittels Zeitrafferkamera, Wildkamera und Reflektoren (Nachtbild)

Figure 4: Optical debris flow monitoring station (orange marked) with time-lapse cameras, game-cams, and reflectors (night image)

Die optischen Messeinrichtungen wurden um meteorologische Stationen und, während der Projektlaufzeit, um ereignisinduzierte UAS-Befliegungen ergänzt. Weiters wurden geologische Gutachten beauftragt, der Oberflächenabfluss nach Markart et al. (2004) bestimmt und Gerinneparameter erhoben.

Evaluierung des Prototyps

Für die Evaluierung wurden Datensätze aus dem Zeitraum 2010 und 2020 (11 Jahre) herangezogen. Es zeigte sich, dass die Dokumentationen durchaus unterschiedliche Qualität aufweisen. In Zeiträumen, in denen die Testgebiete bereits instrumentiert waren, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass (zumindest am Beobachtungspunkt) alle Ereignisse identifiziert wurden. Informationsquellen für darüber hinaus gehende Zeiträume (WLV Ereignisdatenbank, Feuerwehreinsatzdokumentation, Gemeindearchive) sind dagegen meist unvollständig. Insbesondere kleinere Ereignisse ohne Schäden oder notwendige Sofortmaßnahmen wurden (vor allem bei der Bettelwurfmaure) häufig nicht dokumentiert.

Weiters konnten keine INCA-Prognosen für die Evaluierung herangezogen werden, da diese seitens der ZAMG nicht abgespeichert werden. Um dennoch Niederschlagsdaten für den Kontrollzeitraum zur Verfügung zu haben, wurden für alle Niederschlagsereignisse über 10 mm/h Intensität INCA-Postanalysen erstellt. Es ist davon auszugehen, dass diese die Niederschlagsereignisse tendenziell besser abbilden als „echte Prognosen“, was Auswirkungen auf die Resultate der Evaluierung hat.

Für die Bewertung wurden die registrierten und/oder dokumentierten Ereignisse mit den

Modellergebnissen verglichen. Die Evaluierung erfolgte dabei sowohl mittels statistischer Verfahren als auch im Zuge von Einzelereignisanalysen. Beim Einsatz statistischer Verfahren gibt es grundsätzlich vier mögliche Fälle (Abb. 5), wobei richtig erkannte Ereignisse (vorhergesagt- ja und beobachtet- ja) und alle „nicht eingetroffenen Ereignisse“ (vorhergesagt- nein und beobachtet- nein) als Treffer und somit als korrekte Vorhersage gewertet werden.

Ereignis	beobachtet	
	ja	nein
vorhergesagt ja	n pjoj	n pnoj
vorhergesagt nein	n pjon	n pnon

Abbildung 5: Mögliche Ergebnisse im Vergleich: Modellierung / dokumentierte Ereignisse

Figure 5: Possible results of the comparison: modelling / documented events

Die einseitige Verteilung der Vorhersagen (überwiegend kein Ereignis vorhergesagt und beobachtet) würde Trefferraten (hit rates) von über 99 % bewirken. Um aussagekräftige Kennwerte zu erhalten, wurde daher (unter anderen) das Cohens Kappa nach Landis and Koch (1977) ermittelt, mit dem zufällig richtige Vorhersagen herausgefiltert und dadurch die Vorhersagequalität bewertet werden kann (Tab. 1).

Zwischen den Gebieten gibt es erhebliche Unterschiede in der Prognosequalität. Tabelle 1 zeigt, dass keine, über alle Testgebiete allgemein

Szenario	R. Moscardo	R. Rudan	Bettelwurf	Cancia	Gröbentalbach	Mittelwert
m0_max	0,399	0,221	0,333	0,599	0,600	0,430
m0_mean	0,132	0,299	0,461	0,587	0,500	0,396
m0_percentile	0,332	0,239	0,333	0,599	0,600	0,420
m1_max	0,415	0,186	0,249	0,608	0,714	0,434
m1_mean	-0,001	0,315	0,461	0,499	0,500	0,355
m1_percentile	0,298	0,213	0,333	0,570	0,600	0,403
m2_max	0,478	0,170	0,186	0,608	0,705	0,430
m2_mean	-0,001	0,332	0,499	0,533	0,500	0,373
m2_percentile	0,284	0,192	0,299	0,570	0,727	0,414
Mittelwert	0,260	0,241	0,350	0,575	0,605	0,406
Max	0,478	0,332	0,499	0,608	0,727	0,434

Tabelle 1: Cohens Kappa für alle Szenarien und Testgebiete (≤ 0 keine Übereinstimmung, $\geq 0,81-1$ sehr gute Übereinstimmung), Qualität der Ereignisprognosen, beste Werte sind rot hinterlegt

Table 1: Cohen's kappa for all scenarios and test sites (≤ 0 no agreement, $\geq 0,81-1$ perfect), quality of event forecasts, best values highlighted in red

gültige Aussage bezüglich der Wahl eines besonders geeigneten Szenarios zur Ermittlung des Gebietsniederschlags getroffen werden kann. Allerdings hat die Wahl des Niederschlags-Szenarios, außer im Rio Moscardo, nur mäßigen Einfluss auf die Ergebnisqualität. Im Gröbentalbach und Rovina di Cancia wurden die besten Werte für das Gütekriterium Cohens Kappa erzielt (substantial), während die Vorhersagequalität für die besten Szenarien in den anderen Gebieten noch mit moderat beurteilt werden konnten; nur im

Rio Rudan lag sie auf niedrigem Niveau. Besonders für die Bettelwurfmaure ist zu bedenken, dass durchaus prognostizierte, kleinere Ereignisse auch tatsächlich stattgefunden haben könnten, die aber nicht dokumentiert wurden – der ermittelte Wert für Cohens Kappa ist daher als Untergrenze zu sehen, die Vorhersagequalität ist dementsprechend wahrscheinlich höher. Im Rio Rudan traten auch durch Hangrutschungen induzierte Muren auf, für deren Vorhersage der INADEF-Prototyp nicht geeignet ist.

Weitere statistische Analysen (modifizierte hit-rate, Eintrittswahrscheinlichkeit) sowie die Einzelereignisanalysen bestätigen diese Aussagen weitgehend. Werden Ereignisse richtig erkannt, so ist die zeitliche Genauigkeit der Vorhersage überwiegend gut, die Abschätzung des Volumens lässt hingegen noch „viel Luft nach oben“.

Voraussetzungen für den Einsatz des INADEF-Prototyps

Der Einsatz des neu entwickelten Frühwarnsystems INADEF ist nicht überall eine sinnvolle Alternative oder Ergänzung zu bestehenden Maßnahmen, er ist an gewisse Voraussetzungen gebunden. Zunächst ist die Frage nach der primären Ereignisursache zu klären. Der Prototyp kann systembedingt nur Murereignisse identifizieren, die durch (hohe) Gerinneabflüsse und damit verbundener Seiten- und Tiefenerosion ausgelöst werden. Ereignisse, die auf Rutschungen, Schneeschmelze etc. zurückzuführen sind, können nicht erkannt werden.

Eine weitere Voraussetzung ist die Verfügbarkeit der Informationsgrundlagen, insbesondere die permanente Bereitstellung qualitativ hochwertiger Niederschlagsprognosedaten (z.B. INCA). Neben deren grundsätzlicher Verfügbarkeit ist auch die voraussichtliche Qualität zu klären, die stark von der Qualität der Wetterradar-daten abhängig ist. Gebiete, die vom Wetterradar abgeschattet oder weit von der nächsten Radarstation entfernt sind, eignen sich weniger. Durch ExpertInnen erhobene Geländedaten sowie vorhandene Ereignisdokumentationen für die Kalibrierung des Prototypens sind weitere Voraussetzungen.

Angemerkt sei, dass Frühwarnsysteme vor allem dort Sinn machen, wo durch temporäre Maßnahmen – wie zum Beispiel Objektschutz, gezielte Steuerung von Einsatzkräften, Sperren

von Verkehrswegen oder Evakuierungen – Schäden wesentlich verringert werden können. „Last but not least“ ist die Einstellung vor Ort, die Erwartungen beziehungsweise die Risikotoleranz, die Bereitschaft der lokalen Bevölkerung zur Mitwirkung und die Klärung operativer Fragen (Verantwortliche, Alarmpläne...) entscheidend für eine erfolgreiche Implementierung.

Conclusio

Im Rahmen des INTERREG Projektes INADEF (ITAT3035) konnte ein vielversprechender Prototyp eines Frühwarnsystems für Muren entwickelt werden. Ein längerer, im Projektrahmen nicht realisierbarer Echtzeit-Testbetrieb wäre jedoch für eine finale Beurteilung notwendig, welcher auch über mögliche Vorwarnzeiten und damit verbundene Prognosequalitäten weitere Angaben ermöglichen würde.

Bei Frühwarnsystemen, die auf Prognosemodellen basieren ist generell davon auszugehen, dass nicht zuletzt in Abhängigkeit der jeweiligen Modellkalibrierung (z.B. Wahl des maßgeblichen Szenarios) immer auch Fehlalarme ausgelöst oder Ereignisse nicht identifiziert werden können. Auch bieten sie keinen Schutz im Sinne technischer Verbauungen. Diese Faktoren sind bei der Wahl dieser Schutzstrategie entsprechend zu kommunizieren. Vorteile sind die vergleichsweise geringen Kosten, die Flexibilität des Systems gegenüber Änderungen (Stichwort Klimawandel) und die geringe Beeinträchtigung der Landschaft.

Zur Erreichung einer optimierten Prognosequalität ist jedenfalls zu überprüfen, ob die angeführten Voraussetzungen erfüllt werden. Im derzeitigen Entwicklungsstadium sollte der Prototyp in den einzelnen Gebieten während des Betriebes nachkalibriert werden. Dies erfordert eine verlässliche Ereignisdokumentation, die mittels des Einsatzes optischer Instrumentarien

kostengünstig möglich ist. Da es sich bei dem im Rahmen des INTERREG-Projektes entwickelten Ansatz um einen Prototyp handelt, besteht natürlich noch Verbesserungspotenzial. Dies betrifft einerseits das Modell selbst (zum Beispiel die Interaktion zwischen den Modellkomponenten), andererseits auch die Kalibrierung des Modelles, bei welcher noch kaum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden konnte. Zumindest für die ersten Jahre wird daher eine intensivierete Ereignisdokumentation empfohlen. Diese kann mittels einer ebenfalls im Projekt entwickelten (wenig aufwändigen) optischen Überwachung erfolgen, wodurch mit einer Steigerung der Prognosequalität im Laufe der Zeit zu rechnen ist. Bei einer allfälligen Implementierung ist die Begleitung durch die Entwickler sinnvoll und wünschenswert, um Verbesserungspotenziale bestmöglich zu nutzen.

Die Frage, wer in Österreich Betreiber eines solchen Systems sein könnte, wurde im Projekt nur gestreift, wäre aber, da sie mit erheblichen Anforderungen (24/7 Erreichbarkeit etc.) verbunden ist, zu klären.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

DI Karl Hagen
Bundesforschungszentrum für Wald
Seckendorff-Gudent-Weg 8, 1130 Wien
karl.hagen@bfw.gv.at

DI Veronika Lechner
Bundesforschungszentrum für Wald
Rennweg 1, 6020 Innsbruck
veronika.lechner@bfw.gv.at

Christian Demmler
Bundesforschungszentrum für Wald
Rennweg 1, 6020 Innsbruck
christian.demmler@bfw.gv.at

Literatur/References:

- BERNARD M., BOREGGIO M., DEGETTO M., GREGORETTI C. (2019). Model-based approach for design and performance evaluation of works controlling stony debris flow with an application to a case study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy). *Science of the Total Environment* 688: 1373-1388
- HAGEN K., LECHNER V. (2021). Entwicklung eines Frühwarnsystems für Muren (INADEF). *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz*, Heft 187.
- HOSSEINZADEHTALAEI P., TABARI H., WILLEMS P. (2020). Climate change impact on short-duration extreme precipitation and intensity-duration-frequency curves over Europe. *Journal of Hydrology* 590 (6): 125249
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L., Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 3–32
- IPCC (2022). Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33
- KANN A., MEIROLD-MAUTNER I., SCHMID F., KIRCHENGAST G., FUCHSBERGER J., MEYER V., TÜCHLER L., BICA B. (2015). Evaluation of high-resolution precipitation analyses using a dense station network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 19: 1547–1559
- KOHL B. (2011). Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST, Entwicklung eines praktikablen Modells zur Ermittlung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation an der Leopold-Franzens Universität Innsbruck
- LANDIS J. R., KOCH G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33: 159–174
- MARKART G., KOHL B., SOTIER B., SCHAUER T., BUNZA G., STERN R. (2004). Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). Dokumentation; Schriftenreihe des Bundesamtes und Forschungszentrums für Wald, Wien, 2004, Nr. 3
- PRENNER D., HRACHOWITZ M., KAITNA R. (2019). Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of the Total Environment* 658: 958-972
- SÄTTELE M., BRÜNDL M., STRAUB D. (2015). Reliability and effectiveness of early warning systems for natural hazards: Concept and application to debris flow warning. *Reliability Engineering and System Safety* 142: 192–202

MARKUS KEUSCHNIG, MARKUS DÖRFLER, INGO HARTMEYER

Satellitenbasierte Detektion von Bodenbewegungen für die Überwachung von Wildbacheinzugsgebieten und Schutzbauwerken

Satellite-based detection of ground motion

for monitoring torrent catchments and protective structures.

Zusammenfassung:

Neue Satellitenmissionen und verbesserte Analyseverfahren haben in den letzten 5–10 Jahren zu signifikanten Fortschritten im Bereich der satellitenbasierten Radarinterferometrie (SB-InSAR) geführt und ermöglichen mittlerweile die großflächige Identifikation von Bodenbewegungen im Millimeterbereich. SB-InSAR stellt damit ein wertvolles Analysetool im Naturgefahrenbereich dar und ist im Zusammenhang mit der erwarteten klimawandelbedingten Zunahme von alpinen Naturgefahren von zentraler Bedeutung. Durch die hohe räumliche Präzision und das hohe zeitliche Auflösungsvermögen ist SB-InSAR in der Lage, die Kinematik langsamer Kriech- und Rutschbewegungen exakt zu charakterisieren. Dies ermöglicht die Früherkennung potenziell gefährlicher Beschleunigungstrends und die rechtzeitige Ergreifung von Adaptionsmaßnahmen.

Abstract:

Over the last 5–10 years new satellite missions and improved analytical procedures led to significant progress in satellite-based radar interferometry (SB-InSAR) and have enabled the identification of ground movements at millimetre accuracy over large surface areas. SB-InSAR thus represents a valuable tool for natural hazard analysis and is of central importance regarding the expected climate change-related increase in alpine natural hazards. Due to its high spatial precision and high temporal resolution, SB-InSAR is capable of accurately characterizing the kinematics of slow creep and slide movements. This enables early detection of potentially dangerous acceleration trends and timely adoption of adaptation measures.

Stichwörter:

SB-InSAR,
Radarinterferometrie,
Klimawandel,
Naturgefahren,
Massenbewegungen

Keywords:

*SB-InSAR, radar interferometry,
climate change, natural hazards,
mass movements*

Hintergrund

Auf Grund ihrer Berührungslosigkeit und ihrer gleichzeitigen Fähigkeit große Flächen zu erfassen, sind Fernerkundungsverfahren in der Analyse alpiner Naturgefahren von großer Relevanz. Besonders Beobachtungen in steilen, entlegenen Gebieten, welche durch Ortsbegehungen bzw. direkte Messungen in der Regel gefährlich oder undurchführbar sind, werden ermöglicht (Kääb et al. 2000). Passive Fernerkundungssysteme messen die natürlich vorhandene elektromagnetische Strahlung (reflektierte Sonnenstrahlung, von der Erdoberfläche ausgehende Wärmestrahlung). Beispiele für passive Systeme sind Multispektralscanner oder Wärmebildkameras. Im Gegensatz dazu stehen aktive Verfahren, welche selbst Strahlung aussenden und deren reflektierte Anteile messen. Beispiele für aktive Systeme sind Laserscanner im optischen Wellenlängenbereich oder Radarverfahren im Mikrowellenbereich – so wie die in diesem Artikel vorgestellte SAR-Interferometrie.

Seit dem Einsatz der ersten zivilen Erdbeobachtungssatelliten Anfang der 1970er hat sich im Bereich der Fernerkundung eine sehr dynamische Entwicklung vollzogen. Der rasante technologische Fortschritt der letzten Jahrzehnte ermöglichte die ständige Erschließung neuer Anwendungsbereiche. Ein Fernerkundungsbereich, der durch technologische Fortschritte in den letzten 5–10 Jahren besonders stark an Bedeutung gewonnen hat, ist die satellitenbasierte SAR-Interferometrie (SB-InSAR). Weiterentwicklungen der SAR-Satellitenmissionen und der Analyseverfahren ermöglichen mittlerweile die großflächige Identifikation von Bodenbewegungen im Millimeterbereich über kurze (Tage) und lange Zeitintervalle (Jahre). Die resultierenden Anwendungspotenziale von SB-InSAR sind aktuell noch nicht im Mainstream angekommen und werden daher

noch nicht adäquat in Wert gesetzt. Der vorliegende Artikel adressiert diese Lücke und skizziert das faszinierende Potenzial von SB-InSAR für die Überwachung von Wildbacheinzugsgebieten und Schutzbauwerken.

Klimawandel erhöht das Potential für Bodenbewegungen

Der österreichische Alpenraum ist – wie viele Gebirgsregionen weltweit – vom Klimawandel besonders stark betroffen. Allein seit 1850 stieg die Temperatur hier (+2 °C) in etwa doppelt so stark wie im globalen Durchschnitt (+1 °C) (Böhm 2012, Auer et al. 2014). Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist mit einer weiteren Erwärmung von mehreren Grad Celsius zu rechnen (IPCC 2022, Kotlarski et al. 2022).

Als direkte Konsequenz der klimatischen Veränderungen kommt es zu einer Steigerung des flüssigen Niederschlagsanteils, zu einem Anstieg kurzfristiger Starkregenereignisse, zu einer Zunahme stationärer Wetterlagen (z.B. Dauerregen), zu einem Ausschmelzen von Permafrost sowie zu einem rapiden Rückgang der Gletscher (APCC 2014). Die Auswirkungen der modifizierten Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse auf die Untergrundstabilität in Wildbacheinzugsgebieten sind hochkomplex und erfordern raum-zeitlich differenzierte Analysen. Zahlreiche Studien rechnen dennoch künftig mit einer generell erhöhten Verfügbarkeit bzw. Mobilisierung von Sediment und gehen von einer deutlichen, klimawandelbedingten Zunahme von Muren, Rutschungen und Felsstürzen aus (Hartmeyer et al. 2020, Schlägl et al. 2021, Stoffel et al. 2014). Gemeinsam mit der immer intensiveren wirtschaftlichen Nutzung des Alpenraums stellen diese Naturgefahren somit einen erheblichen Risikofaktor dar, der in Zukunft signifikant an Bedeutung gewinnen wird.

Die Anforderungen an das alpine Naturgefahrenmanagement werden aus diesem Grund weiter zunehmen und die Risikoanalyse insbesondere im Bereich der Früherkennung schadenbringender Ereignisse vor neue Herausforderungen stellen. Satellitenbasierte InSAR-Anwendungen haben in diesem Kontext immenses Potenzial, da sie auf Grund ihres hohen Auflösungsvermögens und ihrer hohen Präzision grundsätzlich in der Lage sind Naturgefahren frühzeitig zu identifizieren und somit potenziell die Basis bilden für eine rechtzeitige und daher kostengünstige Initiierung technischer bzw. organisatorischer Adaptionsmaßnahmen.

SB-InSAR: Methodische Grundlagen und aktueller Stand der Technik

Zur Erstellung einer Bodenbewegungskarte werden Radarimpulse von einem Satelliten ausgestrahlt, von der Erdoberfläche reflektiert und vom

Satelliten anhand von zwei Parametern registriert: Amplitude und Phase. Die Amplitude ist die Stärke des reflektierten Signals, die von den physikalischen Oberflächeneigenschaften beeinflusst wird. Änderungen der Entfernung zwischen den beiden Radarbildern werden als Phasendifferenz angezeigt (Abb. 1). Die Kombination dieser beiden Bilder wird als "Interferenz" bezeichnet, da sich die beiden Wellen durch die Kombination entweder gegenseitig verstärken oder auslöschen. Anders als sichtbares oder infrarotes Licht durchdringen Radarwellen die meisten Wetterwolken und sind auch bei Dunkelheit wirksam.

Bereits 1992 wurde der erste Radar-Satellit ERS-1 durch die Europäische Weltraumorganisation (ESA) in Betrieb genommen. Zu den limitierenden Faktoren zählten die geringe Auflösung (30*30 m) und die lange Wiederkehrzeit von 35 Tagen (die Zeit, die ein Satellit benötigt, um dasselbe Gebiet erneut zu überfliegen). Im Rahmen des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus

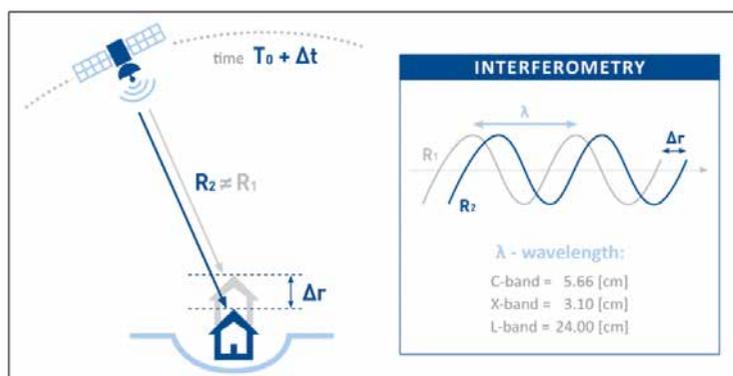


Abbildung 1: Radarwellen werden kontinuierlich vom Satelliten ausgesendet und deren Reflektionen analysiert. Dabei wird die Phasenverschiebung gemessen, die Wellenlänge ist abhängig vom gewählten Satelliten (verändert nach TRE, 2022).

Figure 1: Radar waves are continuously transmitted from the satellite and their reflections are analysed. The phase shift is measured, the wavelength depends on the selected satellite (modified from TRE, 2022).

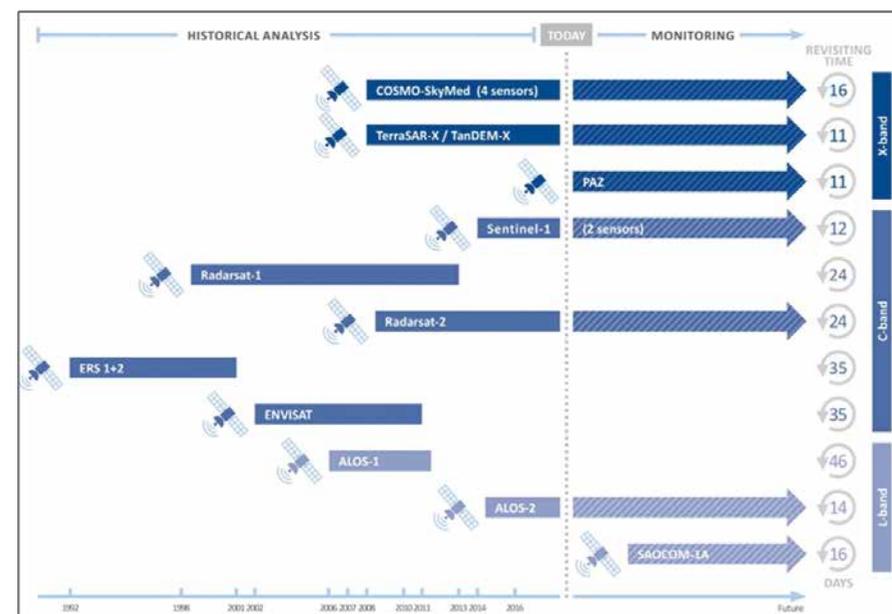


Abbildung 2: Auswahl an SAR-Satelliten, ihre Wiederkehrzeiten und Wellenlängen (Bänder) (verändert nach TRE, 2022).

Figure 2: Selection of SAR satellites, their revisiting times and wavelengths (bands) (modified from TRE 2022).

(EU, ESA) stehen seit 2014 die Daten der Sentinel-Satelliten beinahe weltweit und kostenlos zur Verfügung. Die Sentinel-1 Satelliten mit einer Wellenlänge von 5,66 cm (C-Band, Abb. 1) erreichen dabei eine Auflösung von 20*5 Meter (IW-Modus) und eine Wiederkehrzeit 6 Tagen (Abb. 2).

Aktuell existiert knapp ein Dutzend SAR-Satelliten mit unterschiedlichen Wiederkehrzeiten und Wellenlängen. Alle SAR-Satelliten umkreisen die Erde auf einer nahezu polaren Umlaufbahn in einer Höhe von 500-800 km. Die Satelliten bewegen sich auf der Hälfte ihrer Flugbahn vom Nord- zum Südpol (absteigende Umlaufbahn, descending mode) und auf der anderen Hälfte vom Süd- zum Nordpol (aufsteigende Umlauf-

bahn, ascending mode). Folglich wird dasselbe Gebiet entlang der beiden Umlaufbahnen mit auf- und absteigenden Bildern überflogen (Abb. 3a). Die Radarsignale werden dabei kontinuierlich in einem Winkel von ca. 20–50°, in der sogenannten „Line of Sight“ (LOS), zur Seite hin ausgesendet (Abb. 3b). Da sich die reale Bewegung von der auf die LOS projizierten Bewegung unterscheiden kann, können Daten aus der auf- und absteigenden Umlaufbahn kombiniert werden, um horizontale und vertikale Bewegungen zu errechnen. Aufgrund der Umlaufbahnen und der Abstrahlungsrichtung können horizontale Bewegungen nur in O-W Richtung detektiert werden.

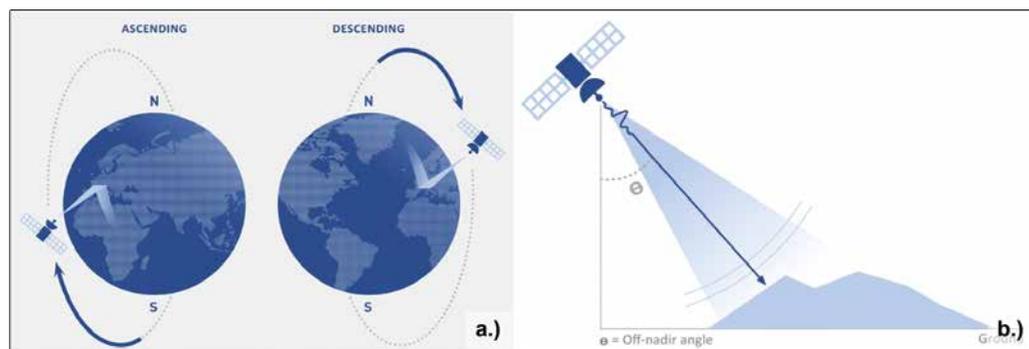


Abbildung 3: Umlaufbahnen (a) und Abstrahlungswinkel (Line of Sight, LOS) (b) (verändert nach TRE, 2022).

Figure 3: Orbits (a) and line-of-sight (LOS, b) (modified from TRE, 2022).

Seit dem Start der ersten Missionen in den 1990ern umkreist eine wachsende Anzahl von SAR-Satelliten die Erde und liefert immer umfangreichere Datenreihen mit höherer Auflösung,

kürzeren Wiederholungszeiten und größerer Datendichte. In Verbindung mit stark gestiegenen Rechenleistungen und modernen Algorithmen können mittlerweile ganze Aufnahmepakete voll-

automatisch untereinander verrechnet werden. So integriert der auf multitemporale Analysen ausgelegte SqueeSAR®-Algorithmus Pakete von zumindest 30 SAR-Aufnahmen und ermöglicht mittels aufwändigen statistischen Analysen die Identifikation von Oberflächenänderungen im Millimeterbereich (Ferretti et al. 2011). Für längere Zeitreihen ($n > 30$) liegt die Standardabweichung in stabilen Oberflächenbereichen typischerweise bei < 1 mm/Jahr (Abb. 4). Werden lediglich zwei Aufnahmen miteinander verglichen (statt eines ganzen Aufnahmepakets), liegt die Genauigkeit häufig im Bereich von ± 5 mm.

Potentiale für die Überwachung von Wildbacheinzugsgebieten und Schutzbauwerken am Beispiel des Muhrals (Lungau, Salzburg)

Im Rahmen des Projekts SedInOut (Interreg V-A Italien-Österreich, 2019–2022) wurden Bodenbewegungen im alpinen Raum auf einer Fläche von über 15.000 km² detektiert und analysiert (Salzburg, Kärnten, Südtirol). Hauptziel des Projektes ist die Entwicklung von Standards zur Abschätzung des Sedimenttransports durch Massenbewegungen (SEDINOUT, 2022). Für die Detektion von Massenbewegungen im Bundesland Salzburg (7.159 km²) wurden dabei 494 Sentinel-1 Aufnahmen prozessiert (SqueeSAR®). Das Ergebnis umfasst mehr als 1,1 Millionen Messpunkte mit einer resultierenden Messpunktdichte von rund 160 Punkten/km². Die mittlere Standardabweichung über die gesamte Aufnahmeperiode (2014–2020) beträgt $\pm 0,23$ mm/Jahr.

Langanhaltende saisonale Schneebedeckung, eine heterogene Topographie mit vielen nord- bzw. südexponierten Steilflanken (= ungünstige Aufnahmegeometrie) und teilweise intensiver Bewuchs machen das Hochgebirge generell zu einem schwierigen Terrain für SB-InSAR-Analysen. Die im Rahmen des Projekts

SedInOut durchgeführten InSAR-Auswertungen demonstrieren dennoch das großflächige InSAR-Anwendungspotenzial in Gebirgsregionen. Exemplarisch wird an dieser Stelle ein Ausschnitt aus dem Muhrtal (Lungau, Salzburg) dargestellt, der hinsichtlich Verfügbarkeit und Qualität der InSAR-Daten eine für den Alpenraum typische Dreiteilung zeigt: (i) entlang des besiedelten und mit unterschiedlichen Infrastrukturen (Straßen, Stromleitungen etc.) erschlossenen Talbodens ist die Datendichte hoch, was in erster Linie auf das hervorragende Radar-Reflektionsvermögen künstlicher Bauten zurückzuführen ist (Abb. 5a: blaue Zone); (ii) an den bewaldeten Talflanken zeigt sich erwartungsgemäß eine äußerst geringe Datenverfügbarkeit, InSAR-Reflektoren treten nur sehr sporadisch auf (Abb. 5a: grüne Zone); (iii) in den über der Waldgrenze gelegenen Regionen zeigt sich hingegen wieder eine hohe Punktdichte welche auf das günstige Reflektionsverhalten raumzeitlich persistenter Fels- und Schuttformationen zurückgeführt werden kann (Abb. 5a: rote Zone).

Rasche bzw. abrupte Veränderungen der Geländeoberfläche stellen im Rahmen von InSAR-Auswertungen ein signifikantes Hindernis dar und führen in der Regel zur Dekorrelation. Zurückzuführen ist dies auf den Umstand, dass zwischen zwei Radar-Aufnahmen nur Bodenveränderungen in der Größe von maximal einem Viertel der Wellenlänge (Sentinel-1: 25 % von 5,66 cm) eindeutig gemessen werden können (Kauther & Schulze 2015). Sind die Verschiebungsdifferenzen innerhalb der Wiederkehrzeit größer, kann die zugehörige Verschiebungsgröße nicht mehr eindeutig berechnet werden. Die Wiederkehrzeit ist aus diesem Grund ein wichtiges Kriterium für die Auswahl geeigneter SAR-Satelliten (Abb. 2). InSAR-Analysen sind daher generell kein probates Mittel um intensive Erosion in und entlang von Gerinnen (z.B. starker Geschiebetransport) zu quantifizieren, bei der es zu einer vollständigen

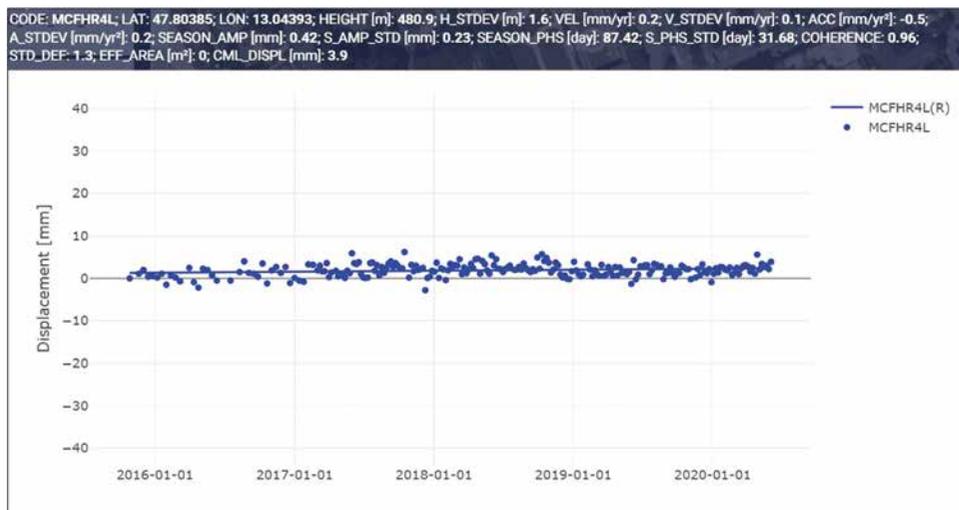


Abbildung 4: Typische Sentinel 1-basierte InSAR-Zeitreihe von einem Gebäude (Stadt Salzburg) analysiert mittels SqueeSAR® Algorithmus. Blaue Punkte markieren Satellitenaufnahmen über die Zeit (x-Achse). Auf der y-Achse ist die Verschiebung in mm aufgetragen. Die vertikale Standardabweichung (V_STDEV) für diese Datenreihe liegt bei 0,1 mm/Jahr.

Figure 4: Typical Sentinel 1-based InSAR time series of a building (city of Salzburg) analyzed with SqueeSAR® algorithm. Blue dots mark satellite images over time (x-axis). Displacement in mm is plotted on the y-axis. The vertical standard deviation (V_STDEV) for this data series is 0.1 mm/year.

Modifikation des Terrains kommt. Dementsprechend gering ist im ausgewählten Fallbeispiel die Datendichte entlang der sichtbaren Gerinnestrukturen sowohl am Talboden (Muhr), als auch über der Waldgrenze (Wildbäche).

Hervorragend geeignet sind InSAR-Auswertungen hingegen für die Detektion langsamer Kriech-, Fließ-, Senk- und Hebungsbewegungen. Im Fallbeispiel Muhr zeigen sich nordöstlich der Harrerspitze (siehe I in Abb. 5b), nördlich des

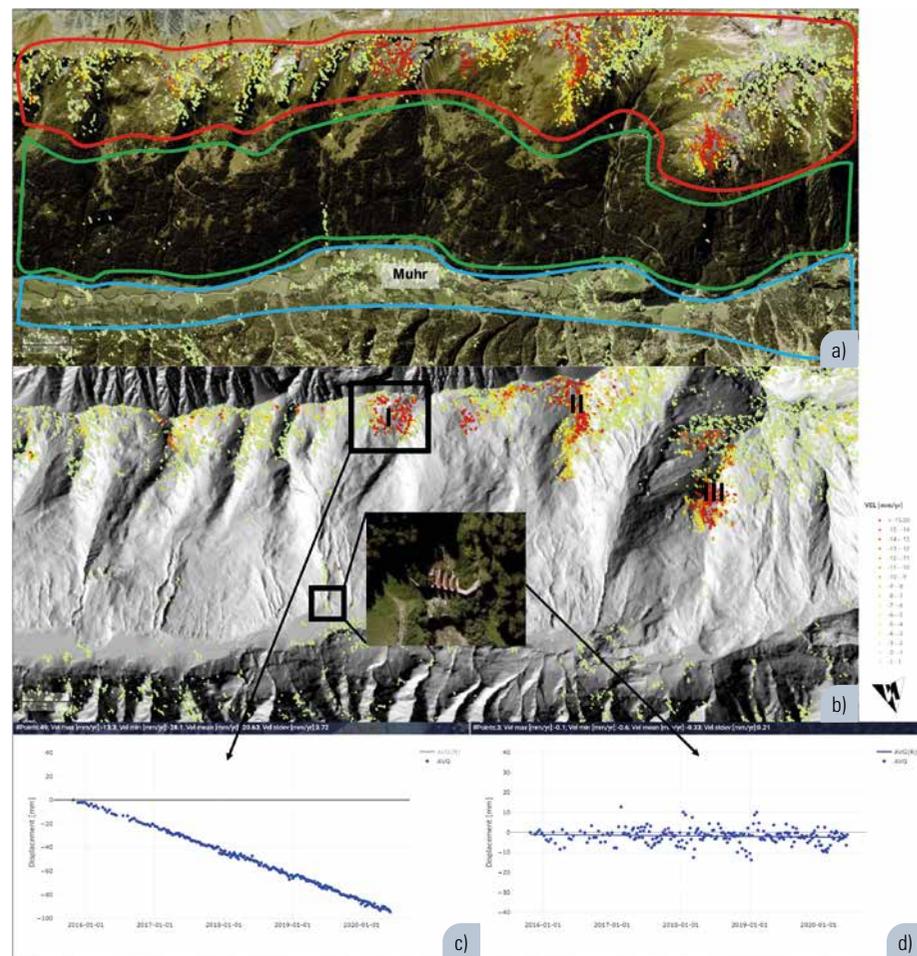


Abbildung 5: Fallbeispiel Gemeinde Muhr (Lungau, Salzburg): Hohe InSAR-Datendichte in den Talböden (Gebäude und Infrastrukturen) und in Regionen über der Waldgrenze (Fels und Schutt).

Figure 5: Case Study Muhr Municipality (Lungau, Salzburg): High InSAR point density along valley floors (buildings and infrastructures) and above the tree line (bedrock and debris).

Oblitzen (siehe II in Abb. 5b) und nördlich des Ochsenkopfs (siehe III in Abb. 5b) deutliche Oberflächenbewegungen. Exemplarisch ist in Abb. 5c die Detailanalyse der Massenbewegung unterhalb der Harrerspitze dargestellt, die für den Zeitraum 2016–2020 eine lineare Bewegung und einen Gesamtversatz von rund 100 mm demonstriert. Darstellungen wie die abgebildete Verschiebungskurve sind hervorragend geeignet um die Kinematik großer Massenbewegungen darzustellen und zeigen wie InSAR-Auswertungen dazu beitragen können potenziell gefährliche Beschleunigungen von Hangbewegungen bzw. bevorstehende Sementeinträge in Wildbachsysteme in einem sehr frühen Stadium zu erkennen (automatische Identifizierung nicht-linearer Verschiebungen).

Ähnlich wie langsame Massenbewegungen sind auch Schutzbauwerke potenziell gut für die InSAR-basierte Überwachung geeignet. Die Abwesenheit dichter Vegetation (Kronenschluss) vorausgesetzt, stellen größere Schutzbauwerke auf Grund ihrer persistenten Geometrie adäquate Radar-Reflektoren dar und können dementsprechend über die Zeit überwacht werden. Beispielhaft ist in Abbildung 5b und 5d der Fall einer Wildbachsperre in unmittelbarer Nähe der Ortschaft Vordermuhr abgebildet. Über den vierjährigen Beobachtungszeitraum (2016–2020) wurden keine signifikanten Bewegungen registriert, lediglich in den Wintermonaten kommt es schneedeckenbedingt sporadisch zu kleineren Abweichungen.

Zusammenfassung und Ausblick

SB-InSAR ist ein erprobtes Fernerkundungsverfahren, das bereits seit den frühen 1990er-Jahren im Einsatz ist. In den letzten 5-10 Jahren konnten

durch neue SAR-Satellitenmissionen (Sentinel 1) sowie durch Fortschritte in der Datenanalyse (z.B. SqueeSAR©-Algorithmus) signifikante Verbesserungen der Messgenauigkeit, Bodenauflösung und der Zeitintervalle erzielt werden. Unter geeigneten physischen Voraussetzungen (u.a. Topografie, Oberflächenbedingungen) ermöglicht SB-InSAR aktuell die großflächige Erkennung von Bodenbewegungen im Millimeterbereich über kurze (Tage) bzw. lange (Jahre) Untersuchungszeiträume. SB-InSAR ist damit auch im Naturgefahrenbereich von größter Relevanz und ermöglicht potenziell (i) die Ersterkennung (Identifizierung) bis dato unbekannter Naturgefahren, (ii) die Beobachtung (Langzeit-Monitoring) bereits bekannter Naturgefahren, sowie (iii) die Überwachung und Zustandsbeurteilung von Schutzbauwerken. Die hohe zeitliche Auflösung der Datenreihen erlaubt dabei eine exakte Charakterisierung der Kinematik und eine Identifizierung potenziell gefährlicher Beschleunigungstrends. Anhand eines repräsentativen Fallbeispiels (Muhrtal, Salzburg) wurde die Eignung von SB-InSAR zur Identifizierung langsamer Massenbewegungen oberhalb der Waldgrenze und zur Überwachung größerer Schutzbauwerke exemplarisch demonstriert.

Auch in Zukunft nimmt die Anzahl von SAR-Satelliten, Rechenleistung und Genauigkeit der Algorithmen rasant zu. Zum Beispiel werden im ARGE ALP Projekt RockSAR (2022–2024, RSAR, 2022) neuste – durch KI unterstützte Algorithmen – für die Überwachung schnellerer Massenbewegungen (Rate im m-Bereich) unter Feldbedingungen erprobt. Mit dem Start neuer Satelliten-Generationen (L-Band Satelliten wie ALOS-4, NISAR oder Tandem-L) können in den nächsten Jahren auch Waldbereiche mit kurzen Wiederkehrzeiten überwacht werden.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Dr. Markus Keuschnig
 GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
 Wissenspark Salzburg Urstein
 Urstein Süd 13
 markus.keuschnig@georesearch.ac.at

Dr. Ingo Hartmeyer
 GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
 Wissenspark Salzburg Urstein
 Urstein Süd 13
 ingo.hartmeyer@georesearch.ac.at

Markus Dörfler, MSc
 GEORESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
 Wissenspark Salzburg Urstein
 Urstein Süd 13
 markus.doerfler@georesearch.ac.at

Literatur/References:

APCC (2014):
 Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Hg. v. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. Wien, Österreich.

AUER, I.; FOELSCH, U.; BÖHM, R.; CHIMANI, B.; HAIMBERGER, L.; KERSCHNER, H. et al. (Hg.) (2014):
 Vergangene Klimaänderung in Österreich. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Wien: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.

BÖHM, R. (2012):
 Changes of regional climate variability in central Europe during the past 250 years. Eur. Phys. J. Plus, 127, 54, <https://doi.org/10.1140/epjp/i2012-12054-6>.

FERRETTI, A., FUMAGALLI, A., NOVALI, F., PRATI, C., ROCCA, F., RUCCI, A. (2011)
 A new algorithm for processing interferometric data-stacks: SqueeSAR™. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, November 2010 IEEE TGRS, 49(9), 3460-3471.

HARTMEYER, I.; DELLESKE, R.; KEUSCHNIG, M.; KRAUTBLATTER, M.; LANG, A.; SCHROTT, L.; OTTO, J.-C. (2020):
 Current glacier recession causes significant rockfall increase: The immediate paraglacial response of deglaciating cirque walls. In: Earth Surface Dynamics Discussions 2020, S. 1–25. DOI: 10.5194/esurf-2020-8.

IPCC (2022):
 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

KAUTHER, R., SCHULZE, R. (2015):
 Satellitengestützte Radarinterferometrie – ein neues Werkzeug für die Geotechnik. Bundesanstalt für Wasserbau, BAW Kolloquium „Projekte der Geotechnik an Bundeswasserstraßen“.

KÄÄB, A., HUGGEL, C. und PAUL F. (2000):
 Früherkennung hochalpiner Naturgefahren mittels Fernerkundung. INTER-PRAEVENT 2000, Tagungspublikation, Band 1, 49-60.

KOTLARSKI, S., GOBIET, A., MORIN, S., OLEFS, M., RAJCAZAK, J., SAMACOÏTS, R. (2022): 21st Century alpine climate change. Climate Dynamics, <https://doi.org/10.1007/s00382-022-06303-3>.

RSAR (2022):
 Projekt RockSAR. <https://www.georesearch.ac.at/de/bereiche/forschungsbereiche/geo/projekt-rocksar/>. Last access: 29.09.2022.

SCHLÖGL, M., HEISER, M., SCHEIDL, C., FUCHS, S. (2021):
 Frequency, magnitude and seasonality of damage-inducing torrential events in Austria (1962-2017). PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.927584>

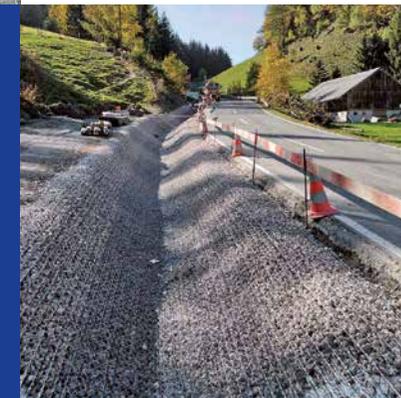
SEDINOUT (2022):
 Projekt SedInOut. <https://www.provinz.bz.it/bauen-wohnen/oeffentlichebauten/geologie/projekt-sedinout.asp>. Last access: 29.09.2022.

STOFFEL, M., TIRANTI, D., HUGGEL, C. (2014):
 Climate change impacts on mass movements — case studies from the European Alps. Sci. Total Environ. 493, 1255–1266. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.102>.

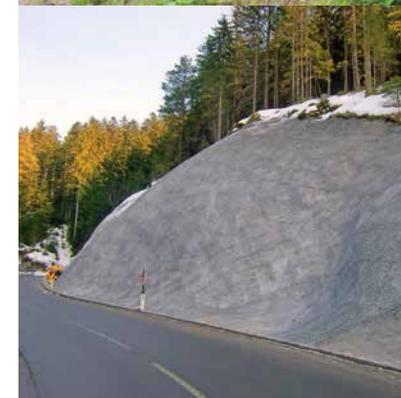
TRE (2022):
 TRE ALTAMIRA – InSAR Technology. <https://site.tre-altamira.com/company/our-technology/>. Last access: 29.09.2022.



