



Heft 78, 2019

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

FORUM
für Wissen
2019



Lernen aus Extremereignissen

Redaktion

Michael Bründl

Jürg Schweizer



Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee
und Landschaft WSL

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Heft 78, 2019

WSL Berichte

ISSN 2296-3456

FORUM

für Wissen

2019

Lernen aus Extremereignissen

Redaktion

Michael Bründl

Jürg Schweizer

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF

Das Forum für Wissen ist eine Veranstaltung, die von der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL durchgeführt wird. Aktuelle Themen aus den Arbeitsgebieten der Forschungsanstalt werden vorgestellt und diskutiert. Neben Referenten von der WSL können auswärtige Fachleute beigezogen werden. Gleichzeitig zu jeder Veranstaltung «Forum für Wissen» erscheint eine auf das Thema bezogene Publikation in der Reihe WSL Berichte. Alle Beiträge wurden von zwei Fachpersonen begutachtet.

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Prof. Dr. Konrad Steffen, Direktor WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Jürg Schweizer, Leiter SLF

Schriftleitung
Sandra Gurzeler

Wir danken folgenden Personen, welche sich als Reviewer zur Verfügung stellten, für die kritische Durchsicht der Beiträge und die hilfreichen Kommentare:
Alexandre Badoux, Peter Bebi, Michael Bründl, Christoph Graf, Christine Huovinen, Christoph Marty, Jürg Schweizer und Manfred Stähli.

Zitierung
Bründl, M.; Schweizer, J. (Red.) 2019: Forum für Wissen 2019. Lernen aus Extremereignissen. WSL Ber. 78: 73 S.

Layout
Sandra Gurzeler, WSL

Fotos Umschlag
Waldschaden 1999, Haslital (BE). Foto: M. Bründl
Zerstörte Häuser durch die S. Placi-Lawine 1984, Disentis (GR). Foto: S. Gliott
Überflutung Schächenmündung (UR), Hochwasser 2005, Foto: Schweizer Luftwaffe
Bergungsarbeiten Lawinenkegel Airolo (TI) 1951. Foto: Photopress
Trockenes Flussbett der Töss im Sommer 2018. Foto: G. Pestalozzi

Bezugsadresse
WSL Shop
Zürcherstrasse 111
CH-8903 Birmensdorf
e-shop@wsl.ch
PDF Download: www.wsl.ch/berichte

ISSN 2296-3448 (Print)
ISSN 2296-3456 (Online)

Vorwort

Können Gesellschaften aus extremen Ereignissen mit Sachschäden und Todesopfern lernen? Die Antwort auf diese Frage hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab. Zentral ist sicherlich das politische System einer Gesellschaft. Nur wenn es möglich ist, die abgelaufenen Ereignisse zu dokumentieren und selbstkritisch zu analysieren, kann die Bevölkerung in Zukunft besser mit Extremereignissen umgehen. Nach dem ersten Schock und dem Aufatmen besteht allzu leicht die Gefahr, schnell wieder zur Tagesordnung überzugehen – das Gedächtnis einer Gesellschaft beschränkt sich hier meist nur auf wenige Jahre. Da «nach dem Ereignis» auch «vor dem Ereignis» bedeutet, zeichnen sich resiliente Gesellschaften dadurch aus, dass sie nicht nur den Ursprungszustand rasch wieder herstellen, sondern auch Massnahmen umsetzen, um in Zukunft besser vorbereitet zu sein. Dieser wiederkehrende Prozess lässt sich mit dem Kreislauf des Integralen Risikomanagements darstellen, wobei der Aspekt des Lernens eine dritte Dimension erfordert und wir auch von der Spirale des Integralen Risikomanagements sprechen könnten.

In der Schweizer Naturgefahrengeschichte haben Extremereignisse mit bedeutenden Schäden immer wieder zu drastischen Einschnitten in das gesellschaftliche Leben geführt. Der Blick in die Vergangenheit zeigt jedoch, dass die Schweiz stets Lösungen gefunden hat mit den Auswirkungen von Extremereignissen umzugehen und entsprechende Lehren zu ziehen. Hervorzuheben in diesen Anpassungsprozessen ist der Umgang mit der Lawinengefahr, den die UNESCO im November 2018 mit der Aufnahme in die Liste des immateriellen Kulturerbes ausgezeichnet hat.

Mit den Beiträgen zu diesem Forum für Wissen spannen wir einen Bogen von der Wissenschaft zur Praxis. Heini Wernli ordnet Extremereignisse aus meteorologischer Sicht ein. Stefan Brönnimann legt dar, welche Lehren aus den Hochwasserereignissen des 19. Jahrhunderts gezogen wurden, und Stefan Margreth zeigt anhand der letzten 150 Jahre, wie sich der moderne Lawinenschutz entwickelt hat. Wie die aktuellen Klimaszenarien CH2018 vermuten lassen, müssen wir uns auf den Umgang mit zu viel Wasser (Hochwasser), aber auch mit zu wenig Wasser (Trockenheit) einstellen. Norina Andres und Andreas Rigling zeigen hierzu aktuelle Trends auf.

Wie die Praxis mit Extremereignissen umgeht, beleuchten Christian Wilhelm anhand der Bergsturz- und Murgangereignisse in Bondo aus Sicht eines Kantons und Josef Eberli am Beispiel von Hochwasserereignissen aus Sicht eines Kantons und des Bundes.

Wir sind überzeugt, angesichts der bevorstehenden klimatischen und gesellschaftlichen Herausforderungen mit diesem «Forum für Wissen» den Blick für einen sach- und zeitgerechten Umgang mit Extremereignissen zu schärfen – eine zentrale Grundlage für eine resiliente Gesellschaft gegenüber Umweltrisiken.

Davos, 30. April 2019

Michael Bründl
Tagungsleiter Forum für Wissen

Inhalt	Seite
Vorwort	3
Was sind Extremereignisse? Einordnung aus meteorologischer Sicht Heini Wernli	7
Simulation des Hochwassers von 1868 und Lehren für die Zukunft Stefan Brönnimann, Peter Stucki und Andreas Zischg	13
Lawinenwinter der letzten 150 Jahre: ihre Bedeutung zur Entwicklung des Lawinenschutzes Stefan Margreth	21
Hochwasserschäden: Entwicklung und Trends Norina Andres und Alexandre Badoux	31
Wie viel Trockenheit ertragen unsere Wälder? Lehren aus extremen Trockenjahren Andreas Rigling, Sophia Etzold, Peter Bebi, Peter Brang, Marco Ferretti, David Forrester, Holger Gärtner, Arthur Gessler, Christian Ginzler, Barbara Moser, Marcus Schaub, Sophie Stroheker, Volodymyr Trotsiuk, Lorenz Walthert, Roman Zweifel und Thomas Wohlgemuth	39
Bergsturz Cengalo und Murgänge Bondo: Erfahrungen der kantonalen Fachstelle Christian Wilhelm, Gian Cla Feuerstein, Andreas Huwiler und Roderick Kühne	53
Umgang mit Hochwasserereignissen und die Lehren aus Sicht eines Kantons und des Bundes Josef Eberli	67

Was sind Extremereignisse? Einordnung aus meteorologischer Sicht

Heini Wernli

ETH Zürich, Institut für Atmosphäre und Klima, Universitätstrasse 16, 8092 Zürich, heini.wernli@env.ethz.ch

Meteorologisch bedingte Extremereignisse sind sowohl von grosser gesellschaftlicher Bedeutung wie auch wissenschaftlich von grossem Interesse. Sie stellen statistisch seltene Ereignisse dar, entweder hinsichtlich eines gemessenen Wetterparameters (z.B. extreme Windgeschwindigkeit) oder in Bezug auf den verursachten sozioökonomischen Schaden (z.B. extremer Sturmschaden im Wald). Viele Extremereignisse sind mit typischen Wettersystemen verbunden (z.B. Hagelschäden mit Gewittern, Hitzewellen mit stationären Hochdruckgebieten). Die Vorhersage und Warnung vor Extremereignissen erfordern die detaillierte Untersuchung der meteorologischen Prozesse, die zu solchen Ereignissen führen können. Wie aktuelle Forschungsergebnisse zeigen, ist es oft ein komplexes Zusammenspiel diverser Faktoren, das beispielsweise ein «normales» Tiefdruckgebiet in einen extremen Sturm verwandelt.

1 Definition und Bedeutung

Es ist sinnvoll, zwei Kategorien von Extremereignissen zu unterscheiden. Unter Extremereignissen der ersten Kategorie versteht man Wetterereignisse, die bezüglich eines meteorologischen Parameters sehr stark vom Durchschnitt abweichen (z.B. besonders tiefe Temperaturen, grosse Niederschlagsmengen oder hohe Windgeschwindigkeiten). Weichen gleichzeitig mehrere Parameter sehr stark vom Durchschnitt ab, so spricht man auch von «compound extremes» (MARTIUS *et al.* 2016). Extremereignisse der zweiten Kategorie werden hinsichtlich des extremen sozioökonomischen Schadens definiert (z.B. besonders hohe Gebäudeschäden durch eine Flut). Solche Ereignisse werden auch «high-impact events» genannt und stehen aktuell im Fokus eines internationalen Programms der WMO (World Meteorological Organization; JONES und GOLDING 2014). Es ist zu beachten, dass der tatsächlich eintretende Schaden sehr stark von nicht-meteorologischen Faktoren abhängt, wie zum Beispiel der Bevölkerungsdichte und der Landnutzung in den betroffenen Gebieten sowie den Vermeidungsstrategien im Falle einer rechtzeitigen Unwetterwarnung. Die beiden Kategorien von Extremereignissen sind deshalb nicht notwendigerweise deckungsgleich: so verursacht zum Beispiel ein extremer Hagelsturm über einem See

kaum Schaden, und umgekehrt kann ein tropischer Wirbelsturm enormen Schaden verursachen, wenn er über eine Stadt zieht, ohne dass der Wirbelsturm aus meteorologischer Sicht aussergewöhnlich intensiv ist. Beide Kategorien von Extremereignissen werden in der aktuellen Forschung untersucht, mit den Zielen, 1) die physikalischen Prozesse, die zu den Ereignissen führen, besser zu verstehen, 2) die Vorhersagen solcher Ereignisse zu verbessern, sowie 3) die Häufigkeit solcher Ereignisse im sich verändernden Klima zu quantifizieren. Die folgenden Abschnitte geben zunächst einen kurzen Überblick der grundlegenden meteorologischen Aspekte von Extremereignissen. Anschliessend folgt anhand von zwei kurzen Beispielen ein Einblick in die aktuelle Forschung zu diesem Thema.

2 Meteorologie von Extremwetterereignissen

Viele markante Wetterereignisse in Mitteleuropa (und in anderen Regionen der mittleren Breiten) sind mit dem Durchzug von Tiefdruckgebieten und ihren dazugehörigen Fronten verbunden. Ausnahmen sind mit Hochdrucklagen verbundene Hitzewellen, nicht durch Fronten ausgelöste Hitzegewitter im Sommer sowie stark durch die Topografie geprägte Phänomene wie zum

Beispiel Föhnstürme. Tiefdruckgebiete und Fronten führen zu raschen und oft markanten Temperaturänderungen und vielfach zu intensiven Niederschlägen (Regen, Schnee, Hagel) und starken bodennahen Winden.

Im Detail können die meteorologischen Bedingungen, die zu einem Extremereignis führen, von Fall zu Fall stark variieren. Trotzdem gibt es einige markante Merkmale, die den meisten Extremsituationen gemeinsam sind. Sie werden in diesem Abschnitt exemplarisch dargestellt, zunächst für Temperaturextreme und dann für Stürme. Alle Beispiele sind für Zentraleuropa (Westdeutschland). Detailliertere Ausführungen zu vielen der hier beschriebenen Prozesse findet man zum Beispiel in WALLACE und HOBBS (2006).

2.1 Extreme Temperaturen

Als erstes werden extreme Temperaturereignisse betrachtet. Abbildung 1 zeigt die meteorologische Situation für einen besonders kalten Wintertag und einen besonders warmen Sommertag in Westdeutschland. Beim winterlichen Kaltereignis (Abb. 1a) strömt kalte Luft aus Skandinavien nach Deutschland, angetrieben von einem ausgeprägten, beinahe stationären Hochdruckgebiet über dem östlichen Nordatlantik. Solche beinahe stationären Hochs werden als «blockierende Hochdrucklagen» bezeichnet. Die Trajektorien, welche die Zugbahn der kalten Luftmassen in den drei Tagen vor der Ankunft in Westdeutschland darstellen, zeigen auf, dass die kalte Luft sehr rasch nach Mitteleuropa transportiert wird.

Beim sommerlichen Warmereignis (Abb. 1b) wird die Wettersituation wieder durch ein ausgedehntes, stationäres Hochdruckgebiet über Westeuropa bestimmt. In einem solchen Hochdruckgebiet kommt es vornehmlich zum Absinken von Luftmassen, was einen

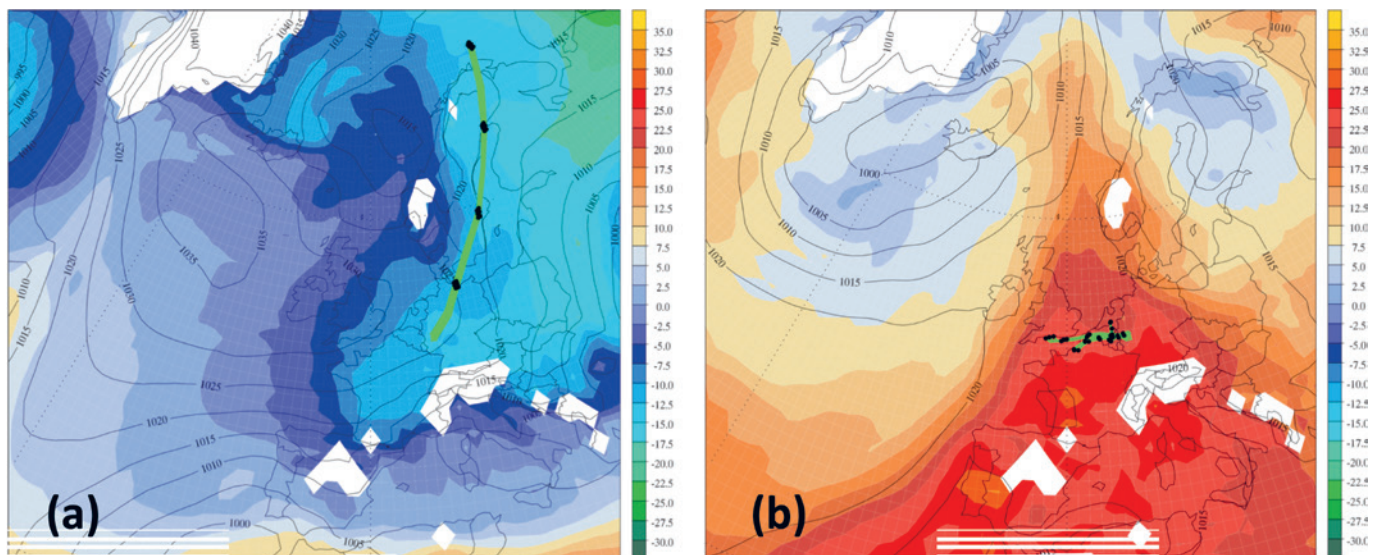


Abb. 1. Meteorologische Situation während (a) einem winterlichen Kalteneignis in Westdeutschland am 28. Februar 2005 und (b) einem sommerlichen Warmereignis am 10. August 2003. Dargestellt sind die Temperatur in einer bodennahen Schicht (auf 900 hPa, d.h. in einer Höhe von ca. 1 km; farbige Konturen; Konturabstand 2,5° C) und der auf Meeressniveau reduzierte Bodendruck (schwarze Konturlinien; Konturabstand 5 hPa). Rückwärtstrajektorien über 3 Tage, gestartet aus der Eifelregion auf 900 hPa, sind als grüne Linien eingezeichnet. Die Markierungen entlang der Trajektorien geben die Positionen im Abstand von 24 Stunden an. Abbildung aus WERNLI und PFAHL (2009).

wolkenfreien Himmel zur Folge hat. Ausserdem sind die Luftmassen dort häufig über mehrere Tage «gefangen» und werden dank der intensiven Sonneneinstrahlung sehr stark erwärmt. So sind die 3-Tages-Rückwärtstrajektorien verhältnismässig kurz, was auf die schwachen Winde in einer solchen stationären Hochdrucklage zurückzuführen ist. Besteht eine solche Wetterlage über einen längeren Zeitraum von eventuell mehreren Wochen, so kann dies zu einer Hitzewelle führen, wie zum Beispiel im Sommer 2003.

2.2 Extreme Winde

Stürme in Mitteleuropa treten meist im Winter zwischen November und März in Verbindung mit einem intensiven Tiefdruckgebiet auf, das im Atlantik entsteht. Der Entstehungsort liegt in einer Region mit einem sehr starken, horizontalen Temperaturkontrast, wo also kalte, polare Luftmassen und wärmere Luft aus gemässigten Breiten nahe beieinander liegen. Über dieser Region befindet sich in einer Höhe von rund 10 km der Jetstream, ein starker, räumlich relativ eng begrenzter Wind aus meist westlicher Richtung mit maximalen Geschwindigkeiten bis über 250 km/h. Je ausgeprägter der Temperaturkontrast am Boden ist, desto grösser sind auch die Windgeschwin-

digkeiten des Jets in der Höhe. In einer solchen Umgebung mit einem starken, horizontalen Temperaturkontrast und einem starken Jetstream können sich Tiefdruckgebiete rasch verstärken. Diese Intensivierung wird oft durch das Freisetzen latenter Wärme durch Kondensation von Wasserdampf in Wolken begünstigt. Abbildung 2 zeigt als Beispiel einer solchen Entwicklung die meteorologische Situation während der Stürme «Vivian» und «Wiebke» im Februar 1990. Am 27. Februar befand sich das Zentrum des Orkantiefs «Vivian» über Skandinavien, während im Nordatlantik ein neues Tief entstand. Dieses verstärkte sich in den darauffolgenden zwei Tagen zum Orkan «Wiebke» (von einem Orkan spricht man bei bodennahen Windgeschwindigkeiten von mindestens 118 km/h). Das Tiefdruckzentrum befand sich am 1. März über Norddeutschland. Die stärksten Winde traten bei «Wiebke» in Frankreich, West- und Süddeutschland auf – dort liegen die schwarzen Isolinen des Drucks besonders dicht zusammen – während bei «Vivian» auch die Schweiz sehr stark von Sturmschäden betroffen war (SCHÜEPP *et al.* 1994). Eine ähnliche rasche Abfolge von intensiven Tiefdruckgebieten gab es im Dezember 1999 mit den Stürmen «Lothar» und «Martin». Dieses Phänomen bezeichnet man als «Clustering» von Tiefdruckgebieten (PINTO *et al.* 2014).

Es wird aktuell intensiv erforscht, nicht zuletzt deshalb, weil eine direkte Abfolge von Extremereignissen zu grossen kumulierten Schäden führen kann.

3 Beispiele der aktuellen Forschung

Die aktuelle Forschung untersucht verschiedene, bisher ungenügend verstandene Aspekte im Zusammenhang mit meteorologischen Extremereignissen. Diese beinhalten ein verbessertes Prozessverständnis, die detaillierte Modellierung mit hochauflösenden numerischen Modellen sowie eine Abschätzung der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen im sich ändernden Klima. Unsere Arbeitsgruppe beschäftigt sich in erster Linie mit dem physikalischen Prozessverständnis, und die folgenden zwei Beispiele geben einen kurzen Einblick in aktuelle Resultate.

3.1 Donauflut Juni 2013

Im Juni 2013 war Mitteleuropa durch eine Jahrhundertflut der Flüsse Donau und Elbe getroffen, nach einer viertägigen Periode mit starken Niederschlägen. Bereits vor dieser Periode waren die Wetterbedingungen in der Region aussergewöhnlich kühl und nass

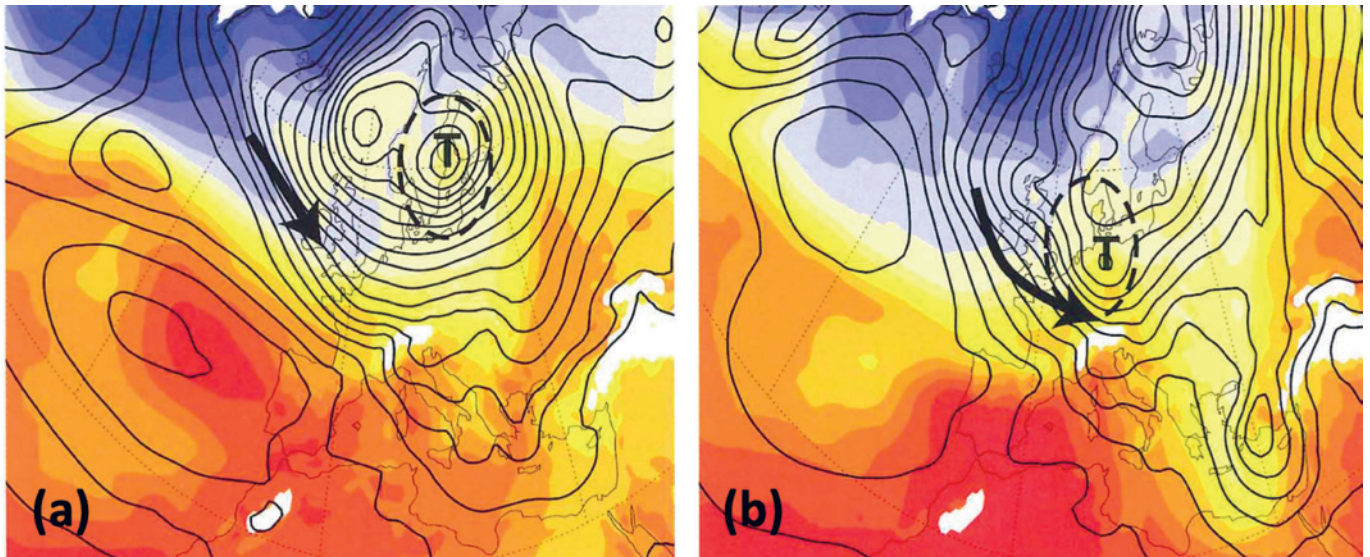


Abb. 2. Meteorologische Situation während der Stürme (a) «Vivian» und (b) «Wiebke» Ende Februar 1990. Dargestellt sind die Temperatur auf 850 hPa (farbige Konturen; Konturabstand 2,5°C) und der auf Meeressniveau reduzierte Bodendruck (schwarze Konturlinien; Konturabstand 5 hPa). Abbildung aus WERNLI und PFAHL (2009).

aufgrund von wiederholt aufgetretenen Trogbildungen in der oberen Troposphäre über dem Alpenraum. Diese langanhaltende Wetterlage führte vor dem eigentlichen Starkniederschlagsereignis bereits zu einem ungewöhnlichen Temperaturmuster über Europa: relativ warme Luft lag über Deutschland und Polen, während in der Schweiz und Italien ungewöhnlich kalte Bedingungen herrschten. Dieser «verdrehte Temperaturverlauf» führte dazu, dass in den letzten Tagen des Mai 2013 drei Tiefdruckgebiete «aus der falschen Richtung», das heisst aus der Region des Schwarzen Meeres, in Richtung Westen zu den Alpen propagierten. Diese Tiefdruckgebiete waren an sich nicht besonders intensiv, aber transportierten kontinuierlich feuchte Luft von Norden gegen die Nordalpen und die deutschen Mittelgebirge und sorgten so für extreme Niederschläge. Interessanterweise stammte beinahe das gesamte Wasser, das Ende Mai und anfangs Juni nördlich der Alpen ausregnete, von Verdunstung über dem Europäischen Festland, das heisst, die normalerweise vorherrschenden ozeanischen Verdunstungsquellen spielten bei diesem Extremereignis kaum eine Rolle (siehe Abb. 3). Dies illustriert, dass in einigen Fällen lokale Extremereignisse mit sehr ungewöhnlichen, grossräumigen Wetterprozessen verbunden sind (GRAMS *et al.* 2014).

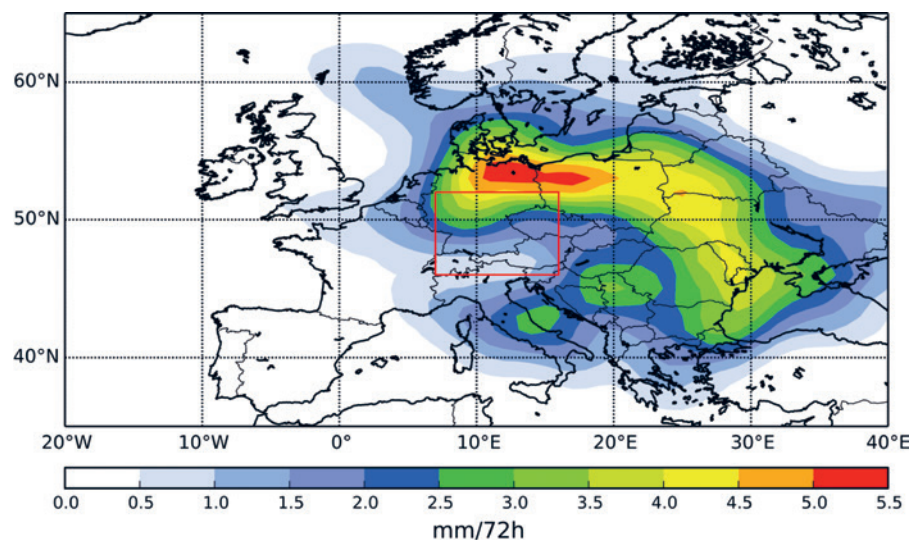


Abb. 3. Verdunstungsquellen des Niederschlags, der in der roten Box in den 3 Tagen von 00 UTC 31 Mai bis 00 UTC 3 Juni 2013 fiel (Farben zeigen die Verdunstung in mm, akkumuliert über 3 Tage). Abbildung aus GRAMS *et al.* (2014).

3.2 Extremes Warmereignis in der Arktis im Dezember 2015

An der Jahreswende 2015/2016 wurden in der Arktis rekordverdächtig hohe Temperaturen von über 0°C erreicht, sodass das Meereis während ein paar Tagen zu schmelzen begann. Dadurch reduzierte sich mitten im tiefsten Winter die Ausdehnung des arktischen Meereises stark. Mithilfe von Rückwärtstrajektorien wurde in der Studie von BINDER *et al.* (2017) untersucht, auf welchem Weg die warme

Luft in die Arktis transportiert wurde, und welche Prozesse für die Erwärmung dieser Luftmassen verantwortlich waren. Es zeigte sich ein überraschend komplexes Bild mit drei ganz unterschiedlichen Luftmassen, die zu diesem Warmereignis beigetragen hatten: 1) warme Luft, die innerhalb von rund 5 Tagen von der Sahara bis beinahe zum Nordpol transportiert wurde, 2) anfänglich kalte, bodennahe Polarluft, die über dem vergleichsweise warmen Nordatlantik durch Wärme-flüsse aus dem Ozean auf über 0°C erwärmt

wurde, sowie 3) stark absinkende Luft aus der mittleren Troposphäre (ca. 5 km Höhe), die beim Absinken durch Kompression sehr stark adiabatisch erwärmt wurde. Diese drei Luftmassen vereinten sich nördlich von Schottland und wurden dort von einem aussergewöhnlich starken, polwärts gerichteten Wind in 1 bis 2 km Höhe zum Pol transportiert (siehe Abb. 4). Diese starken Winde waren die direkte Folge einer Serie von sehr intensiven Tiefdruckgebieten bei Island sowie einem starken Hochdruckgebiet über Skandinavien. Dieses Beispiel illustriert eindrücklich das Zusammenspiel verschiedenster Faktoren und physikalischer Prozesse, die notwendig sind, um ein Extremereignis entstehen zu lassen.

4 Vorhersagen

Korrekte Wettervorhersagen sind beim Auftreten von Extremereignissen besonders wichtig, insbesondere um die betroffene Bevölkerung rechtzeitig zu warnen. Gleichzeitig ist die Vorhersage solcher Ereignisse jedoch auch besonders schwierig, einerseits weil, wie zuvor dargestellt, oft ein komplexes Zusammenspiel verschiedenster Faktoren wichtig ist, und andererseits, weil Extremereignisse selten sind und damit die Modelle relativ selten für solche Ereignisse getestet und optimiert werden können. Dies führt dazu, dass Vorhersagen von Extremereignissen grundsätzlich unsicher sind. Um diese Unsicherheit zu quantifizieren, wurden in den letzten 20 Jahren sogenannte Ensemble-Vorhersagesysteme entwickelt. Die Kernidee ist, dass anstelle einer einzigen Vorhersage das numerische Modell viele Vorhersagen derselben Situation ausgehend von leicht unterschiedlichen Anfangsbedingungen berechnet (WERNLI 2012). Dies führt zu unterschiedlichen Vorhersagen, und das Ausmass ihrer Abweichung stellt ein gutes Mass dar für die Unsicherheit einer Vorhersage. Ebenso können solche Ensemble-Vorhersagen verwendet werden, um Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines Extremereignisses zu bestimmen. Falls zum Beispiel 10 von 50 Ensemble-Simulationen einen extremen Sturm vorhersagen und die anderen 40 Simulationen

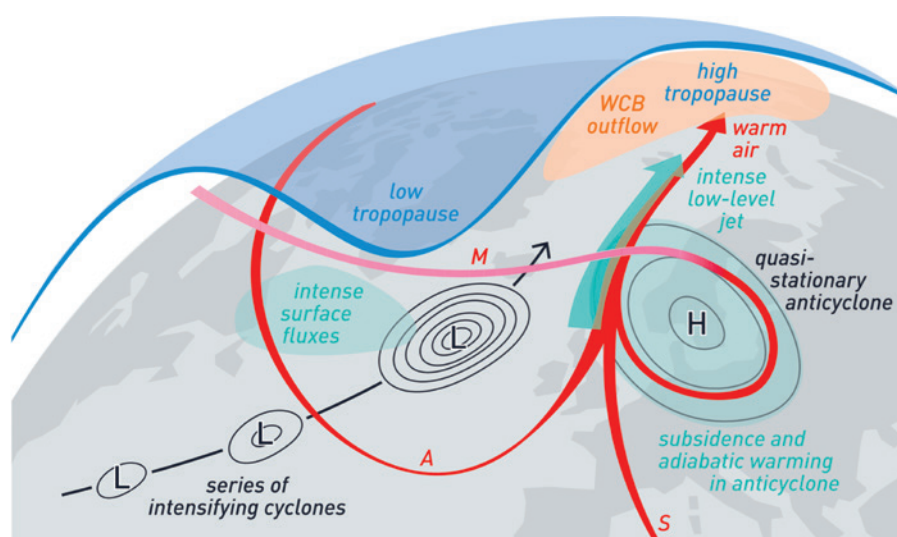


Abb. 4. Schematische Darstellung der ungewöhnlichen Prozesse, die Ende Dezember 2015 zum extremen Warmereignis in der Arktis führten. Eine Serie von Tiefdruckgebieten («L») über dem Nordatlantik entwickelte sich nahe eines Höhentrogs mit einer tiefliegenden Tropopause (blau). Ein starker «warm conveyor belt» (WCB), d. h. ein Strom feuchter Luft, der in diesen Tiefdruckgebieten aufsteigt, förderte die zum Pol gerichtete Ausdehnung des Höhenrückens (hohe Tropopause nördlich von Spitzbergen) und die Ausbildung eines stationären Hochdruckgebiets («H») über Skandinavien. Zwischen den Nordatlantischen Tiefs und diesem Hoch entstand eine extrem starke, polwärts gerichtete Strömung in Bodennähe (grüner Pfeil), welche die warmen Luftmassen S, A und M (rote Pfeile) in die Arktis transportierte. Abbildung aus BINDER *et al.* (2017), gezeichnet von Sandro Bösch (ETH Zürich).

ein «normales» Tiefdruckgebiet, dann ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit von 20 Prozent für das Auftreten eines Extremereignisses. Seit Mai 2016 betreibt die MeteoSchweiz ihr eigenes operationelles Ensemble-Vorhersagesystem, COSMO-E (KLASA *et al.* 2018), mit einer sehr feinen Maschenweite von 2 km. Dieses System ermöglicht damit Wahrscheinlichkeitsvorhersagen von meteorologischen Extremereignissen in der Schweiz.

5 Literatur

- BINDER, H.; BOETTCHER, M.; GRAMS, C. M.; JOOS, H.; PFAHL, S.; WERNLI, H., 2017: Exceptional airmass transport and dynamical drivers of an extreme wintertime Arctic warm event. *Geophys. Res. Lett.* 44: 12028–12036; siehe auch Artikel im Tages Anzeiger vom 15. Januar 2018 [<https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/natur/Highway-zur-Arktis/story/16305939>].
- GRAMS, C.M.; BINDER, H.; PFAHL, S.; PIAGET, N.; WERNLI, H., 2014: Atmospheric processes triggering the central European floods in June 2013. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 14: 1691–1702.
- JONES, S.; GOLDING, B., 2014: High Impact Weather Implementation Plan. WWRP, 87 S. [https://www.wmo.int/pages/prog/arep/wwrp/new/documents/HIW_IP_v1_4.pdf].
- KLASA, C.; ARPAGAU, M.; WALSER, A.; WERNLI, H., 2018: An evaluation of the convection-permitting ensemble COSMO-E for three contrasting precipitation events in Switzerland. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 144: 744–764.
- MARTIUS, O.; PFAHL, S.; CHEVALIER, C., 2016: A global quantification of compound precipitation and wind extremes. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 43: 7709–7717.
- PINTO, J. G.; GÓMARA, I.; MASATO, G.; DACRE, H. F.; WOOLLINGS, T.; CABALLERO, R., 2014: Large-scale dynamics associated with clustering of extratropical cyclones affecting Western Europe. *J. Geophys. Res. Atmos.* 119: 13704–13719.
- SCHÜEPP, M.; SCHIESSER, H.H.; HUNTRIESER, H.; SCHERRER, H.U.; SCHMIDTKE, H., 1994: The winterstorm «Vivian» of 27 February 1990: About the meteorological development, wind forces and damage situation in the forests of Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* 49: 183–200.
- WALLACE, J.M.; HOBBS, P.V., 2006: Atmospheric science – an introductory survey. Academic Press, Burlington.

WERNLI, H.; PFAHL, S., 2009: Grundlagen des Klimas und extremer Wettersituationen. In: SIROCKO F. (Hg.) Wetter, Klima, Menschheitsentwicklung – Von der Eiszeit bis ins 21. Jahrhundert. Darmstadt, Wissenschaftliche Buchgesellschaft. 44–52.

WERNLI, H., 2012. Wetter, Chaos und probabilistische Wettervorhersagen. PROMET, 37: 3–11.

Abstract

What are extreme events? A meteorological perspective

Extreme weather events are of great socioeconomic relevance but also highly interesting from a scientific point of view. They correspond by definition to rare events, which can be defined either on the basis of a measured atmospheric parameter (e.g., extreme wind speed) or in terms of their impact (e.g., extreme windstorm damage in a forest). Many types of extreme events are caused by specific weather systems (e.g., hail occurs in thunderstorms and heat waves in stationary high-pressure systems). The prediction and warning of extreme events requires a detailed investigation of the meteorological processes that lead to the formation of such events. Recent research results reveal that often a complex interplay of various factors and physical processes are responsible for an extreme event to occur, e.g., to convert a “normal” low-pressure system into a devastating storm. Two examples are shown to illustrate this point, first the processes leading to the Elbe flood in late spring 2013 and then the sequences of events leading to the extreme Arctic warm event in late 2015.

Keywords: extreme temperature, extreme precipitation, storms, extratropical cyclones, trajectories, weather prediction

Simulation des Hochwassers von 1868 und Lehren für die Zukunft

Stefan Brönnimann¹, Peter Stucki¹ und Andreas Zischg²

¹ Geographisches Institut und Oeschger-Zentrum für Klimaforschung, Universität Bern, Hallerstr. 12, CH-3012 Bern, stefan.broennimann@giub.unibe.ch, peter.stucki@giub.unibe.ch

² Geographisches Institut und Mobiliar Lab für Naturrisiken, Universität Bern, andreas.zischg@giub.unibe.ch

Numerische Methoden kombiniert mit historischen Daten erlauben, vergangene Wetterereignisse wie das Hochwasser von 1868 detailliert und quantitativ zu untersuchen. Das Hochwasser betraf vor allem die Kantone Tessin, Graubünden und Wallis und führte zu verheerenden Schäden. Ausgehend von Reanalysen und dynamischem Downscaling lässt sich das Ereignis mit hydrologisch-hydraulischen Modellen reproduzieren. Damit lassen sich die Folgen des historischen Hochwassers mit den potenziellen Schäden vergleichen, die ein Hochwasser dieser Gröszenordnung heute verursachen könnte. Das Ereignis kann als ein extremes meteorologisch-hydrologisches Szenario betrachtet werden. Die betroffenen Flächen sind heute zwar weit intensiver besiedelt als damals, dafür zeigen die Flussverbauungen in der Magadinoebene Wirkung. Die Bewältigung der Schäden nach dem Ereignis prägt die Schweiz bis heute. Das Hochwasser von 1868 verhalf einem national koordinierten Hochwasserschutz zum Durchbruch.¹



Abb. 1. Oben: Geschiebeablagerungen der Saltina in Brig und Glis von 1868 (WB-Archiv). Unten: Das Dorf Vals, GR, nach dem Hochwasser von 1868 (Gemeindearchiv Vals).

1 Einleitung

Nach einem regenreichen Monat ereigneten sich Ende September und Anfang Oktober 1868 in den Schweizer Alpen zwei extreme Niederschlagsereignisse (COAZ 1869; ARPAGAU 1870; STUCKI *et al.* 2012, 2018). Während die erste Niederschlagsphase am 27. und 28. September vor allem im Tessin und Graubünden zu grossen Regenmengen führte, betraf die zweite Phase vom 1. bis 5. Oktober vor allem die Kantone Tessin, Wallis und Uri. Über acht Tage fielen auf dem San-Bernardino-Pass 1118 Millimeter Niederschlag. Zahlreiche Flüsse und Seen traten über die Ufer. Im Rheintal bildeten sich Seen, die Magadinoebene stand unter Wasser. Der Lago Maggiore erreichte am 4. Oktober 1868 den höchsten je gemessenen Stand von 199,98 m ü.M. Auch im Wallis traten Flüsse über die Ufer (vgl. Abb. 1).

Die Folgen des Ereignisses waren verheerend: 51 Menschen starben, Brücken wurden weggeschwemmt oder beschädigt, Dörfer und Strassen wurden von Geschiebe zugedeckt oder von Murgängen zerstört (vgl. Abb. 1). Vor allem der Kanton Tessin war stark betroffen (vgl. Abb. 2). Umgerechnet auf das Jahr 2000 kann von einem Schaden von knapp einer Milliarde Franken ausgegangen werden (PFISTER 2009); es war eine der schadenreichsten Naturkatastrophen überhaupt in der Schweiz, und die Bewältigung war auch politisch folgenreich (SUMMERMATTER 2005). In diesem Beitrag möchten wir das Ereignis von 1868 als Extremereignis untersuchen und die Frage stellen, wie wir

¹ Dieser Artikel beruht zu einem grossen Teil auf dem Heft von BRÖNNIMANN *et al.* (2018) und dem Fachartikel von STUCKI *et al.* (2018), vgl. auch das Video dazu: youtu.be/l2AtsZWpsuU.

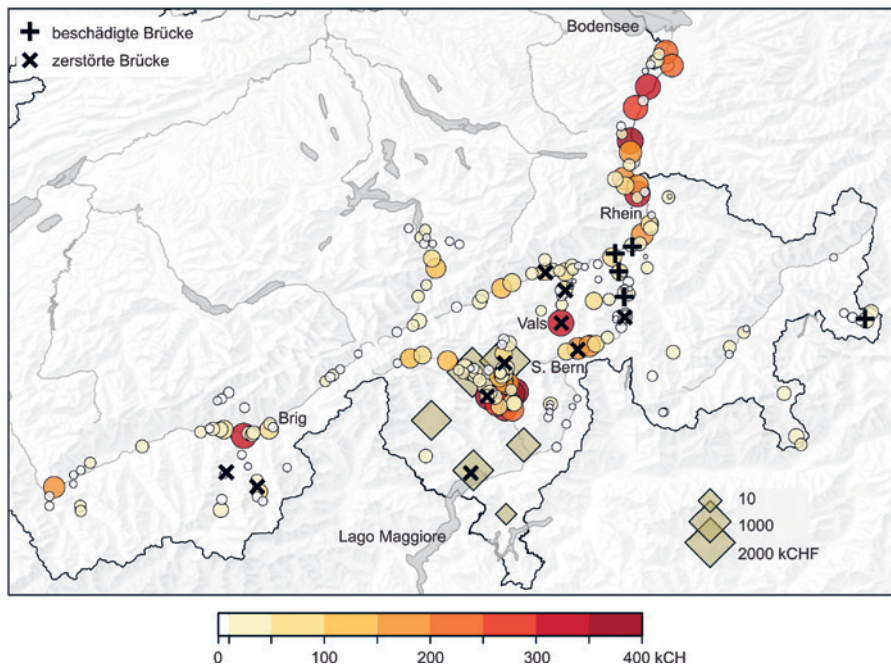


Abb. 2. Schadensbeträge verursacht durch das Hochwasser im September und Oktober 1868 (in Tausend Schweizer Franken, kCHF) aus zeitgenössischen Erhebungen in fünf Kantonen. Kreise und Diamanten beziehen sich auf Schadenssummen pro Gemeinde bzw. (im Kanton Tessin) Bezirk. Kreuze zeigen Schäden an Brücken (verändert aus STUCKI *et al.* 2018).

aus vergangenen Extremereignissen lernen können (vgl. BRÖNNIMANN *et al.* 2018 für eine ausführlichere, populärwissenschaftliche Übersicht).

Das Hochwasserereignis von 1868 wurde von Seiten der Geschichtswissenschaft gut untersucht (PFISTER und BRÄNDLI 1999; SCHMID 2001; SUMMER-MATTER 2005). Die Arbeiten zeigen, welchen Einfluss dieses Ereignis auf den jungen Bundesstaat hatte und wie es den Umgang mit Hochwasser und Naturkatastrophen in der Schweiz nachhaltig veränderte. Neu ist, dass auch die naturwissenschaftlichen Aspekte quantitativ mit einer Modellkette, die von Wetterdaten bis zu simulierten Überflutungsflächen reichen, untersucht werden können. Dieser quantitative Ansatz lässt sich mit historischen Forschungsfragen verbinden und kann so zu neuen Erkenntnissen führen. In der Folge wenden wir eine solche Modellkette für das Hochwasserereignis 1868 an.

Die Kombination von atmosphärische Reanalysen mit dynamischem Downscaling und hydrologischen (oder anderen) Modellen wird für Ereignisse in den letzten Jahrzehnten bereits seit längerem eingesetzt (z.B. WILBY *et al.* 2000). Weiter zurückreichende Reanalysen (COMPO *et al.* 2011) sowie Wet-

terrekonstruktionen durch Analogverfahren (FLÜCKIGER *et al.* 2017) erlauben die Anwendung solcher Modellketten auch für weiter zurückliegende Ereignisse (vgl. STUCKI *et al.* 2015 für einen Föhnsturm in der Schweiz). Diese Rückwärtsverlängerung in die Vergangenheit ist für die Naturgefahrenforschung von grosser Bedeutung (vgl. BRÖNNIMANN *et al.* 2019a). Sie führt zu grösseren Stichproben an Extremereignissen als die kurze Periode gegitterter, meteorologischer Felder und erlaubt damit die Analyse von sehr seltenen und potenziell sehr folgenschweren Ereignissen (vgl. auch WETTER 2017). So konnte beispielsweise der Rekordseestand am Bodensee und der hohe Abfluss des Rheins im Frühsommers 1817 numerisch simuliert werden (RÖSSLER und BRÖNNIMANN 2018). Mit hydrologisch-hydraulischen Modellen können anschliessend Szenarien simuliert werden, um so neue Schlussfolgerungen für das Hochwasserrisikomanagement der Gegenwart und Zukunft zu ziehen.

Für Hochwasser ist die Rückwärtsverlängerung insofern wichtig, als ausserordentlich grosse Ereignisse im 19. Jahrhundert häufig waren (SCHMÖCKER-FACKEL und NÄF 2010), während sie um die Mitte des 20. Jahrhundert bis ca. 1978 seltener wurden

(PFISTER 2009). Diese Häufung hat klimatische Gründe, so waren Hochwasserwetterlagen in der ersten Phase häufiger, in der zweiten seltener (BRÖNNIMANN *et al.* 2019b). Aber die selteneren Hochwasser um die Mitte des 20. Jahrhundert hatten wiederum Rückwirkungen auf den gesellschaftlichen Umgang mit Risiken (PFISTER 2009). Die Rekonstruktion historischer Hochwasserereignisse und derer Folgen erfordert daher zwingend die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Fachleuten aus den Forschungsbereichen Klimatologie, Hydrologie und Umweltgeschichte.

2 Wetterrekonstruktion

Die Modellkette beginnt mit einer grossräumigen Wetterrekonstruktion. In dieser Arbeit verwenden wir die «Twentieth Century Reanalysis» (20CRv2c, COMPO *et al.* 2011). 20CRv2c beruht auf der Assimilation von Messungen des Luftdrucks in ein globales Wettervorhersagemodell und liefert alle sechs Stunden ein Ensemble von 56 gleich wahrscheinlichen Realisierungen des Wetters. Die wenigen für 1868 verfügbaren Stationen reichen bereits aus, um über Mitteleuropa eine sinnvolle Rekonstruktion zu erhalten. Dies zeigt sich in diesem Fall an der guten Übereinstimmung der 56 Realisierungen, so dass für weitere Analysen wie auch für das dynamische Downscaling (vgl. Kap. 3) nur noch der Mittelwert der 56 Realisierungen verwendet wird.

Die Analyse von 20CRv2c für das Ereignis zeigt eine Abfolge von vier nur langsam vorankommenden Höhentiefs, wobei sich zwei davon zu weit nach Süden reichenden Trögen entwickelten. Damit einher gingen Höhenwinde aus südlichen bis sogar südöstlichen Richtungen im Bereich der Alpen. Als Beispiel zeigt Abbildung 3 die Wetterlage am 3. Oktober 1868. Eine grossräumige Tiefdruckrinne erstreckte sich von den Alpen bis Nordafrika. Dieses Tief entsprach einem Höhentrog auf ca. fünf Kilometer über Meer (500 hPa). Auf der Trogvorderseite herrschte in der unteren Troposphäre eine nordwärts gerichtete Strömung, die Feuchtigkeit vom Mittelmeer gegen die Alpen

führte. Auch Rückwärtstrajektorien (vom Ankunftspunkt über den Alpen rückwärts verfolgte Bahnen der Luftpakete) für zwei Tage mit starkem Niederschlag (27. September und 3. Oktober 1868) zeigen eine Herkunft der bodennahen Luftpakete vom Tyrrhenischen Meer her (Stucki *et al.* 2018). Über mehrere Tage konnte dadurch viel Wasserdampf über dem noch warmen Mittelmeer aufgenommen werden, der dann beim Aufsteigen über der Alpensüdseite kondensierte. Entsprechend führten beide Episoden zu langanhaltenden Starkniederschlägen auf der Alpensüdseite, die den Pegel des Lago Maggiore ansteigen liessen.

