
19 Muren

Roland Kaitna, David Prenner und Johannes Hübl*

Zusammenfassung

Murgänge sind Massenverlagerungsprozesse an der Schnittstelle zwischen Rutschungen, Hochwasserereignissen und Bergstürzen, die im Alpenraum meist durch Starkregen oder langanhaltenden Niederschlag ausgelöst werden. Aufgrund der großen Abflussmengen, dem spontanen Auftreten, der hohen Geschwindigkeit und Sedimentkonzentration stellen Muren in besiedelten Gebieten eine erhebliche Gefahr dar. In den Alpen bewegen sich typische Ereignisvolumina zwischen wenigen 1.000 m³ bis zu mehreren 100.000 m³. Aufgrund der eingeschränkten Datenlage sind Ereignisgröße oder Wiederkehrperiode von Extremereignissen in Bezug auf Muren nicht eindeutig zu definieren. Wir gehen davon aus, dass es sich bei extremen Muren entweder um Ereignisse mit außergewöhnlicher Ereignisgröße handelt (vergleichbar mit einem »extremen« Hochwasser, definiert mit einer 300-jährlichen Wiederkehrperiode), oder der eingetretene Schaden infolge von Prozessüberlagerung, Kaskadeneffekten oder Ähnlichem sehr hoch ist. Obwohl die Forschung zu Muren in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht hat, bleibt gerade bei der Vorhersage von extremen Muren eine große Unsicherheit. Auf jeden Fall ist eine weitere Verbesserung des Wissensstandes zum Prozess selbst, aber auch zu Schutzmaßnahmen erstrebenswert.

Abstract

Debris flows are mass wasting processes situated between landslides, rock avalanches, and flood events that typically initiate due to short-duration storm events or long-lasting rainfall. Due to high discharges, high velocities and large content of sediment, debris flows represent a severe hazard for settlements and infrastructure. In alpine regions typical event volumes range from a view 1.000 m³ to several 100.000 m³. Due to limited data, the definition of event magnitude and return period of extreme debris flows is rather ambiguous. Here we consider extreme debris flow as rare events of extraordinary high event magnitudes (comparable to an »extreme« flood event with 300 year return period), or by significant damage due to the superposition of different processes, cascade-effects or

* Roland Kaitna, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, roland.kaitna@boku.ac.at.

David Prenner, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, david.prenner@boku.ac.at.

Johannes Hübl, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, johan.nes.huebl@boku.ac.at.

similar. Although research on debris flows has made great strides in recent decades, there is a great deal of uncertainty surrounding the prediction of extreme mudflows. In any case, a further improvement in the level of knowledge about the process itself, but also on protective measures is desirable.

Kernaussagen

- Muren stellen ein großes Gefahrenpotential in alpinen Regionen dar.
- Extreme Muren sind seltene Ereignisse mit großer Magnitude und/oder hoher Schadenswirkung.
- In den letzten Jahrzehnten ist keine Steigerung der Ereignisrate dokumentierter Muren und Extremereignisse in Österreich zu erkennen.
- Eine Änderung durch eine Veränderung der klimatischen Bedingungen ist nicht ausgeschlossen.
- Datengrundlagen und Modellierungsansätze entsprechen dem Stand-der-Technik, sollten aber laufend verbessert werden.

Key Points

- Debris flows represent a serious hazard in alpine regions.
- Extreme debris flows are rare events with a high event magnitude and/or high degree of damage.
- We find no explicit increase of occurrence rate of documented debris flows and extreme events in Austria within the last decades.
- This may change due to changing climatic conditions.
- Available data and modeling approaches are at the state-of-the-art, but should be continuously improved.

19.1 Definition und Charakteristika

Muren sind Verlagerungsprozesse von Sediment, Wasser und oft auch Wildholz in Wildbacheinzugsgebieten, welche in besiedelten Regionen der Alpen ein erhebliches Gefahrenpotential darstellen. Nach der Klassifikation von Hungr et al. (2001) werden Muren als schnell bis extrem schnell (> 5 m/s) fließende Mischungen von gesättigtem Lockermaterial beschrieben. Abhängig von der Korngrößenverteilung des Sediments und des Wassergehaltes unterscheidet man zwischen Schlammuren (engl. »mudflow«) und granularen Muren (engl. »granular debris flows«). Besondere Charakteristika von Muren sind der oft beobachtete schubweise Abfluss (z. B. Zanuttigh und Lamberti, 2007), eine hohe Feststoffkonzentration an der Front (Pierson, 1986) und der Fließvorgang innerhalb eines Gerinnes. Letzteres unterscheidet Muren von Hangmuren, die keine seitliche Begrenzung des Fließweges zeigen und sich meist aus flächgründigen Rutschungen am Hang entwickeln (Rickenmann, 2014).