Steilwälle Wasserbau Entwässerung Sonderkonstruktionen



Hangsicherung Böschungssicherung Steinschlagschutz Stützbauwerke



WIR SICHERN & KULTIVIEREN ERDE.



J. Krismer | Bundesstraße 23
 A - 6063 Innsbruck - Rum
 T +43 512 26 38 00

www.krismer.at
office@krismer.at

YVES BÜHLER, PETER BEBI, MARC CHRISTEN, STEFAN MARGRETH,
ANDREAS STOFFEL, LUKAS STOFFEL, CHRISTOPH MARTY, PERRY BARTELT, RODERICK KÜHNE

Automatisch berechnete Gefahrenhinweiskarten für Lawinen

Automated avalanche hazard indication mapping

Zusammenfassung:

Gefahrenkarten bilden eine wichtige Grundlage für den Umgang mit der Lawinengefahr im Alpenraum. Allerdings existieren diese Karten nur im Siedlungsbereich, für einen Grossteil der Fläche sind keine oder nur sehr begrenzte Informationen zur Lawinengefährdung verfügbar. Aus diesem Grund hat das WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF zusammen mit dem Amt für Wald und Naturgefahren (AWN) des Kantons Graubünden eine Methode entwickelt, um flächendeckende Gefahrenhinweiskarten automatisiert zu erstellen. Die Kombination von Anrissgebiets-Ausscheidung mit der numerischen Simulation der Auslaufstrecken mit der Software RAMMS macht dies möglich. Dabei halten wir uns so weit wie möglich an die Vorgehensweise, wie sie in der Schweiz zur Erstellung der Gefahrenkarten verwendet wird.

Abstract:

Hazard maps are a crucial base for tackling avalanche hazard in the Alps. But such maps are only elaborated within specific, mostly settled areas, for the large part none or only very limited information on avalanche danger is available. Therefore, the WSL Institute for Snow and Avalanche Research SLF and the office for forest and natural hazards (AWN) of the canton Grisons developed a methodology to calculate spatial continuous hazard indication maps for large Regions. The combination of release area delineation with the numerical simulation of avalanche runout with the software RAMMS makes this possible. We stick as much as possible with the procedure applied for the hazard mapping generation in Switzerland.

Stichwörter:

Flächendeckende
Gefahrenhinweiskarten,
Lawinen, RAMMS,
Gefahrenkarten

Keywords:

Area-wide Hazard
indication maps, avalanches,
RAMMS, hazard maps

Einleitung

Gefahrenkarten sind ein essentielles Werkzeug um effizient und wirtschaftlich mit der Lawinengefahr im Alpenraum umzugehen. Sie zeigen auf, wo die Gefährdung durch Lawinen besonders hoch ist, wo Verkehrswege gefährdet sein können und wo Gebäude nicht oder nur mit Auflagen erbaut werden dürfen (Rudolf-Miklau et al., 2014). Allerdings existieren solche Gefahrenkarten oft nur im Siedlungsbereich, dort wo sie von Sachverständigen unter Einbezug verschiedener Informationsquellen mit substantiellem Aufwand erarbeitet wurden. Für den grossen Teil des Alpen Gebietes aber existieren solche Informationen nicht (90 % der Fläche zum Beispiel im Kanton Graubünden).

Die Automatisierung der Gefahrenhinweiskartierung begann in der Schweiz mit dem Projekt «SilvaProtect-CH» dessen Ziel es war, die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen zu quantifizieren (Bafu, 2013). Da immer bessere digitale Geländemodelle (DEM), Grundlagedaten zur Waldstruktur und numerische Lawinendynamik-Modelle verfügbar wurden, begann das SLF mit der Entwicklung einer automatischen Ausscheidung von potentiellen Lawinenanrissgebieten basierend auf räumlich hochaufgelösten DEM Daten (Maggioni und Gruber, 2003; Bühler et al., 2013, 2018). Die Verknüpfung dieser Anrissgebiete mit dem etablierten Lawinendynamik-Modell RAMMS (Christen et al., 2010) sowie die Verfügbarkeit von erschwinglicher Computer-Power ermöglicht heute die automatisierte Berechnung von Gefahrenhinweiskarten über einen ganzen Kanton oder gar ein ganzes Land. Da der Kanton Graubünden den Bedarf an solchen Zusatzinformationen erkannt hat, gab er im Jahr 2018 dem SLF den Auftrag anhand von zwei Testgebieten (Davos und Zuoz) aufzuzeigen, wie und mit welcher Qualität Gefahrenhinweiskarten automatisch erstellt werden können. Aufgrund der

Erkenntnisse dieser Machbarkeitsstudie erfolgte dann im Jahr 2020 der Auftrag für die Berechnung der Karten für den gesamten Kanton (Fläche 7'105 km²). Deshalb zeigen wir in diesem Artikel am Beispiel des Kantons Graubündens auf, wie wir bei dieser Berechnung vorgehen und wie die Resultate angewendet werden können.

Ausscheidung der Anrissgebiete und numerische Simulation der Lawinen

Basierend auf dem digitalen Geländemodell (DEM) und dessen Ableitungen (Hangneigung, Exposition, Krümmung, Rauigkeit) werden alle Gebiete identifiziert, welche Lawinenanrissgebiete produzieren können. Dabei wird aber keine Abschätzung der Anbruch-Wahrscheinlichkeit vorgenommen. Innerhalb dieser Gebiete werden mittels objektbasierter Bildanalyse (OBIA) Anrisspolygone ausgeschieden (Abb. 1). Dies geschieht in Abhängigkeit der Häufigkeitsszenarien (10, 30, 100 und 300 Jahre), wie sie für die Gefahrenkartierung verwendet werden (Bühler et al. 2013, 2022).

Danach wird anhand von Extremwertstatistik, basierend auf den Daten der langjährigen Schneehöhenmessreihen in der Schweiz, der dreitägige Schneehöhenzuwachs $\Delta HS(3)$ berechnet. Um den unterschiedlichen Schneeklimata Rechnung zu tragen, werden dazu Regionen gebildet (5 an der Zahl im Kanton Graubünden). Zusammen mit einem Korrekturfaktor für die Höhenlage und den Triebschneezuschlag wird dann für jedes Anrisspolygon eine individuelle Anbruchhöhe d_0 (Bühler et al., 2013, 2022) und in weiterer Folge das Anbruchvolumen berechnet.

Für alle Szenarien wird die Berechnung einmal mit und einmal ohne Einbezug der Schutzwirkung des Waldes durchgeführt. Dies ermöglicht räumliche Aussagen über die Schutzwirkung der verschiedenen Waldgebiete

(Bebi et al., 2021). Mit diesem Verfahren halten wir uns so eng wie möglich an die Vorgehensweise, welche für die Erstellung von Gefahrenkarten in der Schweiz verwendet wird. Die Anrisspolygone werden nun mit dem für diese Anwendung entwickelten RAMMS:LSHIM (Large Scale Hazard Indication Mapping) Modul modelliert (Abb. 1). Die

dabei verwendeten Parameter (Reibung, Kohäsion etc.) entsprechen ebenfalls dem Vorgehen für die Erstellung der Gefahrenkarten. Die Simulationen beinhalten die maximalen Geschwindigkeiten, Fließhöhen und Drücke der Lawinen, wie sie mit RAMMS berechnet werden.

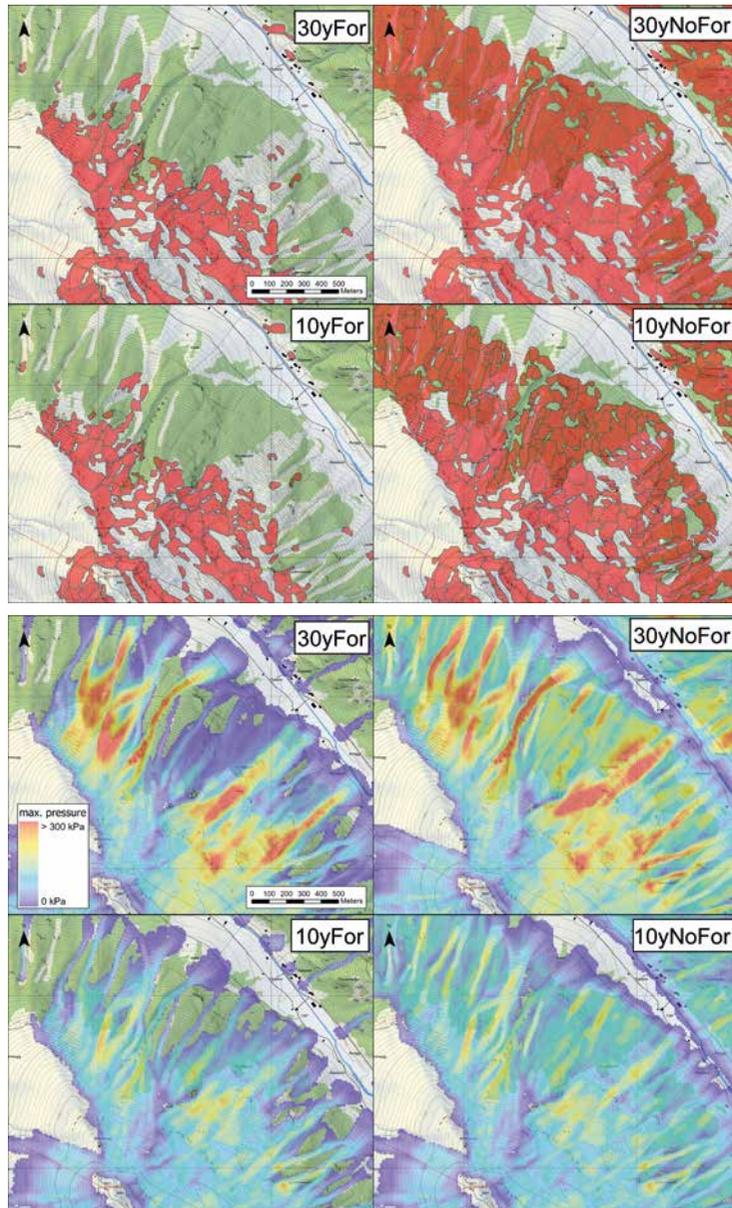


Abbildung 1:
Beispiel für die
ausgeschiedenen
Anrissgebiete (oben)
und daraus berechneten
Lawinensimulationen
(unten) für die Szenarien
mit 10 und 30 jährlicher
Wiederkehrperiode mit und
ohne Wald (Bühler et al.,
2022).

Figure 1:
Example of the separated
avalanche starting zones
(above) and the avalanche
simulations calculated
from them (below) for the
scenarios with 10 and 30
year return periods with and
without forest (Bühler et
al., 2022)

Resultate

Für den Kanton Graubünden haben wir insgesamt 2 Millionen Lawinen simuliert (Abb. 2). Die Anzahl an Lawinen reicht dabei von 88'600 (Szenario 300 Jahre mit Wald) bis zu 563'000 (Szenario 10 Jahre ohne Wald). Dabei werden beim häufigen Szenario (10 Jahre mit Wald) 22 % der Kantonsfläche als Lawinenanrissgebiete ausgeschieden. Beim extremen Szenario (300 Jahre mit Wald) sind es 29 %. Bei den Simulationen in denen die Schutzwirkung des Waldes nicht

berücksichtigt wird, steigen diese Zahlen auf 35 %, respektive 43 %. Dies demonstriert die grosse Bedeutung des Waldes als Schutz vor Lawinen bereits bei den Anrissgebieten.

Werden nun die simulierten Auslaufdistanzen der Lawinen betrachtet, reicht die von Lawinen betroffene Fläche von 47 % der Kantonsfläche (10 Jahre) bis zu 67 % der Kantonsfläche (300 Jahre). Lässt man die Schutzwirkung des Waldes weg, steigen diese Zahlen auf 66 % und 84 %. Somit schützt der Wald in etwa 20 % der Kantonsfläche vor Lawinen.

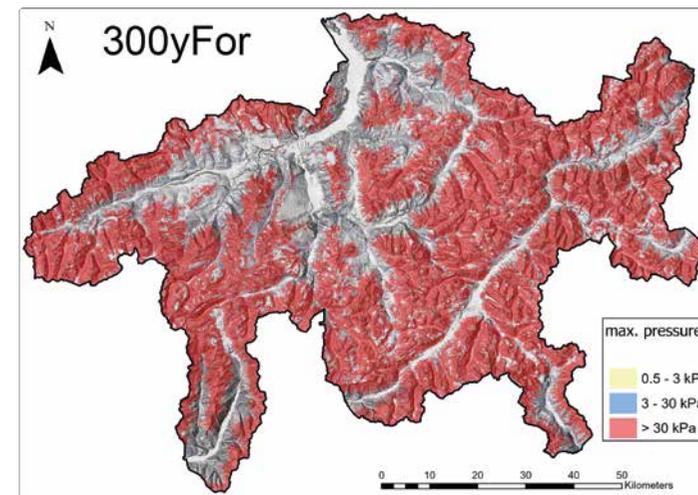


Abbildung 2:
Die maximalen
Lawinendrücke für
das häufige (10 Jahre)
und das extreme (300
Jahre) Lawinenszenario
berechnet mit Einbezug der
Schutzwirkung des Waldes
für den gesamten Kanton
Graubünden (Bühler et al.,
2022).

Figure 2: The maximum
avalanche pressures for
the frequent (10 years)
and the extreme (300
years) avalanche scenario
calculated with inclusion of
the protective effect of the
forest for the entire canton
of Graubünden (Bühler et
al., 2022)

Die Resultate der Simulationen wurden mit den bestehenden Gefahrenkarten (Abb. 3), dem Lawinenkataster sowie mit Lawinenabgängen validiert, welche mittels Satellitendaten kartiert wurden (Bühler et al., 2019, Hafner et al., 2021). Dabei hat sich gezeigt, dass die Übereinstimmung als gut beurteilt werden kann. Da aber bei der Berechnung für die Gefahrenhinweiskarte keine Staub- und Nassschneelawinen simuliert und auch keine permanenten Schutzmassnahmen wie Schneebrücken berücksichtigt wurden, treten auch Abweichungen auf. Insbesondere sehr große, kesselförmige Anrissgebiete, welche in ganz extremen Fällen als Ganzes abgehen können, werden unterschätzt. Hier ist aber festzuhalten, dass die automatisch erstellten Gefahrenhinweiskarten nicht dieselbe Zuverlässigkeit und Genauigkeit aufweisen können wie die Gefahrenkarten.

Anwendung in der Praxis

Das Hauptanwendungsgebiet der Gefahrenhinweiskarte liegt außerhalb der Erfassungsbereiche von Gefahrenkarten. Dies zum Beispiel, wenn Bauten außerhalb der Bauzone geplant werden (z.B. Berg- oder Jagdhütten). Auch wenn Erweiterungen von Skigebieten oder weiterer Infrastruktur geplant wird, sind die Gefahrenhinweiskarten die Informationsgrundlage für eine erste Abschätzung. Sie dienen auch als Grundlage für flächendeckende Risikoübersichten bei Verkehrswegen wie Straßen oder Eisenbahngleisen.

Vergleicht man die Gefahrenhinweiskarten mit den bestehenden Gefahrenkarten, können potentielle Defizite sowie falsche oder veränderte Annahmen (zum Beispiel Veränderungen im Wald) identifiziert werden. Auch können so ältere Gefahrenkarten überprüft werden. Da aber die permanenten Schutzmassnahmen beim vorgestellten Verfahren nicht berücksichtigt werden, wird ein Großteil der Abweichungen darauf

zurückzuführen sein. Wenn aber die Gefahrenhinweiskarte eine starke Gefährdung eines Gebietes aufzeigt, dieses aber nicht von den Gefahrenkarten abgedeckt ist, dürfte sich eine detaillierte Betrachtung der Situation lohnen. Es zeigt sich, dass die Gefahrenhinweiskarten eine wichtige Grundlage für die Überprüfung und Überarbeitung der Gefahrenkarten darstellen und auch als erste Annäherung zur Abschätzung der Lawinengefahr herangezogen werden.

Alle Szenarien wurden einmal mit und einmal ohne Berücksichtigung der Schutzwirkung des Waldes berechnet (Bebi et al. 2021). Deshalb können die Resultate zur Visualisierung und Evaluation der Schutzwaldwirkung verwendet werden. Heute basiert die maßgebende Schutzwaldausscheidung noch auf den Modellierungen von SilvaProtect-CH (BAFU, 2013), welche mit einem 25 m Geländemodell einem veralteten Anrissgebiet-Algorithmus (Maggioni und Gruber, 2003) und dem numerischen Simulationsmodell AVAL-2D (ein Vorgänger von RAMMS) berechnet wurden. Aufgrund der großen ökonomischen und gesellschaftlichen Auswirkungen der Schutzwaldwirkung haben Änderungen in der Ausscheidung weitreichende Folgen. Deshalb braucht es noch weitere Untersuchungen und Diskussionen bis diese neue Methode angewendet werden kann. Sollen aber in Zukunft mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Lawinenschutzwald untersucht werden, können diese Simulationen als Vergleichsszenarien herangezogen werden. Sie ermöglichen detaillierte Aussagen zur Schutzwaldwirkung und eine Visualisierung von möglichen Veränderungen (z.B. Störungen oder Klimaveränderung).

Nicht zuletzt erweisen sich die flächendeckenden Gefahrenhinweiskarten als wertvolles Werkzeug für die Visualisierung und Kommunikation der Lawinenrisiken im Austausch zwischen verschiedenen Experten, Politikern und der Bevöl-

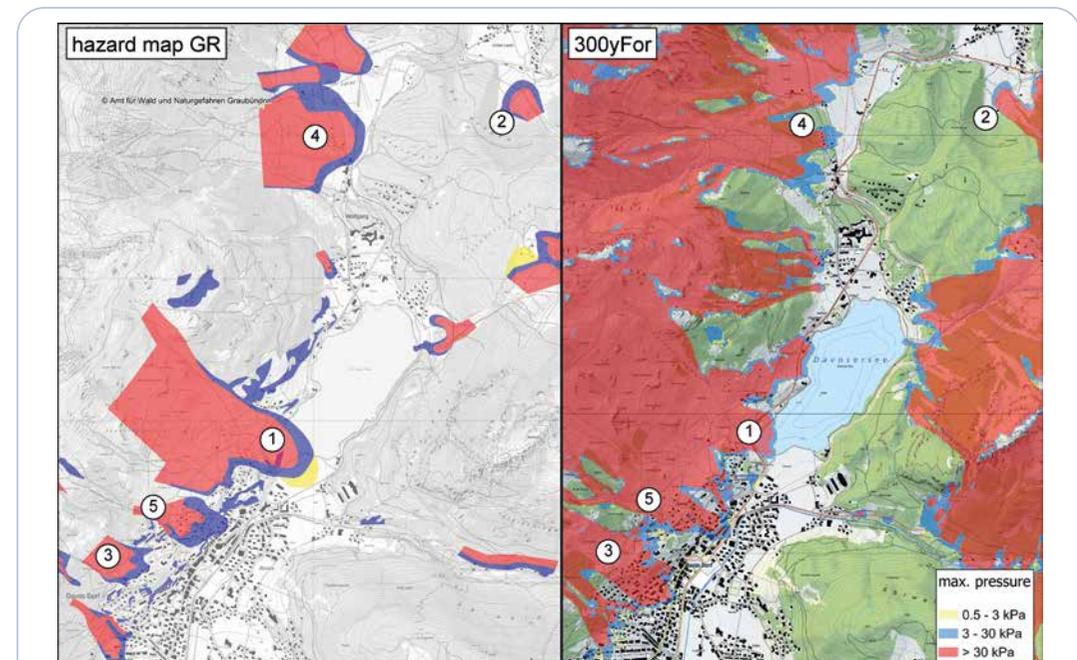


Abbildung 3: Vergleich der Gefahrenkarte (links) mit den automatisch erstellten Simulationen (rechts, Szenario 300 Jahre mit Wald) in Davos Dorf. Der Gefährdungsbereich durch die Lawinen 3 und 5 geht in den automatischen Simulationen deutlich weiter, da die Schutzmassnahmen im Anrissgebiet nicht berücksichtigt sind. Der Gefährdungsbereich der Dorfberglawine (1) dagegen geht weniger weit, da hier die Staubwolke massgebend ist (Bühler et al., 2022).

Figure 3: Comparison of the hazard map (left) with the automatically generated simulations (right, scenario 300 years with forest) in Davos Dorf. The hazard area due to the avalanches 3 and 5 is much larger in the automatic simulations, since the protective measures in the starting area are not taken into account. The danger zone of the Dorfberg avalanche (1), on the other hand, is shorter, since the dust cloud is decisive here (Bühler et al., 2022).

kerung. Die Gefahrenhinweiskarten sind heute eine wichtige Basis für die effiziente Validierung und Priorisierung von detaillierteren Gefahrenabschätzungen im Kanton Graubünden.

Schlussfolgerungen und Ausblick

In diesem Artikel präsentieren wir einen weitgehend automatisierten Ablauf zur Erstellung von flächendeckenden Gefahrenhinweiskarten für den Kanton Graubünden, welcher mit einer Fläche von 7'105 km² der größte der Schweiz ist. Wir berechnen vier Szenarien (Wiederkehrperioden 10, 30, 100 und 300 Jahre) jeweils mit und ohne Berücksichtigung der Schutzwirkung des Waldes. Damit decken wir sowohl häufige wie

auch extreme Ereignisse ab. Die resultierenden Gefahrenhinweiskarten wurden mit bestehenden Gefahrenkarten, dem Lawinenkataster sowie Lawinenkartierungen basierend auf Satellitendaten verglichen. Dabei wird eine gute Übereinstimmung festgestellt. Die größten Abweichungen treten wegen der unterschiedlichen Ausscheidung der Anrissgebiete sowie der Nicht-Berücksichtigung von permanenten Schutzmassnahmen und Veränderungen im Wald oder dem Gelände auf. Staub- und Nassschneelawinen werden nicht simuliert und sehr große Anrissgebiete, welche als ganze Kessel abgehen, werden tendenziell unterschätzt.

Die Karten sind nun mehr als zwei Jahre beim Amt für Wald und Naturgefahren AWN des

Kantons Graubündens im Einsatz. Die Hauptanwendungsgebiete sind:

- Erste Gefahrenabschätzung
- Evaluierung von Bauvorhaben in Gebieten außerhalb des Erfassungsbereiches der Gefahrenkarten
- Überprüfung und Anpassung bestehender (vor allem älterer) Gefahrenkarten
- Erste Ausscheidung und Bewertung von Schutzwald
- Kommunikation und Diskussion von Lawinenrisiken zwischen Ingenieuren, Behörden und Bevölkerung

Die reproduzierbaren, flächendeckenden Gefahrenhinweiskarten können auch als «zweite Meinung» bei Gefahrenbeurteilungen von Experten oder als Grundlage für großflächige Risikoanalysen dienen. Solche Karten können in allen Regionen berechnet werden, in denen räumlich hochaufgelöste Geländemodelle, Informationen zur Schneeklimatologie sowie zur Schutzwirkung des Waldes vorliegen. Solche Daten können heute zum Beispiel auch aus Satelliten gewonnen werden (Sykes et al., 2022).

Zurzeit erarbeiten wir die Gefahrenhinweiskarten für die Kantone Wallis und Tessin, wo wir nun auch Schutzmaßnahmen miteinbeziehen. Bereits angewendet wurde der Ansatz für die Klassierung des Lawinengeländes (Harvey et al., 2018) für die Skitourenplanung in der White Risk App des SLF (<https://whiterisk.ch>), sowie für die Regionen Trentino, Langtaufers und Livigno in Italien. Auch in Georgien, Chile, Afghanistan, Spitzbergen, Alaska, Neuseeland, Kanada und Indien wurden in enger Zusammenarbeit mit lokalen Partnern bereits Berechnungen durchgeführt. Weitere Anwendungen zum Beispiel in Island sind in Planung. Obwohl zahlreiche Einschränkungen bestehen, überwiegt der Nutzen dieser neuen Methode deutlich.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Dr. Yves Bühler
WSL- Institut für Schnee-
und Lawinenforschung SLF
Flüelastrasse 11
7260 Davos Dorf
Schweiz
buehler@slf.ch

Roderick Kühne
Amt für Wald und Naturgefahren AWN,
Kanton Graubünden
Ringstrasse 10
7001 Chur
Schweiz
roderick.kuehne@awn.gr.ch

Literatur/References:

- BAFU (2013).
SilvaProtect-CH: Prozessmodellierung, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern.
- BEBI P., BAST A., HELZEL K., SCHMUCKI G., BROZOVA N., BÜHLER Y. (2021).
Avalanche Protection Forest: From Process Knowledge to Interactive Maps. Protective forests as Ecosystem-based solution for Disaster Risk Reduction, DOI: 10.5772/intechopen.99514.
- BÜHLER, Y., BEBI, P., CHRISTEN, M., MARGRETH, S., STOFFEL, L., STOFFEL, A., MARTY, C., SCHMUCKI, G., CAVIEZEL, A., KÜHNE, R., WOHLWEND, S., BARTELT, P. (2022):
Automated avalanche hazard indication mapping on a statewide scale. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22: 1825-1843, 10.5194/nhess-22-1825-2022.
- BÜHLER Y., KUMAR S., VEITINGER J., CHRISTEN M., STOFFEL, A. (2013).
Automated identification of potential snow avalanche release areas based on digital elevation models. Natural Hazards and Earth System Sciences, 13, DOI: 1321-1335, 10.5194/nhess-13-1321-2013.
- BÜHLER Y., VON RICKENBACH D., STOFFEL A., MARGRETH S., STOFFEL L., CHRISTEN, M. (2018).
Automated snow avalanche release area delineation – validation of existing algorithms and proposition of a new object-based approach for large-scale hazard indication mapping. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, DOI: 3235-3251, 10.5194/nhess-18-3235-2018.
- BÜHLER Y., HAFNER E. D., ZWEIFEL B., ZESIGER M., HEISIG H. (2019)
Where are the avalanches? Rapid SPOT6 satellite data acquisition to map an extreme avalanche period over the Swiss Alps. The Cryosphere, 13: 3225-3238, DOI: 10.5194/tc-13-3225-2019.
- CHRISTEN M., KOWALSKI J., BARTELT, P. (2010b).
RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, 63: 1 - 14, DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.04.005.

- HAFNER E. D., TECHEL F., LEINSS S., BÜHLER, Y. (2021).
Mapping avalanches with satellites – evaluation of performance and completeness. The Cryosphere, 15: 983-1004, DOI: 10.5194/tc-15-983-2021.
- HARVEY S., SCHMUDLACH G., BÜHLER Y., DÜRR L., STOFFEL A., CHRISTEN, C. (2018).
Avalanche terrain maps for backcountry skiing in Switzerland. International Snow Science Workshop ISSW, Innsbruck, Austria.
- MAGGIONI M., GRUBER U. (2003).
The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. Cold Regions Science and Technology, 37: 407-419, DOI: 10.1016/S0165-232X(03)00080-6.
- RUDOLF-MIKLAU F., SAUERMOSEER S., MEARS A. (2014).
The Technical Avalanche Protection Handbook, Ernst und Sohn Berlin..
- SYKES J., HAEGELI P., BÜHLER Y. (2022).
Automated snow avalanche release area delineation in data sparse, remote, and forested regions. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 22: 3247–3270, DOI: 10.5194/nhess-22-3247-2022.

INGENIEURBÜRO FÜR
NATURGEFAHRENMANAGEMENT

Analysen
Planungen
Baubegleitung
Beratung und Gutachten



DI Meinrad Guggenbichler-Str. 2/2
5310 Mondsee
CHRISTOPH T: +43 660 3624341
SKOLAUT E: christoph@skolaut.at
www.skolaut.at

BETTINA FISCHER, WILLY LOSERIES

Naturgefahren im Klimawandel – Vorsorgecheck

Natural hazards in climate change – precautionary check

Zusammenfassung:

Naturgefahrenvorsorge und Klimawandelanpassung sind notwendige Maßnahmen, um für veränderte Klima- und Katastrophenszenarien gewappnet zu sein. Dabei sind Gemeinden wichtige und zentrale Akteure in der Vorsorge und der zentrale Ansprechpartner für die Bevölkerung. Im Fokus des Vorsorgechecks stehen die Stärkung der Kompetenz und Kapazität der Gemeinde im Rahmen der Eigenvorsorge. Das Ziel ist die kommunalen Entscheidungsträger für die lokal relevanten Naturgefahren- und Klimarisiken zu sensibilisieren, sowie das Risikobewusstsein und die Vorsorgekapazität im Wirkungsbereich der Gemeinde zu stärken. Dabei werden bestehende Vorsorgepotenziale als auch möglicher Handlungsbedarf identifiziert, um für den Katastrophenfall und die Herausforderungen des Klimawandels noch besser vorbereitet zu sein.

Abstract:

Natural hazard prevention and climate change adaptation are necessary measures to be prepared for changing climate and disaster scenarios. Municipalities are important and central actors in preparedness and the central contact for the population. The focus of the precautionary check is on strengthening the competence and capacity of the municipality in the context of its own precautions. The aim is to sensitize municipal decision-makers to the locally relevant natural hazards and climate risks and to strengthen risk awareness and precautionary capacity within the range of action of the municipality. Thereby existing precautionary potentials as well as possible need for action are identified in order to be even better prepared for disasters and the challenges of climate change.

Stichwörter:

Vorsorgecheck, Naturgefahren, Klimawandel, Klimawandelanpassung

Keywords:

precautionary check, natural hazards, climate change, climate change adaption

Einleitung

Laut dem sechsten und damit aktuellsten Bericht des Weltklimarats (IPCC) hat die vom Menschen verursachte Klimakrise massive Auswirkungen auf viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt. Die am Bericht beteiligten Wissenschaftler:innen warnen zudem vor noch schwereren Naturkatastrophen, sollte der CO₂-Ausstoß nicht massiv eingedämmt werden (vgl. IPCC, 2022). Auch Österreich stellt keine Ausnahme dar und ist immer wieder von Naturkatastrophen betroffen, seien es massive Überschwemmungen, Hagel, Waldbrand, aber auch Hitze und lange Trockenperioden – um nur ein paar Beispiele zu nennen. Die Palette an möglichen Naturkatastrophen ist auch hierzulande breit gefächert. Problematisch ist mitunter, dass durch die immer weiter voranschreitende Klimakrise die Häufigkeit wie auch die Intensität von Naturgefahren weiter erhöht wird (IPCC, 2022). Doch nicht nur die Klimakrise verschlimmert die Auswirkungen von Naturgefahren, auch die in Österreich weit verbreitete Praxis der Versiegelung – Österreich ist laut Hagelversicherung unrühmlicher „Europameister“ in der Disziplin „Bodenfraß pro Kopf“ (Österreichische Hagelversicherung, 2020) – trägt maßgeblich dazu bei, dass beispielsweise Böden das Oberflächenwasser nicht mehr speichern können und sich urbane Gebiete an heißen Sommertagen stark aufheizen und nachts nicht ausreichend abkühlen. Besonders für vulnerable Gruppen (ältere Menschen, Kleinkinder, kranke Menschen) kann dies zu ernsthaften gesundheitlichen Folgen führen. Was können Gemeinden nun konkret tun, um Risiken die ihr Gemeindegebiet betreffen zu erkennen und dahingehend

Vorkehrungen zu treffen? Antworten darauf kann der Vorsorgecheck Naturgefahren im Klimawandel liefern, den wir als Klimaschutzkoordination des Landes Steiermark gemeinsam mit dem EPZ (Elementarschadenpräventionszentrum) seit 2019 bereits in rund 50 Gemeinden durchführen dürfen.

Historie

Der Vorsorgecheck Naturgefahren im Klimawandel, der ursprünglich im Rahmen der AG Eigenvorsorge des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) in Kooperation mit dem Technischen Büro Skolaut entwickelt wurde, basiert auf dem Vorbild des Hochwasseraudits der DWA (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall). Dieser wurde einerseits vereinfacht und gleichzeitig auf insgesamt 13 Naturgefahren erweitert. Die Abteilung Umweltfolgenabschätzung & Klimawandel der Umweltbundesamt GmbH rückte dabei die klimawandelanpassungsrelevanten Faktoren noch stärker in den Fokus. Folgende Naturgefahren werden durch den Vorsorgecheck abgedeckt (Umweltbundesamt, 2022):

- **Hydrologische Naturgefahren**
(Starkregen, Hochwasser, Muren)
- **Gravitative Naturgefahren**
(Rutschungen, Setzungen, Steinschlag/Felssturz, Lawinen)
- **Klimabezogene Naturgefahren**
(Hitze, Trockenheit, Waldbrand, Sturm, Hagel, Blitz, Schnee-/Eislast, Spätfrost, Schädlingskalamitäten, invasive Arten)



Abbildung 1: Relevante Naturgefahren, Quelle: Umweltbundesamt

Figure 1: Relevant natural hazards, Source: Umweltbundesamt

Ablauf

Gemeinden sind zentrale Akteure, wenn es um die Risikovorsorge geht und für eine optimale Vorsorge benötigt man auch umfangreiches Wissen. Gemeinden sollten daher nicht nur über ihre Gefährdungslage Bescheid wissen und von welchen Naturgefahren sie aktuell wie auch zukünftig bedroht sind, sondern auch darüber informiert sein, welche Möglichkeiten zur Risikovorsorge sie konkret haben. Dabei reicht die Bandbreite von technischen über planerische Maßnahmen, Informationsweitergabe an die Bewohner:innen der Gemeinde bis hin zum Wissen über das richtige Verhalten im Ereignisfall. Wissen, das in dieser Breite oft aufgrund personeller und finanzieller Ressourcen in der Form nicht immer vorhanden und/oder abrufbar beziehungsweise oft auch auf viele unterschiedliche Gemeindeakteur:innen verteilt ist. Genau hier unterstützt der Vorsorgecheck die aktuelle Situation zu reflektieren und

alle dafür relevanten Akteur:innen an einen Tisch zu holen (vgl. Umweltbundesamt, 2022).

Im Rahmen einer telefonischen Vorbesprechung mit der Auditorin oder dem Auditor wird im ersten Schritt erklärt, wie der Vorsorgecheck in der Gemeinde ablaufen wird und welche Akteur:innen aus der Gemeinde teilnehmen sollten. Am Tag des Checks selbst kommt ein Auditor:in für klimabedingte Naturgefahren sowie ein Auditor:in für den Bereich der hydrologisch/gravitativen Naturgefahren in die Gemeinde und begleitet die Teilnehmenden bei der Reflexion der Risiken für Menschen, Umwelt und Infrastruktur. Im Rahmen eines Self-Assessments wird diskutiert, von welchen Naturgefahren die Gemeinde am unmittelbarsten bedroht ist und wie sich die aktuelle Bedrohung durch die Klimakrise verändern wird, sowie welche Vorsorgemaßnahmen bereits seitens der Gemeinde getroffen wurden.

An der Reflexion beteiligen sich alle Teilnehmenden, dies sind unter anderen die Bürgermeisterin oder der Bürgermeister, Amtsleiter:innen, Bauamtsleiter:innen, Verantwortliche der Blaulichtorganisationen (insbesondere Feuerwehr und Rettung), aber auch Zuständige für die Gemeindeinfrastruktur, Rechtsfragen oder die

Raumplanung. Die einzelnen Naturgefahren werden anschließend in einer Matrix verortet (siehe Abbildung 2). Die Risiken zu kennen und die dahingehende Verletzlichkeit der Gemeinde einzuschätzen, ist somit der erste Schritt (vgl. Umweltbundesamt, 2022).

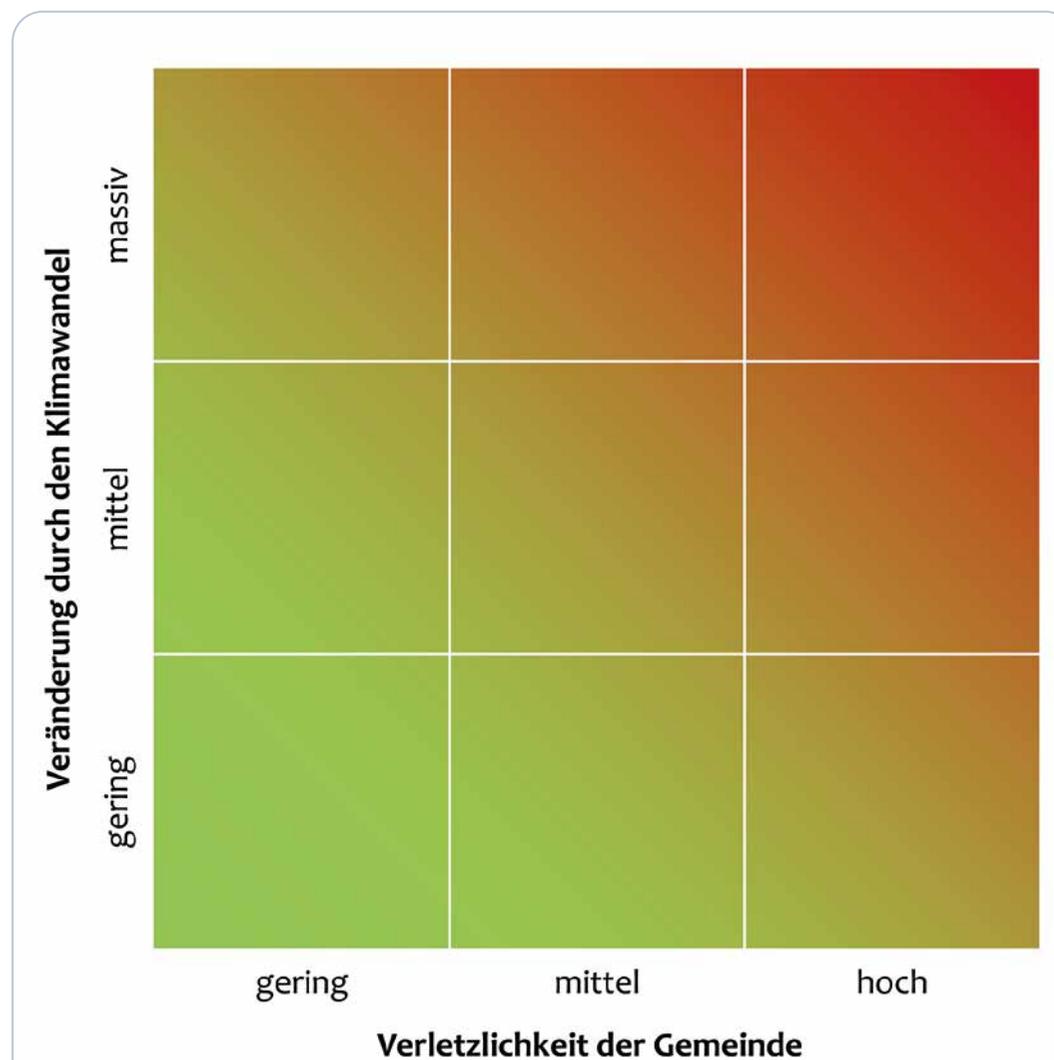


Abbildung 2: Matrix zur Verortung relevanter Naturgefahren, Quelle: Umweltbundesamt

Figure 2: Matrix locating relevant natural hazards, Source: Umweltbundesamt

Im nächsten Schritt werden für jede Naturgefahr, die für die Gemeinde Relevanz hat, die vier Vorsorgebereiche besprochen (siehe Abbildung 3): **Flächenwirksame Vorsorge, Verhaltenswirksame Vorsorge, Bauvorsorge und Risikovorsorge.**

Unter dem Bereich der **flächenwirksamen Vorsorge** fällt beispielsweise die Vermeidung der Versiegelung, der Umgang mit Frischluftschneisen oder das Schaffen von grüner und blauer Infrastruktur, welche das Mikroklima und den Hitzestress verbessern. Zur **verhaltenswirksamen Vorsorge** zählen Maßnahmen wie das Warnen der Bevölkerung beim Eintritt von Schadensereignissen (Starkregen, Hitzewellen etc.), die Sensibilisierung der Bevölkerung für Naturgefahren (Weitergabe von Informationen) oder auch das Schädlingsmonitoring. **Bauvorsorge** betrifft unter anderem die Beratung über hagel- und sturmresistente Baustoffe, oder die Anwendung der OIB 6 Richtlinie im Bezug zu sommertauglichem Bauen. **Risikovorsorge** reicht

von der Bewusstseinsbildung der Bevölkerung über die Restrisiken bis hin zur Unterstützung der Gemeinde bei der Schadensabwicklung. Die Prävention durch technische Schutzmaßnahmen, wie Hochwasserschutz, Lawinenverbauungen oder bauliche Hangsicherungen, wird im Vorsorgecheck aber bewusst ausgeklammert (vgl. Umweltbundesamt, 2022).

Der Vorsorgecheck Naturgefahren im Klimawandel wird in der Steiermark innerhalb eines halben Tages in der Gemeinde durchgeführt. Im Anschluss erfolgt eine Auswertung durch das Auditor:innen-Team sowie die Verfassung eines **Berichtes** und eines **Aktionsplanes** für die Gemeinde. In Form von Ringdiagrammen ist der Status-Quo der Vorsorge für jede Naturgefahr ablesbar. Teil des Berichts sind auch **Empfehlungen** für weitere Schritte und Hinweise auf **good-practice Beispiele**. Wird ein Handlungsbedarf identifiziert, erfolgt ein Verweis auf weitere Expert:innen. Im Rahmen des Checks

kommen von der Gemeinde wie auch von den Auditor:innen immer wieder Umsetzungsideen die im Rahmen des Berichts dann im sogenannten Aktionsplan zusammengefasst und auch gleich mit der Zuständigkeit einer Gemeindemitarbeiterin/eines Gemeindemitarbeiters, die/der sich freiwillig dazu bereit erklärt, versehen wird. Eine **Linkliste** mit aktuellen good-practice Beispielen, Infomaterialien für Bürger:innen sowie wissenschaftlichen Erkenntnissen zu allen Naturgefahren runden das Paket noch ab.

Resümee

Ziel des Vorsorgechecks ist vor allem die Sensibilisierung von kommunalen Entscheidungsträger:innen und Akteur:innen für die lokal relevanten Naturgefahren und Klimarisiken. Auch eine Stärkung des Risikobewusstseins und der Vorsorgekapazität sind in diesem Zusammenhang hervorzuheben. In der Steiermark konnten von 2019 bis 2022 bisher rund 50 Vorsorgechecks Naturgefahren im Klimawandel durchgeführt werden und weitere 30 Checks sind für das Jahr 2023 geplant. Viele steirische Gemeinden, in denen ein Naturgefahrencheck bereits durchgeführt wurde, haben große Probleme mit Starkregenereignissen, Hagel und/oder Sturm, um nur die am häufigsten vorkommenden Naturgefahren zu nennen. Auch Hitze und Trockenheit sind in nahezu allen Gemeinden (vor allem in der Süd-/Oststeiermark) ein großes Thema. Hitze wie auch Trockenheit haben in vielen Gemeinden zwar bereits Schäden angerichtet, werden von ihnen jedoch selten als Naturgefahr erfasst. Hier bedarf es noch viel an Sensibilisierungsarbeit. Zieht man die aktuellsten, wissenschaftlichen Prognosen (ClimaMap, ÖKS 15) heran, so sieht man, dass 40 bis 50 Hitzetage pro Jahr bis zum Ende des Jahrhunderts (im RCP 8.5 Szenario) für viele steirische Gemeinden

Realität sein werden. Daher ist es umso wichtiger, dass raumplanerische Maßnahmen, die heute getroffen werden, auch die Veränderungen durch die Klimakrise mitbedenken.