Die Wetterlagen vor und während des Hochwasserereignisses waren sehr typisch für Überschwemmungen auf der Alpensüdseite. Aus meteorologischer Sicht ergibt sich die ausserordentliche Schwere des Ereignisses aus einer Verquickung von vier aufeinanderfolgenden, zum Teil langanhaltenden und sehr regenintensiven Wetterlagen, die auf der grossräumigen Wetterskala von weit nach Süden reichenden Kaltlufttrögen geprägt waren. Aufgrund der klaren atmosphärischen Muster könnte dieses extreme Hochwasser heute wohl sehr früh vorhergesagt werden. Den Wetterdiensten sind und waren solch regenintensive, vor allem im Herbst auftretende Südlagen bekannt. Für einen sehr ähnlichen Fall Ende Oktober 2018 wurden im Wettermodell der MeteoSchweiz denn auch realistische 250 bis 400 mm Niederschlag prognostiziert (MeteoSchweiz 2018). Auch im Oktober 2000 konnte

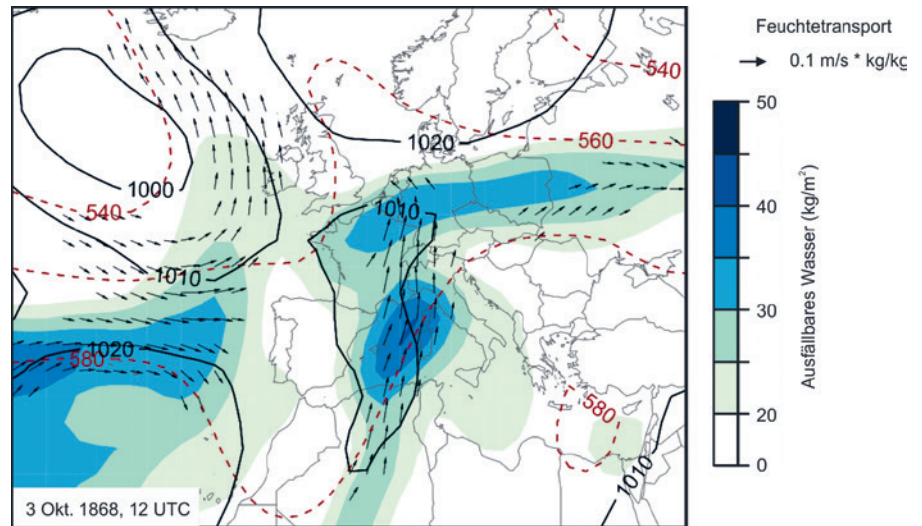


Abb. 3. Ausfällbares Wasser in der Atmosphäre (Farbschattierung, kg/m^2) und Feuchtetransport (Pfeile, $\text{m/s} \cdot \text{kg/kg}$) auf 850 hPa (ca. 1,5 km über Meer), Luftdruck auf Meereshöhe (schwarze durchgezogene Linien, hPa), Geopotenzielle Höhe auf 500 hPa (rote, gestrichelte Linien, Dekameter, ca. 5,5 km über Meer) für den 3. Oktober 1868 aus der Twentieth Century Reanalysis 20CRv2c.

der Schweizer Wetterdienst aufgrund der synoptischen Analysen die Behörden schon einige Tage im Voraus über die potenziellen Starkniederschläge informieren. Obwohl damals die absoluten Niederschlagsmengen noch deutlich unterschätzt wurden, hatte man aus dem analogen Extremereignis vom September 1993 gelernt (Bundesamt für Wasser und Geologie 2002).

3 Downscaling

Das Ereignis von 1868 wurde sowohl dynamisch als auch statistisch herunterskaliert. Das dynamische Down-

scaling beruht auf dem WRF-Modell (SKAMAROK *et al.* 2008). In vier Schritten wurde das Ensemblemittel der 20CRv2c-Reanalyse bis auf eine Auflösung von zwei Kilometer herunterskaliert. Als Beispiel zeigt Abbildung 4 den Niederschlag in der Nacht vom 26. zum 27. September 1868. Zwar lässt sich das Ereignis nicht Gitterzelle für Gitterzelle mit der Realität vergleichen, aber die Niederschlagsverteilung (Abb. 4, rechts) erscheint sehr plausibel und physikalisch realistisch. Wo die feuchte Luft auf die Voralpen trifft, wird sie angehoben und Kondensation setzt ein. Dadurch werden hochreichende konvektive Zellen initiiert, aus denen organisierte Gewitter entstehen,

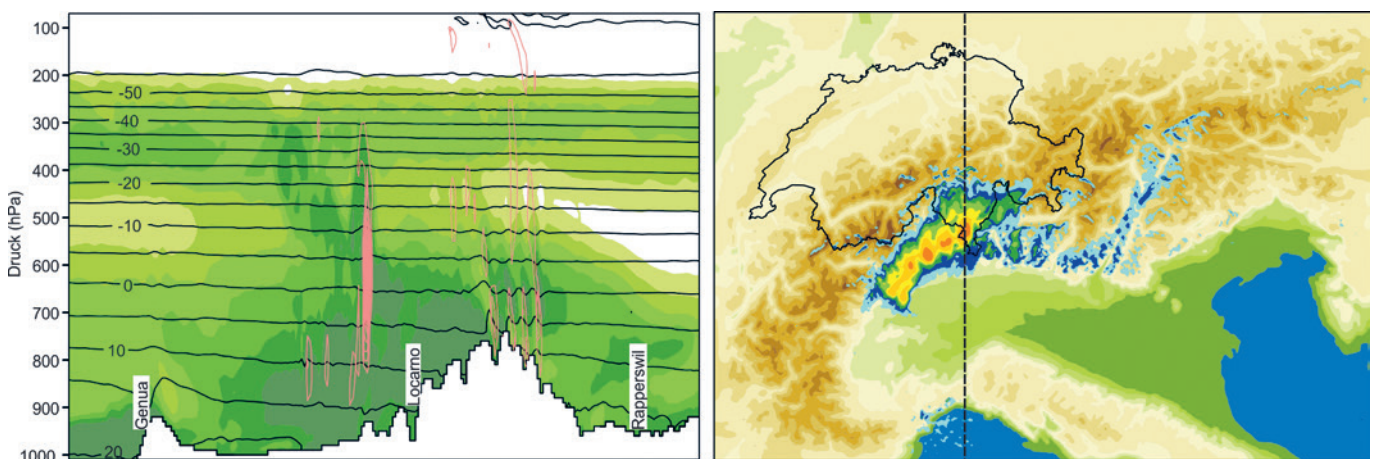


Abb. 4. Dynamisches Downscaling des Extremwetters im September 1868 mit dem WRF-Modell. Links: Meridionaler Querschnitt (entlang der gestrichelten Linie im rechten Bild) der relativen Feuchte am 26. September 21 UTC. Die roten Linien links stellen den Vertikalwind dar. Rechts: stündlicher Niederschlag in derselben Nacht, 27. September 3 UTC (vgl. BRÖNNIMANN *et al.* 2018).

was im Querschnitt (Abb. 4, links) gut sichtbar ist. Die Gewitter ziehen mit der mittleren Strömung nach Norden, der Niederschlag erreicht das südliche Tessin und dringt schliesslich in die Alpentäler und über den Alpenhauptkamm vor.

Hinweise für starke Konvektion gibt es auch aus damaligen Beobachtungen. Während der zwei Hauptniederschlagsphasen zwischen dem 26. September und dem 4. Oktober 1868 wird unter anderem von anhaltendem Regen und schweren Gewittern mit einzelnen Hagelzügen berichtet (ARPAGAU 1870, Abb. 5). Somit bildet das Modell die Situation realistisch ab. Während der neun Tage produziert das Modell nahezu ununterbrochene, ausgedehnte und intensive Niederschläge über dem Tessin, die durch den anhaltenden Feuchtigkeitstransport von Süden, orographische Hebung und die Entwicklung von Gewittern erklärt werden können.

Eine zweite Herunterskalierung des Ereignisses erfolgte mit einer Analogmethode. Für jeden Tag vom 1. Oktober 1867 bis 31. Oktober 1868 wurde der meteorologisch ähnlichste Tag in den vergangenen 50 Jahren gesucht (vgl. FLÜCKIGER *et al.* 2017). Dieser Analogtag muss die selbe Wetterlage (SCHWANDER *et al.* 2017) aufweisen wie der Tag in der Vergangenheit, und die Stationsmessungen von Temperatur und Niederschlag in Lugano, Zürich, Mailand und Padua sowie an einem Gitterpunkt in 20CRv2c über den Alpen müssen maximal übereinstimmen (euklidische Distanz der standardisierten Messungen).

Zwar gibt es an einzelnen Tagen Unterschiede zwischen der statistischen und der dynamischen Methode des Downscalings. Über das Gesamteignis aufsummiert sind die Niederschlagsmengen in beiden Methoden aber fast identisch.

4 Hydrologisch-hydraulische Simulationen

In einem weiteren Schritt wurde versucht, auch die Flächen zu bestimmen, die infolge des hier rekonstruierten meteorologischen Ereignisses überflutet worden wären. Wir wollten testen, ob mit den heutigen hydrologischen und hydraulischen Modellen auch die damals überfluteten Flächen und Gebäude rekonstruiert werden können. Diese Rekonstruktion der Folgen des damaligen Hochwasserereignisses wurde am Beispiel des Flusses Ticino und des Lago Maggiore in der Magadino-Ebene zwischen Bellinzona und dem See getestet.

Das rekonstruierte Niederschlagsmuster wurde in einem ersten Schritt in das hydrologische Modell PREVAH (VIVROLI *et al.* 2009) eingespeist. Dieses Modell wurde für die Kurzfrist-Vorhersage von Abflüssen im Einzugsgebiet des Lago Maggiore entwickelt und ist ein gekoppeltes hydrologisches und hydraulisches System, das auch anthropogene Einflüsse auf die Hydrologie wie beispielsweise durch die Wasserkraft oder die heutige Seeregulierung mit berücksichtigt (vgl. ANDRES *et al.* 2016). Diese Routinen wur-

den aus dem Modellsystem entfernt, da die menschlichen Einflüsse auf die Gewässer im 19. Jh. noch nicht relevant waren. In einem weiteren Schritt wurden der mit dem hydrologischen Modell simulierte Abfluss des Ticino und der Seespiegel des Lago Maggiore in ein Überflutungsmodell (VETSCH *et al.* 2017) eingespeist. Das Modell berechnet Fliesstiefen und Fliessgeschwindigkeiten auf Basis der oberen Randbedingung des Zuflusses und der unteren Randbedingung des Seespiegels. Die Überflutung in der Magadino-Ebene (Abb. 6, links) ergibt sich aus dem Zusammenspiel von statischer Überflutung durch den See und dynamischer Überflutung durch den Fluss.

Die Rekonstruktion des hydrologischen Ereignisses auf Basis des rekonstruierten Niederschlags ergab einen grossen Unterschied in der zeitlichen Entwicklung des Seespiegels zu den Messungen. Der modellierte maximale Pegelstand (196,98 m ü.M.) war drei Meter unter dem beobachteten Pegelstand (199,98 m ü.M.). Die modellierten überfluteten Flächen waren deshalb sehr gering. Zudem fanden in der Simulation im oberen Bereich der Magadino-Ebene keine Ausuferungen statt.

Das heutige Gerinne des Flusses mit den Hochwasserschutzdämmen fasst den gesamten Spitzenabfluss des damaligen Hochwasserereignisses (Abb. 6, rechts). Die Wirkung aller seit dem Ereignis 1868 umgesetzten Hochwasserschutzmassnahmen kann somit demonstriert werden. Die damaligen Ausdehnungen können aber nur simuliert werden, wenn der damalige Systemzustand der Gewässer rekonstruiert wird. Dabei müssen vor allem zwei Faktoren berücksichtigt werden. Erstens hat sich die Seepiegel-Abfluss-Beziehung am Seeauslass des Lago Maggiore deutlich verändert. Dies ist auf eine starke Sohlenerosion während des Hochwasserereignisses 1868 zurückzuführen (AMBROSETTI *et al.* 1994). Die Flusssohle beim Seeauslass ist deutlich tiefer als damals, damit ist der Flussquerschnitt wesentlich grösser und es kann bei gleichem Pegelstand viel mehr Wasser aus dem See ausfliessen als vor dem Hochwasserereignis von 1868. Zweitens ist der Ticino in der Magadino-Ebene heute kanalisiert und eingedämmt. Auch dies ist ein wesentli-

die Hirten auf einen bösen Herbst. Die gleichen Zeugen haben auch von dem Hagel Kunde gebracht, welcher am 27., 30. Sept. und 2. October im Hochgebirg in weitem Umfang gefallen war. Man sah den weissen Saum am Morgen des 28. vom Platze aus und freute sich dess. Es war aber Täuschung; man hatte den Hagel mit dem Schnee verwechselt.

Besonders war es der Freitag, 2. October, der zwischen 8 und 9 Uhr Abends die Gemüther mit Furcht und Schrecken erfüllte. Eine neue Gestalt betrat die Bühne und zwar unter nie enden wollenden Donnern und Blitzen. Die wunde Erde sollte noch von einem Strom von Hagelschlossen gepeitscht werden.

warten lassen. Ein fürchterliches Hagelwetter entleerte sich am 1. October im Nachbargebirge. Der scharfe Regen so ihm folgte, liess die Töbel Verzasca und Maggia furchtbar anschwellen. Brücken, Land und Gebäude und was ihnen in den Weg kam, wurde zerstört oder weggetragen.

Abb. 5. Drei Berichte zu Hagel zwischen dem 27. September und dem 2. Oktober (aus ARPAGAU, 1870, S. 17, 66 und 111).

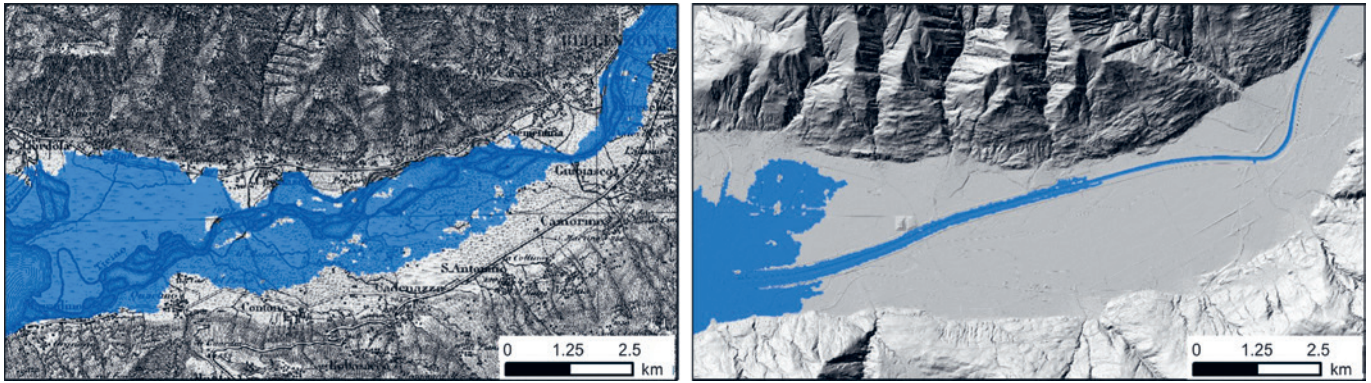


Abb. 6. Simulierte Überflutungsflächen des rekonstruierten Hochwasserereignisses 1868 in der Magadino-Ebene in der historischen Situation (links) und im heutigen Gewässersystem (rechts) (vgl. BRÖNNIMANN *et al.* 2018). Eine historische Karte der tatsächlichen Überschwemmungsfläche des Ereignisses konnte nicht gefunden werden. Die Karte links stimmt aber gut mit zeitgenössischen Berichten überein. So schreibt ARPAGAU (1870, S. 112) «Die Gegend von Biasca bis Bellenz und von Bellenz bis Locarno glich fünf Tage lang einer Fortsetzung des Langensees.»

cher Eingriff, der den Flussquerschnitt wesentlich erweitert hat.

Um die damalige Überflutung rekonstruieren zu können, muss der historische Flusslauf in einem digitalen Geländemodell abgebildet werden. So haben wir auf Basis der historischen Karten und der heute noch sichtbaren Spuren der ehemaligen Flussarme ein digitales Geländemodell des historischen Flusslaufes rekonstruiert. Mit diesem Geländemodell konnte die ehemalige Überflutungsfläche der damaligen Geländesituation simuliert werden (Abb. 6, links). In dieser Simulation sind beinahe der gesamte Talboden und die Magadino-Ebene vom Hochwasser betroffen, was auch die historischen Quellen qualitativ bestätigen. Der Vergleich der beiden Simulationen zeigt die Wirkung der beiden Änderungen im Gewässersystem. Die natürliche Sohlenerosion beim Seeauslass vermindert heute das Ansteigen des Seespiegels und somit einen Rückstau in die Magadino-Ebene. Die Hochwasserschutzmassnahmen am Fluss verhindern ein Ausufern des Ticino. Beide Effekte zusammen reduzieren somit die überfluteten Flächen erheblich.

Das Hochwasserrisiko wird aber nicht nur aufgrund der Änderungen im Gewässersystem beeinflusst, es steigt auch mit der Anzahl der exponierten Werte. Das Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum hat ein stetes Ansteigen von wohnhaften Personen, Gebäuden und Infrastruktur in den potenziell von Hochwasserereignissen betroffenen Flächen zur Folge. In einem Modellexperiment haben wir das

Wachstum im Gebäudebestand den Änderungen im Gewässerzustand gegenübergestellt. Dabei musste der historische Gebäudebestand kartiert werden.

Unterhalb von Bellinzona und in Ufernähe des Lago Maggiore auf Schweizer Seite standen im Oktober 1868 in der rekonstruierten Überflutungsfläche (Abb. 6, links), welche aus dem gemessenen Seepiegel und dem simulierten Hochwasserabfluss resultiert, 436 Gebäude. Betrachtet man den Gebäudebestand von 2016, würden in derselben überfluteten Fläche (historisches Geländemodell) 3934 Gebäude in Mitleidenschaft gezogen werden. Das bedeutet, dass der exponierte Siedlungsbestand in diesen Flächen um den Faktor neun zugenommen hat. Wird hingegen der heutige Flusslauf berücksichtigt (heutiges Geländemodell, simulierter Seepiegel und simulierter Abfluss in Bellinzona, Abb. 6, rechts), sind 944 Gebäude betroffen. Dies bedeutet, dass der Hochwasserschutz und die Vergrößerung des Seeauslasses durch die Sohlenerosion während des Ereignisses von 1868 eine positive Wirkung haben. 2990 Gebäude profitieren heute von diesen geplanten und ungeplanten Veränderungen im Gewässersystem.

5 Folgerungen für Praxis und Wissenschaft

Das Management von Hochwasserrisiken basiert auf quantitativen Gefahren- und Risikoanalysen. Da extreme

Hochwasserereignisse definitionsgemäss sehr selten sind und deshalb nicht in jedem Gebiet in der instrumentellen Messperiode aufgetreten sind, ist die Abschätzung von Wahrscheinlichkeiten und Ausmass von extremen Szenarien schwierig beziehungsweise grossen Unsicherheiten unterworfen. Die Formulierung von Szenarien ist deshalb eine wesentliche Grundlage für die Gefahren- und Folgenabschätzung. Die offenen Fragen betreffen dabei nicht nur die Auftretenswahrscheinlichkeit, sondern auch die erwartete Magnitude eines extremen Wetterereignisses (Niederschlagssumme und -intensität) sowie die Grösse des berechneten Gebietes. Insbesondere für Versicherungsfragen sind das Niederschlagsmuster und das betroffene Gebiet wichtig. Dies kann entscheiden, ob beispielsweise eine Ballung von Risiken vorhanden ist oder nicht.

Das hier vorgestellte Beispiel einer Simulation eines lange zurückliegenden Ereignisses zeigt auf, wie eine Messreihe mit zusätzlichen extremen Ereignissen erweitert werden kann. Mit der gekoppelten Rekonstruktion sowohl der meteorologischen als auch der hydrologischen und hydraulischen Prozesse, die im Oktober 1868 abgelaufen sind, konnte dieses Ereignis integral abgebildet werden. Solche Rekonstruktionen liefern eine wichtige Grundlage für die Analyse der räumlichen und zeitlichen Dynamik früherer Hochwasserereignisse und zeigen die Entwicklung des Hochwasserrisikos seit deren Auftreten auf (ZISCHG *et al.* 2018). Das Beispiel zeigt, wie stark die

Hochwasserschutzmassnahmen das Abflussgeschehen und die Anzahl der exponierten Gebäude beeinflussen. Diese Analyse der räumlich-zeitlichen Dynamik von Systemänderungen wiederum erlaubt es (a) eine Beurteilung der bisher vorgenommenen Adaptationsmassnahmen durchzuführen und (b) Simulationsmodelle für die Untersuchung der Wirkung zukünftiger Massnahmen zu entwickeln.

Das Hochwasserereignis von 1868 hat ausserdem auch politische und gesellschaftliche Entwicklungen angestoßen und Neuerungen im Hochwasserschutz zum Durchbruch verholfen (SCHMID 2001). Hochwasserschutz und Forstwesen wurden zur Bundesangelegenheit, mit neuen administrativen Strukturen, und Bundessubventionen waren nun nicht mehr Grossprojekten in den Talebenen vorbehalten, so dass in der Folge zahlreiche Wildbachverbauungen durchgeführt wurden (vgl. SUMMERMATTER 2012). Langfristige Systemänderungen wie beispielsweise in der Praxis des Risikomanagements, das Siedlungswachstum und zukünftige Adaptationsmassnahmen sind deshalb bei Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwasserrisiken unbedingt zu berücksichtigen. Für eine rückblickende Betrachtung zeigt das vorliegende Beispiel auf, wie die Veränderungen in der Flussmorphologie bei der Interpretation von historischen Quellen berücksichtigt werden können. Eine einfache Übertragung beispielsweise des damaligen gemessenen Seepiegels auf die heutige Situation würde eine starke Überschätzung der heutigen Überflutungsgefahr zur Folge haben.

Aus der vorgestellten Rekonstruktion und Nachmodellierung des Hochwasserereignisses von 1868 können verschiedene Schlussfolgerungen formuliert werden. Für die Wissenschaft zeigt das Vorgehen das grosse Potenzial einer Analyse historischer Ereignisse auf. Die bisher lückenhaften Messreihen können mit den heute verfügbaren Modellen so verdichtet werden, dass ein historisches Wetterereignis sehr detailliert rekonstruiert werden kann. Für die Erforschung von vergangenen Extremereignissen eröffnen sich somit viele neue Möglichkeiten. Je detaillierter vergangene Ereignisse rekonstruiert werden können, desto ergiebiger sind sie auch

für die Gewinnung allgemeiner neuer Erkenntnisse über Extremereignisse.

Zurzeit wird intensiv an der Entwicklung von Simulationsmodellen für die Analyse der möglichen Langzeiteffekte von Anpassungsmassnahmen geforscht. Diese Modelle sollen aufzeigen, welche Klimawandel-Anpassungsmassnahmen nachhaltig sind, beziehungsweise welche keine langfristigen Nebenwirkungen zur Folge haben. Rekonstruierte Ereignisse, die länger zurückliegen, können für die Validierung dieser Modelle eine wertvolle Grundlage bilden.

Für die Praxis des Hochwasserschutzes und Risikomanagements können vor allem aus der Analyse der Auswirkungen des Hochwasserereignisses Schlussfolgerungen gezogen werden. Es hat sich gezeigt, dass ein derart grosses Ereignis sehr viele politische Prozesse anstossen kann. Im Nachgang von 1868 wurden neue Konzepte zum Hochwasserschutz eingeführt und die Aufgabenverteilung zwischen den Kantonen und dem Bund wurde neu ausverhandelt. Solche einschneidende Ereignisse stellen somit sogenannte «windows of opportunity» dar.

Auch heute noch steigen die für Investitionen in den Hochwasserschutz eingesetzten öffentlichen Mittel nach einem grossen Ereignis an. In dieser Phase können Hochwasserschutzprojekte umgesetzt werden, für die es vorher entweder keine Finanzierung oder keine Akzeptanz gegeben hat. Auch heute noch, Jahre nach dem Paradigmenwechsel von der Gefahrenabwehr hin zu einem integralen Risikomanagement (PLANAT 2004), werden Hochwasserschutzmassnahmen mehrheitlich nach einem eingetretenen Ereignis umgesetzt.

Eine Umfrage unter Gemeinden zeigte, dass 53 Prozent aller Hochwasserschutzprojekte als Reaktion auf ein Ereignis initiiert wurden (THOMI *et al.* 2015). Dabei ist jedoch oft eine ad-hoc-Wiederherstellung des vorherigen Zustandes zu beobachten, der ja zu den augenscheinlichen Problemen geführt hat. Die erhöhte Bereitschaft für Investitionen in Schutzbauten zeigt sich auch in den Ausgaben der öffentlichen Hand. In den Jahren nach 1987, 1999 und 2005 wurden die Investitionen in Schutzbauten deutlich erhöht (BAFU 2009, S. 90; BAFU 2019).

Einige Jahre nach dem Ereignis gehen die Investitionen in der Regel wieder zurück. ZISCHG (2018) gibt einen Überblick über die Reaktionen der verschiedenen Akteure auf Hochwasserereignisse. Jedes Hochwasserereignis zeigt ausserdem, wie wichtig die Instandhaltung der bestehenden Schutzbauten ist. Für diese unspektakulären Massnahmen fehlt in den Gemeinden oft das Geld. Deshalb werden in manchen Fällen neue Hochwasserschutzprojekte initiiert anstatt die älteren Bauwerke zu sanieren oder instand zu halten (THOMI *et al.* 2015).

Die oben gezeigte Rekonstruktion und Quantifizierung der Wirkung der bestehenden Hochwasserschutzbauten erleichtern die Kommunikation über die Notwendigkeit der laufenden Instandhaltung von Schutzbauten. Dass bauliche Massnahmen über Jahrzehnte Schutz garantieren, wird heute beinahe als Selbstverständlichkeit angenommen. Wenn angegeben werden kann, wie viele Gebäude heute von den bestehenden Schutzbauten profitieren, könnte dies die Akzeptanz für Instandhaltungsmassnahmen erhöhen. Zusammenfassend kann gefolgert werden, dass Informationen über historische Ereignisse sehr wertvoll in der Kommunikation von Risiken sein können.

Verdankungen

Die diesem Artikel zu Grunde liegenden Arbeiten wurden unterstützt durch das Oeschger-Zentrum für Klimaforschung der Universität Bern, durch den Schweizerischen Nationalfonds (Projekt CHIMES 169676) und durch den European Research Council (PALAEO-RA 787574).

6 Literatur

- AMBROSETTI, W.; BARBANTI, L.; BERNARDI, R.; LIBERA, V. DE; ROLLA, A., 1994: La piena del Lago Maggiore dell'autunno 1993: un evento di portata secolare, Documenta dell'Istituto Italiano di Idrobiologia, 45, Istituto Italiano di Idrobiologia.
- ANDRES, N.; LIEBERHERR, G.; SIDERIS, I. V.; JORDAN, F.; ZAPPA, M., 2016: From calibration to real-time operations: An assess-

- ment of three precipitation benchmarks for a Swiss river system. *Met. Apps.* 23: 448–461.
- ARPAGUS, J. B., 1870: Das Hochwasser des Jahres 1868 mit besonderer Berücksichtigung des Kantons Graubünden. Denkblätter. Chur, Selbstverlag des Verfassers.
- BAFU, 2009: Wiederbeschaffungswert der Umweltinfrastruktur. Umfassender Überblick für die Schweiz, Bern.
- BAFU, 2019: Indikator Naturgefahren: Investitionen für den Schutz vor Naturgefahren. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-naturgefahren/naturgefahren--daten--indikatoren--und-karten/naturgefahren--indikatoren/indikator-naturgefahren.pt.html/aHR0cHM-6Ly93d3cuaW5kaWthdG9yZW4uYWR-taW4uY2gVUHVibG/ljLOFlbURldGFpbD9pbmQ9R0UwMjQmbG5nPWRIJIN1Ymo9Tg%3d%3d.html>. Abgerufen am 15.03.2019.
- BRÖNNIMANN, S.; ROHR, C.; STUCKI, P.; SUMMER-MATTER, S.; BANDHAUER, M.; BARTON, Y.; FISCHER, A.; FROIDEVAUX, P.; GER-MANN, U.; GROSJEAN, M.; HUPFER, F.; IN-GOLD, K.; ISOTTA, F.; KEILER, M.; MARTIUS, O.; MESSMER, M.; MÜLCHI, R.; PANZIERA, L.; PFISTER, L.; RAIBLE, C.C.; REIST, T.; RÖSSLER, O.; RÖTHLISBERGER, V.; SCHER-RER, S.; WEINGARTNER, R.; ZAPPA, M.; ZIM-MERMANN, M.; ZISCHG, A.P., 2018: 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz verän-derte: Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensia*, G94. 52 S.
- BRÖNNIMANN, S.; MARTIUS, O.; ROHR, C.; BRESCH, D.N.; LIN, K.-H.E., 2019a: Historical Weather Data for Climate Risk Assessment. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1436: 121–137.
- BRÖNNIMANN, S.; FRIGERIO, L.; SCHWAN-DER, M.; ROHRER, M.; STUCKI, P.; FRANKE, J., 2019b: Causes for increased flood fre-quency in central Europe in the 19th century. *Climate Past Disc.* <https://doi.org/10.5194/cp-2019-17>, in review.
- Bundesamt für Wasser und Geologie, 2002: Hochwasser 2000- Les crues 2000, Ereignisanalyse / Fallbeispiele – Analyse des événements / Cas exemplaires. Bern, Be-richte des BWG. 248 S.
- COAZ, J.F., 1869: Die Hochwasser im Sep-tember und October 1868 im bündneri-schen Rheingebiet. Vom naturwissen-schaftlichen und hydrotechnisch-forst-lichen Standpunkt betrachtet. Leipzig, Engelmann.
- COMPO, G.P.; WHITAKER, J.S.; SARDESHMUKH, P.D.; MATSUI, N.; ALLAN, R.J.; YIN, X.; GLEASON, B.E.; VOSE, R.S.; RUTLEDGE, G.; BESSEMOULIN, P.; BRÖNNIMANN, S.; BRU-NET, M.; CROUTHAMEL, R.I.; GRANT, A.N.; GROISMAN, P.Y.; JONES, P.D.; KRUK, M.; KRUGER, A.C.; MARSHALL, G.J.; MAUGERI, M.; MOK, H.Y.; NORDLI, Ø.; ROSS, T.F.; TRIGO, R.M.; WANG, X.L.; WOODRUFF, S.D.; WORLEY, S.J., 2011: The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137: 1–28.
- FLÜCKIGER, S.; BRÖNNIMANN, S.; HOLZKÄM-PEL, A.; FUHRER, J.; KRÄMER, D.; PFISTER, C.; ROHR, C., 2017: Simulating crop yield losses in Switzerland for historical and present Tabora climate scenarios. *Envi-ron. Res. Lett.* 12: 074026.
- MeteoSchweiz, 2018: Klimabulletin Okto-ber 2018. Zürich.
- PFISTER, C., 2009: Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust tra-ditionalen Risikobewusstseins. *GAIA* 18: 239–246.
- PFISTER, C.; BRÄNDLI, D., 1999: Rodungen im Gebirge – Überschwemmungen im Vor-land: Ein Deutungsmuster macht Kar-riere. In: SIEFERLE, R.P.; BREUNINGER, H. (Hrsg.) *Natur-Bilder: Wahrnehmungen von Natur und Umwelt in der Geschichte*, Frankfurt/New York, Campus Verlag. 297–321.
- PLANAT, 2004: Sicherheit vor Naturgefahr-en. Vision und Strategie, Bern.
- RÖSSLER, O.; BRÖNNIMANN, S. 2018: The ef-fect of the Tabora eruption on Swiss flood generation in 1816/1817. *Science of the Total Environment* 627:1218–1227.
- SCHMID, F.S., 2001: Politische Konsequen-zen aus dem Unwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwas-serschutzes. *Schweiz. Z. Forstwes.* 152, 12: 521–526.
- SCHMOCKER-FACKEL, P.; NAEF, F., 2010: Chan-ges in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14: 1581–1594.
- SCHWANDER, M.; BRÖNNIMANN, S.; DE-LAYGUE, G.; ROHRER, M.; AUCHMANN, R.; BRUGNARA, Y., 2017: Reconstruction of Central European daily weather types back to 1763. *Int. J. Climatol.* 37: 30–44.
- SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B.; GILL, D.O.; BARKER, D.M.; DUDA, M.G.; WANG, W.; PO-WERS, J.G., 2008: A Description of the Ad-vanced Research WRF Version 3, NCAR Tech. Note, (NCAR/TN–475CSTR), Na-tional Center for Atmospheric Research, Boulder, Colorado.
- STUCKI, P.; RICKLI, R.; BRÖNNIMANN, S.; MAR-TIUS, O.; WANNER, H.; GREBNER, D.; LUT-ERBACHER, J., 2012: Five weather patterns and specific precursors characterize ex-treme floods in Switzerland. *Meteorol. Z.* 21:531–550.
- STUCKI, P.; BRÖNNIMANN, S.; MARTIUS, O.; WELKER, C.; RICKLI, R.; DIERER, S.; BRESCH, D.; COMPO, G.P.; SARDESHMUKH, P., 2015: Dynamical downscaling and loss modeling for the reconstruction of histo-rical weather extremes and their impacts – A severe foehn storm in 1925. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 96: 1233–1241.
- STUCKI, P.; BANDHAUER, M.; HEIKKILÄ, U.; RÖSSLER, O.; ZAPPA, M.; PFISTER, L.; SAL-VISBERG, M.; FROIDEVAUX, P.; MARTIUS, O.; PANZIERA, L.; BRÖNNIMANN, S., 2018: Re-construction and simulation of an ext-reme flood event in the Lago Maggiore catchment in 1868. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 18: 2717–2739.
- SUMMER-MATTER, S., 2005: Die Überschwem-mungen von 1868 in der Schweiz: Unmit-telbare Reaktion und längerfristige Prä-vention. Mit näherer Betrachtung des Kantons Wallis. Nordhausen, T. Bautz.
- SUMMER-MATTER, S., 2012: Die Prävention von Überschwemmungen durch das po-litische System der Schweiz von 1848 bis 1991, Inauguraldissertation der Philoso-phisch-historischen Fakultät der Univer-sität Bern.
- THOMI, L.; ZISCHG, A.; SUTER, H., 2015: Was macht Hochwasserschutzprojekte erfolg-reich?: Eine Evaluation der Risikoent-wicklung, des Nutzens und der Rolle pri-vaater Geldgeber, Geographisches Insti-tut, Bern.
- VETSCH, D.; SIVIGLIA, A.; EHRBAR, D.; FAC-CHINI, M.; GERBER, M.; KAMMERER, S.; PE-TER, S.; VONWILER, L.; VOLZ, C.; FARSHI, D.; MUELLER, R.; ROUSSELOT, P.; VEPREK, R.; FAEH, R., 2017: BASEMENT – Basic Si-mulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Ha-zard Simulation. Zurich.
- VIVIROLI, D.; ZAPPA, M.; GURTZ, J.; WEIN-GARTNER, R., 2009: An introduction to the hydrological modelling system PREVAH and its pre- and post-processing-tools. *Environ. Model. Softw.* 24: 1209–1222.
- WETTER, O., 2017: The potential of historical hydrology in Switzerland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21: 5781–5803.
- WILBY, R.L., HAY, L.E.; GUTOWSKI JR., W.J.; ARRIIT, R.W.; TAKLE, E.S.; PAN, Z.; LEA-VESLEY, G.H.; CLARK, M.P., 2000: Hydrolo-gical responses to dynamically and statis-tically downscaled climate model output. *Geophys. Res. Lett.* 27: 1199–1202.
- ZISCHG, A., 2018: Floodplains and Complex Adaptive Systems—Perspectives on Con-

necting the Dots in Flood Risk Assessment with Coupled Component Models, Systems, 6, 9.

ZISCHG, A.P.; HOFER, P.; MOSIMANN, M.; RÖTHLISBERGER, V.; RAMIREZ, J.A.; KEILER, M.; WEINGARTNER, R., 2018: Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. *Sci. Total Environ.* 639: 195–207.

Abstract

Simulation of the 1868 Flood Event and Lessons for the Future

Numerical methods combined with historical data allow the detailed and quantitative investigation of past weather events such as the 1868 flood. This flood affected Ticino, Grisons and Valais and led to enormous damage. Based on reanalyses and dynamical downscaling, the event can today be reproduced with hydrological-hydraulic models and the historical damage data can be compared with contemporary flood impacts of a similar magnitude. It can be used as one basis for estimating extreme meteorological and hydrological scenarios for hazard assessment. Moreover, it can help quantifying the effects of the river correction and flood protection measures constructed in the aftermath of the flood. Although the floodplains are now much more intensively populated than at that time, the river engineering measures of the Ticino River in the Magadino plain prove to be effective. We can also learn from a historical analysis for the coping strategies. The event strengthened upcoming positions in flood hazard management and set a new course for the practice of flood management in the long term.

Keywords: historical weather extremes, downscaling, flooding, hydrological modeling

Lawinenwinter der letzten 150 Jahre: ihre Bedeutung für die Entwicklung des Lawinenschutzes

Stefan Margreth

WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Flüelastrasse 11, CH 7260 Davos Dorf, margreth@slf.ch

In den letzten 150 Jahren hat sich der Lawinenschutz in der Schweiz stark weiterentwickelt. Viel dazu beigetragen haben die Lehren aus vergangenen Lawinenwintern. Als Lawinenwinter werden Winter bezeichnet, die sich durch eine überdurchschnittliche Anzahl Schadenlawinen auszeichnen, detailliert analysiert werden, für ihre Zeit prägend sind und einen Handlungsbedarf aufzeigen. Solch einschneidende Lawinenwinter, die in diesem Artikel diskutiert werden, ereigneten sich 1888, 1951, 1954, 1968, 1999 sowie 2018. Diese Winter trugen massgeblich dazu bei, den Lawinenschutz zu verbessern. Trotz einer heute viel höheren Verletzlichkeit der Gesellschaft gingen die Anzahl Todesopfer und Sachschäden in den letzten beiden Lawinenwintern markant zurück.

1 Was versteht man unter einem Lawinenwinter?

Die Entwicklung des Lawinenschutzes ist geprägt von den Erfahrungen und Lehren, die man aus Lawinenwintern gezogen hat. Was genau unter einem Lawinenwinter zu verstehen ist, kann jedoch nicht so eindeutig beantwortet werden. Es ist nicht zielführend, klare Schwellenwerte wie zum Beispiel

Grösse und Anzahl der aufgetretenen Lawinen, Anzahl Todesopfer oder betroffene Flächen zu definieren, anhand derer sich ein Winter als Lawinenwinter klassifizieren lässt. Vielmehr spielen die Interaktion der Lawinen mit dem Lebensraum, die Auswirkungen auf die Gesellschaft und das mediale Interesse eine Rolle. Ein Lawinenwinter muss nicht unbedingt zu einer Lawinenkatastrophe führen. Im dicht besie-

delten Alpenraum verursachen heute grosse, zahlreich auftretende Lawinenereignisse unweigerlich Einschränkungen und Unannehmlichkeiten, zum Beispiel geschlossene Skigebiete, gesperrte Verkehrsverbindungen, Evakuierungen oder allenfalls Zerstörungen und Todesopfer, meist verbunden mit einer hohen Medienpräsenz.

In diesem Artikel verstehen wir unter einem Lawinenwinter ein Ereignis, das sich durch eine überdurchschnittliche Lawinenaktivität auszeichnet, detailliert analysiert wird und etwas bewirkt. Ein Lawinenwinter ist prägend für seine Zeit und zeigt einen erforderlichen Handlungsbedarf auf. Im Folgenden betrachten wir die Lawinenwinter 1888, 1951, 1954, 1968, 1999 sowie 2018 und ihre Bedeutung zur Entwicklung des Lawinenschutzes in der Schweiz (Abb. 1). Lawinenunfälle im freien Gelände werden hier nicht behandelt.

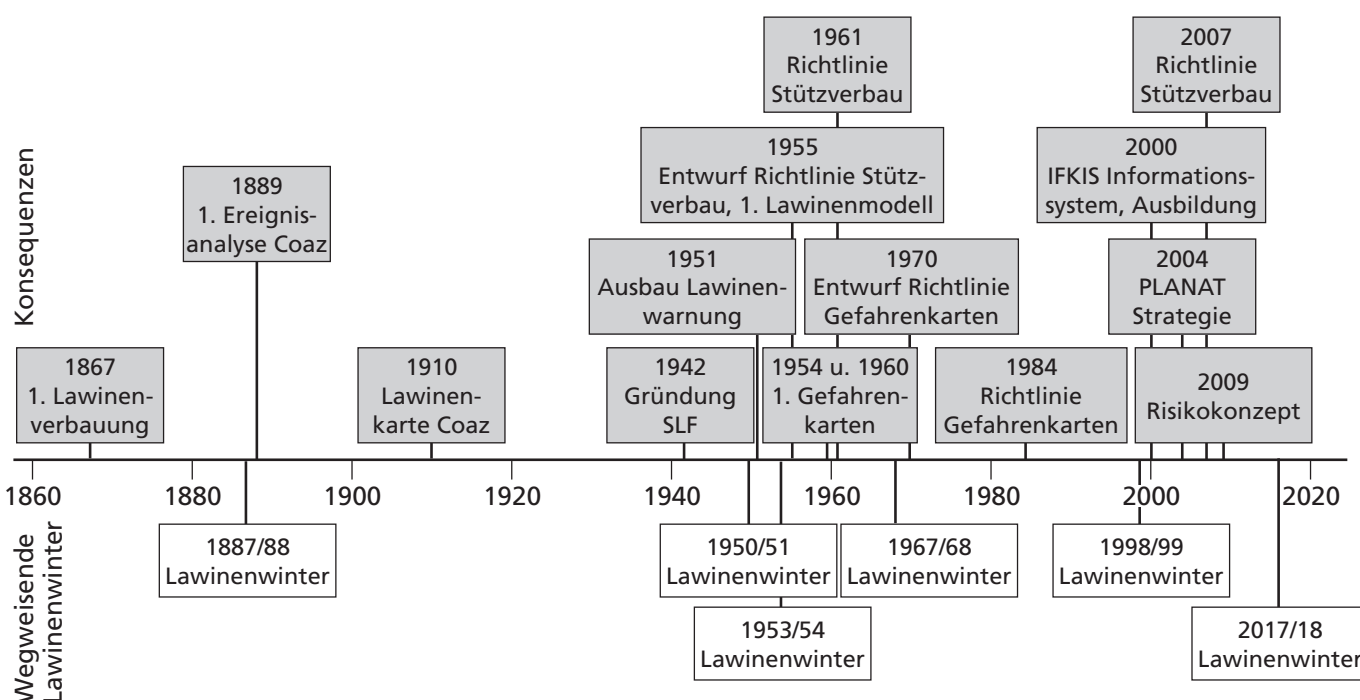


Abb. 1. Wegweisende Lawinenwinter und ihre Konsequenzen für die Entwicklung des Lawinenschutzes.

2 Lawinenwinter 1888: erste Ereignisanalyse und Forcierung von Lawinenverbauungen

Im Winter 1887/88 gingen in der Schweiz in drei unabhängigen Perioden (15.–20. Februar, 26.–28. Februar und 27.–30. März 1888) über tausend Lawinen nieder. 84 Menschen wurden von Lawinen verschüttet, 49 starben. Weiter wurden rund 700 Stück Vieh getötet, 850 Ge-

bäude beschädigt sowie 1350 Hektaren Wald zerstört. Am stärksten betroffen waren die Kantone Tessin, Graubünden und Wallis. Das grösste Einzelunglück ereignete sich östlich von Bellinzona im Valle Morobbia. Eine Lawine traf am 26. Februar 1888 den Weiler Melirolo. Sieben Personen starben und 17 Gebäude wurden zerstört (Coaz 1889). Die Lawine wurde auf die systematische Entwaldung im 19. Jahrhundert zurückgeführt.



Abb. 2. Die erste technische Verbauung eines Lawinenanrissgebiets in der Schweiz unterhalb des Motta d'Alp oberhalb von Martina (Graubünden). Im Vordergrund eine der 19 Steinmauern, die 1868 von Coaz projektiert wurde. 1987 wurden die Mauern mit Stahlschneebrücken ergänzt (Foto S. Margreth, SLF).

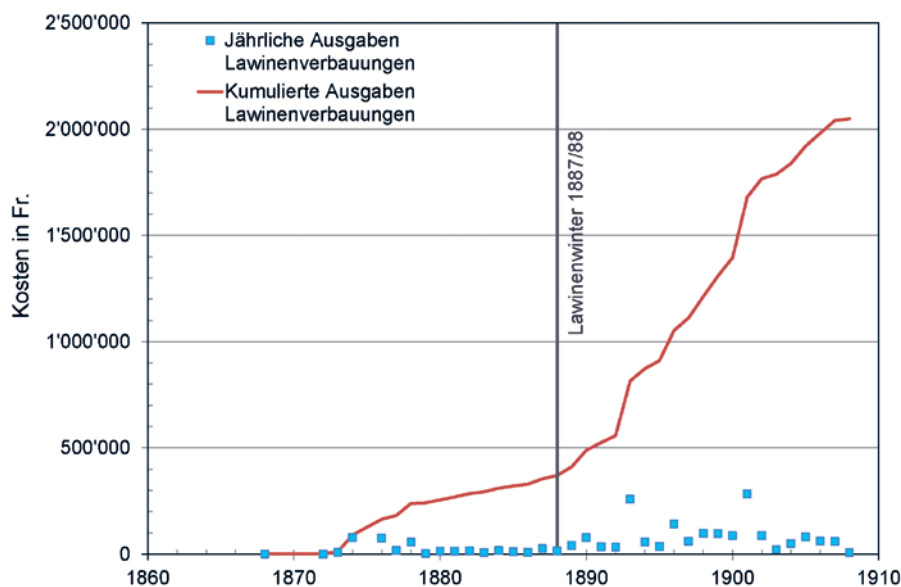


Abb. 3. Jährliche und kumulierte Kosten (nicht teuerungsbereinigt) von subventionierten Lawinenverbauungen zwischen 1868 und 1908 nach der Statistik von Coaz (1910).

Der Lawinenwinter 1888 ist aus zwei Gründen von Bedeutung: einerseits stieg danach die Anzahl neuer Verbauprojekte und Aufforstungen stark an, andererseits wurde erstmals eine eigentliche Ereignisdokumentation über die aufgetretenen Lawenschäden erstellt (Coaz 1889). Bei beiden Aktivitäten hatte Johann Coaz, Lawinenpionier und Eidg. Forstinspektor, eine Schlüsselrolle inne. Coaz trieb die Technik des Lawinenverbbaus im Anbruchgebiet mit massiven Werken in der Form von Mauerterrassen und Verpfählungen voran. Er realisierte bereits um 1868 die erste technische Anbruchverbauung der Schweiz (Abb. 2). Nachdem 1876 das Forstpolizeigesetz eingeführt wurde, das die Subventionierung von Aufforstungs- und Verbaumassnahmen durch Bund und Kantone ermöglichte, entstanden zahlreiche weitere Lawinenverbauungen. Bis zum Lawinenwinter 1888 wurden in der Schweiz rund 70 Verbauprojekte mit Kosten von knapp 0,4 Mio. Franken (nicht teuerungsbereinigt) realisiert. Da sich die bisher erstellten Schutzmassnahmen bewährten, wurden zwischen 1888 bis 1908 200 weitere Verbauprojekte mit Kosten von 1,7 Mio. Fr. erstellt (Abb. 3). Bis 1938 zogen sich gegen 1000 km massive Werke in der Form von Terrassen und Mauern durch die Schweizer Alpen, obwohl infolge der Weltwirtschaftskrise von 1929 Aufforstungen und Verbaumassnahmen nicht mehr wie gewünscht gefördert werden konnten.