Der Spitzenabfluss von Muren kann um ein Vielfaches größer sein als der eines Hochwasserereignisses innerhalb des gleichen Wildbachgerinnes

(Rickenmann, 1999; Pfitscher et al., 2016). In den Alpen liegen diese Abflüsse typischerweise im Bereich von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ bis mehrere $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Zusammen mit Geschwindigkeiten von meist 5–10 m/s und der hohen Dichte zeichnen sich Muren durch ein hohes Zerstörungspotential für Infrastruktureinrichtungen und Gebäuden (besonders auch Personen in Gebäuden) aus. Gerade die mitgeführten Gesteinsblöcke haben eine hohe zerstörerische Wirkung und sind in der Ingenieurspraxis als Einzellasten mit extrem hoher Energie bei der Bemessung von Schutzbauwerken anzusetzen. Trotz des häufigen Auftretens von Schüben (»pulsierender Murgang«) kann jedoch eine grobe Korrelation zwischen Ereignisvolumen und Spitzenabfluss gefunden werden (Rickenmann, 1999).

In der Literatur werden verschiedene Auslösemechanismen für Muren beschrieben. Die Murmobilisierung kann durch Rutschungsprozesse gesteuert sein, die sich in einen oder mehrere Murschübe entwickeln können (Iverson, 2000; Take et al., 2004). Andererseits können Muren aus Gerinnesediment entstehen (Berti und Simoni, 2005; Theule et al., 2012). Weiters scheinen Muren auch durch kurzzeitigen Aufstau von Sediment (zum Beispiel bei Verklausung durch Wildholz oder bei einem Gefällsknick) und schneller Remobilisierung entstehen (McGuire et al., 2017). Die Entstehung von Muren kann zusätzlich durch tektonische Aktivität (z. B. Dadson et al., 2003), vulkanische Aktivität (z. B. Pierson et al., 1990), von Gletscherseenausbrüchen (GLOFs, z. B. Breien et al., 2008; Schwanghart et al., 2016), oder durch Prozesstransformation aus Fels-Eis Lawinen entstehen (Evans et al., 2009; Huggel et al., 2005). Die tatsächlichen Auslösemechanismen von Muren in Österreich werden meist nur in Einzelfällen, bei einer detaillierten Ereignisdokumentation bestimmt (siehe beschriebene Fallbeispiele).

19.1.1 ONR 24800

Die österreichische Normungsregel 24800 (ONR, 2009) unterscheidet zwischen fluviatilen und murartigen Prozessen. Letztere unterscheiden sich in murartigen Feststofftransport und Murgang. Hier sind Murgänge als »langsam bis schnell fließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz« definiert, mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration (C_v) typischerweise zwischen 0,4 und 0,7; was einer Dichte zwischen 1.700 kg/m^3 und 2.400 kg/m^3 entspricht. Murartiger Feststofftransport kennzeichnet den Übergangsbereich zwischen fluviatilen Feststofftransport und Murgängen und liegt im Bereich von $C_v \sim 0,2\text{--}0,4$. Im Feld bzw. bei der Ereignisdokumentation erfolgt die Unterscheidung anhand der morphologischen Beurteilung der Ablagerung, was besonders beim Übergang zwischen fluviatilem und murartigem Feststofftransport schwierig ist.

19.1.2 Extremereignisse im Zusammenhang mit Muren

In der Ingenieurspraxis werden Naturgefahrenprozesse meist anhand der Beziehung zwischen Magnitude und Frequenz (bzw. Ereignisgröße und Wiederkehrperiode) definiert. Ein Extremereignis ist dementsprechend ein seltenes Ereignis mit einer außergewöhnlich hohen Intensität (meist Volumen [m³] oder Spitzenabfluss [m³/s]). In Anlehnung an ein extremes Hochwasser würde eine extreme Mure einem Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren entsprechen. Dieser *Prozess-basierte Ansatz* ist allerdings aufgrund der schwachen statistischen Aussagekraft der vorhandenen Daten mit großen Unsicherheiten verbunden und wird in der Praxis in Österreich (z. B. in der Gefahrenzonenplanung) derzeit nicht verwendet.

Ein *Auswirkungs-basierter* (Risiko-basierter) Ansatz zur Bewertung von extremen Muren wäre eine Bewertung aufgrund des aufgetretenen Schadens, der ökonomischen Folgen, der Anzahl der Betroffenen und/oder der Möglichkeit einer Gemeinde oder Region im Ereignisfall ohne Hilfe von außen das Ereignis zu bewältigen. Wenn die Größe des Schadens in den Mittelpunkt gestellt wird, kann eine extreme Mure auch eine kleinere Ereignisgröße mit einer kürzeren Wiederkehrdauer haben. Das ist meist dann der Fall, wenn sich verschiedene Ereignisse überlagern (z. B. Vorverfüllung eines Geschieberückhaltebereichs durch Feststofftransport und anschließender Murgang), oder wenn Kaskadeneffekte auftreten (z. B. Unterbrechung einer Infrastruktureinrichtung durch eine Mure).

In vielen Fällen wird die Bewertung von *Extremereignissen* in Bezug auf Muren eine Kombination von beiden Ansätzen beinhalten. Im Folgenden skizzieren wir die historische Entwicklung von Muren, die als extrem eingestuft wurden und fassen verschiedene Fallbeispiele zusammen.