Jede Gemeinde hat ihren eigenen Zugang zum Thema Naturgefahren und ist oft auch von unterschiedlichen Naturgefahren betroffen. Der große Vorteil der Checks ist, dass alle relevanten Akteur:innen an einem Tisch sitzen und sich gemeinsam über mögliche Gefährdungen und Vorsorgemaßnahmen unterhalten. Das Wissen über die jeweilige Gefährdungslage ist in den Gemeinden groß – die Einbeziehung von neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen zu Veränderungen der jeweiligen Naturgefahren durch die Klimakrise ist etwas, das im alltäglichen Leben der Gemeinde noch nicht in großem Maße berücksichtigt wird. Aber mit dem Wissen, in welchem Ausmaß die Klimakrise die jeweiligen Naturgefahren in der Gemeinde beeinflussen, können zukunftsfähige kommunale Entscheidungen getroffen werden. Diese Lücke versucht der Vorsorgecheck unter anderem zu schließen und damit Gemeinden für den Katastrophenfall und die kommenden Herausforderungen im Bereich der Naturgefahren bestmöglich vorzubereiten.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Bettina Fischer, MSc, MA
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Klimaschutzkoordination
Landhausgasse 7, 8010 Graz
bettina.fischer@stmk.gv.at

Willy Loseries, MSc
Amt der Steiermärkischen Landesregierung
Klimaschutzkoordination
Landhausgasse 7, 8010 Graz
willy.loseries@stmk.gv.at

IDENTIFIZIERUNG KRITISCHER HANDLUNGSBEREICHE

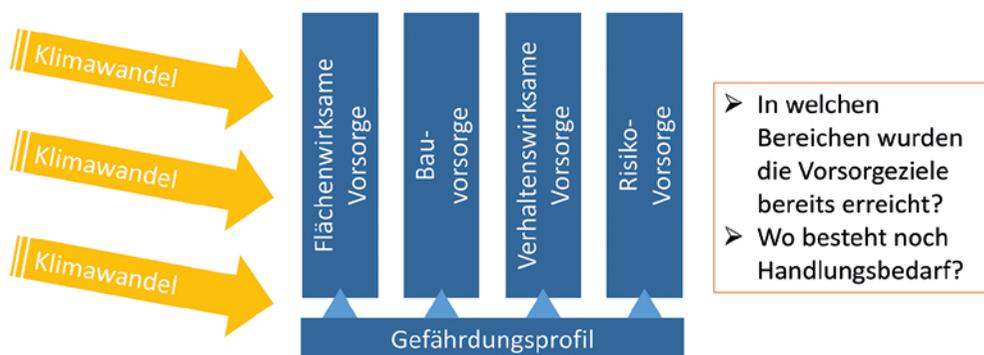


Abbildung 3: Identifizierung von Handlungsbedarf in den 4 Säulen der Naturgefahrenvorsorge, Quelle: Umweltbundesamt

Figure 3: Identification of the need for action in the 4 pillars of natural hazard preparedness, source: Umweltbundesamt

Infos:

Vorsorgecheck Naturgefahren im Klimawandel:

www.naturgefahrenimklimawandel.at

Klimaschutzkoordination

des Landes Steiermark:

<https://www.technik.steiermark.at/cms/>

ziel/58813719/DE/

Literatur/References:

CLIMA MAP (2018).
Climate Change Impact Map for Austrian Regions, Daten Steiermark.
Online unter: <https://data.ccca.ac.at/dataset/gis-daten-steiermark-v02>
(Abruf 28.08.2022)

IPCC (2022).
Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA: 3-33

ÖSTERREICHISCHE HAGELVERSICHERUNG (2020).
Täglich verlieren wir Boden: Österreich ist Europameister. Online unter: <https://www.hagel.at/presseaussendungen/taeglich-verlieren-wir-boden-oesterreich-ist-europameister/> (Abruf 21.08.2022)

ÖKS 15 (2016).
Klimaszenarien für Österreich. Online unter: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/klimaschutz/anpassungsstrategie/publikationen/oeks15.html (Abruf 28.08.2022)

UMWELTBUNDESAMT (2022).
Naturgefahren im Klimawandel. Online unter: www.naturgefahrenimklimawandel.at. (Abruf 19.08.2022)

hartl consulting

Leistungen

- Planungen für WLW und Skigebiete
- Geographische Informationssysteme (GIS)
- Global Positioning Systems (GPS)
- Laserscan und Orthofoto
- Sensortechnik/GPS-Tracker für Tiere

www.hartl-consulting.at

**PERZ
LAN**



Ingenieurkonsulent • Ingenieurbüro
DI Thomas Perz
Kulturtechnik und Wasserwirtschaft

Wildbach- und Lawinenschutz
2620 Neunkirchen
www.perzplan.at

Forst- und Holzwirtschaft
8600 Bruck an der Mur
office@perzplan.at



Halbeisen & Prast KG
Transporte - Erdbau

RENATE MAYER, ROSEMARIE HIERET, JOLANDA REXEIS, KATHRIN BLANZANO

Resilienz vor Naturkatastrophen am Beispiel der Gemeinden Perschling in Niederösterreich und Deutschlandsberg in der Steiermark

Resilience against Natural Disasters - Examples from the municipalities Perschling in Lower Austria and Deutschlandsberg in Styria

Zusammenfassung:

Naturkatastrophen hinterlassen Spuren in der Landschaft und im Bewusstsein der betroffenen Bevölkerung. Der Zeitpunkt des Ereignisses kann nicht genau vorhergesagt werden. Prognosen zu Naturereignissen und ihren Auswirkungen sind aufgrund der Klimaveränderung und den Eingriffen in den Natur- und Landschaftshaushalt nur schwer zu treffen, der zeitliche Spielraum für die Vorbeugung von Schäden wird immer geringer. Maßnahmen für die Widerstandsfähigkeit zum Schutz der Bevölkerung, von Sachgütern und der Umwelt werden getroffen. Anhand von zwei Gemeinden wird erklärt, welche Maßnahmen zur Förderung der Widerstandsfähigkeit gegen Naturkatastrophen bereits umgesetzt werden und welches Potential für weitere Maßnahmen besteht.

Abstract:

Natural disasters leave traces in the landscape and in the consciousness of the affected population. The timing of the event cannot be predicted precisely, neither in terms of locality nor in dimension of the extent of damage. Forecasts of natural events and their impacts are difficult to make due to climate change and the interventions in the natural and landscape balance, and the time frame for mitigation is becoming smaller. Preventive measures for resilience are taken to protect the population, material assets and the environment. Two municipalities are used as examples to explain which options are already being implemented and where there is potential for further measures.

Stichwörter:

Naturkatastrophen,
Resilienz, Vorsorge,
Zusammenhalt,
Handlungsweisen

Keywords:

*Natural disasters,
resilience,
precaution, solidarity*

Einleitung

„Katastrophen kennt allein der Mensch, sofern er sie überlebt; die Natur kennt keine Katastrophen“ (Frisch, 1979).

Naturereignisse mit unerwarteten Auswirkungen nehmen in vielen Regionen deutlich zu. Die Klimaveränderung beeinflusst die Naturräume und die Kulturlandschaft mit ihren unterschiedlichen Landnutzungsformen sowie zukünftige Handlungsweisen. Viele Instrumente zum Schutz vor Naturgefahren sind bewährt und stehen im internationalen Austausch hinsichtlich Einsatzmöglichkeiten, Effizienz, Ressourcen und Weiterentwicklung.

Für den Schutz vor Naturgefahren unter dem Aspekt der Klimaveränderung bedarf es einer vorausschauenden Berücksichtigung möglicher Katastrophenszenarien, was von Erfahrungsberichten, Praxiswissen und entsprechenden Ressourcen abhängt. Für die Bevölkerung in gefährdeten Gemeinden stellen sich Fragen, wie sich durch die Klimaveränderung die Anzahl und die Auswirkungen von Naturereignissen entwickeln werden, wie man persönlich betroffen ist und wie gut die jeweilige Gemeinde vor Schaden verursachenden Naturereignissen geschützt ist (Hieret, Rexeis, 2022).

Die Einschätzung von Naturgefahren und mögliche Auswirkungen von Ereignissen auf die Siedlungsräume in Deutschlandsberg in der Steiermark und in Perschling in Niederösterreich werden anhand einer BürgerInnen-Befragung und Interviews mit Entscheidungsträgern und Experten angeführt.

Die ASDR Naturgefahrenntagung 2021 in Öblarn brachte bereits Aufschlüsse darüber, wie gesammelte Erfahrungen von Naturkatastrophen mit Fachleuten diskutiert und mit der Öffentlichkeit, insbesondere auch mit der interessierten jungen Generation, geteilt werden können.



Abbildung 1: ASDR Naturgefahrenntagung 30.09.2022, von links nach rechts: Renate Mayer (HBLFA), Markus Mayerl (WLV), Rosemarie Hieret und Jolanda Rexeis, (beide HBLFA Schule), Natalie Prüggl (KLAR! Zukunftsregion Ennstal, Veranstalterin), Foto: Blanzano, 2021

Figure 1: ASDR Natural Hazards Conference 30.09.2022, from left to right: Renate Mayer (HBLFA), Markus Mayerl (WLV), Rosemarie Hieret and Jolanda Rexeis, (both HBLFA, school), Natalie Prüggl (KLAR! Zukunftsregion Ennstal, Organiser), Photo: Blanzano, 2021

Methoden der Befragung und Auswertung

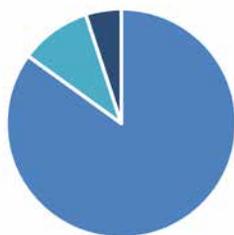
Die Erhebung der Daten erfolgte je nach Zielgruppe als Interview oder einer Befragung (Online-Fragebogen in Perschling, analoge Befragung in Deutschlandsberg). Die Website „<https://www.surveo.com>“ ermöglichte es, den Online-Fragebogen per SMS und WhatsApp an die BürgerInnen auszusenden. Beim handschriftlichen Dokument musste man direkt auf die BürgerInnen zugehen

Zusammenhalt in einer Notsituation



■ Ja ■ Nein ■ Weiß nicht

Zusammenhalt in einer Notsituation



■ Ja ■ Nein ■ Weiß nicht ■ nichts angegeben

Abbildung 2: Befragungsergebnis zum Zusammenhalt in Notsituationen in der Gemeinde Perschling (links) und der Gemeinde Deutschlandsberg (rechts)

Figure 2: Survey result of the solidarity in the municipality Perschling (left) and Deutschlandsberg (right)

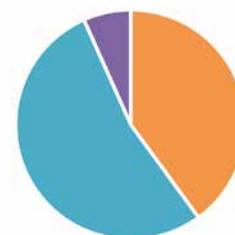
und sie bitten, sich fünf Minuten Zeit zu nehmen. Der Fragebogen umfasste wenige, unkomplizierte Fragen und sollte für die Befragten möglichst das Interesse am Thema wecken. Bei den befragten EinwohnerInnen wurde Wert auf Erfahrungen mit Naturkatastrophen im Zeitraum von mindestens 20 Lebensjahren in der Gemeinde gelegt. Bei den Interviews mit den Entscheidungsträgern der Gemeinden lag das Hauptaugenmerk auf der Art der Naturereignisse und das Ursachen-Wirkungsgefüge sowie Lösungen für die Vermeidung der Gefahren beziehungsweise Schäden in der Zukunft, inklusive Abwicklung im Katastrophenfall. Die Ergebnisse der Befragungen wurden in das jeweilige Interview eingebunden.

Auch wenn die Stichprobengröße nicht repräsentativ ist, (20 Befragungen in Deutschlandsberg, 15 in Perschling), kann ein Trend für beide Gemeinden festgestellt werden. Ohne Zweifel ist der Zusammenhalt in einer Notsituation die wichtigste Sofortmaßnahme, um Menschen, Tiere und Ortschaften zu retten sowie zu unterstützen. Die BewohnerInnen beider Gemeinden können

sich darauf verlassen, Hilfe zu bekommen, der Zusammenhalt zeugt von Stabilität, Verlässlichkeit und Vertrauen unter den BürgerInnen. Diese Einschätzung wurde durch die Interviews der Bürgermeister bestätigt (Hieret & Rexeis, 2022, S. 53ff). Die Frage „Haben Sie das Gefühl, dass eine Zusammenarbeit in Notsituationen in der Gemeinde besteht und sich die Menschen untereinander helfen“ wird in den Abbildungen 3 und 4 erfasst (Hieret & Rexeis, 2022, S. 50).

In der Gemeinde Perschling sind Hochwasser und Überschwemmungen in guter Erinnerung, während in Deutschlandsberg Stürme mit Folgeerscheinungen wie Windwürfen und Borkenkäferbefall im Gedächtnis der Bevölkerung blieben. Obwohl sich über 45 % der BürgerInnen in Sicherheit fühlt, besteht beim Informationstransfer zum Thema Naturgefahren durchaus Handlungsbedarf (Hieret & Rexeis, 2022). Die Abbildung 3 beschäftigt sich mit der Frage „Wurden Sie über Naturgefahren in der Gemeinde informiert (Hieret & Rexeis, 2022, S. 46).

Informationen über Naturgefahren



■ Ja ■ Nein ■ Weiß nicht

Informationen über Naturgefahren



■ Ja ■ Nein ■ Weiß nicht ■ nichts angegeben

Abbildung 3: Befragungsergebnis zum Informationstransfer in der Gemeinde Perschling (links) und der Gemeinde Deutschlandsberg (rechts)

Figure 3: Survey result of information transfer in the municipalities Perschling (left) and Deutschlandsberg (right)

Das Thema Klimaveränderung und Auswirkungen auf Naturgefahren spielt in beiden Gemeinden eine große Rolle. Die Abfrage wurde folgendermaßen formuliert: „Denken Sie, dass durch die

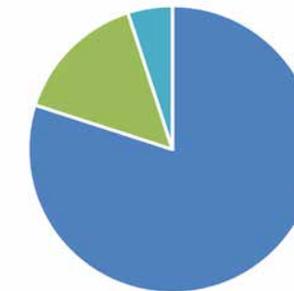
Klimaveränderung die Naturgefahren und Katastrophen eher zunehmen oder abnehmen?“ (Hieret & Rexeis, 2022, S. 51).

Klimaveränderungen



■ Zunehmen ■ Abnehmen ■ Weiß nicht

Klimaveränderungen



■ Zunehmen ■ Abnehmen ■ Weiß nicht

Abbildung 4: Einschätzung der Befragten zu Klimaveränderung und Anstieg von Naturgefahren/Naturkatastrophen in der Gemeinde Perschling (links) und in der Gemeinde Deutschlandsberg (rechts)

Figure 4: Respondents' assessment of climate change and increase in natural threats/natural disasters in the municipalities Perschling (left) and Deutschlandsberg (right)

Lösungsansätze zur Gefahrenbewältigung in den Gemeinden

Relevante Naturgefahren in der **Gemeinde Deutschlandsberg** im Süden der Steiermark sind nach Einschätzung der BürgerInnen und Ereignisdokumentation Hochwässer, Schädlingskalamitäten (z.B. Borkenkäfer), Sturm und Trockenheit sowie Hagel, Spätfrost und Hitze.

Die folgende Tabelle von ÖKS 15 (Amt der Steiermärkischen Landesregierung, 2017) beschreibt die mittleren Niederschlagssummen für Deutschlandsberg von 1971–2000 aus beobachteten Daten sowie die prognostizierten (simulierten) Änderungen für die Perioden von 2021–2050 und 2051–2100.

Die Gemeinde Deutschlandsberg war in das Projekt „LIFE LOCAL ADAPT (2015–2021)“ eingebunden. Klimaanpassungsmaßnahmen auf lokaler Ebene, auch zum Schutz vor Naturkatastrophen, betreffen dabei unter anderem die Vermittlung von praxisnahem Wissen in kommunalen Aufgaben, Aufwertung der Ressourcen für Anpassungsaktivitäten und konkrete Umsetzungsmaßnahmen. (Life Local Adapt, 2020).

Der Bürgermeister sieht im Interview die intakte Umwelt als wichtigste Ressource, Zitat: „*Es führt kein Weg vorbei, sich dem Klimawandel anzupassen und den Klimaschutz ernst zu nehmen*“ (Hieret & Rexeis, 2022, S. 77–80). Sturm- und Hagelschäden kann vorbeugend nur bedingt mit Schutzmaßnahmen entgegengewirkt werden. Szenarien mit Windgeschwindigkeiten von 120–160 km/h sieht er als größte Bedrohung für die Gemeinde. Zusätzlich sind Hagel- und Regenereignisse in unberechenbaren Intervallen zu befürchten. Im Katastrophenfall sind vor allem die Kommunikation und die technische und personelle Infrastruktur für einen flexiblen Einsatz wichtig (Schneepflüge für Hagel, Stromspeicher für eine autonome Strombereitstellung, automatisierte Alarm-Apps bei großem Anstieg der Pegel an bestimmten Fließgewässern). Durch die Befragung der BürgerInnen fühlt sich der Bürgermeister der Gemeinde Deutschlandsberg bestätigt. Für 65 % der Bevölkerung ist Information zu Naturgefahren besonders wichtig. Dazu vermittelt die Gemeinde im Stadtmagazin, über soziale Medien, ihre Website und die jeweiligen Einsatzorganisationen mit eigenen Kommunikationsplattformen

via Facebook entsprechendes Wissen. 85 % der BürgerInnen bewerten den Zusammenhalt in Krisensituationen als gut. Das wird durch Ansprechpersonen in den einzelnen Ortsteilen ermöglicht und auch die Bürgerinitiativen agieren unkompliziert (Hieret & Rexeis, 2022).

Die **Gemeinde Perschling** in Niederösterreich liegt mitten im Weinbaugebiet Traisental. Nach den Stürmen Kyrill 2007 sowie Paul und Emma 2008 verzeichnete die Gemeinde große Schäden durch Windwürfe und Borkenkäfer. Ein Großereignis am 08.07.1997 durch vorausgegangene Starkregentage, verursachte eine Kettenreaktion von verschiedenen Katastrophenszenarien, beginnend mit einem Dambruch mit anschließender Überschwemmung mitten in der Nacht und zusätzlich einem Waldbrand. Das Auslau-

fen von 40.000 Liter Heizöl sowie der Mangel an Ölabscheidern führte zur Verunreinigung des Grundwassers, der Gefährdung der Hydranten und der Gasleitung, es musste Trinkwasser für die Bevölkerung angefordert werden. Die Bahnlinie wurde wegen der Überschwemmungen gesperrt und wichtige Verbindungsstraßen zwischen den Orten tagelang unpassierbar. Die Kommunikation über Telefon brach zusammen. Etwa 45 Häuser wurden schwer beschädigt (Baum, 1997). Die Ursachen der Schäden waren vielfältig. Der Uferbewuchs an Gewässerdämmen verursachte Verklauungen, einige Häuser hatten Rohre, die vom Alarm des Gewässers in das Haus führten und die Rückstauklappen konnten nicht rechtzeitig geschlossen werden (Hiert & Rexeis, 2022).

Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Lufttemperatur (in °C)

	1971-2000		2021-2050				2071-2100			
	Jahreswerte		RCP4.5		RCP8.5		RCP4.5		RCP8.5	
bis	+ 7,2	+ 1,8	+ 2,0	+ 2,0	+ 3,1	+ 5,3				
Mittel	+ 7,0	+ 1,3	+ 1,4	+ 1,4	+ 2,3	+ 4,0				
von	+ 6,8	+ 0,9	+ 0,9	+ 1,8	+ 3,3					
	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer	Winter	Sommer
bis	- 1,5	+ 15,8	+ 1,9	+ 1,7	+ 2,1	+ 2,0	+ 3,1	+ 3,0	+ 5,1	+ 5,7
Mittel	- 1,9	+ 15,6	+ 1,6	+ 1,3	+ 1,4	+ 1,4	+ 2,4	+ 2,0	+ 4,6	+ 4,1
von	- 2,3	+ 15,4	+ 0,8	+ 1,1	+ 0,7	+ 1,1	+ 2,0	+ 1,7	+ 3,7	+ 3,4

Winter: Dezember - Jänner - Februar / Sommer: Juni - Juli - August

Abbildung 5: Beobachtete Werte und simulierte Änderungen der mittleren Niederschlagssummen in %, © Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2017).

Figure 5: Observed values and simulated changes in mean precipitation totals in %, © Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2017).



Abbildung 6: Verklauungsstelle an der Perschling, Foto: Gemeinde Perschling (1997).

Figure 6: Driftwood entanglement Perschling River in 1997, Photo: Gemeinde Perschling (1997).

Der Bürgermeister der Gemeinde Perschling bestätigt im Interview: „Einige Wohngebiete wurden früher in Gefahrenzonenbereichen falsch gewidmet. Es hat Fehlentscheidungen in der Raumordnung gegeben“ (Hieret & Rexeis, 2022, S. 81–83). Nach seiner Einschätzung hätten bestimmte Flächen mit einem Bauverbot ausgewiesen werden müssen. Man versucht aus den Fehlern zu lernen (Hieret & Rexeis, 2022). Nach der Katastrophe erfolgten angepasste Schutzmaßnahmen, den Gemeindevertretern ist aber auch bewusst, dass beim nächsten Ereignis wieder Schäden auftreten können und Regenwasserkanäle teilweise auch zu klein dimensioniert sind. Als Landwirt stellt der Bürgermeister fest, dass zu viel Maisanbau, vor allem in Fallrichtung bei Starkregenereignissen jedenfalls problematisch ist und Mulchsaat vorgeschrieben wird. Technische Maßnahmen wie Auffangbecken müssen alle paar Jahre geräumt werden, das trockene Substrat wird auf den Äckern aufgebracht. Eigenverantwortung und Selbstschutz wird im Interview betont (Hieret & Rexeis, 2022). Aus der Sicht des interviewten Geologieexperten wird aufgrund der Geomorphologie Entwarnung hinsichtlich großflächiger Rutschungen gegeben. Jedoch fehlt durch die Begradigung der Flüsse natürlicher Retentionsraum. Diese Maßnahmen wurden in vielen Gebieten für die Schaffung von landwirtschaftlichen Nutzflächen gesetzt und werden nun für die Umsetzung der EU Wasserrahmenrichtlinie stellenweise wieder umgekehrt (Mayer, R., Plank, C. 2017). Auch aus der Sicht der Geologie wird der Anstieg der Starkregenereignisse wahrgenommen. Die Schadanfälligkeit durch geogene und hydrologische Naturgefahren kann zum Beispiel durch Humusaufbau, sachgemäße Bodenbearbeitung und grüne, standortsgemäße Strukturen in der Landschaft sowie natürliche Retentionsflächen gemindert werden (Mayer et al. 2022).

Für die Widerstandsfähigkeit gegen

Naturkatastrophen gibt es kein Patentrezept aber eine Vielzahl von Möglichkeiten, die auf die örtlichen /regionalen Gegebenheiten abgestimmt und regelmäßig angepasst werden können. Umfassende Beobachtungen und Dokumentationen von natürlichen Prozessen und Phänomenen wie komplexen Wettersituationen sind genauso notwendig, wie etwa die Vorsorge hinsichtlich Objektschutz und angepasste Raumentwicklung und Landnutzung, um das Ursachen-Wirkungsgefüge in interdisziplinären Arbeitsgruppen weiter zu erforschen. Die Gesellschaft ist im Kollektiv gefordert, Lösungen für die Herausforderungen mitzutragen und Eigenverantwortung zu übernehmen. Als bewusstseinsbildende Maßnahmen sind zum Beispiel die Beteiligungsprozesse im Zuge der Gefahrenzonenplanung (Mayer, R., Ottitsch, A. 1997), Planspiele zum Thema Naturgefahren (Mayerl, et al. 2021) und Vorsorgechecks (BMLRT, 2022) sowie Informationsplattformen wie HORA (BML, 2022) und Gefahrenzonenpläne oder Gefahrenkarten verfügbar. Merkblätter zum Thema Starkregen bieten Maßnahmen und Empfehlungen für Gemeinden zur Abschätzung von Gefährdungen und Schadenspotential, Minimierung und Abwehr, Verantwortlichkeiten, Information der Betroffenen und Anleitung zur Eigenvorsorge (Gössinger-Wieser, 2018). Verhaltensempfehlungen vor, während und nach einem Hochwasser stehen auch im Naturgefahrenportal der Schweiz zur Verfügung (Schweizerische Eidgenossenschaft, 2020). Im österreichischen Aktionsprogramm Waldbrand geht es um Wahrnehmen-Vermeiden-Bekämpfen und es werden Verhaltensregeln zur Verhinderung der Waldbrandentstehung aufgezeigt (BML, 2022). Die umfassende Bewusstseinsbildung über Naturgefahren und ihre möglichen Auswirkungen sind für die Sorgfaltspflicht im eigenen Lebensmittelpunkt der Betroffenen wichtig. Die rechtzeitige Einbindung der BürgerInnen in die Planungsprozesse für

die Raumnutzung und in Schutzmaßnahmen sind wichtig für die Akzeptanz der Nutzungsbeschränkungen auf bestimmten Flächen. Ziel ist es, den Nutzungsdruck zu vermindern und einen Konsens für Vorsorgemaßnahmen zum eigenen Schutz und dem Schutz der Nachbarn zu treffen.

Anschrift der Verfasserinnen/Authors' addresses:

Dipl.-Ing. Renate Mayer
Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für
Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal
renate.mayer@raumberg-gumpenstein.at

Rosemarie Hieret, Jolanda Rexeis
Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für
Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal

Mag. Kathrin Blanzano
Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für
Landwirtschaft Raumberg-Gumpenstein
Altirdning 11, 8952 Irdning-Donnersbachtal
kathrin.blanzano@raumberg-gumpenstein.at

Literatur/References:

- AMT DER STEIERMÄRKISCHEN LANDESREGIERUNG (2017). ÖKI15 Klimaszenarien für die Gemeinde Deutschlandsberg bis 2100, Version 3.1: 09/2017, im Internet unter: https://www.umwelt.steiermark.at/cms/dokumente/12594738_75236689/82acd15e/Factsheet-Steiermark.pdf (letzter Zugriff am 22.08.2022)
- BAUM, J. (1997). Die Hochwasserereignisse 1997 in Niederösterreich und welche Lehren daraus gezogen werden können. Expertise im Auftrag der Grünen Bildungsveranstaltung NÖ, S. 5
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, REGIONEN UND WASSERWIRTSCHAFT (BML), (2022). Brennpunkt Wald Aktionsprogramm Waldbrand: Wahrnehmen-Vermeiden-Bekämpfen. Abteilung III/4 – Wildbach- und Lawinerverbauung und Schutzwaldpolitik, Wien, S. 43
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, REGIONEN UND WASSERWIRTSCHAFT (BML), (2022). HORA Natural Hazard Overview&Risk Assessment Austria. Im Internet unter <https://www.hora.gv.at/> letzter Zugriff am 29.08.2022
- BUNDESMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT, REGIONEN UND TOURISMUS (BMLRT), (2022). Vorsorgecheck Naturgefahren im Klimawandel. Im Internet unter www.naturgefahrenimklimawandel.at (letzter Zugriff am 29.08.2022)

- FRISCH, M. (1979). Der Mensch erscheint im Holozän. Frankfurt am Main, Suhrkamp, S.103.
- GÖSSINGER-WIESER, A. (2018). Faktenblatt Starkregen Maßnahmen und Empfehlungen bei Starkregen. Amt der Steiermärkischen Landesregierung EU Projekt Life LOCAL ADAPT, 1. Auflage, Mai 2018; Graz
- HIERET, R., REXEIS, J. (2022). Widerstandsfähigkeit vor Naturkatastrophen, Diplomaturaarbeit, HBLFA Raumberg-Gumpenstein Irdning-Donnersbachtal
- LIFE LOCAL ADAPT (2021). Integration of climate change adaption into the work of local authorities. Im Internet unter <https://life-local-adapt.eu/de/project/> (letzter Zugriff am 29.08.2022)
- MAYER, R., OTTITSCH, A. (1997). Designing a Public Participation Approach to Natural Disaster Control and Risk Assessment, Hrsg. European Forest Institute (EFI), Proceedings No.14, Joensuu, S, 211-226
- MAYER, R., PLANK, C. (2017). Blühende Erfolge. In: IDM Info Europa, Informationen über den Donauraum und Mitteleuropa Umwelt schützen Zukunft sichern Natura 2000 im Donauraum, Ausgabe 03/2017, S. 14
- MAYER, R., et al. (2019). CAMARO-D Cooperating towards Advanced Management routines for land use impacts on the water regime in the Danube river basin. Final Project Report. (DTP1-1-096-2.1). Transnational best practice management, 4.1. Awareness raising, INTERREG Danube transnational Programme. Editor: HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Irdning-Donnersbachtal. ISBN: 978-3902849-71-7, S. 23, 24
- MAYER, R., HOCHEGGER, K., BOHNER, A., STARZ, W., BLANZANO, K. (2022). Protected areas – potentials and measures for green and blue infrastructure, agriculture and local recreation, Abstract 7th International Symposium for Research Protected Areas facing the Biodiversity Crisis, Vienna, 7th-9th September 2022
- MAYERL, M., STOCKER, L., MAYER, R. (2021). Gefahrenzonenplanspiel Ramsau am Dachstein, Poster-Session: Klimawandelanpassungs-Ideen vor den Vorhang! ADSR Naturgefahren Tagung 2021, Öblarn

CHRISTIAN AMBERGER, STEPHAN VOLLSINGER, PETER LEPKOWICZ

Ablauf und Management des Waldbrandes Hirschwang in den Quellschutzforsten der Stadt Wien

Process and management of the forest fire disaster in Hirschwang in the source protection forests of the city of Vienna

Zusammenfassung:

Am 25. Oktober 2021 entzündete sich der Schutzwald am Eingang zum Höllental südlich des Schneebergs in Niederösterreich und entwickelte sich unter massiver medialer Begleitung zu einem der größten Waldbrände Österreichs. Insbesondere die Strauchschicht und die sensible, teils jahrzehntealte Verjüngung wurden komplett vernichtet. Zum langfristigen und nachhaltigen Schutz dieser Waldbestände soll ein flächenwirtschaftliches Projekt der Wildbach- und Lawinerverbauung ausgearbeitet werden.

Abstract:

On October 25, 2021, the protective forest at the entrance to the Höllental south of the Schneeberg in Lower Austria caught fire and developed into one of the largest forest fires in Austria under intensive media accompaniment. In particular, the shrub layer and the sensitive regeneration, some of which was decades old, were completely destroyed. An area management project is being developed by the Austrian Forest-technical Service for Torrent- and Avalanche Control to provide long-term and sustainable protection of these forest stands.

Stichwörter:

Schutzwald,
Waldbrand,
Hirschwang,
Niederösterreich,
Flächenwirtschaftliches
Projekt

Keywords:

Protective forest, forest fire,
Hirschwang, Lower Austria,
area management project

Lage und Ablauf des Waldbrandes

Der Waldbrand ereignete sich in Hirschwang, einem Ortsteil der Gemeinde Reichenau an der Rax. Die Brandfläche befindet sich orografisch links des Höllentales, am südlichen Abhang des 1300 m hohen Mittagsteines in einer Seehöhe von rund 800 m bis 1100 m. Die gesamte, in Brand geratene Fläche befindet sich im Eigentum der Stadtgemeinde Wien und wird von deren Forstverwaltung „Quellschutz“ bewirtschaftet.

Am 25. Oktober 2021 vormittags entzündete sich der Schutzwald am südöstlichen Eingang zum niederösterreichischen Höllental zwischen Rax und Schneeberg.

Aufgrund der wochenlangen Niederschlagsarmut und dem starken, drehenden Wind konnte sich der Waldbrand trotz des sofortigen schlagkräftigen Eingreifens der Einsatzkräfte unkontrolliert ausbreiten. Insbesondere war der im Jahr 2020 gegründete Sonderdienst „Flur- und Waldbrandbekämpfung“ des Landesfeuerwehrverbandes Niederösterreich unmittelbar nach dem Ausbruch des Brandes mit geschulten Einsatzkräften und Spezialgerät am Einsatzort.

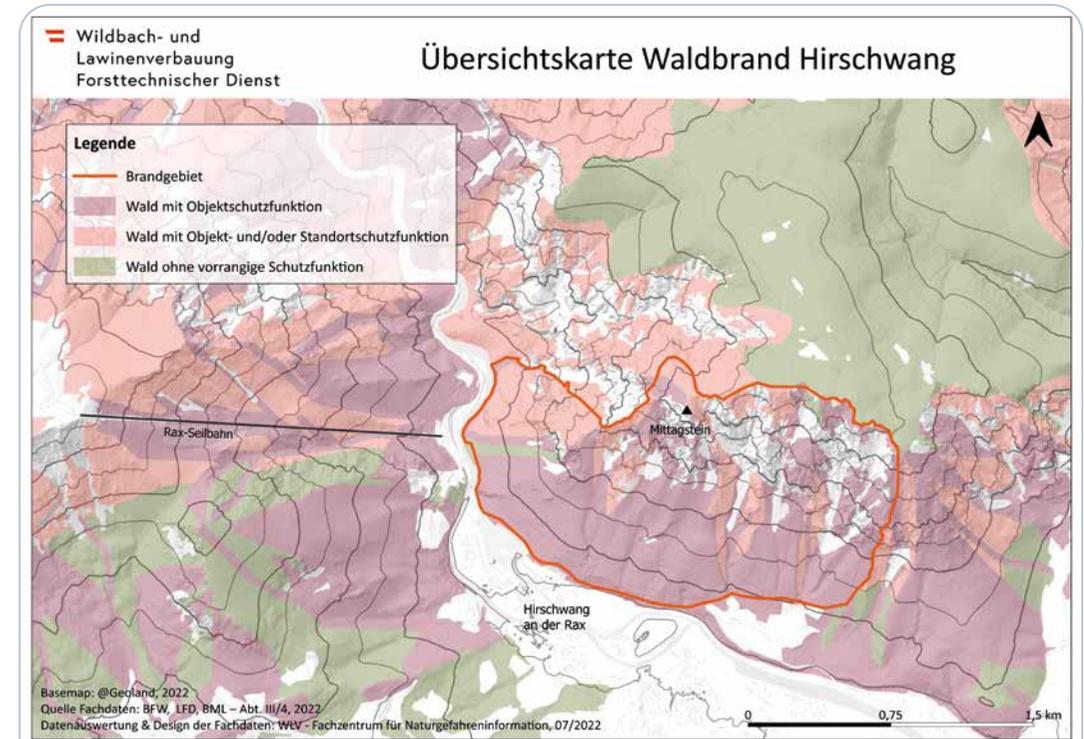


Abbildung 1: Lageplan des Brandereignisses und Darstellung der Hinweiskarte Schutzwald des BML.

Figure 1: Site plan of the fire incident and representation of the BML protection forest information map.

Der Waldbrand breitete sich insbesondere in den ersten drei Tagen rasch aus und wurde bald – medial „befeuert“ – zum „Größten Waldbrand, der jemals in Österreich stattfand“, hochstilisiert.

In der Rückschau gesehen, waren rund 80 Hektar Fläche betroffen, der Waldbrand reiht sich somit bei den großen Ereignissen ein. Er ist vergleichbar mit dem Ereignis 2015 in Lurnfeld (Kärnten) mit ebenfalls 80 Hektar sowie mit dem Ereignis 2014 bei Absam (Tirol) mit rund 100 Hektar. In beiden Fällen war die Brandintensität aber höher, Kronenfeuer hatten dort jeweils zum flächigen Absterben von Bäumen geführt.

Endgültiges „Brand aus“ konnte in Hirschwang am 6. November nach dem Löschen der letzten aktiven Glutnester gegeben werden.

Beeindruckend war die Einsatzstatistik. In den 13 Einsatztagen waren in Summe fast 9.000 HelferInnen, darunter mehr als 7.750 Feuerwehrleute tätig. Nach Angaben des NÖ Landesfeuer-

wehrkommandos wurden in Summe 186.072 Einsatzstunden geleistet. An Ort und Stelle waren außerdem 1.355 Fahrzeuge und 33 Katastrophenhilfsdienst-Züge. Es waren Feuerwehren aus allen Bundesländern Österreichs eingesetzt. Neben diesem nationalen Schulterschluss gab es aber auch internationale Hilfe, vor allem aus der Luft. Italien entsandte zwei Canadair-Maschinen des Typs CL-415, die mit der Löschwasserentnahme aus der Neuen Donau rund um Allerheiligen auch in Wien für Furore sorgten und zahlreiche Schaulustige anzogen. Aus Deutschland kamen zwei Spezialhubschrauber – Sikorsky CH-53 – und aus der Slowakei eine Maschine vom Fabrikat Mil Mi-17. Mit insgesamt 16 Fluggeräten aus dem In- und Ausland wurden 4.348 Turns durchgeführt. Die über dem Rax-Schneeberg-Gebiet abgeworfene Wassermenge belief sich auf etwa fünf Millionen Liter. Insgesamt wurden 619 Pilotenstunden geleistet.



Abbildung 2: Blick auf ein Bodenfeuer im Bereich eines Schwarzkiefern-Altbestandes (Foto: WLV Sektion WNB, 2021).

Figure 2: View of a ground fire in the area of an old black pine stand (Photo: WLV Sektion WNB, 2021).

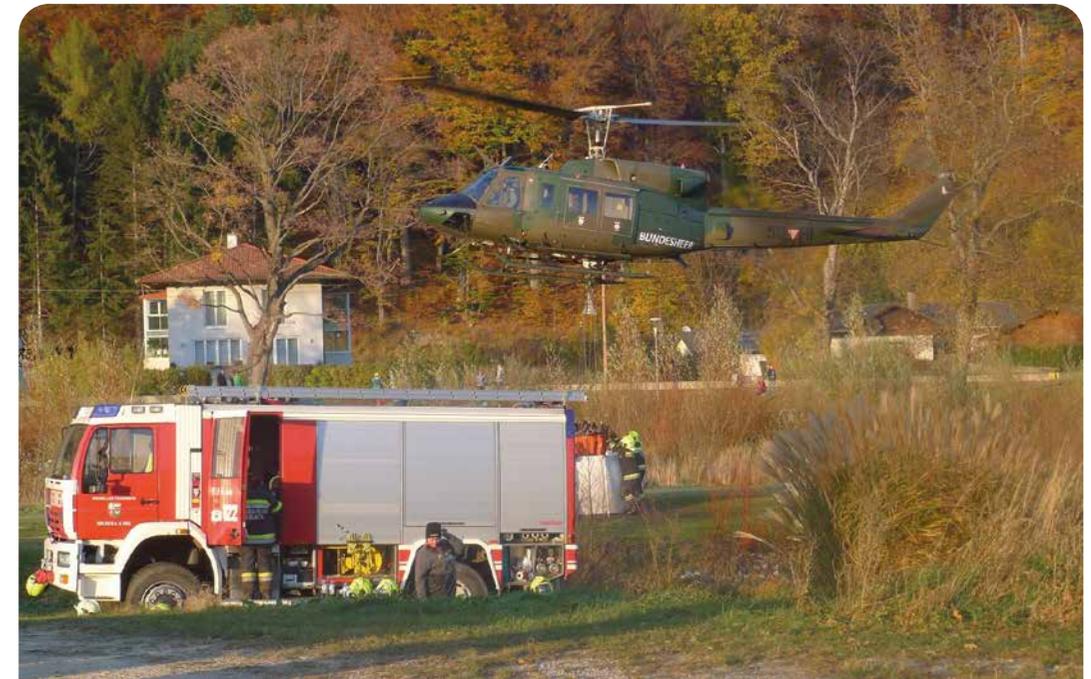


Abbildung 3: Hubschrauber Augusta Bell-212 des Österreichischen Bundesheeres bei der Wasseraufnahme (Foto: WLV Sektion WNB, 2021).

Figure 3: Augusta Bell-212 helicopter of the Austrian Armed Forces catching water (Photo: WLV Sektion WNB, 2021).

Hinsichtlich der Brandursache wird von einer "fremden Zündquelle", mutmaßlich von einem Lagerfeuer, ausgegangen. Deshalb wurden diverse Zeugeneinvernahmen durchgeführt und Luftbilder ausgewertet. Schon bald stand für eine etwaige Tätersausforschung die Durchführung einer Funkzellenauswertung im Raum. Diese konnte zeitnah zum Brand nicht durchgeführt werden, da der erste Anfangsverdacht der Oberstaatsanwaltschaft Wiener Neustadt auf „fahrlässige Herbeiführung einer Feuersbrunst“ mit einer Strafandrohung von bis zu einem Jahr lautete, wofür dieses Verfahren nicht zulässig ist. Erst die Änderung des Anfangsverdacht auf Brandstiftung mit einer Strafandrohung von bis zu zehn Jahren, machte es Ende April 2022 dann doch möglich, eine Funkzellenauswertung zu veranlassen. Bis August 2022 sind davon noch keine Ergebnisse bekannt.

Analyse des Brandereignisses

Der erste Eindruck, wenn man das Waldbrandgebiet besucht, ist der, dass es gar nicht so schlimm aussieht, wie man wohl erwarten würde und wie die dramatischen Bilder in den Medien den Anschein erweckten. Dies ist dem Umstand geschuldet, dass nur in jüngeren Beständen (rund 5 Hektar) das Feuer auch auf die Kronen übergriff und somit deutlich sichtbar verbrannte Bestände hinterließ. Ansonsten brannte nur die ausgetrocknete Kraut- und Strauchschicht und die skelettreichen Streuschichten am Boden glühten tagelang weiter wie „Kohlen am Grill“.

Die Baumschicht im Gebiet besteht neben beigemischtem Laubholz überwiegend aus mächtigen, durchwegs rund 200 Jahre alten

Schwarzkiefern (*Pinus nigra*). Diese Bestände waren in den ersten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts systematisch zur Kautschukgewinnung angelegt worden. Die so genannten „Pechbäume“ wurden auf dem bergseitigen Drittel durch Plätzen oder Hobeln geschält. Um den Harzfluss aufrecht zu erhalten und zu stimulieren, wurde die Wunde sukzessive nach oben erweitert. Die



Abbildung 4: Ausgekohlte Schwarzkiefer („Pechbaum“) (Foto: WLV Sektion WNB, 2021).

Figure 4: Charred black pine ("pitch tree") (Photo: WLV Sektion WNB, 2021).

Harzgewinnung (Pecherei) wird heute nicht mehr betrieben und wurde 2011 von der UNESCO zum Immateriellen Kulturerbe in Österreich erklärt. Die heute in Ostösterreich noch zahlreich anzutreffenden Pechbäume präsentieren sich – wie auch in Hirschwang – als mächtige, wenngleich mäßig vitale Individuen mit massiven Schäden am Stamm und sehr hohem Gehalt an ausgehärtetem Harz.

Einige der in Brand geratenen Pechbäume zeigten Brandverhalten wie Schwedische Fackeln, indem sie innen ausbrannten, während der äußere Splint und die isolierende, verkohlte Rinde einen Kamineffekt erzeugten.

Wurden ungeharzte Kiefernstämme dem Feuer ausgesetzt, so war zu beobachten, dass die dicke Borke zwar oberflächlich ankohlte, es aber einer sehr langen Ausgesetztheit bedurfte, bis sie komplett durchbrannten und der Baum dann abstarb, weil seine Leitbahnen zerstört worden waren.

Andererseits trägt gerade auch die schuppige Borke der Schwarzkiefer zur Verbreitung des Feuers bei, weil brennende Borkenschuppen in der heißen Luft nach oben getrieben werden und wie kleine glühende Späne wieder irgendwo landen und ein neues Glutnest initiieren können.

Die Brandschwere ist definitionsgemäß (Maringer, J. et al., 2020) als gering bis mittel zu bezeichnen. Die massivste Belastung für die Bäume war eben die tagelange, metertiefe Erhitzung des Bodens und somit des sensiblen Feinwurzelraumes. Hier wird man endgültig erst in den nächsten 1–3 Jahren abschätzen können, wie viel, der für die Bäume unerlässlichen Feinwurzelmasse, abgestorben ist und ob sie überleben oder nicht. Beobachtungen anderer Waldbrände zeigen, dass die Regenerationsfähigkeit des Bestandes erheblich von der Feuchtigkeit in den Vegetationsperioden der nächsten drei Jahre abhängt.

Der größte schutzwaldbauliche Schaden ist die komplette Zerstörung der Verjüngung und der Strauchschicht. Dieser Ausfall bedeutet den Verlust von 30–40 Jahren waldbaulicher Anstrengungen.



Abbildung 5: Abgebrannte und abgestorbene Waldverjüngung (Foto: WLV Sektion WNB, 2021).

Figure 5: Burnt and dead forest regeneration (Photo: WLV Sektion WNB, 2021).

Unmittelbare Sanierungsarbeiten

Seitens der Forstverwaltung „Quellschutz“ des Forst- und Landwirtschaftsbetriebes der Stadt Wien wurde unmittelbar nach dem Brandende mit Querfällungen begonnen, um der Boden-erosion möglichst früh Einhalt zu gebieten. Bis August 2022 wurden dafür mehr als 1.000 durch den Brand zerstörte Bäume geschlägert. Unmittelbar wurden weitere rund 2.000 Laubbäume (Bergahorn, Mehlbeere, Traubeneiche) und Sträucher – sowohl wurzelnackte Pflanzen als auch Containerpflanzen – gesetzt.

Daneben wurde auf rund 50 Hektar eine Birken-Schneesaat ausgebracht und am schutzlosen Boden Grassaaten initiiert.

Planung eines Flächenwirtschaftlichen Projektes

Die entstandenen Schäden am Schutzwald und die bevorstehende Klimakatastrophe machen eine umfassende und nachhaltige Sanierung des Brandgebiets ebenso unabdingbar, wie die Schaffung von Präventionsmaßnahmen zum Schutz der noch nicht betroffenen, aber in hohem Maße brandgefährdeten Flächen des Quellschutzwaldes.

Eine langfristig ansprechbare Investitionsbasis wird daher notwendig sein. Unmittelbar notwendige schutzwaldbauliche Maßnahmen können aus dem Waldfonds des BML, „Maßnahme 1: Wiederaufforstung und Pflegemaßnahmen nach Schadereignissen“, dotiert werden; für längerfristig anzulegende Maßnahmen erscheint die Erarbeitung eines Flächenwirtschaftlichen Projektes im Sinne der Technischen Richtlinie für die Wildbach- und Lawinverbauung mit einer möglichen Laufzeit bis zu 30 Jahren zielführend.



Abbildung 6:
Mobilisierbares, erosives
Material im Projektgebiet
(Foto: WLV Sektion WNB,
2021).

Figure 6:
Mobilizable erosive material
in the project area (Photo:
WLV Sektion WNB, 2021).

Dieses Flächenwirtschaftliche Projekt wurde in groben Zügen konzipiert und wird im wesentlichen folgende Inhalte umfassen:

Schutzwaldbauliche Maßnahmen

- Baumartenüberführung: Umbau der überalterten, sehr homogenen, durchwegs rund 200 Jahre alten Schwarzkiefernbestände.
- Einbringen standortangepasster Laubbaumarten, unter anderen mit Mehlbeere, Eberesche, Ahorn, Eiche, Nuss und der (Wieder) Aufbau einer klimafitten Verjüngung und Strauchschicht.
- Weitere ergänzende Aussaaten.
- Ausarbeitung und Umsetzung eines waldbaulichen Bewirtschaftungskonzeptes, mit dem Ziel, einen möglichst waldbrandresistenten und brandresilienten Bestandaufbau zu schaffen.
- Ergänzende Quer- und Schrägschlägerungen, um Steinschlag sowie – im Brand-

falle – das Abrollen von brennenden, glotenden Wurzelstöcken zu unterbinden.

- Errichtung von Brandschneisen und Korridore.
- Erschließungskonzept.
- Umfassende Wildstandskontrolle und jagdliches Management.

Ergänzende Technische Maßnahmen

Ein ergänzender technischer Steinschlagschutz, also im Wesentlichen die Einbringung von Schutznetzen wird nur lokal notwendig sein; das endgültige Ausmaß hängt vom Umfang und von der Zeitdauer des Vitalitätsverlustes der Baumschicht ab.

Sonstige Maßnahmen

- Errichtung von Löschleitungen.
- Errichtung von Löschteichen in Hochlage.
- Eventuell Errichtung von Hubschrauberlandeplätzen.

- Detektion von Glutnestern mittels Wärmeradar am Gegenhang (Reichweite rund 5 km, wenige reliefbedingte Abschattungen).
- Besucherstromlenkung.
- Wald-Monitoring.
- Forstwissenschaftliche Begleitung.

Wirtschaftlichkeit, Förderumfeld

Eine nach monetären Werten ausgerichtete Kosten-Nutzen-Untersuchung (KNU) würde bei diesem Projekt zu keinem positiven Kapitalwert führen, da im Bereich der Waldbrandfläche und in den Randzonen kaum Liegenschaften, Betriebsstandorte oder Infrastrukturen unmittelbar gefährdet sind. Für die Ermittlung der Wirtschaftlichkeit muss das starke öffentliche Interesse an der langfristigen Sicherstellung der Quellschüttungen (qualitativ und quantitativ) als intangibler Wert in der Wirtschaftlichkeitsuntersuchung berücksichtigt werden.

Aus der Perspektive der Interessenlage würden sich als Investitionspartner nur der Bund und das/die Land/Stadt Wien (als ausschließlicher Grundeigentümer) anbieten („extraterritoriales Wiener Projekt“).