Coaz erkannte den Nutzen, Lawinen zu dokumentieren, einerseits aus naturwissenschaftlichem Interesse und andererseits, um mögliche Verbaumassnahmen besser planen zu können. Bereits 1872 forderte Coaz als damaliger Kantonsobforst von Graubünden die Kreisobforst auf, die abgegangenen Lawinen aufzunehmen und eine Statistik zu führen. Dies bezeichnet man heute als Ereigniskataster. 1874 wurde Coaz erster Eidg. Forstinspektor und dehnte die Lawinenstatistik auf die ganze Schweiz aus. Er benutzte die Lawinenereignisse von 1888, um die Kantone mit einem weiteren Aufruf zu motivieren, eine Lawinenstatistik zu führen. Den kantonalen Forstdiensten wurde eine detaillierte Instruktion zugestellt, so dass die Aufnahmen nach einheitlichen Mass-

stäben erfolgen konnten. Das Resultat lässt sich sehen: Im Juli 1889 publizierte Coaz die Analyse des Lawinenwinters 1888 (Coaz 1889). Der Bericht enthält neben einer Beschreibung der Schnee- und Wettersituation insbesondere auch die in den Kantonen verzeichneten Lawinen und aufgetretenen Schäden. Die Schadenssumme betrug teuerungsbereinigt rund fünf Mio. Franken. Die aufgenommenen Lawinen wurden rund zur Hälfte als Fliesslawinen respektive als Grundlawinen klassiert. Damals wurde den Lawinenablagerungen, den sogenannten Lawinenkegeln, grosse Bedeutung beigemessen. Südlich von Vrin im Kanton Graubünden brachen zum Beispiel am 24. März 1888 von beiden Talseiten riesige Lawinen mit einem geschätzten Volumen von 7,5 Millionen m³ an, die Ablagerungshöhen bis 100 m verursachten (Coaz 1889). Eine solche Ablagerungshöhe ist auch heute noch rekordverdächtig.

1910 erschien das zweite grosse Werk von Coaz, «Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizer Alpen», einschliesslich einer erarbeiteten Lawinenkarte (Abb. 4, Coaz 1910). Die Tabellen dieser ersten Lawinenstatistik enthalten insgesamt 9368 Lawinzüge. Mit diesem Werk lieferte Coaz wichtige Grundlagen für die Gefahrenkartierung in der Schweiz. Beim Erarbeiten von Gefahrenkarten lohnt es sich auch heute noch, einen Blick auf seine Lawinenkarten zu werfen. Leider sind die Datenblätter der einzelnen Lawinen verschollen. Seit 1888 werden alle grösseren Lawinenereignisse erfasst. Das SLF registriert seit 1945 alle gemeldeten Schadenlawinen und beschreibt den Winterverlauf in einem Winterbericht.

3 Lawinenwinter 1951: Ausbau Lawinenwarnung, Modernisierung Stütz- verbau und Entwicklung Gefahrenkarten

Im Winter 1950/51 traten zwei aussergewöhnliche Lawinenperioden auf, die zur grössten Lawinenkatastrophe des 20. Jahrhunderts in der Schweiz führten. Gegen 1300 Schadenlawinen wurden verzeichnet. Lawinen erfassten 234 Personen, von denen 98 starben. Rund

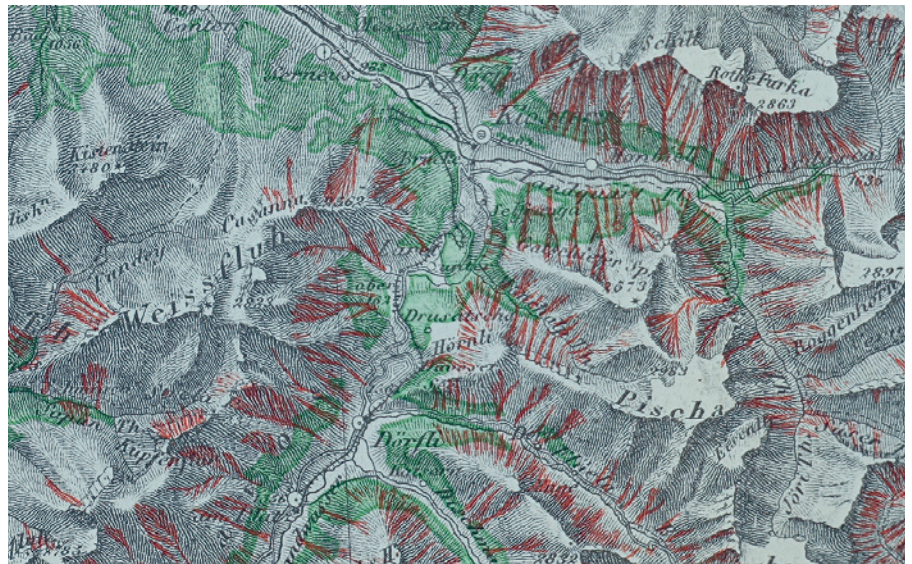


Abb. 4. Ausschnitt aus der Lawinenkarte von Coaz im Massstab 1:250 000 für das Gebiet von Davos und Klosters. Die roten Linien stellen die aufgenommenen Lawinen dar (Coaz 1910).



Abb. 5. Die Unglückslawine von Vals (Graubünden) vom 20.1.1951 brach unterhalb der Leisalp an. In drei total zerstörten Wohnhäusern starben 19 Personen (Foto Archiv SLF).

1500 Gebäude wurden zerstört und 235 Stück Vieh getötet (EDI, 1951). Die Gesamtschäden an Sachwerten betrugen indexbereinigt etwa 105 Mio. Franken (SLF 2000). Die erste Lawinenperiode vom 19. bis 20. Januar 1951 wurde durch eine langanhaltende und intensive Nordweststaulage ausgelöst und betraf insbesondere die Zentral- und Ostschweiz. Dort fielen zwischen dem 16. und 22. Januar 1951 bis 250 cm Schnee. Das schlimmste Unglück ereignete sich im bündnerischen Vals, als am 20. Januar 1951 die Alpbüel-Lawine das Dorf zwischen der Dorfbrücke und dem Hotel Terme auf einer Breite

von 300 m erfasste: 23 Gebäude wurden zerstört und 30 Personen verschüttet (Abb. 5). 19 Personen starben. Die Gemeindebehörden hatten die Evakuierung von einigen Gebäuden angeordnet, die jedoch nicht befolgt wurde (SLF 1952). Drei Wochen später führte eine Südstaulage vom 11. bis 12. Februar 1951 zu grossen Lawenniedergängen, insbesondere im Kanton Tessin und wiederum im Gotthardgebiet. Schwer getroffen wurde Airolo durch einen katastrophalen Abgang der Val-lascia-Lawine. Drei Häuserreihen wurden bis 20 m hoch verschüttet. Zehn Personen starben. Der Lawinenwinter

1951 übertraf den Lawinenwinter 1888 hinsichtlich Schäden bei weitem.

Der Lawinenwinter 1951 führte zu einem Paradigmenwechsel im Lawinenschutz und trug wesentlich zur späteren Entwicklung des Integralen Lawinenschutzes bei. Man wandte sich von den massiven Mauern ab und setzte voll auf die modernen, gegliederten Stützwerke. Die Gründung des Eidg. Instituts für Schnee und Lawinenforschung (im Folgenden SLF genannt) im Jahre 1942 und seine Tätigkeiten in den Jahren vor dem Lawinenwinter 1951 trugen viel zu diesen Änderungen bei. Der Lawinenwinter wurde detailliert analysiert und man stellte sich die Frage, wie in Zukunft ähnliche Ereignisse vermieden werden könnten. Wegweisende Antworten auf diese Frage fanden sich an der viertägigen wissenschaftlichen Tagung vom Oktober 1952, die das SLF und die Schweizerische Schnee- und Lawinenforschungskommission zum Lawinenwinter 1951 und den sich daraus ergebenden Folgerungen für den Lawinenschutz organisierten (SLF 1953). Die Analyse des Lawinenwinters zeigte, dass die Lawinenwarnung nicht optimal war. Die Lawinenperiode im Januar wurde zwar richtig erkannt und es wurde zeitgerecht gewarnt, im Februar unmittelbar vor der Katastrophe erschien jedoch kein Bulletin. Damals waren zwar 28 Vergleichsstationen vorhanden, sie meldeten die Schnee- und Lawinensituation aber nicht täglich. Es wurde daraufhin beschlossen, die Anzahl der Vergleichsstationen auf 50 zu erhöhen und tägliche Wetter-, Schnee- und Lawinenbeobachtungen durchzuführen, die bis um 9.30 Uhr mit Telegraph und Fernschreiber dem SLF zu übermitteln waren. Weiter wurden der Inhalt des Lawinenbulletins formalisiert sowie die Herausgabe zeitlich optimiert.

Ein sehr wichtiges Thema bei der Analyse des Lawinenwinters 1951 war, wie sich die Lawinenverbauungen bewährt hatten. Die Untersuchungen zeigten, dass rund 90 Prozent der Verbauungen «die Prüfungen mit besseren oder schlechteren Noten bestanden» (SLF 1952) und dass sich der bisherige Aufwand für den Lawinenverbau gelohnt hatte. Der Lawinenwinter zeigte klar, dass die neueren, gegliederten Stützwerke wie Schneerechen infolge grösserer Wirkungshöhe viel ef-

fektiver waren als die massiven Mauern oder Terrassen. Damit sich diese neuen Werktypen etablieren konnten, brauchte es aber noch den nötigen Problemdruck, der durch den Lawinenwinter 1951 entstand.

Der Lawinenwinter führte weiter dazu, dass der Lawinenschutz zur öffentlichen Aufgabe wurde. Dem Bund war klar, dass er die finanziellen Mittel für die Förderung von Verbauungen bereitstellen musste. So stiegen die Bundessubventionen für den Lawinenschutz nach 1951 markant an und dehnten sich auch auf Massnahmen aus, die nicht allein dem Schutze des Waldes dienten, wie zum Beispiel Galerien. Dies löste eine Flut von neuen Verbauungs- und Ergänzungsprojekten zu bestehenden Verbauungen aus und führte zu einer intensiveren Erforschung des Lawinenschutzes. Da rasch gebaut werden musste, entwickelte die Industrie serienmässig hergestellte, vorfabrizierte Stützwerke. Innerhalb kurzer Zeit wandelten sich die Stützwerktypen von Mauern oder Terrassen zu viel wirksameren Konstruktionen aus Stahl, Aluminium, Holz, Drahtseilen oder Beton. Um zu beurteilen, wie die verschiedenen Werktypen auf die Schneedecke wirkten, wie sie sich verankern liessen und wie dauerhaft die Baumaterialien waren, erstellte das SLF in Davos einen Versuchsverbau

(Abb. 6). 1955 publizierte das SLF die erste provisorische Version der Stützverbau-Richtlinien und schaffte damit einheitliche Grundlagen, welche die Ingenieure und Industrie bei der Planung und Bemessung von Stützverbauungen unterstützten. Die Erkenntnisse aus dem Lawinenwinter 1951 waren für die Weiterentwicklung des Stützverbau von grosser Bedeutung (MARGRETH und SAUERMOSER 2014).

Viele Schadenlawinen von 1951 lösten sich unterhalb der Waldgrenze, insbesondere in der Januarperiode. Lichte Waldbestände konnten das Anbrechen des extrem lockeren Schnees nicht verhindern. Die Forstorgane unternahmen nach dem Lawinenwinter 1951 grosse Anstrengungen, solche Hänge wieder aufzuforsten. Dies war jedoch nicht einfach. Deshalb lancierte die Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) in Birmensdorf und das SLF in Davos in den frühen fünfziger Jahren das erste gemeinsame Forschungsprogramm «Wiederherstellung der oberen Waldgrenze». Ziel war, der Forstpraxis wissenschaftlich abgestützte Grundlagen für eine erfolgreiche Aufforstung zur Verfügung zu stellen. Ein wichtiger Standort in diesem Projekt war die Versuchsfläche Stillberg bei Davos. Das Lawinenanrissgebiet wurde im Jahr 1975 systematisch mit 92000 Bäumen bepflanzt. Seither



Abb. 6. SLF-Versuchsverbau Dorfberg (Graubünden). Ab dem Jahre 1952 wurden neue Verbautypen aus unterschiedlichen Baumaterialien wie Aluminium und Holz getestet (Foto Archiv SLF).

liefert es wertvolle Erkenntnisse über die langfristige Wirkung verschiedener Umweltfaktoren an der alpinen Waldgrenze und über die Möglichkeiten und Grenzen von Hochlagenaufforstungen (BEBI *et al.* 2009).

Der Lawinenwinter 1951 zeigte auch, dass viele zerstörte Gebäude erst im Zeitraum zwischen 1930 und 1950 gebaut worden waren. Oft hatten Einheimische davor gewarnt, an gewissen Stellen zu bauen. Der Eidg. Oberforstinspektor Emil Hess forderte angesichts der grossen Gebäudeschäden, dass ein Lawinenkataster für gefährdete Bergdörfer obligatorisch sein sollte. Ihm war aber auch klar, dass Lawinen «unberechenbare Naturerscheinungen» sind, da im Lawinenwinter 1951 auch sehr alte Waldbestände und Gebäude zerstört wurden (EDI 1951). Im Juni 1952 erliess das Eidg. Departement des Innern Richtlinien für Aufforstungs- und Verbauprojekte, in denen nicht nur auf die Notwendigkeit von Lawinenkatastern, sondern auch von Lawinenzonenplänen hingewiesen wurde. Darin forderte der Bund, dass bei Umsiedelungen oder Massnahmen zum Schutze von Gebäuden keine Beiträge geleistet werden, wenn bei der Wahl der Bauplätze keine Rücksicht auf Lawinenzonenplan und Lawinenkataster genommen wurde. Die Umsetzung dieser Richtlinie dauerte aber mehrere Jahrzehnte, weil die Zuständigkeiten zuerst geregelt und die Abgrenzungskriterien für die verschiedenen Zonen definiert werden mussten. In dieser Zwischenphase herrschte in vielen Kurorten in den Alpen eine starke Bautätigkeit. Den ersten Lawinenzonenplan erstellte das Kreisforstamt Meiringen 1954 für die Gemeinde Gadmen im Berner Oberland «rein gutachtlich und ohne grossen Untersuchungen» (SCHWARZ 1980). Dieser Plan enthielt vier Zonen mit unterschiedlichen Nutzungsmöglichkeiten. 1960 erarbeitete das SLF für die Gemeinde Wengen einen Baulinienplan, in dem zum ersten Mal eine rote Zone (unbedingtes Bauverbot) und eine blaue Zone (bedingtes Bauverbot) eingeführt wurden (FRUTIGER 1970). Ab 1962 standen die Forstorgane den Gemeinden, die für die Lawinenzonierung zuständig waren, aber nicht über das notwendige Fachwissen verfügten, als technische Berater bei der Erarbeitung

der Zonenpläne bei. 1962 und 1967 führte das SLF Kurse für die Bearbeiter von Lawinenzonenplänen durch. In den folgenden Jahren arbeitete es zusammen mit den Forstorganen zahlreiche Lawinenzonenpläne aus. Die Entwicklung der Kriterien für die Auscheidung der Gefahrenzonen wird im untenstehenden Abschnitt zum Lawinenwinter 1968 aufgezeigt.

4 Lawinenwinter 1954: Entwicklung Lawinenmodellierung

Zwischen dem 10. und 12. Januar 1954 kam es zu einer Vielzahl verheerender Lawinenabgänge nördlich des Alpenhauptkamms über das Prättigau bis nach Vorarlberg in Österreich (SLF 1955). Nach einem späten Einschneien führte eine ausgeprägte Nordweststau-lage zu Neuschneemengen von 150 bis 200 cm in zweieinhalb Tagen. Die Niederschlagsintensitäten waren höher als im Winter 1951 und die Temperaturen tiefer. Dies führte dazu, dass Schadenlawinen auch in tiefen Höhenlagen (oft unterhalb von 1400 m) oder in Wäldern anbrachen, ohne diese zu zerstören. Oft handelte es sich um Staublawinen oder sogenannte Wildschnee-Lawinen. Der Schnee war ausserordentlich locker,

liess sich kaum schaufeln und wurde mit Zucker verglichen. 325 Schadenlawinen verschütteten 159 Personen, von denen 33 starben. Mehr als 600 Gebäude wurden zerstört. Dass die Schäden nicht grösser waren, wurde unter anderem dem nach 1951 stark intensivi-erten Lawinenverbau zugeschrieben. Besonders hart traf es Vorarlberg. Dort verschütteten Lawinen 270 Personen, von denen 125 Personen starben.

Der Lawinenwinter 1954 hatte einen grossen Einfluss auf die Entwicklung von Lawinenmodellen. Nach der Lawinenkatastrophe beauftragte ein Hersteller von Lawinenschutzsystemen die Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt EMPA mit der Analyse von Gebäudeschäden, um die von Lawinen verursachten Kräfte besser eingrenzen zu können. Adolf Voellmy führte die Untersuchungen insbesondere in Vorarlberg durch (Abb. 7). Er rechnete die vorgefundenen Schäden nach und publizierte 1955 im wegweisenden Artikel «Über die Zerstörungskraft von Lawinen» ein einfaches Modell der Lawinenbewegung – das sogenannte «Voellmy-Modell» (VOELLMY 1955). Das Modell, das auf den Gesetzen der Hydraulik basiert, ermöglichte, Auslaufstrecken und dynamische Druckwirkungen von Lawinen zu berechnen. Voellmy führte die Reibungsterme μ und ξ ein, die noch heute in

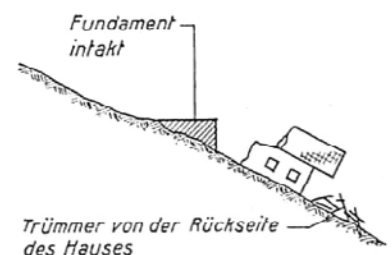
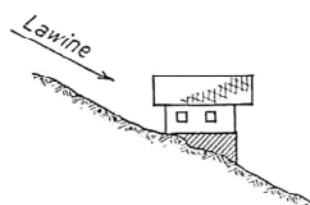


Abb. 7. Voellmy untersuchte nach der Lawinenkatastrophe von 1954 in Vorarlberg (Österreich) aufgetretene Schäden an Gebäuden, um Rückschlüsse auf die Kräfte und die Dynamik von Lawinen machen zu können. Die in Blockbauweise erstellten Gebäude wurden von der Lawine als Ganzes vom Fundament gehoben und weggestossen (VOELLMY 1955 und Archiv SLF).

lawinendynamischen Modellen verwendet werden. Mit der Forschungsarbeit von Voellmy wurde eine zentrale Grundlage geschaffen, um Schutzbauten zu dimensionieren und Lawinengefahrenzonen in Siedlungsgebieten abzugrenzen. Bruno Salm entwickelte das Modell später weiter und machte es der Praxis zugänglich (SALM *et al.* 1990).

5 Lawinenwinter 1968: Weiterentwicklung der Gefahrenkartierung

Im Januar 1968 sorgte eine Nordweststaulage mit starken Niederschlägen und stürmischem Wind für prekäre Verhältnisse auf der Alpennordseite und insbesondere in Graubünden. Besonders schwer getroffen wurde Davos. Am 26. und 27. Januar 1968 verursachten dort 41 grosse Lawinenabgänge verheerende Schäden. Im Siedlungsgebiet von Davos starben 13 Menschen in Lawinen. 51 Wohnhäuser und 14 Ställe wurden getroffen sowie 11 ha Wald zerstört. Die mit Abstand grösste Schadenlawine war die Dorfbachlawine, die alleine 29 Gebäude zerstörte und vier Todesopfer verursachte (SLF 1969). Der letzte ähnlich grosse Abgang der Dorfbachlawine hatte sich 1609 ereignet. Die Katastrophe 1968 war aus damaliger Sicht in ihrer Art und Auswirkung einmalig. Auch aus heutiger Sicht ist die örtliche und zeitliche Konzentration von teilweise unbekannten oder sehr selten auftretenden Lawinen mit grosser Schadenwirkung sehr bemerkenswert, am ehesten vergleichbar mit den verheerenden Lawinnenniedergängen im Februar 1999 im Paznauntal (Tirol, Österreich).

Für das Auslaufgebiet der Dorfbachlawine bestand seit 1961 eine Gefahrenkarte, die vom SLF rein gutachterlich ohne Berechnungen und definierte Abgrenzungskriterien erarbeitet wurde. Man war sich bewusst, dass bei der Zonenabgrenzung «keine extremen und absolut sicheren Grenzen angenommen wurden» (FRUTIGER 1970). Die in der Gefahrenkarte berücksichtigte Wiederkehrdauer dürfte etwa 50 Jahre betragen haben. Die Lawine von 1968 überfloss die Gefahrengrenzen um mehr als 300 m (Abb. 8). Die Mehrzahl der zerstörten Wohnhäuser befand

sich im weissen, als sicher betrachteten Gebiet. Die gewonnenen Erfahrungen aus dem Lawinenwinter 1968 sowie planerische und risikobasierte Überlegungen führten dazu, dass seither bei der Gefahrenkartierung Extremlawinen mit einer Wiederkehrdauer bis zu 300 Jahren berücksichtigt werden. Man war sich jedoch im Klaren, dass ein vollständiger Schutz vor Lawinen nicht möglich ist. Ein Restrisiko wurde bei der Gefahrenkartierung bewusst in Kauf genommen. Die Kriterien, nach welchen Lawinengefahrenkarten ausgearbeitet sind, wurden 1984 in einer Richtlinie zusammengefasst (BFF und SLF 1984). Das Konzept dieser Richtlinie, die Intensität und die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses als Mass für die Gefährdung zu verwenden, wurde später in den Bundesempfehlungen zu den Hochwassergefahren (BWW *et al.* 1997) und Massenbewegungen übernommen (BRP *et al.* 1997; BAFU 2016).

6 Lawinenwinter 1999: Weiterentwicklung der temporären Massnahmen und Optimierung des Integralen Lawinenschutzes

1999 kam es in weiten Teilen des Alpenraums zu zahllosen Lawinnennieder-

gängen mit teilweise katastrophalen Folgen. Die intensive Lawinenaktivität wurde durch drei aufeinanderfolgende, mehrtägige Nordweststaulagen (26.–29. Januar, 5.–10. Februar und 17.–24. Februar 1999) verursacht, die zu lang anhaltenden, intensiven Schneefällen führten. Innerhalb von knapp vier Wochen fielen in grossen Teilen des Alpenraumes 5 bis 8 m Schnee, und es herrschte für mehrere Tage die höchste Gefahrenstufe 5 («sehr gross») der europäischen Lawinengefahrenskala. Viele Verkehrswege waren unterbrochen und ganze Talschaften über längere Zeit von der Umwelt abgeschnitten. Hunderttausende von Touristen sassen fest, teilweise ohne Elektrizität. In der Schweiz wurden rund 1200 Schadenlawinen mit insgesamt 17 Todesopfern in Gebäuden und auf Strassen gezählt. Die damit verbundenen direkten und indirekten Sachschäden beliefen sich auf über 600 Millionen Franken und übertrafen diejenigen vergangener Lawinenwinter bei weitem (SLF 2000). Der Lawinnenniedergang von Evolène war mit 12 Toten das schlimmste Unglück (Abb. 9). Das Lawinenunglück führte zu einem lange dauernden strafrechtlichen Verfahren, das mit der Verurteilung des Gemeindepräsidenten und des Sicherheitsverantwortlichen endete. Dieses Urteil verunsicherte die Lawindienste, war aber auch Anlass, entsprechende Lehren aus dem Unglück zu ziehen.

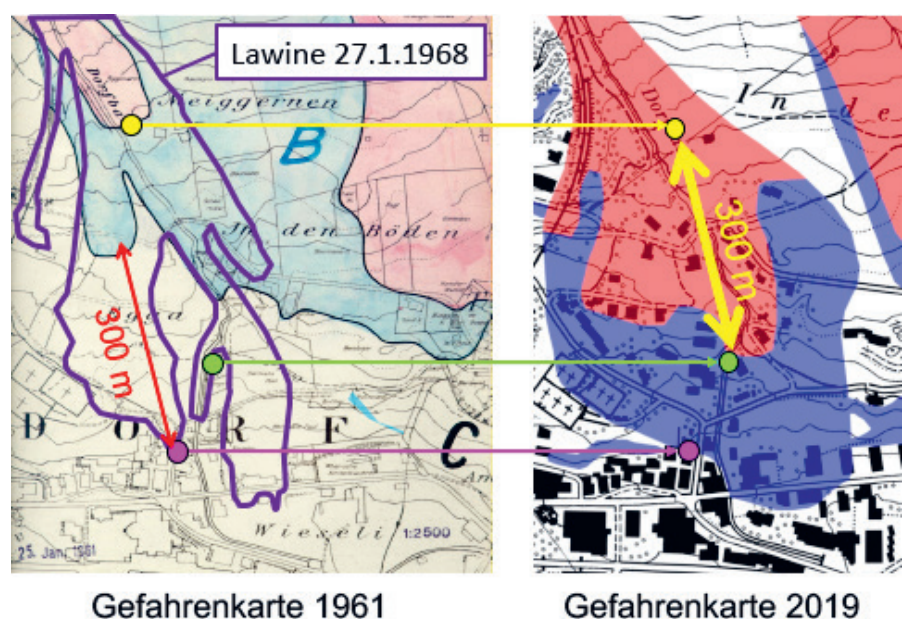


Abb. 8. Lawinengefahrenkarte der Dorfbachlawine in Davos Dorf (Graubünden) von 1961 und 1919. Die Katastrophenlawine vom 27.1.1968 überfloss die Gefahrengrenze um rund 300 m (Quelle: SLF und Kanton Graubünden).

Das SLF erarbeitete im Auftrag des Eidgenössischen Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) eine umfassende Ereignisanalyse zum Lawinenwinter 1999 (SLF 2000). Die Analyse zeigt, dass der während der letzten Jahrzehnte praktizierte Integrale Lawinenschutz mit baulichen, planerischen, biologischen und organisatorischen Massnahmen weitere Todesopfer und Sachschäden verhinderte. Die umfangreichen Investitionen insbesondere in den baulichen Lawinenschutz, welche seit dem Lawinenwinter 1950/51 getätigt wurden, hatten sich grösstenteils bewährt. Die Zahl der Todesopfer war 1999 (17 Tote) im Vergleich zu 1950/51 (98 Tote) viel geringer, trotz des sehr hohen Touristenaufkommens in der Lawinenperiode, die genau in die Ferienzeit fiel. Eine grosse Bedeutung erlangten die organisatorischen Massnahmen und die künstliche Lawinenauslösung. Die Analyse zeigte aber auch, dass bei der Ausbildung und den Pflichtenheften der Lawinendienste sowie beim Umgang mit Information und Kommunikation weitere Verbesserungen notwendig waren. Um diese Lücken zu schliessen, wurde das Projekt «Interkantonales Frühwarn- und Kriseninformationssystem IFKIS» gestartet. Die wichtigsten Ergebnisse daraus waren ein Ausbildungskonzept für Lawinendienste, eine Praxishilfe «Arbeit im Lawinendienst» und die Entwicklung eines Informationssystems (BRÜNDL *et al.* 2004).

Auch bei den technischen Massnahmen konnten anhand der aufgetretenen Extremereignisse neue Erfahrungen gewonnen werden. Diese Erkenntnisse aus dem Lawinenwinter 1999 wurden bei der Überarbeitung der «Technischen Richtlinie für den Lawinenverbau im Anbruchgebiet» im Jahre 2007 (MARGRETH und SAUERMOSE 2014) integriert. Für die Bemessung von Lawinenauffangdämmen wurde ein neues Verfahren entwickelt (BAILLIFARD *et al.* 2007).

Die 1999 bestandenen Lawinengefahrenkarten und Sicherheitskonzepte trugen wesentlich dazu bei, dass die Gebäudeschäden und Anzahl Todesopfer nicht noch höher ausfielen. Nur vereinzelt, wie zum Beispiel in Evolène, überschritten Lawinen die Grenzen der Gefahrenkarten. In der Folge wur-



Abb. 9. Unglückslawine in Evolène (Wallis) vom 21.2.1999. Die Lawine brach in mehreren Anrissgebieten auf einer totalen Breite von rund vier Kilometern an. Die Schneemassen töteten 12 Personen und richteten grossen Sachschaden an. Zwei Lawinenarme überflossen die Kantonsstrasse, die auf einer Länge von 160 m rund 6 m hoch verschüttet wurde (Foto S. Margreth, SLF, 25.2.1999).

den zahlreiche Gefahrenkarten überprüft und wo nötig angepasst (GRUBER und MARGRETH 2001). Es wurde jedoch nicht als notwendig erachtet, die Abgrenzungskriterien der Gefahrenzonen generell zu verschärfen. Weil sich die Verbauungen im Lawinenwinter 1999 weitgehend bewährt hatten, gewann die Thematik der Rückzoning an Bedeutung. Dazu wurde 2008 die Praxisanleitung PROTECT entwickelt (ROMANG 2008), die eine Systematik beschreibt, wie sich die Wirkung von Schutzmassnahmen in Gefahrenkarten berücksichtigen lässt. Im Februar 1999 wurden zahlreiche touristische Transportanlagen durch Lawinen beschädigt oder zerstört. Um dies zukünftig zu verhindern, wurde 2015 der Leitfaden «Berücksichtigung der Lawinen und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen» publiziert (MARGRETH *et al.* 2015).

Der Winter 1999 war charakterisiert durch viele grosse, kombinierte Fliess- und Staublawinen. Wie bereits nach dem Lawinenwinter 1954 wurden die 1999 beobachteten extremen Auslaufstrecken von Lawinen für die Kalibrierung und Weiterentwicklung der Lawinenmodelle verwendet. Bereits Ende 1999 führte das SLF das numerische Si-

mulationsmodell AVAL-1D in die Praxis ein (CHRISTEN *et al.* 2002), das später zum numerischen zweidimensionalen Simulationsmodell RAMMS weiterentwickelt wurde (CHRISTEN *et al.* 2010).

Der Lawinenwinter 1999 zeigte deutlich, dass trotz bedeutender Investitionen in den baulichen Lawinenschutz Personen, Gebäude oder Verkehrswege nach wie vor gefährdet sein können und sich Naturgefahren nicht allein mit Verbauungen verhindern lassen. Der Lawinenwinter 1999 ermöglichte, den Integralen Lawinenschutz, das heisst das optimale Zusammenspiel von permanenten und temporären Massnahmen zur Risikominimierung, weiter voranzutreiben. Unter dem Einfluss der ausserordentlichen Naturereignisse im Jahre 1999 verlangte die Motion Danioth die Ausarbeitung einer gesamtschweizerischen Strategie zur Verbesserung der Sicherheit vor Naturgefahren. Dieser Motion wurde mit der PLANAT-Strategie Folge geleistet, die ihrerseits die Entwicklung einer ganzheitlichen Risikokultur forderte (PLANAT 2004). Das Kernelement der PLANAT-Strategie ist eine Risikoverminderung mit einem verhältnismässigen Mitteleinsatz. Seitdem wurden verschiedene Lücken



Abb. 10. Am Geissberg (Uri) brachen am 22. Januar 2018 etliche Lawinen in- und ausserhalb der Stützverbauung an. Die Stützwerke bremsten die Schneemassen ab und verhinderten einen noch grösseren Anbruch. Die Lawinen stoppten ausserhalb des Siedlungsgebietes von Gurtellen und richtete keine Schäden an (Foto S. Margreth, SLF, 24.1.2018).

zur Umsetzung des Risikokonzepts geschlossen, und die risikobasierte Massnahmenplanung hat sich in der Praxis etabliert (BRÜNDL 2009).

7 Lawinenwinter 2018: Bewährung des Integralen Lawinenschutzes

Im Januar 2018 fielen in hohen Lagen innerhalb von 25 Tagen verbreitet 2,5 bis 5 m Schnee, so viel wie an gewissen Stationen nur alle 75 Jahre. Am 22. bis 23. Januar führte wiederum eine ausgeprägte Nordwestlage dazu, dass erstmals seit 1999 die höchste Gefahrenstufe 5 («sehr gross») der europäischen Lawinengefahreskala grossflächig herausgegeben wurde. Viele grosse und mehrfach sehr grosse Lawinen brachen an, wobei das Wallis und Graubünden am stärksten betroffen waren. Rund 150 Schadenlawinen wurden gezählt. Der feuchte Schnee in mittleren

Lagen bremste die weiter oben trocken angerissenen Lawinen, so dass keine Siedlungen getroffen wurden. Teilweise wurden sie aber nur knapp verfehlt. Im Januar 2018 war es ausserdem extrem warm; der wärmste Januar seit Beginn der Messungen von MeteoSchweiz im Jahr 1864. Der Niederschlag fiel in tieferen Lagen meist als Regen. Dadurch kam es auch zu einigen Slushflows und Murgängen. Die Analyse zeigt, dass keine dauernd bewohnten Gebäude zerstört wurden und keine Personen in Siedlungen oder auf Verkehrsachsen zu Schaden kamen. Aufgrund der Lawinengefahr waren aber zahlreiche Verkehrsachsen bis zu neun Tage gesperrt. Der Lawinenwinter 2018 war viel weniger extrem als der Lawinenwinter 1999. Damals fiel ein Drittel mehr Schnee und das bis in tiefere Lagen.

Nach der Lawinenperiode im Januar 2018 erstellte das SLF im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU eine Ereignisanalyse (BRÜNDL *et al.* 2019). Das Ziel der Untersuchun-

gen war, den Winter 2018 zu analysieren und mit dem Lawinenwinter 1999 zu vergleichen, um den Erfolg der in der Zwischenzeit realisierten Massnahmen bewerten zu können. Zur Dokumentation der Lawinenaktivität wurden erstmals Satellitenbilder (SPOT 6) ausgewertet. Dabei handelte es sich um Bilder vom 24. Januar 2018 mit einer Auflösung von 1,5 m. Ausgewertet wurden alle Gebiete mit der Gefahrenstufe 5 («sehr gross») und die daran grenzenden Gebiete, was einer Fläche von 12500 km² beziehungsweise rund 50 Prozent der Schweizer Alpen entsprach. Auf dieser Fläche wurden mehr als 18000 Lawinen kartiert. Rund 16 Prozent der erfassten Lawinen hatten eine Fläche von mehr als 80000 m² und brachen in Süd- bis Ost-Expositionen an. Die Untersuchungen zeigten, dass im Siedlungsgebiet keine Lawinen die Gefahrengrenzen überschritten. Die meisten grossen und sehr grossen Lawinen liefen im roten Gefahrengebiet aus. Die baulichen Massnahmen haben

sich bewährt und es konnte kein dringlicher Handlungsbedarf ausgemacht werden. Die in einigen Stützverbauungen angebrochenen Lawinen zeigten aber, dass bei allen Schutzmassnahmen grössere oder kleinere Restgefährdungen bestehen bleiben (Abb. 10). Wichtig ist, dass bei der Planung von Schutzmassnahmen auch der Überlastfall geprüft wird, das heisst jener Fall, bei dem die Schutzmassnahme keine volle Wirkung mehr zeigt. Um beurteilen zu können, wie die temporären Massnahmen im Januar 2018 griffen, wurden in neun Regionen Interviews mit Lawinendienstern durchgeführt. Im Vergleich zu 1999 haben sich Ausbildungsstand, Organisation und zur Verfügung stehende Grundlagen wie Lawinenbulletins, Messdaten oder Absperrpläne weiter verbessert. 2018 wurden zweimal pro Tag Lawinenbulletins in vier Sprachen publiziert. Dies trug auch zu einer besseren Information der Öffentlichkeit bei. Die Anzahl der IMIS-Stationen hat sich seit 1999 verdoppelt. Die künstliche Lawinenauslösung hat sowohl für die Sicherung von bewohnten Gebieten wie auch für Verkehrsachsen stark an Bedeutung gewonnen. 2018 bestanden rund 500 ortsfeste Sprenganlagen. Weiter waren 30 Detektionssysteme und Alarmanlagen installiert, die gut funktionierten. Den grössten Handlungsbedarf wurde bei noch fehlenden Sicherheitskonzepten und beim Umgang mit Prozessen wie Regen auf Schnee, Slushflows oder Gletschneeruiert, die infolge der Klimaerwärmung zukünftig zunehmen könnten. Der Lawinenwinter 2018 hat gezeigt, dass der Integrale Lawinenschutz funktioniert, aber sich noch weiter optimieren lässt.

8 Schlussfolgerungen

Die Schweiz hat einen hohen Standard im Umgang mit der Lawinengefahr. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass vergangene Lawinenwinter im Hinblick auf Verbesserungs- und Entwicklungspotenzial selbstkritisch hinterfragt und die richtigen Lehren daraus gezogen wurden. Diese aus vielen Jahrzehnten gewonnenen Erkenntnisse haben dazu geführt, dass die UNESCO im November 2018

den Umgang mit der Lawinengefahr in der Schweiz in die Liste des immateriellen Kulturerbes aufgenommen hat. Eine wichtige Basis für diesen Umgang bildeten Ereignisdokumentationen und -analysen, erstmalig durchgeführt durch Coaz mit der schweizweiten Dokumentation der Lawinenereignisse von 1888. Später lieferten insbesondere die Erkenntnisse aus den Lawinenwintern 1951 und 1999 wesentliche Impulse für die Weiterentwicklung des Lawinenschutzes; der Schritt von der Gefahrenabwehr zu einem Risikomanagement wurde vollzogen. Wichtig dabei war, dass bereits vor einer Krisensituation mögliche Konzepte für Verbesserungen und Entwicklungen bestanden. Ein Lawinenwinter konnte dann helfen, vorbereitete Konzepte schneller umzusetzen. Aus Schaden klüger zu werden, stösst bei komplexen Systemen wie Wetter, Schnee und Lawinen an Grenzen. Jeder Lawinenwinter und jede Lawine hat ihre Besonderheiten. Weil Extremsituationen glücklicherweise nur selten auftreten, lassen sich langfristige Muster oder eine Periodizität zum Beispiel bei der Lawinenaktivität kaum erkennen. Wichtig ist, dass bei der Analyse der zukünftigen Konsequenzen aus vergangenen Ereignissen auch aktuelle Trends wie der Klimawandel oder die intensiviertere Raumnutzung mitberücksichtigt werden. Dazu bilden Ereignisdokumentationen und Ereignisanalysen eine wichtige Grundlage.

9 Literatur

BAFU (Hrg.), 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.

BAILLIFARD, M.; KERN, M.; MARGRETH, S., 2007: Anleitung zur Dimensionierung von Lawinenauffangdämmen. Davos, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.

BEBI, P.; HAGEDORN, F.; MARTIN, M.; RIXEN, C.; SENN, J.; WASEM, U., 2009: Langfristige Waldgrenzen-Forschung am Stillberg – vor lauter Bäumen den Wald noch sehen. Forum für Wissen 2009: Langzeitforschung für eine nachhaltige Waldnutzung. 87–92.

BRÜNDL, M. (Ed.), 2009: Risikokonzept für Naturgefahren – Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 420 S.

BRÜNDL, M.; ETTER, H.-J.; STEINIGER, M.; KLINGLER, CH.; RHYNER, J.; AMMANN, W.J., 2004: IFKIS – a basis for managing avalanche risk in settlements and on roads in Switzerland. Nat. Hazards Earth-Syst. Sci. 4: 257–262.

BRÜNDL, M.; HAFNER, E.; BEBI, P.; BÜHLER, Y.; MARGRETH, S.; MARTY, C.; SCHAEER, M.; STOFFEL, L.; TECHEL, F.; WINKLER, K.; ZWEIFEL, B.; SCHWEIZER, J., 2019: Ereignisanalyse Lawinensituation im Januar 2018. WSL Ber. 76. 162 S.

BFF; SLF, 1984: Richtlinien zur Berücksichtigung der Lawinengefahr bei raumwirksamen Tätigkeiten/Bundesamt für Forstwesen (BFF) und Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF). Bern, EDMZ.

BWW; BRP; BUWAL, 1997: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen 1997. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

BRP; BWW; BUWAL, 1997: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen 1997. Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW) und Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL).

CHRISTEN, M.; BARTELT, P.; GRUBER, U., 2002: AVAL-1D: An Avalanche Dynamics Program for the Practice. In International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim – Matsumo, Japan. Congress publication. 715–725.

CHRISTEN, M.; KOWALSKI, J.; BARTELT, P., 2010: RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology. 63: 1/2, 1–14.

COAZ, J., 1889: Der Lawinenschaden im schweizerischen Hochgebirge im Winter und Frühjahr 1887–88. Bern, Stämpfli.

COAZ, J., 1910: Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizeralpen. Bern, Stämpfli.

EDI, 1951: Der Lawinenwinter 1950–51. Veröffentlichungen über Verbauungen Nr. 6. Bern, Eidg. Dep. des Innern EDI, Inspektion für Forstwesen, Jagd und Fischerei.

FRUTIGER, H., 1970: Der Lawinenzonenplan. Schweizerische Z. Forstw. 121, 246–276.

- GRUBER, U.; MARGRETH, S., 2001: Winter 1999: a valuable test of the avalanche hazard mapping procedure in Switzerland. *Ann. Glaciol.* 32: 328–332.
- MARGRETH, S.; SAUERMOSER, S., 2014: Entwicklung von Standards und Normen im technischen Lawinenschutz. *Wildbach- und Lawinenverbau*. 78: 174, 42–56.
- MARGRETH, S.; STOFFEL, L.; SCHAEER, M., 2015: Berücksichtigung der Lawinen und Schneedruckgefährdung bei Seilbahnen. Ein Leitfaden für die Praxis. *WSL Ber.* 28: 43 S.
- PLANAT, 2004: Strategie Naturgefahren Schweiz. Synthesebericht. Bern, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.
- ROMANG, H. (Ed.), 2008: Wirkung von Schutzmassnahmen. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 289 S.
- SALM, B.; BURKARD, A.; GUBLER, H.U., 1990: Berechnung von Fliesslawinen – Eine Anleitung für den Praktiker. Davos, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. 47.
- SCHWARZ, W., 1980: Abschätzung der Lawinengefährdung an Hand von Beispielen der Ortsplanung. *Internationales Symposium Interprävent Bad Ischl*. 4: 337–351.
- SLF, 1952: Schnee- und Lawinen in den Schweizeralpen Winter 1950/51. Winterbericht des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/ Davos. Bern, EDMZ.
- SLF, 1953: Der Lawinenwinter 1950/51 und die sich daraus ergebenden Folgerungen für die Lawinenverbauung. *Wiss. Tagung*, 6.-9. Oktober 1952. Davos, SLF Interner Bericht Nr. 147.
- SLF, 1955: Schnee- und Lawinen in den Schweizeralpen Winter 1953/54. Winterbericht des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/ Davos. Bern, EDMZ.
- SLF, 1969: Schnee- und Lawinen in den Schweizeralpen Winter 1967/68. Winterbericht des Eidg. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch/ Davos. Bern, EDMZ.
- SLF, 2000: Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF. 588 S.
- VOELLMY, A., 1955: Ueber die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweiz Bauz.* 73, Hefte 12, 15, 17, 19 und 37; 159–162, 212–217, 246–249, 280–285.

Abstract

Avalanche winter of the last 150 years: its importance for the development of avalanche protection

Over the last 150 years, avalanche protection in Switzerland has developed considerably. The lessons learned from past avalanche winters have contributed greatly to this development. An avalanche winter is characterized by the fact that it has been analyzed in detail, was influential for its time and showed a need for action. The important avalanche winters discussed in this article are 1888, 1951, 1954, 1968, 1999 and 2018. These winters have made a significant contribution to improving avalanche protection. Despite today's much higher vulnerability of society, the number of fatalities and property damage in the last two avalanche winters has decreased distinctly.

Keywords: avalanche winter, avalanche protection, event analysis, hazard mapping

Hochwasserschäden: Entwicklung und Trends

Norina Andres und Alexandre Badoux

Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf
norina.andres@wsl.ch, alexandre.badoux@wsl.ch

An der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL werden seit 1972 Schäden infolge von Hochwasser, Murgängen, Rutschungen und (seit 2002) Sturzprozessen zusammengetragen. Die jährliche, mittlere nominale Schadenssumme aller Prozesse beträgt rund 250 Mio. CHF, mit einem Hochwasserschadenanteil von 88 Prozent. Eine Analyse der jährlichen Schadenssumme unter Berücksichtigung der Teuerung, der Bevölkerungs- und Wertezunahme hat keinen signifikanten Trend ergeben. Somit kann statistisch nicht belegt werden, dass Schäden in der Schweiz zunehmen. Aus vergangenen Hochwasserereignissen wurde viel gelernt und über die Jahre viel in den Schutz investiert, was sicherlich der Zunahme von Schäden entgegenwirkte. Der Weg von rein technischen Massnahmen zu einem integralen Risikomanagement spielt dabei eine zentrale Rolle.

1 Einleitung

In diesem Artikel werden die Schäden aus der Unwetterschadens-Datenbank der WSL genauer unter die Lupe genommen. Es interessieren folgende Fragen: Wie variiert die Schadenssumme von Jahr zu Jahr (Kap. 2)? Haben die Schäden über die Jahre tendenziell zugenommen (Kap. 3)? Was hat man aus vergangenen Ereignissen gelernt (Kap. 4)?

2 Schäden in der Schweiz seit 1972

Medien berichten regelmässig von Schäden, welche Naturgefahrenprozesse verursachen. An der Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL werden diese Schadensinformationen seit 1972 in einer Datenbank systematisch erfasst und analysiert (HILKER *et al.* 2009). Diese lange Zeitreihe ermöglicht einen Vergleich der Schäden seit 1972. In den letzten rund 20 Jahren unterstützte das Bundesamt für Umwelt BAFU das Betreiben der Datenbank finanziell massgeblich.

2.1 Einführung in die Unwetterschadens-Datenbank

In der Datenbank der WSL werden Schäden infolge von Hochwasser, Murgängen und Rutschungen berück-

sichtigt. Schäden durch Steinschläge, Fels- und Bergstürze werden seit 2002 ebenfalls aufgenommen. Die Einträge basieren auf Meldungen in rund 3400 Schweizer Printmedien sowie zusätzlichen Informationen aus dem Internet. Dabei werden Sach-, Infrastruktur-, Wald- und Landwirtschaftsschäden sowie Interventionskosten der erfassten Ereignisse auf Basis von Erfahrungswerten grob abgeschätzt. Im Falle von folgensweren Ereignissen werden zusätzliche Informationen von Versicherungen, Krisenstäben und amtlichen Stellen von Gemeinden, Kantonen und vom Bund beigezogen. In den Schadenskosten sind sowohl versicherte Sach- und Personenschäden (Gebäude- und Privatversicherungen) als auch nicht versicherte und nicht versicherbare Schäden enthalten. Indirekte Schäden, spätere Sanierungsmassnahmen und Folgeprojekte, Betriebsausfallkosten sowie ideelle Schäden werden hingegen nicht aufgenommen. Die WSL publiziert ihre Ergebnisse in Form jährlicher Berichte und stellt diese in einen langjährigen Kontext (z.B. ANDRES und BADOUX 2018).

2.2 Auswertung der Schäden zwischen 1972 und 2017

In der Folge werden die Auswertungen der nominalen, nicht normalisierten Schäden für den Zeitraum von 1972 bis 2017 präsentiert (Abb. 1).

Anteil an den Gesamtschäden: Prozesse

Im Zeitraum von 1972 bis 2017 wurden 88 % der Gesamtschäden durch Hochwasser und Überschwemmungen verursacht. Rutschungen machten 6 %, Murgänge 5 % und Sturzprozesse 1 % aus. Der Anteil der verschiedenen Prozesse an den Gesamtschadenskosten variiert von Jahr zu Jahr. Im Jahr 2017 war zum Beispiel der Anteil der Murgangskosten mit 25 % deutlich höher als im langjährigen Schnitt, was auf das Bergsturzergebnis mit folgensweren Murgängen in Bondo GR zurückzuführen ist.