19.2 Historische Entwicklung

In den Alpen wurden Murgangvolumina meist zwischen wenigen 1.000 m³ und mehreren 10.000 m³ beobachtet. Ereignisse mit über 100.000 m³ sind eher außergewöhnlich und können wahrscheinlich als *Extremereignisse* bewertet werden. Wie im Kapitel 19.1.2 argumentiert, können allerdings auch Ereignisse von wenigen 10.000 m³ in manchen Einzugsgebieten Extremereignisse darstellen.

Ein Versuch der Quantifizierung von extremen Muren ermöglicht die Ereignisdatenbank des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinverbauung (WLV). In dieser Datenbank wurden historische Informationen über Wildbachereignisse inklusive Muren innerhalb der letzten Jahrhunderte flächendeckend für ganz Österreich gesammelt (Hübl et al., 2009). Wichtig zu

erwähnen ist, dass die Datenbank sich nur auf Schadereignisse bezieht, d. h. auf Muren, die einen Schaden verursacht haben und von einer Beobachterin/einem Beobachter dokumentiert wurden, was meist in Bereichen mit Besiedelung oder Infrastruktureinrichtungen der Fall ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ereignisdatenbank heterogen und nicht komplett ist. Für besiedelte Gebiete ist der Datensatz ab dem Jahr 1945 aussagekräftig (Heiser et al., 2019). Außerhalb dieser Bereiche, im sogenannten Naturraum, ist eine Beurteilung aufgrund fehlender Daten oder Zugänglichkeit sehr schwierig.

Auf dem Bundesgebiet von Österreich wurden seit dem Jahr 1800 rund 5.000 Murgänge registriert, von denen etwa 3.700 Ereignisse eine subjektive Intensitätsangabe (*gering, mittel, stark und extrem*) haben. Davon sind 230 Ereignisse als *extrem* bewertet worden. Abbildung 01a zeigt die zeitliche Entwicklung sowie die Ereignisrate der dokumentierten Muren. Die Ereignisrate wird als Anzahl der Ereignisse pro Jahr dividiert durch Gesamtzahl der Ereignisse gerechnet. Die Linien stellen ein gleitendes Mittel mit einer Fenstergröße von 10 Jahren dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ereignisrate im Verlauf der letzten zwei Jahrhunderte zugenommen und danach wieder abgenommen hat. Der Anstieg bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts ist sicherlich mit der immer konsequenteren Dokumentation der Murgangereignisse durch die WLW zu erklären und muss nicht notwendigerweise einen Anstieg der tatsächlichen Aktivität entsprechen. Der markante Peak in den 1960er Jahren spiegelt die außergewöhnlich feuchten Wetterlagen im Herbst der Jahre 1965 und 1966 wieder, die zu zahlreichen Hochwasser- und Murgangereignissen vor allem in Kärnten und Osttirol geführt haben. In den letzten Jahrzehnten lässt sich kein Anstieg der dokumentierten Murgangereignisse in Österreich feststellen. Extreme Muren wurden vor allem am Ende des 19. Jahrhunderts und in den 1960er Jahren dokumentiert. In Abbildung 01b ist die mittlere Intensität der Ereignisse pro Jahr seit 1800 zu sehen. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden wenige und meist große Ereignisse dokumentiert, was sich in einer hohen mittleren Intensität pro Jahr widerspiegelt. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden immer mehr Muren dokumentiert, auch kleine Ereignisse. Dadurch sinkt die mittlere Intensität pro Jahr. Wichtig zu betonen ist aber, dass diese Daten nicht unbedingt den Verlauf der natürlichen, ungestörten Aktivität von Muren in Österreich darstellen, sondern stark von geänderten Siedlungsraum, der Beobachtung (inklusive der subjektiven Wahrnehmung) und dem Effekt von Schutzmaßnahmen beeinflusst sind.

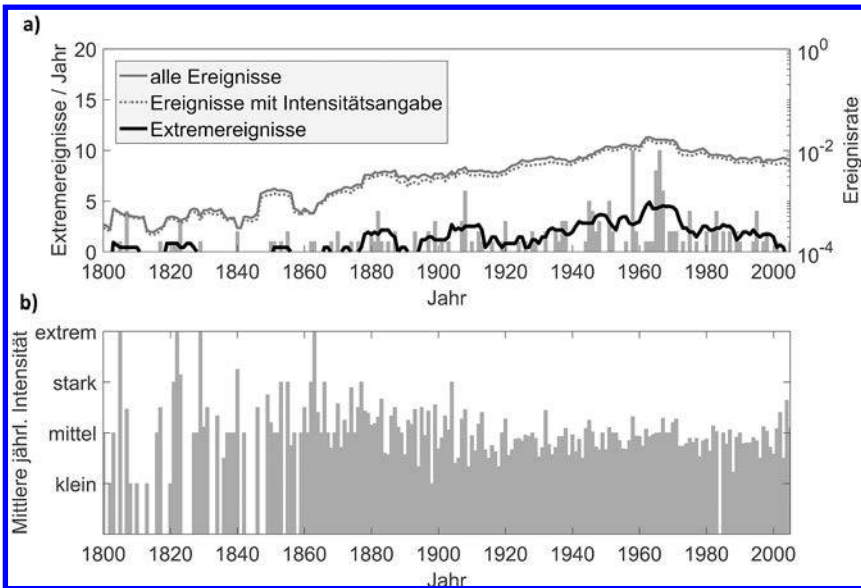


Abbildung 01: Historische Entwicklung dokumentierter Murgangereignisse in Österreich zwischen 1800 und 2005 (a). Die Intensitätsangaben (b) beziehen sich auf der Einteilung in der Ereignisdatenbank des Forsttechnischen Diensts für Wildbach- und Lawinenverbauung.