Umsetzung, Ausblick

Nach Klärung der Förder- und Investitionsmodalitäten kann die stufenweise Umsetzung im Jahr 2023 beginnen. In der ersten Phase wird vorrangig neben der ohnedies unabdingbaren Wildstandskontrolle und einem jagdlichen Managementplan die Errichtung weiterer, einfacher forsttechnischer Maßnahmen wie Quer- und Schrägschlägerungen (um die Bodenrauhigkeit zu erhöhen und der Bodenerosion Einhalt zu gebieten), stehen.

Die begleitenden schutzwaldbaulichen Maßnahmen sollen mit eigenem Fachpersonal

in enger Abstimmung zwischen der Magistratsabteilung 49 und der Wildbach- und Lawinenverbauung erfolgen.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

DI Christian Amberger, Sektionsleiter
Wildbach- und Lawinenverbauung
Sektion Wien, Niederösterreich und Burgenland
Marxergasse 2, 1030 Wien
christian.amberger@die-wildbach.at

DI Stephan Vollsinger, Gebietsbauleiter
Wildbach- und Lawinenverbauung
Gebietsbauleitung Wien, Burgenland und Niederösterreich Ost
Neunkirchner Straße 125, 2700 Wiener Neustadt
stephan.vollsinger@die-wildbach.at

DI Peter Lepkowicz
Forst- u. Landwirtschaftsbetrieb der Stadt Wien
Leiter der Forstverwaltung Quellschutz
Emil von Linhart-Gasse 4
2651 Reichenau/Rax
peter.lepkowicz@wien.gv.at

Literatur/References:

- ALLGAIER LEUCH, B., STREIT, K., BRANG, P. (2017). Naturnaher Waldbau im Klimawandel. Merkbl. Prax. 59:12 S.
- DORREN, L., BERGER, F., IMESON, A.C., MAUER, B., REY, F. (2004). Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. For. Ecol. Manage. 195: 165–176.
- HENNING, B. (2019). Waldbrand – Prävention, Bekämpfung, Wiederbewaldung. Bern, Haupt.: S 216.
- MARINGER, J.; ASCOLI, D., GEHRING, E., WOHLGEMUTH, T., SCHWARZ, M., CONEDERA, M. (2020). Feuerökologie montaner Buchenwälder. Waldleistungen und waldbauliche Maßnahmen nach Waldbrand. Merkbl. Prax. 65. 12 S.
- PEZZATTI, G.B., DE ANGELIS, A., CONEDERA, M. (2016). Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. In: Pluess, A.R.; Augustin, S.; Brang, P. (Red.), Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Bern, Stuttgart, Wien, Haupt.: 223–245.
- Waldbrand-Blog der Universität für Bodenkultur, Institut für Waldbau, <https://fireblog.boku.ac.at/>

SANDRA MELZNER, MARCO CONEDERA, GIANNI BORIS PEZZATTI

Post Waldbrand Risiko in den schweizerischen Gebirgen

Post wildfire risk in the Swiss mountain areas

Zusammenfassung:

Im Gebirge gehören Waldbrände zu den bedeutendsten Naturereignissen. Neben der Veränderung des Waldbestands bzw. der Beeinträchtigung der Schutzwaldfunktion haben hohe Feuertemperaturen auch erhebliche physikalische und chemische Auswirkungen auf den Boden und Fels. Dies bedingt eine erhöhte Disposition gegenüber dem Auftreten geohydrologischer Prozesse wie Steinschläge, Felsstürze, Murgänge, Hangmuren und Erdbeben, die Infrastrukturen und Siedlungen gefährden können. In der Schweiz sind in der Waldbranddatenbank Swissfire umfangreiche waldbezogene Daten zu über 10.000 Waldbrandereignissen gespeichert. Damit bildet die Datenbank ein wichtiges Instrument, nicht nur um die Entwicklung und Veränderungen in den Feuerregimen in unterschiedlichen Gebieten erkennen zu können, sondern auch um Hinweise auf das Potential geohydrologischer Gefahren und Risiken nach Feuer zu geben und entsprechende technische und waldbauliche Maßnahmen planen und umsetzen zu können.

Abstract:

In mountain areas, wildfires are among the most important natural disturbances. In addition to the disruption of the vegetation cover or the impairment of the protective forest function, the high temperatures also have considerable physical and chemical effects on the soil and rockmass structure. This results in an increased susceptibility to geohydrological processes such as landslides, rockfalls and debris flows, which can endanger infrastructures and settlements. The Swiss forest fire database Swissfire contains extensive forest-related data on more than 10,000 fire events. The database is thus an important tool not only for identifying the development and changes in fire regimes in different areas, but also

Stichwörter:

Waldbrand,
Schutzwald, Swissfire,
geohydrologische
Gefahren, Rutschung,
Steinschlag, Hangmure,
Murgang

Keywords:

Wildfire, protective forest, Swissfire,
geohydrological hazards, landslide,
rockfall, hillside debris flow, debris flow

for providing information on the potential of geohydrological hazards and risks after fires and for planning and implementing appropriate technical and silvicultural measures.

Einleitung

Die heterogene tektonische und geologische Grunddisposition der Alpen bedingt räumlich stark variierende topographische und geomorphologische Verhältnisse. Diese variablen Gebiets-eigenschaften haben nicht nur entscheidenden Einfluss auf die historische Siedlungsentwicklung im Alpenraum und die damit verbundenen Landschaft- und Vegetationsstrukturen, sondern auch auf die zeitliche Veränderung der Feuerregime und geohydrologischen Prozesse (Abb. 1).

Die durch den Klimawandel bedingte Zunahme an Hitzewellen und Dürreperioden

führen in vielen Regionen zu einem sehr hohen Waldbrandrisiko und einer Vielzahl an Waldbränden, die zudem die Anfälligkeit gegenüber dem Auftreten geohydrologischer Gefahren erhöhen. Klimatische Extremereignisse wie Stürme (z.B. Hagel und Starkniederschlag, schneereiche Winter), schwächen nach einem schweren Waldbrand zusätzlich den/die Waldzustand/-struktur und führen zu einer Verschärfung der Folgen. Die Waldbrandanfälligkeit und die geologische Disposition gegenüber Erosion oder gravitativer Massenbewegungen (Abb. 1) hängen von einer Vielzahl von Faktoren ab, die sich gegenseitig bedingen können.

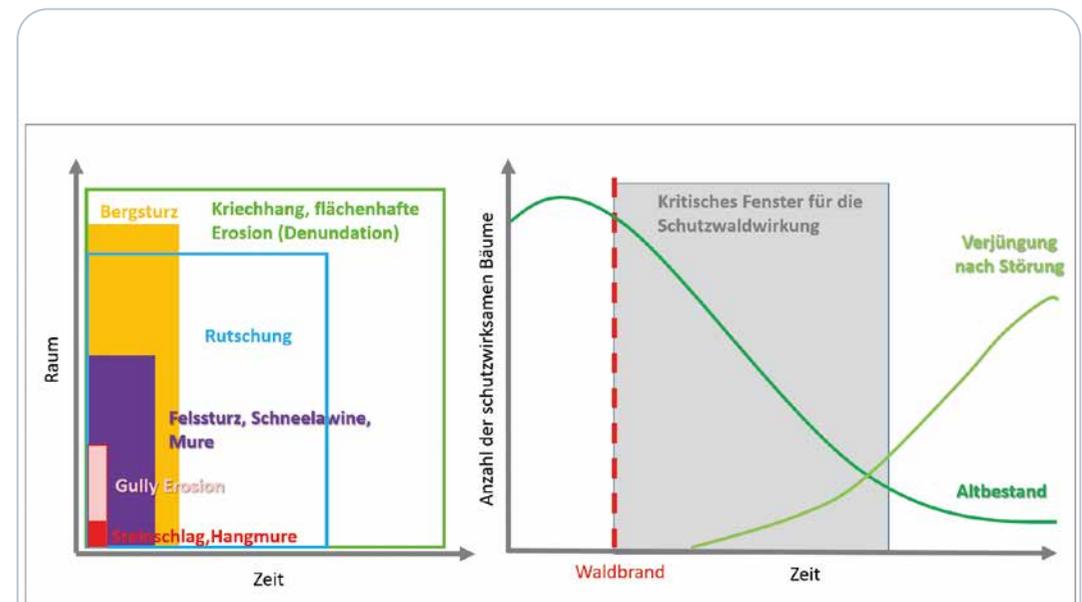


Abbildung 1: Kritisches Zeitfenster für die Schutzwirkung des Waldes gegenüber geohydrologischen Naturgefahren (verändert nach Conedera and Pezzatti, 2019).

Figure 1: Critical time window for the protective effect of the forest against geohydrological natural hazards (modified after Conedera and Pezzatti, 2019).

Die meisten Untersuchungen hinsichtlich der geohydrologischen Auswirkungen von Waldbränden wurden in den USA und im Mittelmeerraum durchgeführt (z.B. Sarro et al., 2021). In der Alpenregion existieren wenige Arbeiten, die sich mit dem Thema hydrogeologische Gefahren im Zuge eines Waldbrandereignisses oder post-Waldbrandgefahren im Gebirge beschäftigen (z.B. Conedera et al., 2003; Providoli et al., 2002; Maringer et al., 2016; Regione Piemonte, 2018; Gehring et al., 2019; Melzner et al., 2019; Ascoli et al., 2020 und UNEP, 2022).

Das Ziel dieses Artikels ist es, anhand ausgewählter Waldbrände in der Schweiz das geohydrologische Gefahrenpotential im Zuge und nach einem Waldbrandereignis zu diskutieren und Anreize für weiterführende Forschungs- und Arbeitsschwerpunkte zu setzen.

Waldbrandgeschehen in der Schweiz

Die Schweiz verfügt über eine **landesweite Waldbranddatenbank Swissfire** (www.swissfire.ch), die ein zentrales Instrument der nationa-

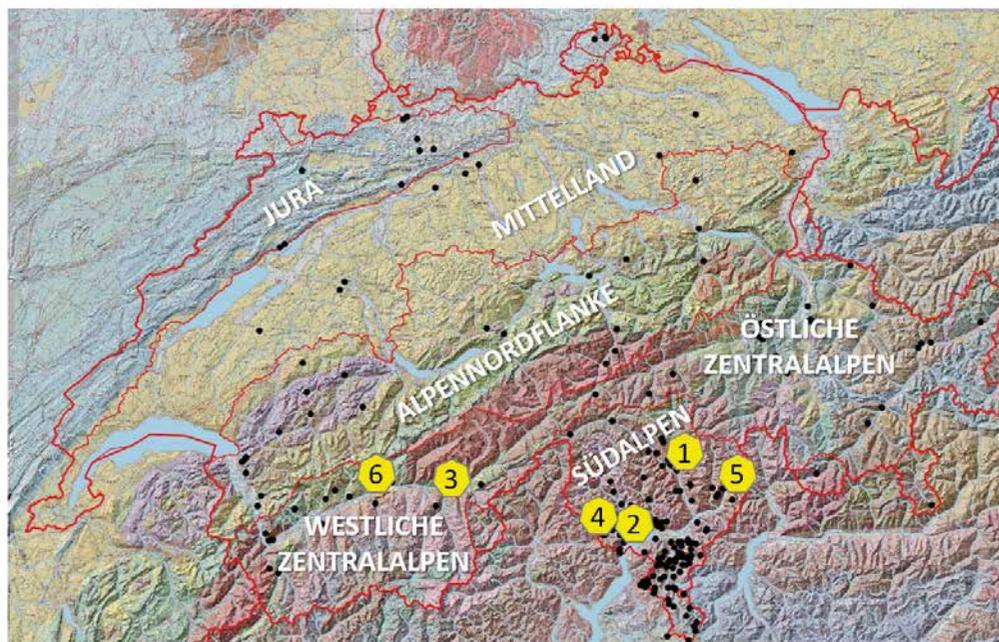


Abbildung 2: Tektonische Grunddisposition und biogeographische Gliederung der Schweiz. Schwarze Punkte: geografische Lage der seit dem Jahr 2000 registrierten Waldbrände mit einer Brandfläche größer als 1 Hektar. Gelbe Punkte markieren die Lage der im Text genannten Waldbrandbeispiele, 1 Pollegio (TI), 2 Ronco s/Ascona (TI), 3 Visp (VS), 4 Verdasio (TI), 5 Mesocco (GR), 6 Leuk (VS) (Quelle: Waldbranddatenbank Swissfire; BAFU; swisstopo, für Legende siehe www.map.geo.admin.ch).

Figure 2: Tectonic disposition and biogeographic units of Switzerland. Black dots: geographic location of wildfires documented since the year 2000 with an area >1 ha in size. Yellow dots refer to the location of the wildfire examples mentioned in the text, 1 Pollegio (TI), 2 Ronco s/Ascona (TI), 3 Visp (VS), 4 Verdasio (TI), 5 Mesocco (GR), 6 Leuk (VS) (Source Swissfire, BAFU, and swisstopo, for the legend, please see www.map.geo.admin.ch).

len Waldbrandstrategie ist und im Jahr 2008 in einer Zusammenarbeit der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), des Bundesamtes für Umwelt und der 26 Kantone entwickelt wurde (Pezzatti et al. 2019). Die Waldbranddatenbank kann für die Brände von mindestens 1 Hektar seit ca. dem Jahr 2000 als vollständig betrachtet werden. In der Schweiz werden seitdem jährlich im Schnitt rund 106 Waldbrände gemeldet, die eine Brandfläche von 151.5 Hektaren betreffen. Die meisten Meldungen beziehen sich auf Waldbrände kleinen Ausmaßes und lediglich 11.4 Prozent der gemeldeten Waldbrände (d.h. 12 Brände im Jahr) verzeichnen Brandflächen von einem 1 Hektar und größer (Abb. 2).

Bei der **räumlichen Verteilung** der Waldbrände in der Schweiz in dem Zeitraum 2000 bis 2021 (siehe Abb. 2) fällt auf, dass die Ereignisse mit einer Brandfläche grösser als ein Hektar vorwiegend in dem gebirgigen Teil der südlichen und Zentralalpen aufgetreten sind. In den Tallagen und unteren Hangbereichen waren vor allem die Kastanienwälder und seltener Buchen und Nadelwälder vom Feuer betroffen, in den höheren Hanglagen der alpinen Täler vor allem Nadelwälder (z.B. Fichten und Kieferbestände). Im Bereich der Alpennordflanke und in den flacheren Bereichen des Mittellandes sind in der Datenbank kaum Einträge über größere Waldbrände zu finden. Dies ist vorwiegend darin begründet, dass dort aufgrund der anderen gebietsspezifischen Verhältnisse (z.B. Geologie, Geomorphologie) vergleichsweise feuchtere klimatische Bedingungen und weniger zusammenhängende Waldflächen (vor allem im dichtbesiedelten Mittelland) existieren. Der nördlichste Teil der Schweiz ist als Mittelgebirge „Jura“ ausgebildet, welches durch ein sehr markantes Relief in Form eines über 300 km² langen Bogens aus Kalkstein charakterisiert

ist. Auf den flachgründigen Böden (Rendzinen) wachsen vor allem Fichten, Tannen und Buchen. Die Wälder in diesem Bereich waren im Gegensatz zum Mittelland in der Vergangenheit bedeutend häufiger von Waldbränden betroffen.

Hinsichtlich **des zeitlichen Auftretens** der Waldbrände in der Schweiz lässt sich zusammenfassen, dass sich anhand der dokumentierten Ereignisse zwei Hauptbrandsaisonen im Frühling (März-April) und im Hochsommer (Juli-August) abgrenzen lassen. In den letzten Jahren hat sich zudem die Anzahl der Tage mit einer meteorologischen Waldbrandgefahr erhöht (Pezzatti et al., 2016), wodurch generell längere Waldbrandsaisonen zu verzeichnen sind. Immer häufiger treten Waldbrände bereits im Winter auf, wie es zum Beispiel in den schneearmen Wintern in den Jahren 2016/17 und 2021/22 der Fall war. Auch durch Blitzschlag verursachte Brände sind wegen der immer häufiger auftretenden Sommerdürren und Gewitter in den letzten Jahren vermehrt dokumentiert worden (Moris et al. 2020).

Einwirkung des Feuers auf Vegetation, Boden und Fels

Im Gebirge hat die Topographie und die damit verbundenen Wind- und Vegetationsverhältnisse sowie die vom Feuer selber erzeugte Thermik einen starken Einfluss auf das **Feuerverhalten**, wie die Geschwindigkeit und Intensität der Feuerlinie, die Feuerverweildauer, Flammenhöhe, sowie der Brandtyp (Bodenfeuer, Lauffeuer, Kronenfeuer) und schlussendlich auch das gesamte räumliche Muster der Feuerausbreitung. Die **Indikatoren für die Schwere eines Brandes** sind der Verbrennungsgrad der Baumvegetation, Abbrennungsgrad der Streu, die Aschefarbe (je weißer desto intensiver das Feuer) und Aschemenge am Boden (Abb. 3A+B).

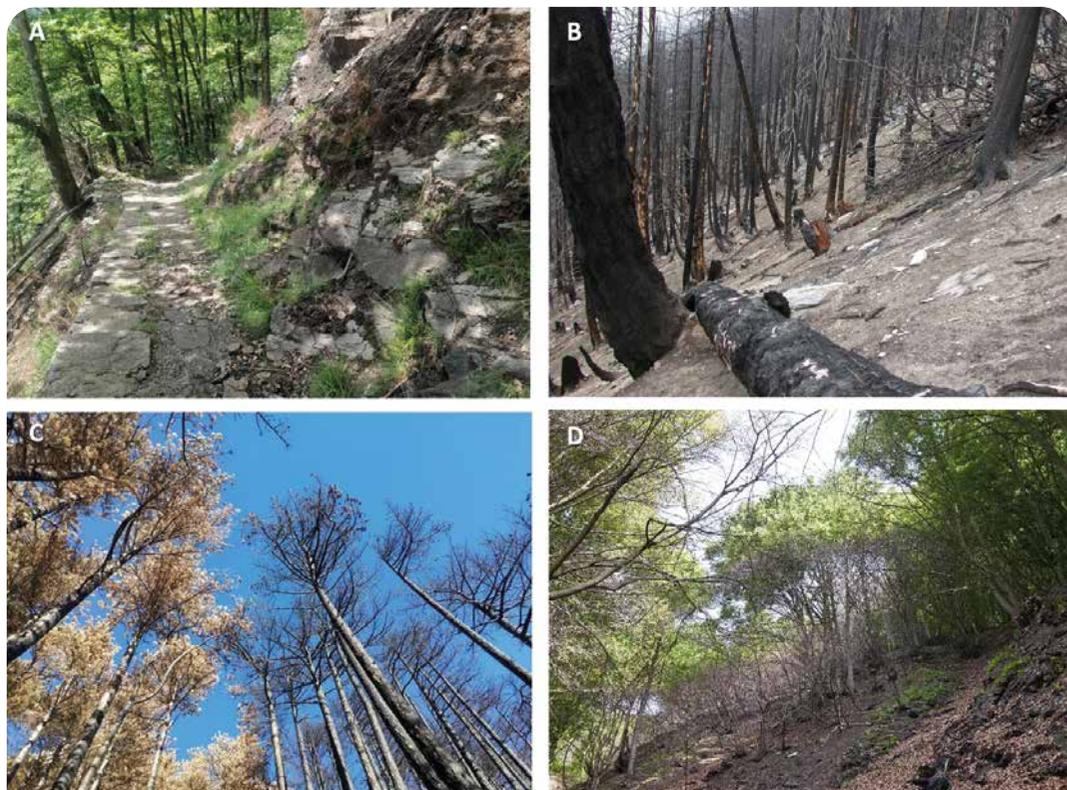


Abbildung 3: Einfluss kleinräumiger topographischer Wechsel auf das Feuerverhalten. (A) unversehrte Krautvegetation im Bereich von Wegen aufgrund des Überspringens der Feuerthermik und -flamme, (B) Große Mengen an weißer Asche bei einem sehr intensiven Feuer, das auch die Baumkronen erfasst hat, (C) im Bereich von Runsen entsteht durch den „Kamineffekt“ ein Kronenfeuer (rechte Bäume) gegenüber thermisch beeinträchtigten Bäumen (linke Bäume), und (D) durch Thermik verursachte Schäden in den unteren Baumkronen (Fotos: A und C von S. Melzner, B von M. Conedera, D von M. Keller).

Figure 3: Influence of small-scale topographic changes on fire behaviour. (A) undamaged herbaceous vegetation in the area of paths due to fire thermal and flame skipping, (B) consistent amount of white ash as a result of a very intense stand-replacing fire, (C) in the area of gullies, the "chimney effect" creates a crown fire (right trees) compared to thermally impaired trees (left trees), and (D) thermal-induced damage in the lower parts of the tree crowns (Photos A and C by S. Melzner, B by M. Conedera, D by M. Keller).

Die **Einwirkung des Feuers auf die Wald- und Bodenvegetation** hängt sehr stark vom Feuer-**typ** und der Feuerintensität ab. **Bodenfeuer** verbrennen das unterirdische Brandgut langsam (schwelende Feuer). Bei **Lauffeuern** erfasst die Feuerfront das Brandgut auf der Bodenoberfläche und Bäume werden nur im unteren Bereich des Stammes (Stammfuß) angebrannt. Je nach Alter oder Entwicklungsstadium und Rindeneigenschaften (z.B. Borkentyp) können die Bäume die

Brandverletzungen überleben. **Kronenfeuer** sind durch große Flammenhöhen gekennzeichnet, die Baumkronen erreichen und/ oder ganze Bäume verbrennen können (Abb. 3B und 3C). Intensive Lauffeuer oder Kronenfeuer entwickeln sich häufig in Hangbereichen mit kleinräumigen topographischen Wechseln in Form von Runsen, wo durch den Kamineffekt rasche Wechsel im Feuerverhalten und in der Ausbreitung der Thermik verursacht werden (Abb. 3C+D). In solchen Fällen

können ganze Baumkronen letale Schäden erfahren, auch wenn die Flammen nur am Stammfuß gewirkt haben (Conedera et al., 2010).

Es gibt zahlreiche Studien, die sich mit den **Auswirkungen von Ascheablagerungen auf Abfluss- und Erosionsprozesse**, und Erosionsraten beschäftigen (z.B. Bodi et al., 2011), die jedoch zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben. Während viele Studien darauf hindeuten, dass Asche die Infiltration vorübergehend verringert, indem sie entweder die Bodenporen verstopft (Marxer et al., 1998) oder eine Oberflächenkruste bildet (Onda et al., 2008), weisen andere Autoren darauf hin, dass Asche und insbesondere die bei

leichten bis mittelschweren Bränden entstandene Schwarzkohle die Infiltration erhöhen könnte, indem sie Niederschläge speichert und den darunter liegenden Boden vor Versiegelung schützt (Wittenberg et al., 2012). Die Ascheschichten können den verbrannten Boden auch vor dem Aufprall von Regentropfen und der damit verbundenen Spritzerosion schützen (Melzner et al., 2019).

Die **Einwirkung von Feuer auf Boden und Gestein** sind im Gelände vorwiegend anhand von Rissen im Boden/Gestein oder anhand der Ausbildung von Exfoliationsklüften erkennbar (Abb. 4).



Abbildung 4: Feuereinwirkung auf die Gesteinsstruktur im alpinen Gelände (Fotos: A von S. Melzner, B von M. Conedera) und sekundärer Steinschlag (Foto C von M. Conedera).

Figure 4: Fire-induced alteration of the rock in alpine mountains (Photos: A by S. Melzner, B by M. Conedera) and secondary rockfall (photo C by M. Conedera).

Durch Temperaturschocks bedingte Rissbildungen treten auf, wenn die thermisch induzierte Spannung so groß ist, dass das Gesteins- oder Bodenmaterial nicht in der Lage ist, sich schnell genug anzupassen, um die erforderliche Verformung aufzunehmen. Infolgedessen kommt es zu einem Oberflächenversagen in Form von Rissen oder Abplatzungen aufgrund der Kompression und der dadurch verursachten Scherspannung. Bei vertikalen Felswänden sind die Feuereinwirkungen weniger stark ausgeprägt (Melzner et al., 2019), da die Verweildauer des Feuers und die Dauer der Erhitzung geringer ist, als im moderat geneigten Gelände. Zudem hat die Feuereinwirkung bei verschiedenen Lithologien unterschiedliche Effekte bzw. beginnt bei unterschiedlichen Temperaturen (Sarro et al., 2021). Diese Ergebnisse beruhen bislang vorwiegend auf Labortests, da es noch keine Projekte im alpinen Hochgebirge gibt, die sich mit der Einwirkung des Feuers während eines Waldbrandes und der langfristigen Beobachtung der geohydrologischen Folgen beschäftigt (Melzner et al., 2019).

Abbildung 5: Regentropfen- und Grabenerosion nach Waldbrand (Photos von M. Conedera).

Figure 5: Post-fire splash and gully erosion (photos by M. Conedera)



Zeitliche Entwicklung des geohydrologischen Gefahrenpotentials nach einem Feuer im Gebirgswald

Im Zuge eines Waldbrandereignisses können aufgrund des **direkten** oder **indirekten** Effekts des Feuers unterschiedliche Typen von geohydrologischen Prozessen (Abb. 1) auftreten.

Während eines Feuers kann durch die **direkte Feuereinwirkung** sogenannter „**primärer**“ **Steinschlag** aus der Felswand oder „**sekundärer**“ **Steinschlags** durch umfallende Bäume aus dem Hangschutt herausgelöst werden (Melzner et al., 2020). Wenn die organische Bedeckung des Hangschutts vollständig verbrannt ist, kann sekundärer Steinschlag auch aus dem freigelegten Hangschutt oder der verbrannten Streu- und Humusschicht generiert werden.

Im Fall des *Waldbrands in Pollegio* (Punkt 1 in Abb. 2) wurden im Jahr 2018 aufgrund einer hohen Steinschlaggefährdung Teile eines Wohngebietes evakuiert. Beim *Großbrand in Mesocco* (GR) (Punkt 5 in Abb. 2) im Jahr 2016 wurde sogar eine Nationalstraße wegen Steinschlaggefahr während des Brandes gesperrt (Krättli 2017). Beim *Waldbrand in Verdasio* (TI) (Punkt 4 in Abb. 2) im Jahr 2022 wurde ein Stein wahrscheinlich durch einen Baumwurf mobilisiert und von einem Kastanienstock oberhalb der Siedlung gestoppt (Abb. 4C).

Indirekt werden **durch einen Waldbrand** nicht nur die disponierenden und auslö-



senden Faktoren der geohydrologischen Gefahren verstärkt, sondern auch die Schutzfunktion des Gebirgswaldes vermindert. Durch ein Feuer entsteht in den betroffenen Wäldern eine **Baumbestandsdynamik** (Abb. 1), die sehr stark von der Intensität des Brandes und von den Baumarten abhängt. Sind die Bäume stark geschädigt oder vollständig verbrannt, kann das im Fall von Schutzwäldern vorübergehend zu einem Schutzdefizit gegenüber potentiellen geohydrologischen Gefahren, vorwiegend Steinschlag, Hangmuren, flachgründigen Rutschungen und Schneelawinen, führen. Das „**kritische Fenster für die Schutzwaldwirkung**“ kann sich je nach Waldtyp und Feuerintensität nach einem Waldbrand auch über mehrere Jahrzehnte erstrecken, besonders wenn alle Bäume des Altbestands gestorben sind und

die Waldverjüngung noch nicht eingetreten oder noch nicht ausgereift ist (Maringer et al. 2020).

Wenn die Bodenvegetation und Bodenstreu vollständig verbrannt ist, können im Falle eines Niederschlagsereignisses die Bodenpartikel durch Regentropfen aufgewirbelt und abtransportiert werden (Regentropfenerosion, Abb. 5A). Wissenschaftliche Studien in den Alpen haben gezeigt, dass Asche im Gegensatz zu den zuvor angesprochenen internationalen Studien vorwiegend einen Versiegelungseffekt bewirkt, der die Infiltration verringert sowie den Oberflächenabfluss beschleunigt und erhöht (Marxer et al. 1998; Conedera et al. 2003). Bei Starkniederschlägen kommt es dann sogar zu **Hochwasser** und **Rutschungen**, die das Material für **Murgänge** bereitstellen können.

Abbildung 6: Geohydrologisches Gefahrenpotential während und nach einem Waldbrand. Im Falle des totalen Ausfalls eines Waldbestandes (A) können sich noch Jahre nach dem Waldbrandereignis flachgründige Rutschungen (B) und Murgänge (C) ausbilden (Photo A von M. Conedera; B und C von A. Brigger).

Figure 6: Geohydrological hazard potential during and after a wildfire. In the case of total loss of a forest stand (A), shallow landslides (B) and debris flows (C) can still form years after the forest fire event (photo A by M. Conedera; B and C by A. Brigger).



In **den ersten Monaten** nach einem Feuer sind somit die Gebiete besonders anfällig nicht nur gegenüber **Regentropfenerosion**, sondern auch gegenüber Oberflächenabfluss und linienförmiger **Rillen- und Grabenerosion** (Abb. 5B und Punkt 5 in Abb. 2). Beim Waldbrand in Ronco s/Ascona (TI) (Punkt 2 in Abb. 2) im März 1997 wurde im darauffolgenden August in dem vom Waldbrand betroffenen Einzugsgebiet durch ein 10-jähriges Niederschlagsereignis ein 200-jähriges Hochwasser- und Murgang-Ereignis verursacht (Conedera et al. 2003), welches eine Murablagerung von 3500 m³ im Dorf zur Folge hatte.

Im Fall eines Kronenfeuers und dem tota-

len Ausfall des Waldbestandes auf steilen Hängen (Abb. 6A) können **auch Jahre nach einem Brand flachgründige Rutschungen** entstehen (Abb. 6B). Dies war beispielsweise der Fall beim Waldbrand in Visp im Jahr 2011 (Gerold, 2019), bei dem sich im Jahr 2018 im vom Waldbrand betroffenen Gebiet ein Murgang ausbilden konnte (Abb. 6C und Punkt 3 in Abb. 2).

Management des post Waldbrand Risikos

Ein wichtiger Bestandteil in dem Katastrophenmanagement in Waldbrandgebieten in gebirgigen Regionen bilden die **waldbaulichen und techni-**



Abbildung 7: Management des post Waldbrand Risikos. Sofortmaßnahmen im Bereich des Katastrophengebiets Verdasio. (A) Steinschlagschutz, (B) Erosionsschutz, (C) Schutz vor Hangmuren/Wasser, und (D) Warnschilder (Photos von S. Melzner).

Figure 7: Management of the post wildfire risk. Urgent measures in the Verdasio wildfire disaster area. (A) Rockfall protection, (B) Erosion protection, (C) Flood/mudflow protection, and (D) warning signs (photos by S. Melzner).

schon Sofortmaßnahmen (Abb. 7), um die Gefahr und das Risiko durch geohydrologische Prozesse nach einem Waldbrand zu minimieren; beispielsweise (i) die Implementierung provisorischer technischer Schutzmaßnahmen gegen Oberflächenwasserabfluss, Erosion und Steinschlag (z.B. Steinschlagnetze, Auslegen von Naturfasermatten; Abb. 7A-C), (ii) Entfernung potentiell künftiger Gefahrenquellen wie abgestorbene Bäume und Blöcke, (iii) die Fixierung von Blöcken am Hang/Felswand, und (iv) das Aussäen schnell wachsender Pflanzenarten.

Eine weitere wichtige Sofortmaßnahme ist die Information der Bevölkerung über potentiell bestehende und künftige, geohydrologische Gefahren mittels Warnschildern (Abb. 7D), Aushängen oder Informationsveranstaltungen in der Gemeinde.

Einhergehend ist die Planung **mittelfristiger Schutzmaßnahmen** für die Verkürzung des kritischen Fensters der Schutzwaldwirkung und den Schutz der Siedlungen und Infrastrukturen. Geologische Detailgutachten und forstwirtschaftliche Erhebungen bilden eine wichtige Grundlage, um ein permanentes waldbauliches und technisches Schutzkonzept zu planen.

Ausblick

Entscheidend für die Beurteilung der Folgen von Waldbränden ist nicht das einzelne Feuerereignis allein, sondern auch die vorangehende Feuergeschichte, also das Feuerregime eines Gebietes. Waldbrandmanagementaktivitäten sollten die systematische Dokumentation geohydrologischer Prozesse vor, während und nach einem Waldbrandereignis berücksichtigen und in die nationale Waldbranddatenbanken integrieren. Trotz logistischer Schwierigkeiten in dem stark exponierten Relief in Gebirgswäldern besteht ein prak-

tischer Bedarf, die durch Waldbrände verursachte Veränderung der Fels- und Bodenoberfläche zu verstehen, um die Vorhersage potenzieller geohydrologischer Prozesse nach Waldbränden und die damit verbundenen Gefahren und Risiken vorhersagen zu können. Die Analyse der langfristigen Auswirkungen von Feuer und anderer klimatischer Extreme auf zukünftige Steinschlag-, Rutschungs- und Murgangdispositionen sind wichtige Forschungsthemen für die Zukunft.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Dipl. Geogr. Sandra Melzner
GEOCHANGE Consulting e.U.
Ingenieurbüro für Technische
Geologie und Naturgefahren
Hernalser Gürtel 47/19, 1170 Wien, Österreich
Eppensteinerstraße 4, Top 4, 9020 Klagenfurt,
Österreich
www.geochange-consulting.com
office@geochange-consulting.com

DI Marco Conedera
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL
Campus di Ricerca
a Ramél 18
6593 Cadenazzo, Schweiz
https://www.wsl.ch
marco.conedera@wsl.ch

DI Boris Pezzatti
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL
Campus di Ricerca
a Ramél 18
6593 Cadenazzo, Schweiz
https://www.wsl.ch
boris.pezzatti@wsl.ch

Literatur/References:

- ASCOLI, D., BÖTTICHER, F., CARREGA, P., CONEDERA, M., COTERCHIO, A., DUCHE, Y., FIORUCCI, P., GHIRINGHELLI, A., GOTTERO, F., JEREB, L., KOLSEK, M., KOSICEK, J. P., LAHAYE, S., MAIER, H., MAYER, C., MAYR, S., MÜLLER, M. M., PEZZATTI, B., PIRONE, S., RIZZOLO, R., RYSER, D., SAUTTER, M., SCHUNK, C., VACCCHIANO, G., VACIK, H., VALESE, E., VILÁ-VILARDELL, L., ZIMMERMANN, L. (2020). Forest Fires in the Alps: State of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management: White Paper for policy makers; In: Müller, M.M., Vacik, H., Vilá-Vilardell, L. (Eds.), EUSALP Action Group 8, Climate- ADAPT, Dec 21 2021.
- BODI, M.B., MATAIX-SOLERA, J., DOERR, S.H., CERDÀ, A. (2011). The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma* 160: 599-607. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.11.009>.
- CONEDERA, M., PETER, L., MARXER, P., FORSTER, FELIX, RICKENMANN, D., RE, L. (2003). Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: a case study of the Riale Buffaga, Ticino, Switzerland. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(2): 117-129. <https://doi.org/10.1002/esp.425>
- CONEDERA, M., LUCINI, L., VALESE, E., ASCOLI, D., GB PEZZATTI, G.B., (2010). Fire resistance and vegetative recruitment ability of different deciduous trees species after low-to moderate-intensity surface fires in southern Switzerland. In D. X. Viegas (Ed.), VI international conference on Forest Fire Research (14 pp.). ADAUCEIF University of Coimbra.
- CONEDERA, M. UND PEZZATTI, B. (2019). Waldbrände in der Schweiz. Eine Gefahr nicht nur für den Wald. Bevölkerungsschutz: Zeitschrift für Risikoanalyse und Prävention, Planung und Ausbildung, Führung und Einsatz, 12(34): 17-19.
- GEHRING, E., CONEDERA, M., MARINGER, J., GIADROSSICH, F., GUASTINI, E. UND SCHWARZ, M. (2019). Shallow landslide disposition in burnt European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests. *Scientific Reports*, 9(1), 8638 (11 pp.). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45073-7>
- GEROLD, P. (2019). Waldbrandmanagement im Kanton Wallis und Lehren aus dem Brand von Visp im Jahr 2011. In: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, Heft 5/2019.
- KRÄTTLI, S. (2017). Ich hörte meine Familie schreien: der Wald brennt. *BündnerWald* 70, 2: 10-16.
- 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. *European Journal of Forest Research*, 135(4), 657-673. <https://doi.org/10.1007/s10342-016-0962-y>
- MARINGER, J., ASCOLI, D., GEHRING, E., WOHLGEMUTH, T., SCHWARZ, M., & CONEDERA, M. (2020). Feuerökologie montaner Buchenwälder. Waldleistungen und waldbauliche Massnahmen nach Waldbrand. Merkblatt für die Praxis: Vol. 65. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt WSL.
- MARXER, P., CONEDERA, M., & SCHAUB, D. (1998). Postfire runoff and soil erosion in the sweet chestnut belt of southern Switzerland. In L. Trabaud (Ed.), *Fire Management and Landscape Ecology* (pp. 51-62). International Association of Wildland Fire.
- MELZNER, S., ROSSI, M., GUZZETTI, F. (2020). Impact of mapping strategies on frequency-size distributions. *Journal of Engineering Geology* 272.
- MELZNER, S. SHTOBER-ZISU, N., KATZ, O., WITTENBERG, L. (2019). Brief communication: Post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19: 2879-2885, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2879-2019>.
- MORIS, J. V., CONEDERA, M., NISI, L., & PEZZATTI, G. B. (2020). Blitzschlagbrände und Sommerrockenheit: Gibt es einen Zusammenhang? *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 171(5): 281-287. <https://doi.org/10.3188/szf.2020.0281>
- ONDA, Y., DIETRICH, W.E., BOOKER, F. (2008). Evolution of overland flow after a severe forest fire, Point Reyes, California. *Catena* 72, 13-20. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.02.003>, 2008.
- PEZZATTI, G. B., DE ANGELIS, A., & CONEDERA, M. (2016). Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. 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*. Haupt 223-245.
- PEZZATTI, G. B., BERTOGLIATI, M., GACHE, S., REINHARD, M., & CONEDERA, M. (2019). Swissfire: technisch modernisiert und dank Archivrecherchen inhaltlich erweitert. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 170(5): 234-241. <https://doi.org/10.3188/szf.2019.0234>.
- PROVIDOLI I., ELSENBEER H., CONEDERA M., (2002). Post-fire management and splash erosion in a chestnut coppice in southern Switzerland. *Forest Ecology and Management*, 162, 219-229. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00517-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00517-5).
- REGIONE PIEMONTE (2018). Piano straordinario di interventi di ripristino del territorio percorso dagli incendi boschivi dell'autunno 2017.
- SARRO, R., PEREZ-REY, I., TOMAS, R., ALEJANDRO, L.R., HERNANDEZ-GUTIERREZ, L.E., MATEOS, R.M. (2021). Effects of Wildfires on Rockfall Occurrence: A Review through Actual Cases in Spain. *Appl. Sci.* 2021, 11,2545.
- SASS O. (Hrsg.), (2019). Waldbrände in den Nordtiroler Kalkalpen. *Innsbrucker Geographische Studien* Bd. 41.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (2022). Spreading like Wildfire – The Rising Threat of Extraordinary Landscape Fires. A UNEP Rapid Response Assessment. Nairobi.
- WITTENBERG, L. (2012). Post-Fire Soil Ecology: Properties and Erosion Dynamics. *Isr. J. Ecol. Evol.* 58, 151-164. <https://doi.org/10.15660/IJEE.58.2-3.151>.

Gmunden . Saalfelden . Oberalm . Kitzbühel



Ingenieurkonsultanten . Geologie und Hydrogeologie
Geotechnik und Bauingenieurwesen . Naturgefahren und Umwelt



Ingenieurbüro Illmer Daniel GmbH

Technisches Büro für Wildbach- und Lawinenschutz
Entwurf- und Einreichplanung-Ausschreibungs- und Ausführungsplanung-Bauaufsicht

Industriegelände Zone B 27 · A-6166 Fulpmes
Tel./Fax: +43 (0)5225 62148 · Mobil: +43 (0)6648831 7711
E-Mail: office@ib-illmer.at
Web: www.ib-illmer.at

CATHERINE BERGER, MAIKE SCHNEIDER, SANDRO RITLER,
MARKUS ZIMMERMANN, EVA GERTSCH-GAUTSCHI, ADRIAN SCHERTENLEIB

Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen – Erfahrungen und Empfehlungen aus der Schweiz

Dealing with ageing protection systems in mountain torrents – experiences and recommendations from Switzerland

Zusammenfassung:

In Schweizer Wildbächen wurden seit Mitte des 19. Jahrhunderts unzählige Schutzbauten erstellt. Mit der Zeit wurden die Schutzsysteme modifiziert und die Ansprüche der Gesellschaft haben sich gewandelt. Veränderungen in den Einzugsgebieten fanden statt und werden sich u.a. aufgrund des Klimawandels weiter akzentuieren. Wegen der Alterung der Bauten und den veränderten Rahmenbedingungen stellt sich die Frage, wie ein künftiges Schutzsystem die gestellten Anforderungen optimal erfüllen kann: Soll das bisherige Schutzsystem in seiner Funktion erhalten, angepasst oder vollständig neu konzipiert werden? Im Auftrag des Schweizerischen Bundesamts für Umwelt BAFU wurde ein Ansatz für die Lösungsfindung beim Umgang mit alternden Schutzsystemen entwickelt. Erfahrungen aus zehn Schweizer Wildbächen veranschaulichen das Vorgehen und zeigen den Umgang in der Praxis.

Abstract:

Since the middle of the 19th century countless protection structures have been built in Swiss torrents. Over time, the protection systems have been modified and the demands of society have changed. Changes in catchment areas have been occurring and will be accentuated in the future, i.e., due to climate change. As the protection structures are subjected to ageing and the framework conditions change, the question arises if a future protection system can optimally fulfil the set requirements: Should the functionality of the existing protection system be maintained, adapted, or replaced? An approach to finding solutions on how to deal with ageing protection system has been developed on behalf of the Swiss Federal Office of the Environment (FOEN). Experiences from ten Swiss torrents are used to illustrate the procedure and handling in practice.

Stichwörter:

Wildbach, alternde Schutzsysteme, Hochwasserschutz, Lebenszyklus, Systems Engineering

Keywords:

Torrent, ageing protection systems, flood protection, life cycle, systems engineering

Alternde Schutzsysteme – wie weiter?

Die Hochwasserinfrastruktur in den Schweizer Gewässern hat gemäß verschiedenen Abschätzungen des Schweizerischen Bundesamts für Umwelt BAFU einen Wiederbeschaffungswert im Bereich von 35 bis 40 Mrd. CHF. Ein großer Teil dieser Schutzinfrastruktur befindet sich in Wildbächen in Form von Tausenden von Schutzbauten unterschiedlichen Alters und Zustands. Viele der seit Mitte des 19. Jahrhunderts errichteten Schutzsysteme haben trotz Schutzbautenmanagement und Unterhalt das Lebensende erreicht. Über die Jahre wurden die Schutzsysteme modifiziert, z. B. durch Ergänzungen, Anpassungen oder Auflassen von Maßnahmen. Die Einzugsgebiete der Wildbäche haben sich z. B. durch Nutzungsänderungen,

Ereignisse oder den Klimawandel verändert. Schutzansprüche, wirtschaftliche, ökologische und landschaftliche Anforderungen sowie das Verständnis für den Umgang mit Naturgefahren und die technischen Möglichkeiten haben sich ebenfalls gewandelt. In Anbetracht dieser Veränderungen und auch in Bezug auf den Klimawandel müssen neue Anforderungen erfüllt werden und eine Überprüfung der Schutzsysteme ist unumgänglich, bevor größere Investitionen getätigt werden. Es stellen sich die Fragen, ob das bestehende, über die Zeit gewachsene Schutzsystem angesichts der vielfältigen bereits stattgefundenen, sowie der zu erwarteten Änderungen noch zeitgemäß ist, sowie ob und wie die Bauten in die Zukunft überführt werden sollen (Abbildung 1).



Abbildung 1: Wildbachsperrn an der Gürbe (Kt. Bern) um 1900 (links, C. Bähler aus Salvisberg 2017) und im Jahr 2021 (rechts, Ingenieurbüro Speerli GmbH)

Figure 1: Torrent check dams at the Gürbe torrent around 1900 (left, C. Bähler from Salvisberg 2017) and in 2021 (right, Ingenieurbüro Speerli GmbH)

Lebenszyklen von Schutzsystemen

Jedes Schutzsystem durchläuft einen Lebenszyklus, der bei der Identifizierung des Schutzbedarfs beginnt und über die Konzeption, Planung, Realisierung und den Betrieb bis zum Überprüfen des Schutzsystems an seinem Lebensende reicht (Lebenszyklusmodell des Systems Engineering für Schutzsysteme (SE) nach PLANALP 2014, Abbildung 2). Der Lebenszyklus läuft wiederholt ab. Die Frage nach dem Umgang mit dem alternden, bisherigen Schutzsystem stellt sich am Ende des Lebenszyklus (Phase 7SE) und ist auf Konzeptstufe beantwortet, sobald das künftige Schutzsystem definiert ist (Phase 2SE; dunkel hervorgeho-

bene Phasen 7SE-2SE in Abbildung 2). «Alternd» bezieht sich in diesem Kontext weniger auf das absolute Alter als vielmehr auf die Tatsache, dass ein bestehendes Schutzsystem den aktuellen Ansprüchen nicht mehr gerecht wird, z.B. ausgehend von veränderten Bedingungen aufgrund des Klimawandels. Ziel ist es, den neuen Lebenszyklus mit einem nachhaltigen, zweckmäßigen und zukunftsgerichteten Schutzsystem zu beginnen, das die gestellten Anforderungen optimal erfüllt. Dabei sind zeitliche Entwicklungen zu berücksichtigen, vielfältige Themen anzusprechen und zahlreiche betroffene Personen einzubeziehen – eine große Herausforderung.