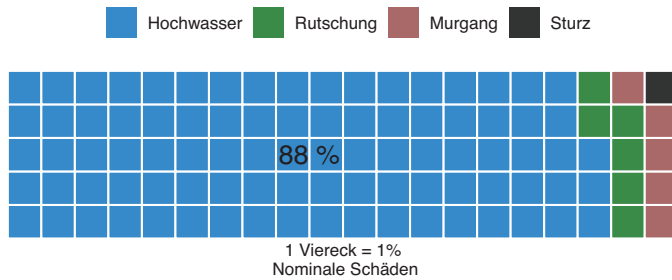
Anteil an den Gesamtschäden: Ursachen

Werden die meteorologischen Auslöser der Gefahrenprozesse betrachtet, so sind 56 % der Gesamtschäden eine Folge von lang andauernden Niederschlägen. Dauerregen über mehrere Tage führte zum Beispiel 2005 und 2007 zu Hochwasser in Bächen und Flüssen, welche über die Ufer traten und hohe Schäden verursachten. Gewitter und intensive Niederschläge sind für 40 % der Gesamtschäden verantwortlich. Gewitter verursachen vor allem lokal Ausuferungen, Überschwemmungen, Murgänge und flachgründige Rutschungen. Der Anteil an den Gesamtschäden infolge Gewitter ist in 35 von insgesamt 46 untersuchten Jahren sogar grösser als jener der Schäden aus Dauerregen. Die Kombination von Schneeschmelze und Regen verursachte rund 1 % der Gesamtschäden. Unbekannte oder andere Auslöser waren für 3 % der Kosten verantwortlich.

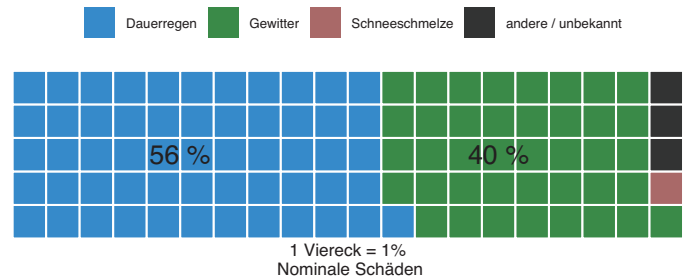
Monatliche Verteilung der Schäden

Die monatliche Verteilung der Schäden zeigt deutlich, dass im August durchschnittlich die höchsten Schäden auftreten, gefolgt von Juli und Juni. Die hohen Schäden im August wurden vor allem durch die Grossereignisse 1978, 1987, 2005 und 2007 verursacht. Generell sind in den Monaten November bis April wenig Schäden zu verzeichnen.

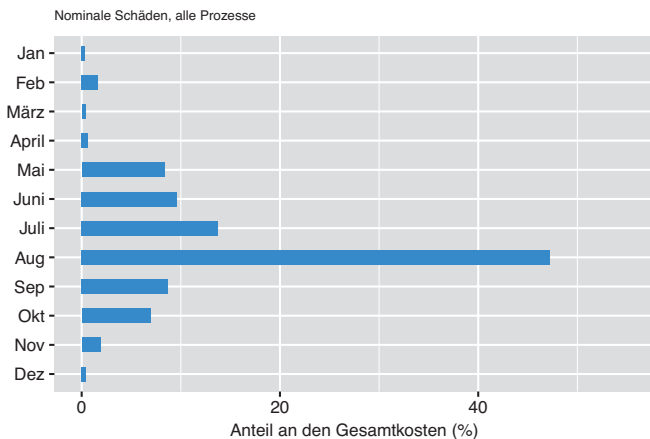
Anteil an Gesamtschäden – Prozesse



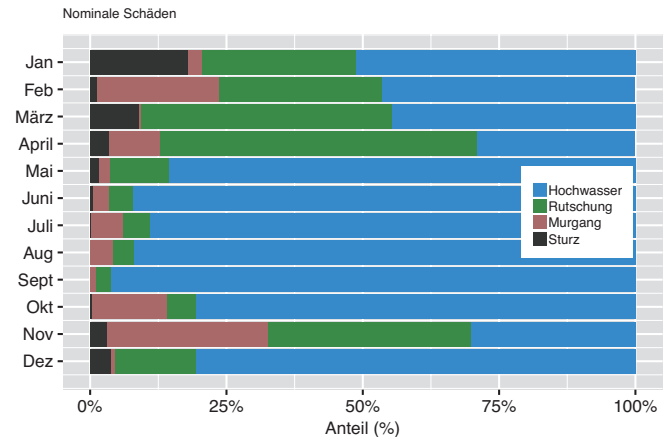
Anteil an Gesamtschäden – Ursachen



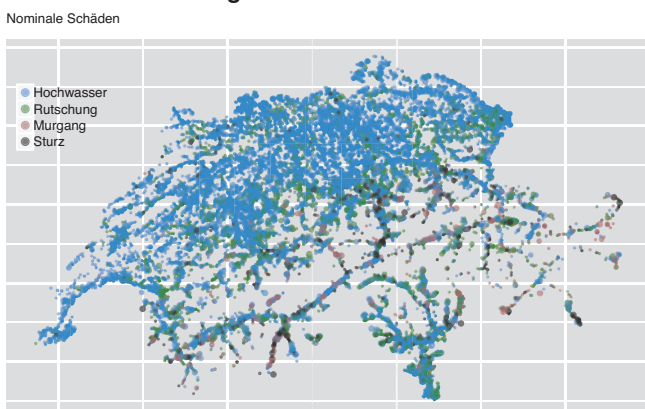
Monatliche Verteilung der Schäden



Anteil an den monatlichen Schäden



Räumliche Verteilung der Schäden



Jährliche Verteilung der Schäden 1972 bis 2017

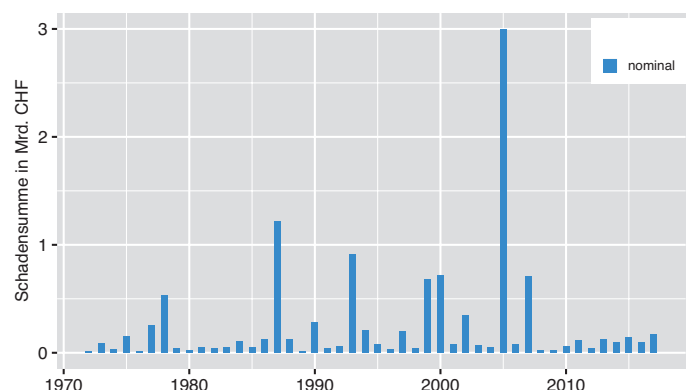


Abb. 1. Resultate der Auswertung der nominalen Schäden 1972 bis 2017.

Anteil an den monatlichen Schäden

Die hohen Schadenskosten im Sommerhalbjahr von Mai bis Oktober sind vor allem auf Hochwasserereignisse zurückzuführen. In den restlichen Monaten ist der Anteil der Schäden durch Rutschungen, Murgänge und Sturzprozesse an den Gesamtkosten höher.

Räumliche Verteilung der Schäden

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Schäden, so fällt auf, dass diese vor allem im Mittelland und in den Haupttälern der Alpen zu verzeichnen sind. Im Mittelland dominie-

ren die Hochwasserschäden, während die Rutschungen vor allem in den Vor-alpen und Alpen vorkommen. Auch die Sturzprozesse sind vor allem in steilem Gelände zu finden.

Jährliche Verteilung der Schäden und Grossereignisse

Das arithmetische Mittel der nominalen Schäden von 1972 bis 2017 beträgt 249 Mio. CHF/Jahr und der Median 83 Mio. CHF/Jahr. Diese Zahlen und die Grafik der jährlichen Verteilung der Schäden (Abb. 1) zeigen auf, dass die Zeitreihe seit 1972 durch einzelne

ausserordentliche Ereignisse geprägt ist, welche jeweils sehr hohe Schäden verursacht haben. In den zehn letzten Jahren der Datenreihe zwischen 2008 und 2017 waren die Schäden mit einem arithmetischen Mittel von 91 Mio. CHF/Jahr unterdurchschnittlich. Ins Auge sticht 2005 mit sehr hohen nominalen Schäden von rund 3 Mrd. CHF (Abb. 1, Tab. 1).

Das erste Hochwasser seit Beginn der Erfassung der Daten 1972 mit nominalen Schäden von über 500 Mio. CHF ereignete sich 1978. Das Unwetter vom 7. und 8. August 1978 verur-

sachte grosse Schäden im Kanton Tessin und im Einzugsgebiet der Thur. Im Tessin waren neun Todesopfer und zahlreiche Verletzte zu beklagen. Ausserdem waren grosse Schäden an Siedlungen, Verkehrswegen sowie Landwirtschafts- und Forstgebieten zu verzeichnen. Besonders schwer betroffen waren Ascona und Losone, wo Ausbrüche der Melezza und Maggia zu Verwüstungen führten (ZELLER und RÖTHLISBERGER 1979).

Die zweithöchsten Schäden seit 1972 wurden im Jahr 1987 verzeichnet. Am 18. und 19. Juli 1987 lösten intensive, über 30 Stunden anhaltende Niederschläge unzählige Fluss- und Bachausbrüche, Murgänge, Überschwemmungen und Rutschungen im Bündnerland und Tessin aus. Vier Personen verloren ihr Leben und Hunderte mussten evakuiert werden. Am 24. und 25. August 1987 war vor allem der Alpenraum betroffen. Erosion entlang der Reuss führte zu Dammbrochen und Unterspülungen von Strassen. Weite Gebiete der unteren Reusebene im Kanton Uri standen unter Wasser. Murgänge führten zu grossen Schäden zum Beispiel in Münster im Kanton Wallis. Im Tessin waren vor allem die Verkehrswege schwer betroffen (ZELLER und RÖTHLISBERGER 1988).

Langanhaltende Niederschläge über den Kantonen Wallis und Tessin führten am 24. September 1993 zu Hochwasser und zur dritthöchsten jährlichen Schadenssumme seit 1972. In Brig verklebte das Geschiebe an der Saltinabrücke, worauf Teile der Stadt mit vielen Gebäuden meterhoch mit Geröllmassen zugedeckt wurden (BEZZOLA *et al.* 1994). Zwei Personen kamen ums Leben (RÖTHLISBERGER 1994).

Ausgiebige Niederschläge und Schneeschmelze führten im Mai 1999 zu zwei Hochwasserereignissen (11.–15. und 20.–22.), welche vor allem Ufergebiete von Seen und Gebiete entlang von grossen Flüssen im Mittelland betrafen, wie zum Beispiel die Städte Thun und Bern. Zu Überschwemmungen kam es bei beinahe allen Alpenrandseen und deren Zu- und vor allem Ausflüssen (HEGG *et al.* 2000).

Vom 13. bis 15. Oktober 2000 war vor allem die Alpensüdseite von langanhaltenden Regenfällen betroffen. Die extrem hohen Wasserstände verursachten entlang des Lago Maggiore (v.a. in Locarno) grosse Schäden. Im Wallis führten Erosion, Rutschungen und Murgänge im ganzen Kantonsgebiet zu Schäden. 16 Personen verloren ihr Leben, 13 davon in Gondo (HEGG *et al.* 2001).

Das Hochwasser vom 21. bis 22. August 2005 war das schadenreichste seit Beginn der systematischen Datensammlung 1972. Schäden entstanden entlang von grossen Flüssen im Mittelland sowie in den Voralpen und der Zentralschweiz. Die heftigen Regenfälle führten zu grossräumigen Überschwemmungen, Murgängen, Rutschungen und Hangmuren sowie zu sechs Todesfällen (BEZZOLA und HEGG 2007; HILKER *et al.* 2007).

Langandauernde Regenfälle führten vom 8. bis 9. August 2007 zu einer Überbelastung der Jurarandseen und der Aare. Ausufernde Bäche verwüsteten mehrere Ortschaften in den Kantonen Aargau, Solothurn, Basel-Landschaft, Bern und Waadt (BEZZOLA und RUF 2009; HILKER *et al.* 2008).

3 Normalisierung und Trends

Um die finanziellen Schäden von Naturgefahrenprozessen über die Jahre vergleichen zu können, werden sie normalisiert. Dabei stellt man sich die Frage, wie viel ein Ereignis heute kosten würde, das zum Beispiel 1978 auftrat. Neben der Teuerung lassen sich für solche Berechnungen weitere sozio-ökonomische Veränderungen über die Zeit berücksichtigen. Zum Beispiel sind bei einer Bevölkerungszunahme mehr Menschen potenziell gefährdet. Auch der Ausbau des Strassen- und Bahnnetzes sowie eine Zunahme von Gebäuden und Infrastruktur führen zu einem höheren Schadenspotenzial. Dies macht die Gesellschaft gegenüber Naturgefahren verletzlicher. Im Vergleich zu früher ist das Eigentum heute oftmals mehr wert und Menschen sind vermögender. Ausserdem werden mehr teure Sachgüter in Gebäuden aufbewahrt, zum Beispiel Autos in unterirdischen Garagen, Gerätschaften und technische Anlagen im Untergeschoss. Dies erhöht heute das Schadenspotenzial stark.

3.1 Methodik Normalisierung

In der Folge werden einige Normalisierungsmethoden vorgestellt und für die Zeitperiode von 1972 bis 2016 angewendet. Die Sturzprozesse sind aus diesen Auswertungen ausgeschlossen, da erst ab 2002 entsprechende Schadensdaten vorliegen.

Die simpelste und oft angewendete Normalisierung berücksichtigt nur die Entwicklung der Teuerung über die Jahre.

Tab. 1. Grossereignisse seit 1972.

Datum	Nominale Schäden Ereignis [Mio. CHF]	Betroffene Kantone/Gebiete	Nominale Schäden Jahr [Mio. CHF]
7.–8. August 1978	514	TI	530
18.–19. Juli / 24.–25. August 1987	1050	Inneralpine Talschaften (UR, GR, TI, VS, BE)	1220
24. September 1993	663	VS	912
11.–15. / 20.–22. Mai 1999	577	Deutschschweiz (BE, AG, ZH, SG, TG)	683
14.–15. Oktober 2000	669	VS, TI	718
21.–22. August 2005	2978	Zentralschweiz (LU, UR, OW, NW), BE, GR	2997
8.–9. August 2007	379	Mittelland	709

$$NS_{2016} = S_y \times T_y \quad (1)$$

Der auf das Jahr 2016 normalisierte Schaden (NS) wird durch die Multiplikation des nominalen Schadens (S) aus dem Jahr y mit dem Teuerungsfaktor (T) aus dem Jahr y berechnet.

In ANDRES und BADOUX (2019) werden weitere Normalisierungsmethoden getestet. Die Methoden und Resultate der Studie sind im Folgenden kurz zusammengefasst. In der Studie wurde der Ansatz von PIELKE JR. und LANDSEA (1998) verwendet, welcher den nominalen Schaden (S) aus dem Jahr y mit einem Faktor für die Teuerung (T), die Bevölkerungsentwicklung (P) und die Entwicklung des Reichtums (R) multipliziert.

$$NS_{2016} = S_y \times T_y \times P_y \times R_y \quad (2)$$

Die Faktoren in den Gleichungen werden generiert, indem der Wert für das Jahr 2016 jeweils durch den entsprechenden Wert für das Jahr y dividiert wird. Für die Teuerung resultiert für 2016 somit ein Wert von 1 und zum Beispiel ein Wert $T_{1972} = 2,58$ für das Jahr 1972. Für die Berechnung des Teuerungsfaktors (T) wurde der Landesindex der Konsumentenpreise verwendet, für die Bestimmung des Faktors der Bevölkerungsentwicklung (P) die Bevölkerungszahlen pro Kanton und für die Entwicklung des Reichtums (R) entweder der Reallohn oder das Bruttoinlandsprodukt BIP (Daten: www.bfs.admin.ch). Die Normalisierung der Schäden mittels Gleichung (2) wird in der Folge «Reallohn-Ansatz» oder «BIP-Ansatz» genannt, je nachdem welcher Faktor (R) für die Entwicklung des Reichtums benutzt wurde.

Ein weiterer Ansatz für die Normalisierung der Schadensdaten ergibt sich aus der Multiplikation des nominalen Schadens (S) aus dem Jahr y mit dem

Faktor für die Entwicklung der Versicherungssumme für Gebäude (V). In der Folge nennen wir diese dritte Methode den «Versicherungssummen-Ansatz».

$$NS_{2016} = S_y \times V_y \quad (3)$$

Die Daten zur Bestimmung des Faktors V wurden vom Interkantonalen Rückversicherungsverband (IRV) zur Verfügung gestellt und beinhalten Informationen für 19 der 26 Schweizer (Halb-)Kantone. Für die restlichen Kantone wurde der Mittelwert der Daten aus den 19 Kantonen verwendet. Im Vergleich zum BIP- und Reallohn-Ansatz gemäss PIELKE JR. und LANDSEA (1998) wurde bei dieser Methode angenommen, dass die Entwicklung der Bevölkerung und des Reichtums bereits in den Zahlen der Versicherungssumme enthalten ist. Mit den beiden Faktoren Bevölkerungsentwicklung (P) und Versicherungssumme (V) ist in den drei verwendeten Ansätzen (Gleichungen 2 und 3) auch eine räumliche Komponente enthalten.

Um zu testen, ob der Trend der Schadenssummen über die Jahre signifikant ist, wurden eine lineare Regression und ein Mann-Kendall-Trend-Test angewendet. Die Anzahl Datenbankeinträge über die Untersuchungsperiode wurde ebenfalls analysiert, was in ANDRES und BADOUX (2019) näher erläutert ist.

3.2 Resultate und Diskussion zu Normalisierung und Trends

Wenn für den Normalisierungsprozess nur die Teuerung verwendet wird (Gleichung 1), so steigt die Gesamtschadenssumme über alle Jahre um rund 20 % von 11 226 Mio. CHF auf 13 652 Mio. CHF. Mit den restlichen

Normalisierungsansätzen verdoppelt sich die Gesamtschadenssumme über den Zeitraum von 1972 bis 2016 beinahe (siehe Tab. 2). Ein Vergleich der drei Normalisierungsansätze aus ANDRES und BADOUX (2019) zeigt, dass bei Anwendung des Versicherungssummen-Ansatzes die höchsten Schadenssummen resultieren, gefolgt vom BIP-Ansatz, welcher neben dem Bevölkerungswachstum und der Teuerung das BIP verwendet. Die tiefsten Werte ergeben sich mit dem Reallohn-Ansatz. Der Mittelwert von nominal 249 Mio. CHF Schaden pro Jahr steigt durch die Normalisierung je nach Ansatz auf Werte von 493, 443 und 416 Mio. CHF. Der Median ist deutlich tiefer als der Mittelwert, der von den einzelnen Grossereignissen beeinflusst wird. Nominal werden für den Median 83 Mio. CHF pro Jahr erreicht und 138 Mio. CHF pro Jahr mit dem Versicherungssummen-Ansatz.

Bei der Betrachtung der jährlichen Verteilung der Schäden fällt auf, dass durch die Normalisierung die Schadenssummen zu Beginn der Untersuchungsperiode deutlich nach oben korrigiert werden (Abb. 2). Das Jahr mit der höchsten Schadenssumme bleibt 2005. Aber die Jahre 1978 und 1987 weisen nun ebenfalls Schäden über 1,7 Mrd. CHF auf. Das Jahr 1978 rückt nach 1987 an die dritte Stelle der Jahre mit den höchsten Unwetterschäden. Für die Jahre mit geringen nominalen Schadenssummen ist der Effekt der Normalisierung absolut betrachtet sehr klein.

Die leicht steigende Regressionsgerade der nominalen Schadenssummen in Abbildung 2 lässt vermuten, dass die Schäden über die 45 Jahre des Erfassungszeitraums zunehmen. Im Vergleich dazu zeigen die Regressionsgeraden der mit den drei Ansätzen normalisierten Schadenssummen eher eine leichte Ab-

Tabelle 2 Kennwerte für Schadenssummen der Periode 1972–2016 (nominal und normalisiert mit der Teuerung und weiteren drei Ansätzen: Verwendung der Versicherungssummen von Gebäuden sowie Berücksichtigung von Teuerung und Bevölkerungswachstum in Kombination mit dem BIP oder dem Reallohn).

	nominal	normalisiert mit der Teuerung	normalisiert mit dem Versicherungssummen-Ansatz	BIP-Ansatz	Reallohn-Ansatz
Summe (Mio. CHF)	11 226	13 652	22 173	19 940	18 740
Mittelwert (Mio. CHF)	249	303	493	443	416
Median (Mio. CHF)	83	93	138	125	127

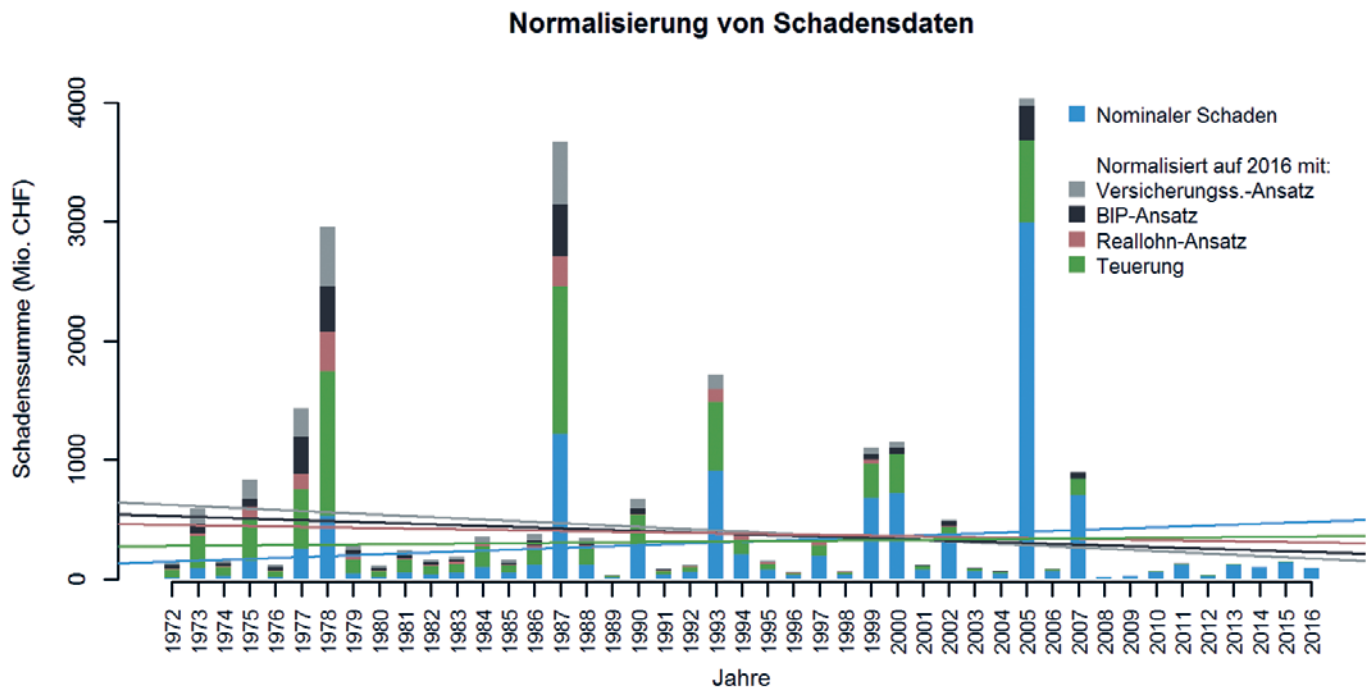


Abb. 2. Jährliche Schäden in der Schweiz durch Hochwasser, Murgänge und Rutschungen (in Mio. CHF) nominal und normalisiert auf Werte für das Jahr 2016 mit verschiedenen Ansätzen: Verwendung der Versicherungssummen von Gebäuden (Versicherungssummen-Ansatz), Berücksichtigung von Teuerung und Bevölkerungswachstum in Kombination mit dem BIP (BIP-Ansatz) oder Reallohn (Reallohn-Ansatz) sowie nur Berücksichtigung der Teuerung. Obwohl die Regressionsgeraden eine gewisse Neigung aufweisen, zeigen die angewendeten Trend-Tests keine Signifikanz (Lineare Regression, Mann-Kendall-Trend-Test).

nahme. Die Trend-Tests über die jährlichen Schadenssummen mit der linearen Regression (Daten in log-Skala) und der Mann-Kendall-Methode zeigen jedoch keine Signifikanz ($P < 0,05$), weder für die nominalen Schadenssummen noch für die normalisierten.

Die Studie zeigt deutlich, dass Aussagen über eine Zunahme von Schäden im Zeitraum von 1972 bis 2016 für die hier untersuchten Prozesse statistisch nicht belegbar sind. Eine Trendanalyse mit Jahressummen ist jedoch nur bedingt aussagekräftig, weil die untersuchten 45 Jahre durch wenige Grossereignisse dominiert werden, welche rund 71% der totalen nominalen Schäden ausmachen (1977, 1978, 1987, 1993, 1999, 2000, 2005, 2007). Die Trendanalyse ist somit stark von der Verteilung dieser schadenreichen Jahre in der Untersuchungsperiode abhängig (KRON *et al.* 2012). Eine nur 45-jährige Untersuchungsperiode könnte auch zu kurz sein, um signifikante Trends nachzuweisen. Ein Blick in die Vergangenheit zeigt, dass während der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts nur wenige grosse Hochwasser auftraten (PFISTER 2009). Daraus könnte geschlossen werden, dass solche Ereignisse in den letzten

30 Jahren des 20. Jahrhunderts und zu Beginn des 21. Jahrhunderts zunehmen. Dieser Schluss ist jedoch falsch, da sich im 19. Jahrhundert einige schwere Hochwasser ereigneten (BRÖNNIMANN *et al.* 2018; RÖTHLISBERGER 1991; PFISTER 2009; SCHMOCKER-FACKEL und NAEF 2010). Eine Studie von PETRASCHECK (1989) hat diesbezüglich gezeigt, dass die Normalisierung der Schadenskosten des 1868-Ereignisses auf das Jahr 1987 zu ähnlich hohen Werten führt, wie sie infolge des Ereignisses im Sommer 1987 auftraten.

Die Zunahme von nominalen Schäden durch Naturereignisse wird an verschiedensten Orten festgestellt. So steht zum Beispiel im IPCC Assessment Report der Arbeitsgruppe II, dass mit «hohem Vertrauen» die ökonomischen Kosten durch extreme Wetterereignisse in der Periode 1960 bis 2000 zugenommen haben (CRAMER *et al.* 2014). BOUWER (2011) hat 22 Studien analysiert, von denen die meisten zeigten, dass dieser Anstieg der Kosten auf einen Anstieg des Reichtums und einer Zunahme der durch Naturgefahren bedrohten Bevölkerung zurückzuführen ist. Denn nach Durchführung einer Normalisierung war in

den Daten jeweils kein Trend mehr ersichtlich.

Neben dem Klimawandel beeinflussen andere Faktoren die zeitliche Entwicklung der Schadensdaten, zum Beispiel Schutzmassnahmen. In der Schweiz werden jährlich rund 2,9 Mrd. CHF in Schutzmassnahmen investiert (geschätzt für die Periode 2000–2005; PLANAT 2007; WEGMANN *et al.* 2007). Der Einfluss all dieser risikomindernden Massnahmen auf die Schadenskosten von Ereignissen ist schwierig zu erfassen. Es ist aber möglich, dass diese Investitionen in die Sicherheit einen Effekt des Klimawandels aufheben oder ihm zumindest entgegenwirken.

4 Lehren aus vergangenen Hochwasserereignissen

Der Schutz vor Naturgefahren beschäftigt die Menschen seit jeher und aus jedem Hochwasserereignis der Vergangenheit wurden entsprechend Lehren gezogen. Die Strategien und Möglichkeiten, sich zu schützen, haben sich allerdings über die Zeit beträchtlich geändert. Erste gemeinschaftliche

Schutzmassnahmen wurden ab dem 18. Jahrhundert ergriffen, als vor allem die Flüsse begradigt wurden, um Agrarland zu gewinnen oder die Tal Ebenen zur Vorbeugung gegen Krankheiten zu entsumpfen (BAFU 2016). Nach einer Reihe von schweren Ereignissen mit hohen Schäden wurde der Schutz vor Naturgefahren Mitte des 19. Jahrhunderts zur gemeinsamen Aufgabe von Bund und Kantonen erklärt (BAFU 2016). Oft erwähnt wird das Ereignis vom Herbst 1868, welches als Trendwende im Hochwasserschutz betrachtet wird (BRÖNNIMANN 2018). Im Nachgang zum katastrophalen Hochwasser kam es zum Erlass einer eidgenössischen Forstgesetzgebung. Zahlreiche Flüsse und Bäche wurden verbaut sowie grosse Flächen aufgeforstet (SCHMID 2001). Des Weiteren wurden meteorologische und hydrologische Messsysteme eingerichtet. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts wurde die Schweiz von grösserem Hochwasser verschont und man glaubte bereits, die Gefahren auf alle Zeiten gebannt zu haben. Die Unwetterereignisse 1977, 1978 und 1987 zeigten jedoch, dass dies nicht stimmte und ein neues Umdenken im Hochwasserschutz erforderlich war (SCHMID 2001).

Ende der 1980er und anfangs der 1990er Jahre wurden zahlreiche Bundesgesetze und Verordnungen erlassen, welche den Wasserbau betrafen. Das Bundesgesetz über den Wasserbau, das 1991 in Kraft trat, stärkte den nachhaltigen Hochwasserschutz und forderte flächendeckende Gefahrenkarten. Es wurde erkannt, dass der Schutz vor Hochwasser eine vielschichtige Aufgabe ist und dass auch ökologische, wirtschaftliche und planerische Anliegen berücksichtigt werden müssen. Mit dem nachhaltigen Hochwasserschutz versuchte man die Natur nicht mehr in erster Linie mit Schutzbauten zu bändigen, sondern gewährte den Wasserläufen Freiräume, etwa in Form von Überflutungsflächen (BWG 2002a). Schutzziele wurden formuliert und Strategien ausgearbeitet, die den Überlastfall berücksichtigen (UVEK 2008).

Erfolgreiche Hochwasserschutzkonzepte wurden zum Beispiel in Brig nach dem Hochwasserereignis 1993 mit grossen materiellen Schäden und zwei Todesopfern eingeführt. Dank ei-

ner Kombination von baulichen Massnahmen, wie der Hubbrücke über die Saltina und temporären Massnahmen konnten während des Hochwassers vom Oktober 2000 grosse Schäden verhindert werden, obwohl der Abfluss der Saltina noch höher war als 1993. Auch an diversen weiteren Orten schützten die eingeführten Massnahmen vor hohen Schäden wie zum Beispiel in Visp, Naters oder Gampel-Steg (BWG 2002b).

Das Integrale Risikomanagement (IRM) von Naturgefahren wurde 2004 durch die Nationale Plattform Naturgefahren (PLANAT) in der Strategie Naturgefahren Schweiz verankert. Der Schutz vor Naturgefahren wird als Daueraufgabe betrachtet, bei der Fachstellen, Behörden, Versicherungen und Betroffene zusammenarbeiten und einen intensiven Risikodialog führen. Dabei sollen alle Naturgefahren betrachtet und alle Arten von Massnahmen in die Planung einbezogen werden, um ein Sicherheitsniveau anzustreben, welches sämtliche Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt (ökologisch, sozial vertretbar und ökonomisch verhältnismässig; BAFU 2016).

Auch aus dem Ereignis 2005 mit den höchsten Schäden seit 1972 wurden Lehren gezogen. Die Optimierung der Warnung und Alarmierung (OWARNA) wurde aufgegleist und eine engere Vernetzung der nationalen Fach- und Führungsstellen angestrebt (BAFU 2011). Mit der gemeinsamen Informationsplattform Naturgefahren (GIN) und dem Webportal www.naturgefahren.ch erhielten sowohl die Naturgefahrenverantwortlichen als auch die Bevölkerung neue Instrumente, die sie bei der Ereignisbewältigung unterstützen. Das hydrometeorologische Messnetz wurde weiter ausgebaut, und entsprechende Vorhersagen wurden verbessert (BAFU 2016). Das Ereignis 2005 hat gezeigt, dass in allen Phasen des Risikokreislaufs (Vorbeugung, Bewältigung und Regeneration) alle Möglichkeiten genutzt werden müssen, um Schäden zu verhindern (UVEK 2008).

Die Strategie Umgang mit Risiken aus Naturgefahren wurde kürzlich von der PLANAT überarbeitet und 2018 veröffentlicht (PLANAT 2018).

5 Literatur

- ANDRES, N.; BADOUX, A., 2018: Unwetter-schäden in der Schweiz im Jahre 2017. Rutschungen, Murgänge, Hochwasser und Sturzereignisse. *Wasser Energie Luft* 110, 1: 67–74.
- ANDRES, N.; BADOUX, A., 2019: The Swiss flood and landslide damage database: normalization and trends. *J. Flood Risk Manage.* (accepted October 2018). Early view. doi: 10.1111/jfr3.12510.
- BAFU, 2011: Leben mit Naturgefahren. Ziele und Handlungsschwerpunkte des Bundesamts für Umwelt (BAFU) im Umgang mit Naturgefahren. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU.
- BAFU, 2016: Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbelay vom 14.12.2012. Bern.
- BEZZOLA, G.R.; HEGG, C., 2007: Ereignisanalyse Hochwasser 2005, Teil 1 – Prozesse, Schäden und erste Einordnung, Umwelt-Wissen Nr. 0707. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 215 S.
- BEZZOLA, G.R.; RUE, W., 2009: Ereignisanalyse Hochwasser 2007. Analyse der Meteor- und Abflussvorhersagen; vertiefte Analyse der Hochwasserregulierung der Jurarandgewässer, Umwelt-Wissen Nr. 2709. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU. 209 S.
- BEZZOLA, G.R.; ABEGG, J.; JÄGGI, M.N.R., 1994: Saltinabrücke Brig-Glis (Rekonstruktion des Hochwassers vom 24. September 1993 in Brig-Glis). Schweiz. Ing. Arch. 11:165–169.
- BOUWER, L.M., 2011: Have Disaster Losses Increased due to Anthropogenic Climate Change? *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 92, 1: 39–46.
- BRÖNNIMANN, S.; ROHR, C.; STUCKI, P.; SUMMERMATTER, S.; BANDHAUER, M.; BARTON, Y.; FISCHER, A.; FROIDEVAUX, P.; GERMANN, U.; GROSJEAN, M.; HUPFER, F.; INGOLD, K.; ISOTTA, F.; KEILER, M.; MARTIUS, O.; MESSMER, M.; MÜLCHI, R.; PANZIERA, L.; PFISTER, L.; RAIBLE, C.C.; REIST, T.; RÖSSLER, O.; RÖTHLISBERGER, V.; SCHERRER, S.; WEINGARTNER, R.; ZAPPA, M.; ZIMMERMANN, M.; ZISCHG, A. P., 2018: 1868 – das Hochwasser, das die Schweiz veränderte. Ursachen, Folgen und Lehren für die Zukunft. *Geographica Bernensia*, G94, 52 S., doi:10.4480/GB2018.G94.01.
- BWG, 2002a: Hochwasserschutz im Fluss. Von der Expertensache zum Anliegen aller. Bern.

- BWG, 2002b: Hochwasser 2000 – Les crues 2000. Ereignisanalyse / Fallbeispiele – Analyse des événements / Cas exemplaires. Berichte des BWG, Serie Wasser – Rapports de l'OFEG, Série Eaux – Rapporti dell'UFAEG, Serie Acque. Nr. 2. Bern.
- CRAMER, W.; YOHE, G.W.; AUFFHAMMER, M.; HUGGEL, C.; MOLAU, U.; DA SILVA DIAS, M.A.F.; STONE, D.A.; TIBIG, L., 2014: Detection and attribution of observed impacts. In: FIELD, C.B.; BARROS, V.R.; DOKKEN, D.J.; MACH, K.J.; MASTRANDREA, M.D.; BILIR, T.E. *et al.* (eds) *Climate change 2014 – Impacts, adaptation and vulnerability: Part A: Global and sectoral aspects: Working Group II Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report Global and sectoral aspects*. Cambridge, England and New York, NY, Cambridge University Press. 1: 979–1037.
- HEGG, C.; BADOUX, A.; GRAF, C.; RÖTHLISBERGER, G., 2000: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1999. *Wasser Energie Luft* 92, 3/4: 59–68.
- HEGG, C.; BADOUX, A.; BASSI, E.; SCHMID, F., 2001: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2000. *Wasser Energie Luft* 93, 5/6: 117–129.
- HILKER, N.; JEISY, M.; BADOUX, A.; HEGG, C., 2007: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2005. *Wasser Energie Luft* 99, 1: 31–41.
- HILKER, N.; BADOUX, A.; HEGG, C., 2008: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 2007. *Wasser Energie Luft* 100, 2: 115–123.
- HILKER, N.; BADOUX, A.; HEGG, C., 2009: The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 9, 3: 913–925.
- KRON, W.; STEUER, M.; LOW, P.; WIRTZ, A., 2012: How to deal properly with a natural catastrophe database – analysis of flood losses. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12, 3: 535–550.
- PETRASCHECK, A., 1989: Die Hochwasser 1868 und 1987. *Wasser Energie Luft* 81, 1–3: 1–8.
- PFISTER, C., 2009: Die «Katastrophenlücke» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionellen Risikobewusstseins – The “Disaster Gap” of the 20th Century and the Loss of Traditional Disaster Memory. *GAIA* 18, 3: 239–249.
- PIELKE JR., R.A.; LANDSEA, C.W., 1998: Normalized hurricane damages in the United States: 1925–95. *Weather and Forecasting* 13, 3: 621–631.
- PLANAT, 2007: Jährliche Aufwendungen für den Schutz vor Naturgefahren. Projekt B1. Bern, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.
- PLANAT, 2018: Umgang mit Risiken aus Naturgefahren. Strategie 2018. Bern, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT.
- RÖTHLISBERGER, G., 1991: Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz. Ber. Eidgenöss. Forsch.anst. Wald Schnee Landsch. 330: 120 S.
- RÖTHLISBERGER, G., 1994: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1993. *Wasser Energie Luft* 86, 1/2: 1–8.
- SCHMID, F., 2001: Politische Konsequenzen aus dem Unwetterereignis von 1868 – Anfänge des eidgenössischen Hochwasserschutzes. *Schweiz. Z. Forstwes.* 152, 12: 521–526.
- SCHMOCKER-FACKEL, P.; NAEF, F., 2010: Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 14, 8: 1581–1594.
- UVEK, 2008: Hochwasser 2005 in der Schweiz. Synthesebericht zur Ereignisanalyse. Bern.
- WEGMANN, M.; MERZ, H.; MEIERHANS STEINER, K., 2007: Jährliche Aufwendungen für den Schutz vor Naturgefahren in der Schweiz. Projekt B1. Strategie Naturgefahren Schweiz, Umsetzung des Aktionsplans PLANAT 2005–2008. Bern.
- ZELLER, J.; RÖTHLISBERGER, G., 1979: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1978. *Wasser Energie Luft* 71, 5/6: 103–108.
- ZELLER, J.; RÖTHLISBERGER, G., 1988: Unwetterschäden in der Schweiz im Jahre 1987. *Wasser Energie Luft* 80, 1/2: 29–42.

Abstract

Flood Damage: Development and Trends

At the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL damage caused by floods, debris flows, landslides and (since 2002) rockfall has been compiled since 1972. The annual average nominal loss from all processes amounts to around CHF 250 million, with a flood loss ratio of 88 %. An analysis of the annual loss amount, taking into account inflation, population and wealth development, has not revealed any significant trend. This means that it cannot be statistically proven that losses are increasing in Switzerland. Much has been learned from past floods and much has been invested in protection over the years, which has certainly counteracted the increase in losses. The path from purely technical measures to integral risk management plays a central role here.

Keywords: flood damage, normalization, trend

Wie viel Trockenheit ertragen unsere Wälder? Lehren aus extremen Trockenjahren

Andreas Rigling^{1,3}, Sophia Etzold¹, Peter Bebi², Peter Brang¹, Marco Ferretti¹, David Forrester¹, Holger Gärtner¹, Arthur Gessler^{1,3}, Christian Ginzler¹, Barbara Moser¹, Marcus Schaub¹, Sophie Stroheker¹, Volodymyr Trotsiuk^{1,3}, Lorenz Walthert¹, Roman Zweifel¹ und Thomas Wohlgemuth¹

¹ Eidg. Forschungsanstalt WSL, Zürcherstr. 111, CH-8903 Birmensdorf, andreas.rigling@wsl.ch

² WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung SLF, Flüelastr. 11, CH-7260 Davos Dorf

³ ETH Zürich, Departement Umweltsystemwissenschaften, Universitätsstr. 2, CH-8092 Zürich, Schweiz

Die Bilder grossflächig brauner Laubbäume in weiten Teilen der Schweiz sowie Zentraleuropas im Frühsommer 2018 sind uns noch sehr präsent. Diese um rund drei Monate verfrühte Herbstverfärbung der Wälder war das Resultat der extremen Hitze und langanhaltenden Dürre. Auch wenn das Ausmass und die Sichtbarkeit der Schäden in Wald und Landwirtschaft 2018 ausserordentlich waren, so stellen wir eine Häufung von solchen extremen Hitze- und Trockenjahren (2003, 2011 und 2015) fest. Laut dem neuesten Klimabericht für die Schweiz muss davon ausgegangen werden, dass Hitze- und Dürreperioden in Zukunft noch häufiger auftreten dürften. Was heisst dies nun für unsere Wälder? Wie viel Trockenheit können sie ertragen? Wir diskutieren diese Fragen anhand von Daten aus verschiedenen Monitoringansätzen und zeigen auf, dass die verschiedenen Waldökosysteme sehr unterschiedlich reagieren und die zukünftige Dynamik unserer Wälder von der Kombination und dem zeitlichen Auftreten von Trockenheit und anderen Wetterextremen abhängen wird.

1 Einleitung

Der Klimawandel hat in der Schweiz mit einem Anstieg der mittleren Jahrestemperatur um 1,5 °C seit Mitte der 1980er-Jahre markante Ausmasse angenommen. Im Jahr 2018 wurde in Zürich erstmals eine mittlere Jahrestemperatur von 11 °C erreicht (Daten MeteoSchweiz), und neun der zehn wärmsten Jahre traten nach 2000 auf (CH2018, 2018). Neben diesen «schleichenden» Veränderungen konnten in den vergangenen Jahrzehnten zudem wiederholt extreme Witterungsereignisse beobachtet werden, wie etwa die Winterstürme Vivian (1990), Lothar (1999) und Burglind (2018) sowie markante Spätfröste (2016, 2017) und Trockenjahre (2003, 2011, 2015, 2018). Die klimatischen Veränderungen haben in unseren Wäldern Spuren hinterlassen (RIGLING *et al.* 2018; GARDINER *et al.* 2010; WOHLGEMUTH *et al.* 2018). Laut den Klimaszenarien für die Schweiz (CH2018, 2018) werden in Zukunft die Sommer generell niederschlagsärmer und heisser. Hitzetage, Tropennächte und ausgedehnte Trockenperioden werden häufiger auftreten. Die

Winter hingegen werden feuchter, aber schneeärmer, und mit Starkniederschlägen muss zu allen Jahreszeiten vermehrt gerechnet werden.

Vor diesem Hintergrund kommt dem vergangenen Jahr 2018 mit der stärksten Sommerdürre seit Messbeginn im Jahr 1864 eine besondere Bedeutung zu. In weiten Teilen des Schweizer Mittellandes führte die Trockenheit zu massiven Produktionseinbusen in der Land- und Forstwirtschaft (Abb. 1). In den nordöstlichen Landesteilen zwischen Basel und Walensee fiel von April bis August weniger als 50 % der sonst üblichen Niederschlagsmenge. Im Westen und im Süden war die Trockenheit dagegen weniger ausgeprägt. Das Sommerhalbjahr (April bis September) war noch heisser als im bisherigen Spitzenreiterjahr 2003 und somit die heisseste je gemessene Periode (MeteoSchweiz 2019).

Erhöhte Baummortalität als Folge von Trockenheit ist weltweit bereits seit mehreren Jahren zu einem zentralen Thema der Wald- und speziell der Klimafolgenforschung geworden. Während anfangs mehrheitlich über Baumsterben in niederschlagsarmen Gebie-

ten berichtet wurde, nahmen in den letzten Jahren die Meldungen über Mortalitätsphänomene in Wäldern der gemässigten, borealen und sogar der tropischen Zonen zu (ALLEN *et al.* 2010, 2015; GALIANO *et al.* 2010; WILLIAMS *et al.* 2013). Auch in der Schweiz ist es in den letzten 20 Jahren wiederholt zu ausgedehntem Baumsterben gekommen, wobei die Waldföhre in den zentralen Alpentälern (*Pinus sylvestris* L.) jeweils besonders stark betroffen war (RIGLING *et al.* 2018).

Die Landwirtschaft kann aufgrund kürzerer Produktionszyklen schneller auf zunehmende Trockenheit reagieren (z.B. BAFU 2017). Sie kann beispielsweise die Sortenwahl oder die Fruchtfolge im Ackerbau anpassen, und es besteht die Möglichkeit, Kulturen mit einer hohen Wertschöpfung zu bewässern. In der Tierproduktion lassen sich trockenheitsbedingte Futterausfälle durch Zukäufe kurzfristig auffangen. Diese kurzfristigen und flexiblen Anpassungsmassnahmen fehlen hingegen im Management von langlebigen Wäldern. Diese haben, im Gegensatz zu den allermeisten Produktionsformen in der Landwirtschaft, viel längere Produktionszeiträume von Jahrzehnten bis zu Jahrhunderten. Der Artenzusammensetzung und Bewirtschaftungsform kommt daher eine weitreichende Bedeutung zu. Doch hier eine Entscheidung zu treffen, gestaltet sich heute schwierig, da die Bäume immer extremeren Umweltbedingungen ausgesetzt sind und sowohl an die heutigen wie auch die zukünftigen Bedingungen angepasst sein sollten. Von der Waldbewirtschaftung wird erwartet, dass sie langfristig, nachhaltig und kontinuierlich die verschiedenen von der Gesellschaft nachgefragten Waldleistungen sicherstellt wie Holzproduktion, Er-

holungsraum für die Bevölkerung, Lebensraum für Tiere und Pflanzen oder der Schutz unseres Trinkwassers. Lassen sich solche Leistungen während einer gewissen Zeit nicht erbringen, kann dies fatale Folgen haben, zum Beispiel im Falle der Schutzwälder im Gebirge, welche die Bevölkerung und Infrastruktur vor Naturgefahren wie Lawinen, Steinschlag und Murgang schützen. Ohne diese schützende Wirkung wäre ein Leben im Gebirgsraum nicht denkbar. Die Frage stellt sich also, wie robust unsere Wälder gegenüber sich aktuell ändernden klimatischen Einflüssen sind, insbesondere den häufiger stattfindenden Klimaextremen wie Trockenheit, Sturm und Spätfrost. Diese Frage zu beantworten, ist für die Waldbewirtschaftenden zunehmend schwierig, da mittlerweile klimatische Bedingungen herrschen, die für unsere Generation neuartig sind. Die grosse

Schwierigkeit besteht also darin, dass das aktuelle Erfahrungswissen in Zeiten des raschen Umweltwandels nicht mehr ausreicht.

Die extremen Trockenjahre bieten die Gelegenheit, um die Anpassungsfähigkeit der Wälder gegenüber Wetterextremen zu untersuchen und daraus zu lernen, sofern uns genügend Messungen und Daten zur Verfügung stehen. Diese Daten sind entscheidende Grundlagen für Szenarien der zukünftigen Waldentwicklung und somit auch für eine zukunftsgerichtete Anpassung der Bewirtschaftungskonzepte.

