

SANDRA MELZNER, MARCO CONEDERA, GIANNI BORIS PEZZATTI

Post Waldbrand Risiko in den schweizerischen Gebirgen

Post wildfire risk in the Swiss mountain areas

Zusammenfassung:

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

Abstract:

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

Stichwörter:

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

Keywords:

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

Einleitung

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

Die durch den Klimawandel bedingte Zunahme an Hitzewellen und Dürreperioden

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

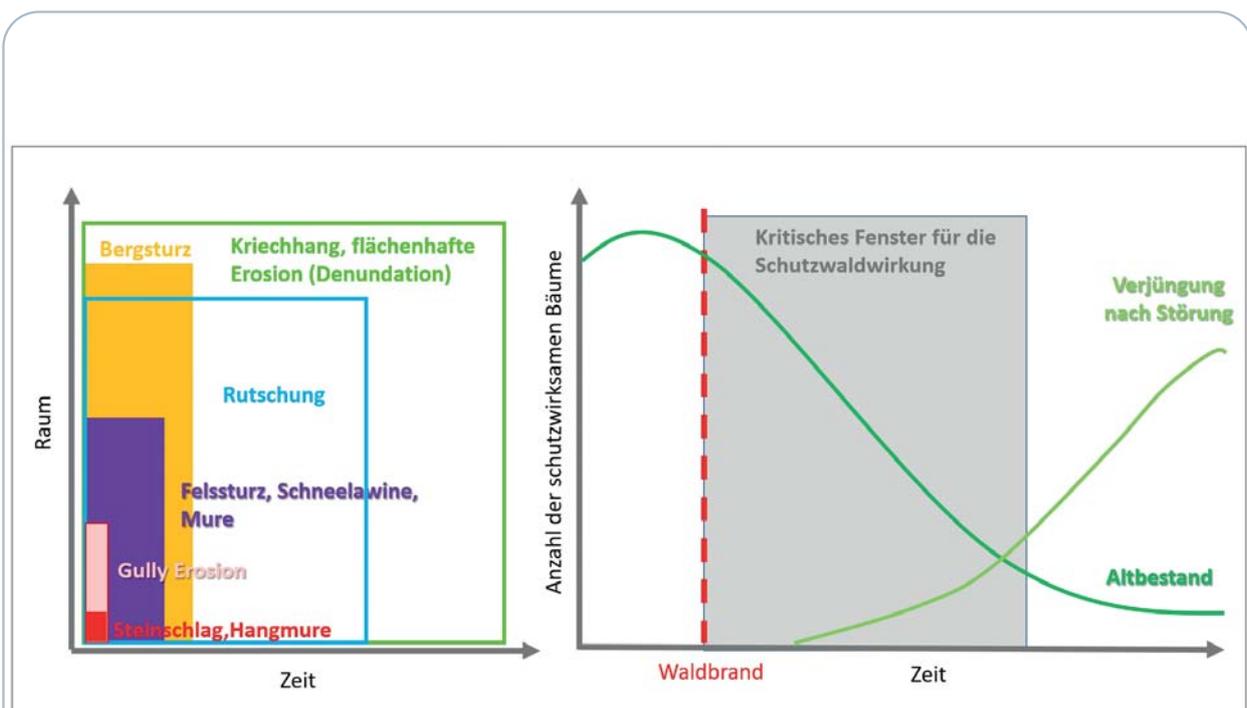


Abbildung 1: Kritisches Zeitfenster für die Schutzwirkung des Waldes gegenüber geohydrologischen Naturgefahren (verändert nach Conedera and Pezzatti, 2019).

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

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

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

Waldbrandgeschehen in der Schweiz

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

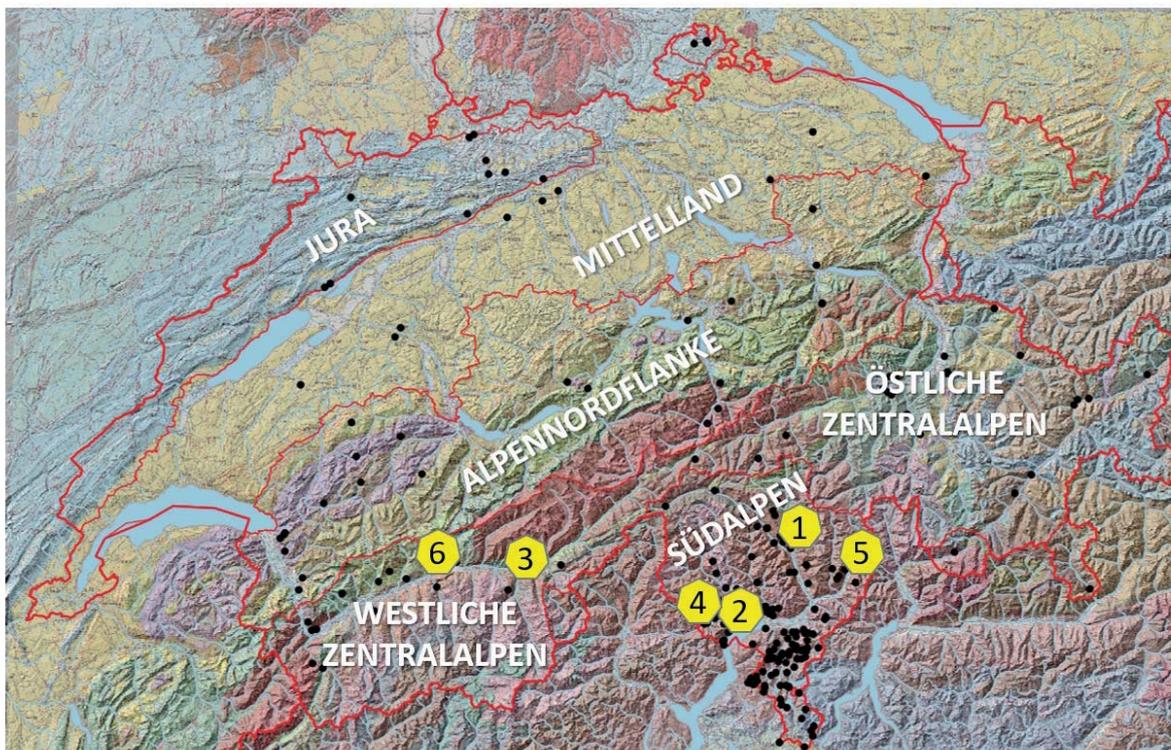


Abbildung 2: Tektonische Grunddisposition und biogeographische Gliederung der Schweiz. Schwarze Punkte: geographische Lage der seit dem Jahr 2000 registrierten Waldbrände mit einer Brandfläche größer als 1 Hektar. Gelbe Punkte markieren die Lage der im Text genannten Waldbrandbeispiele, 1 Pollegio (TI),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

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

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

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

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

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

Einwirkung des Feuers auf Vegetation, Boden und Fels

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



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

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

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

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

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

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

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

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



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

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

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

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

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



Zeitliche Entwicklung des geohydrologischen Gefahrenpotentials nach einem Feuer im Gebirgswald

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

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

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

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



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

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

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

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

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



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

Im Fall eines Kronenfeuers und dem tota-

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

Management des post Waldbrand Risikos

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



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

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

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

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

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

Ausblick

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

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

Anschrift der VerfasserInnen/Authors' addresses:

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

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

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

Literatur/References:

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