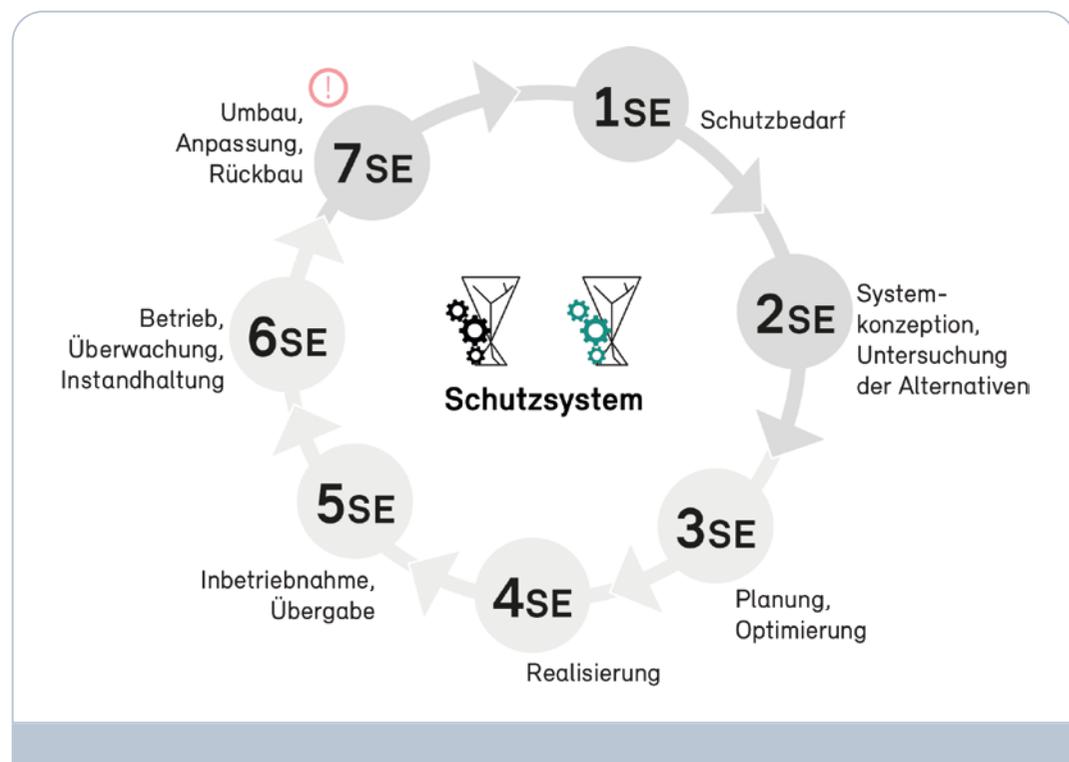


Abbildung 2: Lebenszyklusmodell des Systems Engineering für Schutzsysteme (SE) in sieben Phasen 1SE-7SE (nach PLANALP 2014). Das Ausrufezeichen steht für den Zeitpunkt des Überprüfens eines Schutzsystems am Ende des Lebenszyklus.

Figure 2: Systems engineering life cycle model for protection systems (SE) in seven phases 1SE-7SE (cf. PLANALP 2014). The exclamation mark represents the time of reviewing a protection system at the end of its life cycle.

Unterstützung bei der Lösungsfindung

Zur Unterstützung beim Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen hat das BAFU eine Publikation erarbeiten lassen. Im Rahmen der Publikation wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- Teilen bisheriger Erfahrungen beim Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen für ein breites Publikum von Fachleuten auf allen Ebenen (Gemeinden, Kantone, Bund, Privatwirtschaft).
- Inspiration zur ganzheitlichen Systembetrachtung bei der Überprüfung von Schutzsystemen und zum bewussten Nachdenken über Systemerhalt, Systemanpassungen oder Systemwechsel bei den baulichen Maßnahmen anlässlich des Variantenstudiums.
- Bereitstellen eines strukturierten und nachvollziehbaren Vorgehens für die Überprüfung von Schutzsystemen in Wildbächen.

Mit dem Aufzeigen von generellen Überlegungen auf Stufe eines Konzeptstudiums liegt der Fokus auf dem gesamten Schutzsystem und weniger auf

den einzelnen Bauwerken. Um einen geeigneten Umgang mit dem bisherigen Schutzsystem zu finden, werden die Systeme in ihrer Gesamtheit (Einzugsgebiet bis zur Mündung der Wildbäche in den Vorfluter und unter Berücksichtigung von Wechselwirkungen, bedingt durch gesellschaftliche Aspekte) und über die Zeit betrachtet (Abbildung 3). So wird der zurückliegende Lebenszyklus untersucht (Vergangenheit – Gegenwart) und der aktuelle Zustand erfasst (Gegenwart = Zeitpunkt des Überprüfens). Der Blick auf den neu anstehenden Lebenszyklus unterstützt die Erarbeitung eines zweckmäßigen und zukunftsgerichteten neuen Schutzsystems (Gegenwart – Zukunft).

Vier Abklärungsschritte unterstützten Fachpersonen beim Übergang von einem Lebenszyklus in den nächsten, vom bisherigen Schutzsystem bis zur Konzeption des künftigen Schutzsystems:

- **Abklärungsschritt 1:** Kenntnis der einstigen, aktuellen und künftigen Rahmenbedingungen aus Naturraum (physische Gegebenheiten, z.B. Klima und Topographie) und Kulturraum (Nutzung und Inwertsetzung des Naturraums durch den Menschen, z.B. Infrastruktur und Gesetze).

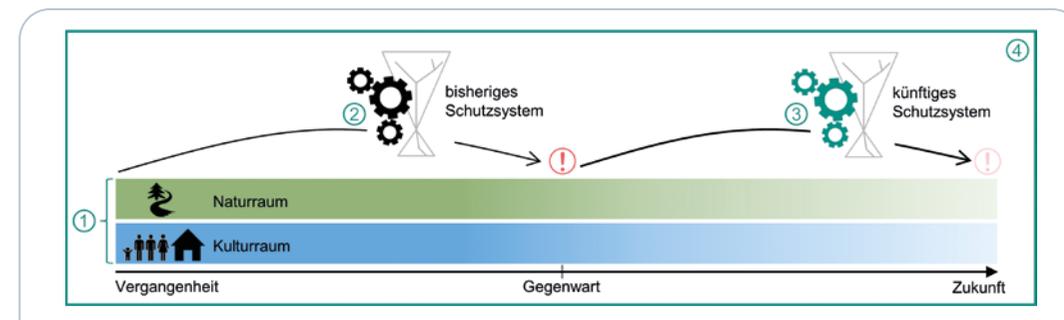


Abbildung 3: Vier Abklärungsschritte strukturieren den Umgang mit alternden Schutzsystemen. Die verblassende Farbe symbolisiert die zunehmende Prognoseunsicherheit für die Zukunft. Das Ausrufezeichen steht für den Zeitpunkt des Überprüfens eines Schutzsystems.

Figure 3: Four clarification steps structure the procedure when dealing with ageing protection systems. The fading colour symbolizes the increasing uncertainty in future forecasts. The exclamation mark represents the time of reviewing a protection system.

- **Abklärungsschritt 2:** Verständnis für das bisherige Schutzsystem inklusive Auslösung seines Überprüfens.
- **Abklärungsschritt 3:** Erarbeitung eines Schutzkonzepts für ein zweckmäßiges und nachhaltiges künftiges Schutzsystem.
- **Abklärungsschritt 4:** Berücksichtigung von übergreifenden Aspekten wie dem allgemeinen Umgang mit Naturgefahren, den sich wandelnden Ansprüchen an ein Schutzsystem oder die Kommunikation mit den Beteiligten.

Abklärungsschritte

Die vier Abklärungsschritte führen strukturiert durch den ergebnisoffenen Planungs- und Entscheidungsprozess, wie das bisherige Schutzsystem in die Zukunft überführt werden soll

(Tabelle 1). Es werden die relevanten Themen angesprochen und es wird dazu inspiriert, über eine mögliche Veränderung oder Anpassung bestehender Schutzsysteme nachzudenken. Auf diese Weise kann auch der Klimawandel frühzeitig miteinbezogen werden, sodass ein Schutzsystem künftigen Herausforderungen optimal begegnen kann.

In Bezug auf die Funktionstypen der baulichen Maßnahmen wird unterschieden zwischen einem Systemerhalt, einer Systemanpassung und einem Systemwechsel. Dabei sind die Übergänge fließend und die Abgrenzung ist nicht an einzelnen Bauten erkennbar, sondern erst über das gesamte Schutzsystem verständlich. Im Sinne des integralen Risikomanagements soll das künftige Schutzsystem aus einer optimalen Kombination aus raumplanerischen, baulichen, organisatorischen und ingenieurbioologischen Maßnahmen bestehen (Abbildung 4).

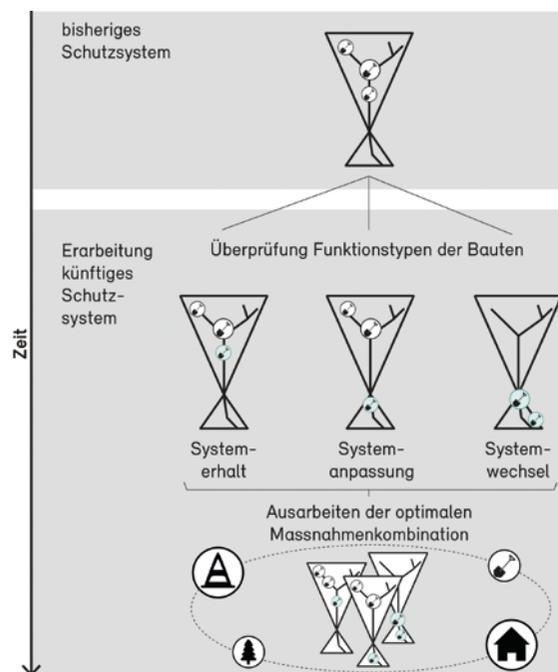


Abbildung 4:
Variantenstudium auf
Konzeptstufe. Das bisherige
Schutzsystem wird überprüft
und durch eine optimale
Maßnahmenkombination
ein künftiges Schutzsystem
ausgearbeitet.

Figure 4:
Investigation of variants
at the conceptual level.
The existing protection
system is reviewed and a
future protection system
is elaborated considering
an optimal combination of
protection measures.

Konzept	Schritt	Thema	Zentrale Fragen (Auswahl)
	①	Rahmenbedingungen	
	1.1	Entwicklung des Naturraums	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Voraussetzungen und Bedürfnisse bestehen im Natur- und Kulturraum zum aktuellen Zeitpunkt des Überprüfens?
	1.2	Entwicklung des Kulturraums	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Veränderung im Natur- und Kulturraum haben seit der Errichtung des Schutzsystems bis zum Zeitpunkt des Überprüfens stattgefunden? • Was sind mögliche Szenarien für die künftige Entwicklung im Natur- und Kulturraum?
	②	Verständnis für das bisherige Schutzsystem	
	2.1	Kenntnis und Verständnis bisheriger Maßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Was war das ursprüngliche Schutzkonzept und welche Schutzziele wurden angestrebt? • Wie hat sich das bisherige Schutzsystem seit seiner Errichtung bis zum Zeitpunkt des Überprüfens entwickelt und bewährt? • Welche Schutzmaßnahmen bestehen in welchem Zustand, mit welcher Funktion, Zuverlässigkeit und Wirkung, mit welchem Nutzen und mit welcher emotionalen Bedeutung für wen?
	2.2	Beurteilung der Zweckmäßigkeit	<ul style="list-style-type: none"> • Erfüllt das bestehende Schutzsystem die aktuellen Ansprüche?
	2.3	Auslösung des Überprüfens	<ul style="list-style-type: none"> • Was hat ein Überprüfen ausgelöst?
	③	Verständnis für das künftige Schutzsystem	
	3.1	Zielformulierung und Zielvergleich	<ul style="list-style-type: none"> • Was sind die Ansprüche an das künftige Schutzsystem? • Worin unterscheiden sich die künftigen Ansprüche und das bestehende System?
	3.2	Variantenstudium und Variantenentscheid	<ul style="list-style-type: none"> • Ist ein Systemerhalt, eine Systemanpassung oder ein Systemwechsel möglich und sinnvoll? • Welche Varianten sind denkbar, sollen weiterverfolgt und optimiert werden?
	3.3	Überführung des bisherigen Schutzsystems in ein zweckmäßiges künftiges Schutzsystem	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Variante ist im Hinblick auf ihren gesamten Lebenszyklus zu bevorzugen? • Was sind mögliche Hürden auf dem Weg vom bisherigen zum künftigen Schutzsystem und wie können sie gemeistert werden? • Wie kann das Erhaltungsmanagement langfristig sichergestellt werden? • Was sind die weiteren Planungsschritte?
	④	Übergreifende Aspekte	
4.1	Projektgrundlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Welche Entscheidungsgrundlagen werden benötigt? 	
4.2	Kommunikation	<ul style="list-style-type: none"> • Wie können Vertrauen und Akzeptanz geschaffen werden? 	
4.3	Umgang mit Naturgefahren	<ul style="list-style-type: none"> • Wie wird der integrale und nachhaltige Umgang mit Naturgefahren gewährleistet? 	

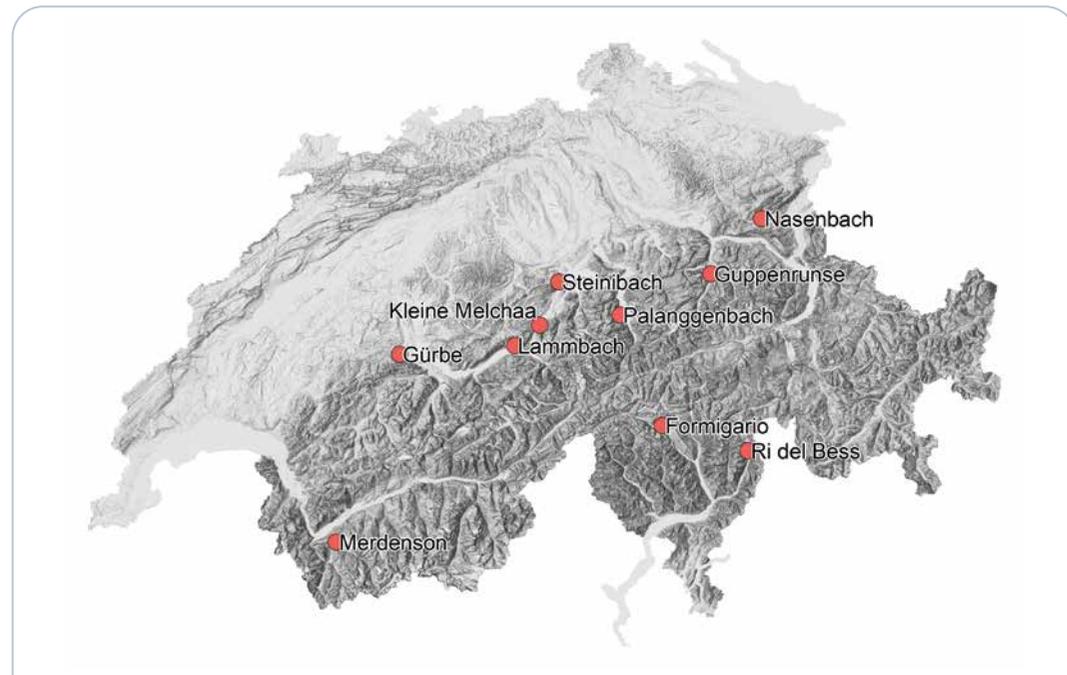
Tabelle 1: Struktur zur Analyse eines Schutzsystems: Konzept, Abklärungsschritt, Thema und zentrale Fragen

Table 1: Structure for the analysis of a protection system: concept, clarification step, topic and main questions

Erfahrungen und Empfehlungen

Zur Entwicklung des Konzepts zur Überprüfung von Schutzsystemen wurden zehn Wildbach-Fallbeispiele aus dem Schweizer Alpen- und Vor-

alpenraum (Abbildung 5) analysiert. Bei diesen Wildbächen fand eine bewusste Überprüfung des alternden Schutzsystems statt.



Wildbach	Kanton (Gemeinde)	Wildbach	Kanton (Gemeinde)
Formigario	Tessin (Faido)	Merdenson	Wallis (Val de Bagnes)
Guppenrunse	Glarus (Glarus Süd)	Nasenbach	St. Gallen (Wildhaus – Alt St. Johann)
Gürbe	Bern (viele Gemeinden vom Gantrischgebiet bis Wattenwil)	Palanggenbach	Uri (Seedorf, Attinghausen)
Kleine Melchaa	Obwalden (Giswil, Sachseln)	Ri del Bess	Graubünden (Mesocco)
Lammbach	Bern (Brienz, Hofstetten, Schwanden)	Steinibach b. Hergiswil	Nidwalden (Hergiswil)

Abbildung 5: Fallbeispiele für den Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen aus dem Schweizer Alpen- und Voralpenraum. Bei jedem Beispiel wurde eine individuelle Lösung gefunden. (Datengrundlage © swisstopo)

Figure 5: Case studies for dealing with ageing protection systems in torrents from the Swiss Alpine and Pre-Alpine regions. For each torrent an individual solution was found. (data © swisstopo)



Abbildung 6: Schutzbauten in verschiedenen Wildbächen. Links: kombinierte Stein-Holzschwells im Nasenbach (Flussbau AG SAH 2013), Mitte: Sperre im Val de Gervan, Ri del Bess (AFRY Svizzera SA 2020), rechts: Sperre im Einzugsgebiet des Lammbachs (Mätzener & Wyss et al. 2018).

Figure 6: Protection structures in different torrents. Left: combined stone-wood swells in the Nasenbach torrent (Flussbau AG SAH 2013), centre: check dam in the Ri del Bess torrent (AFRY Svizzera SA 2020), right: check dam in the Lammbach torrent (Mätzener & Wyss et al. 2018).

Einzugsgebiet, Naturgefahrenprozess, Auswirkungen des Klimawandels, Größe, Zustand und Wirkung von Schutzbauten sowie die Antwort auf die Frage nach einem geeigneten Umgang mit dem alternden Schutzsystem waren in jedem Fall spezifisch (Abbildung 6). Die Struktur der Lösungsfindung und die grundsätzlich anzustellenden Überlegungen blieben jedoch die gleichen und die gemachten Erfahrungen trugen maßgeblich dazu bei, das Vorgehen gemäß der vier Abklärungsschritte in Abbildung 3 und Tabelle 1 zu entwickeln. Die Fallbeispiele lieferten somit wichtige Erkenntnisse und ermöglichten das Ableiten von Empfehlungen für die Umsetzung der Abklärungsschritte in der Praxis. Die Theorie wird im Folgenden durch ausgewählte Erfahrungen aus den Beispielen illustriert.

Rahmenbedingungen kennen (Abklärungsschritt 1)

Im Naturraum sowie im Kulturraum bestehen Voraussetzungen und Bedürfnisse, die sich mit der Zeit z.B. im Zusammenhang mit dem Klimawandel verändern. Die Rahmenbedingungen

beeinflussen die Schutzsysteme physisch und im Hinblick darauf, wie sie verstanden und bewertet werden.

Ausgewählte Erfahrungen:

Entwicklungen im Naturraum beeinflussen die Gefahrenprozesse und die Beanspruchung der Schutzsysteme. Eine deutliche Waldzunahme kann Einzugsgebiete stabilisieren und den Geschiebeeintrag verringern (Abbildung 7). Andererseits kann der Geschiebeeintrag zunehmen, wenn z.B. Gletscher schmelzen oder Rutschungen aktiviert werden.

Rahmenbedingungen sowohl aus dem Naturraum (z. B. Topographie, Nebenbäche) als auch aus dem Kulturraum (z. B. Schadenpotenzial wie Siedlungsgebiet, Infrastrukturanlagen oder gesetzliche Vorgaben) können vorhandene Platzverhältnisse und somit das Variantenstudium für den Umgang mit bestehenden Schutzsystemen einschränken.



Abbildung 7: Waldbedeckung im Einzugsgebiet des Lammbachs. Links: Stand 1927 (© swisstopo); Rechts: Stand 1995 (Documenta Natura, Huber/Kobi)

Figure 7: Forest cover in the Lammbach catchment area. Left: date 1927 (© swisstopo); right: date 1995 (Documenta Natura, Huber/Kobi)

Naturgefahrenereignisse mit oder ohne Schadensfolgen können bewirken, dass

- Fragen in Bezug auf die Ausgangslage geklärt werden.
- die Ausgangslage und damit ein bestehendes Schutzsystem von Grund auf neu beurteilt werden.
- das Bewusstsein über eine Gefahr gefördert und die Bevölkerung sensibilisiert wird.
- sich die Sichtweise und Wahrnehmung von Risiken und Risikoreduktion verändern.
- das Infragestellen eines bestehenden Schutzsystems überhaupt möglich wird.
- die Notwendigkeit für einen Systemwechsel vor Augen geführt wird.
- die Akzeptanz von Maßnahmen vergrößert wird.
- Entscheidungsprozesse zur Verbesserung beschleunigt werden.
- Maßnahmen überstürzt in Angriff genommen werden. Eine vorgängig ausgearbei-

tete Strategie für den Umgang mit dem bestehenden Schutzsystem hilft, dass unter Zeit- und Handlungsdruck keine wenig reflektierten Sofortmaßnahmen ergriffen werden.

- Gremien für die Ereignisbewältigung gegründet sowie Kommunikationswege und administrative Abläufe geschaffen werden, die auch für Hochwasserschutzprojekte genutzt werden können.

Geschichte nachzeichnen und dadurch die Gegenwart verstehen (Abklärungsschritt 2)

Aus dem umfassenden Blick in die Vergangenheit ergibt sich ein Verständnis für das bestehende Schutzsystem.

Ausgewählte Erfahrungen:

Schutzsysteme sind in den meisten Fällen nicht Resultat einer einmaligen Planung, sondern sie sind über die Zeit gewachsen. Ergänzungen oder Anpassungen erfolgten meist als

Reaktion auf Ereignisse oder aufgrund von Veränderungen im Kultur- oder Naturraum. Das Aufzeigen von Entstehung und Entwicklung des bisherigen Schutzsystems trägt zum Verständnis des Bestehenden bei und dient der Argumentation beim Umgang mit alternden Schutzsystemen. Zustand, Unterhalt und die getätigten sowie die geplanten Investitionen in ein Schutzsystem geben Hinweise auf das Risikobewusstsein und/oder die Verbundenheit der Bevölkerung zu einem Schutzsystem. Gut unterhaltene sowie intakte Bauwerke haben oft auch emotional eine große Bedeutung und werden selten infrage gestellt. Der aktuelle Nutzen bestehender Bauten und Maßnahmen stimmt jedoch nicht zwingend mit deren Wirksamkeit überein. Auch bei gut unterhaltenen, intakten und wirksamen Bauwerken kann der Nutzen in Bezug auf das Schutzkonzept beschränkt und ein Auflösen oder ein Rückbau sinnvoll sein. Neben Schäden an Bauwerken können wirtschaftliche Überlegungen, ökologische Anforderungen oder gesetzliche Vorgaben die Zweckmäßigkeit eines bestehenden Schutzsystems herabsetzen. Maßnahmen sind umso leichter umzusetzen, wenn Handlungsbedarf nicht nur vorhanden, sondern auch anerkannt wird. Durch Aufzeigen der Geschichte kann der Handlungsbedarf veranschaulicht werden.

Zukunft planen (Abklärungsschritt 3)

Die Konzeption eines durch alle Beteiligten getragenen, zweckmäßigen künftigen Schutzsystem kann nur unter Berücksichtigung der Rahmenbedingungen (Abklärungsschritt 1) und Verständnis für das bisherige Schutzsystem (Abklärungsschritt 2) erfolgen. Für jedes alternde Schutzsystem wird geprüft, ob in Bezug auf die baulichen Maßnahmen ein Erhalt, eine Anpassung oder ein Wechsel

des bisherigen Systems zweckmäßig ist und welche Maßnahmenkombination das Schutzsystem optimiert (Abbildung 4).

Alle Möglichkeiten sollen ergebnisoffen geprüft und bereits bei der Konzeption des gesamten anstehenden Lebenszyklus des Schutzsystems berücksichtigt werden. Auch das künftige Schutzsystem wird altern und eines Tages sein Lebensende erreichen. Mit geeignetem Erhaltungsmanagement kann das Altern der Schutzbauwerke verzögert und das bestehende Sicherheitsniveau möglichst lange aufrechterhalten werden. Die Dokumentation der heutigen Überlegungen erleichtern ein künftiges Überprüfen.

Ausgewählte Erfahrungen:

Anforderungen an Schutzsysteme und Möglichkeiten für deren Umsetzung haben sich im letzten Jahrhundert verändert:

- Die Ansprüche an die künftigen Schutzsysteme umfassen neben dem Schutzaspekt ebenfalls ökologische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte.
- Künftige Entwicklungen z.B. in Bezug auf die Gefahrensituation sollen berücksichtigt werden.
- Die finanziellen Ressourcen sind begrenzt und insbesondere Arbeitskräfte teurer als früher.
- Der Arbeitssicherheit wird größere Bedeutung zugemessen als früher.
- Aus neuen Techniken (z.B. naturnaher Wasserbau), Baumaterialien und Maschinen bieten sich neue und andere Maßnahmenmöglichkeiten.

Die zehn untersuchten Beispiele zeigen, dass die Prüfung des Systemerhalts, der Systemanpassung und des Systemwechsels in jedem Fall einen Mehrwert bringt. Auch wenn sich eine Bestvariante bereits bei Projektbeginn abzeichnet, macht ein Variantenvergleich

den Entscheid nachvollziehbar und belastbarer, z.B. gegen Einsprachen. In den vier untersuchten Beispielen, bei welchen es zu einem funktionalen Systemwechsel kam, wurde dieser Wechsel als Investition in die Zukunft betrachtet und es wird erwartet, dass die künftigen Erneuerungskosten des Schutzsystems tiefer ausfallen als bisher. Durch vorausschauende Betrachtung des anstehenden Lebenszyklus des Schutzsystems können Veränderungen antizipiert und ein flexibles System geschaffen werden. Bei allen Fallbeispielen wurde das künftige Schutzsystem durch eine gebietspezifische Kombination von Massnahmentypen optimiert.

Berücksichtigung übergreifender Aspekte (Abklärungsschritt 4)

Zentrale Erfolgsfaktoren für ein Projekt sind gemäß den Erfahrungen das Vorhandensein korrekter, nachvollziehbarer Projektgrundlagen, das Verständnis für den allgemeinen Wandel beim Umgang mit Naturgefahren und eine erfolgreiche Kommunikation.

Ausgewählte Erfahrungen:

Das dokumentierte Wissen über Rahmenbedingungen und das bisherige Schutzsystem (sowohl zur Entwicklung als auch zum aktuellen Zustand) bildet den Grundpfeiler für alle Entscheidungen. In Kenntnis möglicher künftiger Entwicklungen in Natur- und Kulturraum können nachhaltige Schutzsysteme konzipiert werden.

Eine klare Regelung und Offenlegung der Projektorganisation ist Voraussetzung und vereinfacht die Abläufe sowie die Kommunikation. Zum Projektmanagement gehören u.a.

- die Identifikation der relevanten Beteiligten (Akteuranalyse)
- die Bekanntgabe von Handlungsspielräumen
- die Klärung von Aufgaben, Zuständigkeiten und Kompetenzen
- die Definition von Ansprechpersonen und Kommunikationswegen.

Der Umgang mit Naturgefahren hat sich im Verlauf des 20./21. Jahrhunderts gewandelt. Sowohl die Möglichkeiten für den Umgang mit Naturgefahren als auch die Werte und Ansprüche haben sich verändert.

Schlussfolgerung

Die Frage nach einem geeigneten Umgang mit alternden Schutzsystemen ist hochaktuell und stellt sich im gesamten Alpen- und Voralpenraum. Der ergebnisoffene Lösungsansatz des Schweizerischen Bundesamts für Umwelt BAFU strukturiert das Vorgehen und unterstützt Fachleute, den Übergang eines Schutzsystems in den nächsten Lebenszyklus optimal zu gestalten. Mit Hilfe von grundsätzlichen Überlegungen wird geprüft, ob das bisherige Schutzsystem noch zeitgemäß ist oder aufgrund von Veränderungen allenfalls eine Systemanpassung oder ein Systemwechsel zweckmässig und möglich ist.

Schlussendlich leitet bei einer integralen Betrachtung über die Zeit der folgende Grundsatz durch die Lösungsfindung: Man muss die Geschichte eines Schutzsystems kennen, um die Gegenwart zu verstehen und die Zukunft zu planen.

Erfahrungen aus zehn Schweizer Wildbächen flossen bei der Erarbeitung des Lösungsansatzes ein und zeigen exemplarisch Möglichkeiten im Umgang mit alternden Schutzsystemen.

Das Konzept zusammen mit den aufgearbeiteten Erfahrungen und Empfehlungen aus der Praxis dient allen Akteuren im Hochwasserschutz, um beim Umgang mit alternden Schutzsystemen mit den beschränkten finanziellen Mitteln die langfristig beste Wirkung zu erzielen. Der Lösungsansatz wurde für Wildbäche in der Schweiz entwickelt. Er lässt sich auf weitere Regionen übertragen und kann in seinen Grundzügen für Schutzsysteme in anderen Gewässern (z.B. Talflüssen) und weiteren Prozessen (z.B. Lawinen, Sturz, Rutschungen) angewendet oder dafür angepasst werden.

Publikation

Das Konzept zum Umgang mit alternden Schutzsystemen ist beschrieben in der Publikation «Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen» der Reihe Umwelt-Wissen des Schweizerischen Bundesamts für Umwelt BAFU. Die Publikation besteht aus dem Bericht sowie einem Anhang mit Faktenblättern zu Fallbeispielen. Die Dokumente können unter den folgenden Links in Deutsch und Französisch heruntergeladen werden. Die italienische Fassung wird bis Ende 2022 vorliegen.

Link deutsche Fassung:

www.bafu.admin.ch/uw-2210-d

Link französische Fassung:

www.bafu.admin.ch/uw-2210-f

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Dr. Catherine Berger
geo7 AG geowissenschaftliches Büro
Neufeldstrasse 5–9, CH-3012 Bern
catherine.berger@geo7.ch

Maike Schneider
geo7 AG geowissenschaftliches Büro
Neufeldstrasse 5–9, CH-3012 Bern

Sandro Ritler
HOLINGER AG
Bahnhofquai 2, CH-4601 Olten

Dr. Markus Zimmermann]
NDR Consulting GmbH
Riedstrasse 5, CH-3600 Thun

Dr. Eva Gertsch-Gautschi
Bundesamt für Umwelt Schweiz BAFU, Abteilung
Gefahrenprävention, Sektion Hochwasserschutz
Postfach, CH-3003 Bern
eva.gertsch@bafu.admin.ch

Adrian Schertenleib
Bundesamt für Umwelt Schweiz BAFU, Abteilung
Gefahrenprävention, Sektion Hochwasserschutz
Postfach, CH-3003 Bern
adrian.schertenleib@bafu.admin.ch

Literatur/References:

AFRY Svizzera SA (2020). Ri del Bess 2 - Val de Gervan. Technischer Bericht, Grono.

BAFU (Hrsg.) (2022). Umgang mit alternden Schutzsystemen in Wildbächen. Erfahrungen und Empfehlungen. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Wissen Nr. 2210:74 S. Zugriff über: www.bafu.admin.ch/uw-2210-d (deutsch), www.bafu.admin.ch/uw-2210-f (französisch)

FLUSSBAU AG SAH (2013). Wildhuser Thur. Hochwasserabflüsse und Geschiebefrachten. Technischer Bericht im Auftrag des Baudepartements des Kt. St. Gallen, Tiefbauamt, Naturgefahrenkommission. Zürich.

MÄTZENER & WYSS Bauingenieure AG, NDR Consulting GmbH, geo7 AG, Sigmaphan AG und Moeri & Partner AG 2018: HWS Lamm- und Schwanderbach. Technischer Bericht Wasserbauplan, Planaufgabe.

PLANALP Plattform Naturgefahren der Alpenkonvention (Hrsg.) (2014). Beständigkeit von Schutzsystemen gegen Alpine Naturgefahren. Erfüllung vielseitiger Ansprüche durch die Anwendung der Prinzipien des Systems Engineering und des Lebenszyklusmanagements in den Ländern der Alpenkonvention. PLANALP Broschüre 2014.

SALVISBERG M. (2017). Der Hochwasserschutz an der Gürbe. Eine Herausforderung für Generationen (1855–2010). Wirtschafts-, Sozial- und Umweltgeschichte (WSU), Band 7. Schwabe Verlag, Basel.

Immer und überall zuverlässiger, umweltfreundlicher, wetterunabhängiger Strom:

Netzferne Energieversorgung mit Brennstoffzellen für Frühwarnsysteme

Reliable, environmentally friendly, weather independent power, anytime, anywhere: Off-grid fuel cell power solutions for early warning systems

Zusammenfassung:

Zur Sicherstellung der unterbrechungsfreien Datenerhebung und -übermittlung bei jedem Wetter und zu jeder Jahreszeit benötigten Naturgefahren-Frühwarnsysteme eine zuverlässige Stromversorgung. An schwer zugänglichen Orten stellt die Energieversorgung eine beträchtliche logistische und technische Herausforderung dar. Netzferne Energieversorgungslösungen mit Brennstoffzellen liefern über Monate und selbst unter schwierigsten Wetterbedingungen zuverlässig, fernsteuerbar und vollautomatisch Strom nach Bedarf, ohne Nutzereingriff. Da die Stromherstellung in den Brennstoffzellen schadstoffarm aus Wasserstoff bzw. Methanol erfolgt, sind sie auch in Naturschutzgebieten nutzbar. Der Beitrag stellt Vorteile, Kostenersparnisse und Referenzbeispiele vor.

Abstract:

For uninterrupted data delivery and transmission in any weather and any season, early warning systems require a reliable power supply. Especially in remote, difficult to access regions, reliable power can pose significant logistic and technical challenges. Off-grid fuel cell energy solutions provide reliable, remote-controlled, fully automatic power on demand over months, even in the most difficult weather scenarios, without requiring any user intervention. The fuel cell's power generation from hydrogen resp. methanol generates virtually no emissions, which makes them ideal power supply solutions for nature reserves and protected areas. This article presents benefits, cost savings and reference applications.

Stichwörter:

netzferner Strom,
zuverlässiger Strom,
wetterunabhängiger Strom,
umweltfreundlicher Strom,
Brennstoffzelle

Keywords:

off-grid power supply, reliable power, weather-independent power supply, environmentally-friendly power, fuel cell

Wenn konventionelle Energieversorgungen an ihre Grenzen kommen

Aufgrund des Klimawandels steigen die Anforderungen an Maßnahmen zum Schutz vor Naturgefahren. Moderne Mess-, Überwachungs- und Frühwarnsysteme helfen, drohende Gefahren wie Lawinenabgänge, Steinschläge, Vulkanausbrüche, Waldbrände, Hochwasser oder Sturzbäche rechtzeitig zu erkennen und um Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Mit der zunehmenden Zahl von Funktionen und Anwendungen ist auch der Strombedarf dieser Systeme gestiegen. Da sie meist an weit abgelegenen Orten zum Einsatz kommen, zum Teil unter extremen Witterungsbedingungen, zum Beispiel im Eis und unter hohen Minusgraden im Winter, in feuchten Umgebungen oder in großer Höhe, stellt eine unterbrechungsfreie Stromversorgung für Betreiber häufig ein großes Problem dar:

Weil Batterien schwer sind und nur über geringe Energiedichte verfügen, müssen sie oft und in der Regel mit erheblichem Zeit- und Logistikaufwand ersetzt werden. Solarmodule liefern nur bei Sonneneinstrahlung zuverlässig Strom und können deshalb die 24/7-Verfügbarkeit der Systeme nicht sichern. Wasser- und Windgeneratoren sind abhängig von den Umgebungsbedingungen. Netzferne Generatoren sind laut und dürfen aufgrund ihrer Betriebsemissionen an vielen Orten aus Umweltschutzgründen nicht genutzt werden, thermoelektrische Generatoren sind zwar leiser, benötigen aber eine konstante Hitzequelle, weswegen sie sich nicht zum Einsatz in waldbrandgefährdeten Szenarien eignen.

Brennstoffzellen – 100 % zuverlässiger netzferner Strom

Brennstoffzellen erzeugen aus einem Betriebsstoff (Wasserstoff oder Methanol) vollautomatisch, leise und umweltfreundlich Strom nach Bedarf, bei jedem Wetter, zu jeder Jahreszeit, in großer Höhe, in einem Temperaturspektrum von -40 °C bis +50 °C. Seit Jahren bewähren sie sich in Extremsätzen auf der ganzen Welt.

Das Funktionsprinzip von Brennstoffzellen

Für den Betrieb von netzfernen Gefahrenschutzanlagen haben Betreiber die Wahl zwischen zwei grundsätzlichen Technologien von Brennstoffzellen: DMFC, Direktmethanol-Brennstoffzellen, die den Alkohol Methanol als Betriebsstoff nutzen, und PEM, Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen, die Wasserstoff als Betriebsstoff nutzen. Das Herzstück der Brennstoffzelle ist der Stack, die stromerzeugende Kernkomponente. Durch die Zufuhr von Wasserstoff oder Methanol und Sauerstoff in den Stack wird in einem elektrochemischen Prozess, der sogenannten kalten Verbrennung, effizient Strom erzeugt, ohne Zwischenschritte und ohne bewegte Teile. Der dafür erforderliche Betriebsstoff wird aus einem Tank, entweder einem Methanol-Kanister oder einer Wasserstoff-Flasche, an die Anode des Stacks transportiert. Als Oxidationsmittel wird der Kathode Sauerstoff aus der Luft zugeführt. Dieser Prozess ist sowohl bei Wasserstoff- als auch bei Direktmethanol-Brennstoffzellen gleich. Der Betriebsstoff reagiert aktiv mit dem Sauerstoff zu

Wasser, ohne dass dafür von außen Energie zugeführt werden muss. In der Direktmethanol-Brennstoffzelle reagiert der Alkohol Methanol (CH_3OH) direkt, also ohne Reformier oder andere Zwischenschritte, mit dem Wasser zu Kohlendioxid und H^+ -Ionen. Bei der Stromerzeugung entstehen bei beiden Technologien lediglich Abwärme (die häufig zum Warmhalten empfindlicher Messkomponenten oder Ähnliches verwendet wird), Wasserdampf und, bei den DMFC-Brennstoffzellen, geringe Mengen Kohlendioxid. Der leise, autarke Prozess macht Brennstoffzellen zu umweltfreundlichen, vielseitig nutzbaren Stromerzeugern, die in immer mehr Anwendungen laute, emissionsstarke Generatoren ersetzen.

DMFC-Brennstoffzellen

DMFC-Brennstoffzellen sind klein, kompakt und liefern eine Leistung bis zu 500 W. Daher eignen sie sich ideal für die Versorgung netzferner Mess-, Frühwarn- und Überwachungssysteme, die erfahrungsgemäß in der Regel einen Leistungsbedarf zwischen 200 und 2.500 Wh pro Tag haben. Bei

den DMFC-Brennstoffzellen wird der Wasserstoff direkt (daher auch der Name dieser Technologie) aus dem Methanol gewonnen. Im Betrieb arbeitet die Brennstoffzelle immer mit der Batterie des jeweiligen Verbrauchers zusammen und überwacht, bei eingebautem Laderegler, kontinuierlich deren Ladezustand. Sinkt er unter eine voreingestellte Schwelle, startet die Brennstoffzelle automatisch und lädt die Batterie wieder auf. Sobald die Batterie den vorgeschriebenen Ladezustand erreicht hat, schaltet die Brennstoffzelle zurück in den Standby-Modus. Batterien halten so wesentlich länger, da sie die gesteuerte Aufladung vor Tiefentladung schützt. Dies steigert Autonomie und Lebensdauer der Anwendung.

Je nach Anwendung bietet diese Technologie verschiedene Lösungen für Betreiber, von Brennstoffzellen für temporäre Einsätze mit wenigen Betriebsstunden, über die Back-up-Stromversorgung für netzgebundene oder solar betriebene Hybrid-Installationen bis hin zu vollintegrierten Brennstoffzellenlösungen für den komplett autarken Dauerbetrieb über viele Monate, oft auch im Hybridbetrieb mit Solaranlagen.



Abbildung 1: Funktionsprinzip DMFC-Brennstoffzelle ( SFC Energy AG, 2022)

Figure 1: Operation of a DMFC fuel cell ( SFC Energy AG, 2022)

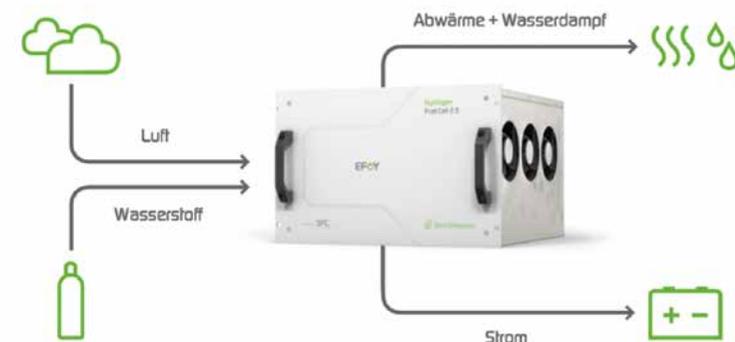


Abbildung 2: Funktionsprinzip einer Wasserstoff-Brennstoffzelle ( SFC Energy AG, 2022)

Figure 2: Operation of a hydrogen fuel cell ( SFC Energy AG, 2022)

Wasserstoff-Brennstoffzellen

Wasserstoff-Brennstoffzellen ermöglichen Energielösungen im höheren Leistungsbereich von 2,5 kW bis zu 50 kW. Daher werden sie häufig zur Ablösung konventioneller Dieselmotoren und als Back-up-Stromversorgung oder Netzersatzanlage eingesetzt, um die ununterbrochene Energieversorgung kritischer Infrastrukturen bei einem Netzausfall sicherzustellen. Auch hier startet die Brennstoffzelle automatisch ihren Betrieb, sobald die Batteriespannung einen Schwellenwert unterschreitet und übernimmt die Stromversorgung.

Welche Brennstoffzellentechnologie für welche Anwendung?

Für Betreiber ist es aufgrund der Vielfalt der zu berücksichtigenden Bedingungen und Faktoren oft nicht leicht, die beste Energieversorgungsloung für ihre Anwendung zu bestimmen.

Generell gilt: DMFC-Brennstoffzellen eignen sich für die Stromversorgung kleinerer,

mobiler, netzferner Systeme bis zu einer Leistung von 1000 W. Da sie leicht und kompakt sind, sind sie schnell installiert und können ohne größeren logistischen Aufwand auch an abgelegene, schwer zugängliche Einsatzorte transportiert werden. In einer leicht tragbaren Box mit Batterie und nötigem Zubehör integriert, sind sie gut geeignet für temporäre Einsatzszenarien: Die Plug-and-Play Box mit Brennstoffzelle wird einfach an den Verbraucher angeschlossen und versorgt ihn vollautomatisch über die gesamte Einsatzdauer.

Wasserstoff-Brennstoffzellen werden vorrangig stationär eingesetzt. Ihr Leistungsbereich von 2,5 kW bis 50 kW wird für die Stromversorgung größerer Anlagen genutzt. Der wichtigste Anwendungsbereich dieser Technologie ist aktuell die Back-up-Stromversorgung kritischer Anlagen bei Stromausfall, zum Beispiel im Gesundheits- und Sicherheitsbereich. Der entscheidende Vorteil von Wasserstoff-Brennstoffzellen in diesen Anwendungen ist, dass sie, anders als die bislang als Back-up genutzten Generatoren, auch in ökologisch sensiblen Bereichen eingesetzt werden dürfen, weil sie sehr leise und effizient sind.

Das Beste aus zwei Welten: Hybridbetrieb Brennstoffzelle & Solarmodul

Der Hybridbetrieb von Brennstoffzelle und Solarmodul vereint die Vorteile der beiden Technologien, während gleichzeitig ihre Nachteile durch die Kombination ausgeglichen werden. Solange bei Sonneneinstrahlung das Solarmodul ausreichend Strom zur Ladung der Batterie liefert, verbleibt die Brennstoffzelle im Standby-Betrieb, die Anlage wird dann ausschließlich mit Solarstrom betrieben. In diesem Modus wird kein Betriebsstoff verbraucht, die Verbraucher werden mit „kostenlosem“ Solarstrom betrieben. Erst wenn bei schlechtem Wetter oder in der dunklen Jahreszeit kein ausreichender Solarertrag mehr erfolgt, schaltet sich die Brennstoffzelle vollautomatisch ein und übernimmt zuverlässig und wetterunabhängig die Stromversorgung. So kann die 24/7-Verfügbarkeit der sicherheitskritischen Anlagen auch fern vom Netz zu jedem Zeitpunkt und in jedem Wetter kosteneffizient sichergestellt werden.

Der Hybridbetrieb von Brennstoffzellen ist auch möglich mit anderen alternativen Ener-

gieversorgern wie Wind- oder Wasserkraftgeneratoren. Die Laderegelung wird dabei an die jeweiligen Anwendungsbedingungen angepasst.

Fernüberwachung und Autarkieverlängerung

Für Brennstoffzellen gibt es eine Vielzahl moderner Steuer- und Bedienmöglichkeiten. Dadurch kann die Brennstoffzelle ebenso bequem vor Ort über ein Bedienpanel bedient werden, wie auch remote vom Laptop, Smartphone oder Tablet. Mit entsprechendem Zubehör können Brennstoffzellen ohne großen technischen Aufwand rund um die Uhr überwacht, in existierende Kommunikationsnetzwerke eingebunden und unmittelbar an sich ändernde Bedingungen angepasst werden, ohne dass dafür Personal an die Einsatzstelle geschickt werden muss.

Gesicherten Fernzugriff auf jede einzelne Brennstoffzelle ermöglichen Cloud-Anwendungen. Zur Nutzung dieser Option ist eine Internetanbindung der Brennstoffzelle oder eine entsprechende alternative Kommunikationsverbindung erforderlich.

Remote abrufbare Brennstoffzellendaten sind beispielsweise der aktuelle Betriebszustand der jeweiligen Brennstoffzelle, historische Verlaufsdaten und die Füllstände der Tankpatronen. Bei Bedarf können Betriebsparameter konfiguriert und vollautomatische Firmware-Updates geplant werden. Ein integriertes Alarm-Management informiert per Email oder SMS über bevorstehende Tankpatronenwechsel oder über grenzwertunterschreitende Batteriespannungen.

Damit hat der Betreiber zu jedem Zeitpunkt Überblick über den Betriebszustand von Brennstoffzelle, Verbraucherbatterie und Verbraucher und kann rechtzeitig drohenden Systemausfällen vorbeugen.