Mittlerweile verfügen wir über sehr gute Klimamessreihen, um die langfristigen Trends zu erkennen, und über immer besser abgestützte Szenarien für die zukünftige Entwicklung des Klimas. Dennoch können wir das Auftreten von Extremereignissen nicht vorhersagen. Wir wissen nicht, wann und

wo die nächste Trockenheit oder der nächste Spätfrost auftreten wird. Kontinuierliche, automatisierte Messungen des Wasserversorgungszustands der Bäume zeigen zwar, wie sich solche Extremereignisse auswirken (DIETRICH *et al.* 2018), doch ist das Schweizer Messnetz nicht so dicht, dass lokale und kleinräumige Ereignisse erfasst werden könnten. Andere Messnetze haben zwar eine höhere räumliche Auflösung. Die Bäume werden dort aber nicht häufig genug beprobt, um aufzuzeigen, wie sich Extremereignisse über die Vegetationsperiode hinweg auswirken. Sobald sich eine extreme Trockenperiode abzeichnet, geraten wir regelmässig unter Zugzwang, auf die Schnelle zusätzliche Messungen der Trockenheit und ihrer Effekte vorzunehmen. Wie gehen wir mit dieser grundsätzlichen Schwierigkeit um? Im folgenden Beitrag stellen wir verschiedene Da-



Abb. 1. Der trockene Sommer 2018 hinterliess Spuren in der Landwirtschaft und im Wald. Ab Mitte Juli verdorhten in der Nordostschweiz a) Maisfelder (Furttal ZH) und b) Sonnenblumenfelder (Hemishofen SH), und die Wälder verfärbten sich teilweise oder c) vollständig (Hemishofen SH). Im Herbst wurden zunehmend Borkenkäferschäden an Fichten sichtbar (d) (Hedingen ZH) (Fotos: A. Rigling, WSL).

tenquellen des WSL-Waldmonitorings vor. Wir diskutieren einerseits ihre Eignung zur Erfassung des Einflusses von Wetterextremen auf die Wälder und andererseits zeigen wir anhand dieser Daten die unterschiedlichen Sensitivitäten von Waldökosystemen gegenüber extremer Trockenheit auf.

2 Datengrundlage

Die WSL betreibt im Rahmen der Umweltbeobachtung des Bundes verschiedene Monitoringnetzwerke und -plattformen, um den Waldzustand zu erheben und Prozesse der Walddynamik zu untersuchen. Die verschiedenen Ansätze unterscheiden sich in Bezug auf die Länge der Zeitreihen, die zeitliche Auflösung und die räumliche Repräsentativität der Messdaten (Abb. 2). Die längsten Zeitreihen sind die Ertragskundeflächen (EFM). Die Daten mit der höchsten zeitlichen Auflösung stammen aus Intensivmonitoringprogrammen (z.B. LWF oder TreeNet), und die für den gesamten Schweizer Wald räumlich repräsentativsten Daten werden im Landesforstinventar (LFI) und mittels Satelliten erhoben. Jede dieser Datenreihen verfolgt spezifische Fragestellungen. Die kombinierte Analyse dieser Daten ist die eigentliche Stärke des WSL-Waldmonitorings:

- **Ertragskundeflächen¹ (EFM)** liefern detaillierte Informationen zu Wachstum und Bestandesstruktur in Abhängigkeit unterschiedlicher Bewirtschaftungseingriffe. Die Daten stammen aus 390 Waldbeständen in der Schweiz. Die ältesten Flächen werden seit mehr als 130 Jahren regelmässig vermessen. Die zeitliche Auflösung der sehr langfristigen Erhebungen beträgt 5 bis 12 Jahre. Der Fokus dieser Beobachtungsflächen liegt seit Beginn weg auf den Bewirtschaftungseingriffen. Die Daten eignen sich nur für die Analyse von langfristig wirkenden Klimaeffekten, nicht aber dafür, die kurzfristige Wirkung von Extremereignissen zu erkennen.
- Das Projekt **Naturwaldreservate² (NWR)** untersucht die natürliche Waldentwicklung in insgesamt 49 Waldreservaten in der gan-

zen Schweiz (gemeinsames Projekt WSL/ETH). Das Monitoring wird ca. alle 10 Jahre auf Kern- und Stichprobeflächen durchgeführt. Die meisten Kernflächen stehen seit den 60er- oder 70er-Jahren des 20. Jahrhunderts unter Beobachtung. Die ältesten Aufnahmen stammen aus dem Arvenwald Tamangur (GR) und wurden bereits 1905 erhoben. Die einzigartigen Datenreihen zeigen die langfristige Entwicklung der Waldstrukturen, des Baumwachstums und der Mortalität auf, doch ist die kurzfristige Wirkung von Extremereignissen aufgrund der langen Aufnahmeintervalle meist nicht klar messbar.

- Das **Landesforstinventar³ (LFI)** erfasst den Zustand und die Veränderungen im Schweizer Wald anhand von 6500 Probeflächen, die auf einem systematischen Netzwerk über die gesamte Schweizer Waldfläche verteilt sind. Von 1983 bis 2006 wurden drei Vollerhebungen mit einem Abstand von ca. 10 Jahren durchgeführt. Ab 2009 wurde das LFI in eine kontinuierliche Inventur umgewandelt, die es ermöglicht, die Auswirkungen von Extremereignissen zu erkennen. Dies geschah 2018 mit einer Sonderuntersuchung zu den Auswirkungen der Dürre auf die Buche im Rahmen der Initiative «WSL Trockenheit 2018».
- Die **Sanasilva-Inventur⁴** erfasst seit 1985 den Zustand der Bäume im Schweizer Wald durch die Erhebung des Blatt- und Nadelverlustes. Der «Verlichtungsgrad» ist eine integrale Grösse zur Messung der Vitalität von Bäumen. Er wird visuell auf 5 % genau geschätzt, wobei die Extreme «100 % für einen toten Baum ohne Nadeln oder Blätter» und «0 % für einen voll beblätterten Baum» gelten (DOBBERTIN *et al.* 2001). Die repräsentativen Aufnahmen von rund 1100 Bäumen werden auf einem Teilnetz des LFI auf einem 16 mal 16 km Raster durchgeführt. Die jährlichen Aufnahmen finden jeweils im Juli und August statt, nach voller Blattentfaltung und vor Einsetzen der Herbstverfärbung. Je nach Zeitpunkt des Auftretens von klimatischen Extremereignissen sind deren Effekte schon im laufenden Jahr oder erst im Fol-

gejahr in den Aufnahmedaten sichtbar.

- **Waldschutzerhebungen⁵:** Seit 1989 wird jährlich mittels einer Umfrage die Waldschutzsituation in allen Forstkreisen der Schweiz erhoben. Der Hauptfokus liegt dabei auf Schädlingen und Krankheiten von Bäumen. Zusätzlich werden auch extreme Wetterereignisse wie Frost und Trockenheit erfragt. Für einzelne Organismen oder Ereignisse können räumlich explizite Aussagen bezüglich Auftreten und Schadwirkung mit jährlicher Auflösung gemacht werden. Je nach Zeitpunkt des Auftretens dieser biotischen und abiotischen Extremereignisse sind deren Effekte schon im laufenden Jahr oder erst im folgenden Jahr in den Aufnahmedaten sichtbar.

Diese Monitoringnetzwerke werden durch punktuelle Untersuchungen und Datenerhebungen mit hoher zeitlicher Auflösung ergänzt:

- Die **Langfristige Waldökosystemforschung⁶ (LWF)** untersucht seit 1994 auf 19 Flächen den Zustand der Wälder. Die Erhebungen reichen von der alljährlichen Einschätzung des Kronenzustandes bis zu automatischen Messungen des Baumwachstums im Zehnminutentakt. Pro Jahr werden ca. 25 Millionen Messdaten zusammengetragen. Diese detaillierten und zeitlich hoch aufgelösten Messungen eignen sich für die Analyse grossflächig auftretender Klimaextreme und ihrer Effekte auf den Wald.
- Im Projekt **TreeNet⁷** werden seit 2011 an 34 Standorten in der Schweiz mittels Punktdendrometern die Stammradiusänderungen von ca. 300 Bäumen mit einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten gemessen. Zusätzlich werden, ebenfalls zeitlich hoch aufgelöst, verschiedene Parameter der Atmosphäre und des Bodens erfasst, wie etwa Luftfeuchtigkeit oder Bodenwasserpotenzial (ETZOLD *et al.*

¹ www.wsl.ch/efm

² www.wsl.ch/naturwaldreservate

³ www.lfi.ch

⁴ www.wsl.ch/sanasilva

⁵ waldschutz.wsl.ch

⁶ www.wsl.ch/lwf

⁷ www.wsl.ch/treenet

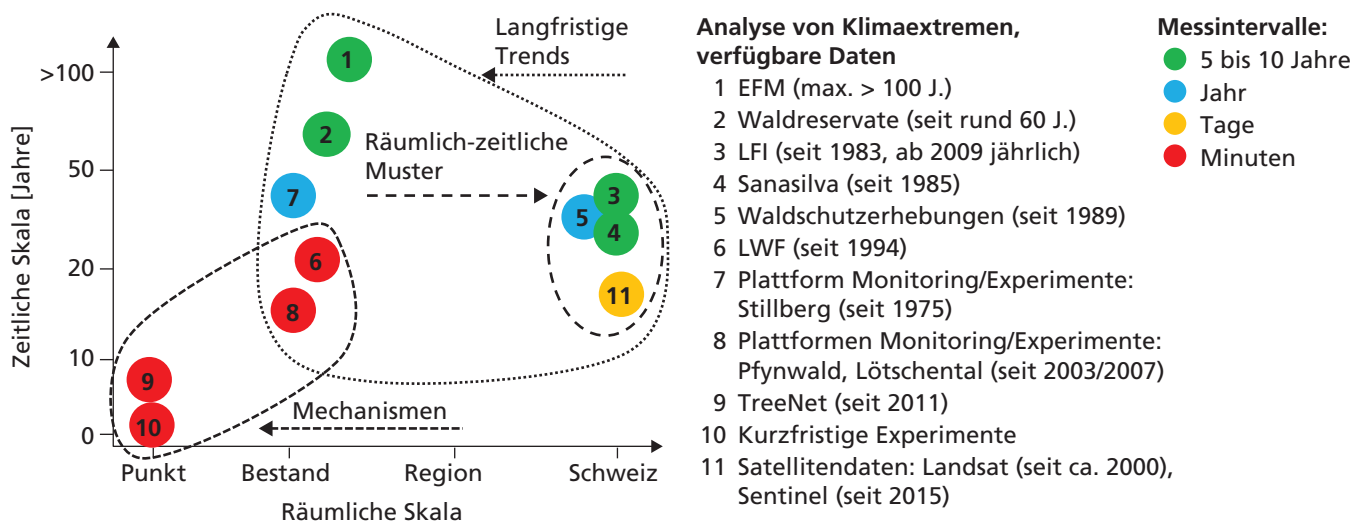


Abb. 2. Verfügbare Datenreihen, gruppiert nach räumlicher und zeitlicher Skala sowie Messintervall ihrer Verfügbarkeit.

2018). Aus den Messungen werden laufend das aktuelle Baumwachstum sowie das Baumwasserdefizit (ein Mass, wie viel Wasser einem Baum zur Sättigung fehlt) berechnet (ZWEIFEL *et al.* 2016). Diese zeitlich hoch aufgelösten Daten sind geeignet, um sporadisch auftretende Wetterextreme zu erfassen und ihre Effekte auf den Wald zu analysieren.

- In besonders empfindlichen Ökosystemen werden langfristige Forschungsplattformen betrieben. Sie dienen einerseits dazu, die langfristige Entwicklung dieser Waldbestände zu beobachten. Andererseits sind sie Plattformen für verschiedene kurzfristige Forschungsprojekte, die von den langfristigen Monitoringkampagnen vor Ort profitieren. Die Messungen finden entsprechend auf sehr unterschiedlichen Zeitskalen, von Minuten bis Jahren, statt. Am Stillberg⁸, an der oberen Waldgrenze im Dischmatal bei Davos, wurden 1975 im Rahmen eines systematisch angelegten Aufzuchtversuchs mit verschiedenen Baumarten 92000 junge Bäume gepflanzt. Seit mehr als 40 Jahren wird über das Wachstum und Überleben dieser Pflanzen in Abhängigkeit von verschiedenen Umwelteinflüssen Buch geführt. Zusätzlich zum Langzeitmonitoring wurden hier seit den 1980er-Jahren Experimente durchgeführt, unter anderem zu den Effekten von Witterungsextremen, erhöhtem CO₂ und höheren Bodentemperaturen auf das Pflan-

zenwachstum (z.B. DAWES *et al.* 2011). Im Alptal⁹, unweit von Einsiedeln SZ, wird seit bald 30 Jahren der Einfluss von erhöhtem Stickstoffeintrag auf einen Fichtenwald analysiert (z.B. SCHLEPPI *et al.* 2017). Im Pfynwald (Kanton Wallis)¹⁰ wird seit 2003 ein Waldföhrenbestand grossflächig bewässert, um den Einfluss von unterschiedlicher Wasserverfügbarkeit auf das Wachstum von 800 Waldföhren zu studieren (z.B. DOBBERTIN *et al.* 2010). Und im Lötschental¹¹ werden seit 2007, entlang eines Höhengradienten vom Talboden bis zur Waldgrenze, die Effekte des Klimawandels auf das Zellwachstum und die Physiologie von Fichte und Lärche untersucht (z.B. KING *et al.* 2013).

- **Satellitendaten:** Ergänzend zu terrestrischen Erhebungen bringen Daten der satellitengestützten Erdbeobachtung detaillierte Informationen über grosse Flächen zur Landbedeckung. Seit 2015 liefern die Satelliten des Copernicus-Programmes¹², Sentinel-2a, Bilder mit einer räumlichen Auflösung von bis zu 10 mal 10 m, und dies alle 3 bis 5 Tage. Damit können sehr dichte, wolkenfreie Datenreihen erstellt werden, um den Zustand und die Entwicklung der Vegetation zu quantifizieren.

In den Projekten LWF und TreeNet besteht eine enge Verbindung zu Swiss FluxNet¹³ der ETH Zürich, zum Swiss Crane Project¹⁴ der Universität Basel und zur kantonalen Walddauerbeob-

achtung des Instituts für angewandte Pflanzenbiologie in Witterswil¹⁵.

Ergänzend zu den erwähnten langfristigen und grossflächigen Monitoringprojekten eignen sich kurzfristige Experimente, um innert kurzer Zeit die Reaktionsfähigkeit einzelner Baumarten auf Klimaextreme zu untersuchen und spezifische Klimaszenarien zu testen:

- Speziell zu erwähnen ist hier die **Modell-Ökosystemanlage**¹⁶ (**MOD-OEK**) an der WSL in Birmensdorf, die 1992 in Betrieb genommen wurde. In 16 Glaskammern mit Schiebedach können der Wasser-, Temperatur- und Nährstoffhaushalt kontrolliert und Klimaszenarien getestet werden (HAGEDORN *et al.* 2016).
- Im Talboden von Leuk (Kanton Wallis) war 2008 bis 2014 eine Regendachanlage in Betrieb, die für Keimlingsexperimente unter kombinierten Behandlungen von Trockenheit, Wärme und erhöhten CO₂-Konzentrationen diente (MOSER *et al.* 2018).

⁸ www.slf.ch/stillberg

⁹ www.wsl.ch/nitrogen-dynamics-alptal

¹⁰ www.wsl.ch/pfynwald

¹¹ www.wsl.ch/de/projekte/das-loetschental.html

¹² sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2

¹³ www.swissfluxnet.ch

¹⁴ ppe.duw.unibas.ch/en/scii

¹⁵ www.iap.ch

¹⁶ www.wsl.ch/modoeck

Diese Monitoringprojekte und Experimente liefern Inputdaten für die Entwicklung und Validierung von Modellen, mit deren Hilfe sich das Prozessverständnis überprüfen und schärfen lässt. Ausserdem dienen sie zum Up- und Downscaling von Messresultaten und für das Entwickeln von Szenarien und Projektionen der zukünftigen Waldentwicklung. Besonders zu erwähnen sind hier die Artenverbreitungsmodelle (ZIMMERMANN *et al.* 2016), die beschreiben, wie sich die Verbreitungsgebiete von Baumarten in einem sich verändernden Klima entwickeln. Zudem werden die Daten für Modelle verwendet, um die Entwicklungsdynamik von Wäldern zu untersuchen (BUGMANN 1996). Diese Modelle beinhalten auch Prozesse wie die Wanderungsfähigkeit und -geschwindigkeit einzelner Arten (ROHNER *et al.* 2018) und können so die Veränderung der Artenzusammensetzung und der Bestandesstruktur unter verschiedenen Zukunftsszenarien projizieren. Diese Modellierungsansätze werden in diesem Beitrag nicht weiter vertieft und lediglich andiskutiert. Die Kombination von Monitoring und Modellierung wird in Kapitel 4 anhand eines mechanistischen Modelles dargestellt.

3 Langfristige Trends

Neben dem Wachstum sind Mortalitätsraten gut geeignet, um den Erfolg von Bäumen in einer sich verändernden Umwelt abzuschätzen. Im Rahmen des Forschungsprogrammes Wald und Klimawandel¹⁷ wurden die Mortalitätsraten von den sieben Hauptbaumarten Buche (*Fagus sylvatica*), Eiche (*Quercus robur*, *Q. petraea*), Fichte (*Picea abies*), Föhre (*Pinus sylvestris*, *P. mugo*) und Tanne (*Abies alba*) untersucht. Die Daten stammen von 85 Ertragskunde- flächen (EFM), 178 Kernflächen aus 28 Naturwaldreservaten (NWR) und 13 Flächen der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF) aus einem Zeitraum von mehr als 100 Jahren mit Inventurperioden von 3 bis 20 Jahren. Es wurden dabei Messungen von 247529 Bäumen verwendet. Die Untersu-

chungsflächen wurden pro Baumart in jeweils zwei sich standörtlich stark unterscheidende Untergruppen aufgeteilt wie Hoch- versus Tieflagen und feuchte versus trockene Standorte (ETZOLD *et al.* 2019). Die Resultate zeigen kein einheitliches Bild (Abb. 3): Bei ei-

nigen Baumarten, zum Beispiel Buche und Tanne, nahm die Mortalität bis in die 1960er-Jahre zu, danach jedoch tendenziell wieder ab. Hingegen zeigen die trockenen Waldföhrenwälder der tieferen Lagen des Mittellandes, am Jurasüdfuss und in den inneralpinen Tro-

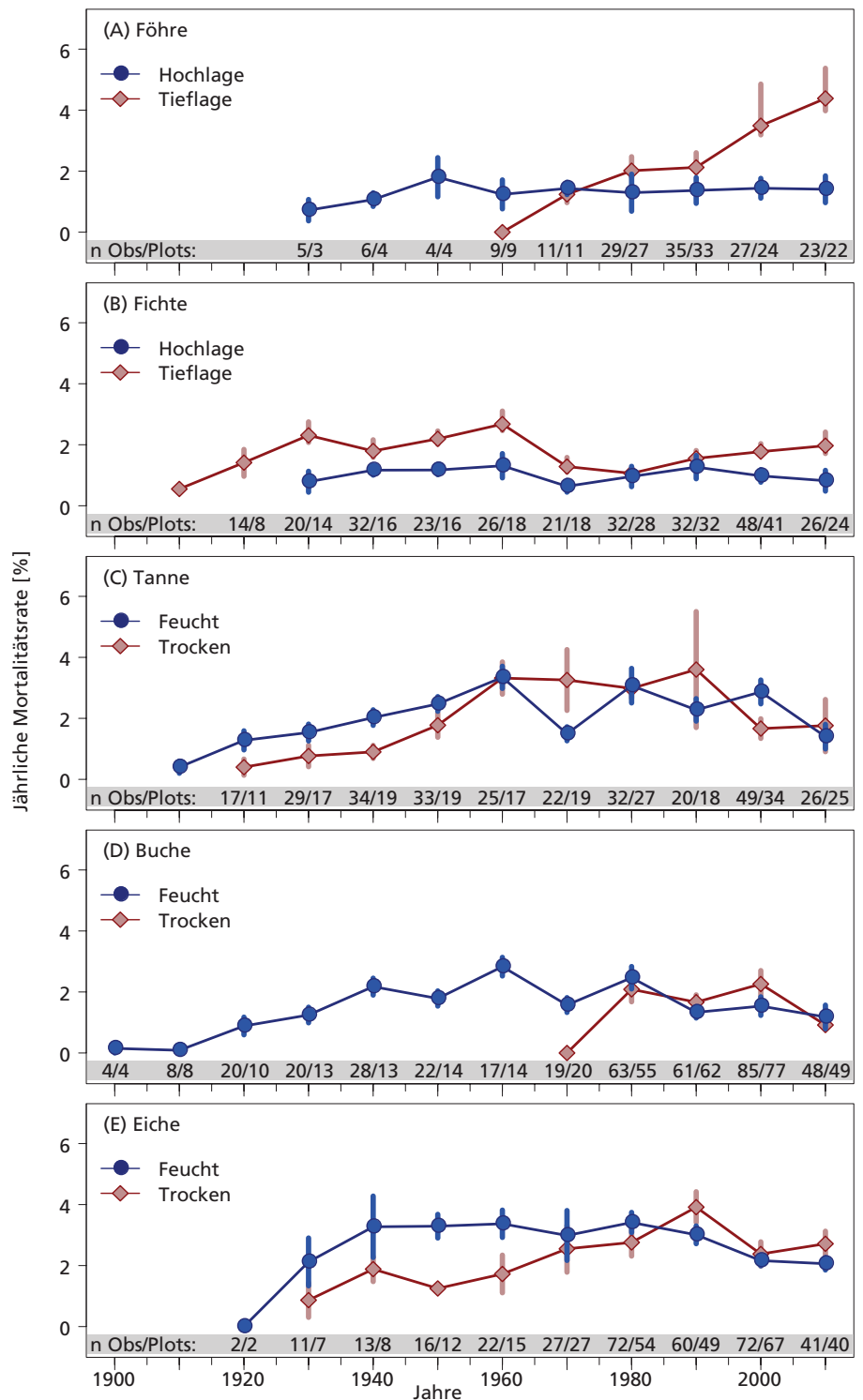


Abb. 3. Trends der Baummortalität aufgrund von langfristigen Monitoringdaten aus 85 Ertragskunde- flächen (EFM), 28 Naturwaldreservaten (NWR) und 13 Flächen der Langfristigen Waldökosystemforschung (LWF). Diese langen Zeitreihen geben Aufschluss über langfristige Entwicklungen, doch sind extreme Ereignisse (z.B. Trockenheit oder Frost) aufgrund der Messintervalle von 5–10 Jahren kaum erkennbar (ETZOLD *et al.* 2019, abgeändert).

¹⁷ www.wsl.ch/wald_klima

ckengebieten schon seit den 1960er- und verstärkt seit den 1990er-Jahren eine höhere Mortalität. Der Grund für diese spezifischen Muster ist der Umstand, dass Mortalität in der Regel nicht monokausal ist, sondern durch komplexe Interaktionen von verschiedenen Faktoren gesteuert wird. Diese Variabilität der Mortalität konnte mittels logistischer Regressionsmodelle teilweise erklärt werden, die verschiedene Faktoren wie Klimabedingungen, aber auch Topographie und Bestandsstruktur berücksichtigen. Die Modelle zeigten für Waldföhre, Fichte in Tieflagen und Tanne einen signifikanten Effekt von Trockenheit und Temperatur auf die Mortalität. Diese Daten sind also sehr gut geeignet, um langfristige Trends darzustellen und die Variabilität der Mortalität zu modellieren. Aufgrund der Messintervalle von 5 bis 10 Jahren sind sie jedoch ohne Zusatzerhebungen im Ereignisfall nur bedingt geeignet, um den kurzfristigen Einfluss von Extremereignissen wie Stürmen, Trocken- oder Hitzejahren abzubilden. Hierfür sind Daten mit zumindest jährlicher zeitlicher Auflösung notwendig.

In den Tieflagen des Wallis wird seit Jahrzehnten wiederholt über teilweise grossflächige Absterbewellen in Waldföhrenwäldern berichtet (z.B. RIGLING *et al.* 2018). Mit den jährlich erfassten Daten zum Nadelverlust und zur Mortalität auf der LWF-Monitoringfläche Visp kann die Mortalitätsdynamik in diesen Wäldern nachvollzogen werden (Abb. 4). Der Nadelverlust und die Mortalität der Waldföhren laufen seit 1996 weitgehend parallel. Es gab vier klare Maxima von Nadelverlust in den Jahren 1999, 2004, 2011 und 2017, die alle auf ein Jahr oder auf mehrere Jahre mit deutlich negativer Wasserbilanz folgten. Abgesehen von diesen Höchstwerten lag der durchschnittliche Nadelverlust der Bäume bei 20 bis 30 % und die Mortalität nahe null (RIGLING *et al.* 2018). Generell waren die vergangenen zwei Jahrzehnte in den Tieflagen des Oberwallis ausserordentlich trocken, mit negativen klimatischen Wasserbilanzen in Visp von Oktober bis August in 15 von insgesamt 24 Jahren. Die gute Übereinstimmung zwischen Nadelverlust und Mortalität bedeutet, dass jeweils im Zuge von Trockenjahren die Nadelmasse reduziert wird (SOLBERG 2004), auch um den

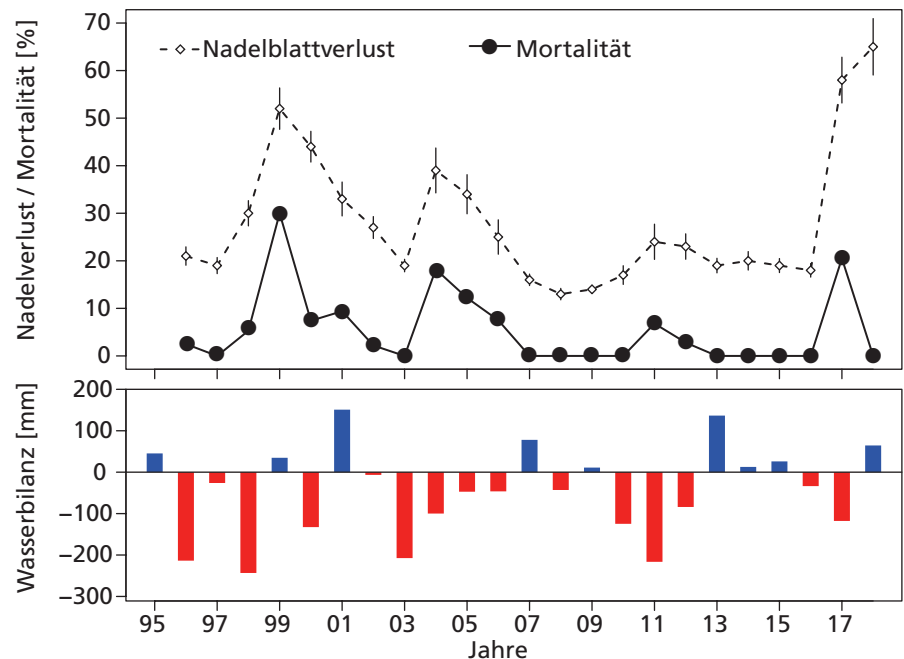


Abb. 4. Lange Datenreihen mit jährlichen Werten zu Nadelverlust, Mortalität und klimatischer Wasserbilanz (Oktober des Vorjahres bis August) auf der LWF-Monitoringfläche Visp machen die Effekte von Extremjahren sichtbar (RIGLING *et al.* 2018, abgeändert).

Wasserverbrauch zu senken. Die Anpassungen verlaufen aber langsamer als sich die Umwelteinflüsse verändern und wirken zum Beispiel bei Föhren über Jahre nach (ZWEIFEL und STERCK 2018; ZWEIFEL *et al.* in prep). Dadurch verringert sich die Widerstandskraft der Bäume gegenüber weiteren abiotischen sowie biotischen Stressfaktoren (ROUAULT *et al.* 2006). Dies hat zur Folge, dass stark geschwächte Individuen absterben. Immergrüne Nadelbäume benötigen mehrere Jahre, um die abgestossene Nadelmasse zu ersetzen und wieder die ursprüngliche Photosyntheseleistung zu erbringen. Deshalb reduzieren aufeinanderfolgende Trockenjahre die Regenerationsfähigkeit der Waldföhre und erhöhen ihr Absterberisiko (BIGLER *et al.* 2006). Die ausserordentlich hohen Mortalitätsraten nach den Trockenjahren 1996, 1998 sowie 2003 bis 2005 in Visp bestätigen diese Aussage.

Das Jahrringwachstum von Gehölzpflanzen wird durch sämtliche am Wuchsort wirkenden Umweltfaktoren beeinflusst. Frost, Trockenheit, Schädlinge, Krankheiten oder hohe Vegetationskonkurrenz bewirken die Bildung von schmalen Jahrringen, während günstige Umweltbedingungen das Wachstum stimulieren und breitere Jahrringe zur Folge haben (SCHWEIN-

GRUBER 1996). Die Messung der Jahrringabfolgen im Holz ermöglicht somit die Rekonstruktion vergangener Umweltzustände. Allerdings bilden sich Extremereignisse häufig mit einer gewissen Verzögerung im Wachstum ab und wirken über mehrere Jahre nach (ZWEIFEL und STERCK 2018). Der Vergleich des Jahrringwachstums der noch lebenden mit schon abgestorbenen Waldföhren in der Region Brig-Visp zeigte während Jahrzehnten einen äusserst synchronen Verlauf (Abb. 5). Erst nach dem Trockenjahr 1998 reduzierte sich das Wachstum der später abgestorbenen Bäume im Vergleich zu den noch lebenden. Die Schere öffnete sich dann weiter nach den Trockenjahren 2003 bis 2005 und der extremen Frühjahrstrockenheit 2011. Ab 2013 war das Wachstum der heute toten Bäume signifikant geringer als dasjenige der noch lebenden Bäume. Die extreme Trockenheit in der zweiten Jahreshälfte 2016 führte letztlich zur Absterbewelle im Oberwallis zwischen Sierre und Brig (RIGLING *et al.* 2018). Die retrospektive Analyse der jährlichen Wachstumsdaten erlaubt, den Einfluss von extremen Trockenjahren auf das Wachstum und letztlich das Überleben der Bäume darzustellen. Hierbei zeigt sich häufig, dass absterbende Bäume schon längere Zeit vor

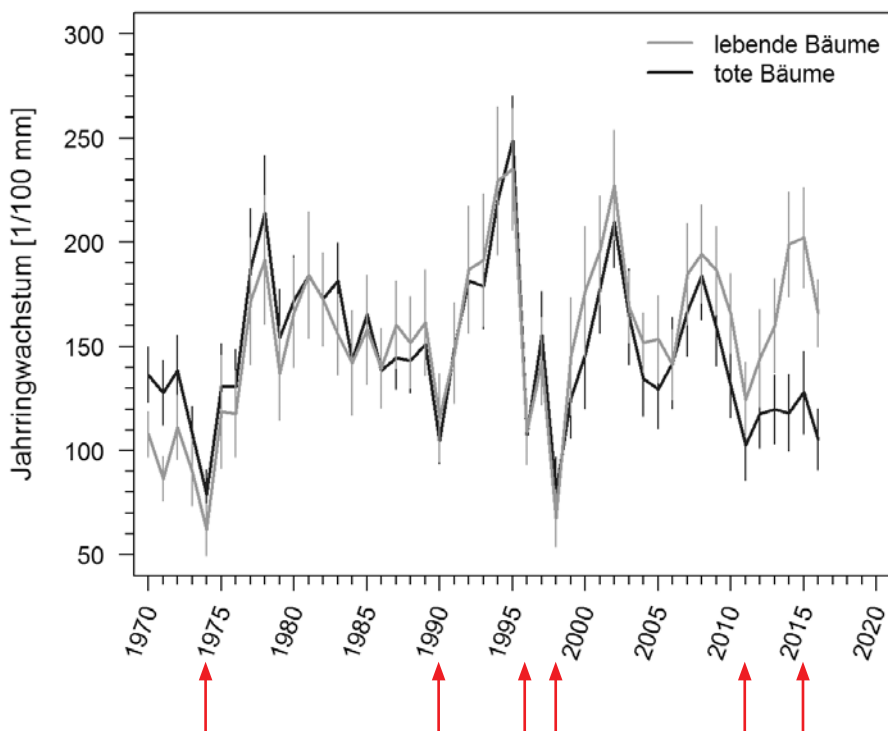


Abb. 5. Wachstumskurven von lebenden und im Jahr 2017 abgestorbenen Föhren im Wallis, wo in den Trockenjahren 2016 und 2017 wiederum grossflächig Waldföhrenmortalität festgestellt wurde. Oft sind extreme Trockenjahre (rote Pfeile), die schon Jahre zurückliegen, Auslöser für Baumsterben (RIGLING *et al.* 2018, abgeändert).

ihrem Tod ein geringeres Wachstum aufwiesen (Abb. 5). Allerdings sind auch Fälle bekannt, bei denen keine langfristigen Vitalitätsverluste vorlagen oder gar vorwiegend stark wüchsige Individuen abstarben (GESSLER *et al.* 2018).

Der Einfluss von Trockenheit auf die Baumsterblichkeit wird durch Interaktionen mit biotischen Faktoren verstärkt. So macht Mistelbefall (*Viscum album* ssp. *austriacum*) Waldföhren durch zusätzlichen Wasser- und Kohlenhydratentzug anfälliger gegenüber Trockenheit (DOBBERTIN und RIGLING 2006; ZWEIFEL *et al.* 2012). Die oft mit einer Trockenperiode einhergehenden hohen Temperaturen können die Entwicklung von Insekten beschleunigen (WERMELINGER und SEIFERT 1999; WERMELINGER *et al.* 2008). Ausserdem kann Trockenheit die Bäume für Pilzkrankheiten anfälliger machen (ROUAULT *et al.* 2006). Bei ausgewachsenen Waldbäumen sind diese sekundären Trockenheitseffekte wahrscheinlich oft bedeutender als ein primäres akutes «Verdursten». Ein bekanntes Beispiel hierfür ist der Zusammenhang zwischen Borkenkäferbefall, Winterstürmen und extremer Trockenheit bei

der Fichte (QUELOZ *et al.* 2018; JAKOBY *et al.* 2016). Die seit 1984 jährlich aufgezeichneten Schäden durch den Buchdrucker (*Ips typographus*) illustrieren diese Dynamik eindrücklich (Abb. 6): Die Winterstürme Vivian (1990), Lothar (1999) und Burglind (2018) sowie die heissen und trockenen Sommer 2003, 2015 und 2018 führten jeweils unmittelbar zu erhöhter Mortalität durch

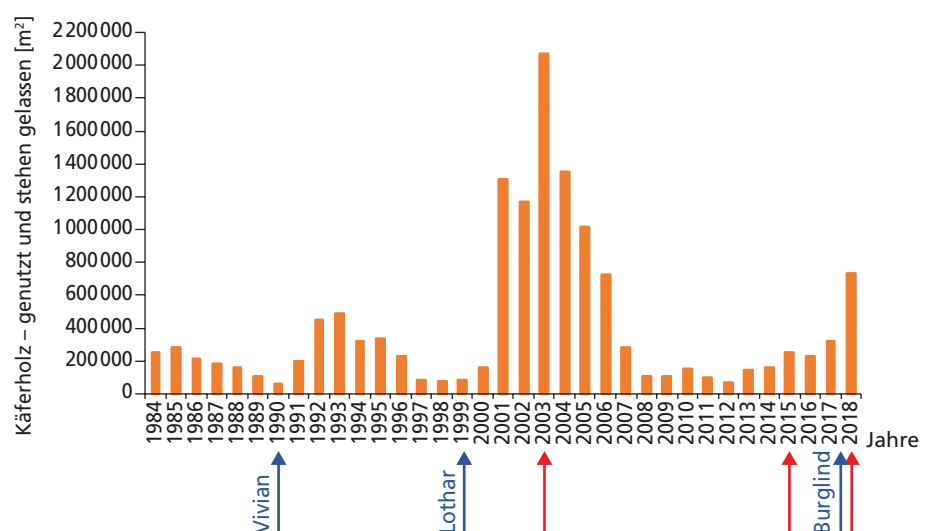


Abb. 6. Lange Datenreihen mit jährlicher Auflösung erlauben, den Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Buchdruckerschäden (1984–2018) und Winterstürmen (blaue Pfeile) sowie Hitze- und Trockenjahren (rote Pfeile) aufzuzeigen (Daten Waldschutz Schweiz).

den Buchdrucker. Maximale Mortalität wird jeweils beobachtet, wenn bald nach einem Sturm ein Hitze- und Trockenjahr auftritt: 1) Die durch den Sturm geworfenen Bäume sind ideales Brutmaterial für den Borkenkäfer. 2) Die Trockenheit schwächt die noch stehenden Fichten, und 3) die Hitze führt zu einer optimalen Entwicklung und somit zu einer starken Vermehrung der Borkenkäferpopulationen. Dieser verstärkte Effekt eines gestaffelten Auftretens von zwei Extremereignissen ist nach dem Wintersturm Lothar (1999), gefolgt vom Hitzesommer 2003, sowie nun wiederum 2018 nach dem Wintersturm Burglind und dem Hitzesommer zu beobachten.

4 Räumlich-zeitliche Muster

Für die langfristige Ausrichtung der Schweizer Waldbewirtschaftung ist es zentral, die Produktivität von Waldökosystemen unter dem Einfluss von zunehmend extremen Klimabedingungen vorhersagen zu können. TROTSIUK *et al.* (in prep.) führten Langzeitmessreihen von LFI, EFM und LWF zusammen und berechneten die Produktivität von Waldökosystemen in der Schweiz unter dem Einfluss von Klimaschwankungen, von den Tieflagen bis an die Waldgrenze. Mithilfe von Datenassimilation kombinierten sie Messungen und Beobachtungen mit den Ergebnissen des dynamischen und prozessba-

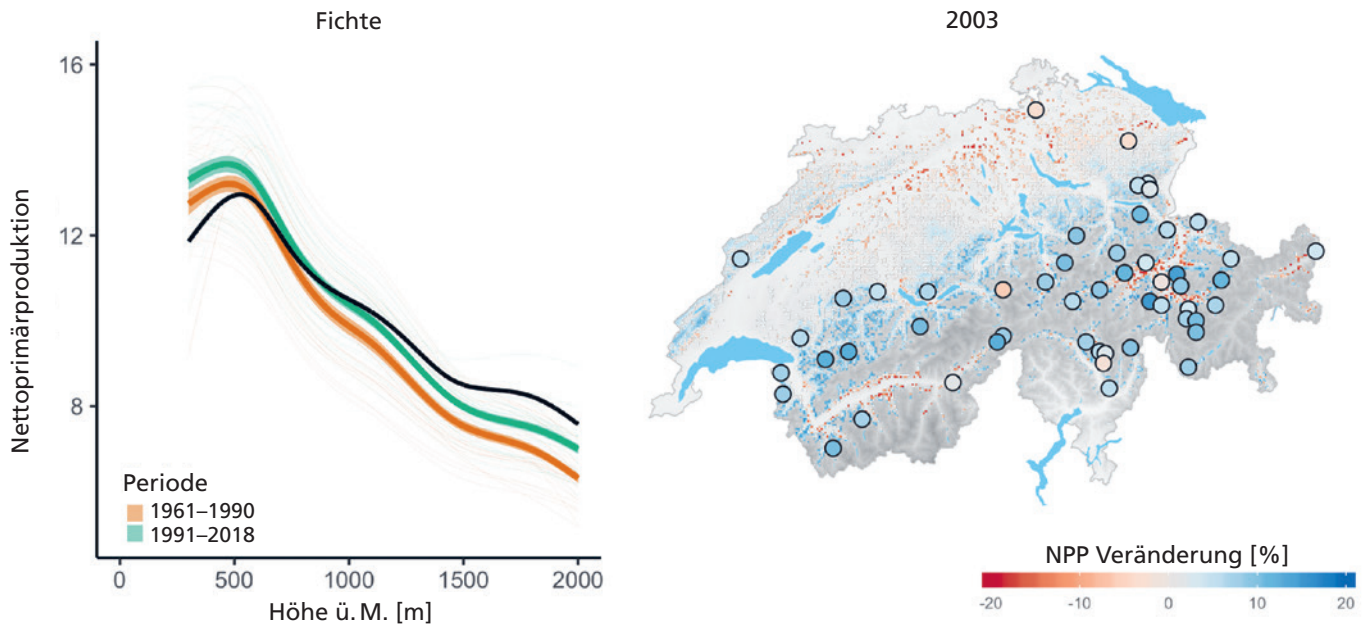


Abb. 7. Durchschnittliche Nettoprimärproduktivität (NPP) entlang eines Höhengradienten. NPP wurde mit dem 3PG-Modell innerhalb der potenziellen Verbreitung der Fichte (*Picea abies*) simuliert. Die grauen Linien zeigen NPP in den jeweiligen Jahren zwischen 1961 und 2018. Die schwarze Linie zeigt die relative Abweichung von NPP im Jahr 2003 im Vergleich zu 1961–2018. Diese ist räumlich extrapoliert für die ganze Schweiz in der Karte rechts dargestellt.

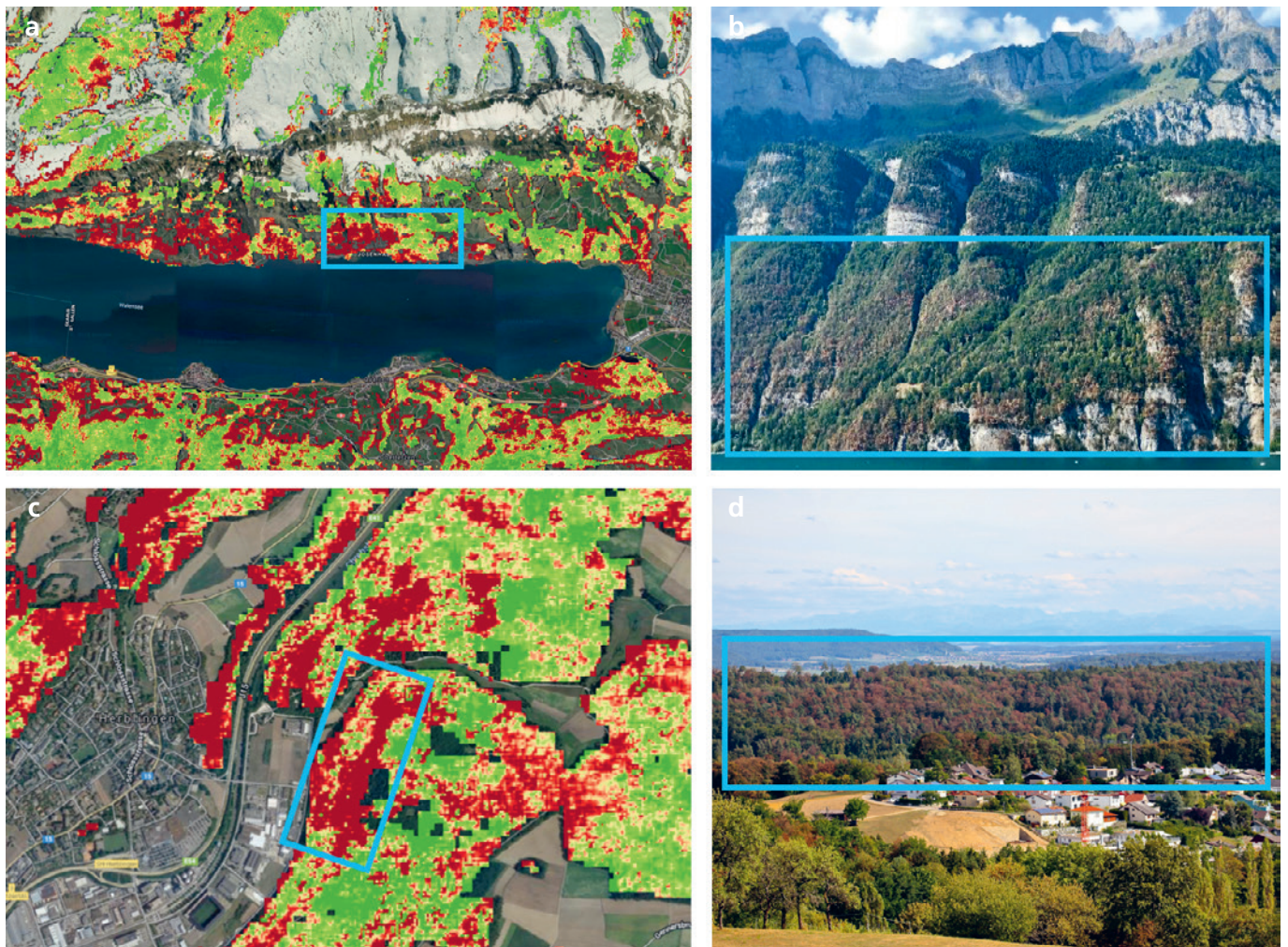


Abb. 8. Räumlich hoch aufgelöste, schweizweite Erfassung und Analyse von Trockenstress für das Jahr 2018 aufgrund von Sentinel-Satellitendaten. Dargestellt sind zwei Beispielregionen: Walensee SG (a, b) und Herblingen SH (c, d). Gebiete mit Trockenstress sind in Rot, solche mit wenig Trockenstress in Grün dargestellt (a, c). Die Fotos (b, d) zeigen die tatsächliche Braunfärbung Anfang August 2018 der entsprechenden Bestände (in Blau markiert). (Fotos: A. Rigling, WSL).

sierten Wachstumsmodells 3-PG (AUGUSTYNICZIK *et al.* 2017), um so Zustand und Wachstumsdynamik der Waldökosysteme und der damit verbundenen Unsicherheiten der Modellierung abzuschätzen. Erste Modellrechnungen für die Fichte (*Picea abies*) weichen für alle untersuchten Bestände mit weniger als 4 % von den absoluten Wachstumswerten ab (Abb. 7). Die jährliche mittlere Nettoprimärproduktivität (NPP) nimmt mit zunehmender Höhe ab. Hingegen profitiert die Fichte zunehmend von den wärmeren Temperaturen an den höher gelegenen Standorten. Gleichzeitig wird das Wachstum aber durch die Abnahme des verfügbaren Bodenwassers in den tieferen Höhenlagen eingeschränkt. Diese Ergebnisse stehen im Einklang mit globalen Trends zu Interaktionen zwischen limitierenden Faktoren, welche zeigen, dass selbst in borealen Gebieten die Wälder zunehmend sensitiv auf Trockenheit reagieren (z.B. BABST *et al.* 2019).

Räumlich und zeitlich hoch aufgelöste Daten der Erdbeobachtung mit Satelliten erlauben es, Zustände und Veränderungen über grosse Flächen zu quantifizieren. Mit den Satellitendaten Sentinel-2a des Copernicus-Programms stehen schweizweit alle 3 bis 5 Tage Bilder mit Auflösungen von 10 m bis 20 m frei zur Verfügung. Die Sensoren nehmen neben den sichtbaren Farbbändern auch die speziell für Vegetationsanalysen relevanten Bänder im nicht sichtbaren Infrarotbereich auf. Die hohe zeitliche Auflösung der Daten erlaubt es, die Entwicklung von verschiedenen Eigenschaften der Vegetation im Jahresverlauf zu verfolgen. In einer ersten Pilotstudie wurden für den sehr trocken-heissen August 2018 die durchschnittlichen Werte des Normalised Difference Water Index (NDWI) mit einer räumlichen Auflösung von 20 mal 20 m für die Schweiz berechnet. Der NDWI erlaubt Rückschlüsse auf den Wassergehalt der Vegetation. Die Daten wurden mit den Werten von 2016/17 verglichen und es wurden Anomalien ausgewiesen (Abb. 8). Erste qualitative Plausibilisierungen waren positiv und die WSL führt aktuell quantitative Analysen zum Ausmass der Trockenheit 2018 für die ganze Schweiz im Rahmen der Initiative «Trockenheit 2018» durch.