Figure 01: Historical development of documented debris flow events in Austria between 1800 and 2005 (a). The given intensities (b) follow the classification given by the Austrian Forest Service for Torrent and Avalanche Control.

Datenquelle: Ereignisdatenbank WLW

19.3 Fallbeispiele

Weltweit ist es in den letzten Jahrzehnten zu mehreren extremen Murgangereignissen gekommen. Zu erwähnen sind sicherlich die katastrophalen Muren am Huascarán in Peru (Evans et al., 2009) und Kolka/Karmadon im russischen Kaukasus (Huggel et al., 2005), die sich in Folge einer Prozesstransformation (Schmelzen von Eis und Schnee) aus großen Fels-/Eislawinen entwickelt haben und mehrere tausend Todesopfer gefordert haben. Auch die hohe Anzahl von Muren nach Erdbeben stellen außergewöhnliche und fatale Katastrophen dar, wie nach dem Chi-Chi Erdbeben in Taiwan (z. B. Lin et al., 2004).

Ein Beispiel von extremen Muren in den Alpen sind der Murgang von Stože, Slowenien (Mikoš et al., 2004), der sich aus einer großen Rutschmasse gebildet hat, oder die Mure nach dem Bergsturz vom Piz Cengalo, in Bondo, Schweiz (Baer et al., 2017).

Historisch gab es in Österreich eine Reihe von extremen Murgangereignissen mit teilweise katastrophalen Folgen für die lokale Bevölkerung. Der Murgang am

Rastötzenbach vom 14. Juni 1569 zerstörte im Markt Hofgastein 52 Häuser und kostete 147 Menschen das Leben (Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, 2009). Als rezente Beispiele von extremen Muren in Österreich können wahrscheinlich die Ereignisse am Schallerbach (See in Tirol), Lorenzerbach (St. Lorenzen im Paltental), Tronitzerbach (Afritz am See) oder die Mure vom Sattelkar im Obersulzbachtal (Neukirchen am Großvenediger) bewertet werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

19.3.1 Schallerbach (See in Tirol)

In der Nacht vom 07. zum 08. Juni 2015 ereignete sich ein außergewöhnliches Murgangereignis am Schallerbach in der Gemeinde See/Tirol (Hübl et al., 2016). Der Auslöser war ein intensiver Niederschlag mit einer rekonstruierten Intensität von rund 50 mm innerhalb von sechs Stunden. Durch eine intensive Schneeschmelze und gewittrigen Niederschlägen an den zwei Vortagen war das Einzugsgebiet hydrologisch vorbelastet. Infolge des stark Geschiebe-belasteten Abflusses wurde das Rückhaltebecken oberhalb des Ortes bis zu den Sperrenflügel verfüllt. Anschließend kam es zu einem großen und mehreren kleinen Murschüben, die anfänglich die Sperre überflossen und in den Vorfluter abgeleitet wurden. Der nachfolgende Abfluss erodierte den orographisch linken Teil des Erddamms der Sperre, was zu einer massiven Verschotterung der Ortsteile Gries und Elis führte. Insgesamt wurden rund 126.000 m³ Lockermaterial im Einzugsgebiet mobilisiert und etwa 60.000 m³ im Siedlungsraum abgelagert. Neben Schäden an Infrastruktur und Umweltschäden durch ausgetretene Betriebsmittel, wurden bei dem Ereignis 70 Gebäude beschädigt und vier weitere zerstört (Abbildung 02). Obwohl der einzelne Murschub etwa der Größenordnung des Bemessungereignisses entsprach, kann durch die Prozessüberlagerung und dem eingetretenen Schaden dieses Ereignis als extrem betrachtet werden.

19.3.2 Lorenzerbach (St. Lorenzen im Paltental)

Am Morgen des 21. Juli 2012 kam es im Lorenzerbach zu einem Murenabgang, der im Gemeindegebiet von St. Lorenzen im Paltental großflächige Vermurungen und Schäden zur Folge hatte (Hübl et al., 2012). Der Auslöser für den Murgang war eine Kaltfront mit intensiven Niederschlägen von 100–120 mm innerhalb von 24 Stunden, mit sehr feuchten Vorbedingungen. Der rekonstruierte Spitzenabfluss erreichte mit 500–800 m³/s ein Vielfaches des abgeschätzten Bemessungsabflusses für Reinwasser (HQ₁₅₀) von 34 m³/s und dürfte ursächlich mit einer Verklausung durch eine Rutschung im Oberlauf des Lorenzerbaches



Abbildung 02: Ablagerungen des Schallerbachs in der Gemeinde See in Tirol.

Figure 02: Deposits of the Schaller creek in the community See in Tyrol.

Quelle: WLV Tirol

zusammenhängen. Insgesamt wurden 67 Gebäude beschädigt, davon sieben komplett zerstört.