Der Betriebsstoff

DMFC-Brennstoffzellen nutzen Methanol (CH_3OH) als Betriebsstoff. Um einen sicheren Betrieb der Brennstoffzelle zu ermöglichen, wird hochreines Methanol in eigens für Brennstoffzellenanwendungen entwickelten, auslaufsicheren Tankpatronen abgefüllt. Tankpatronen sind je nach Bedarf in den Größen 5, 10, 28 und 60 Liter erhältlich. Zur Wahrung höchster Qualitätsstandards wird jede Abfüllung überwacht. Methanol darf aufgrund seiner guten biologischen Abbaubarkeit in ökologisch sensiblen Bereichen eingesetzt werden.

Mit intelligentem Tankpatronen-Management können mehrere Tankpatronen an eine einzelne DMFC-Brennstoffzelle angeschlossen werden, je nach Modell bis zu zwei, vier oder acht Tankpatronen gleichzeitig. Ist eine Tankpatrone leer, wird automatisch auf die nächste volle Tankpatrone umgeschaltet. Durch diese Konfiguration kann die Autarkiezeit ohne Benutzereingriff bis zu verachtfacht werden.

Die hohe Energiedichte von Methanol ermöglicht Betreibern die Bereitstellung von viel

Energie auf kleinstem Raum: Eine 10-Liter Tankpatrone beispielsweise hat bei einem Gewicht von ca. 8,5 kg eine Nennkapazität von 11,1 kWh. Damit kann ein 50 W-Verbraucher 222 Stunden autonom betrieben werden. Um die gleiche Energie zur Verfügung zu stellen, wären ca. 280 kg Blei-Gel-Batterien erforderlich.

In den Wasserstoff-Brennstoffzellen haben sich einzelne Wasserstoff-Druckflaschen oder Flaschenbündel bewährt. Sie ermöglichen einen einfachen Austausch leerer Flaschen im Feld.

Individuell konfigurierbar für die jeweiligen Bedingungen

Netzferne Brennstoffzellenlösungen können für spezifische Anforderungen konfiguriert werden. Abhängig von Spannung, Stromverbrauch und täglichen Betriebsstunden der Verbraucher stehen verschiedene Brennstoffzellenmodelle zur Verfügung. Alle Brennstoffzellen sind hybridisierbar mit Solarmodulen und auch mit anderen alternativen Energieversorgern wie Wind- oder Wasserkraftgeneratoren, wobei die Laderegelung individuell an den Bedarf der jeweiligen Anwendung angepasst werden kann. Individuelle oder auch ganze Gruppen von Brennstoffzellensystemen sind zentral steuer- und überwachbar, wodurch sich der Administrations- und Logistikaufwand erheblich reduzieren lässt. Für raue Umgebungsbedingungen und empfindliche Verbraucher stehen unterschiedliche Gehäuselösungen zur Verfügung für den sicheren, wettergeschützten Betrieb von Verbrauchern und Brennstoffzellen. In diesem Szenario kann zudem in kalten Temperaturen die Abwärme der Brennstoffzelle zum Temperieren von Batterie und Verbrauchern genutzt werden. Schließlich sind Brennstoffzellenlösungen auch in mehreren mobilen Trailer-Lösungen, mit und ohne Solar, konfigurierbar (SFC Energy AG, 2022).

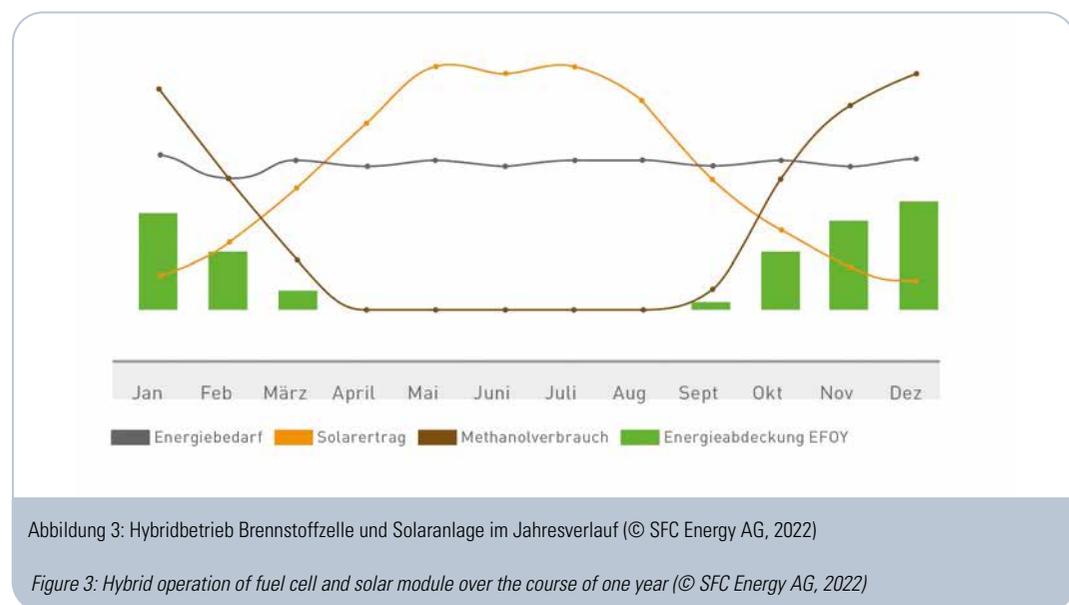


Abbildung 3: Hybridbetrieb Brennstoffzelle und Solaranlage im Jahresverlauf (© SFC Energy AG, 2022)

Figure 3: Hybrid operation of fuel cell and solar module over the course of one year (© SFC Energy AG, 2022)

Anwendungsbeispiele Naturgefahrenschutz

Mechanische Lawinenauslösung

Die künstliche Lawinenauslösung beruht in der Regel auf dem Einsatz von Detonationsmittel. Eine neuartige, alternative Technologie löst Lawinen mittels Hydraulik und Metallplatten lautlos und ohne Detonation aus. Für den Betrieb dieser umweltfreundlichen, neuen Lawinenauslösungstechnologie nutzt SATS Singer Alpine Technologies (<https://www.sats-avalanche.com/de>) DMFC-Brennstoffzellen als Energiequelle:

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY Pro 2800, Max. Leistung: 125 W, Gewicht 7,8 kg
Verbraucher:	Hydraulikmotor, Hydraulikpumpe, Wechselrichter
Leistungsbedarf:	stark schwankend: Dauerlast ca. 80 Watt und Peak 1,2 kW (bei der Auslösung)
Hybridbetrieb:	Ja, mit 410 Wp Solar
Einsatzart:	stationär
Konfiguration:	mobile Box mit Batterien und 2 x 60 l Tankpatrone
Autarkiezeit:	eine Saison

Überwachungsstationen Vulkanausbruch

Um die Tätigkeit von Vulkanen zu überwachen und frühzeitig Aussagen über mögliche Ausbrüche treffen zu können, kommen auf vielen Vulkanen Überwachungsstationen zum Einsatz, zum Teil in großer Höhe. Versorgt werden die Stationen mit DMFC-Brennstoffzellen, die extremen Witterungsbedingungen und großen Temperaturschwankungen standhalten müssen. Entscheidende Vorteile für den Betreiber sind das Remote Monitoring der Brennstoffzelle und die langen Autarkiezeiten, da viele der Anlagen nur mit dem Helikopter aus der Luft erreichbar sind.

Hydro2Power SRL stattete zwölf Messstationen rund um einen Vulkan zur Voraussage von Ausbrüchen und zur Überwachung der Vulkantätigkeit aus. Die Stationen liegen bis zu 3.000 m über dem Meeresspiegel.

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY 150, Max. Leistung: 75 W, Gewicht 6,9 kg
Verbraucher:	Sensoren, Modem etc.
Leistungsbedarf:	zwischen 20–50 W
Einsatzdauer:	24/7
Hybridbetrieb:	mit 1.200 Wp Solar Panelen
Konfiguration:	In wetterfestem EFOY ProCube 2060A mit integrierter Batterie und 2x M28 Tankpatronen, Solarladeregler
Autarkiezeit:	6 Monate Autonomie bei 50 W

GNSS Empfänger für Erdbebenwarnung

Erdbeben können plötzlich auftreten und gewaltige Schäden in der Natur und an Infrastrukturen verursachen. Daher sind in Norwegen an vielen Gletschern, Flüssen und Infrastrukturen GNSS-Empfänger oder Kameras zur Erdbebenfrüherkennung installiert.

Das Norwegian Water Resources and Energy Directorate (NVE) überwacht in Norwegen mehrere Objekte und Infrastrukturen zum Schutz vor Erdbebengefahr. An den Einsatzorten sind weder Sonnenlicht noch Windkraft zuverlässig verfügbar.

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY Pro 2800, Max. Leistung: 125 W, Gewicht 7,8 kg
Verbraucher:	GNSS-Empfänger, Switch, Funkgeräte, Kamera
Leistungsbedarf:	zwischen 20-40 W für GNSS-Empfänger, Switch und zwei GHz-Funkgeräte oder 60-80 W für Kamera statt GNSS-Empfänger
Einsatzdauer:	24/7
Hybridbetrieb:	mit Solar und/oder teilweise Windgeneratoren
Konfiguration:	isolierte Box mit zwei Batterien, zwei 28 l-Tankpatronen, Kommunikationshardware und ggf. Solarladeregler
Autarkiezeit:	bis zu ein Jahr mit zwei 28 l Tankpatronen, bei Winterbetrieb mit Kamera und Zuheizung: 2-3 Monate mit zwei 28 l Tankpatronen

Wärmebildkameras zur Brandfrüherkennung

Zur Früherkennung von Wald- und Schwellbränden und Bränden auf Mülldeponien werden temporär Wärmebildkameras mit Datenfernübertragung eingesetzt. Diese Kameras müssen während ihres Einsatzes unterbrechungsfrei und zuverlässig mit Strom versorgt werden. Gleichzeitig müssen sie schnell installiert und deinstalliert werden können, um bei sich ändernder Gefahrenlage zügig und ohne großen Aufwand an andere Orte versetzt werden zu können. Generell kann diese Lösung für viele Arten netzferner Kameraanwendungen genutzt werden, zum Beispiel Wildtierkameras, Dauerbeobachtungs- oder Überwachungsszenarien etc.

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY 150, Max. Leistung: 75 W, Gewicht 6,9 kg
Verbraucher:	Kameras, Sensoren, Modem
Leistungsbedarf:	50 W
Einsatzdauer:	24/7
Hybridbetrieb:	mit 1.200 Wp Solar
Konfiguration:	EFOY ProCube 2060A Outdoor-Box mit Batterie, Solarladeregler und zwei 28 l Tankpatronen
Autarkiezeit:	6 Monate mit zwei 28 l Tankpatronen

Datenerfassung Wetter- und Klimadaten, seismische Bewegungen

Standorten ohne Solarunterstützung eine lückenlose Datenerfassung sichergestellt sein. Aufgrund der teils extremen Umgebungsbedingungen müssen die Stromversorger auch in großer Kälte und bei Erschütterung zuverlässig funktionieren.

Hierfür kommen DMFC-Brennstoffzellen zum Einsatz, zum Beispiel in den ASFS (Atmospheric Surface Flux Stations) Stationen der National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) zur Messung der Eisschmelze im Eismeer:

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY Pro 2800, Max. Leistung: 125 W, Gewicht 7,8 kg
Verbraucher:	Sensoren, Modem, Heizelemente
Leistungsbedarf:	60-100 W
Einsatzdauer:	24/7
Hybridbetrieb:	nein
Konfiguration:	ProEnergyBox 4060P Outdoor-Box mit Batterie und zwei 60 l-Tankpatronen
Autarkiezeit:	60-90 Tage mit zwei 60 l-Tankpatronen

Wasserpegelstand- und Regenmessung

Hochwasser ist in vielen Regionen an Flüssen oder Gletschern eine große Gefahr, insbesondere im Zusammenhang mit dem immer häufiger auftretenden Starkregen.

Greater Wellington Regional Councils (GWRC) betreibt im Großraum Wellington, Neuseeland, ein Hochwasserfrühwarnnetzwerk. An zwei Stationen, an denen je eine HS-40 Bubbler-Einheit, ein Funkgerät und ein Datenlogger zum Einsatz kommen, ist kein Einsatz von Solarmodulen möglich. Hier kommt eine DMFC-Brennstoffzelle zum Einsatz.

DMFC-Brennstoffzelle:	EFOY Pro 900, Max. Leistung: 42 W, Gewicht 6,5 kg
Verbraucher:	HS-40 Bubbler Einheit, Funkgerät, Datenlogger
Leistungsbedarf:	20-40 W
Einsatzdauer:	24/7
Hybridbetrieb:	nein
Konfiguration:	In einer Aufzeichnungshütte ist die Brennstoffzelle in einem kleinen wasserdichten Unterstand installiert und direkt mit der Batterie und zwei 10 l Tankpatronen verbunden
Autarkiezeit:	ca. 45 Tage mit 20 W

Notstromversorgung für kritische Kommunikationsanlagen

Zur Absicherung der Kommunikation von Einsatzkräften der Bergwacht, Polizei oder Feuerwehr ist eine zuverlässige und dauerhafte Stromversorgung von höchster Bedeutung. Sendeanlagen sind in der Regel über Netzstromanschlüsse versorgt, in wenigen Fällen auch über Solaranlagen. Sollte es zum Ausfall der primären Energiequelle kommen, sorgen Wasserstoffbrennstoffzellen für einen netzunabhängigen Betrieb, zum Beispiel im BOS-Digitalfunk der Polizei in Deutschland.

PEM-Brennstoffzelle:	EFOY Hydrogen Fuel Cell 2.5, Max. Leistung: 2.500 W je Brennstoffzellen-Modul
Verbraucher:	Sendeanlage, Steuerung, Klimageräte etc.
Leistungsbedarf:	1 bis 5 kW
Einsatzdauer:	wenige Minuten bis mehrere Tage
Hybridbetrieb:	nein
Konfiguration:	2 bis 3 Brennstoffzellen in Kombination mit Wechselrichter (48 V DC / 230 V AC)
Autarkiezeit:	In der Regel Auslegung des Wasserstofftanks auf 72, 96 oder 160 Stunden

Anschrift der Verfasserin/Author's address:

Mona Mittelstädt
SFC Energy AG
Eugen-Sänger-Ring 7,
85649 Brunnthal, Deutschland
www.efoy-pro.com
info@sfc.com

Literatur/References:

SFC Energy AG, (2022).
Saubere Energielösungen mit EFOY Brennstoffzellen und Lithium Batterien. Im Internet unter: https://www.hy-line-group.com/products/hag/datasheet/sfc-industry-brochure_de.pdf (Abfrage am 08.08.2022)

STEFANIE PESSENTEINER, PAUL KRENN, SEBASTIAN GEGENLEITHNER,
NICOLE KAMP, WOLFGANG SCHÖNER, OLIVER SASS, JOSEF SCHNEIDER,
BENJAMIN SCHREI, CHRISTOPH GAISBERGER

Modellierung zukünftiger Abflüsse und Geschiebefrachten im Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Steiermark)

Modelling future runoff and bed load transport in the Schöttlbach catchment (Styria)

Zusammenfassung:

In den Jahren 2011 und 2017 haben murartige Hochwasserereignisse enorme Schäden im oberen Murtal verursacht. Ob diese Ereignisse bereits Auswirkungen des Klimawandels waren, ist unklar. Wie sich Hydrologie und Sedimenttransport im Zuge des Klimawandels verändern werden, wurde im ACRP Projekt RunSed-CC für das Schöttlbachtal modelliert. Mittels Beobachtungsdaten und Klimaszenarien simulierte Abflüsse und beobachtete Sedimentdaten wurden in einem 2D-Transportmodell verknüpft, um den Geschiebetransport vergangener und zukünftiger Ereignisse abzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen, dass Extremniederschläge und -abflüsse im Schöttlbach in Zukunft zunehmen werden. Aufgrund der nahezu unbeschränkten Sedimentverfügbarkeit ist in dem Gebiet auch eine überproportionale Zunahme der Sedimentfrachten zu erwarten, wenn die Häufigkeit von Störereignissen eine kritische Schwelle überschreitet.

Abstract:

In 2011 and 2017 sediment-laden torrential floods caused enormous damage in the upper Mur valley. Whether these events have already been impacts of climate change is unclear. Within the ACRP project RunSed-CC the reaction of hydrology and sediment transport to climate change has been modelled for the Schöttlbach valley. To estimate past and future bed load transport, observation-based and climate model-based simulated discharges were combined with observed sediment data in a 2D-transport model. Our results show, that extreme precipitation and runoff in the Schöttlbach area will increase in the future. Due to quasi unlimited sediment supply in the Schöttlbach valley sediment transport is assumed to increase disproportionately when the disturbance frequency increases above a critical level.

Stichwörter:

Klimawandel,
Modellierung,
Wildbachereignis,
Hochwasser,
Sedimenttransport

Keywords:

Climate change, modelling,
torrential events, flood,
sediment transport

Einleitung

In den Sommermonaten der Jahre 2011 und 2017 haben Extremniederschläge und daraus folgende Hochwasserereignisse mit beträchtlichem Sedimenttransport in der Stadt Oberwölz sowie im gesamten Einzugsgebiet des Schöttlbachs (Wölzer Tauern, Steiermark) enorme Schäden verursacht. Ob diese Ereignisse bereits eine Folge des Klimawandels waren, ist unklar. Die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels und der damit verbundenen, zunehmenden Extremniederschläge und Hochwasserereignisse in kleinen alpinen Einzugsgebieten stellt nach wie vor eine Herausforderung an Wissenschaft und Praxis dar (vgl. Meißl et al., 2017). Auch das Wissen über die daraus resultierenden Auswirkungen auf den Sedimenttransport ist noch unzureichend (vgl. Hirschberg et al., 2021). Ausgehend von dieser Forschungslücke wurde in den Jahren 2017-2021 das ACRP (Austrian Climate Research Program) Projekt RunSed-CC (Schöner et al., 2021) an der Universität Graz sowie der Technischen Universität Graz in enger Zusammenarbeit mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV), Gebietsbauleitung Steiermark West durchgeführt. Ziel von RunSed-CC war es, die Auswirkungen der Klimaerwärmung auf hydrologische und geomorphologische Prozesse in alpinen Wildbacheinzugsgebieten am Beispiel des Schöttlbachs zu untersuchen. Hierfür wurde das hydrologische Modell WaSiM mit Klimabeobachtungsdaten (Spartacus, GPARD1, INCA, Stationsdaten) und Szenariodaten für die Zukunft (ÖKS15) angetrieben. Anschließend wurden diese simulierten Abflussganglinien als Eingangsd-

ten für die Geschiebetransportmodellierung mit TELEMAC-2D-SISYPHE verwendet. Kontinuierliche Durchflussmessungen sowie wiederholte Messungen der Sedimentverfügbarkeit, Sedimentmobilisierbarkeit und des Sedimenttransports dienten zur Validierung der Modellkette. Erste Erkenntnisse unserer Arbeit zum Wildbachereignis 2017 wurden bereits in Heft Nr. 184 im Artikel von Krenn et al. (2019) präsentiert. Im vorliegenden Beitrag werden die zentralen Ergebnisse des Gesamtprojekts RunSed-CC vorgestellt und zukünftige Forschungsnotwendigkeiten skizziert.

Untersuchungsgebiet, Daten und Methodik

Das Einzugsgebiet des Schöttlbachs

Der Schöttlbach liegt in den Wölzer Tauern (Niedere Tauern), knapp 15 km nordöstlich der Stadt Murau (Abb. 1). Er ist ein Zubringer des Wölzerbachs, der ca. 10 km flussabwärts bei Scheifling in die Mur mündet. Die Geologie im Untersuchungsgebiet wird von Glimmerschiefer und Gneis geprägt, vereinzelt finden sich auch Kalk, Dolomit und Amphiboliteinschlüsse. Die höhergelegenen Bereiche des Schöttlbachtals (>1600 m) sind durch alpine Rasen und zum Teil steile, felsdurchsetzte Hänge gekennzeichnet, in den Lagen darunter dominieren Nadelwälder und Weideflächen das Gebiet. Die Bodenart ist überwiegend sandig bis lehmig. Die größten Sedimentdeposits finden sich in tiefergelegenen Talabschnitten, wo sich der Schöttlbach in einen hochorosiven, quartären Sedimentkörper einschneidet. Tab. 1 fasst die wichtigsten, geographischen Eigenschaften des Schöttlbach-Einzugsgebiets zusammen.

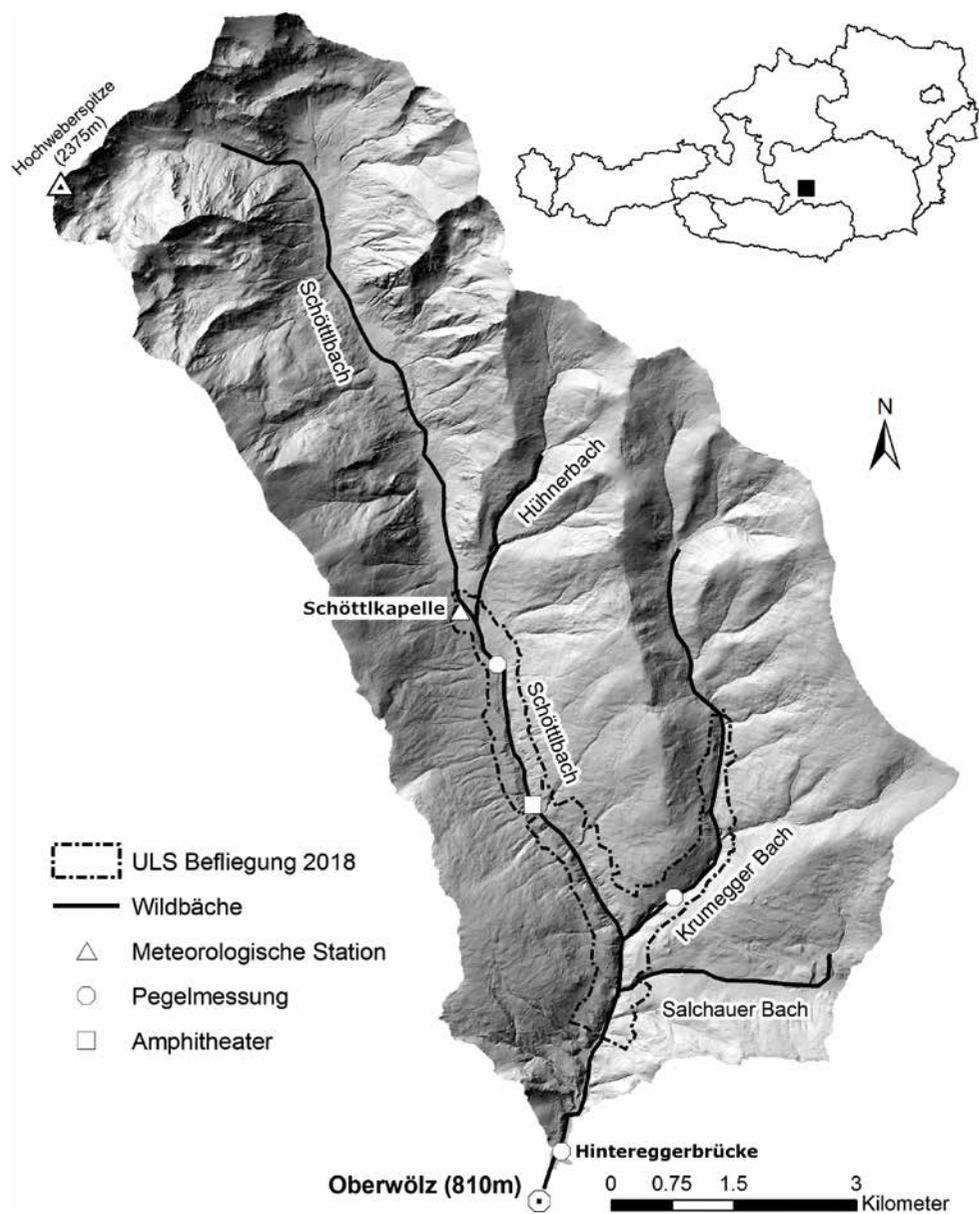


Abbildung 1: Das Untersuchungsgebiet des Schöttlbachtals in den Wölzer Tauern.

Figure 1: The research area of the Schöttlbach valley in the Wölzer Tauern.

Einzugsgebiet des Schöttlbachs

Einzugsgebietsgröße [km ²]	70.54
Höhe am Outlet [m a.s.l.]	815
Höchste Erhebung (Hochweberspitze) [m a.s.l.]	2372
Mittlere Neigung [%]	40.4
Länge des Hauptgerinnes [km]	16.7
Mittlere Gerinnebettneigung [%]	8.48
Mittlere Jahrestemperatur (Outlet) [°C]	6.4
Mittlerer Jahresniederschlag (Outlet) [mm]	737
Gebäude in roter und gelber Gefahrenzone	156

Tabelle 1: Geographische Eckdaten für das Einzugsgebiet des Schöttlbachs. Klimatologische Werte sind für die Station Oberwölz (Periode 1971-2000) am Gebietsauslass angegeben (Datenquelle: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG).

Table 1: Basic geographic information of the Schöttlbach catchment. Climatological characteristics refer to the Station Oberwölz (period 1971-2000) at the catchment outlet (Data source: Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG).

Die Modellkette (von der Abfluss- zur Geschiebetransportsimulation)

In unserem Modellierungsansatz haben wir nach Möglichkeit freie Software und Daten verwendet (Peßenteiner et al., 2020). Das hydrologische Modell WaSiM (Schulla, 2017) wurde dabei mit dem hydrodynamischen Modell TELEMAC-2D (Hervouet, 2007; Hervouet und Ata, 2017) sowie dessen Sedimenttransportmodul SISYPHE (Tassi, 2017) gekoppelt. Durch diese neuartige Kopplung wurde eine kohärente Analyse der Beziehungen zwischen Niederschlag, Abfluss und Geschiebefracht auf unterschiedlichen zeitlichen und räumlichen Skalen möglich.

Hydrologische Modellierung mit WaSiM

Wir haben das Niederschlags-Abfluss-Modell WaSiM in unterschiedlichen Komplexitätsstufen und räumlich-zeitlichen Auflösungen angewandt. Aufgrund der Datenverfügbarkeit und um eine Kalibrierung mit gemessenen Durchflussreihen der Station Niederwölz zu ermöglichen, haben wir zunächst Simulationen für das Gesamtgebiet des Wölzerbachs (von dem der Schöttlbach ein Teileinzugsgebiet darstellt) in der Auflösung 1 Tag beziehungsweise 1x1 km² durchgeführt. Als Eingangsdaten für Temperatur und Niederschlag wurden sowohl Stationsdaten (ZAMG, Hydrographischer Dienst (AHYD), Vorläuferprojekt ClimCatch (Sass et al., 2015)) als auch Rasterdaten (SPARTACUS, GPARD1, INCA der ZAMG sowie ÖKS15-Klimaszenarien) verwendet. Eine genaue Beschreibung des Modells, der Eingangsdaten, sowie eine Validierung der hochaufgelösten ÖKS15 Klimaszenarien in der Vergangenheit findet sich in Peßenteiner et al. (2021). Für die Zukunftssimulationen wurden sowohl ein moderates Konzentrationspfadszenario (RCP4.5) als

auch ein Extremszenario (ohne zusätzliche Bemühungen zur Emissionsbeschränkung, RCP8.5) verwendet, um den Bereich möglicher zukünftiger Entwicklungen abzudecken. Die Analyse von kleinräumigen Extremniederschlägen und Hochwässern verlangt eine hohe zeitliche und räumliche Auflösung der hydrometeorologischen Daten. Um eine Abschätzung zukünftiger Extremabflüsse im Schöttlbach zu ermöglichen, haben wir Temperatur und Niederschlag aus den ÖKS15 Klimaszenarien von täglicher zu stündlicher Auflösung disaggregiert. Für die Temperatur wurde dabei ein sinusoidaler Ansatz nach Förster et al. (2016) unter Verwendung von Tagesminimum-, Tagesmaximum- und Tagesmitteltemperatur verwendet. Der Tagesniederschlag wurde mithilfe eines Fragmentansatzes ähnlich Winter et al. (2019) auf Stundenwerte gebracht.

Geschlebetransport-Modellierung mit TELEMAC-2D-SISYPHE

Die hydromorphologische Modellierung wurde mit dem numerischen Modell TELEMAC-2D (Hervouet und Ata, 2017) sowie mit dessen Sedimenttransportmodul SISYPHE durchgeführt. Um die komplexen Transportprozesse in steilen Wildbächen modelltechnisch abbilden zu können, wurden im Rahmen von RunSed-CC verschiedene hydrodynamische und morphologische Ansätze in die Open Source Modelle TELEMAC-2D und SISYPHE implementiert. Eine genaue Beschreibung der verwendeten Ansätze findet sich in Gegenleithner et al. (2020). Für die Geschlebetransportmodellierung am Schöttlbach werden minimale und maximale als Geschiebe transportierbare Korngrößen über die Rouse-Zahl abgeschätzt. In Suspension transportierte Feinanteile werden vernachlässigt und größere Felsen als zusätzliche Rauigkeit abgebildet. Gemessene

Korngrößenverteilungen werden zur Klassifizierung der verwendeten Korngrößen, der vertikalen Schichten sowie für die Initialisierung des Geschiebes zu Simulationsbeginn herangezogen. Das Geschiebetransportmodell erstreckt sich von den Pegeln im Oberlauf des Schöttlbachs und des Krumeggerbachs, welche die Einlassrandbedingungen des Modells darstellen, bis hin zur Geschiebesperre, die als Auslassrandbedingung dient (entspricht in etwa dem strichlierten Gebiet in Abb. 1). Die Modellzuflüsse werden dabei von Pegelmessungen bzw. simulierten Abflüssen des hydrologischen Modells geliefert. Für den Geschiebezufluss ins Modell wird ein Gleichgewichtsansatz verwendet.

Messungen zu Sedimentverfügbarkeit, Sedimentmobilisierbarkeit und Sedimenttransport

Neben dem Erosionsflächen-Monitoring mit terrestrischen Laserscans wurden im Projekt RunSed-CC vor allem Sedimentbudgets über geomorphologische Oberflächenveränderungen bestimmt. Ein essentieller Datensatz konnte dabei in Kooperation mit der Gebietsbauleitung Steiermark West der WLW im November 2018 organisiert und finanziert werden und wurde mittels einem auf einer Drohne (UAV – Unmanned Aerial Vehicle; UAV-borne) montiertem Laserscanner (Riegl VUX-1LR) gewonnen. Diese Daten konnten mit jenen der Airborne Laserscanning (ALS; Riegl LMS-Q560 & LMS-Q680i) Messkampagne des Landes Steiermark (2012) verglichen und Differenzmodelle (DEMs of Difference - (DoD)) generiert werden. Die genaue Methodik wurde in Krenn et al. (2019, in Heft 184 dieser Reihe) beschrieben. Tieferegehende Beschreibungen der Methode und der abgeleiteten Ergebnisse finden sich in Kamp et al. (under revision) und Krenn et al. (under revision).

Ergebnisse

Extremereignisse 2011 und 2017

Während das Hochwasser am 7. Juli 2011 durch eine lokale, konvektive Niederschlagszelle mit bis zu 140 mm Gesamtniederschlagsmenge über 8 Stunden (davon 100–120 mm in 2,5 Stunden, Hübl et al., 2011) verursacht wurde, haben im Jahr 2017 mehrere über das Einzugsgebiet hinwegziehende Gewitterzellen zwischen dem 4. und 6. August 2017 ein mehrgipfeliges Hochwasserereignis ausgelöst. Insgesamt war die maximale 8-stündige Gesamtniederschlagsmenge im Jahr 2017 lokal mit 85 mm deutlich geringer (Abb. 2). Es ist jedoch davon auszugehen, dass im Jahr 2017 die Vorbefeuchtung maßgeblich zur katastrophalen Entwicklung des Ereignisses beigetragen hat. Im 18-tägigen Zeitraum von 20.7. – 6.8.2017 fielen an der auf 1254 m a.s.l. gelegenen Station Schöttlkapelle (siehe Abb. 1) 406 mm Niederschlag (beinahe 1/3 des Gesamtjahresniederschlags an diesem Ort). Die auf den Zeitraum

2013 bis 2019 bezogene, höchste gemessene 10-minütige Niederschlagssumme von 24 mm wurde am 22.7.2017 an dieser Station verzeichnet. Mit Abflussspitzen von rund 18 m³/s war somit bereits die Woche vor dem Katastropheneignis 2017 durch ein kleines Hochwasser (HQ₁–HQ₂) geprägt. Zwar wurde das Hochwasserereignis vom 4. August 2017 zu Beginn noch vom 2013 errichteten Pegel Hintereggerbrücke (Sass et al., 2015) in Oberwölz erfasst, jedoch ist aufgrund der Sohlerhöhung durch das mitgeführte Geschiebe der Pegelschlüssel nicht anwendbar. Im Laufe des Ereignisses wurde die Station sogar zunehmend beschädigt. Für das Ereignis im Jahr 2011 wurden Spitzenabflüsse zwischen 90 m³/s und 100 m³/s geschätzt (Hübl et al., 2012), während im Jahr 2017 der Abflussscheitel um die 80 m³/s betrug (WLW, persönliche Mitteilung). Die mit WaSiM modellierten Abflussspitzen (Auflösung: 100 x 100 m², 1 h; nur Wasser, ohne Berücksichtigung der mitgeführten Sedimente) stimmen gut mit diesen Schätzungen überein (vgl. Abb. 2).

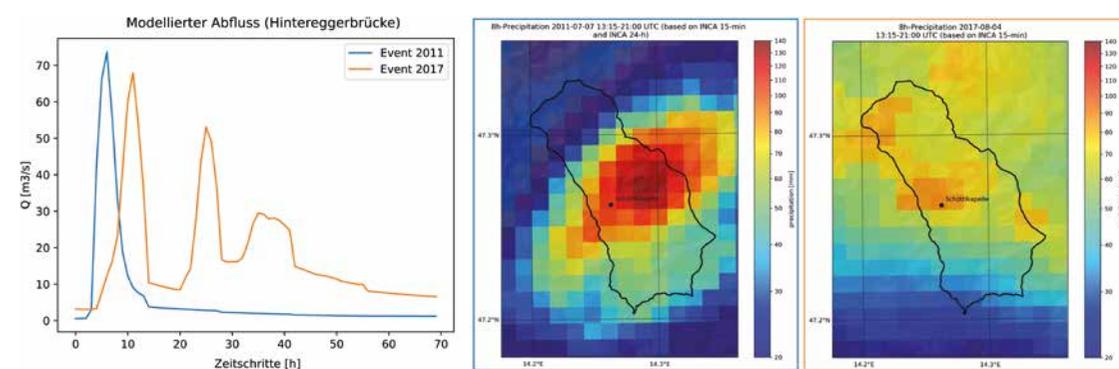


Abbildung 2: Modellierter Abfluss des Schöttlbachs am Pegel Hintereggerbrücke für die Extremereignisse 2011 und 2017 (links) und auslösende Niederschläge aggregiert über 8 Stunden (rechts).

Figure 2: Modelled discharges for the Schöttlbach at the gauging station Hintereggerbrücke during the extreme events 2011 and 2017 (left) and accumulated precipitation over 8 hours which triggered them (right).

Für die Ereignisse 2011 und 2017 wurden die volumetrischen Ablagerungen des Geschiebes im Rückhaltebecken berechnet und den Messungen der abgelagerten Sedimentfracht gegenübergestellt. Eine Unsicherheitsanalyse mit verschiedenen Modellparameterkombination (numerische Lösungsverfahren, Ansätze, etc.) sowie leichten Variationen der gewählten, geschiebehydraulischen Parameter (Korngrößen, lateraler Sedimenteintrag, Felsstrecken, etc.) ergab, dass die Menge des zugegebenen Materials von den Seitenhängen den größten Einfluss auf die Ergebnisse hatte. Zwei Extremszenarien (Szenario #1: kein lateraler Sedimenteintrag, Szenario #2: zeitlich konstanter lateraler Sedimenteintrag, der die maximale Transportkapazität des Flusses gerade

noch nicht überschreitet) sollten schließlich den Unsicherheitsbereich des anfallenden Geschiebes eingrenzen. Tabelle 2 zeigt gemessene Anlandungsvolumina (Geschiebe und Suspension) im Rückhaltebecken sowie die Kubatur der minimalen und maximalen Geschiebeanlandungen. Bei Szenario #1 konnte das gesamte Geschiebe im Rückhaltebecken aufgefangen werden, wohingegen bei Szenario #2 ein vernachlässigbar kleiner Anteil ins Unterwasser transportiert wurde. Es wird vermutet, dass die Differenz zum Gesamttransportvolumen auf Schwebstoffe, die das angewandte Modell nicht abbilden kann, rückzuführen ist. Abb. 3 zeigt die Anlandungen für das Ereignis 2011 ohne (links) bzw. mit max. lateralen Geschiebeeintrag (rechts).

Ereignis	Gemessen/Beobachtet [m ³]	Min [m ³]	Max [m ³]
2011	~ 15000 (Hübl et al., 2012)	10100	23828
2017	~ 30000 (Krenn et al., 2021)	14800	31730

Tabelle 2: Beobachtete Sedimentmengen im Rückhalteraum des Schöttlbachs nach den Ereignissen 2011 und 2017 und simulierte Spannweite.

Table 2: Observed sediment volumes at the retention basin in the Schöttlbach after the events 2011 and 2017 and simulated range of sediment volumes.

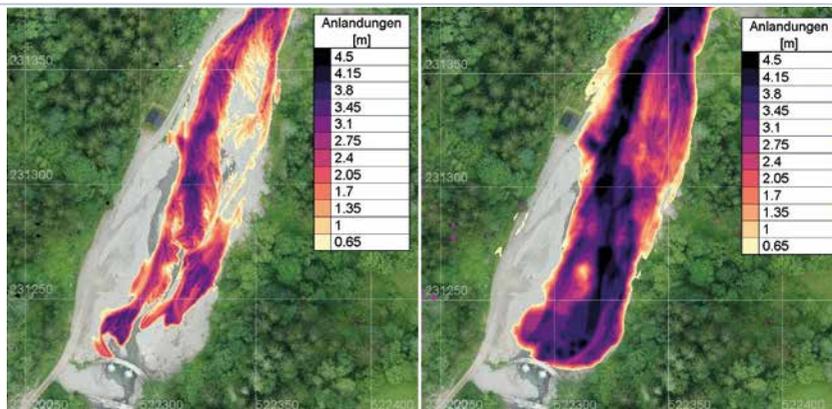


Abbildung 3: Simulierte Anlandungen für das Extremereignis 2011 mit minimalem lateralem Sedimenteintrag (links) und maximalem lateralem Sedimenteintrag (rechts).

Figure 3: Simulated sedimentation for the extreme event 2011 with minimum lateral sediment input (left) and maximum lateral sediment input (right).

Die Bestimmung von Sedimentverfügbarkeit, Sedimentmobilisierbarkeit und Sedimenttransport zur Modelleingabe und Validierung erwies sich als äußerst komplex und zeitaufwändig. Für das Ereignis 2011 wurde von Hübl et al. (2012) eine Mobilisierung von 90.000 m³ Sediment geschätzt. Im Verlauf des extremen Ereignisses wurden Hänge destabilisiert, Vegetation abgetragen und der Lauf des Wildbachs stark verändert. „Schlafende Sedimentquellen“ wurden dadurch aktiviert, so dass dieses Ereignis auch die Folgejahre durch erhöhte Sedimentverfügbarkeit und erhöhten Sedimenteintrag von den Hängen

ins Rückhaltebecken geprägt hat. Auf Basis der UAV- bzw. ALS-Datensätze konnte in RunSed-CC ein ganzheitliches Sedimentbudget (Abb. 4) für das Wildbachereignis 2017 erstellt werden, welches mit den Schätzungen des mobilisierten Volumens seitens der WLV gut übereinstimmt. In Summe wurden im Zuge dieses Extremereignisses ca. 131.000 m³ ausgetragen, von denen nur 36.000 m³ im Rückhaltebecken zurückgehalten werden konnten, während der Rest außerhalb des Untersuchungsgebietes abgelagert wurde (Krenn et al., under revision).

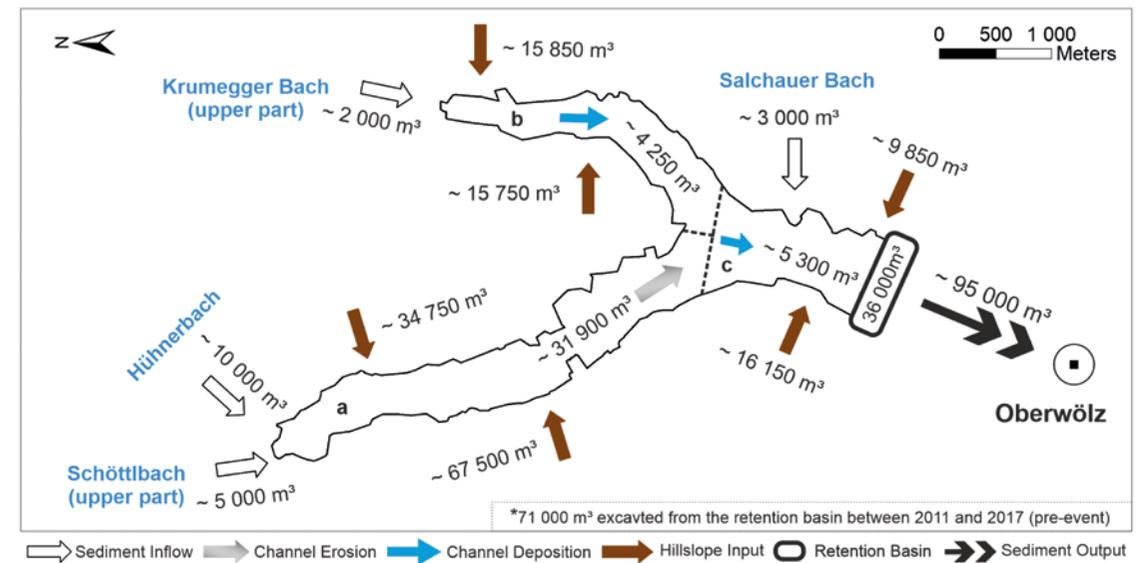


Abbildung 4: Sedimentbilanz für das Einzugsgebiet des Schöttlbachs über den Zeitraum 2011 bis 2018. Netto-Erosion im Umfang von 182.000 m³ im ULS-Untersuchungsbereich, Zufuhr aus nicht im Scan abgedeckten Seitenbächen von 20.000 m³. Im Jahr 2012 wurden 36.000 m³ und im Zeitraum 2012-2017 wurden 35.000 m³ (insgesamt 71.000 m³) abgebaggert. Während des Ereignisses konnten durch die Geschiebesperre ca. 36.000 m³ retiniert werden. Somit ergibt sich eine Sediment-Gesamtbilanz für das Einzugsgebiet von ca. 131.000 m³, das in Richtung der Geschiebesperre bzw. 95.000 m³, die in Richtung Oberwölz transportiert wurden.

Figure 4: Sediment budget for the Schöttlbach catchment over the period 2011 to 2018. The net erosion was determined 182.000 m³ in the ULS study area, sediment input of the main tributaries was estimated approx. 20.000 m³. In 2012, 36.000 m³ of sediment were excavated and in the period 2012-2017, 35.000 m³ have been removed from the retention basin. During the 2017 event 36.000 m³ of sediment have been trapped by the retention basin. Summed up 131.000 m³ were transported towards the retention basin, whereof 95.000 m³ were mobilized towards Oberwölz.

Aufgrund der unterschiedlichen hydro-meteorologischen Bedingungen der Extremwetterereignisse von 2011 und 2017 ist ein Vergleich anhand ihrer Abflussspitzen, deren Jährlichkeiten und den damit assoziierten Geschiebefrachten praktisch nicht möglich. Auch eine Gegenüberstellung der mobilisierten Kubaturen lässt sich nur bedingt durchführen, da sich das geomorphologische System des Einzugsgebietes nach dem Ereignis im Juli 2011 in einer instabilen Phase befunden hat.

Klimaszenarien sowie Extremereignisse von Abfluss und Sedimentfracht in der Zukunft

Langzeitsimulationen des Abflusses für das gesamte Einzugsgebiet des Wölzerbachs wurden mit dem hydrologischen Modell WaSiM in einer zeitlichen Auflösung von 1 Tag und mit einer räumlichen Auflösung von 1x1 km² von 1961/1971 (je nach Datenverfügbarkeit der regionalen Klimamodelle) bis zum Jahr 2100 durchgeführt. Zur Erfassung der Modellunsicherheiten wurde das gesamte ÖKS15 Ensemble (13 Läufe), zur Erfassung des „Szenarientrichters“ das mode-

rate Szenario RCP4.5 sowie das Extremszenario RCP8.5 verwendet. Beide RCP Szenarien zeigen einen deutlichen und für alle Modelle signifikanten Anstieg der mittleren Tagestemperaturen für das Teileinzugsgebiet des Schöttlbachs. Während der Anstieg im Szenario RCP4.5 0.22 °C/Dekade (Ensemble-Median über alle ÖKS15 Regionalmodellläufe) über die Periode 2021–2100 beträgt, zeigt sich für das extremere RCP8.5 ein massiver Anstieg von 0.54 °C/Dekade. Die jährlichen Niederschlagssummen zeigen für beide RCP Szenarien keinen einheitlichen Trend (Mann-Kendall Test, alpha=0.05) für die dreizehn ÖKS15 Modelle (RCP4.5, kein Trend: 9/13 Modellen, signifikant ansteigender Trend: 4/13 Modellen, signifikant fallender Trend: 0/13 Modellen; RCP8.5, kein Trend: 10/13 Modellen, signifikant ansteigender Trend: 2/13 Modellen, signifikant fallender Trend: 1/13 Modellen) in der Periode 2021–2100. Dabei ist anzumerken, dass das Modell, welches einen fallenden Trend simuliert, von Peßenteiner et al. (2021) als problematisch identifiziert wurde, da es den Niederschlag in der zweiten Jahreshälfte für die Vergangenheit um bis zu 50 % unterschätzt.