5 Mechanismen der Baum-mortalität

Eine starke Verringerung der Bodenwasserverfügbarkeit während Dürreperioden führt zu einem Schliessen der Spaltöffnungen in Blättern und Nadeln, ähnlich wie bei einem hohen Wasserdampfsättigungsdefizit der Luft in trockenen Hitzeperioden. Dies wirkt einem zu starken Wasserverlust entgegen (ZWEIFEL *et al.* 2012). Bei extremen Dürreereignissen kann der Wasserverlust der Blätter an die Atmosphäre allerdings trotz dieses Regulationsmechanismus so gross werden, dass er sich nicht mehr durch eine Aufnahme des Wassers aus dem Boden ausgleichen lässt. Dies kann Embolien in den wasserleitenden Gefässen des Xylems verursachen (ZWEIFEL *et al.* 2007) und die Wasserversorgung der Blätter nachhaltig einschränken, was zum Verdorren und Absterben der Krone und des gesamten Baumes führen kann. Bei weniger starken Dürreereignissen kann das Schliessen der Spaltöffnungen solche Embolien verhindern, führt aber dazu, dass auch weniger CO₂ in die Blätter gelangt. Die Reduzierung des Wasserverlustes verursacht somit unweigerlich auch eine geringere Photosyntheseleistung, und lange Dürreperioden können einen verringerten Vorrat an Kohlenhydraten bewirken (VON ARX *et al.* 2017). Somit stehen den Bäumen möglicherweise weniger Zucker

und damit auch weniger Energie für grundlegende und lebensnotwendige Stoffwechselprozesse, aber auch für die Verteidigung gegen Schadinsekten und Pilze zur Verfügung.

Um diese Prozesse besser zu verstehen und sie in vorhersagefähige Modelle zu implementieren, werden Experimente durchgeführt. In der Modell-Ökosystemanlage (MODOEK) (Abb. 9) an der WSL werden Klimaszenarien getestet und die Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit, Stoffwechselprozesse, Baumwachstum und Mortalität untersucht. Die Anlage besteht aus 16 Glaskammern mit Schiebedach. Jede Kammer enthält zwei halbrunde Boden-Lysimeter-Abteile. Ein automatisches Kontrollsystem schliesst die Dächer der Kammern, um Regen auszuschliessen, und erlaubt so, die Bewässerung und Lufttemperatur gezielt zu steuern. Die Bodentemperatur und -feuchtigkeit wird in verschiedenen Bodentiefen gemessen.

Versuche mit Buchen (*Fagus sylvatica*) zeigten, dass während einer über mehr als zwei Monate andauernden Sommertrockenheit die Fotosyntheserate um bis zu 87 % verringert wird (AREND *et al.* 2016), und trotzdem können die Pflanzen ihre Kohlenhydratvorräte auf einem vergleichbaren Niveau wie die Kontrollbäume halten (PFLUG *et al.* 2018). Kurzfristig wird also das Wachstum reduziert, um ausreichende Kohlenstoffvorräte auf-



Abb. 9. Modell-Ökosystemanlage an der WSL, Birmensdorf (Foto: R. Boesch, WSL).

rechtzuerhalten und so lebenswichtige Funktionen zu gewährleisten. Im langfristigen Niederschlagsmanipulationsexperiment im Pfynwald konnten diese Befunde an Waldföhren (*Pinus sylvestris*) bestätigt werden (SCHÖNBECK *et al.* 2018). Die langfristige Strategie der Bäume zielt also ebenfalls darauf ab, genügend Reserven für essenzielle Stoffwechselprozesse zu erhalten. Trockengestresste Föhren reduzieren allerdings, wie oben erwähnt ihre Nadelmenge, und wenn der Nadelverlust gewisse Schwellenwerte überschreitet (SCHÖNBECK *et al.* 2018; BACHOFEN *et al.* 2019), nehmen die Kohlenhydratvorräte ab. Dies weist auf unzureichende fotosynthetische CO₂-Fixierung hin und diese Bäume sterben dann meist innerhalb einiger Jahre ab (TIMOFEEVA *et al.* 2017).

Die Reaktion von Waldbäumen auf Trocken- und Hitzeereignisse ist also ein subtiles, artspezifisches Balance-Spiel zwischen Wasser- und Kohlenstoffhaushalt und zeigt auch in einem extremen Sommer wie 2018 ein heterogenes Bild (Abb. 10). Während die einen Buchen an gewissen Standorten nur einen Bruchteil des durchschnitt-

lichen langjährigen Wachstums aufwiesen, zeigten andere fast normales Wachstum. Hingegen verzeichneten alle im TreeNet-Messnetz untersuchten Fichten im Mittelland sehr starke Wachstumseinbussen. Je grösser das Baumwasserdefizit wird, desto kürzer werden die Perioden, in denen Bäume noch wachsen können (Abb. 10).

Die TreeNet-Daten über die ersten fünf Messjahre attestieren der Buche eine ausgesprochene Wärmetoleranz, solange die Bodenwasserverfügbarkeit gut ist. Den Fichten hingegen reicht eine gute Bodenwasserverfügbarkeit nicht aus, um Hitzeperioden zu überbrücken, und ihr Absterberisiko nimmt daher deutlich zu (ETZOLD *et al.* 2018). Eine grosse Bedeutung kommt dabei auch dem Zeitpunkt einer auftretenden Hitze- oder Trockenperiode zu. Während die Hitzewelle 2015 relativ spät in der Wachstumsperiode auftrat und zudem auf einen ausgesprochen feuchten Frühling folgte, setzte die Hitze und Trockenheit 2018 an zahlreichen Standorten bereits früh ein, mit entsprechend starken Einschränkungen der physiologischen Prozesse und des Wachstums. Das Stammwachs-

tum von Baumarten in der Schweiz ist aber generell nur etwa zu einem Drittel durch aktuelle Witterungsbedingungen zu erklären (ETZOLD *et al.* 2018; OGLE *et al.* 2015; ZWEIFEL und STERCK 2018), denn es ist stark von den Bedingungen der Vorjahre geprägt. Wenn wir also die Wirkung von Trockenjahren auf unsere Wälder verstehen wollen, dann müssen wir auch Daten der Vorjahre in unsere Auswertungen miteinbeziehen.

6 Fazit

Wir sind in der Schweiz in der vorteilhaften Lage, dass wir über ein starkes Umweltmonitoring mit zunehmend verbesserter Datengrundlage verfügen. Dank neuester Messansätze und verbesserter Sensortechnologie können wir mittlerweile die in den letzten Jahrzehnten verstärkt aufgetretenen Klimaextreme erfassen und die Reaktion der Wälder darauf messen. Die Kombination des langfristigen Monitorings mit kurzfristigen Datenerhebungen und Experimenten, verknüpft mit Modellierungsansätzen, erlaubt die Resis-



Abb. 10. Radiales Stammwachstum und Baumwasserdefizit von zwei Buchen und einer Fichte aus Muri AG (Fläche IAP) und dem Sihlwald ZH (Fläche WSL). Exemplarische Resultate aus dem Projekt TreeNet (ETZOLD *et al.* 2018) aus dem Hitzesommer 2018.

tenz und Resilienz unserer Wälder gegenüber dem aktuellen und prognostizierten Klimawandel abzuschätzen.

Wir stellen fest, dass die Sensitivitäten je nach Waldökosystem sehr unterschiedlich sind. In den trockenen Waldföhrenwäldern im Wallis sehen wir, dass aufeinanderfolgende Trockenjahre Hauptauslöser für starke Veränderungen in der Walddynamik sind – die Waldföhre, obwohl grundsätzlich gut an Trockenheit angepasst, stösst in diesen Extremjahren auf Trockenstandorten an ihre Grenzen. Trockenheit, in Kombination mit Stürmen, ist auch der Hauptgrund für die massiven Borkenkäferepidemien, welche die grösstenteils standortsfremden Fichtenwälder der Tieflagen in den vergangenen Jahren stark dezimiert haben. Diese massiven Schäden haben europaweit die Diskussion über die Zukunft der Fichte, des Brotbaums der zentraleuropäischen Forstwirtschaft, lanciert. Wie werden sich die höher gelegenen Fichtenwälder verändern, wenn mit fortschreitendem Klimawandel auch diese bis anhin weniger stark durch Trockenstress, Schädlinge und Krankheiten heimgesuchten Ökosysteme betroffen sind? Und wie werden sich die ausgedehnten Buchenmischwälder im Mittelland nach dem extremen Hitze- und Trockenjahr 2018 entwickeln? Auch wenn wir mittlerweile die Prozesse viel besser verstehen und wir aus den Klimaextremen der letzten Jahre gelernt haben, so bestehen nach wie vor, unter anderem auch mangels Erfahrung in den Buchenwäldern, grosse Unsicherheiten bei der Abschätzung deren zukünftigen Entwicklung. Aufgrund der Erfahrungen der letzten Jahre müssen wir davon ausgehen, dass die Kombination und das kaskadenartige Auftreten von Trockenheit, Stürmen, Krankheiten und Schädlingen innert kurzer Zeit ganze Landschaften massiv verändern können, womit auch das Paradigma der stabilen Buchenmischwälder in Frage gestellt wird. Die Zukunft grosser Laubwaldgebiete im Mittelland wird also davon abhängen, wie sich die Witterung in den kommenden Jahren entwickeln und wann nach 2018 das nächste Extremjahr auftreten wird. Ein Trockenjahr, wie beispielsweise 1947

oder 1976, kann weggesteckt werden (ZINGG und BÜRG 2008), mehrere aufeinanderfolgende Hitze- und Trockenjahre dürften aber zu massiven Veränderungen der Wachstumsdynamik und letztlich der Baumartenzusammensetzung führen (RIGLING *et al.* 2012).

Im Nachgang zum Trocken- und Hitzejahr 2018 unterstützte die WSL 13 ad-hoc-Projekte¹⁸, um kurzfristig die Effekte dieses Witterungsextremes auf die Umwelt zu analysieren. Aufgrund der Häufung von klimatischen Extremereignissen in den letzten Jahren und ihrer teilweise dramatischen Konsequenzen nicht nur für Wälder, sondern für die Umwelt generell, plant die WSL die Forschung zu Wetterextremen und extremen Lebensräumen in einer neuen strategischen Initiative zu vertiefen.

Dank

Viele der erwähnten Studien konnten nur dank der grossen Unterstützung einer Vielzahl von verschiedenen Geldgebern, Waldbesitzern und Forstdienstlichen über all die Jahre durchgeführt werden. Diese enge Zusammenarbeit zwischen Forschung und Praxis ist die Grundlage für erfolgreiche, langfristige Messkampagnen.

Ein spezieller Dank geht ans Bundesamt für Umwelt (BAFU), als wichtigen Partner für eine Vielzahl von kurz- und langfristigen Projekten und Monitoringprogrammen wie LFI, LWF, Sanasilva, Waldreservate, TreeNet und das Forschungsprogramm Wald und Klimawandel.

Ein weiterer grosser Dank geht an die Generationen von Feldteams und technischen Fachspezialisten, denn sie sind die Basis eines erfolgreichen, qualitativ hochstehenden und somit verlässlichen Umweltmonitorings.

7 Literatur

ALLEN, C.D.; MACALADY, A.; CHENCHOUNI, H.; BACHELET, D.; McDOWELL, N.; VENNETIER, M.; GONZALES, P.; HOGG, T.; RIGLING, A.; BRESHEARS, D.D.; FENSHAM, R.; ZHANG, Z.; KITZBERGER, T.; LIM, J.-H.; CASTRO, J.; ALLARD, G.; RUNNING, S.W.; SEMERCI, A.; COBB, N., 2010: Drought-Indu-

ced Forest Mortality: A Global Overview Reveals Emerging Climate Change Risks. *For. Ecol. Manage.* 259: 660–684

ALLEN, C.D.; BRESHEARS, D.D.; McDOWELL, N.G., 2015: On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* 6: 129.

AREND, M.; GESSLER, A.; SCHAUB, M., 2016: The influence of the soil on spring and autumn phenology in European beech. *Tree Physiol.* 36, 1: 78–85.

AUGUSTYNICZIK, A.L.; HARTIG, D.F.; MINUNNO, F.; KAHLE, H.-P.; DIACONU, D.; HANNEWINKEL, M.; YOUSEFPOUR, R., 2017: Productivity of *Fagus sylvatica* under climate change – A Bayesian analysis of risk and uncertainty using the model 3-PG. *For. Ecol. Manage.* 401: 192–206.

BABST, F.; BOURIAUD, O.; POULTER, B.; TROUET, V.; GIRARDIN, M.P.; FRANK, D.C., 2019: Twentieth century redistribution in climatic drivers of global tree growth. *Sci. Adv.* 5, 1: eaat4313.

BACHOFEN, C.; WOHLGEMUTH, T.; MOSER, B., 2019: Biomass partitioning in a future dry and CO₂ enriched climate: shading aggravates drought effects in Scots pine but not European black pine seedlings. *J. Appl. Ecol.* 56: 866–879.

BAFU (Hrsg.), 2017: Impulse für eine klimaangepasste Schweiz. Erkenntnisse aus 31 Pilotprojekten zur Anpassung an den Klimawandel. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 1703: 96 S.

BIGLER, C.; BRAEKER, O.U.; BUGMANN, H.; DOBBERTIN, M.; RIGLING, A., 2006: Drought as inciting mortality factor in Scots pine stands of the Valais, Switzerland. *Ecosystems* 9: 330–343.

BUGMANN, H.K.M., 1996: A simplified forest model to study species composition along climate gradients. *Ecology* 77: 2055–2074.

CH2018, 2018: CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report, National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp.

DAWES, M.A.; HÄTTENSCHWILER, S.; BEBI, P.; HAGEDORN, F.; HANDA, T.I.; KÖRNER, C.; RIXEN, C., 2011: Species-specific tree growth responses to 9 years of CO₂ enrichment at the alpine treeline. *J. Ecol.* 99: 383–394.

DIETRICH, L.; ZWEIFEL, R.; KAHMEN, A., 2018: Daily stem diameter variations can predict the canopy water status of mature temperate trees. *Tree Physiol.* 38.7: 941–952.

DOBBERTIN, M.; HUG, C.; SCHWYZER, A., 2001: Aufnahmeanleitung für die Sana-

¹⁷ www.wsl.ch/wald_klima

- silva-Inventur und Kronenansprachen auf den LWF-Flächen. Birmensdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research WSL.
- DOBBERTIN, M.; RIGLING, A., 2006: Mistletoe (*Viscum album* ssp. *austriacum*) contributes to the *Pinus sylvestris* L. decline in the Rhone Valley of Switzerland. *For. Pathol.* 36: 309–322.
- DOBBERTIN, M.; EILMANN, B.; BLEULER, P.; GIUGGIOLA, A.; GRAF PANNATIER, E.; LANDOLT, W.; SCHLEPPI, P.; RIGLING, A., 2010: Effect of irrigation on needle, shoot and stem growth in natural drought exposed *Pinus sylvestris* forests, *Tree Physiol.* 30: 346–360.
- ETZOLD, S.; ZWEIFEL, R.; HAENI, M.; BURRI, S.; BRAUN, S.; WALTHERT, L.; DAWES, M.; BUCHMANN, N.; HAELER, E.; KÖCHLI, R.; SCHAUB, M.; EUGSTER, W., 2018: Tree-Net. Daten und Analysen der ersten fünf Messjahre. *WSL Ber.* 72. 70 S.
- ETZOLD, S.; ZIEMIŃSKA, K.; ROHNER, B.; BOTTERO, A.; BOSE, A.K.; RUEHR, N.K.; ZINGG, A.; RIGLING, A., 2019: One century of forest monitoring data in Switzerland reveals species- and site-specific trends of climate-induced tree mortality. *Front. Plant Sci.* 10: 307 pp.
- GALIANO, L.; MARTINEZ-VILALTA, J.; LLORET, F., 2010: Drought-induced multifactor decline of Scots pine in the Pyrenees and potential vegetation change by the expansion of co-occurring oak species. *Ecosystems* 13: 978–991.
- GARDINER, B.A.; BLENNOW, K.; CARNUS, J.-M.; FLEISCHER, P.; INGEMARSON, F.; LANDMANN, G.; LINDNER, M.; MARZANO, M.; NICOLL, B.; ORAZIO, C.; PEYRON, J.-L.; REVIRON, M.-P.; SCHELHAAS, M.-J.; SCHUCK, A.; SPIELMANN, M.; USBECK, T., 2010: Destructive storms in European forests: past and forthcoming impacts. Final report to DG Environment. 132 p.
- GESSLER, A.; CAILLERET, M.; JOSEPH, J.; SCHÖNBECK, L.; SCHAUB, M.; LEHMANN, M.; TREYDTE, K.; RIGLING, A.; TIMOFEEVA, G.; SAURER, M., 2018: Drought induced tree mortality – a tree-ring isotope based conceptual model to assess mechanisms and predispositions. *New Phytol.* 2019: 485–490.
- HAGEDORN, F.; JOSEPH, J.; PETER, M.; LUSTER, J.; PRITSCH, K.; GEPPERT, U.; KERNER, R.; MOLINIER, V.; EGLI, S.; SCHAUB, M.; LIU, J.-F.; LI, M.; SEVER, K.; WEILER, M.; SIEGWOLF, R.T.W.; GESSLER, A.; AREND, M., 2016: Recovery of trees from drought depends on belowground sink control. *Nat. Plants*, 2: 16111.
- JAKOBY, O.; STADELMANN, G.; LISCHKE, H.; WERMELINGER, B., 2016: Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In: PLUESS, A.R.; AUGUSTIN, S.; BRANG, P. (Red.) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien.* Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL; Bern, Stuttgart, Wien, Haupt. 247–265.
- KING, G.; FONTI, P.; NIEVERGELT, D.; BÜNTGEN, U.; FRANK, D., 2013: Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6°C natural warming gradient. *Agric. For. Meteorol.* 168: 36–46.
- MeteoSchweiz, 2019: Klimabulletin Jahr 2018. Zürich.
- MOSER, B.; BACHOFEN, C.; WOHLGEMUTH, T., 2018: Föhrenverjüngung: Plastizität und Akklimation in einem trockeneren Klima. *Schweiz. Z. Forstwes.* 169, 5: 269–278.
- OGLE, K.; BARBER, J.J.; BARRON-GAFFORD, G.A.; BENTLEY, L.P.; YOUNG, J.M.; HUMMAN, T.E.; LOIK, M.E.; TISSUE, D.T., 2015: Quantifying ecological memory in plant and ecosystem processes. *Ecol. Lett.* 18: 221–235.
- PFLUG, E.; BUCHMANN, N.; SIEGWOLF, R.T.W.; SCHAUB, M.; RIGLING, A.; AREND, M., 2018: Resilient leaf physiological response of European beech (*Fagus sylvatica* L.) to summer drought and drought release. *Front. Plant Sci.* 187: 11 pp.
- QUELOZ, V. (Ed.); DUBACH, V. (Ed.); BEENKEN, L.; BUSER, C.; FORSTER, B.; HÖLLING, D.; MEIER, F.; MEYER, J.B.; ODERMATT, O.; QUELOZ, V.; RUFFNER, B.; SCHNEIDER, S.; STROHEKER, S., 2018: *Waldschutzüberblick 2017*. WSL Ber. 67. 35 S.
- RIGLING, A.; ELKIN, C.; DOBBERTIN, M.; GIUGGIOLA, A.; WOHLGEMUTH, T.; BUGMANN, H., 2012: Waldentwicklung in zentral-alpinen Trockentälern unter fortschreitendem Klimawandel – die Fallstudie Region Visp. *Schweiz. Z. Forstwes.* 163: 481–492.
- RIGLING, A.; MOSER, B.; FEICHTINGER, L.; GÄRTNER, H.; GIUGGIOLA, A.; HUG, C.; WOHLGEMUTH, T., 2018: 20 Jahre Waldföhrensterben im Wallis – Rückblick und aktuelle Resultate. *Schweiz. Z. Forstwes.* 169: 242–250.
- ROHNER, B.; WALDNER, P.; LISCHKE, H.; FERRETTI, M.; THURIG, E., 2018: Predicting individual-tree growth of central European tree species as a function of site, stand, management, nutrient, and climate effects. *Eur. J. For. Res.* 137: 29–44.
- ROUAULT, G.; CANDAU, J.-N.; LIEUTIER, F.; NAGELEISEN, L.-M.; MARTIN, J.-C.; WARZÉE, N., 2006: Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Ann. For. Sci.* 63: 613–624.
- SCHLEPPI, P.; CURTAZ, F.; KRAUSE, K., 2017: Nitrate leaching from a sub-alpine coniferous forest subjected to experimentally increased N deposition for 20 years, and effects of tree girdling and felling. *Biogeochemistry* 134: 319–335.
- SCHÖNBECK, L.; GESSLER, A.; HOCH, G.; MCDOWELL, N.; RIGLING, A.; SCHAUB, M.; LI, M.-H., 2018: Homeostatic maintenance of non-structural carbohydrates after 13 years of drought and irrigation in *Pinus sylvestris* L. *New Phytol.* doi: 10.1111/nph.15224.
- SCHWEINGRUBER, F., 1996: *Tree Rings and Environment Dendroecology.* Bern, Stuttgart, Wien, Haupt. 609 S.
- SOLBERG, S., 2004: Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *For. Pathol.* 34: 93–104.
- TIMOFEEVA, G.; SIEGWOLF, R.; TREYDTE, K.; RIGLING, A.; SCHAUB, M.; BUGMANN, H.; SAURER, M., 2017: Long-term effects of drought on tree-ring growth and carbon isotope variability of Scots pine in an inner-Alpine valley in Switzerland. *Tree Physiol.* 37: 1028–1041.
- TROTSIUK, V.; SCHAUB, M.; FERRETTI, M.; EUGSTER, W. (in prep.): Data assimilation in forest ecosystems using forest inventories and processes growth model.
- VON ARX, G.; ARZAC, A.; FONTI, P.; FRANK, D.; ZWEIFEL, R.; RIGLING, A.; GALIANO, L.; GESSLER, A.; OLANO, J.M., 2017: Dynamics of sapwood ray parenchyma and non-structural carbohydrates (NSC) of *Pinus sylvestris* in response to drought and long-term irrigation. *Funct. Ecol.* 31, 7: 1371–1382.
- WERMELINGER, B.; SEIFERT, M., 1999: Temperature-dependent reproduction of the spruce bark beetle *Ips typographus*, and analysis of the potential population growth. *Ecol. Entomol.* 24: 103–110.
- WERMELINGER, B.; RIGLING, A.; SCHNEIDER-MATHIS, D.; DOBBERTIN, M., 2008: Infestation preferences of bark and wood boring insects in declining Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests in the Swiss Rhone valley. *Ecol. Entomol.* 33: 239–249.
- WILLIAMS, A.P.; ALLEN, C.D.; MACALADY, A.K.; GRIFFIN, D.; WOODHOUSE, C.A.; MEKO, D.M.; SWETMAN, T.W.; RAUSCHER, S.A.; SEAGER, R.; GRISSINO-MAYER, H.D.; DEAN, J.S.; COOK, E.R.; GANGODAGAMAGE, C.; CAI, M.; MCDOWELL, N.G., 2013: Tem-

- perature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang.* 3: 8–13.
- WOHLGEMUTH, T.; FORSTER, B.; GINZLER, C.; QUELOZ, V.; VITASSE, Y.; RIGLING, A., 2018: Sommertrockenheit – zunehmend eine Herausforderung für den Wald. *Wald Holz* 9: 18–19.
- ZIMMERMANN, N.E.; SCHMARTZ, D.R.; GALLIEN, L.; KÖRNER, C.; HUBER, B.; FREHNER, M.; KÜCHLER, M.; PSOMAS, A., 2016: Baumartenvverbreitung und Standorteignung. In: PLÜSS, A.; AUGUSTIN, S.; BRANG, P. (Red.) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bern, Bundesamt für Umwelt BAFU; Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL; Bern Stuttgart, Wien, Haupt. 199–221.
- ZINGG, A.; BÜRGI, A., 2008: Trockenperioden seit 1900 und Waldwachstum: eine Analyse langfristiger Datenreihen. *Schweiz. Z. Forstwes.* 159, 10: 352–361.
- ZWEIFEL, R.; STEPPE, K.; STERCK, F.J., 2007: Stomatal regulation by microclimate and tree water relations: interpreting ecophysiological field data with a hydraulic plant model. *J. Exp. Bot.* 58: 2113–2131.
- ZWEIFEL, R.; BANGERTER, S.; RIGLING, A.; STERCK, F.J., 2012: Pine and mistletoes: how to live with a leak in the water flow and storage system? *J. Exp. Bot.* 63: 2565–2578.
- ZWEIFEL, R.; HAENI, M.; BUCHMANN, N.; EUGSTER, W., 2016: Are trees able to grow in periods of stem shrinkage? *New Phytol.* 211: 839–849.
- ZWEIFEL, R.; STERCK, F.J., 2018: A conceptual tree model explaining legacy effects on stem growth. *Front. For. Glob. Chang.* 1: 9
- ZWEIFEL *et al.* (in prep): Legacy effects on growth of pine trees – implications from a stopped irrigation experiment.

Abstract

How much drought can our forests endure? Lessons from extreme drought years

Climate change is taking on striking proportions in Switzerland and extreme weather events such as winter storms, late frosts and dry years have increasingly left their mark on our forests in recent years. It must be assumed that periods of heat and drought will become even more frequent in the future. What does this mean for our forests? Switzerland has a strong environmental monitoring system. Thanks to the latest measurement approaches and improved sensor technology, we are in a position to record the increasing incidence of climate extremes and the reaction of forests to them. The combination of long-term monitoring with short-term data collection and experiments, combined with modelling approaches, makes it possible to estimate the resistance and resilience of our forests in a future climate. Our data show that the sensitivities vary considerably depending on the tree species and location. The future development of our forests will depend on the combination and timing of weather extremes. Forests can cope with a single dry year, but several successive heat and dry years combined with storms, pests and diseases will lead to massive changes in the growth dynamics and ultimately the tree species composition of forests.

Keywords: Drought, climatic extremes, tree growth, mortality, monitoring, experiments

Bergsturz Cengalo und Murgänge Bondo: Erfahrungen der kantonalen Fachstelle

Christian Wilhelm, Gian Cla Feuerstein, Andreas Huwiler und Roderick Kühne

Amt für Wald und Naturgefahren, Kanton Graubünden, Loestr. 14/16, CH-7000 Chur, christian.wilhelm@awn.gr.ch

Vom 23. bis 31. August 2017 traten vom Pizzo Cengalo bis nach Bondo in einer aussergewöhnlichen Ereignisabfolge ein Bergsturz, ein Schuttstrom und mehr als zehn Murgänge auf. Bei diesem historischen Ereignis ging der Bergsturz von gut drei Millionen Kubikmeter unmittelbar in einen Schuttstrom über, was bisher weltweit ausserordentlich selten beobachtet wurde. Seit dem Bergsturz werden acht Personen auf einem Bergwanderweg vermisst. Der Schuttstrom und die Murgänge haben insgesamt 500 000 Kubikmeter Schuttmaterial bis nach Bondo geführt. Im vorliegenden Artikel werden Erfahrungen aus Sicht der kantonalen Fachstelle zu Monitoring, Entscheidungsgrundlagen, Gefahrenbeurteilung und Sofortmassnahmen sowie zur Räumung und Wiederinstandstellung geschildert. Im Zentrum steht dabei die Ereignisbewältigung, die nur mit ausserordentlicher Teamleistung zu bewerkstelligen war, sowohl im Bereich Naturgefahren als auch gesamthaft. Die vielfältigen Herausforderungen zeigen, dass das Geschehene durchaus als «Umgang mit Extremereignissen» einzuordnen ist. Abschliessend werden neue Fragen zu den Ursachen des Ereignisses und deren Verkettungen im Hinblick auf mögliche Entwicklungen und Lösungen aufgelistet.

1 Ereigniskontext und Vorgeschichte

1.1 Lokalisierung und Nutzungen

Die Naturereignisse Cengalo–Bondo traten vom Pizzo Cengalo in die Val

Bondasca und bis hinunter nach Bondo auf. Die Val Bondasca ist ein Seitental des Bergells. In Abbildung 1 sind nur die wesentlichen Erschliessungen aufgeführt, es gibt noch zahlreiche weitere Verbindungen und Übergänge. Der Kanton Graubünden hat ein sehr gros-

ses Netz mit Bergwanderwegen von rund 10 000 km Länge.

Die Val Bondasca wird im Sommer alpwirtschaftlich genutzt; im Talboden befinden sich einige Maiensäss-siedlungen. Zwei SAC-Hütten bieten gute Ausgangspunkte für Berg- und Klettertouren. Das Tal hat einen alpinen Charakter, nach den letzten Parkplätzen befindet man sich unmittelbar im Hochgebirge. Im Winter ist die Val Bondasca nicht bewohnt, entsprechend wird die Zufahrtsstrasse auch nicht geräumt.

1.2 Sturzereignisse am Cengalo ab 2011

Die Nordwand des Pizzo Cengalo ist bei Bergsteigerinnen und -steigern sowie Kletternden schon seit jeher als steinschlaggefährdet bekannt. Im Sommer 2011 nahm die Sturzaktivität aus der Nordwand stark zu, worauf das Gebiet ein erstes Mal durch einen Geologen beurteilt wurde. Der Alpinwanderweg «Viale», der die beiden SAC-Hütten verbindet, wurde umgehend gesperrt. Am 27. Dezember 2011 ereigneten sich zwei grosse Felsstürze gefolgt von einem Bergsturz. Dabei stürzten insgesamt rund 1,5 Mio. m³ Felsmaterial ab. Der Bergsturz erodierte beim Aufprall Gletschereis, kam im hinteren Val Bondasca zum Stillstand und erreichte die Hüttenzustiege nicht. Im Ausbruchgebiet, insbesondere an der hinteren Abrissfläche, wurde nach dem Bergsturz von 2011 Eis gesichtet, das vor dem Abbruch in den Klüften war (Abb. 2). Das warf Fragen von wissenschaftlichem Interesse auf, insbesondere zu den Anbruchmechanismen von Fels- und Bergstürzen in Permafrostgebieten (Kap. 2.2).

Nach einer erneuten geologischen Beurteilung im Frühjahr 2012 kam man vorerst zum Schluss, dass mit keinen Grossereignissen mehr zu rechnen

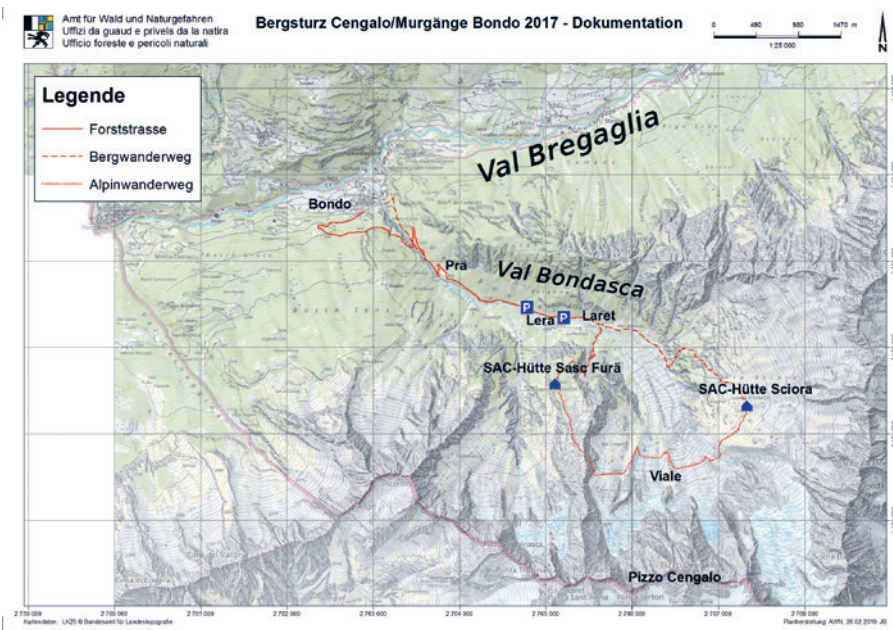


Abb. 1. Lokalisierung der Naturereignisse Pizzo Cengalo – Bondo. Ausschnitt aus der Landeskarte, nicht massstabgetreu. Rot ausgezogen ist die Forststrasse bis Lera, gestrichelt sind die Hüttenzustiege zur Sciora- und Sasc Furä-Hütte und gepunktet der Alpinweg, Viale, der die beiden Hütten bis 2011 verbunden hat (Abb.: AWN).

sei. Ausser der Sperrung des Alpinwanderwegs «Viale» drängten sich in der extensiv genutzten Val Bondasca keine weiteren Massnahmen wegen Sturzgefahren auf.

1.3 Risikomanagement für Murgänge von 2012 bis 2017

Mit Starkniederschlägen im Sommer 2012 entstanden aus den Ablagerungen des Bergsturzes 2011 in der hinteren Val Bondasca Murgänge, die bis nach Bondo vorstiessen – eine Ereignisverkettung, die an andern Orten auch schon beobachtet wurde (z.B. MANI 2016). Betroffen bzw. gefährdet waren dauernd bewohntes Siedlungsgebiet und Gemeinde- sowie Kantonsinfrastrukturen. Durch die neuen Voraussetzungen waren jetzt operative Massnahmen im institutionellen Verantwortungsbereich im Sinne des integralen Risikomanagements (PLANAT 2004 und 2013) gefragt.

Die Bondasca ist langfristig betrachtet kein klassischer Murgangwildbach. Es sind aus der Vergangenheit keine Murgangereignisse bekannt. Der Talboden des Val Bondasca ist mit 8° (14 %) relativ flach, und zwischen der Val Bondasca und Bondo befindet sich eine enge, felsige Schluchtstrecke mit einer Neigung von 13° (23 %). Starker Geschiebetrieb wurde bei Starkniederschlägen als möglich erachtet und zum Beispiel bei einem grossen Ereignis 1927 auch schon beobachtet.

Die umfassende Beurteilung der Murganggefährdung in Bondo führte zu einer neuen Gefahrenkarte Wasser, die gegenüber den bisherigen Gefahrenzonen ausgedehnte Gefahrenbereiche durch Übermuerung oder Übersarung infolge wahrscheinlicher Murgangablagerungen im Gerinnebett zeigte. Die Risiken waren offensichtlich und nicht tragbar. Ausgehend von der neuen Gefahrenkarte Wasser wurde ein umfassendes Schutzkonzept mit den klassischen «Instrumenten» des integralen Risikomanagements IRM ausgearbeitet und umgesetzt (Abb. 3).

Bezeichnend war, dass man den Kreislauf, oder besser die Spirale, des integralen Risikomanagements zweimal durchlief. Die Aktivitäten mit der «Bewältigung Murgang» 2012 sowie



Abb. 2. Links: Ausbruchsnische des Bergsturzes am Pizzo Cengalo vom 27. Dezember 2011 auf rund 3000 m ü.M. Rechts: Gut sichtbar ist an der hinteren Abrissfläche Eis, das Fragen zu den Anbruchmechanismen von Fels- und Bergstürzen aufgeworfen hat, insbesondere zur Rolle des Permafrosts (Fotos: AWN).



Abb. 3. Kreislauf des integralen Risikomanagements «Murgänge Bondo», der von 2012 bis 2017 zweimal durchlaufen wurde (vereinfachte Darstellung). Basierend auf einer neuen Gefahrenkarte wurden ein Auffangbecken gebaut, eine Murgangalarmanlage installiert, eine Notfallplanung mittels Interventionskarte erstellt und ein Frühwarndienst betrieben. Der Gefahrenzonenplan nach Massnahmen war verabschiedet und der lokale Naturgefahrenberater stand im Einsatz (Abb.: AWN).

baulichen Sofortmassnahmen, neuer Gefahrenkarte und neuem Gefahrenzonenplan 2013 verliefen plangemäss. Diskussionslos gebilligt wurde 2013 auch die Murgangalarmanlage. Zentrales Element war eine Reissleine im

Bachgerinne bei Prä, womit die Gemeinde- und Kantonsverantwortlichen vorgewarnt und verschiedene Strassen automatisch gesperrt wurden. Abgestimmt auf die Murgangalarmanlage waren die organisatorischen Massnah-

men, die von den Einsatzkräften auch geübt wurden. Der lokale Naturgefahrenberater der Gemeinde nahm während des Betriebs des Frühwarndienstes und der Bewältigung von einigen kleineren Ereignissen zwischen 2013 und 2017 wichtige Aufgaben an der Schnittstelle Kanton–Gemeinde wahr und trug so zur Verbesserung des integralen Risikomanagements bei.

Parallel zum etablierten Risikomanagement wurde ab 2013 ein Auffangbecken für 50 000 m³ Geschiebe, das dank einkalkuliertem Freibord und Überlastfall 200 000 m³ Geschiebe auffangen konnte, geplant und gebaut (zweiter Durchgang IRM). Dessen Notwendigkeit und Ausgestaltung führte im Dorf Bondo zu einigen Diskussionen. Dank der Zustimmung der Gemeinde Bregaglia, die das ganze Bergell und Maloja umfasst, konnte das Bauwerk dann aber zügig ausgeführt und 2016 fertiggestellt werden. Schliesslich beurteilte die kantonale Gefahrenkommission die (Rest-)Gefährdung nach Ausführung des Auffangbeckens mittels Gefahrenkarte und verabschiedete den angepassten Gefahrenzonenplan. Ebenfalls auf das neue Auffangbecken abgestimmt wurde die Notfallplanung mit der angepassten Interventionskarte Anfang 2017.

1.4 Das Extremereignis vom 23. August 2017

Aufgrund der Beobachtungen und vor allem Messungen im Arge-Alp-Projekt (Kap. 2.2 und 2.3) wurde klar, dass es möglicherweise zu einem weiteren Bergsturz kommen könnte. Da die Sturzaktivität mit Stein- und Blockschlag am Pizzo Cengalo ohnehin hoch war, erregten hauptsächlich grössere Felsstürze Aufmerksamkeit. Am Pizzo Cengalo wurde zwischen 2011 und 2017 jedes Jahr eine Zunahme der Sturzaktivität während der Sommermonate beobachtet, die dann jeweils in einen grossen Felssturz mündete (Abb. 4). Insbesondere beim ersten Bergsturz am 27. Dezember 2011 ereigneten sich nur Stunden vor dem Bergsturz zwei sehr grosse Felsstürze.

Man rechnete 2013 noch mit Jahrzehnten bis zu einem erneuten Bergsturz. Diese Zeitspanne wurde 2015

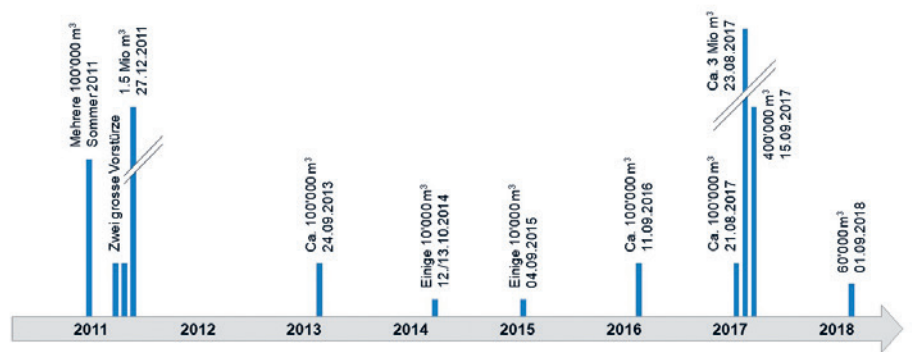


Abb. 4. Fels- und Bergstürze am Pizzo Cengalo 2011–2018. Neben den zwei Bergstürzen mit mehr als einer Mio. m³ sind nur die grössten bekannten Felsstürze aufgetragen. Die Kubaturen mussten z. T. grob geschätzt werden (Abbildung: AWN).



Abb. 5. Ablagerungen vom Bergsturz am Pizzo Cengalo vom 23. August 2017 und verfrachtetes Material in der Val Bondasca durch den unmittelbar folgenden Schuttstrom und die Murgänge zwischen dem 23. und 31. August 2017 (Foto: AWN, Badrutt).

verkürzt auf 1 bis 30 Jahre und mit den Messresultaten am 10. August 2017 auf Wochen bis Monate korrigiert. Die Ungewissheit war gross (Kap. 2.2–2.5), einen genauen Absturzzeitpunkt konnte man nicht voraussagen. Ein Ereignis, das man grundsätzlich kennt, aber dessen Eintritt nicht bestimmbar ist, bezeichnet TALEB 2010, S. 396 ff. als «Grauen Schwan».

Am 23. August 2017 stürzte ein Felsvolumen von ca. 3 Mio. m³ aus der Nordostflanke ab. Der Bergsturz erodierte am Wandfuss rund 0,6 Mio. m³ Eis (ETH Zürich 2017) und kam nach 90 Sekunden in der hinteren Val Bondasca kurzzeitig zum Stillstand (Abb. 5). Acht Personen, die sich während des Bergsturzes auf dem Abstieg von der Sciora-Hütte befanden, werden seither in diesem Gebiet vermisst.

Bereits 30 Sekunden nach Stillstand des Bergsturzes bewegte sich ein Schuttstrom (zähflüssiger Murgang) talwärts und verlagerte rund 0,5 Mio. m³ Material mit rund 8 m pro Sekunde durch die Val Bondasca. Rund 30 000 m³ davon drangen mit rund 2 m pro Sekunde durch die enge Schlucht bis nach Bondo vor. Nach dem Schuttstrom gelangten gleichentags und zwei Tage später insgesamt mehr als 10 Murgänge – ebenfalls ohne Niederschläge – bis nach Bondo. Am 31. August 2017 erreichte – ausgelöst durch Starkniederschläge – ein letzter, sehr grosser Murgang mit ca. 0,26 Mio. m³ Bondo, womit insgesamt rund 0,5 Mio. m³ Material bis nach Bondo verfrachtet wurden (Kap. 3 und 4).

Die Prozessverkettung aus Bergsturz und unmittelbarem Schuttstrom ist in

der Schweiz mit vergleichbaren Rahmenbedingungen kaum beobachtet worden und gilt auch weltweit als sehr selten (GRUNER *et al.* 2018). Die speziellen Rahmenbedingungen am Pizzo Cengalo mit Abbruch von Felsmassen, sehr kurzer Transitstrecke über einen kleinen Gletscher, keiner Schneeüberdeckung und geringer Wasseraufnahme entlang der Auslaufstrecke sind in mehreren Punkten nicht vergleichbar mit den wenigen Beispielen, die weltweit schon beschrieben wurden (u.a. PETRAKOV *et al.* 2008). Auch ein Vergleich der zwei Bergstürze am Pizzo Cengalo zeigt markante Unterschiede (Tab. 1).

Die Ursachen des Bergsturzes wurden mit einer unmittelbar einberufenen Expertengruppe intensiv diskutiert und wie folgt beschrieben:

«Als Ursachen des Bergsturzes vom 23. August 2017 kommen unter anderem Kombinationen folgender Faktoren in Frage: Topographie, geologische Disposition, Sprödbbruchverhalten des Bergeller Granits, Kluftwasserdruck und damit verringerte Stabilität aufgrund von Niederschlagswasser, Schmelzwasser aus Eis und Schnee oder auftauendem Permafrost.» (AWN 2017, S. 3).

Die Aufzählung der vielen Ursachen und der explizite Hinweis auf Kombinationen zeigt die Komplexität des Zusammenspiels vieler Faktoren, die in Untersuchung sind (BAER *et al.* 2017; AMANN *et al.* 2019 in review).

Auch knapp zwei Jahre nach dem Ereignis bestehen erhebliche Unsicherheiten betreffend der Ursachen und Verkettungen der Ereignisse. Antworten auf Fragen, wie sich der Klimawandel im Hochgebirge auf die Häufigkeit und Intensität von Massenbewegungen und insbesondere Prozessverkettungen auswirken wird, sind von der Wissenschaft weiter zu erforschen.

1.5 Risikokonzept und Schutzziele

Können gefährliche Prozesse Personen oder Sachwerte beziehungsweise menschliche Nutzungen im weiteren Sinne betreffen, sind Schäden nicht auszuschliessen, das heisst, es bestehen Risiken. Risiken können mit Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit) und Ausmass von möglichen Schäden abgeschätzt werden. Grundlegend bei diesem Konzept ist, dass der Gefahrenprozess beziehungsweise die Risikokonstellation wiederkehrend auftritt und dementsprechend Häufigkeiten beziehungsweise Wahrscheinlichkeiten abgeleitet werden können. Bei einem Bergsturz muss man Abschätzungen und Annahmen mit sehr grossen Unsicherheiten treffen, eine Periodizität am gleichen Berg ist unwahrscheinlich. Das klassische Risikokonzept stösst an Grenzen.

Schutzziele bei Naturgefahren werden je nach Bedeutung und Intensität des genutzten Raumes abgestuft und damit werden Prioritäten bei den

Schutzmassnahmen gesetzt. Sehr bedeutende Nutzungen wie Bauzonen, dauernd bewohnte Siedlungen und bedeutende Verkehrsträger (institutioneller Verantwortungsbereich) haben hohe Schutzziele, das heisst, es wird eine hohe Sicherheit angestrebt (PLANAT 2013). Dies begründet den hohen Aufwand, den man für die Murgangalarmanlage, das Auffangbecken und die organisatorischen Massnahmen in Bondo getätigt hat.

Entsprechend geringer ist das angestrebte Sicherheitsniveau bei nur zeitweise bewohnten Gebäuden. Für die Val Bondasca mit typischen Maiensässsiedlungen war ein Warn-/Alarmsystem für Bergsturz- und Murganggefährdung nicht verhältnismässig und wurde deshalb nicht weiterverfolgt. Im dünn besiedelten, aber von Naturgefahren beträchtlich betroffenen Kanton Graubünden wäre das Ziel, alle gefährdeten Streusiedlungsgebiete zu überwachen, ein nicht machbares Vorhaben.

Die Hüttenzustiege in die Val Bondasca sind Bergwanderwege (weissrot-weiss markiert), und der «Viale» ist ein Alpinweg (weiss-blau-weiss markiert). Für diese Wege werden im Gegensatz zu Siedlungen keine Gefahrenbeurteilungen mit raumplanerischen Instrumenten (Gefahrenkarten und Gefahrenzonen) vorgenommen. Auch Warn- oder gar Alarmsysteme für Naturgefahren stehen in der Regel nicht zur Diskussion. Im Vordergrund stehen bei erkannter erhöhter Gefährdung die Information aller Betroffenen, zum Beispiel mit Informations- und Warn- tafeln vor Ort, die Sperrung bei zeitlich absehbaren, akuten Gefährdungen oder, als letzte Massnahme, die Aufhebung eines Wegs bei nicht vertretbaren Risiken.

Tab. 1. Vergleich des ersten und zweiten Bergsturzes am Pizzo Cengalo anhand charakteristischer Merkmale. Der zweite Bergsturz unterscheidet sich vom ersten Bergsturz praktisch in allen Merkmalen massgebend. Während beim ersten Sturz das sichtbare Permafrosteis bei der Abbruchfläche Fragen aufwirft, erodiert der zweite Sturz massiv Gletschereis und geht kurz nach der Ablagerung in einen Schuttstrom über.