19.3.3 Tronitzerbach (Afritz am See)

Das Einzugsgebiet des Tronitzerbachs in der Gemeinde Afritz am See, Kärnten, hat eine Fläche von 1,99 km² und erstreckt sich zwischen 720 m und 1.844 m ü.A. In diesem bewaldeten Einzugsgebiet kam es am 29. August zu einem großen und mehreren kleinen Murschüben mit einem Gesamtvolumen von 25–30.000 m³ (Hübl et al., 2016). Sediment und Wildholz lagerten sich am Schwemmkegel ab und führten zu großen Schäden vor allem im Ortsteil Krah (Abbildung 03). Der Auslöser war Starkniederschlag mit Regenmengen von bis zu 35 mm in 90 Minuten. Noch während der Arbeiten zur Ereignisbewältigung kam es am 04. September 2016 zu einer weiteren Mure. Durch die instabilen Einhänge in Folge des ersten Murganges konnten wiederum etwa 30–35.000 m³ Sediment und Wildholz entlang des Bachlaufes mobilisiert werden, die nachmals den betroffenen Ortsteil vermurten. Auch hier war mit rund 50 mm in 135 Minuten

ein Starkniederschlag der Auslöser. Durch eine rechtzeitige Evakuierung kam es zu keinen Personenschäden. Obwohl beide Niederschlagsereignisse als 2- bis 10-jährliche Ereignisse einzustufen sind, kann durch die kurze Abfolge und Beeinflussung der zweiten Mure durch die erste und den damit verbundenen Schäden von einem Extremereignis gesprochen werden.



Abbildung 03: Ablagerungen am Schwemmkegel des Tronitzerbachs, Gemeinde Afritz am See.
Figure 03: Debris flow deposits on the fan of the Tronitzer creek, community Afritz am See.
Quelle: GLB Kärnten Nordost, WLV

19.3.4 Sattelkar, Obersulzbachtal (Neukirchen am Grossvenediger)

In der Nacht von 30. auf den 31. Juli 2014 führten anhaltende und ergiebige Niederschläge zu Massenverlagerungsprozessen in den Oberpinzgauer Achen-tälern. Außergewöhnlich war der Murenabgang aus dem Sattelkar ($\sim 0,4 \text{ km}^2$), dessen unbedeutendes Gerinne ein rechtsufriger Zubringer des Obersulzbaches ist. Die Ablagerungen dieses Murgangs verlegten den Obersulzbach kurzzeitig (Abbildung 04). Eine Bestimmung des Sedimentbudgets anhand eines DEM-Differenzenmodells ergab, dass insgesamt rund 170.000 m^3 Material im Talboden des Obersulzbachtals abgelagert wurden. Davon stammten etwa 70.000 m^3 aus dem Einzugsgebiet oberhalb der Karschwelle auf 2.000 m ü.A. und 100.000 m^3 wurden durch Erosion des Lockermaterials am Hang mobilisiert.

Zwei Aspekte sind hier besonders hervorzuheben: Zum einen die rezente morphologische Dynamik im Sattelkar, die möglicherweise mit peri-glazialen Prozessen in Zusammenhang steht (siehe Beitrag 21 zu *Permafrostgefahren*), und zum andern die extreme Erosionsleistung im Gerinne. Aus einer Länge von mehr als 200 m wurde eine Eintiefung von mindestens 10 m erreicht. Die maximale Eintiefung betrug 14 m. Berechnet man eine mittlere Abtragsfläche aus mehreren Querprofilen, lässt sich eine Erosionsleistung von rund 300 m³ pro Laufmeter ermitteln.



Abbildung 04: Ablagerung der Mure aus dem Sattelkar im Obersulzbachtal.

Figure 04: Deposition of the debris flow from the Sattelkar.

Quelle: L. Fegerl, Landesgeologischer Dienst Salzburg

19.4 Einschätzung des Sachstandes

19.4.1 Auftreten von Muren

Das Auftreten von Muren ist von einer kritischen Kombination von ausreichend Lockermaterial, Wasser und Neigung abhängig (Rickenmann, 2014). Diese Bedingungen werden in den österreichischen Alpen häufig erreicht, wobei das Wasser zur Ereignisauslösung in den meisten Fällen vom Niederschlag, seltener aus Schneeschmelze, stammt. Eine detaillierte Studie über die hydro-meteoro-

logischen Auslösebedingungen von Muren in unterschiedlichen Regionen in Österreich zeigte, dass etwa 50–70 % der Muren von kurzen, intensiven Gewitterniederschlägen und 20–44 % von langanhaltenden Niederschlag ausgelöst wurden. In bis zu 15 % war Schneeschmelze von großer Bedeutung (Prenner et al., 2019, Abbildung 05). Bei vielen Murgangereignissen wird auch Hagel beobachtet, wobei dessen Bedeutung für die Auslösung bisher nicht geklärt ist.