Wird der vergangene Zeitraum ab 1971 mitberücksichtigt (Periode 1971–2100), zeigen neun von dreizehn Modellen einen signifikant ansteigenden Trend der jährlich maximalen Tagesniederschläge und vier von dreizehn Modellen keinen Trend (Mann-Kendall Test, alpha=0.05; Abb. 5 links). Im Vergleich zur Vergangenheit treten diese Maxima für einige der Modelle vermehrt im Winter und Frühling auf (Abb. 5, rechts), was die Wahrscheinlichkeit für Regen-auf-Schnee Ereignisse erhöhen könnte. Insgesamt führen die Änderungen in Temperatur und Niederschlag künftig zu einer höheren Abflussvariabilität und zum Übergang von einem nivalen zu einem mehr pluvial bestimmten Abflussregime mit abnehmender Bedeutung von Schneespeicherung und Schneeschmelze.

Aufgrund des hohen Rechenaufwands konnten zukünftige Extremabflüsse nur exemplarisch für den Schöttlbach in einer Auflösung von 100x100 m² und 1 h simuliert werden. Hierfür haben wir jeweils die größten Niederschlagsereignisse für jedes der dreizehn ÖKS15 Modelle (RCP4.5) herangezogen und für jedes Ereignis 15 Zufallsrealisationen berechnet. Zusätzlich dienten ein Gleichverteilungsszenario (24 h Niederschlag auf den ganzen Tag gleichmäßig verteilt) sowie ein 1 h-Szenario (Gesamtniederschlag fällt innerhalb einer Stunde) als Extrem-Referenzen. In diesen Szenarien zeigen sich große Unterschiede zwischen den einzelnen Realisationen ein und desselben 24 h Ereignisses mit Spitzenabflüssen zwischen HQ₅ und >> HQ₃₀₀. Als Indikator für zukünftig zu erwartende Spitzenabflüsse haben wir schließlich den Multimodell-Multirealisations-Median herangezogen. Mit Abflüssen um die 150 m³/s entspricht dieser einem HQ₁₅₀ Ereignis. Im Vergleich dazu handelte es sich bei den beiden vergangenen Extremereignissen etwa um ein HQ₅₀ (2011) bzw. ein HQ₃₀ (2017).

Das Geschiebemodell zeigt eine signifikante Zunahme des Geschiebetriebs unter

zukünftigen Spitzenabflüssen. Vor allem im Rückhaltebecken und flussauf (bis ca. zur Mündung Krumeggerbach und Schöttlbach) kommt es zu großen Geschiebeanlandungen, welche jedoch unter der vereinfachten Modellannahme eines reinen Geschiebestroms großteils vom Rückhaltebecken (ca. 40.000 m³ maximaler Rückhalt) aufgehalten werden. Hinsichtlich der gesamten, anfallenden Sedimentmenge (Geschiebe + Suspension) werden jedoch signifikant höhere Werte erwartet. Die Untersuchungen der Sedimentbudgets aus den Laserscanning-Daten legen nahe, dass in der Zukunft eine überproportionale Zunahme der Sedimentfracht zu erwarten ist, wenn die Häufigkeit der Störereignisse unter die für die Stabilisierung des Wildbachsystems erforderliche Zeitspanne fällt (Krenn et al., unter revision). Dies gilt jedoch nur für Einzugsgebiete mit hoher bis quasi-unendlicher Sedimentverfügbarkeit, wie es für den Schöttlbach der Fall ist.

Schlussfolgerungen und zukünftiger Forschungsbedarf

Die Ergebnisse von Rused-CC müssen im Lichte der immanenten Unsicherheiten interpretiert werden. Sowohl in allen Schritten der Modellierung als auch in den (Mess-)Daten selbst sind Unsicherheiten vorhanden. Sensitivitätsstudien wurden daher sowohl für das hydrologische als auch das Geschiebetransportmodell durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass die Unsicherheiten in der hydrologischen Modellierung vor allem von der Wahl der Boden- und Grundwasserparameter sowie den meteorologischen Eingangsdaten dominiert werden. Durch die Verwendung aller 13 Ensemblemitglieder des ÖKS15 Datensatzes werden strukturelle Unsicherheiten, verschiedene Parameterisierungsschemata, sowie verschiedene Formen der atmosphärischen Gleichungen und abgebildete Systemprozesse der Klimamodelle

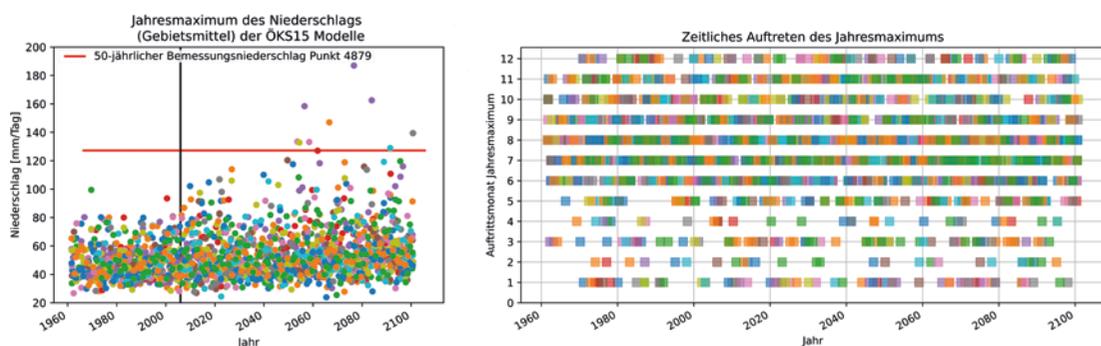


Abbildung 5: Zeitliche Entwicklung der Menge (links) und des Zeitpunkts (rechts) des jährlichen Maximalniederschlags im Einzugsgebiet des Schöttlbachs für die dreizehn Modelle des ÖKS15 Datensatzes. Für eine Beschreibung der verwendeten Modelle siehe auch Peßenteiner et al. (2021).

Figure 5: Temporal development of the amount (left) and timing (right) of the annual maximum precipitation in the Schöttlbach catchment for the thirteen models of the ÖKS15 dataset. A detailed description of the models can be found in Peßenteiner et al. (2021).

berücksichtigt. Unsicherheiten in den Szenarien der Niederschlagsdaten hoher zeitlicher Auflösung wurden in RunSed-CC durch unterschiedliche Realisationen der Disaggregation berücksichtigt. Hier liegt sicherlich ein deutliches Verbesserungspotential durch zukünftige Forschung, insbesondere durch die Verwendung von bias-korrigierten Klimaszenarien auf zumindest Stundenbasis.

Neben den bereits erwähnten Unsicherheiten bezüglich lateralem Sedimenteintrag ergeben sich im Sedimenttransportmodell weitere Unsicherheiten hinsichtlich der Aufteilung des Sedimentvolumens in Suspension und Geschiebe für die Zukunft. Prinzipiell ist festzuhalten, dass ein höherer Abfluss größere Korngrößen in Suspension transportieren kann – somit wird das gesamte Transportvolumen über eine reine Betrachtung des Geschiebetransports höchstwahrscheinlich unterschätzt, wobei eine Quantifizierung hierzu schwierig ist.

Die Unsicherheitskaskade beinhaltet auch die geomorphologische Veränderungsanalyse. Auch wenn sich das technische Setup von Airborne und UAV-borne Laserscanning ähneln, so variieren die Ergebnisse dieser zwei Methoden dennoch erheblich in ihrer Qualität, Genauigkeit und Punktdichte. Kamp et al. (under revision) konnten für das Schöttlach-Einzugsgebiet zeigen, dass über 80 % der Rasterzellen der verwendeten digitalen Höhenmodelle eine hohe bzw. sehr hohe Genauigkeit und somit geringe Höhenfehler (<0.2 m) aufweisen. Entlang des Flusskörpers selbst muss jedoch mit einer schlechteren Qualität gerechnet werden und Untersuchungen in diesen Bereichen sind kritisch zu betrachten.

RunSed-CC konnte das Verständnis von Wildbachprozessen im Klimawandel verbessern. Spezifische Ergebnisse für das Schöttlachgebiet lassen die Verallgemeinerung zu, dass der fluviale Sedimenttransport während Extremereignissen

stark von der Sedimentverfügbarkeit (z.B. nahezu unbeschränkt für den Schöttlach) abhängt und durch die Häufigkeit/Intensität der Extremereignisse (welche die Zeit für eine mögliche Stabilisierung/Konsolidierung unterschreiten oder nicht) bestimmt wird. Andererseits haben die Ergebnisse von RunSed-CC auch klare Lücken für die zukünftige Forschung aufgezeigt. Für die Charakterisierung künftiger Abflüsse bei Extremereignissen sind zeitlich hochaufgelöste (zumindest stündliche) Niederschlagswerte nötig. Diese sind derzeit über die Österreichischen Klimaszenarien (ÖKS15) nicht verfügbar. Hinsichtlich der geomorphologischen Aussagen für das Einzugsgebiet des Schöttlachs sollten längere Beobachtungsräume angestrebt werden, da aufgrund der Singularität der Ereignisse die für die Konsolidierung notwendige Zeitspanne bisher bestenfalls grob abgeschätzt werden kann. Für die Darstellung der Sedimentakkumulation durch die Sedimentmodelle sollten in Zukunft vereinfachte Ansätze bevorzugt werden, die eine langfristige Betrachtung des gesamten Einzugsgebietes ermöglichen. Darüber hinaus sind weitere Messungen des anfallenden Materials in Form von Geschiebe und Suspension notwendig, um eine ausreichende Datenbasis für solche Modelle zu schaffen.

Danksagung

Wir bedanken uns beim Österreichischen Klimafonds für die Finanzierung des Projekts RunSed-CC (ACRP, 9th call, 2016), sowie beim Österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) für die Unterstützung des Doktoratskollegs Climate Change (W1256). Der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) und dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung – Hydrographischer Dienst sowie Referat für Statistik und Geoinformation – danken wir für die freundliche Bereitstellung der Daten. Ein weiterer Dank gilt

der Gemeinde Oberwölz für die Unterstützung bei der Durchführung des Projekts. Abschließend möchten wir uns auch bei den MitarbeiterInnen des forsttechnischen Dienst der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLW) für die gute Zusammenarbeit und Bereitstellung von Daten sowie die hilfreichen Kommentare zu diesem Artikel bedanken.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Stefanie Peßenteiner
Universität Graz – Institut für
Geographie und Raumforschung
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
s.pestenteiner@edu.uni-graz.at

Paul Krenn
Universität Graz – FWF Doktoratskolleg
Klimawandel; Amt der Kärntner Landesregierung
Abt. 12 - Wasserwirtschaft
Brandhofgasse 5, 8010 Graz
paul.krenn@ktn.gv.at

Sebastian Gegenleithner
Technische Universität Graz –
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Stremayrgasse 10/II, 8010 Graz
sebastian.gegenleithner@tugraz.at

Nicole Kamp
Universität Graz – Institut für
Geographie und Raumforschung
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
nicole.kamp@edu.uni-graz.at

Wolfgang Schöner
Universität Graz – Institut für
Geographie und Raumforschung
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
wolfgang.schoener@uni-graz.at

Oliver Sass
Universität Bayreuth –
Lehrstuhl für Geomorphologie
Universitätsstraße 30,
95447 Bayreuth (Deutschland)
oliver.sass@uni-bayreuth.de

Josef Schneider
Technische Universität Graz –
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Stremayrgasse 10/II, 8010 Graz
schneider@tugraz.at

Benjamin Schrei
Universität Graz – Institut für
Geographie und Raumforschung
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
benjamin.schrei@uni-graz.at

Christoph Gaisberger
Universität Graz – Institut für
Geographie und Raumforschung
Heinrichstraße 36, 8010 Graz
christoph.gaisberger@uni-graz.at

Literatur/References:

FÖRSTER, K., HANZER, F., WINTER, B., MARKE, T., STRASSER, U. (2016). An open-source METeorological observation time series DISAggregation Tool (MELODIST v0.1.1). *Geoscientific Model Development* 9: 2315–2333.

GEGENLEITHNER, S., SCHNEIDER, J., ZENZ, G. (2020). Adaptierung eines Open Source Codes zur Modellierung von Geschiebetransport in Wildbächen. *Wasserbau-Symposium 2020, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zürich*. Konferenzpapier.

HERVOUET, J.M. (2007). *Free surface flows: Modelling with the finite element methods*. John Wiley & Sons Ltd.

HERVOUET, J.M. UND ATA, R. (2017). *User manual of opensource software TELEMAC-2D*. Technischer Bericht.

HIRSCHBERG, J., FATICHI, S., BENNETT, G. L., MCADELL, B. W., PELEG, N., LANE, S. N., SCHLUNEGGER, F., MOLNAR, P. (2021). Climate change impacts on sediment yield and debris-flow activity in an Alpine catchment. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 126, e2020JF005739.

HÜBL, J., EISL, J., HOHL, D., KOGLNIG, B. (2011). Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach. Band 1: Ereignisdokumentation, Report number 143, Band 1, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.

HÜBL J., EISL J., KUNDELA G., HOHL D., KARAGIORGO K., HOFER B., TSCHARNER S., WAGNER M. (2012).

Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Wölzerbach Band 2: Ereignisanalyse. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

KAMP N., KRENN P., AVIAN M., SASS O. (under revision).

Comparability of Multi-Temporal DTMs derived from different LiDAR Platforms: Error Sources and Uncertainties in the Application of Geomorphic Impact Studies. Earth Surface Processes and Landforms.

KRENN P., KAMP N., PEsSENTEINER S., SASS O. (under revision).

Analysing the impacts of extreme torrential events using multi-temporal LiDAR datasets – a geomorphic impact study from the Schöttlbach catchment, Upper Styria, Austria. Earth Surface Processes and Landforms.

KRENN P., PEsSENTEINER S., KAMP N. (2019).

Das Wildbachereignis von 2017 im Einzugsgebiet des Schöttlbaches (Oberwölz) – eine geomorphologische Bestandsaufnahme mittels UAV-borne Laserscanning (ULS). In: Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz. Gefahrenzonenplanung 184: 224-237.

MEISSL, G., FORMAYER, H., KLEBINDER, K., KERL, F., SCHÖBERL, F., GEITNER, C., MARKART, G., LEIDINGER, D., BRONSTERT, A. (2017).

Climate change effects on hydrological system conditions influencing generation of storm runoff in small Alpine catchments. Hydrological Processes 31: 1314-1330.

PEsSENTEINER S., HOHMANN C., KIRCHENGAST G., SCHÖNER W. (2021).

High-resolution climate datasets in hydrological impact studies: Assessing their value in alpine and pre-alpine catchments in southeastern Austria. Journal of Hydrology: Regional Studies 38: 100962.

PEsSENTEINER, S., GEGENLEITHNER, S., KRENN, P., KAMP, N. (2020).

Modellierung vergangener und zukünftiger Abflüsse und Sedimentfrachten mit freier Software – Einblicke am Beispiel des Schöttlbach (Niedere Tauern). Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 72: 308-319.

SASS, O., HARB, G., TRUHETZ, H., STANGL, J., SCHNEIDER, J. (2015).

Impact of Climate Change on the sediment yield of small catchments. Abschlussbericht Projekt ClimCatch. Klima- und Energiefonds Projekt B175084.

SCHÖNER, W., PEsSENTEINER S., GAISBERGER C., SCHREI B., SASS O., KRENN P., KAMP N., SCHNEIDER J., GEGENLEITHNER S. (2021).

Modelling future runoff and sediment transport in alpine torrents. Abschlussbericht Projekt Runsed-CC. Klima- und Energiefonds Projekt B670310.

SCHULLA, J. (2017).

Model Description WaSim. Technical Report, www.wasim.ch (05.05.2021)
Tassi, P. (2017). User manual of opensource software SISYPHE. Technischer Bericht.

TACCONE, F., ANTOINE, G., DELESTRE, O., GOUTAL, N. (2018).

A gravity-driven runoff and erosion model for sediment transfers at the catchment scale. E3S Web Conf 40:04019.

WINTER, B., SCHNEEBERGER, K., DUNG, N.V., HUTTENLAU, N., ACHLEITNER, S., STÖTTER, J., MERZ, B., VOROGUSHYN S. (2019).

A continuous modelling approach for design flood estimation on sub-daily time scale. Hydrological Sciences Journal 64: 539–554.

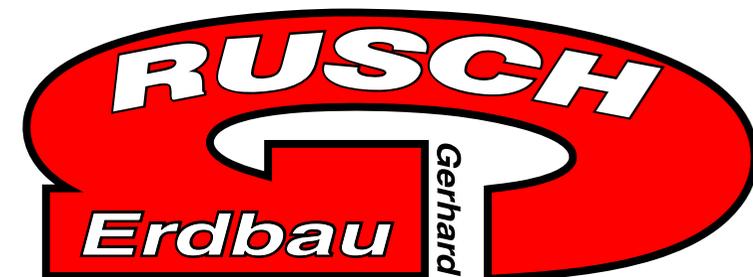
ALPIN CONSULTING
DI WERNER TIWALD ZT-GMBH

ZT für WLW -, Studien, Projekte, Gutachten, Ausschreibungen,
Baubegleitung, Sicherheitsanalysen, Wildbachbegehungen...

Standort Ost
Langseitenrotte 19
3223 Wienerbruck

Standort West
Saurweinweg 5
6020 Innsbruck

T: +43 2728 20404
M: +43 664 2047240
Web: www.tiwald.at



Alberschwende
Mobil 0664/13 13 447

THOMAS ZIEHER, JAN PFEIFFER, VERONIKA LECHNER,
KENT VON MAUBEUGE, HELGE HOYME, HELMUT HOCHREITER, DANIELA ENGL

Einsatz einer Bentonitmatte mit biologisch abbaubaren Komponenten für die Abdichtung von Gerinnebetten

Zusammenfassung:

Bei der Umsetzung von Verbauungsprojekten ist es oftmals gefordert, den Untergrund gegen den Eintrag von Oberflächenwasser abzudichten (z.B. Drainagen, Abführen von Oberflächenabfluss, Gerinneabdichtung). Verschiedene Techniken kommen dabei je nach Gebieteigenschaften zum Einsatz, wobei meist synthetische Materialien verwendet werden. Durch Fortschritte in den Materialwissenschaften können synthetische Materialien zunehmend durch biologisch abbaubare, ökologisch nachhaltige Lösungen substituiert werden, die eine vergleichbare Wirkungsweise erreichen. In diesem Zusammenhang wurde ein Feldexperiment im hydrologischen Einzugsgebiet der langsamen, tiefgründigen Massenbewegung Vögelsberg (Marktgemeinde Wattens, Tirol) eingerichtet. Die wiederholten Beschleunigungsphasen der Massenbewegung mit Geschwindigkeiten bis zu 10 cm/Jahr korrelieren mit Perioden erhöhter Grundwasserneubildung, welche es mit verschiedenen Maßnahmen zu verringern gilt. Ziel des Experiments war es, einen 25 m langen Bachabschnitt mit erneuerbaren Materialien abzudichten. Dazu kam erstmalig ein Prototyp einer Bentonitmatte mit biologisch abbaubarem Trägermaterial der Firma Naue zum Einsatz. Die Funktionalität der Bentonitmatte sowie das Einbaudesign wurden mit periodischen Monitoring-Kampagnen evaluiert. Dazu wurden wiederholt Messungen mit Geoelektrik und terrestrischem Laserscanning durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Bentonitmatte im Zeitraum von August 2020 bis April 2022 die Infiltration von Bachwasser in den Untergrund entlang der Teststrecke verhindern konnte, während die geotextile Deckschicht des Produktes bereits weitgehend abgebaut wurde. Die Böschung und die Sohle des Gerinnes blieben nach dem Einbringen eines Erosionsschutzes stabil. Die neuartige Bentonitmatte kann daher als effektive Alternative zu bestehenden Techniken mittels synthetischen Materialien verwendet werden – vor allem in ökologisch sensiblen Gebieten.

Stichwörter:

Hydrologische Maßnahmen, natur-basierte Lösung, Hang-Drainagierung, tiefgründige Massenbewegung

Using a bentonite mat with bio-degradable components for sealing leaky streambeds

Abstract:

Mitigation measures against the impacts of natural hazards often require sealing the subsurface against infiltration of surface water (e.g. drainages, discharge of surface runoff, sealing of streambeds). For this purpose, various techniques are used which typically rely on synthetic materials. However, progress in materials science and development would often allow replacing synthetic components by renewable, bio-degradable materials providing the same functionality. In this context, an experimental setup was installed in the upslope catchment area of an active, slowly moving deep-seated landslide in Vögelsberg (Tyrol, Austria). At the chosen location the infiltration losses along the unconsolidated streambed potentially contribute to groundwater recharge, which is considered a main hydrological driver of the landslide's repeated acceleration phases with velocities up to 10 cm/year. The goal of the experiment was to permanently seal a 25 m long section of a stream without relying on synthetic materials. To reach this goal, a prototype of a bio-degradable bentonite mat provided by the company Naue was implemented as an impermeable layer along the leaky stream section. The performance of the mat and the implementation design were evaluated based on repeated monitoring campaigns including electrical resistivity tomography and terrestrial laser scanning. The results show that the bentonite mat prevented the infiltration of surface water from August 2020 to April 2022, while the geotextile top layer was substantially depleted. The embankments and the streambed remained stable, particularly after implementing an erosion protection. Therefore, the tested bentonite provides an efficient alternative to sealing methods based on synthetic materials, particularly in ecologically sensitive areas.

Keywords:

Hydrological measures, nature-based solution, hillside drainage, deep-seated landslide

Einleitung

Aktive, sich langsam bewegende, tiefgründige Massenbewegungen zeichnen sich meist durch großräumige sowie raumzeitlich differenziert auftretende Hangdeformationen aus. Vor allem Differenzialbewegungen an Schollengrenzen und lokale Setzungen können erhebliche Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen. Hang- oder Grundwasser ist dabei ein entscheidender Faktor, der die Aktivität tiefgründiger Massenbewegungen maßgeblich beeinflusst (Brückl et al. 2013). Beschleunigungsphasen treten dabei als Folge erhöhter Porenwasserdrücke in der tiefliegenden Scherzone auf. Stabilisierungsmaßnahmen und Sanierungskonzepte, die auf eine Verringerung der Porenwasserdrücke abzielen, sind dabei vielversprechende Werkzeuge um eine Massenbewegung zu verlangsamen (Eberhardt et al. 2007; Hofmann und Sausgruber 2017). Ein wesentlicher Teil derartig umfassender Sanierungsmaßnahmen ist das Abdichten von Gerinnebetten, um aktive Massenbewegungen in versickerungsfähigen Untergründen hydrologisch zu verhindern.

Im Einflussbereich einer aktiven Massenbewegung am Eingang des Wattentals (Marktgemeinde Wattens, Tirol) wurden Wasserverluste in Gerinnebetten erkannt und als eine von mehreren Sofortmaßnahmen in Form von Kunststoffhalbschalen temporär abgedichtet. Da diese technische Maßnahme allerdings wartungsanfällig und nicht als dauerhafte Lösung konzipiert ist, wurde im H2020-Projekt OPERANDUM (Open-air laboratories for nature-based solutions to manage hydro-meteorological risks) an einer ökologisch nachhaltigen Alternative gearbeitet. In Zusammenarbeit des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung (IGF), der Wildbach- und Lawinerverbauung (GBL Mittleres Inntal), des

Bundesforschungszentrums für Wald (BFW) und der Firma Naue GmbH & Co. KG wurde dazu ein Prototyp einer Bentonitmatte mit biologisch abbaubaren Komponenten an einer Versuchsstrecke oberhalb der Massenbewegung eingebaut. Der anschließend quellende Bentonit fungiert dabei langfristig als impermeable Schicht, um die Infiltration von Bachwasser zu verhindern. Die abbaubaren Trägermaterialien dienen in erster Linie dem effizienten und gleichmäßigen Einbau der Matte und werden im Falle des getesteten Prototyps mit der Zeit durch natürliche Prozesse abgebaut. An der Versuchsstrecke wurden nach dem Einbau über 1,5 Jahre wiederholt Messungen mittels Geoelektrik durchgeführt, um die Dichtigkeit der Matte zu evaluieren. Zudem wurde die Oberfläche im Nahbereich der Versuchsstrecke mehrfach mittels terrestrischem Laserscanning eingemessen, um die Stabilität der aufgearbeiteten Böschung zu beobachten.

Im Beitrag wird zunächst die Massenbewegung Vögelsberg vorgestellt und die Ergebnisse der wissenschaftlichen Studien zu ihren hydro-meteorologischen Treibern zusammengefasst. Anschließend werden Prinzipien der Wirkungsweise von Bentonitmatten und die Besonderheiten des getesteten Prototyps beschrieben. In dem darauffolgenden Absatz werden die Ergebnisse des Monitorings vorgestellt und abschließend Potenziale und Limitationen des getesteten Prototyps diskutiert.

Untersuchungsgebiet – die Massenbewegung Vögelsberg

In der Fraktion Vögelsberg (südwestlich des Ortszentrums der Marktgemeinde Wattens, Tirol) sind Schäden an mehreren Gebäuden auf tiefgründige Rutschprozesse zurückzuführen (Tanzer & Außerlechner 2021). Die Kombination von

umfassendem geodätischem Monitoring und der (geo-)morphologischen Interpretation dominanter Geländeformen ermöglichten eine Abgrenzung und Einteilung des aktiven Rutschkörpers in zwei Schollen mit einer Gesamtgröße von ca. 20 Hektar (Abb. 1a und 1b). Dieser Bereich befindet sich an der Stirn eines großräumigen Talzuschubsystems. Typische Geländeformen wie unregelmäßiges, gestauchtes und konvex erscheinendes Gelände im Bereich des Hangfußes (750 m ü.A.) bis zu den von Doppelgraten, Nackentälchen und Zerspalten geprägten südwestlichen Gratregionen mit den Gipfeln des Glotzens und Largozauf 2214 m ü.A. begrenzen das System. Im hydrologischen Einzugsgebiet des aktiven Rutschkörpers befinden sich die permanent wasserführenden Gerinne Vögelerbach und Schwoagerbach (Lage siehe Abb. 1a). Anhand von Inklinometermessungen in einem Bohrloch (Lage siehe Abb. 1a) konnte die Scherzone mit den Hauptversätzen in 48–49 m Tiefe lokalisiert werden. Tachymetermessungen, bereitgestellt durch die Abteilung für Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung, zeigen Bewegungsraten von bis zu 10 cm pro Jahr für die Teilscholle Nord und bis zu 5 cm pro Jahr für die Teilscholle Süd (Engl 2018).

Beschleunigungsphasen der aktiven Massenbewegung treten nach langandauernden Regen- oder Schneeschmelzeereignissen auf, welche zu einer verstärkten Grundwasserneubildung führen. Nachweise und detaillierte Beschreibungen der hydro(geo)logischen Treiber wurden mithilfe eines räumlich verteilten, physikalisch-basierten, hydro-klimatologischen Modells (Pfeiffer et al. 2021) und unter Anwendung sowie geostatistischer Auswertung von natürlichen Tracer-Signalen (Pfeiffer et al. 2022) erbracht. Flächig simulierte Zeitreihen des zur Infiltration bereitstehenden Wassers in Kombination mit Bewegungszeitreihen ermöglichten die Analyse vergangener

hydro-meteorologischer Auslöseereignisse. Seit Beginn der kontinuierlichen Deformationsaufzeichnungen im Mai 2016 wurden insgesamt drei Ereignisse mit überdurchschnittlicher Wasserverfügbarkeit identifiziert. Eine ausgeprägte Schneeschmelze im Nahbereich des aktiven Rutschkörpers im Frühjahr 2019 führte nahezu unmittelbar zu einer markanten Beschleunigung der Massenbewegung. Die wesentlich später einsetzende Schneeschmelze in höheren Lagen konnte dabei zeitlich nicht mit den aufgezeichneten Bewegungsraten in Verbindung gebracht werden. Im Gegensatz dazu deuten Tracer-Signale des Grundwassers jedoch auf eine großräumigere Ausdehnung des Einzugsgebiets von 1000 m ü.A. bis zu den Gipfelregionen auf 2200 m ü.A. hin (Pfeiffer et al. 2022). Langanhaltende und wiederkehrende Regenfälle im Frühsommer 2016 sowie Spätsommer 2017 sorgten ebenfalls für einen ausgeprägten Wasserüberschuss, welcher mit einer Verzögerung von etwa einem Monat zum Anstieg der Versatzraten führte (Pfeiffer et al. 2021).

Ungeachtet der raumzeitlichen Reaktionsunterschiede der aktiven Massenbewegung auf langanhaltende Regenfälle oder intensive Schneeschmelze, konnten alle bisher beobachteten Beschleunigungsphasen auf ein hydro-meteorologisches Ereignis und somit auf eine überdurchschnittliche Grundwasserneubildung zurückgeführt werden. Daraus folgt im Umkehrschluss, dass etwaig gesetzte Maßnahmen zur Reduzierung der Grundwasserneubildung auch die Aktivität der Massenbewegung mindern können. In diesem Zusammenhang ist die Verhinderung von Versickerungsverlusten an permanent wasserführenden Gerinnen im hydrologischen Einzugsgebiet der aktiven Massenbewegung, neben anderen Maßnahmen (wie geplanten Drainagefächern), ein zweckmäßiges Mittel.

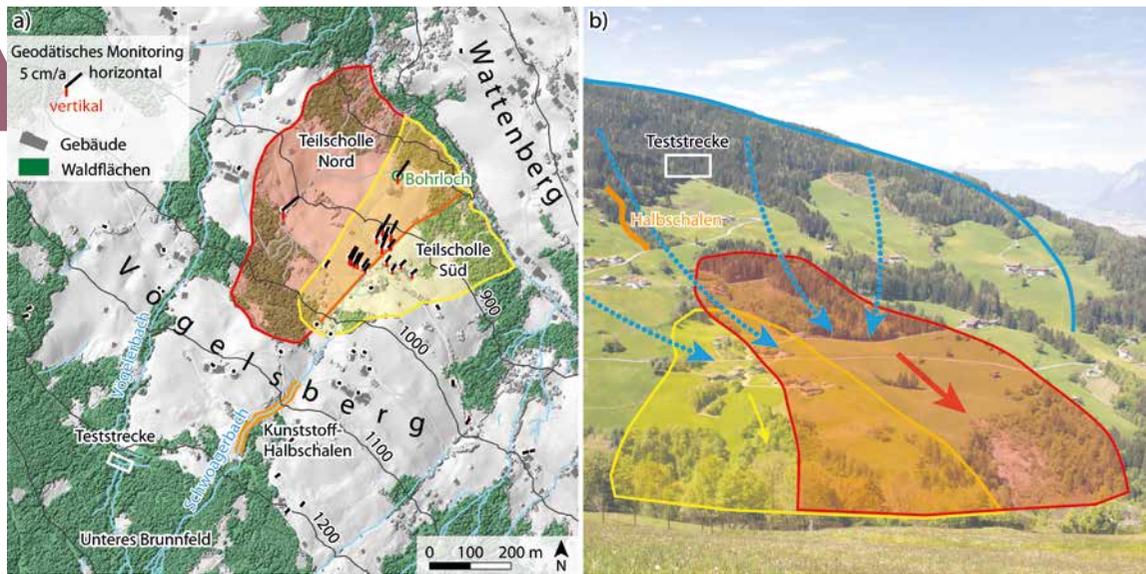


Abbildung 1: (a) Übersicht der Massenbewegung Vögelsberg und ihren zwei Teilschollen (gelb und rot), Lage des Bohrlochs, sowie Bachabschnitt mit Halbschalen und Lage der Teststrecke und (b) Aufnahme von Wattenberg in Richtung Westen mit schematischer Darstellung der beiden Teilschollen (gelb und rot) und dem hydrologischen Einzugsgebiet (Foto: T. Zieher, 26.05.2021).

Figure 1: (a) Overview of the Vögelsberg landslide and the distinguished slabs (yellow and red), position of the drill hole and the half-shell prepared section as well as position of the test track. (b) Image taken from Wattenberg with schematic representation of the two slabs (yellow and red) and the hydrological catchment. (photo: T. Zieher, 26.05.2021)

Eingesetzte Materialien und Einbau

Getesteter Bentonitmatten-Prototyp

Die Bentonitmatten mit biologisch abbaubaren Komponenten ist eine dünnlagige, hocheffektive mineralische Abdichtungsschicht, welche je nach Erfordernis Schluff und/oder Ton und/oder Bentonit enthält, die zwischen zwei dehnbaren und/oder robusten Textillagen eingekapselt wird. Durch die vollflächige Vernadelung der Textillagen kann die Tondichtungsbahn richtungsunabhängig Schubkräfte aufnehmen. Die Textillagen der Dichtungsbahn Bentofix® Green sind unter natürlichen Bedingungen vollständig biologisch abbaubar. Die Dichtungswirkung und die langfris-

tige Scherfestigkeit von Bentofix® Green können derzeit prinzipiell projektspezifisch gesteuert und angepasst werden. Somit ist diese Bentonitmatten-typen eine natürliche mineralische Abdichtung von der Rolle. Sie steht derzeit projektspezifisch für innovative und ökologische Pilotanwendungen zur Verfügung. Die Auslegung der Komponenten erfolgt daher in enger Abstimmung mit den Projektpartnern.

Wie die üblicherweise verwendeten Bentonitmatten ohne biologisch abbaubare Komponenten, wird auch diese Bentonitmatten-typen nach dem Einbau mit einer mindestens 30 cm mächtigen Oberbodenschicht abgedeckt. Diese Oberbodenschicht soll ein freies Quellen des Bentonits unterbinden und wirkt zudem als eine Schutzlage gegenüber externen Belastungen.

Typische Anwendungen dieser neuen Bentonitmatten sind:

- Langfristige Ufer- und Sohlabdichtungen von z. B. Teichen, Dämmen, Becken oder Fließgewässern
- Abdichtungen von Gräben und Mulden zur Vermeidung von ungewünschtem Wassereintrag in den Untergrund
- Anfangsabdichtung von Fließgewässern an der Sohle und im Uferbereich. Im Laufe der Zeit bilden sich an Gewässersohlen sogenannte Kolmationsflächen aus, die die Versickerung verhindern und verlangsamen. Zur Beschleunigung der Kolmation und insbesondere für die initiale Dichtwirkung ist diese Type eine vielversprechende ökologische Lösung

Vorteile des getesteten Prototyps gegenüber Maßnahmen mit synthetischen Materialien:

- Ökologisch nachhaltig: vollständig biologisch abbaubare Materialien, keine langfristige Belastung des Untergrunds
- Wartungsfrei und langlebig: Nach Abbau des Trägermaterials verbleibt die Bentonitschicht und stellt die Abdichtung längerfristig sicher, sofern sie unbeschädigt bleibt (> 100 Jahre)

Die Vorteile der Bentonitmatten gegenüber der Einbringung einer verdichteten Lehm-/Tonschicht (compacted clay liner, als Alternative zum getesteten Prototyp ohne synthetische Materialien) als Abdichtung:

- Einfachere Handhabung der Bentonitmatten: schnelles Ausrollen anstatt aufwändigem Aufbringen einer Lehm-/Tonschicht
- Geringere Fehleranfälligkeit beim Einbau als bei einer Lehm-/Tonschicht
- Weniger Material erforderlich (Matten mit 1 cm Stärke anstatt mehrerer Dezimeter

Lehm/Ton), wodurch weniger Transportfahrten notwendig sind und Zeit eingespart wird

- „Selbstheilung“ des Bentonits: Im Falle der Austrocknung schließen sich Trockenrisse nach erneuter Durchfeuchtung

Einbau an der Teststrecke

Nach dem Durchlaufen des Genehmigungsverfahrens nach dem Tiroler Naturschutzgesetz (TNSchG 2005) und dem Wasserrechtsgesetz (WRG 1959) mit positivem Bescheid wurde der Einbau der Bentonitmatten an der Teststrecke gemeinsam mit den Projektpartnern detailliert geplant und vorbereitet. Vorab wurden Rammsondierungen mittels leichter Rammsonde durchgeführt, um die Regolithmächtigkeit abzuschätzen. Im Bereich der Teststrecke wurden Mindesttiefen von 4–7 m sondiert, wodurch der oberflächennahe Einbau der Bentonitmatten problemlos möglich war.

Nach erfolgter Lieferung der Rolle mit 30 m Länge und 5 m Breite und einem Gewicht von etwa 1 t, wurde die Bentonitmatten mittels Cuttermesser in 4 m lange Abschnitte vorbereitet. Bei der Entladung und der Vorbereitung wurden mechanische Belastungen der Rolle und Verunreinigungen der Matte mit ölhaltigen Flüssigkeiten (die eine Quellung des Bentonits verhindern würden) vermieden. An der Teststrecke im Vöglerbach wurde nach Errichtung einer Wasserhaltung zeitgleich ein ca. 25 m langer Graben mit etwa 4 m Breite und ca. 0,7 m Tiefe entlang des Gerinnes mittels Löffelbagger ausgehoben (Abb. 2a, 2b). Abbildung 2a zeigt den erstellten Verlegeplan der 7 Abschnitte mit jeweils zumindest 0,3 m Überlappung. Die Überlappungen der Abschnitte wurden abfallend in Fließrichtung des Baches ausgeführt. Dementsprechend wurden die Abschnitte

gegen die Fließrichtung verlegt. Der Randbereich der Bentonitmatte wurde bereits werksseitig mit Bentonitpulver eingestreut, wodurch die Überlappungen nach Verlegung abgedichtet werden. Zusätzlich wurde eine Paste aus Bentonitpulver und Wasser vorbereitet, die auf die Überlappung aufgebracht wurde und die Abdichtung garantiert. Um die Stabilität der Böschungen während des Einbaus und danach zu gewährleisten, wurde ein maximales Gefälle von etwa 2:3 nicht überschritten. Generell war das Ziel, die ursprüngliche Geometrie des Bachabschnittes nach dem Einbau wiederherzustellen.

Der Einbau erfolgte an drei Tagen im August 2020 unter fachkundiger Anleitung und tatkräftiger Mithilfe von Kent von Maubeuge

(Fa. Naue GmbH & Co. KG). Die Verlegung der Abschnitte erfolgte manuell, da das geringe Gewicht der vorbereiteten Rollen kein maschinelles Ausbringen erforderte (Abb. 2c). Unmittelbar vor dem Verlegen eines Abschnittes wurde auf den Überlappungsbereich die vorbereitete Bentonitpaste aufgetragen (Abb. 2d). Die Paste stellt eine dichte Verbindung der einzelnen Abschnitte her. Im Bereich der Kurve am Einlauf des Baches in die Teststrecke wurde die Fließgeschwindigkeit mit Hilfe eines einfachen Querwerkes (quer eingebauter Baumstamm) reduziert, um Erosion vorzubeugen. Abschließend wurden die Bentonitmatten mit dem autochthonen Bachsubstrat wieder überdeckt.

Zwei Monitoring-Kampagnen begleiteten das Feldexperiment an der Teststrecke. Zum einen wurde die Dichtheit der Bentonitmatte mittels mehrfachen Geoelektrik-Messungen überprüft, zum anderen wurde die Stabilität der Böschung mittels terrestrischem Laserscanning beobachtet. Zur Evaluierung der Dichtheit der Bentonitmatte wurde entlang der Teststrecke ein Profil mittels Geoelektrik (Lippmann 4point light 10 W) zu sechs unterschiedlichen Zeitpunkten gemessen. Das Profil wurde mit 40 Sonden im Abstand von 1 m ausgestattet (Abb. 3a). Auf die resultierenden Profildaten wurde ein multi-temporaler Inversionsalgorithmus (Kim et al. 2009, Loke et al. 2014, Software RES2DINV, Aarhus GeoSoftware 2020) angewendet, um die zeitlichen Veränderung des elektrischen Widerstandes zu erhalten. Die so berechneten Modelle geben Charakteristika des Untergrunds (z.B. elektrische Leitfähigkeit, Lagerungsdichte, Wassergehalt) wieder und zeigen Veränderungen über die Zeit. Damit können Muster der Infiltration zerstörungsfrei wiedergegeben und interpretiert werden.

Nach der ersten Aufnahme im Dezember 2019 zur Dokumentation des Originalzustandes wurde die Oberfläche im Bereich der Teststrecke während des Einbaus und im Anschluss mit insgesamt acht Laserscanning-Kampagnen vermessen. Dabei kam ein terrestrischer Laserscanner (Riegl VZ-2000i) zum Einsatz. Die multitemporalen 3D Punktwolken wurden aufeinander registriert (Software Riegl RiScanPro, Riegl 2022), anhand vorhandener airborne Laserscanning-Daten von 2007 (bereitgestellt durch die Abteilung für Geoinformation des Amtes der Tiroler Landesregierung) georeferenziert (Projektion Austria GK West,

EPSG 31254) und anschließend Bodenpunkte gefiltert (Axelsson 2000). Aus den Bodenpunkten wurden digitale Geländemodelle mit einer räumlichen Auflösung von 10 cm abgeleitet. Die Differenzen zwischen den individuellen Geländemodellen erlaubten es, Rückschlüsse auf zwischenzeitliche Veränderungen der Geländeoberfläche zu ziehen.

Ergebnisse des Monitorings

Monitoring der Dichtheit

Ein Vergleich der Geoelektrik-Ergebnisse vor (Abb. 3a) und nach dem Einbau (Abb. 3b-f) zeigt eine deutliche oberflächennahe Reduktion des elektrischen Widerstandes oberhalb der eingebauten Bentonitmatte (strichlierte Linien in Abb. 3). Diese Reduktion kann auf Veränderungen der Materialeigenschaften durch den Einbau und einen erhöhten Wassergehalt zurückgeführt werden. Die markante Erhöhung des elektrischen Widerstandes unterhalb der Matte könnte auf eine Verringerung des Wassergehalts hindeuten, ist jedoch sehr wahrscheinlich ein Artefakt bedingt durch das Mess- und Auswerteverfahren. In allen Aufnahmen nach dem Einbau (Abb. 3b-f) ist die oberflächennahe Reduktion des elektrischen Widerstandes deutlich erkennbar, wobei sich der Widerstand unterhalb der Matte im Vergleich zur ersten Aufnahme zu keinem Zeitpunkt verringert. Dies legt nahe, dass das Wasser des Gerinnes trotz zumindest anfangs locker gelagertem Materials die Bentonitmatte nicht durchdringen konnte und auch die Überlappungen der Abschnitte dichthalten.

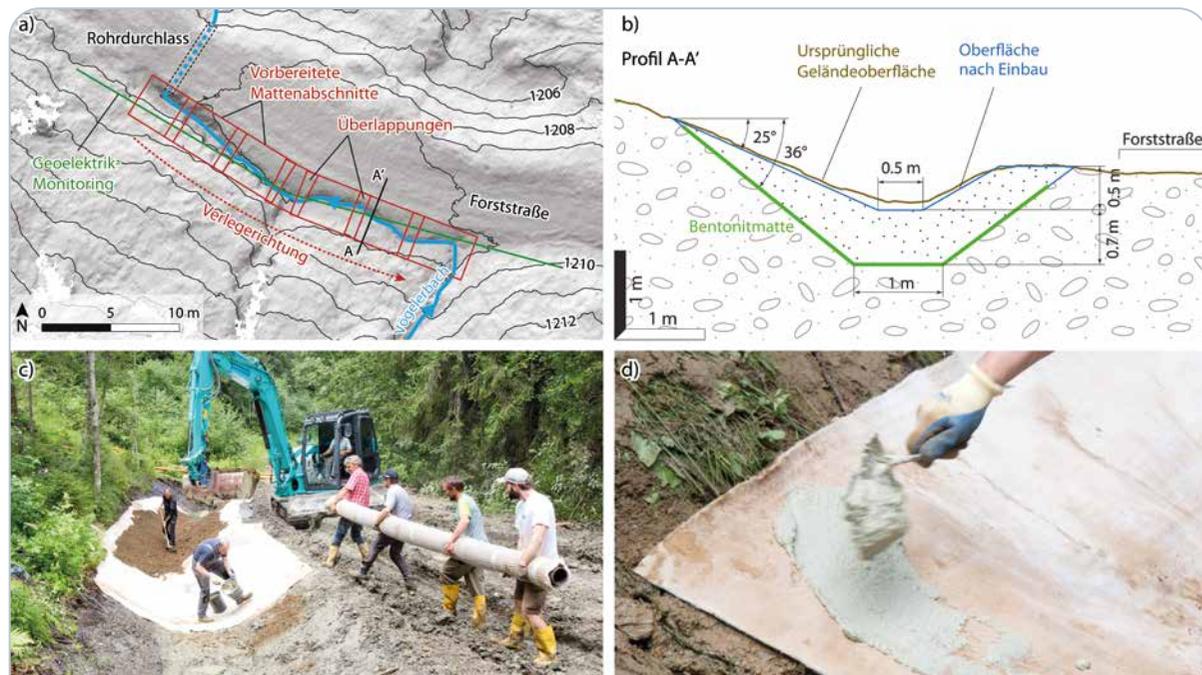


Abbildung 2: Skizzen des Verlegeplans der vorbereiteten Mattenabschnitte entlang der Teststrecke und Profil des Geoelektrik-Monitorings (a), schematische Profildarstellung des Einbaus entlang des Profils A-A' (b), Fotos von der manuellen Verlegung eines Mattenabschnitts (c) und der Herstellung der Überlappungen mittels Bentonitpaste (d).

Figure 2: Installation plan of the prepared test section showing the location of the geoelectric monitoring profile (a), schematic profile of the installation along the profile A-A' (b), and photos showing the field implementation of the mat (c) and establishing sealed overlaps using bentonite paste (d).