Merkmal	Bergsturz	Bergsturz
Zeitpunkt	27.12.2011, Winter	23.08.2017, Sommer
Ausbruchvolumen	1,5–2,0 Mio. m ³	3,1 Mio. m ³
Vorabstürze	Vorabstürze im Sommer 2011 und am Tag des Bergsturzes	Keine Vorabstürze in der Nordostwand
Ausbruchflächen	Gefrorenes Eis sichtbar, Felspermafrost	Wenig Eis sichtbar, viele nasse Flächen, Bergwasserspiegel hoch
Gletscherabtrag	Eis erodiert (Kubatur nicht bestimmt)	0,6 Mio. m ³ Eis erodiert
Staubentwicklung	Sehr gross	Verhältnismässig klein
Ablagerung	Gut abgrenzbar, kein Schuttstrom	Kurzer Stillstand, bereits 30 Sekunden nach Ablagerung fliesst ein Schuttstrom
Nachstürze	Keine relevanten Nachstürze	0,4 Mio. m ³ am 15.09.2017

2 Monitoring am Pizzo Cengalo

2.1 Geologische Disposition

Der Pizzo Cengalo gehört zum Bergeller-Granit und besteht zur Hauptsache aus Tonalit und Granodiorit mit geringeren Mengen an Gabbro, Hornblende und Dioriten (SCHMID *et al.* 1996). Er

hat tektonische Deformation erlebt, und es sind im regionalen Massstab drei dominierende Kluftsysteme erkennbar (DE PREUX 2014, Abb. 6).

Als Bewegungsmechanismus für die Instabilität in der Nordostflanke des Cengalo wird eine Kombination von Blockkippen (Toppling) entlang dem Kluftsysteem 3 und planarem Gleiten (planar sliding) entlang dem System 2 angesehen. Die Neigung und der Reibungswinkel sind kritische Parameter für das Blockkippen. Klüfte mit einer Neigung weniger als 55° können theoretisch nicht kippen. Das Blockkippen ist also nur in der oberen Hälfte möglich (DE PREUX 2014).

2.2 Arge-Alp-Forschungsprojekt

Nach dem Bergsturz vom 27. Dezember 2011 aus der Nordostflanke des Pizzo Cengalo ergab sich die Möglichkeit, die auslösenden Mechanismen für den Bergsturz im Rahmen eines von der Arge Alp finanzierten Projekts zu untersuchen (KENNER und PHILLIPS 2017). Dank diesem Projekt konnten unter anderem interferometrische Radarmessungen (Ground-based Interferometric Synthetic Aperture Radar, GB-InSAR), terrestrische Laserscans (TLS) und detaillierte Analysen der Kluftsysteme durchgeführt werden. Aufgrund der exponierten Lage der Instabilität (dauernder Stein- und Blockschlag, kein Mobilfunkempfang etc.) war die im Rahmen des Projekts geplante Installation von *In-situ*-Sensoren wie Temperaturlogger oder Crackmeter nicht möglich, und es konnten und können bis heute ausschliesslich Fernerkundungsmethoden eingesetzt werden. Zudem war es aufgrund der schieren Grösse der Instabilität sehr schwierig, die relevanten Rissssysteme für eine Instrumentierung zu bestimmen (Abb. 7).

Die im Rahmen des Arge-Alp-Projekts durchgeführten Untersuchungen dienten dazu, die am Pizzo Cengalo ablaufenden Prozesse zu erkennen und zu verstehen (Stufe 1 gemäss BAFU 2016 oder SÄTTELE und BRÜNDL 2015). Die Installation eines Warn- oder gar Alarmsystems war nicht vorgesehen.

Auch die Untersuchung des Verhaltens der Bergsturzablagerungen respektive die Prozessdynamik eines gros-

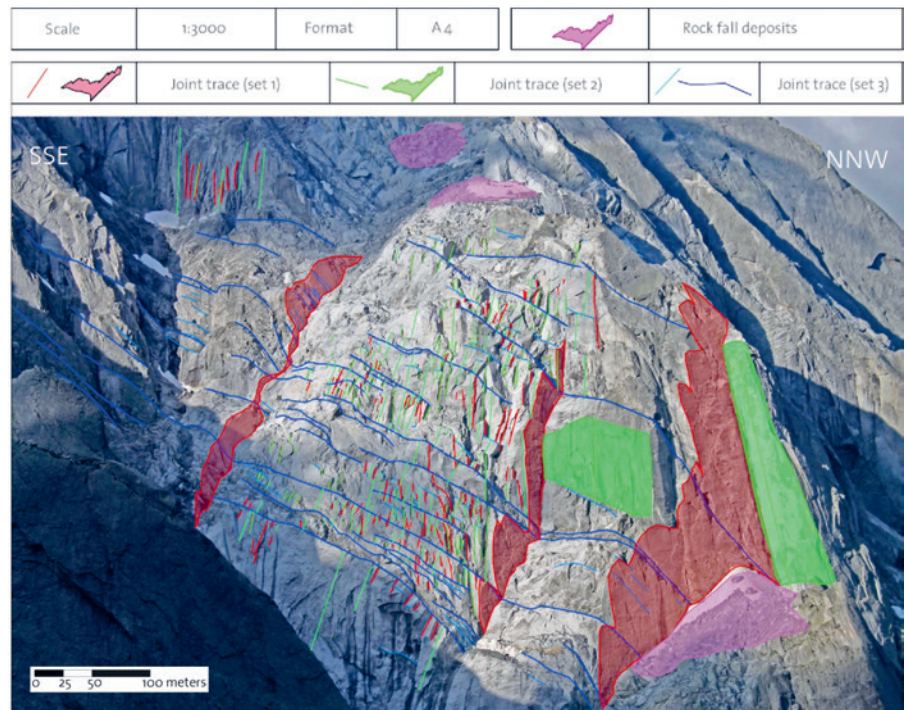


Abb. 6. Kluftsysteme in der Nordostflanke am Pizzo Cengalo. Rot: Kluftsysteem 1 (005/70), Grün: Kluftsysteem 2 (065/70), Blau: Kluftsysteem 3 (245-270/50-70). Das Kluftsysteem 3 fällt am Fusse der Instabilität mit 50° oder weniger ein, weiter oben fällt es mit bis zu 70° deutlich steiler ein (Abb.: DE PREUX 2014).



Abb. 7. Aufnahme der instabilen Felsmasse vom 11. August 2016. Der linke, stark frakturierte, helle Bereich ist am 23. August 2017 abgestürzt. Der Pfeiler im rechten Teil des Bilds ist weitgehend stehen geblieben (Foto: Y. Bonanomi).

sen Fels- oder Bergsturzes waren nicht Bestandteile des Projekts.

Nach Abschluss des Arge-Alp-Projekts 2015 wurde entschieden, die periodischen GB-InSAR und TLS-Messungen zur Verfolgung des Bewegungsverhaltens der Instabilität in der Nordostflanke weiterzuführen, da mit grosser Wahrscheinlichkeit ein wei-

teres Sturzereignis zu erwarten war. Eine präzise Vorhersage des Absturzzeitpunkts war auf der vorhandenen Datenbasis nicht möglich. Es wurde aber damit gerechnet, dass sich ein grosser Sturz in den nächsten 1 bis 30 Jahren ereignen würde. Die im Auftrag des Amts für Wald und Naturgefahren (AWN) durchgeführten Berg-

sturzsimulationen zeigten, dass bei einem Absturz mit einem Volumen von 3,7 Mio. m³ die Zustiege zur Sciora- und Sasc-Furä-Hütte gefährdet sein könnten.

2.3 Radarmessungen

2012 wurden am Pizzo Cengalo im Rahmen des Arge-Alp-Projekts zum ersten Mal GB-InSAR-Messungen durchgeführt. Ziel war es, über mehrere Tage permanent zu messen und zum Beispiel einen allfälligen Tagesgang der Bewegungen aufzulösen. Aufgrund technischer Probleme war dies aber nicht möglich. In der Folge wurden nur noch in periodischen Abständen Messungen an jeweils einem Tag durchgeführt.

Die Messtage mussten aufgrund der aufwändigen Logistik und um Synergien zu nutzen jeweils weit im Voraus terminiert werden, und in der Regel konnte nur ein Verschiebedatum vorgesehen werden. Dies hatte zur Folge, dass auch unter nicht optimalen Bedingungen gemessen werden musste. Zwischen 2012 und 2016 wurden mittlere jährliche Bewegungsraten von rund 2 cm gemessen.

Eine permanente Überwachung der Instabilität mittels Radarinterferometrie wurde sowohl im Arge-Alp-Projekt wie auch in den folgenden Jahren verschiedentlich geprüft, aufgrund der sehr hohen Kosten bei geringem Schadenpotenzial aber nicht weiterverfolgt. Erst die beim Ereignis vom 23. August 2017 beobachtete Prozessverkettung mit direkten Auswirkungen des Bergsturzes bis ins dauernd bewohnte Siedlungsgebiet von Bondo erforderte die Installation eines permanent messenden Radargeräts (Kap. 3.2.2).

2.4 Beobachtungen

Ein weiteres zentrales Element für die Beurteilung einer aktuellen Gefahrensituation bei erwarteten grossen Sturzereignissen ist die Sturzaktivität. Diese nahm bereits im Jahr 2011 stark zu, weswegen der direkt unterhalb der Nordwand des Pizzo Cengalo durchführende Alpinwanderweg «Viale» schon im Sommer 2011 durch die Verantwortlichen wegen unmittelbarer

Gefährdung durch Stein- und Blockschlag sowie Felsstürze mit bis zu mehreren 100 000 m³ gesperrt wurde.

Diese Zunahme der Sturzaktivität wurde in erster Linie von Berggängern sowie dem Personal der beiden SAC-Hütten festgestellt. In den folgenden Jahren wurde versucht, Frequenz und Magnitude der Sturzaktivität zu erfassen. Dabei musste berücksichtigt werden, dass sich Personen nur während der Hüttensaison von Ende Juni bis September im Gebiet aufhalten und Beobachtungen nur bei Tag und guter Sicht verlässlich möglich sind. Die Einschätzung der Grösse des Ereignisses hängt zudem stark von der akustischen Wahrnehmung und der Staubentwicklung ab.

Bei der Protokollierung der Sturzaktivität ist wichtig, die Ausbruchstellen klar zu bezeichnen. Konkret wurde am Pizzo Cengalo zwischen der Nordostflanke (mit der grossen, instabilen Masse) und der Nordwestflanke unterschieden (Abb. 8). Während Stürze aus der Nordwestflanke nicht in einem direkten Zusammenhang mit der Instabilität standen, hätte eine Zunahme von Stürzen aus der Nordostflanke auf eine Beschleunigung der instabilen Masse hindeuten können.

Bei der Interpretation ist schliesslich zu berücksichtigen, dass die beobachtete Sturzaktivität nicht ausschliesslich auf das Bewegungsverhalten der Instabilität zurückgeführt werden muss, sondern stark von einer temperaturgesteuerten, saisonalen Zunahme der Sturzaktivität überlagert sein kann. Dies

gilt allerdings nur für kleine Ereignisse; Stürze mit Volumen von mehr als 100 000 m³ treten über das ganze Jahr verteilt auf (z.B. SLF 2015).

2.5 Gefahrenbeurteilung kurzfristig vor dem Ereignis

Am 28. Juli 2017 wurde eine weitere periodische Radarmessung durchgeführt. Die Ergebnisse lagen am 10. August 2017 vor und zeigten gegenüber den Messungen früherer Jahre erstens eine signifikante Zunahme der Bewegung und zweitens ein grösseres Volumen, welches in Bewegung war. Aufgrund grossräumiger Dekorrelation konnten die exakten Bewegungsraten nicht mehr im gesamten Untersuchungsperimeter bestimmt werden. Die Bewegung im unteren Bereich wurde aber auf rund 10 cm pro Jahr geschätzt, was in diesem Bereich einer Zunahme der jährlichen Bewegungsrate um einen Faktor 2,5 bis 3 gegenüber dem Zeitraum von 2015 bis 2016 entsprach.

Bis am 9. August 2017 beurteilte man die Zeitspanne für einen möglichen Bergsturz noch mit «in den nächsten 1 bis 30 Jahren», denn es gab vorher keine neuen Informationen, die eine andere Einschätzung erfordern hätten. Aufgrund der Messdaten vom 10. August 2017 wurde eine sofortige Beurteilung der vorherrschenden Gefahrensituation vor Ort in die Wege geleitet, die aber keine Hinweise auf einen unmittelbar in den nächsten Tagen be-

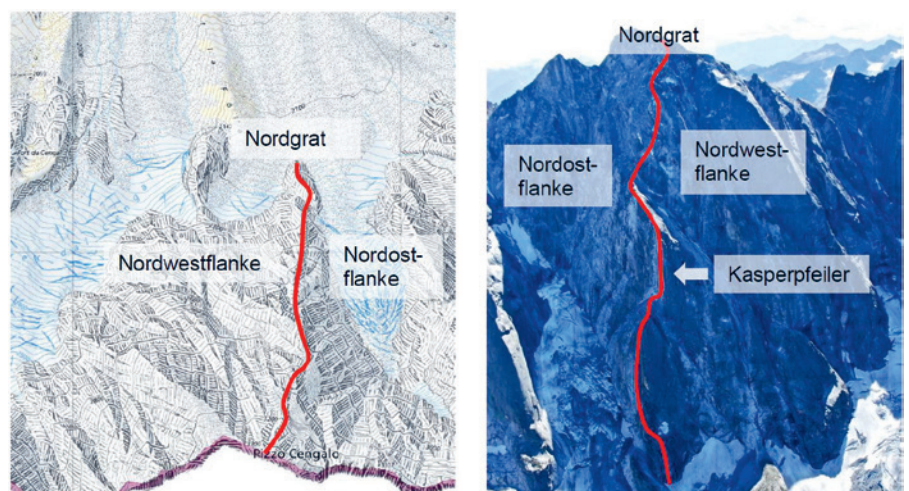


Abb. 8. Bezeichnungen in der Nordwand des Pizzo Cengalo. Links: Ausschnitt aus der Landeskarte (nicht massstabsgetreu), rechts: Ansicht der Nordwand des Pizzo Cengalo (Bild: Ch. Levy, 29. August 2010).

vorstehenden Absturz ergab. Es waren – abgesehen eines etwa 100 000 bis 200 000 m³ grossen Felspakets in der Nordwestflanke – keine neuen Risse, Spalten oder Klüfte erkennbar. Bestehende Risse und Klüfte hatten sich nicht weiter geöffnet. Die Sturzaktivität lag im Rahmen früherer Jahre, am Begehungstag vom 12. August 2017 wurde überhaupt keine Aktivität festgestellt.

Als Massnahmen wurden die Informationstafeln, welche seit 2015 auf die Gefährdung einzelner Abschnitte der Zustiege zur Sciora- und Sasc-Furä-Hütte hinwiesen, mit dem Hinweis aktualisiert, dass möglicherweise in den kommenden Wochen und Monaten mit einem grossen Bergsturz zu rechnen sei. Auch die Eigentümer der Maiensässhütten, die sich im Gefahrengelände befanden, wurden schriftlich auf die erhöhte Gefahrensituation aufmerksam gemacht. Für den 1. September 2017 wurde eine weitere, ausserordentliche Radarmessung angesetzt.

Als wahrscheinlichstes Absturzscenario wurde angenommen, dass vor einem Bergsturz mehrere grosse Felsstürze mit Volumen von jeweils einigen 100 000 m³ als Vorstürze abgehen würden (ähnlich den Vorstürzen beim Bergsturz vom 27. Dezember 2011). Sturzmodellierungen zeigten, dass Felsstürze und sogar Bergstürze bis zu einem Volumen von 1,5 Mio. m³ die Hüttenwege nicht erreichen würden. Ein schlagartiger Absturz des gesamten Volumens in einem Paket wurde als eher unwahrscheinlich beurteilt.

Die Sturzaktivität aus der Nordwestflanke mit dem stark zerklüfteten Felspaket nahm in den darauffolgenden Tagen kontinuierlich zu, bis am 21. August um 11:30 Uhr ein Felssturz mit einem geschätzten Volumen von etwa 150 000 m³ niederging und von einem Berggänger zufällig fotografiert wurde (Abb. 9). Das Ereignis entsprach den Erwartungen, das abgestürzte Felspaket wurde bereits am 12. August als absturzgefährdet beurteilt.

Die Sturzaktivität aus der Nordostflanke nahm seit dem 14. August 2017 kurzfristig zu und dann wieder ab. Ein solches Verhalten wurde auch schon in früheren Jahren beobachtet, zudem handelte es sich bei den beobachteten Stürzen nur um Blockschläge, also kleine Ereignisse.



Abb. 9. Felssturz vom 21. August 2017 aus der Nordwestflanke um ca. 11:30 Uhr. Das Bild wurde vom Hüttenweg in die Sciora-Hütte aufgenommen, das ausgebrochene Volumen lag bei schätzungsweise 150 000 m³, die Staubentwicklung war enorm (Quelle: unbekannt).

Der grosse Felssturz aus der Nordwestflanke vom 21. August 2017 wurde deshalb nicht als Vorbote für einen Bergsturz aus der Nordostflanke interpretiert. Es wurde weiterhin davon ausgegangen, dass auch dort nicht nur eine Zunahme der Sturzaktivität, sondern auch eine Zunahme der Sturzvolumen zu beobachten sein werde und dass einem Bergsturz grosse Felsstürze vorausgehen würden.

Auch am 22. August wurde in der Nordostflanke keine erhöhte Sturzaktivität beobachtet. Bis am Morgen des 23. August 2017 lagen damit keine Hinweise auf einen unmittelbar bevorstehenden Bergsturz aus der Nordostflanke vor.

3 Ereignisbewältigung – Teil Naturgefahren

3.1 Beurteilung in akuter Gefahrenlage und Sicherheitskonzept

Die Murgangalarmanlage löste um 09:36 Uhr Alarm aus, wodurch die Kantons- und Gemeindestrassen via Ampeln automatisch gesperrt wurden. Die Einsatzkräfte bezogen Beobachtungsposten, sperrten die kritischen Bereiche ab und evakuierten aufgrund der immensen Geräuschentwicklungen in der Schluchstrecke der Val Bondasca

das Dorf Bondo. Die laufende Naturgefahrenbeurteilung, die Vermissten-suche, die Evakuierung der Val Bondasca, die Sperrungen und Verkehrs-umleitungen, das Sicherheitskonzept und die Alarmierung, die Versorgung der Bevölkerung und Einsatzkräfte sowie die Information der Bevölkerung, Öffentlichkeit und Medien sind organisatorische und sicherheitstechnische Massnahmen der ersten Stunden – eine riesige Herausforderung für die Einsatzleitung, die richtigen Prioritäten zu setzen!

Gemäss dem Bündner Konzept leitet in besonderen Lagen die Kantons-polizei KaPo die Ereignisbewältigung, bis – je nach Lage – ein Gemeindeführungsstab oder der Kantonale Führungsstab die Einsatzleitung übernimmt. In Bondo übergab die KaPo die Verantwortung für die Ereignisbewältigung am 28. August 2017 an den Gemeindeführungsstab, welcher bis am 18. September 2017 durch den Chef des Kantonalen Führungsstabs und anschliessend bis am 15. Dezember 2017 durch die Gemeindepräsidentin geleitet wurde. Die kantonale Fachstelle Naturgefahren deckte zusammen mit privaten Experten die Bereiche «Naturgefahren» und «Projekte» (Kap. 4) ab. Die Naturgefahrenbeurteilung in akuter und dauernd veränderter Lage in Bondo beinhaltete viele Eigenschaften, die eine akute Lage charakterisieren (z.B. HÄHLEN 2018).

Aufgaben des Ressorts Naturgefahren waren:

- Laufende Gefahrenbeurteilung
- Beratung des Führungsstabs bei Sicherheitsmassnahmen
- Empfehlungen zum Evakuationsplan
- Strategie Sofortmassnahmen, Beratung und Information des Leiters Projekte
- Koordination laufender und neuer Aufträge an Ing.-Büros und
- Auskünfte an Medien zur Gefahrensituation vor Ort

Nachfolgend werden die Gefahrenbeurteilung und das Sicherheitskonzept erläutert. Die laufende Beurteilung der Situation am Pizzo Cengalo und in der Val Bondasca hinsichtlich der aktuellen Gefährdung der Einsatzkräfte und den Siedlungsgebieten in Bondo war eine komplexe Aufgabe mit dauernd wechselnden Rahmenbedingungen. Herausfordernd war auch, das Naturgefahrensteam permanent mit Verantwortlichen und Stellvertretern zu besetzen und die Information und Kommunikation im Team und nach aussen ohne Unterbruch zu gewährleisten.

Folgende Punkte standen bei der Gefahrenbeurteilung im Vordergrund (Reihenfolge variierend):

- *Beobachtung der Situation und der meteorologischen Entwicklung.* Täglich wurden Rekoflüge durchgeführt, um die aktuelle Lage vor Ort einzuschätzen. Sicherheits-, Wach- und Beobachtungsposten, deren Standorte laufend der Situation angepasst werden mussten, und die Daten des Frühwarnsystems waren ebenfalls zentral für die Einschätzung. MeteoSchweiz erstellte zudem durchgehend eine Spezialprognose für zu erwartende Niederschläge in der Val Bondasca.
- *Beurteilung des Pizzo Cengalos in Bezug auf erneute Fels-/Bergstürze.* Die permanenten Radarmessungen (Kap. 3.2.2) ab 4. September 2017 waren für die Gefahrenbeurteilung zentral. Zusätzlich dokumentierte ein dort stationierter Beobachtungsposten sämtliche Sturzereignisse.
- *Einbezug der Daten von lokalen Messstationen und weiteren Informationen.* Neben den verfügbaren

Meteo- und Abflussdaten wurden in den darauffolgenden Wochen zusätzliche Messstationen installiert. Eine grosse Herausforderung war auch die Beurteilung und der adäquate Einbezug von vielen weiteren Informationen, die aus sehr unterschiedlichen Quellen stammten.

- *Beurteilung des potenziell mobilisierbaren Materials in der Val Bondasca und Murgangssimulationen.* Das mobilisierbare Material wurde laufend abgeschätzt, wobei die Kubaturberechnungen aus dem Rapid Mapping (Kap. 3.2.1) sehr wichtig waren. Die Simulationen wurden

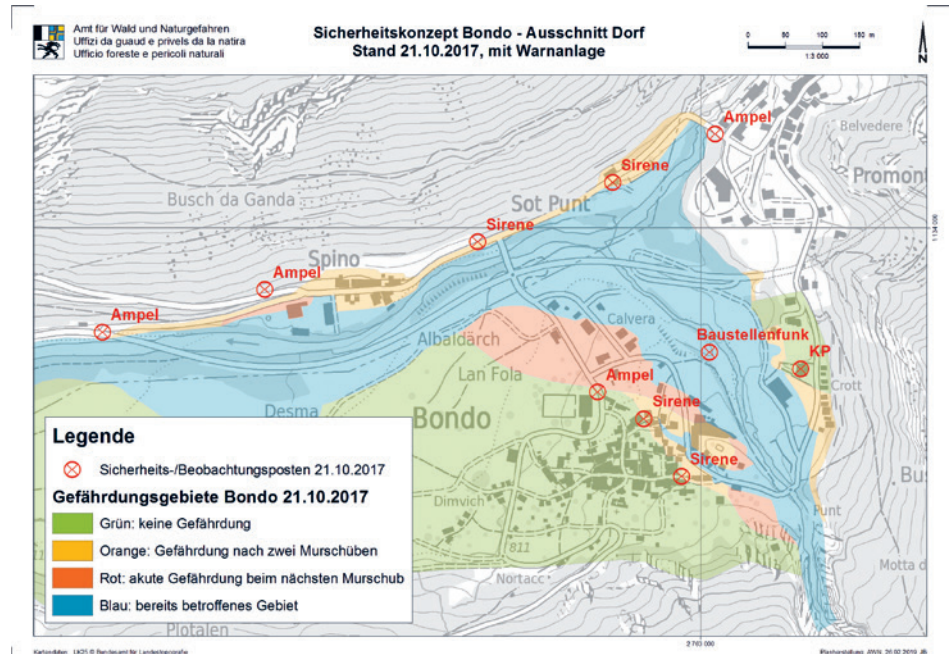


Abb. 10. Sicherheitskonzept Bondo–Ausschnitt Dorf mit den täglich aktualisierten Gefährdungsgebieten. Für die Ausdehnung der Gefährdungsgebiete waren hauptsächlich die aktuelle Gefahrenlage, die prognostizierten, kurzfristigen Entwicklungen, der Stand der Warn- und Alarmierungseinrichtungen und der Stand bei der Räumung und Wiederinstandstellung des Auffangbeckens massgebend (Abb.: AWN).

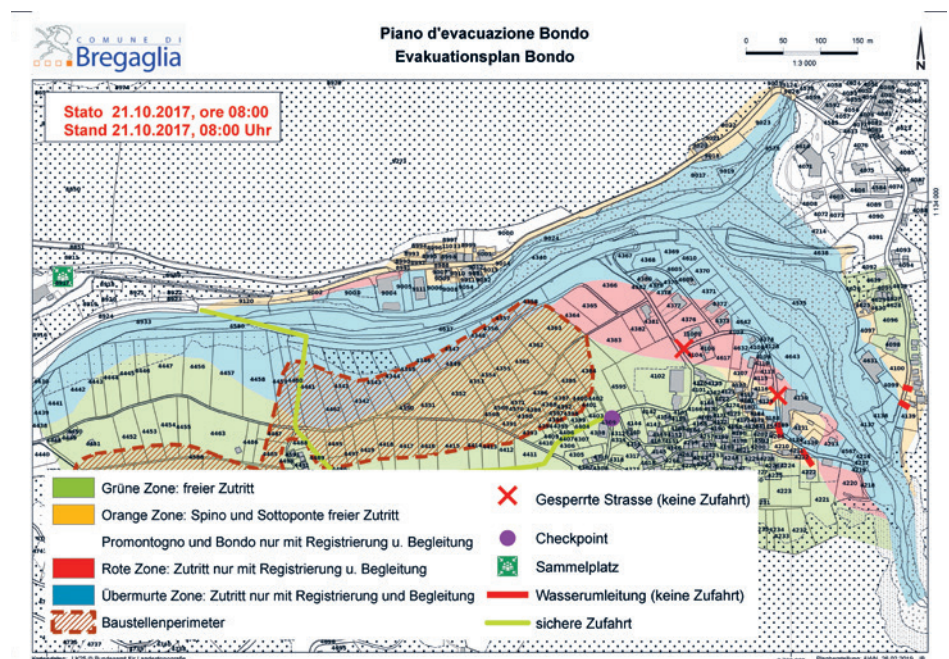


Abb. 11. Evakuationsplan Bondo. Basierend auf den Gefährdungsgebieten und weiteren Rahmenbedingungen wie gefährdete Zugänge usw. wurden die Evakuationsentscheidungen getroffen. Zuständig war die Gemeinde, die dazu auch die Bevölkerung und periodisch die Medien informierte (Abb.: AWN).

auf den aktuellsten Geländemodellen (Rapid Mapping) durchgeführt. Dabei wurden die Eingangsparameter variiert. Anhand dieser Simulationen konnte der potenzielle Ablagerungsbereich für erneute Murgänge abgeschätzt werden.

- *Tägliche Szenarienbildung und Gefahreneinschätzung.* War anfangs die Szenarienbildung ad hoc und eher pauschal, wurde diese zunehmend systematisiert und quantifiziert. Neben den vielen Parametern, die für die einzelnen Ereignisse massgebend waren, wurden auch laufend Ereignisverkettungen bei der Szenarienbildung berücksichtigt. Schliesslich waren auch Szenarien aus bestehenden Gutachten nicht ausser Acht zu lassen und Worst-Case-Überlegungen anzustellen.

Ergebnis dieser Arbeiten war unter anderem eine täglich aktualisierte Karte mit den Gefährdungsgebieten von Bondo (Abb. 10). Basierend auf dieser Karte wurde das Frühwarnsystem bedarfsgerecht festgelegt, und der Führungsstab setzte unter Einbezug der Vorwarnzeiten die erforderlichen Regelungen (Ablaufdiagramme, Vorschriften, Absperrpläne, Checklisten usw.) jeweils in einem Sicherheitskonzept um. In engem Bezug dazu standen auch der Evakuationsplan und die organisatorischen Massnahmen (Abb. 11). Zuständig für die Umsetzung dieser Massnahmen war die Gemeinde, die dazu auch laufend die Bevölkerung und periodisch die Medien informierte.

Nach dem Bergsturz vom 23. August 2017 berief der Kanton Graubünden unter Federführung des AWN unverzüglich eine Expertengruppe aus der ganzen Schweiz ein. Diese Spezialisten aus Wissenschaft und Praxis sowie aus verschiedenen Disziplinen und Themenbereichen wie Geologie, Gletscher, Schnee/Lawinen, Wasserbau, Messmethoden und Murgang arbeiteten mit den Fachleuten des Kantons zusammen. Ziel für die Gruppe war:

- bei der umfassenden Ereignisanalyse «Bergsturz Cengalo – Murgänge Bondo» vorhandene Erfahrungen einzubeziehen und zusätzliches Wissen zu generieren und
- den Beauftragten und Behörden fachliche Hinweise und Grundla-

gen für die Ereignisbewältigung in kurz-, mittel- und längerfristiger Hinsicht zu liefern.

Mehrere der Fragen, die im Laufe der Arbeit der Expertengruppe auftauchten, konnten nicht abschliessend beantwortet werden (AWN 2017). Die Expertengruppe war aber ein äusserst hilfreiches Gremium, und dieses Vorgehen dürfte zukünftig bei Extremereignissen Standard werden.

3.2 Entscheidungsgrundlagen

Einerseits ist die unvollständige Informationslage eine der Hauptherausforderungen bei der Bewältigung von Grossereignissen. Andererseits sind zu viele Daten und Informationen, vor allem wenn deren Qualität unklar und die Unsicherheiten gross sind, heikel für die Entscheidungsfindung. Deshalb ist die rasche Beschaffung von zuverlässigen räumlichen Informationen sowohl für die Ereignisbewältigung als auch für die Ereignisanalyse und Wiederinstandstellung entscheidend. Nachfolgend wird auf Rapid Mapping und permanente Radarmessungen eingegangen.

3.2.1 Rapid Mapping

Um die zeitnahe Erfassung, Aufbereitung und Zurverfügungstellung von Geodaten, das sogenannte Rapid Mapping, sicherzustellen, wurden in Bondo bereits am Tag des Bergsturzes die ersten Befliegungsaufträge ausgelöst. Primäres Ziel war dabei, für die Ereignisbewältigung möglichst rasch einen Gesamtüberblick zu gewinnen. Nach der ersten Befliegung vom 25. August

2017 wurden bis Ende 2017 insgesamt drei weitere Befliegungen des Gesamtperimeters und fünf Befliegungen des Kegelbereichs durchgeführt. Dabei wurden Drohnen, Helikopter und Flächenflugzeuge mit optischen Kameras, Laserscannern und/oder Zeilensensoren eingesetzt. Aus den Aufnahmen wurden Schrägbilder, Orthofotos und digitale Geländemodelle erstellt (Abb. 12).

Rapid Mapping und Datenauswertung wurden von der kantonalen Fachstelle ausgelöst und vom Bund (BAFU, swisstopo) sowie beauftragten Firmen durchgeführt. Die Aufteilung der Befliegungen je nach Anforderungen und Aufnahmeintervall (Ereignisanalyse Gesamtperimeter vs. Instandstellung Kegelbereich) hat sich bewährt. Die Koordination wurde von einer Ansprechperson der Fachstelle wahrgenommen.

Bezüglich Produkten hat sich ein mehrstufiges Vorgehen bewährt. In der Akutphase der Ereignisbewältigung stand der Zeitfaktor im Vordergrund. Schrägbilder und Orthofotos mussten als Übersicht möglichst rasch verfügbar sein, die Genauigkeit war zweitrangig. Deshalb wurden in einem ersten Durchgang vereinfachte Orthofotos mit geringerer Qualität berechnet, welche rund einen Tag nach dem Flug verfügbar waren.

Orthofotos und digitale Geländemodelle als wesentliche Produkte für die Wiederinstandstellung, Ereignisanalyse und zukünftige Gefahrenbeurteilung stellen höhere Ansprüche an die Qualität, sind aber weniger zeitkritisch, wenn sie nicht für die aktuelle Gefahrenbeurteilung benötigt werden. Die aus den zu verschiedenen Zeitpunkten aufge-

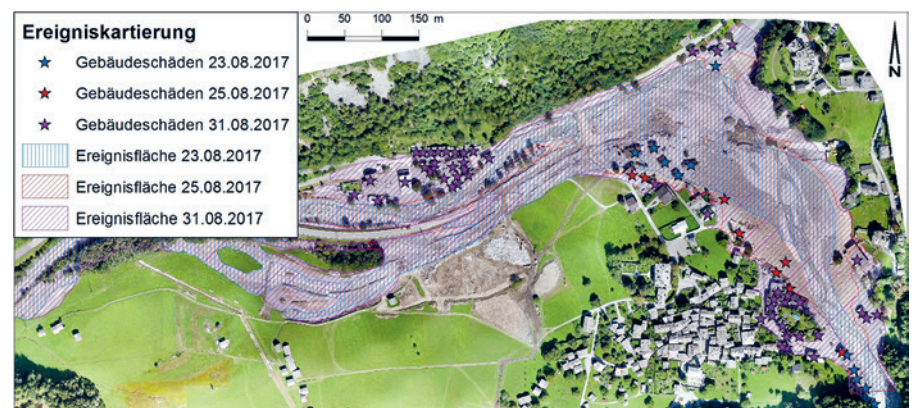


Abb. 12. Kartierung der Ereignisflächen und Gebäudeschäden für den 25.08.2017, 29.08.2017 und 31.08.2017 mittels den Produkten aus dem Rapid Mapping (Abb.: AWN).

nommenen Geländemodellen berechneten Massenbilanzen lassen Rückschlüsse zur Prozessausprägung (Ausbruchkubatur, Erosion, Ablagerung) zu und sind hilfreich für die Beurteilung des neuen Gefahrenpotenzials (Abb. 13). Herausfordernd ist dabei die Erstellung einer zuverlässigen Nullmessung als Vergleich mit dem Zustand vor dem Ereignis (ältere Daten, heterogene Quellen, dynamischer Raum, geringere Datenqualität).

Im Kontext der akuten Ereignisbewältigung in Bondo war die Daten-

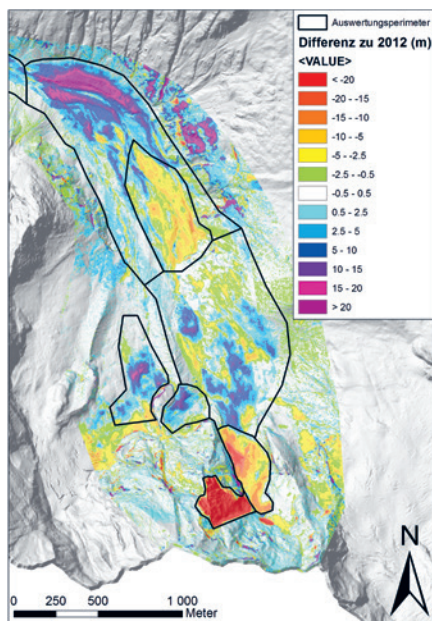
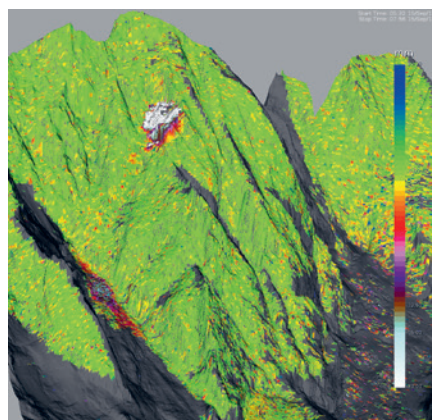


Abb. 13. Höhenänderung der Geländeoberfläche, Stand 25. August 2017, gegenüber dem 18. Juli 2012 zur Berechnung von Massenbilanzen. Die Daten sind ausserhalb des Auswertungspersimeters nicht korrigiert (Abb.: AWN).



erhebung aufgrund des sehr hohen Zeitdrucks und der dynamischen Ereignisentwicklung ein Wettlauf. Die alpine Lage mit schwierigen meteorologischen Bedingungen (Wetter, Sicht, Wind) und extremer Topographie (Höhendifferenz, Neigung, Nordexposition) sowie die Grösse des Gebiets boten weitere Herausforderungen. Hinsichtlich Datenvertrieb war sicherzustellen, dass verschiedene Anwender grosse Datenmengen trotz eingeschränkter Infrastruktur beziehen und nutzen konnten (cloud-Dienste, Map-services, GIS-Server).

Die Festlegung von Standardprodukten mit jeweiliger Datenqualität und Lieferfrist, die Klärung von Abläufen, Entscheidungswegen und Verantwortlichkeiten sowie die Sicherstellung von Datenvertrieb und Nutzung im Ernstfall sollten im Sinne einer Notfallplanung vorgängig sichergestellt werden.

3.2.2 Permanente Radarmessungen

Mit den permanenten Radarmessungen seit dem 4. September 2017 konnten zwischenzeitlich bereits mehrere, zum Teil grosse Felsstürze frühzeitig erkannt und der Absturzzeitpunkt etwa ein bis zwei Tage im Voraus bestimmt werden. Das bisher grösste Ereignis, ein Felssturz mit einem Volumen von rund 400 000 m³, ereignete sich am 15. September 2017. Die instabile Masse wurde seit Inbetriebnahme des permanenten Radars beobachtet, wobei zu Beginn noch unklar war, ob es sich um oberflächliche Erosionsprozesse handelt (bröckelnder Schutt) oder tatsächlich um eine instabile Fels-

masse. Am 13. September 2017 konnte dann zum ersten Mal eine Prognose über den möglichen Absturzzeitpunkt gemacht werden (Abb. 14).

Dank der permanenten Überwachung wurde weiter erkannt, dass sich eine nach dem Bergsturz vom 23. August 2017 verbliebene, mehrere Millionen m³ grosse instabile Masse nicht wie erwartet kontinuierlich und vor allem im Winterhalbjahr bewegt, sondern ruckweise während sehr kurzen Phasen im Sommer. Zudem wurde in zwei Phasen anschliessend eine vom Radar weg gerichtete Bewegung festgestellt. Diese «Rückwärtsbewegung» konnte mit einer zweiten, vom permanenten Radargerät unabhängigen periodischen Radarmessung bestätigt werden.

Beeinträchtigt werden die Messungen insbesondere durch Schnee und Eis sowie durch starke atmosphärische Störungen. Die Erfahrungen am Pizzo Cengalo haben aber gezeigt, dass die Verfügbarkeit zuverlässiger Daten gleichwohl sehr hoch ist. Allerdings sind die automatisierten Auswertungen und die Interpretation der Daten anspruchsvoll und sehr zeitaufwändig.

4 Ereignisbewältigung – Teil Wiederinstandstellung

4.1 Räumen – aber wie?

Jedem Projekt geht ein klares Endziel voraus, so auch bei der Räumung und Deponie des Murgangmaterials sowie

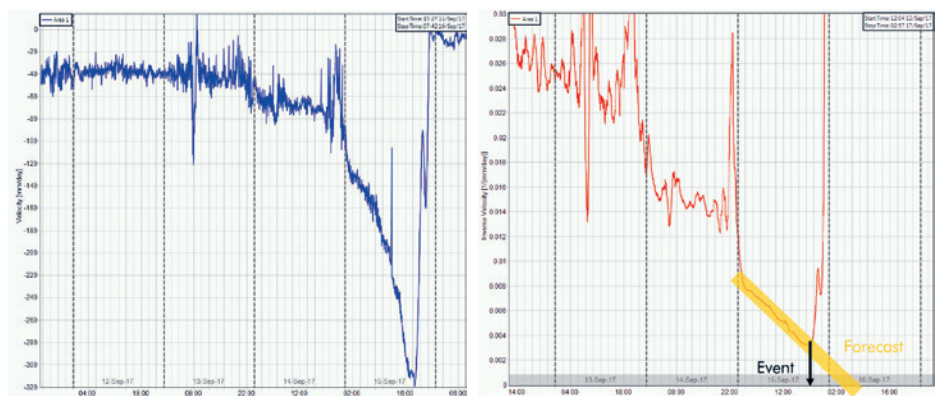


Abb. 14. Links: Instabile Felsmasse etwa 15 Stunden vor dem Absturz am 15. 09. 2017 (Nachsturz zum Ereignis vom 23. August 2017). Zum Zeitpunkt der Messung herrschten mit Regen und Schneefall sehr schlechte Messbedingungen; trotzdem war die Felsmasse sehr gut abgrenz- und die Bewegungsrate gut bestimmbar. Mitte: Mittlere Bewegungsrate der instabilen Felsmasse in mm/Tag. Rechts: Darstellung der inversen Geschwindigkeit (1/v). Eine verlässliche Prognose liess sich erst ca. ein Tag vor dem Absturz machen. Die Masse stürzte dann ein paar Stunden früher als erwartet in mehreren grossen Teilabbrüchen ab (alle Bilder: Geopraevent AG).



Abb. 15. Situation am 1. September 2017 nach dem letzten grossen Murgang vom 31.08.2017. Zu diesem Zeitpunkt lagen im und rund um das Becken von Bondo 490000 m³ Murgangmaterial (Foto: AWN).

der Wiederinstandstellung nach Grossereignissen. Etappenziele müssen dabei im Gesamtteam koordiniert, der anfänglich immer wieder sich ändernden Situation angepasst und letztlich über eine gewisse Zeit auch explizit im Sinne einer rollenden Planung definiert werden.

Wichtig ist, dass zwischen dem Gemeindeführungsstab und der Projektorganisation für die parallel verlaufende Räumung und Wiederinstandstellung eine institutionalisierte Schnittstelle besteht. Mit dem Einsitz des Gesamtprojektleiters der Wiederinstandstellung und dem Vorsteher des Bauamts im Führungsstab war in Bondo diese Koordination gewährleistet.

Die notwendigen baulichen Massnahmen sind aufgrund ihrer zeitlichen Dringlichkeit weder planbar, noch nach den geltenden Regeln der Submissionsgesetzgebung ordentlich ausschreibbar (Abb. 15). Gerade deshalb ist es wichtig, nach den folgenden, rein technischen Kriterien entsprechende Kapazitäten direkt aufzubieten:

- Technische Bedürfnisse respektive Leistungsfähigkeit: Im Fokus stehen dabei rein technische Aspekte zur Wahl von Maschinen. Dies gilt insbesondere für spezielle Maschinen (Bagger mit Tonnage grösser 50 t, spezielle Langarmbagger, ferngesteuerte Maschinen, Grösse der Dumper usw.).

- *Zeitlich/räumliche Verfügbarkeit:* die Verfügbarkeit wird in aufsteigender Reihenfolge und aus der Optik des Ereignisortes von lokal–regional–kantonal bis ausserkantonal abgeklärt.

Erst nach Abschluss der Ereignisphase und der einhergehenden Planbarkeit der anstehenden Arbeiten können die nächsten Bauphasen ordentlich nach den Regeln der Kunst und der Submissionsgesetzgebung durchgeführt werden.

4.2 Engpässe, Herausforderungen und Risiken

Die Koordination und Logistik einer Grossbaustelle ist besonders dann eine grosse Herausforderung, wenn nach wie vor die Gefahr weiterer Ereignisse besteht. Je nach Bedrohungslage werden entsprechende Sicherheitsvorkehrungen für das Personal getroffen. Der Verlust einer oder mehrerer (insbesondere ferngesteuerter) Maschinen wird zu diesem Zeitpunkt der Ereignisbewältigung bewusst in Kauf genommen.

Das Frühwarnsystem Bondo bestand in der Anfangsphase aus Wachposten der Feuerwehr, der Armee und des Forst-/Werkdienstes, die je nach Wetersituation eine Vorwarnzeit zwischen zwei und vier Minuten gewährleisten konnten. Bagger- und Dumperfahrer

wurden im Falle eines Ereignisses anfänglich von Zivilschutzdienstleistenden vor Ort direkt von Mann zu Mann gewarnt respektive aus dem Gefahrenbereich gewunken. Nach der Wiederinstandstellung und dem Ausbau des automatisierten Frühwarn- und Alarmsystems konnte bei jeder Wetterlage über 24 Stunden zuverlässig eine vierminütige Vorwarnzeit garantiert werden. Einhergehend wurden alle Personen im Gefahrenbereich mit Funk und Ohrhörer ausgestattet, damit sie bei erneuten Ereignissen direkt gewarnt werden konnten.

Die eigentliche Abtrags-, Transport- und Deponiekapazität korreliert nur bis zu einem gewissen Grad direkt mit der Anzahl Maschinen und deren Leistungsfähigkeit im Einsatz. Der Abbau des Murgangmaterials hat insofern Grenzen, als irgendwann die Baupisten respektive die Transportwege zu kurz und zu schmal sind, um überall zu kreuzen, die Abtragsorte bereits alle besetzt sind oder das Deponiegelände zu klein ist, als dass noch mehr Maschinen die Gesamtkapazität steigern könnten. Im Falle von Bondo waren es in den Spitzenzeiten 12 Bagger grösser 30 t und 15 Dumper mit Kapazitäten von 16 bis 24 m³, die im Einschichtbetrieb bis zu 8000 m³/Tag und im Zweischichtbetrieb etwas mehr als 15000 m³/20 h abtragen, transportieren und deponieren konnten (Abb. 16).

Der Zweischichtbetrieb wurde über 20 Stunden organisiert, die restlichen vier Stunden wurden für die Instandhaltung des Maschinenparks verwendet. Der Nachtschichtbetrieb setzt eine optimale Beleuchtung des Schadenplatzes voraus. Einerseits sollen die Leuchtmittel einen mehrere Hektaren grossen Raum optimal ausleuchten, andererseits ist bei der Platzierung der Leuchtmittel unbedingt zu beachten, dass sie keinen Maschinisten blenden, um Unfälle zu verhindern. Die zur Verfügung stehenden Maschinen und

technischen Hilfsmittel setzen entsprechend geschultes Personal auf Platz voraus, um einen effizienten Einsatz zu gewährleisten und die laufende Koordination vorzunehmen (Abb. 17).

Besondere Beachtung erfordert die Integration der Schweizer Armee bei baulichen Tätigkeiten. Hier sind prinzipiell Konkurrenzsituationen mit der Privatwirtschaft zu vermeiden, was aufgrund ihrer unterschiedlichen Maschinenpärke, Fähigkeiten und Kompetenzen in Bondo gut machbar war.

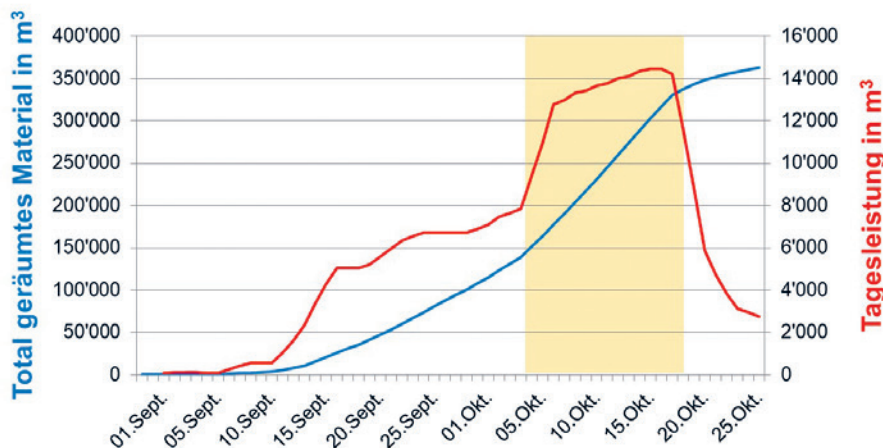


Abb. 16. Tagesleistung des abgetragenen, transportierten und deponierten Murgangmaterials in Bondo (rote Linie) sowie Verlauf des total geräumten Materials (blaue Linie) vom 29.08.2017–24.10.2017. Der gelb markierte Bereich zeigt den Zeitraum der Räumungsarbeiten im Zweischichtbetrieb (Abb.: AWN).