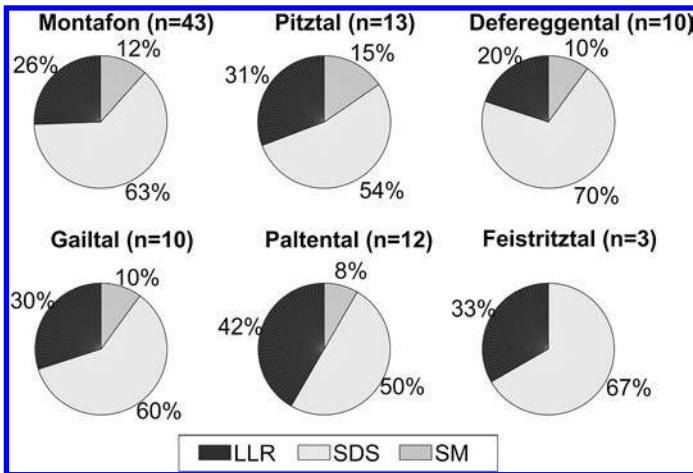


Abbildung 05: Vereinfachte meteorologische Auslösetypen für Muren in verschiedenen Regionen Österreichs. LLR = langanhaltender Niederschlag (long-lasting rainfall), SDS = Gewitter (short-duration storm), SM = Schneeschmelze (snow melt).

Figure 05: Simplified meteorological trigger types for debris flows in different regions in Austria. LLR = long-duration rainfall, SDS = short-duration storm, SM = snow melt.

Quelle: Kaitna et al.; Daten basieren auf einer Studie von Prenner et al., 2019

Zur Vorhersage von Muren werden oft kritische Niederschlagsbedingungen gesucht, meist in der Form einer Grenzbedingung von Intensität und Dauerstufe (I-D Kurven). Einen Überblick über I-D Kurven in verschiedenen Regionen der Welt findet sich bei Guzzetti et al. (2008). Die Verlässlichkeit solcher Grenzwertkurven und auch die Übertragbarkeit zwischen Regionen ist derzeit wenig zufriedenstellend und daher werden I-D Kurven in der Praxis selten verwendet. Ein alternativer Ansatz versucht auf Basis des Vergleichs von Muren-auslösenden-Niederschlägen und Muren-nicht-auslösenden-Niederschlägen Auslöse-Wahrscheinlichkeit zu bestimmen (Berti et al., 2012), die wiederum in der Vorwarnung verwendet werden können. Für Österreich hat es bisher nur lokale Auswertungen von ereignisauslösenden Niederschlägen gegeben (z. B. Moser und Hohensinn, 1983; Projekt MUWA von ZAMG/BFW). Eine systematische Aufarbeitung für dokumentierten Muren ist erst seit Kurzem verfügbar (Braun und Kaitna, 2016; Enigl et al., 2019) und muss in der Praxis noch getestet

werden. Die oft eingeschränkte Praxistauglichkeit der genannten Methoden liegt hauptsächlich an der unzureichenden Erfassung von Niederschlägen, da diese oft räumlich und zeitlich sehr stark variieren. Nikolopoulos et al. (2014) führt vor allem kleinräumige aber kurze und intensive Niederschlagsereignisse an, die hohe Unsicherheiten in die Erstellung von I-D Kurven als auch in die Gefahrenbewertung bringen. Selbst das relativ dichte Messnetz von Niederschlagsstationen im Alpenraum mit einem Abstand von rund 10 km (Borga et al., 2014) ist dabei oft unzureichend, um kleinräumige (konvektive) Niederschlagsereignisse aufzuzeichnen, die für etwa 2/3 der Muren in Österreich auslösend sind (Prenner et al., 2019). Auch alternative, flächige Methoden mittels Satelliten, Wetterradar oder Mobilfunknetzen stellen zurzeit noch keine ausreichende Verbesserung für die Muren-Vorhersage im Vergleich zu klassischen Stationsmessungen dar (Llasat et al., 2005; Leijnse et al., 2007; Marra et al., 2014; Devoli et al., 2015; Salio et al., 2015). Maßgeblich sind auch die Unsicherheiten bei Verwendung von Tagessummen für die Erstellung von Grenzwertkurven/-wahrscheinlichkeiten. Laut Peres et al. (2018) werden die Summen nicht idealerweise zwischen 0:00–23:59 Uhr gebildet, sondern je nach Betreiber unterschiedlich (z. B. ZAMG und HD jeweils um 07:00 Uhr, die italienische Annali Idrologici jeweils um 9:00).