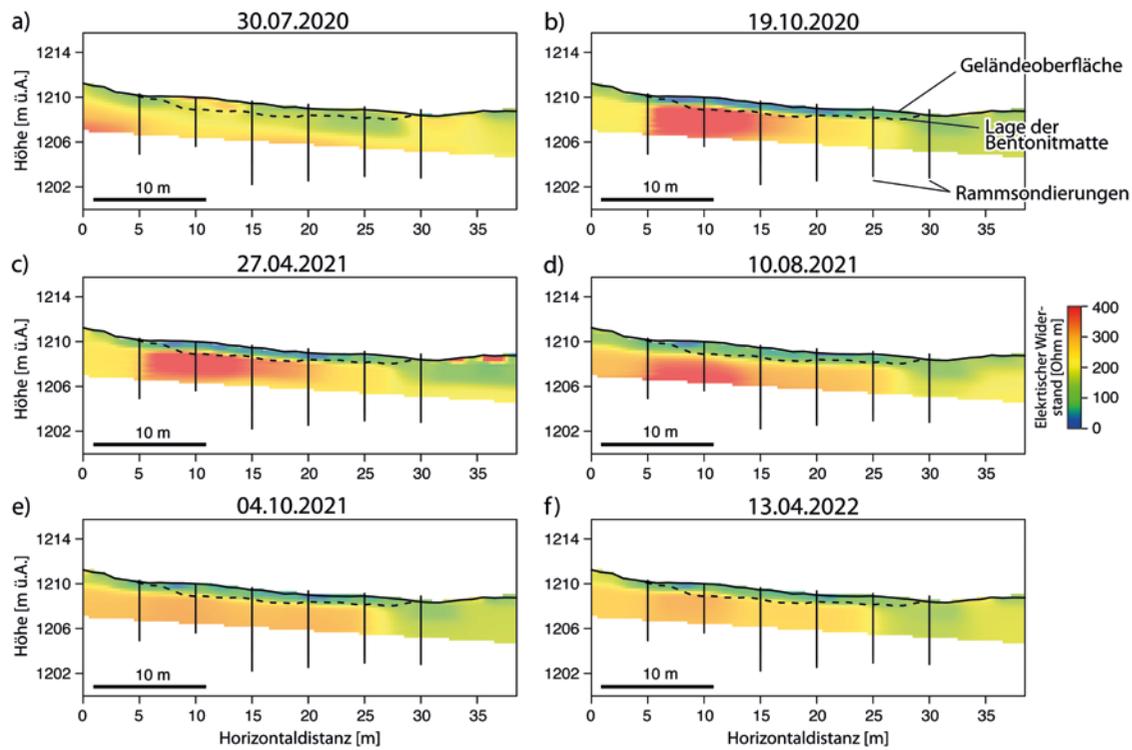


Abbildung 3: Ergebnisse des Geoelektrik-Monitorings längs der Teststrecke (Profil siehe Abb. 2a), Lage der Bentonitmatte (abgeleitet aus Laserscanning-Daten vom 05.08.2020) und erhobene Minimalstiefen des Lockermaterials anhand der Rammsondierungen.

Figure 3: Geoelectric-monitoring results along the test section (profil see figure 2a), position of the bentonite mat (derived from August 5th 2020 laser scanning data) and minimal depths of the loose material derived from dynamic cone penetration tests.

Monitoring der Sohl- und Böschungstabilität

Die Differenzen der abgeleiteten Geländemodelle in Abb. 4a und Abb. 4b zeigen das während des Einbaus ausgehobene (Abb. 4a, in Rot dargestellt) und wieder aufgebrachte (Abb. 4b, in Grün dargestellt) Material von etwa 36 m³. Im Anschluss wurde die Bachsohle nach Erosionserscheinungen aufgrund eines kleineren Hochwassers im August 2020 im unteren Streckenabschnitt (Abb. 4h) mit Steinen und Blöcken der Korngröße bis 500 mm stabilisiert (Abb. 4i). Die Geometrie der

Böschungen wurde dadurch minimal verändert (Abb. 4c). In weiterer Folge kam es von Oktober 2020 bis April 2022 zu keinen signifikanten Veränderungen der Sohle und der Böschungen. Auch während Phasen verstärkten Abflusses wie etwa zur Schneeschmelze oder nach Starkregen-Ereignissen traten keine Veränderungen auf. Lediglich im Bereich des Rohreinlaufs am Ende der Verbauungsstrecke tiefte sich der Vögelerbach zuletzt bis auf das Niveau des Rohres ein.

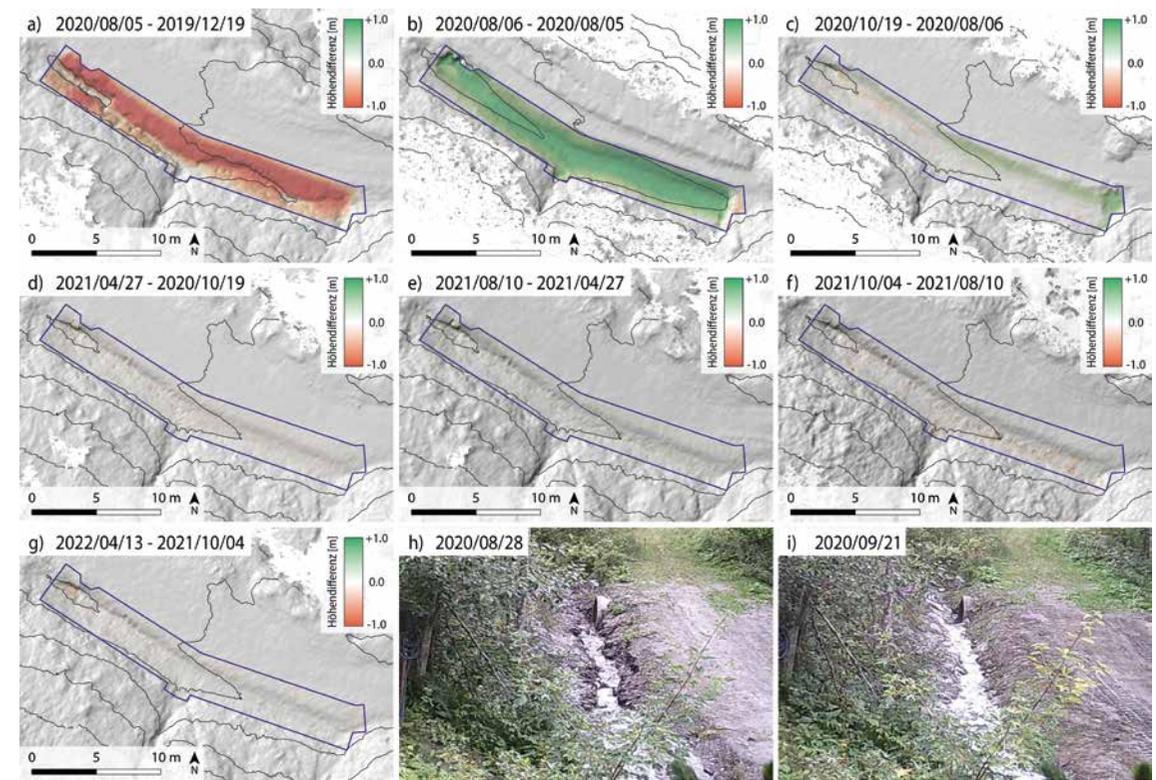


Abbildung 4: Ergebnisse des Monitorings mittels terrestrischem Laserscanning (a-g) und Aufnahmen einer automatischen Kamera (h,i). Die Karten zeigen die Höhendifferenzen zwischen den einzelnen Laserscanning-Aufnahmen auf Basis generierter digitaler Geländemodelle mit einer räumlichen Auflösung von 10 cm.

Figure 4: Monitoring results of the terrestrial laser scanning (a-g) and images of an automatic camera (h,i). The maps shows the height differences between the individual laser scanning acquisitions based on generated digital terrain models with spatial resolution of 10 cm.

Diskussion und Ausblick

Potential

Der verwendete Prototyp einer Bentonitmatte mit biologisch abbaubaren Komponenten hat sich im Rahmen des vorgestellten Feldexperiments für die Abdichtung des Untergrundes bewährt. Die Ergebnisse des Monitorings zeigen, dass die Matte im Beobachtungszeitraum die Infiltration in den Untergrund verhindern konnte. An einem Aufschluss wurde im April 2022 der Zustand der

Matte geprüft, wobei das leichter verwitterbare Deckmaterial bereits weitgehend abgebaut war. Die Bentonitschicht war vollständig durchfeuchtet und gequollen, das untere Trägermaterial noch vollständig intakt. An der Böschung konnten anhand der multi-temporalen Laserscanning-Daten nach der Stabilisierung der Sohle keine Veränderungen mehr festgestellt werden.

Der Einbau entlang der Teststrecke war – nach Aushub des Grabens – mit einfachen Mitteln zu bewerkstelligen. Längere Einbaustrecken sollten jedoch mit Hilfe von Großgerät (Bagger) anstatt manuell ausgeführt werden. Bei der verwendeten Bentonitmatte handelt es sich um einen Prototyp, der die Erfordernisse in diesem Projekt gut erfüllen konnte.

Limitationen

Nach dem Abbau der Trägerlagen der Bentonitmatte verbleibt die etwa 1 cm dicke Tonschicht und gewährleistet die Abdichtung längerfristig. Diese Tonschicht weist allerdings einen geringen inneren Reibungswinkel auf, die potenziell als Schwachschicht im Sinne der Hangstabilität agieren könnte – vor allem nachdem der Scherwiderstand durch einen teilweisen Abbau der vernadelten Fasern geringer wird. In Hanglage sollte die Bentonitmatte daher mit anderen technischen Maßnahmen (zB. Bermen oder Hangrosten) kombiniert werden, um eine dauerhafte Böschungstabilität zu gewährleisten.

Eine Abdichtung eines Gerinnes gegen Infiltration von Bachwasser bedeutet gleichzeitig eine Abdichtung gegen Exfiltration von Zwischenabfluss. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Hangwasser, welches von oberhalb gelegenen Feuchtfächen unterirdisch zur Teststrecke anströmt, unter der Bentonitmatte hindurch geleitet wird. Um diesem Effekt vorzubeugen, könnte ein angepasstes Einbaudesign gewählt werden, wodurch Hangwasser zusätzlich abgefangen und abgeführt wird. Der Einbau muss demnach an die lokalen Charakteristika und die Zielsetzung der Maßnahme angepasst werden.

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

Thomas Zieher PhD, Jan Pfeiffer MSc
Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung,
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Innrain 25, 6020 Innsbruck, Österreich
thomas.zieher@oeaw.ac.at,
jan.pfeiffer@oeaw.ac.at

Dipl.-Ing. Veronika Lechner
Abteilung Wildbachprozesse und
Hydrologie, Bundesforschungszentrum für Wald
Rennweg 1, 6020 Innsbruck, Österreich
veronika.lechner@bfw.gv.at

Dipl.-Ing. Kent von Maubeuge, Dr. Helge Hoyme
Naue GmbH & Co. KG
Gewerbestr. 2, 32339 Espelkamp, Deutschland
kvmaubeuge@Naue.com, hhoyme@Naue.com

Dipl.-Ing. Helmut Hochreiter
GBL Mittleres Inntal, Wildbach und
Lawinenverbauung
Josef Wilbergerstraße 41, 6020 Innsbruck
helmut.hochreiter@die-wildbach.at

Dr. Daniela Engl
Fachzentrum für Geologie und Lawinen,
Wildbach- und Lawinenverbauung
Wilhelm-Greil-Straße 9, 6020 Innsbruck
daniela.engl@die-wildbach.at

Literatur/References:

- AARHUS GEOSOFTWARE (2020).
Handbuch zur Software RES2DINV. URL: https://ags-cloud.dk/AGS/Geotomo%20Manuals/Res2dinvx64_full_manual.pdf (letzter Aufruf: 18.08.2022)
- AXELSSON P. (2000).
DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33(B4/1; PART 4): 111-118.
- BRÜCKL E., BRUNNER F. K., LANG E., MERTL S., MÜLLER M. & STARY U. (2013).
The Gradenbach Observatory—monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods, Landslides 10(6): 815-829.
- EBERHARDT E., BONZANIGO L. & LOEW S. (2007).
Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock. Part II. Mitigation measures and numerical modelling of deep drainage at Campo Vallemaggia, Canadian Geotechnical Journal 44(10): 1181-1199.
- ENGL D. (2018).
Bericht Aktueller Kenntnisstand Hangbewegungen Vögelsberg Gde. Wagens, Technischer Bericht, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung.
- HOFMANN R. & SAUSGRUBER J. T. (2017).
Creep behaviour and remediation concept for a deep-seated landslide, Navistal, Tyrol, Austria, Geomechanics and Tunneling 10(1): 59-73.
- KIM, J.H., M.J. YI, S.G., PARK, AND J.G. KIM, 2009.
4-D inversion of DC resistivity monitoring data acquired over a dynamically changing earth model. Journal of Applied Geophysics, 68: 522-532
- LOKE, M.H., DAHLIN, T. AND RUCKER, D.F., 2014.
Smoothness-constrained time-lapse inversion of data from 3-D resistivity surveys. Near Surface Geophysics, 12: 5-24.
- PFEIFFER J., ZIEHER T., SCHMIEDER J., RUTZINGER M., STRASSER U. (2021).
Spatio-temporal assessment of the hydrological drivers of an active deep-seated gravitational slope deformation: The Vögelsberg landslide in Tyrol (Austria), Earth Surface Processes and Landforms 46(10), 1865-1881.
- PFEIFFER J., ZIEHER T., SCHMIEDER J., BOGAARD T., RUTZINGER M., SPÖTL C. (2022).
Spatial assessment of probable recharge areas – investigating the hydrogeological controls of an active deep-seated gravitational slope deformation, Natural Hazards and Earth System Sciences 22(7): 2219-2237.
- RIEGL (2022).
Handbuch zur Software RiScanPro. RIEGL Laser Measurement Systems GmbH 2022.
- TANZER L. & AUSSERLECHNER R. (2021).
Hangbewegungen und deren Auswirkungen auf Wohn- und Wirtschaftsgebäude im Alpenraum am Beispiel Vögelsberg. In: Tagungsband des 23. Geoforum Umhausen, 14./15. Oktober 2021, Verein Geoforum Tirol: 76-98.

Aktuelles aus Wissenschaft und Praxis

Markus Mayerl:
**Sonnenstrom bei der Wildbach- und
Lawinenverbauung in der GBL Steiermark Nord**

Seite 182

Florian Ahammer, Roland Suchy:
**Borkenkäferkalamitäten im Schutzwald – Exkursionsbericht des Vereins
der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung**

Seite 188

Johannes Hübl, Roland Kaitna:
**50 Jahre Institut für Alpine Naturgefahren an der
Universität für Bodenkultur Wien**

Seite 192

INTERPRAEVENT 2024
Natural hazards in a changing climate

Seite 198

Markus Mayerl, Raphaela Beer:
Wassererlebnis Öblarn feierlich eröffnet

Seite 200

Sonnenstrom bei der Wildbach- und Lawinerverbauung in der GBL Steiermark Nord

Solar power for torrent and avalanche control

Zusammenfassung

Verschiedene Anwendungsformen des Einsatzes von Sonnenstrom bei der Wildbach- und Lawinerverbauung werden hier anhand von erprobten Praxisbeispielen gezeigt.

Abstract

Various forms of application of solar power in torrent and avalanche control are shown here on the basis of proven practical examples.

Stichwörter

Mobile Baustromversorgung, Photovoltaik, Stromspeicher

Keywords

Mobile construction site power supply, photovoltaic, power storage

Einleitung

Die Nutzung von Sonnenenergie wird auch auf Baustellen der Wildbach- und Lawinerverbauung eingesetzt. Dies wird durch die technische Wei-

terentwicklung sowohl bei den Photovoltaikanlagen, bei der Speicherung von Energie als auch durch die Verfügbarkeit von Akkugeräten begünstigt.

Sonnenstrom auf Lawinenbaustellen

Sonnenstrom auf Höhenbaustellen sorgt für weniger Lärm und CO₂-Produktion. Auf Baustellen mitten in der Natur setzt die Wildbach- und Lawinerverbauung, Gebietsbauleitung Steiermark Nord auf Sonnenstrom im Kleinformat.

Speziell auf Lawinenbaustellen ist eine Stromversorgung meist nur durch ein ständig laufendes Stromaggregat möglich, obwohl auf diesen Standorten oft den ganzen Tag die Sonne scheint. Der Stromverbrauch auf Höhenbaustellen ist eher gering, da die Bohrgeräte mit Druckluft-Kompressoren betrieben werden. Bereits seit 2011 ist auf Lawinenbaustellen eine mobile Photovoltaikanlage im Einsatz.

Als Alternative für das Handyladen, zum Kochen und Bohren, liefert die Anlage mit eingebautem Speicherakkumulator ausreichend Strom



Abbildung 1:
Kleine Photovoltaikanlage für Höhenbaustellen (Foto: WLW, GBL Steiermark Nord)

Figure 1:
Small photovoltaic system for high altitude construction sites (Photo: WLW, GBL Steiermark Nord)

und reduziert den Einsatz des Dieselaggregates. Diese Kleinphotovoltaikanlage wurde dafür entwickelt, dass sie als Einheit auch auf entlegene Baustellen transportiert werden kann. Insgesamt wiegt die Box mit dem aufgesetzten Solarpaneel etwa 150 kg. Die Bauteile sind kompakt in einem Kasten aus Metall eingebaut und das Solarpaneel kann direkt auf dem Kasten befestigt werden. Diese Einheit ist zum Hubschraubertransport geeignet und kann als eigenständige Insellösung praktisch überall eingesetzt werden.

Beschreibung	Werte
1 Stück Photovoltaikmodul	150 Watt
Gesamte Ladeleistung	0,15 kWp
Speicherleistung AGM	Netto 2,5 KW/h

Tabelle 1: Technische Daten

Table 1: Technical specifications

Mobile Baustromversorgung mit Drehstrom für Wildbachbaustellen

Die Errichtung von Schutzbauwerken durch die Wildbach- und Lawinerverbauung findet oft mitten in der Natur statt. Eine Versorgung mit Strom ist aufwändig oder aufgrund der Entfernung zum öffentlichen Stromnetz gar nicht möglich. Der Strom wird für Baumaschinen wie Kreissägen, Bohrmaschinen oder auch für das Aufladen von Akku-Geräten benötigt.

Elektrische Baukräne für die Manipulation von Baumaterialien sind auf unseren Wildbachbaustellen durchwegs im Einsatz. Der Prototyp einer Baustromversorgungsanlage mit Photovoltaikpaneelen und Speicherbatterien zur Drehstromversorgung der Baustellen wurde gemeinsam mit einem örtlichen Elektriker im Jahr 2019 entwickelt und ist derzeit auf unserer Wildbachbaustellen im Einsatz.

Die 6 Stück Photovoltaikpaneele sind ausklappbar auf einem kleinen, transportablen Container montiert, in dem neben den Speicherbatterien auch ein Wechselrichter zur Herstellung von Drehstrom eingebaut wurde. Die Versorgung der Baustelle mit Sonnenstrom funktioniert automatisiert und überschüssiger Strom wird in den Pufferspeicher der Anlage gespeichert. Bei einer maximalen Leistung von neun kW kann auch der Baukran problemlos den ganzen Tag mit Energie versorgt werden. Durch diese Anlage wird auf unserer Wildbachbaustelle auf den Einsatz eines Stromaggregates weitgehend verzichtet, d.h. kein Lärm, kein Abgas und kein CO₂.

Beschreibung	Werte
6 Stück Photovoltaikmodule	320 Watt
Gesamte Ladeleistung	1,92 kWp
Speicherleistung AGM	Netto 20KW/h
Wechselrichterleistung	400VAC 3 x 3000W
Gesamtleistung Wechselrichter	9KW/ 400VAC
Automatische Ladeeinrichtung bei Betrieb mit Notstromaggregat	
Automatische Versorgung der Verbraucher bei Notstrombetrieb (Aggregat)	
AC Ausführung	Ausgang 2 x 230V/16A, 1 x 400V/16A Eingang: 1x400V/16A
Anlage mit Systemüberwachung und Visual	

Tabelle 2: Technische Daten

Table 2: Technical specifications



Abbildung 2: Mobile Baustromversorgung als Photovoltaikanlage mit Drehstrom zum Betrieb des Baukranes (Foto: WLV, GBL Steiermark Nord).

Figure 2: Mobile construction site power supply as a photovoltaic system with three-phase current to operate the construction crane (Foto: WLV, GBL Steiermark Nord).

Einsatz von akkubetriebenen Geräten auf Baustellen

Aufgrund der technischen Weiterentwicklung in den letzten Jahren ist es heute auf unseren Baustellen bereits möglich, nahezu alle Kleingeräte auch als strombetriebene Akkugeräte zu verwenden. Dies gilt nicht nur für Bohrmaschinen und

Drahtbindegeräte sondern auch für Motorsägen und kleine Schlagbohrmaschinen zum Setzen von Dübel in Beton. Auch in der Unterkunft werden beispielsweise Kühlschränke und Kaffeemaschine über die mobile PV-Anlage mit Strom versorgt.



Abbildung 3: Akkugeräte (Foto: WLV, GBL Steiermark Nord).

Figure 3: Cordless tools (Photo: WLV, GBL Steiermark Nord).

Diese Kleingeräte werden mit Sonnenstrom von unserer mobilen Photovoltaikanlage aufgeladen. Nur mehr fallweise wird auf benzinbetriebene Geräte (z.B. Motorsägen zum Holzfällen) zurückgegriffen.

Mobilitätskonzept mit Sonnenstrom

Die Errichtung einer 30 kWp-Photovoltaikanlage am Dach unseres Bauhofes der Wildbach- und Lawinenverbauung Steiermark Nord in Liezen ermöglicht das Laden unseres Elektroautos über die SmartFox-Ladestation ausschließlich mit Sonnenstrom. Erwähnen möchte ich dabei, dass durch einen Mix aus verschiedenen angeordneten PV-Paneelen der Strom bedarfsgerechter produziert werden kann. Die senkrecht an der Ostseite der Halle montierten PV-Paneele liefern bereits um sechs Uhr früh am Tag Strom und sind auch im Winter nicht eingeschnitten.

Leistungen meiner Geräte



Abbildung 4: Beispiel für die Stromerzeugung mit Photovoltaik für den Eigenbedarf.

Figure 4: Example of power generation with photovoltaics for personal use.

Bereits um sechs Uhr, etwa zeitgleich mit der Erhöhung des Stromverbrauchs in Büro und Bauhof, beginnt die Stromlieferung durch die senkrechten Paneele an der Ostseite der Halle (gelbe Kurve in der Abb. 4). Der überschüssige Strom, der nicht im Büro und am Bauhof verbraucht wird, kann in das Elektroauto (grüne Kurve in der Abb. 4) oder in das Elektrofahrrad eingespeist werden.

Zusätzlich wird der überschüssige Sonnenstrom im Winter im Rücklauf unserer Zentralheizungsanlage in eine Wärmepatrone geleitet und senkt dadurch den Energieverbrauch der Heizanlage.

Insgesamt liegt der Stromverbrauch in unserer Gebietsbauleitung bei 30000 KWh/Jahr, davon beträgt der von der hauseigenen Photovoltaikanlage erzeugte Stromanteil etwa 50 %.

Der Anteil des selber verbrauchten, vor Ort erzeugten Sonnenstroms liegt bei 67 %, d.h. zwei Drittel des vor Ort erzeugten Sonnenstromes werden durch Büro und Bauhof sowie dem Laden des Elektroautos selber verbraucht.

Anschrift des Verfassers/Author's address:

Dipl. Ing. Markus Mayerl
Wildbach- und Lawinerverbauung,
Gebietsbauleitung Steiermark Nord
Schönaustraße 50, 8940 Liezen
markus.mayerl@die-wildbach.at

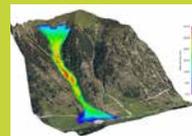


Abbildung 5: Anordnung der Photovoltaikpaneele am Bauhof Liezen (Foto: WLW, GBL Steiermark Nord)

Figure 5: Arrangement of the photovoltaic panels at the building yard in Liezen (Photo: WLW, GBL Steiermark Nord).

Wir sind Ihr absolut kompetenter Partner bei Planungen, Gutachten und Projektmanagement von

**Wildbachverbauungen
Schutzwasserbauten
Böschungssicherungen
Lawinerverbauungen
Forst- und Güterwegen
Schneeanlagen Gesamtplanungen
Wasserver- und -entsorgungen
Modellierungen und Simulationen**



Klenkhart & Partner Consulting ZT GmbH · A-6067 Absam
T: +43 50226 · e-mail: office@klenkhart.at · www.klenkhart.at

Alpine
Engineering
by
KLENKHART
& Partner
Consulting



FLORIAN AHAMMER, ROLAND SUCHY

Borkenkäferkalamitäten im Schutzwald – Exkursionsbericht des Vereins der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung

Zusammenfassung

Das Sturmtief „Vaia“ vom 28. bis 31. Oktober 2018 verursachte schwere Schäden am Schutzwald im Mölltal. Des Weiteren sorgten flächige Schneebrüche in den Wintern 2019/20 und 2020/21 für großflächig devastierte Waldflächen in den Gemeinden Mallnitz, Stall, Rangersdorf, Winklern, Mörttschach und Großkirchheim in Kärnten.

Im Juli 2021 erfolgte dann eine Massenvermehrung des Buchdruckers (Borkenkäferart), der aufgrund des vielen brutfähigen Materials ideale Bedingungen vorfand. Der Verein der Ingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung hielt von 21.-22. September 2022 seine Jahreshauptversammlung in der Sektion Kärnten ab und bereiste am 22. September das Mölltal und das dazugehörige Schutzwaldprojekt.

Stichwörter

Objektschutzwald, Borkenkäferkalamität, Verein der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung Österreich

Keywords

Protective forest, bark beetle calamity, association of engineers of the Torrent- and Avalanche Control Austria

Einleitung

Der Verein der Ingenieure der Wildbach- und Lawinenverbauung wurde am 24.04.2001 in Zell am See von Hermann Kaufmann und einigen weiteren, engagierten B-Technikern der WLV gegründet. Das erklärte Ziel des Vereins ist das Vernetzen der Techniker und der Förster über ganz Österreich; zurzeit zählen wir etwa 60 aktive Mitglieder.

Es zeigt sich, dass die Probleme, sei es in der Bauführung, Projektierung oder auch Baustellensicherheit über ganz Österreich dieselben sind.

Unsere Position bringt mit sich, dass man als B-Techniker weder in der reinen Forstwirtschaft, noch rein im Tiefbau verwurzelt ist, sondern eben ein „Wildbachler“ ist. Genau diese Herausforderung macht den Beruf sehr spannend und das Bilden von Netzwerken deshalb umso wichtiger - geht es doch um sehr spezielle Fragen.

Sofortmaßnahmen

Objektschutzwälder Mölltal 2021

Unser Kollege Florian Ahammer von der Gebietsbauleitung Kärnten Nordwest führte uns ins Mölltal mit der Bemerkung, dass wir uns ab der Ortschaft „Stall“ aufmerksam das Waldbild ringsherum ansehen sollten – und wir merkten schnell warum: Auf den steilen Hängen taleinwärts waren die Waldschäden offensichtlich.

Aufgrund der vielfach nicht mehr gegebenen Schutzwirkung durch den Wald, wurden im Jahr 2021 die Sofortmaßnahmen „Objektschutzwälder Mölltal“ gestartet. Ein flächenwirtschaftliches Projekt als Sofortmaßnahme auszuweisen, ist bei der WLV eine Seltenheit, aber die Dringlichkeit der Lage erforderte im Mölltal ein sofortiges Einschreiten.

Abbildung 1: Teilnehmer an der Jahreshauptversammlung des Vereins der Ingenieure bei dem Vortrag von Wilfried Klaus und Florian Ahammer in der Kultbox Mörttschach (Foto: Verein der Ingenieure der WLV, 2022)

Figure 1: Participants at excursion lecture held by Wilfried Klaus and Florian Ahammer during the Annual General Meeting of the Association of Engineers and Foresters of the WLV in Carinthia (Photo: Verein der Ingenieure der WLV, 2022).



In der „Kultbox Mörttschach“ im gleichnamigen Ort wurde uns von Gebietsbauleiter Wilfried Klaus und seinem Mitarbeiter Florian Ahammer der Umfang der Sofortmaßnahmen erklärt. Die Eckdaten sind:

Projektumfang:	€ 1.050.000,-
Projektlaufzeit:	2021-2023
Finanzierung:	Bund: 62 % Land: 28 % Wasserverband Mölltal: 10 %

Bei einer Begehung vor Ort im Schutzwald oberhalb der Ortschaft Mörttschach wurde das Ausmaß der Kalamitäten nochmal sichtbar.

Die Maßnahmensetzung konzentriert sich derzeit vor allem auf Querfällungen, der Errichtung von temporären Schutznetzen und die Wiederaufforstung. Eine besondere Herausforderung ist das Ablösen der vielen Grundeigentümer des kleinstrukturierten Bauernwalds und die dadurch komplexe Kommunikation.

Zurzeit sind vier Seilbahnen und drei Bagger-Prozessoren im Rahmen der Sofortmaßnahmen im Einsatz. Bis Juli 2021 wurden ca. 313 ha Objektschutzwald zerstört, mit einem Holzanfall von 21.000 Festmeter,

Bis Juli 2022 dehnte sich die Schadfläche im Objektschutzwald schon auf 631 ha aus, der Holzanfall kann noch nicht abgeschätzt werden.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Ing. Florian Ahammer

Wildbach- und Lawinerverbauung
Gebietsbauleitung Kärnten Nordwest
Meister-Friedrich- Straße 2; 9500 Villach
florian.ahammer@die-wildbach.at

Ing. Roland Suchy

Obmann des Vereins der Ingenieure der WLV
Gebietsbauleitung Niederösterreich West
Josef Adlmannseder- Straße 4; 3390 Melk
roland.suchy@die-wildbach.at

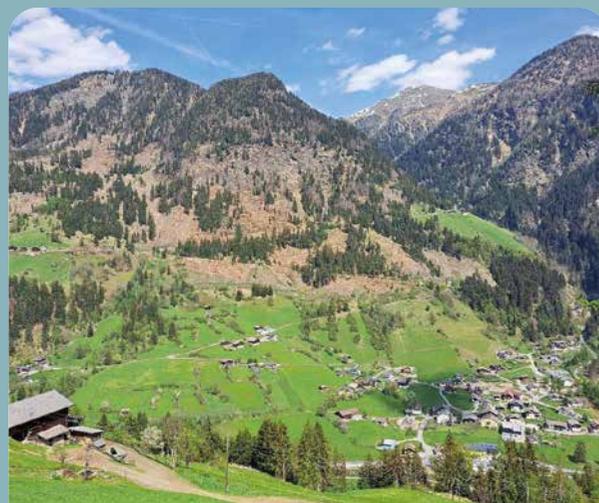
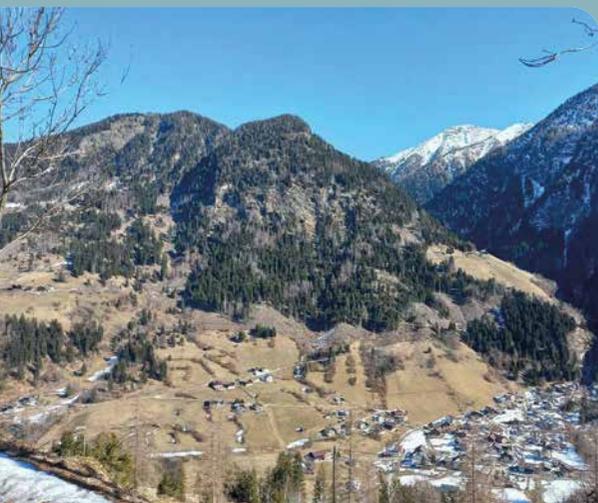


Abbildung 2: Steinschlaggebiet Mörttschachberg- Astenstraße: Dezember 2021 (links), Juni 2022 (rechts). Die Entwaldung ist deutlich sichtbar (Foto: Verein der Ingenieure der WLV, 2022).

Figure 2: Protective forest in the rockfall area Mörttschachberg – Astenstraße in December 2021 (left) and June 2022 (right). The comparison shows the deforestation due to natural disturbances (Photo: Verein der Ingenieure der WLV, 2022).



• **FARFALLA Böschung**

- Straßen- und Forstwegbau
- Sanierung von Rutschungen
- Schneller und einfacher Einbau
- Erhältlich in 2 Baugrößen

• **FARFALLA Bach- und Runsenverbauung**

- Stabilisierung von Gerinnen (Bächen / Runsen)
- Alternative zu Sperren aus Holz
- Schneller und einfacher Einbau
- Erhältlich in 3 Baugrößen

• **Lawinenschutzbauten aus Stahl**

- Stahlschneebrücken Dk-2,0 bis Dk-5,0
- Triebsschneewände
- Lawinenablenkwände
- Lawinenablenkzeuge
- Gleitschutzböcke GSB-1,5

• **Stahlwasserspulen**

- Selbstreinigend
- Längen 4 bis 6 Meter



Der erste Ordinarius und ordentliche Professor am 1972 neu eingerichteten Institut (Abb. 1) war Herbert Aulitzky, der sich zuvor für forstliche Bioklimatologie habilitiert hatte. Er gilt als der Begründer der Gefahrenzonenplanung. Nach seiner Emeritierung wird 1990 Hanns Wolfgang Weinmeister zum Professor für Wildbach- und Lawinerverbauung berufen. Der Name des Institutes wurde nach einer Befragung der Kollegen des Forsttechnischen Dienstes in Wildbach- und Lawinenschutz (WLS) geändert. Der Schwerpunkt lag in der nachhaltigen Sicherung des Kulturräumens durch ökologische und technische Maßnahmen. Zur Abdeckung der Anforderungen an die Ausbildung wurden die Arbeitsbereiche Wildbach, Lawine und Steinschlag eingerichtet.

Mit 1. Jänner 2001 schlossen sich die Institute für Wildbach- und Lawinenschutz sowie Forstliches Bauingenieurwesen zum Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen mit

zunehmend zwei ordentlichen Professoren und rund 35 Mitarbeitern zusammen. Die Leitung des Institutes übernahm ab 2001 Johannes Hübl, der sich im Fach Wildbachkunde und Wildbachverbauung habilitierte. Nach der Pensionierung Weinmeisters wurde Dieter Rickenmann im Jahr 2002 zum Professor für Alpine Naturgefahren berufen. Der Schwerpunkt dieser Professur waren Hydraulik und Geschiebetransport in Wildbächen sowie die Dynamik von Muren.

Im Rahmen der Umsetzung des Universitätsgesetzes 2002 wurden an der BOKU Wien Departments eingerichtet. Diese Chance wurde genutzt und das Institut für Alpine Naturgefahren und forstliches Ingenieurwesen wieder aufgeteilt. Im Department Wald und Bodenwissenschaften verblieb das Institut für Forsttechnik, dem Department Bautechnik und Naturgefahren wurde das Institut für Alpine Naturgefahren zugeordnet (Abb. 2).

Wildbach- und
Lawinerverbauung
(1972 - 1991)

Wildbach- und
Lawinenschutz
(1991 - 2000)



Alpine Naturgefahren und
forstliches Ingenieurwesen
(2001 - 2004)



Alpine Naturgefahren
(2004 -)



Abbildung 2: Die historische Entwicklung des Instituts anhand der eingeführten Logos.

Figure 2: The historical development of the institute on the basis of the introduced logos.

Nach dem Rückzug von Dieter Rickenmann wurde im Jahr 2011 Johannes Hübl zum Professor für Naturgefahren und Risikomanagement berufen. Sein besonderes Interesse gilt der Ereignisdokumentation, dem Monitoring, speziell der Muren,

der Gefahrenanalyse und technischen Schutzbauwerken. Es werden verschiedene Einzugsgebiete mit einzigartigen Messeinrichtungen versehen, die erstmals Einblick in die interne Dynamik von Wildbachprozessen erlauben (Abb. 3).



Abbildung 3: Murenmonitoring in der Gadria, Südtirol (Foto: Institut für Alpine Naturgefahren).

Figure 3: Debris flow monitoring at the Gadria creek, South Tyrol (Photo: Institute of Mountain Risk Engineering).

Im Statut des Departments für Bautechnik und Naturgefahren vom 5. April 2022 werden für das Institut für Alpine Naturgefahren folgende Lehr- und Forschungsschwerpunkte festgelegt:

- Wildbachprozesse
- Schnee und Lawinen
- Schutzmaßnahmen
- Wald und Naturgefahren
- Vulnerabilität und Risikosysteme

Diese Aufteilung zeigt die derzeitige Breite des Lehr- und Forschungsangebots des Instituts, das von zahlreichen Studierenden des Masters Alpine Naturgefahren/Wildbach- und Lawinenverbauung angenommen wird. Im Schnitt belegen rund 70 bis 80 Studierende diesen Master (Abb. 4), um in weiterer Folge eine Anstellung im Bereich des Naturgefahrenmanagements anzustreben.

Durch die angestrebte Modularisierung des Studienangebots an der BOKU Wien findet eine Weiterentwicklung des Studiums statt. Ziel

der Modularisierung ist die Verbesserung der Studierbarkeit, die Erhöhung der Attraktivität für Bachelorstudierende, die fachliche Konsolidierung und die Anpassung an die zukünftigen Herausforderungen im 21. Jahrhundert.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johannes Huebl
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien
johannes.huebl@boku.ac.at

Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Roland Kaitna
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82, 1190 Wien
roland.kaitna@boku.ac.at

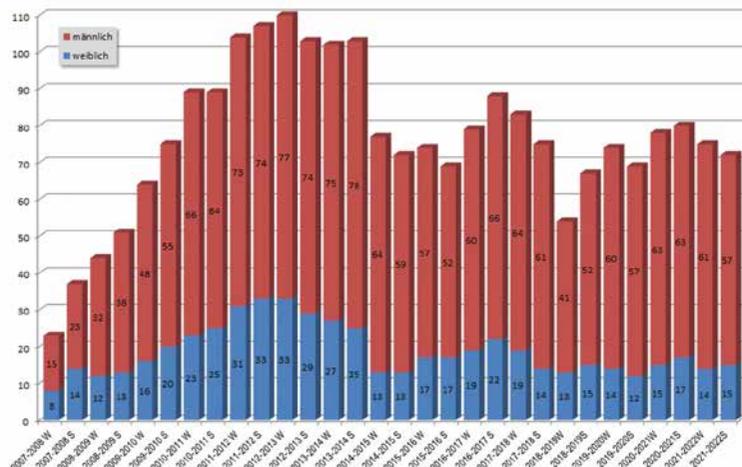


Abbildung 4:
Entwicklung der im Master Alpine Naturgefahren/Wildbach- und Lawinenverbauung inskribierten Studierenden.

Figure 4:
Development of the number of students enrolled in the Master's program "Alpine Naturgefahren/Wildbach- und Lawinenverbauung".



TECHNISCHES BÜRO FÜR ALPINE NATURGEFAHREN BAUMANAGEMENT UND GEOTECHNIK



office@synalp.com



www.synalp.com



Synalp Ost
Admont

+43 (0) 3613/ 21 884

Synalp West
Zirl

+43 (0) 5238/ 52 548

Synalp Mitte

St. Michael/ Lungau

+43 (0) 6477/ 71 315

Synalp Süd

Villach

+43 (0) 4242/ 44 234

Internationale Konferenz

INTERPRAEVENT 2024 Natural hazards in a changing climate



Von 10. bis 13. Juni 2024

Kongresszentrum Hofburg Wien, Österreich



How to manage risks under global warming?

Themen

- Klimawandel: Auslöser, antreibende Faktoren und Konsequenzen
- Risiko-Governance, Strategien und Resilienz
- Datenerhebung, Feldversuche und Modellierung
- Gefahren- und Risikobeurteilung
- Maßnahmen zur Risikominimierung (strukturell und nicht-strukturell)
- Katastrophenmanagement und Wiederherstellung

Ziele

- Stärkung der internationalen Zusammenarbeit
- Vernetzung von Experten und Expertinnen mit Praktiker und Praktikerinnen
- Präsentation und Diskussion von aktuellen Forschungsergebnissen
- Austausch und Weitergabe von Wissen und Erfahrungen

<https://interpraevent2024.at/>



© Kopfsache

You better ask our experts for the best approach

software
maps
geostatistics
reporting
data

"That's it."
Gregor Ortner, CTO UNIDATA

UNIDATA GEODESIGN GMBH
Gärtnergasse 3 Top 6, 1030 Vienna
+43(1) 96 901 78
office@unidata.at
www.unidata.at

MARKUS MAYERL, RAPHAELA BEER

Wassererlebnis Öblarn feierlich eröffnet

Am 21. Mai 2022 wurde das Wassererlebnis Öblarn, als europaweit einzigartiges Demonstrationsmodell der Naturgefahren, vor der eindrucksvollen Kulisse des realen Murbrechers im Öblarner Walchental (Steiermark) eröffnet.

In Zeiten des Klimawandels hat Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung oberste Priorität. Wie Bewusstseinsbildung spielerisch funktioniert und Naturgefahren für alle Altersgruppen hautnah erlebbar gemacht werden, wurde bei der Eröffnungsfeier des Outdoor-Demonstrationsmodells „Wassererlebnis Öblarn“ eindrucksvoll gezeigt: Auf einer 2.800 m² großen Freiluftfläche im Öblarner Walchental unmittelbar neben dem „Murbrecher Mathildenbach“ wurde dazu das Einzugsgebiet des Walchenbaches samt kürzlich errichteter Schutzbauwerke, der Ortskern von Öblarn sowie der Mündungsbereich an der Enns mit Überflutungsflächen im Maßstab 1:25 realitätsgetreu nachgebildet.

Outdoor-Demonstrationsmodell

Bereits die Anfahrt zum Wassererlebnis mit dem Traktorwagen-Shuttle entlang der realen Schutzbauwerke im Walchental ließ die Besucherinnen und Besucher der Eröffnungsfeier das Gefahrenpotential eines Unwetters erahnen. Am 4. und 5. August 2017 war die Gemeinde Öblarn von einer Hochwasserkatastrophe mit Verklausungen am

Walchenbach und der Überflutung des Ortskerns betroffen. Die bereits bestehenden Schutzbauwerke haben damals Schlimmeres verhindert; für einen weiteren Tag Starkniederschlag hätte ihre Rückhaltekapazität jedoch nicht mehr ausgereicht. So erweitert die Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) seit 2017 den Schutz für den Ort Öblarn zu einer ganzen Schutzbauwerkkette, welche aus mehreren Murbrechern und Geschiebefängern besteht. Das letzte, vierte Bauwerk soll im Sommer 2023 fertiggestellt werden.

Im Wassererlebnis Öblarn kann es jetzt bereits in Miniaturform betrachtet und getestet werden. Der angestrebte Schutz des Ortskerns ist im Demonstrationsmodell des Wassererlebnis Öblarn somit bereits komplett. Das Katastrophenereignis vom August 2017 kann im Modell realitätsnah simuliert werden. Sowohl Kinder als auch Erwachsene können selbst das Naturgefahrenszenario gestalten, eigene Bauwerke im Modell platzieren, Muren, Verklausungen und Überschwemmungen im Modell herbeiführen, den Gewässerverlauf mit Schutzbauwerken ausstatten oder auch nicht, somit eine Verklausung bzw. Überschwemmung herbeiführen oder eben verhindern. Die Rolle und Wirkung der vier Wildbach-Schutzbauwerke können so ganz deutlich veranschaulicht werden.



Abbildung 1: Detailansicht des Outdoor-Demonstrationsmodells „Wassererlebnis Öblarn“ (Foto: © Martin Huber, 2022)



Abbildung 2: Bei der feierlichen Eröffnung wurde das Modell auch gleich „eingeweiht“ und Verkläusungen sowie Überflutungen damit simuliert (Foto: © Martin Huber, 2022).

Selbstschutz ist der beste Schutz

Aber auch das Thema Flusshochwasser und Retentionsflächen sowie Selbstschutz Hochwasser werden beim Wassererlebnis Öblarn ausgiebig behandelt. Durch den Klimawandel treten zuneh-

mend mehr Naturkatastrophen und Hochwasserereignisse ein. Neben notwendigen technischen Schutzmaßnahmen und einer nachhaltigen Raumordnung ist auch die Eigenverantwortung der Menschen von besonderer Bedeutung.

Das richtige Schichten von Sandsäcken, die Bedeutung von Gefahrenzonenplänen und

ihre Auswirkungen für die Raumordnung sowie die Kraft des Wassers standen ebenfalls am Eröffnungsprogramm. Zahlreiche Schautafeln zu den Themen „Flusshochwasser & Retention“, „Ein Wildbach und seine Gefahren“ sowie „Wald im Klimawandel/Schutzwald“ begleiten die Besucherinnen und Besucher am Rand des Modells und erklären die wesentlichen Inhalte für alle Zielgruppen.

Buchungsmodalitäten und verfügbare Termine sind auf der Modellwebsite „www.wassererlebnis-öblarn.at“ zu finden.

Anschrift der Verfasser/Authors' addresses:

Dipl. Ing. Markus Mayerl
Wildbach- und Lawinenverbauung,
Gebietsbauleitung Steiermark Nord
Schönaustraße 50, 8940 Liezen
markus.mayerl@die-wildbach.at

Dipl. Ing. Raphaela Beer
Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft,
Regionen und Wasserwirtschaft
Abteilung III/4 – Wildbach- und Lawinenverbauung
und Schutzwaldpolitik
Marxergasse 2, 1030 Wien
raphaela.beer@die-wildbach.at



Foto: Martin Huber

Die nächste Ausgabe *Wildbach- und Lawinenverbau* erscheint voraussichtlich im Juni 2023 mit dem Schwerpunktthema „Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit“.

Möchten Sie einen Artikel zum nächsten Heft beitragen oder haben inhaltliche Vorschläge?

Wir freuen uns auf Ihre Unterstützung:
schriftleitung@wlv-austria.at

Vorschau
Heft 191

Inserentenverzeichnis

Firma	Inserat Seite
Aartesy AG	U4
ALP-infra Consulting + Engineering GmbH	23
Geobru gg AG	57
Geolith Consult	67
Gunz ZT GmbH	37
Halbeisen & Prast KG	103
Hartl Consulting e. U.	103
Heli Austria GmbH	4
Ingenieurbüro Illmer Daniel GmbH	131
i.n.n. – Ingenieurgesellschaft für Naturraum-Management mbH & CoKG	29
J. Krismer HandelsgmbH	87
Klenkhart & Partner Consulting ZT GmbH	187

Firma	Inserat Seite
Mair Wilfried GmbH	191
MEVA Schalungs-Systeme GmbH/ Alzner Baumaschinen GmbH	6
mjp Ziviltechniker GmbH	131
PERZPLAN Ingenieurbüro	102
Gebrüder RUF Bau und Transport GmbH & Co KG	8
Gerhard Rusch Erdbau	167
Skolaut NATURRAUM	95
Synalp GmbH	197
DI Werner Tiwald ZT GmbH	167
Trumer Schutzbauten GmbH	15
UNIDATA GEODESIGN GMBH	199

aartesys



AarteLink[®] – Quantensprung im Naturgefahrenalarm

AarteLink[®] – das Naturtalent.
Naturgefahrenalarm für Steinschlag, Murgang,
Lawine und Hochwasser und vielem mehr.

Dank Funklösung ist **AarteLink[®]** schnell und flexibel
einsetzbar und überzeugt durch die enorme
Batterielebensdauer und hohe Funkreichweite.

www.aartelink.ch