Abb. 17. Grossbetrieb im Hauptablagerungsgebiet Bondo–Auffangbecken. Dort war eine ständige Koordination durch Bodenpersonal vor Ort essenziell, um Unfälle zu vermeiden und eine bestmögliche Effizienz zu gewährleisten (Foto: AWN).

5 Stand heute und Ausblick

5.1 Risikomanagement unter neuen Rahmenbedingungen

Bereits 2012 bis 2017 durchlief man den Kreislauf des integralen Risikomanagements wegen Murgängen in Bondo zweimal (Abb. 3, Kap. 1.3), gefolgt von einem weiteren Durchgang 2017 mit der Ereignisbewältigung und Wiederinstandstellung der provisorischen Schutzbauten (Kap. 3 und 4). Kanton und Gemeinde stehen mit der Planung des neuen Schutzbauwerks vor einem erneuten Durchgang, jedoch mit völlig veränderten Rahmenbedingungen. Am Pizzo Cengalo kann ein erneuter Bergsturz in gleicher Grössenordnung nicht ausgeschlossen werden und in der Val Bondasca liegen seit den Ereignissen von 2017 Materialablagerungen von gegen 3 Mio. m³, deren Wassersättigung und somit deren Abgangsbereitschaft bei einem erneuten Sturz noch ungewiss sind. Eine Gefahrenkarte Wasser musste für die heutige Situation erstellt werden (beffa tognacca gmbh 2018), wozu verschiedene Vorstudien (u.a. ETH Zürich 2017, SLF 2018) einbezogen wurden (Abb. 18).

Die Methodik zur Erstellung einer Gefahrenkarte Wasser in Bondo stösst in verschiedener Hinsicht an Grenzen beziehungsweise ist für diese Rahmenbedingungen noch nicht gelöst. Zum einen waren die Eingangsgrössen teils nur mit sehr grossen Unsicherheiten abschätzbar oder es mussten zur Eintretenswahrscheinlichkeit nicht periodischer Ereignisse schlicht Annahmen getroffen werden. Zum andern führten nicht ausser Acht zu lassende Ereignisverkettungen zu einer Vielzahl von Szenarien, deren Aggregation zu Ereignissen mit einer 30-, 100- und 300-jährlichen «Wiederkehrdauer» für die Gefahrenkarte nur im Kontext mit den baulichen und organisatorischen Massnahmen zulässig waren. So musste zum Beispiel überlegt werden, ob das provisorische Auffangbecken zeitgerecht geräumt werden kann, wenn ein 100-jährliches Ereignis (als Kombination sehr vieler Szenarien) in sehr ungünstiger Abfolge eintreten wird. Zu entscheiden ist auch, welcher Teil des Risikos – basierend auf der aktuellen Gefahrenkarte – mit neuen Schutzbauten ab-

gedeckt werden kann, was noch organisatorisch bewältigt werden muss und welche Restrisiken verbleiben.

5.2 Ausblick und offene Fragen

Die alten Schutzbauten – soweit überhaupt möglich – wieder instandzusetzen ist das eine, den Blickwinkel zu öffnen und sich hinsichtlich einer neuen Schutzbautenkonzeption möglichst viele Optionen offen zu halten, das andere. Für Letzteres muss der Handlungsspielraum für die neuen Schutzbauten, Nutzungen und Erschliessungen und für die Aufwertung des Orts- und Landschaftsbildes verhandelt werden. Zudem sollte der Freiraum für künftige Ereignisse und deren Überlastfall möglichst gross sein. Dies erfordert Verzicht auf landwirtschaftliches Land oder gar Wohnraum. In Bondo durften in diesem Zusammenhang mehrere zerstörte und total beschädigte Gebäude nicht wieder aufgebaut werden. Auch mussten einige Gebäude mit Schäden abgerissen werden, um den notwendigen Freiraum für das Schutzkonzept zu sichern (Abb. 18). Dank sofortiger und intensiver Koordination von Gemeinde, Gebäudeversicherung und Dienststellen von Bund und Kanton konnte dieser Prozess zeitgerecht und bis anhin zielführend für eine wegweisende Gesamtlösung gesteuert und kommuniziert werden.

Gefahrenbeurteilung, Raumnutzung und Risikomanagement ergeben laufend neue Fragen, mit denen umgegangen und zu denen entschieden werden muss. Insbesondere für die Gefahrenbeurteilung von weiteren möglichen Sturzzenarien wurde ein nationales Expertenteam beauftragt, die Erfahrungen von Bergstürzen weltweit einzubeziehen, um den Stand des Wissens für die Modellierung sicherzustellen.

Offene Fragen, die heute anstehen, sind:

- Wie sind die im Sommer 2018 gemessenen, ruckartigen Bewegungen und die Rückwärtsbewegungen am Pizzo Cengalo zu erklären und wie kritisch sind sie bezüglich Absturzprognosen und Ausgestaltung des Frühwarndienstes?
- Wie ist der alleinige Einfluss der Wassersättigung der vorhandenen Sturzablagerungen (d.h. ohne

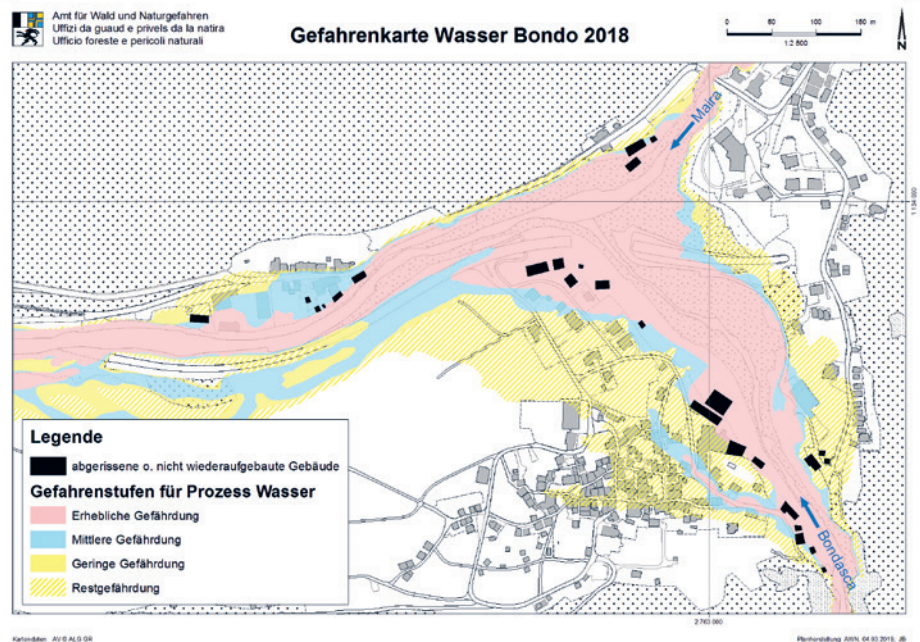


Abb. 18. Aktuelle Gefahrenkarte Wasser Bondo 2018 ohne Berücksichtigung der provisorisch wiederinstandgestellten Schutzbauten. Die Gefahrenbereiche sind durch die Bondasca und die Maira bedingt. Schwarz gekennzeichnet sind die Häuser, die infolge Totalschaden oder wegen Teilschaden und Platzbedarf für die neuen Schutzbauten abgerissen wurden oder ganz zerstört sind und nicht wiederaufgebaut wurden (Abb.: AWN).

weitere Wasserquellen wie erodierter Gletscher usw.) auf die Schuttstromentwicklung (Eintritt und Grösse) bei einem erneuten Bergsturz zu beurteilen?

- Welche Nutzungen sind in der Val Bondasca angemessen? Wie ist die öffentliche und private Zuständigkeit dazu abzugrenzen und welche Kommunikationserfordernisse ergeben sich daraus?
- Welche Anteile der gesamten Risiken in Bondo sind mit i) baulichen, ii) planerischen und iii) organisatorischen Mitteln zu bewältigen und welche verbleibenden Risiken sind im Sinne der Nachhaltigkeit zu tragen und zu kommunizieren?

Zur Beantwortung solcher Fragen ist die «Praxis» immer wieder auf bestmögliche Erkenntnisse aus der Wissenschaft im Sinne dieses Forums für Wissen angewiesen.

Dank

Wir danken unseren Vorgesetzten Reto Hefti und Urban Maissen für die durchgehende Unterstützung und Martin Keiser und Jann Brosi für die Beiträge zu diesem Artikel.

6 Literatur

- AMANN, F.; WALTER, F.; A.; KENNER, R.; PHILLIPS, M.; DE PREUX, A.; HUSS, M.; Tognacca, C.; CLINTON, J.; DIEHL, T.; BONANOMI, Y., 2019 (in review): Direct observation of massive rock slope collapse with initiation of almost immediate debris flow.
- AWN (Hrsg.) 2017: Kurzbericht der Expertengruppe zu den Ereignissen Cengalo/Bondo für die Medienkonferenz vom 15.12.2017. Amt für Wald und Naturgefahren AWN, 7 S. unter: https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/dokumentenliste_afw/20170828_Kurzbericht_Expertengruppe_20171215_dt.pdf, abgerufen am 15.02.2019.
- BAER, P.; HUGGEL, C.; MCARDILL, B.W.; FRANK, F., 2017: Changing debris flow activity after sudden sediment input: a case study from the Swiss Alps. *Geol. Today* 33, 6: 217–223.
- BAFU (Hrsg.) 2016: Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug. 1608: 98 S.
- beffa tognacca gmbh 2018: Gefahrenbeurteilung Murgang & Hochwasser Val Bondasca/Maira. Bericht zur Gefahrenkarte Wasser. 129 S. unter: <https://>

- www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/aktuelles/Seiten/20170828_BergsturzCengalo.aspx, abgerufen am 04.03.2019
- DE PREUX, A. 2014: Characterization of a large rock slope instability at Pizzo Cengalo (Switzerland): roles of structural pre-disposition and permafrost on stability, Master thesis, Department of Earth Sciences, ETH Zürich.
- ETH Zürich 2017: Vadrec dal Cengal Ost: Veränderungen in Vergangenheit und Zukunft. Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie VAW, 17 S. unter: https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/aktuelles/Seiten/20170828_BergsturzCengalo.aspx, abgerufen am 04.03.2019
- GRUNER, U.; LOUIS, K.; McARDELL, K., 2018: Bergstürze – Begriff, Ursachen und Einflussfaktoren, Prozessauslösung, Häufigkeit, Prozesskette und Umgang mit Bergsturzproblematik. Bull. Angew. Geol. 23/1: 7–18.
- HÄHLEN, N. 2018: Akute Gefahrensituationen – Entscheiden in besonderem Kontext. FAN Kursunterlagen, Herbstkurs 2018: Umgang mit akuten Gefahrensituationen. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN. 3–7.
- KENNER, R.; PHILLIPS, M., 2017: Fels- und Bergstürze in Permafrost Gebieten: Einflussfaktoren, Auslösemechanismen und Schlussfolgerungen für die Praxis. Schlussbericht Arge Alp Projekt, Einfluss von Permafrost auf Berg- und Felsstürze. 33 S. https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/aktuelles/Seiten/20170828_BergsturzCengalo.aspx, abgerufen am 04.03.2019
- MANI, P., 2016: Prozess- und Ereignisketten. FAN Kursunterlagen, Herbstkurs 2016: Veränderungen im Periglazial/Prozessketten. Fachleute Naturgefahren Schweiz FAN. 67–76.
- PETRAKOV, D.A.; CHERNOMORETS, S.S.; EVANS, S.G.; TUTUBALINA, O.V., 2008: Catastrophic glacial multi-phase mass movements: a special type of glacial hazard. Adv. Geosci. 14: 211–218.
- PLANAT (Hrsg.) 2004: Sicherheit vor Naturgefahren – Vision und Strategie. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT, Reihe 1/2004, Bundesamt für Bauten und Logistik / BBL, Bern.
- PLANAT (Hrsg.) 2013: Sicherheitsniveau für Naturgefahren. Bern, Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT. 15 S.
- SÄTTELE, M.; BRÜNDL, M., 2015: Praxishilfe für den Einsatz von Frühwarnsystemen für gravitative Naturgefahren, WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Bundesamt für Bevölkerungsschutz/BABS, Bern.
- SCHMID, S.M.; BERGER, A.; DAVIDSON, C.; GIERE, R.; HERMANN, J.; NIEVERGELT, P.; PUSCHNIG, A.R.; ROSENBERG, C., 1996: The Bergell pluton (Southern Switzerland, Northern Italy): overview accompanying a geological-tectonic map of the intrusion and surrounding country rocks. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt. 76: 329–355.
- SLF 2015: Einfluss des Hitzesommers 2015 auf Felsstürze, unter: <https://www.slf.ch/de/permafrost/permafrost-und-naturgefahren/einfluss-des-hitzesommers-2015-auf-felsstuerze.html>, abgerufen am 5.02.2019.
- SLF 2018: Modellierung des Cengalo Bergsturzes mit verschiedenen Rahmenbedingungen. Gutachten G 201720, WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 68 S. unter: https://www.gr.ch/DE/institutionen/verwaltung/bvfd/awn/aktuelles/Seiten/20170828_BergsturzCengalo.aspx, abgerufen am 04.03.2019
- TALEB, N.N., 2010: Der Schwarze Schwan – Die Macht höchst unwahrscheinlicher Ereignisse. Deutsche Gesamtausgabe, Pantheon 2018. 624 S.

Abstract

Rock fall Cengalo and Debris Flows Bondo: Insights from the Cantonal Authorities

Authorities

Between 23 and 31. August 2017 Piz Cengalo produced a massive rock fall, a dryer and more than 10 wet debris flows, which reached Bondo in the valley. This sequence of events was special in the sense that the three million metre cube rockfall transformed instantaneously into a massive debris flow, which globally has been very rarely observed previously. The rockfall left eight hikers missing. The debris flows brought in total 500'000 metres cube of material into the inhabited valley and caused serious damage on buildings and other infrastructure.

Two year after the event serious uncertainties remain regarding the causes and interconnections of the events. Available water in the trigger, the fall/slide and the deposit areas of a previous rock fall should have played a major role. This raised questions on the role of melting snow and ice and its connection to climate change. Such possible interconnections currently undergo careful scientific investigations.

We present insights on monitoring, risk assessment and post-event management from the view of the cantonal authorities. The multiple challenges show that it needs a well-coordinated team effort of federal, cantonal and municipal players to successfully manage such an extreme event.

Keywords: rock fall, debris flows, interconnections, Cengalo, Bondo, extreme events, risk assessment, post-event management

Umgang mit Hochwasserereignissen und die Lehren aus Sicht eines Kantons und des Bundes

Josef Eberli

Bundesamt für Umwelt BAFU, Worblentalstrasse 68, CH-3063 Ittigen, josef.eberli@bafu.admin.ch

Naturgefahrenereignisse betreffen die mit dem Vollzug der Gefahrenprävention beauftragten Organisationen unmittelbar. Sie sind einerseits in die Bewältigung der Ereignisse involviert und andererseits zeigen die Ereignisse auf, ob die bisherigen Vorstellungen, Beurteilungen und Massnahmen adäquat und hinreichend sind. Die Vollzugsorganisationen von Bund und Kanton haben unterschiedliche Rollen und Aufgaben. Im Beitrag werden wichtige Ereignisse der letzten Jahrzehnte und daraus erfolgte Lehren sowie Anpassungen und Entwicklungen aus der Sicht des Kantons Nidwalden und des Bundes aufgezeigt. Im Weiteren werden die gegenseitigen Beeinflussungen zwischen Kanton und Bund, sowie die Verbreitung der Erfahrungen betrachtet. Schliesslich werden Erfolgsfaktoren und Grenzen sowie Verbesserungsmöglichkeiten und Herausforderungen erörtert.

1 Übersicht

In den nachfolgenden Abbildungen 1 und 2 sind die wesentlichen Ereignisse des Beispielkantons Nidwalden und des Bundes dargestellt. Sie umfassen jeweils den Zeitraum vom Ende des 19. Jahrhunderts bis heute. Den Ereignissen sind die jeweiligen Lehren daraus respektive die erfolgten Anpassungen und Entwicklungen zugeordnet. Dabei

Kantonale Lehren aus Ereignissen	Sperrentreppen Aufforstungen Rutschungsentwässerungen Aufhebung landw. Nutzung	1910-1940 Ausbau Engelberger Aa	Stollen mit Drainageschirm	Geomorph. Karten Generelle Projekte: - Geschiebe / Sammler - Verst. Überfallsektion - Erweiterung	Risikokataster 2002 (KATAPLAN) E Notfallplanungen NG Übergangsorganisation lokale NG-Berater Langzeitgeschiebetrieb GK Rutschungen
Ereignisse	é RP _B Wildbäche, Rutschungen	é See Überschwemmung Engelberger Aa	é RP _B	é Steinschlag 84 Wildbäche	é RP _B 800 RS See, Aa RP _B
Entwicklungen ohne kant. Ereignisse	1883 (19Jh)	1910	1972	1979, 80,81, 83,84	1999 2005 2013
Abkürzungen: E'Aa: Engelberger Aa GFZ: Gefahrenzonen GK: Gefahrenkarten GP: Generelles Projekt NG: Naturgefahren RP _B : Beschleunigte permanente Rutschung RS: Spontane Rutschungen	Integralprojekte Ing.-Biologie Naturerschutz 1991 Ausbau E'Aa (Schadenpot.) 1995-97 GK 1.Generation 1998 raumpl. Umsetzung (GFZ und Objektschutz) 1998-06 GK 2.Generation ab 1998 Revision GP Wildbäche - Systemsicherheit (Überlast) - Wirtschaftlichkeit - Geschiedurchgängigkeit - Ökologie ab 2004 Risikoübersicht ab 2013 Strategie ab 2014 Gesetz				

Abb. 1. Ereignisse (blau) in Nidwalden mit Lehren daraus (grün) und Entwicklungen, die nicht durch kantonale Ereignisse, sondern aufgrund anderer Beeinflussungen, initiiert wurden (gelb).

Schweizerische Lehren aus Ereignissen	Berichte: - Gebirgswaldungen (1862) - Wildbäche im Gebirge (1864) 1874 Bundesverfassung Art. 24 1876 Forstpolizeigesetz 1877 Wasserpolizeigesetz	(nicht ermittelt)	Ereignisanalyse Differenzierter HWS / IRM / Strat.PLANAT Paradigmawechsel 1991 Wasserbaugesetz - Gefahrenkarten - raumpl. Tätigkeiten Ereignisanalysen OWARNA lokale NG-Berater Rapid Mapping
Ereignisse	é (19Jh)	1910	é 1987 1999 2005 2007 2013 2014

Abkürzungen:
HWS: Hochwasserschutz
IRM: Integrales Risikomanagement

PLANAT: Ausserparlamentarische Kommission Plattform Naturgefahren
OWARAN: Optimierung der Warnung und Alarmierung vor Naturgefahren

NG: Naturgefahren

Abb. 2. Bedeutende Hochwasserereignisse in der Schweiz (blau) mit schweizweiten Lehren daraus und deren Weiterentwicklungen (grün).

gilt es zu beachten, dass Anpassungen zwar durch Ereignisse initiiert werden, der inhaltliche Ursprung der Anpassungen aber aus verschiedenen Quellen stammen kann.

Der Vergleich von Kanton und Bund zeigt, dass die Ereignisperioden zeitgleich sind. Die einzelnen Ereignisse innerhalb der Ereignisperioden sind jedoch nur vereinzelt deckungsgleich. Es sind die grossflächigen Niederschläge von 1910 und 2005 am Alpennordrand, welche sowohl für Nidwalden als auch für die Schweiz von Bedeutung sind. In Nidwalden waren aber auch lokale Gewitterereignisse wie jene von 1979 bis 1984 Auslöser von kantonalen Anpassungen und Entwicklungen.

Die Gegenüberstellung zeigt die unterschiedlichen Anpassungen und Entwicklungen beim Kanton und beim Bund, sie verdeutlicht aber auch die gegenseitige Beeinflussung.

2 Ereignisse und Lehren im Kanton Nidwalden

Die ausserordentlichen Ereignisse im 19. Jahrhundert waren sowohl auf Bundesebene wie auch auf kantonaler Ebene Auslöser für umfangreiche Verbauungen. Das einschneidende Ereignis von 1883 in Nidwalden geschah jedoch erst nach den vielen verschiedenen Ereignissen die zur ersten schweizweiten Erhebung der Wildbäche im Gebirge führten. Die Berichte «Gebirgswaldungen» und «Wildbäche im Gebirge» mündeten im Bundesver-

fassungsartikel von 1874 und im Forst- und Wasserpolizeigesetz (1877). Für die Entstehung des Bundesverfassungsartikels zu Naturgefahren und dem Forst- und Wasserpolizeigesetz waren neben den Ereignissen im Gebirge aber auch die politischen Bestrebungen, dass sich der Bund an den grossen Gewässerkorrekturen beteiligt, massgebend.

Die Ereignisse in Kombination mit dem neu geschaffenen Verbund im Waldbau und Wasserbau führten zu umfangreichen Massnahmen der Gefahrenabwehr. Neben Aufforstungen, Rutschungsentwässerungen und Verbauungen der Wildbäche mit Sperren zur Reduktion der Erosion und damit des Geschiebetransportes erfolgten bereits auch planerische Massnahmen, indem in Rutschgebieten die landwirtschaftliche Nutzung hoheitlich aufgehoben und diese Gebiete aufgeforstet wurden. Andererseits gerieten mit der neuen schweizerischen Naturgefahrengesetzgebung die planerischen Massnahmen der Banngebiete in Vergessenheit.

Die Wildbachverbauungen in Nidwalden wurden rund hundert Jahre nach dem Bau bei den Gewitterereignissen von 1979, 1980, 1981, 1983 und 1984 intensiv beansprucht und teilweise zerstört. Auf den Schwemmkegeln wurde viel Geschiebe abgelagert. Die Lehren daraus waren, dass die Sperren neu in Eisenbeton erstellt und tiefer in den Kolk eingebunden wurden. Zur Verstärkung der Überfallsektionen wurden verschiedene Methoden evaluiert. Die Geschiebeproblematik wurde systematisch mit Einzugsgebietsanalysen und mit Gesamtlösungen

als Integralprojekte für das jeweilige Einzugsgebiet angegangen. Als Lehre aus dem hohen Geschiebeeintrag wurden neu Geschiebesammler gebaut (Abb. 3). Zur Instandstellung und Erweiterung der Sperrentreppen wurden Langzeitprogramme erstellt. Diese Massnahmen wurden kombiniert mit umfangreichen forstlichen Massnahmen zur Rutschungsstabilisierung. Die Massnahmen blieben, dem Zeitgeist folgend, weitgehend auf die Gefahrenabwehr beschränkt. Die Anpassungen erfolgten durch konzeptionelle und technische Verbesserungen und durch höheren Mitteleinsatz in die traditionelle Sperrentechnik.

Dem Blockschlag von 1984 an der Autobahn A2 beim Lopper begegnete man dagegen mit einer Anpassung der Nutzung und nicht mit Gefahrenabwehr. Beim Ereignis 1984 war das erste Autobahnteilstück der Schweiz zwar nur für wenige Stunden unterbrochen und Personen kamen nicht zu Schaden. Die Ereignisanalyse zeigte jedoch, dass ein Blockschlag auf den Viadukt die wichtigste Nordsüdverbindung der Schweiz für Monate ausser Betrieb setzen würde. Deshalb wurde die Autobahn als Tunnel in den Berg verschoben und damit die Nutzung aus dem Gefahrenbereich genommen.

Das Ereignis 1987 berührte Nidwalden nur am Rande. Der Paradigmawechsel, den das Ereignis auf Bundesebene auslöste, wurde jedoch auch in Nidwalden adaptiert und löste zahlreiche Anpassungen aus. Die Risikobetrachtung zeigte am Beispiel der Engelberger Aa, dass sich das Schadenpotenzial seit dem Ereignis von 1910



Abb. 3. Geschiebesammler Steinibach Dallenwil 1982–84. Foto: GHO-Geschiebemessnetz-Dokumentation.

aufgrund der Siedlungsentwicklung um den Faktor 20 erhöht hatte. Obwohl die Engelberger Aa seit dem Ausbau von 1910 bis 1940 nie über die Ufer getreten war, wurde 1991 ein Ausbauprojekt in Angriff genommen. Im Ausbauprojekt wurde die Idee des differenzierten Hochwasserschutzkonzeptes mitentwickelt. Der differenzierte Hochwasserschutz ersetzt das Dimensionierungshochwasser durch unterschiedliche Schutzziele für verschiedene Objektarten unterschiedlicher Schadensempfindlichkeit. Damit wird erstmals das Risiko indirekt berücksichtigt und der Überlastfall mit möglichst geringem Schadenarm bewältigt. Die zentrale Herausforderung des Projektes war, eine aus Sicht des Bürgers bewährte Verbauung ohne Schadenereignis und allein wegen des Risikos auszubauen, sowie das Gewässer ökologisch aufzuwerten. Hier liegt ein wesentlicher Unterschied in den Randbedingungen von Bund und Kantonen. Im Gegensatz zum Bund können auf kantonaler Ebene grössere Anpassungen nicht direkt lanciert werden, sondern sie müssen vom Volk genehmigt werden. Deshalb wurde die Planung der Engelberger Aa mit intensiver Öffentlichkeitsarbeit begleitet.

Die schweizerischen Entwicklungen führten dazu, dass die generellen Projekte der Wildbäche in Nidwalden ab 1998 überarbeitet und dabei die Elemente Systemsicherheit (Überlast), Ökologie, Geschiebedurchgängigkeit und Wirtschaftlichkeit integriert wurden. Die Gefahrenkarten der ersten Generation wurden in den Jahren 1995-1997 erstellt und von 1998 an bei Baubewilligungen berücksichtigt, sowie bei den Nutzungsplanungsrevisionen umgesetzt.

Das Ereignis von 2005 brachte ergänzende Erkenntnisse in der Gefahrenbeurteilung. Der grossräumige Niederschlag führte in den Wildbächen zu relativ geringen Abflussspitzen. In grösseren Wildbächen erzeugten diese Abflüsse aber einen kontinuierlichen Geschiebetrieb, welcher über drei Tage erhebliche Geschiebmassen transportierte (Abb. 4). Das Szenario «Langzeitgeschiebetrieb» wurde deshalb in die Gefahrenbeurteilungen von grösseren Wildbächen aufgenommen.

Die Gefahrenkarten wurden anhand der Ereignisanalyse systematisch über-



Abb. 4. Erhebliches Geschiebevolumen durch «Langzeitgeschiebetrieb» bei flächigem Niederschlag während 3 Tagen beim Wildbach Buholzbach 2005. Foto: Flugwaffe 2005.



Abb. 5. Eine Verfüllung der Engelberger Aa mit Geschiebe während des Ereignisses 2005. Foto: Fotosammlung Tiefbauamt NW.

prüft. Es zeigte sich, dass die Intensitätskarten die Prozesse in Bezug auf Intensität und Ausdehnung sehr gut abbildeten, was insbesondere auch von der Bevölkerung oft mit Bewunderung festgestellt wurde. Die Ausnahme bildeten die Intensitätskarten der spontanen Rutschungen. Diese mussten durchgehend im Auslaufbereich der Rutschungen verlängert werden und teilweise musste die Breite der Rutschungsgebiete angepasst werden.

Bei den technischen Verbauungen zeigte sich kein Anpassungsbedarf. Dies obwohl in der Engelberger Aa auf den 25 km Länge 250 000 m³ Geschiebe mobilisiert wurden (Abb. 5). Dieses Volumen lag damit um eine Grössenordnung höher, als in der Studie der VAW zum Projekt berechnet worden war. Die in Bezug auf Geschiebe besonders kritischen Entlastungen wurden deshalb in neuen Modellierungen nochmals eingehend analysiert. Es

zeigte sich aber, dass die realisierten Entlastungen hinreichend robust ausgelegt worden waren, und auch bei erheblich höheren Belastungen ihre Wirkung gewährleisten. Andererseits sensibilisierte diese Erfahrung für die hohe Bedeutung der Geschiebezäsuren unterhalb von Entlastungen.

Lehren zur Notfallorganisation

Die Ereignisse von 1999 mit Lawinewinter, Seehochwasser, beschleunigter Grossrutschung Ischenwald und Sturm Lothar waren der Start von verschiedenen Anpassungen im Notfallmanagement. Die standardmässig nach jedem Einsatz erstellten Ereignisanalysen der Notfallorganisationen zeigten den Handlungsbedarf auf. Die überkommunalen Ereignisse, das hohe und langzeitige Aufgebot an Einsatzkräften und die teilweise Überforderung von Gemeindeführungsstäben führten zu Massnahmen in den Notfallorganisationen. Der Einbezug des Überlastfalles bei den technischen Anlagen und die Ausrichtung auf die Risikoreduktion erforderten ebenfalls Anpassungen auf der organisatorischen Seite. Als zentrale Massnahme wurde bis 2002 der Risikokataster erstellt (entspricht späterem KATAPLAN auf Bundesebene). Für ein besseres Zusammenwirken von kantonalen und kommunalen

Einsatzkräften wurde die Rechtsgrundlage angepasst, sodass auch ohne Ausrufung des Notstandes der Kantonale Führungsstab mit den entsprechenden Kompetenzen im Verbund arbeiten kann. Auf dieser Basis wurden im zweiten Schritt die Notfallplanungen konzeptionell neu aufgestellt und gemäss Risikokataster systematisch erarbeitet. Der Mehrwert der neuen Notfallplanungen zeigte sich beim Ereignis 2005 so deutlich, dass die restlichen Notfallplanungen mit viel Elan fertig gestellt wurden.

Die in der Schweiz meist als Miliz organisierte Notfallorganisation tritt dann in Aktion, wenn die professionellen Stammorganisationen (Ämter, Gemeinden, Unternehmungen, Infrastrukturbetriebe, usw.) ein Ereignis nicht mehr zu bewältigen vermögen. Neben den Milizeinsatzkräften wie Feuerwehr (Abb. 6) und Zivildienst, sind auch die Führungsstäbe als Miliz organisiert. Der wichtigste Grundsatz einer funktionierenden und schlagkräftigen Notfallorganisation besteht deshalb darin, die Wissens- und Entscheidungsträger der Stammorganisationen in den Führungsstab zu integrieren. Dies hat zudem den Vorteil, dass bei Einsatzende der Notfallorganisation das Wissen in die öffentlichen Stammorganisationen übergeht, welche die Instandstellung und Regeneration weiterführen. Andererseits führt diese Per-

sonalunion zu sehr hoher zeitlicher Belastung der Betroffenen. Dabei ist der Übergang von der Intervention zur Instandstellung mit der Aufhebung der Notfallorganisation am schwierigsten zu meistern. Einerseits reduziert sich dabei der Personalbestand um ein Vielfaches und andererseits lassen sich in der Praxis die Phasen Intervention, Instandstellung und Folgeprojekte zeitlich nicht trennen. Beispielsweise bedingt eine zielführende Instandstellung, dass die Folgeprojekte während der Interventionsphase bereits als Projektskizzen vorliegen. Nur so gelingt es, die Sofortmassnahmen in das spätere Gesamtprojekt zu integrieren und auszulassende Instandstellungsmassnahmen festzulegen, um den Raum für spätere Projekte frei zu halten. Als Lehre aus den Ereignissen wurde eine Übergangsorganisation zwischen Intervention und Instandstellung aufgebaut und der Kantonale Führungsstab entsprechend angepasst.

Aufgrund des Risikokatasters und der Notfallplanungen wurden die Naturgefahrenspezialisten im Kantonalen Führungsstab verstärkt. Neben der Führung wurden eine Ereignisdokumentationsgruppe, eine Prognosegruppe und ein Fachkräfte-Pool gebildet. Die Bildung der Ereignisdokumentationsgruppe hat den Vorteil, dass eine selbstorganisierte und freigestellte Dokumentationsgruppe, die von Beginn an das Ereignis und dessen Entwicklung dokumentiert, sofort aufgeboten werden kann. Diese neue Organisation hat sich beim Ereignis 2005 bewährt. Das grossflächige Ereignis zeigte jedoch das verbliebene Defizit an Naturgefahrenfachleuten in den Gemeindeführungsstäben deutlich auf. In Folge dieses Ereignisses wurden deshalb Berater Naturgefahren in den Gemeindeführungsstäben eingesetzt. Diese Erkenntnis mehrerer Kantone wurde auch in der Ereignisanalyse des Bundes behandelt. Als Lehre daraus wurden auf Bundesebene die Ausbildung und das Schulungsmaterial für die kantonalen Koordinatoren und für die Ausbilder der lokalen Naturgefahrenberater organisiert.

Beim Ereignis 2005 bestand OWARNA (Optimierung der Warnung und Alarmierung bei Naturgefahren, koordiniert zwischen Bund und Kantonen) noch nicht. Im Naturge-



Abb. 6. Strassenposten der Milizfeuerwehr und Passant an der Kantonsstrasse in Oberriedenbach, Nidwalden, während eines Murgangs am Haldibach 2005. Foto: Fotosammlung Tiefbauamt NW.

fahrenbereich waren die Kantone mit Ausnahme der Hilfestellung durch das Bundesamt für Bevölkerungsschutz (BABS) und die Armee auf sich gestellt. Während dem Ereignis 2005 hat aber das BAFU eine ad hoc Unterstützung organisiert, welche für die Kantone sehr hilfreich war. Insbesondere die Koordination der möglichen finanziellen Hilfeleistungen seitens der verschiedenen Bundesämter erleichterte die Arbeit auf kantonaler Stufe sehr. Besonders wertvoll waren auch die Schadenbilder der Luftwaffe, sowie die Organisation von Laserscanningdaten.

3 Erkenntnisse und Lehren beim Bund

Das Ereignis von 1987, das erste grosse Ereignis nach einer Ereignispause von rund 70 Jahren, löste auf Bundesebene den Paradigmawechsel im Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz aus. Die Lehren aus diesem Ereignis wurden umfassend gezogen. Der Prozess führte vom Dimensionierungshochwasser über den differenzierten Hochwasserschutz zum Integralen Risikomanagement. Es wurde erkannt, dass der Umgang mit den Naturgefahren nicht nur mit einer Verstärkung der Gefahrenabwehr, sondern auch mit Massnahmen auf der Seite der stark wachsenden Nutzung gekoppelt werden muss, um das Risiko effektiv zu begrenzen. Der erste Meilenstein war das neue Wasserbaugesetz von 1991 mit der Einführung der Gefahrenkarten und der Vorschrift, die Gefahren bei den raumwirksamen Tätigkeiten zu berücksichtigen. Es folgten verschiedene Publikationen, wie die Empfehlung zu Gefahrenkarten und raumplanerischer Umsetzung 1997 [10] und die Strategie PLANAT 2004/2018 [13] [14].

Seit der Einführung von Ereignisanalysen bei grossen Ereignissen für alle betroffenen Gebiete der Schweiz und lokaler Ereignisanalysen sowie der Einführung des Ereigniskatasters StorMe werden die Ereignisse und die Lehren daraus systematisch erfasst. Die umfassendste Ereignisanalyse entstand zum Ereignis 2005 und stellt mit den fundierten Beiträgen verschiedenster Autoren und der Einbettung aller Bereiche des IRM eine wertvolle

Grundlage dar [1] [2]. Die in der Ereignisanalyse festgehaltenen Massnahmen auf Stufe Bund sind in der Zwischenzeit umgesetzt. Dies zeigt, dass Erkenntnisse aus Ereignissen stringent in die Weiterentwicklungsprozesse einfließen.

Beim Ereignis 2005 wurde erkannt, dass insbesondere in der Vorsorge, Alarmierung und Intervention noch Lücken zu schliessen sind. Im Rahmen des Projekts OWARNA (Optimierung der Warnung und Alarmierung) [6] [7] wurde inzwischen auf Bundesebene die Warnung und Alarmierung vor Naturgefahren aufgebaut.

4 Folgerungen

Unmittelbare Anpassungen

Die Erfahrung zeigt, dass aus den Ereignissen vielfältig Lehren gezogen werden. Dies erfolgt sowohl auf Stufe Kanton, wie auch auf Stufe Bund. Die limitierten Personalressourcen setzen verschiedentlich Grenzen bei der Bewältigung von Naturereignissen. Durch die Konzentration der Ressourcen auf die Intervention und Instandstellungsmassnahmen, steht für vertiefte Analysen kaum Zeit zur Verfügung. Die Lehren werden in der Folge situativ gezogen und die Anpassungen unmittelbar vor Ort erfolgreich umgesetzt. Diese Anpassungen erfolgen meist bei einfachen Sachverhalten, wie der Aufnahme des Szenarios «Langzeitgeschiebetrüb» bei Wildbächen. Sie erfolgt aber auch bei komplexeren Sachverhalten. Beispielsweise wurde an einer Begehung für mögliche Ablagerungsstandorte von Murgangmaterial vor Ort entschieden, das Murgangmaterial für den Bau von Ablenkdammen und Schutzdammen für Gebäude sowie für eine grossräumige Neugestaltung des Geländes zum Schutz vor weiteren Murgängen zu verwenden. Die Umgestaltung machte den Ablagerungsstandort hinfällig und ersetzte den geplanten Geschiebesammler. Damit war in drei Stunden ein neues Konzept zum Umgang mit grossvolumigen Murgängen (250000 m³) entstanden (Abb. 7). Situative Lehren sind aber subjektiv, schwer vermittelbar und wissenschaftlich nicht

verwendbar. Dies ist wohl ein zentraler Grund, weshalb sich lokale Lehren kaum schweizweit verbreiten. Sie werden nur teilweise von einzelnen Praktikern in anderen Kantonen adaptiert.

Entwicklungen

Neben den unmittelbaren Anpassungen erfolgen konzeptionelle und strategische Anpassungen über einen Entwicklungsprozess. Dieser erfolgt in der Regel über Schritte wie Analysen, Folgerungen, konzeptionelle Neuentwicklungen bis hin zu neuen Methoden und Umsetzungen. Bei diesen Entwicklungsprozessen ist das Ereignis lediglich der Anstoss und die Abwicklung erfordert ein längeres Engagement. Dabei werden meist auch andere Aspekte und Entwicklungen aufgenommen. Als Beispiel auf kantonaler Seite kann hier der Prozess zur Änderung des Umgangs mit dem Geschiebe erwähnt werden, welcher in Nidwalden über eine umfassende Situationsanalyse des Einzugsgebietes zu neukonzeptionierten Projekten über die ganzen Einzugsgebiete erfolgte. Beim Bund hat beispielsweise das Ereignis 1987 über mehrere Jahre letztlich zur Entwicklung des Integralen Risikomanagements (IRM) geführt.

Entwicklungen ohne Ereignisse

Die Entwicklungen im Kanton Nidwalden zeigen auch, dass neue Strategien und Methoden des Bundes auf kantonaler Seite übernommen werden und einen hohen Anteil der Anpassungen ausmachen. Wie bereits erwähnt, erfolgt die Adaption in umgekehrtem Sinne kaum, wenn auch durch den sehr engen Kontakt über die Verbundaufgabe beispielsweise Projekte wie die Engelberger Aa oder die Urner Reuss die Entwicklung des differenzierten Hochwasserschutzes und des IRM mitbeeinflussen. Die einseitige Adaption setzt den Kantonen Grenzen bei der Innovation. Es besteht insbesondere bei grundeigentümergebundenen Lösungen die Gefahr, dass später schweizweit andere Lösungen umgesetzt werden, wodurch die lokale Lösung politisch inakzeptabel würde.

Lehren aus Ereignissen und Entwicklungen auf Stufe Bund

Der Bund ist mit Ausnahme der heutigen Warnung und Alarmierung nicht unmittelbar in die Ereignisbewältigung involviert. Durch die enge Zusammenarbeit im Verbund sind der Austausch und damit die Auseinandersetzung mit den Ereignissen dennoch hoch. Die Entwicklungen, die auf Bundesebene aus dem Ereignis von 1987 gezogen wurden, zeigen eindrücklich, dass auch auf Bundesebene die Lehren aus Ereignissen gezogen werden. Der Paradigmawechsel nach rund hundert Jahren gefestigter Praxis im Umgang mit Naturgefahren verdeutlicht aber auch, dass einerseits Ereignisse wichtige Auslöser von Veränderungen sind und andererseits, dass eine selbstkritische Offenheit der Verantwortlichen notwendig ist, um konsequent Lehren zu ziehen. Nur dank der damals offen formulierten selbstkritischen Frage: «Hat der Hochwasserschutz versagt» und dem konsequenten Bemühen, den Hochwasserschutz zu verbessern, wurde das umfassende Lernen aus dem Ereignis 1987 und die Entwicklung des

IRM ermöglicht. Mit den institutionalisierten Ereignisanalysen, die ein wichtiges Element des IRM sind, ist heute sichergestellt, dass auch zukünftig aus den Ereignissen systematisch die Lehren gezogen werden.

Einbindung der Forschung

Ein 2005 nicht gelöstes Problem im Zusammenhang mit der hohen Auslastung der Naturgefahrenfachpersonen war auf Stufe Kanton die Zusammenarbeit mit der Forschung. Dank der Forschung können vertiefte Erkenntnisse aus den Ereignissen gewonnen werden. Die Forschungen setzen meist zu einem Zeitpunkt ein, bei dem die Spuren der Ereignisse beseitigt sind. Die Datenbasis aus den Ereignisdokumentationen ist für die spezifischen Forschungsarbeiten meist nicht hinreichend und es fehlt an Kapazität der kantonalen Wissensträger, um die erforderlichen Daten aus Journalen, aus Fuhrscheinen, von anderen Wissensträgern, etc. zusammenzutragen. Ebenso fehlt die Kapazität um Forschungsarbeiten begleiten zu können.

Neue Erkenntnisse und ändernde Rahmenbedingungen

Ereignisse bringen immer wieder neue Erkenntnisse. Dies nicht nur durch neu beobachtete Phänomene wie ausserordentliche statistische Ausreisser oder unerwartete Prozesskombinationen, sondern auch in Bezug auf die geänderten Rahmenbedingungen und Möglichkeiten. Die Hydrologie beispielsweise hatte vor dem Ereignis 2005 die neue Technik des Internets genutzt, um die Abflussmessungen nicht mehr nur in statistischen Jahrbüchern zu publizieren, sondern die Pegel online zur Verfügung zu stellen. Das grossflächige Ereignis von 2005 führte jedoch zu so vielen Abfragen, dass das System zusammenbrach und den Einsatzorganisationen nicht mehr zur Verfügung stand. Es wurde erkannt, dass für den Ereignisfall eine hohe Verfügbarkeit gewährleistet sein muss.

Geänderte Rahmenbedingungen ermöglichen positive Veränderungen wie im Beispiel der Optimierung der Warnung und Alarmierung (OWARNA). Die gemeinsame Informationsplattform Naturgefahren (GIN) war erst um



Abb. 7 Murgangablagerungen von insgesamt 250000 m³ mit Block aus Murgang von rund 1000 t am Haldibach in Oberrickenbach.
Foto: Fotosammlung Tiefbauamt NW.

2005 möglich, weil die Technik zur Online-Datenübertragung und Massendatenverarbeitung erst neu entstanden war. Die mit OWARNA vorgesehene Alarmierung via SMS ist in der Zwischenzeit bereits von der bildübertragenden Smartphone-Technik abgelöst worden. Dank Smartphones entstehen heute sehr viele Bilder und Videoaufnahmen. Die systematische Nutzung dieser Informationen bei Ereignissen steht noch aus.

Möglichkeiten der Datenerhebung

Die vom BAFU 2005 ad hoc organisierten Flugwaffenaufnahmen und Laserscanningflüge waren sehr wertvolle Grundlagen zur Lageerfassung, Ereignisdokumentation und für die Analysen. Das daraus entwickelte Rapid Mapping des BAFU ist eine wichtige Weiterentwicklung, welche die Kantone und die Forschung in Zukunft wesentlich unterstützen kann. Hier besteht die Herausforderung, die neuen technischen Möglichkeiten laufend einzubeziehen. Die Nutzung der Satelliten eröffnet neue Möglichkeiten, wie die Ereignisanalyse der Lawinensituation Januar 2018 zeigt. Durch wetterunabhängige Aufnahmemöglichkeiten sowie sinkende Kosten wird es möglich, mehrere Aufnahmen während des Ereignisverlaufs vorzunehmen. Dies gestattet, den Prozessverlauf nachträglich dokumentieren und analysieren zu können. Die schnelle Erfassung und Aufbereitung bringt auch eine wesentliche Entlastung für die Einsatzkräfte in der Lageerfassung und verbessert dadurch die Einsatzqualität.

Aufrechterhaltung und Weitergabe

Die stetige Entwicklung, welche sich aus den Lehren ergeben hat, führt zu einem zunehmend komplexeren System im Umgang mit Ereignissen. Daraus ergeben sich Herausforderungen in Bezug auf die Aufrechterhaltung des Systems und die Gewährleistung der Einsatzbereitschaft. Gleichzeitig gilt es die Errungenschaften und die Erfahrungen aus den Ereignissen an die nächste Generation weiter zu geben. Die heute auszubildenden Naturgefahrenfachpersonen haben die lehrreichen

Ereignisse nicht bewusst erlebt. Es ist eine Herausforderung diese Erfahrungen und Lehren in die Aus- und Weiterbildung einfließen zu lassen. Die Fachverbände KOHS und FAN leisten dazu mit ihren Weiterbildungskursen einen wichtigen Beitrag.

Nach dem Ereignis ist vor dem Ereignis

Aus den vergangenen Ereignissen wurden viele Lehren gezogen. Insbesondere auch die Ereignisbewältigung ist

dank Ereignisanalysen, OWARNA und Notfallplanungen heute wesentlich besser aufgestellt. Die etablierten Übungen auf Kantons- und Bundesebene gewährleisten, dass die Errungenschaften über die Zeit und über Personalwechsel hinweg erhalten bleiben. Die Erfahrung hat gezeigt, dass oft erst beim nächsten Ereignis erkannt wird, welche Entwicklungen hätten integriert werden müssen, um zeitgemäss optimal vorbereitet zu sein. Hoffen wir, dass bis zum nächsten Ereignis die Möglichkeiten neuer Entwicklungen erkannt und umgesetzt sind.

Abstract

Dealing with flooding: lessons learned by cantons and the federal government

The organisations responsible for implementing preventive measures are directly affected by the events associated with natural hazards. On the one hand, they are involved in managing the impact of such events, whose consequences simultaneously indicate whether previous ideas, assessments and measures were adequate and sufficient. The federal and cantonal organisations implementing preventive measures perform different roles and duties. The article presents major events in recent decades and lessons learned as well as adaptations and developments from the point of view of the Canton of Nidwalden and Switzerland's federal authorities. It also considers the mutual influences between the canton and federal authorities and how experience is shared, and then concludes by discussing success factors, limits, challenges and potential for improvements.

Storms that hit the Canton of Nidwalden between 1997 and 1984 prompted a number of adjustments and developments. The weaknesses in the roughly century-old defences dating from the 19th century were recognised and eliminated. The previous practice of using barriers to reduce bed loads was replaced by a comprehensive, systematic approach.

At the federal level, after a roughly 70-year breather, the first major loss event in 1987 triggered a paradigm shift in how Switzerland deals with natural hazards. The event in 2005, in particular, led to the optimisation of warnings and alerts between the federal authorities and the cantons and to the establishment of a nationwide Swiss natural hazard warning and alert system.

Many lessons from past events have already been learned and implemented both in the Canton of Nidwalden and by the federal authorities. However, in future there will be further challenges to face with regard to changing framework conditions, such as technological advances, socioeconomic developments and climate change. On the other hand, established structures need to be maintained and constantly adapted to these new framework conditions. At the same time, education and training must pass on the experience gained from such events to the next generation, which did not live through them.

Keywords: law enforcement authorities, lessons learned, event analyses, adaptations, developments, emergency organisation, further training