Da das Auftreten von Muren in alpinen Regionen weder durch regionale noch durch lokale Niederschlagsgrenzwerte exakt vorhersagbar ist, wird oft das Dispositionskonzept nach Kienholz (1995) verwendet. Danach tritt ein Murgang nur in Einzugsgebieten mit einer gewissen Grunddisposition (z. B. Reliefenergie) auf. In weiterer Folge bestimmt das Zusammenspiel von variabler Disposition und einem direktem Auslöser (meist Niederschlag) das Auftreten eines Murgangs. Bei der variablen Disposition kann es sich zum Beispiel um periodische Änderung der Sedimentverfügbarkeit (saisonal oder abhängig von Verwitterung und Prozesshäufigkeit) oder von der hydrologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet handeln. Abbildung 06 zeigt am Beispiel einer rezenten Studie für das Pitztal, Tirol, wie die regionale Murgang Wahrscheinlichkeit von hydrologischen Vorbedingungen wie der Schneeschmelze und der Bodenfeuchte abhängt (Mostbauer et al., 2018). Hohe Auslösewahrscheinlichkeiten ergeben sich im Frühjahr bei einer Kombination von Schneeschmelze und hoher Bodenfeuchte, wobei nur moderate auslösende Niederschläge gemessen wurden. Die höchsten Wahrscheinlichkeiten zeigen sich wie erwartet bei sehr intensiven, teilweise konvektiven Niederschlägen, wobei hier die Vorfeuchte und die Schneeschmelze eine geringe Rolle spielen. Wir interpretieren diese Resultate dahingehend, dass extreme Muren nicht notwendigerweise mit extremen Niederschlägen verbunden sein müssen, sondern bei besonders ungünstigen Vorbedingungen auch von moderaten Niederschlägen ausgelöst werden können.

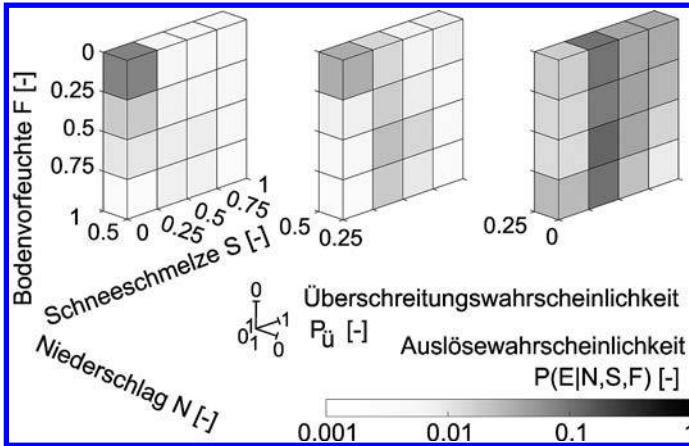


Abbildung 06: Murgang Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Bodenfeuchte, Schneeschmelze und Niederschlag in der Region Pitztal.

Figure 06: Debris flow occurrence probability conditional to soil moisture, snowmelt, and rainfall for the Pitztal region.

Quelle: modifiziert nach Mostbauer et al., 2018

19.4.2 Gefahrenanalyse Muren

Wie Rickenmann (2014) ausführt, sind die wichtigsten Punkte der Gefahrenanalyse das Erkennen der Murfähigkeit eines Wildbaches, sowie die Abschätzung der Ereignisgröße und der gefährdeten Flächen im Ablagerungsbereich. Die Murfähigkeit eines Baches wird meist über das Gefälle ($> 25\text{--}30\%$), Sedimentpotential, dem Vorhandensein von »Stummen Zeugen« (Aulitzky, 1992) und anhand geomorphologischer Kenngrößen bestimmt. Die genaue Bestimmung des zu erwartenden Ereignisvolumens ist schwierig und erfolgt meist aus einer Kombination von rückwärts gerichteter Indikation (was geschah in der Vergangenheit?) und vorwärts gerichteter Indikation (Feldaufnahmen möglicher Sedimentquellen).

Für die Modellierung der Fließdynamik und der gefährdeten Flächen im Ablagerungsbereich wird immer häufiger auf numerische Simulationsprogramme gesetzt. Diese Simulationsprogramme verwenden tiefengemittelten Flachwassergleichungen und basieren auf der Annahme, dass Muren sich als äquivalente Flüssigkeit darstellen lassen. Diese Annahme sollte in der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden. Der Fließwiderstand kann durch konzeptionelle oder rheologische Ansätze beschrieben werden (*Modellparameter*). Neuere Ansätze betrachten Muren als 2-Phasen Gemische, wobei die feste Phase (das Sediment) und die flüssige Phase (Wasser oder eine homogene

Mischung von Feinsediment und Wasser), sowie deren Interaktionen, getrennt modelliert werden (z. B. Iverson und George, 2014; Mergili et al., 2017). Wichtig für eine realistische Modellierung ist die Wahl der Modellparameter, die am besten durch Rückrechnung von gut dokumentierten Ereignissen erfolgt. In der Realität können sich Modellparameter entlang des Fließweges ändern und müssen nicht konstant für alle Muren in einem Einzugsgebiet oder in einer Region sein.

Neben der Wahl der Modellparameter liegt die Hauptproblematik bei jeder Modellierung in der Einschätzung der Ausgangslage. Wo beginnt der Murgang? Mit welcher Ganglinie ist zu rechnen? Gibt es einen Murschub oder mehrere? In der Praxis ist es daher wichtig, durch Szenarien-Bildung eine Bandbreite realistischer Gefährdungssituationen zu identifizieren. Bei der Szenarien-Bildung könnten Extremereignisse als Ereignisse außergewöhnlicher Magnitude (z. B. + 50 % Volumen) oder als Kombination von ungünstigen Ausgangsbedingungen abgebildet werden (z. B. zweiter Murgang nach einem Bemessungs-Murgang) und so als Restrisiko dargestellt werden.

Es gibt verschiedene Prozesse, die typischerweise mit Murgängen verbunden sind und von denen erwartet wird, dass sie das Fließ- und Ablagerungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Diese sekundären Prozesse umfassen die Entwicklung von Schüben (Roll-Wellen), Levée-Bildung (selbst-induzierte Kanalisierung), oder Korngrößenegregation, die zu inverser Sortierung und der Ausbildung einer granularen Murenfront führen kann. Der Effekt von Wildholz und kurzzeitiger Verkläuerung kann hier auch eine Rolle spielen. In der Praxis werden diese Prozesse von Muren-Simulationsmodellen bisher nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es mittlerweile eine recht gute Datenbasis zu Volumen und Ablagerungsflächen von Murgangereignissen gibt, die gemäß den Richtlinien zur Ereignisdokumentation laufend aktualisiert werden sollten. Durch das relative dichte Messnetz sowie neuer Methoden der Fernerkundung sind Daten zu auslösenden Niederschlägen im internationalen Vergleich regional überdurchschnittlich gut vorhanden. Da jedoch die Prozesse in Wildbacheinzugsgebieten auf sehr kleiner räumlicher und zeitlicher Skala ablaufen, ist trotzdem eine ständige Verbesserung anzustreben. Die derzeitigen eingesetzten Modellierungsansätze sind auf dem Stand-der-Technik, allerdings gibt es noch viele Unsicherheit in der Bestimmung der Eingangsparameter der Modelle, da nur in wenigen Einzugsgebieten die relevanten Material- und Fließparameter erfasst werden. Durch die Komplexität in der Prozessentstehung und -dynamik basieren diese Simulationsmodelle allerdings auf starken Vereinfachung und könnten durch ein besseres Prozessverständnis verbessert werden.

19.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

19.5.1 Entwicklungen Naturraum

Neben der *Grunddisposition* eines Einzugsgebietes (z. B. Reliefenergie) und variabler *Disposition* (z. B. saisonale Veränderungen der Geschiebefüchtigkeit) bestimmt im österreichischen Alpenraum der Regeninput, seien es konvektive oder advektive Niederschläge, das Prozessverhalten. Es ist daher zu erwarten, dass Änderungen des Klimasystems (vor allem Temperatur, Niederschlag) auch Änderungen der Häufigkeit und Magnitude von Muren mit sich führen. Die Prognose des zukünftigen Niederschlags mit einer hohen zeitlichen Auflösung (sub-Tagesbasis), und im Besonderen von konvektiven Niederschlägen, stellt die Klimaforschung derzeit noch vor eine große Herausforderung (Gobiet et al., 2013). Die Änderung der Disposition ist ebenso schwer zu quantifizieren. Die qualitativen Argumente unterscheiden meist zwischen kurzfristigen Änderungen in Wildbacheinzugsgebieten (höhere Temperaturen, frühere Schneeschmelze) und verzögerten Effekten (Auftauen von Permafrost, Sedimentfreilegung durch Gletscherrückgang, Frost-Tau Wechsel in höheren Regionen). Eine Zusammenstellung möglicher Effekte findet sich zum Beispiel bei Jomelli et al., (2006), Keiler et al., (2010), oder Stoffel und Huggel (2012).

Da das Klima in Österreich von unterschiedlichen Einflüssen geprägt ist (Auer, 2001) ist es denkbar, dass die Veränderung regional unterschiedlich ausfallen kann. Beniston (2006) erwartet für die Schweizer Alpen eine Verlagerung der Niederschläge von den Sommermonaten ins Frühjahr und den Winter. Da diese beiden Saisonen auch zukünftig kälter wären als die heutigen Sommer, ist mit mehr Schneefall in hochalpinen Lagen zu rechnen. Die Niederschlagshäufigkeit im Sommer wäre zwar geringer, die dabei auftretenden Intensitäten blieben aber zumindest genauso heftig wie heute. Stoffel et al. (2014) schlussfolgern, dass sich aufgrund potentiell häufiger Regen-auf-Schnee Ereignissen, die Murgang-Saison zukünftig auf die Monate März bis Dezember erweitert. Ähnliches wird auch von einer rezenten Studie von Prenner (2018) für Österreich bestätigt. In Bezug auf die verfügbaren Sedimentvolumina sind extremere Ereignisse erwartbar – vor allem gegen Saisonende. Einerseits ermöglichen die geringer werdenden, intensiven Sommerniederschläge eine größere Sedimentakkumulation im Gerinne (Lugon und Stoffel 2010; Stoffel et al., 2011) und andererseits vergrößert sich das verfügbare Sedimentvolumen durch das Auftauen von Permafrostboden über den Sommer, sofern ein solcher im Einzugsgebiet vorhanden ist (Stoffel et al., 2014; Kaitna und Huber, 2017). Da Extremereignisse oft als Folge eines ungewöhnlichen Zusammentreffens ver-

schiedener Prozesse im Einzugsgebiet auftreten, könnten bei einer Änderung eines stabilen Systems vermehrt außergewöhnliche Ereignisse auftreten.

19.5.2 Entwicklungen Lebensraum

Wie in den letzten Jahrzehnten beobachtet ist mit steigenden Siedlungsdruck zu rechnen, was zu einer Erhöhung des Murenrisikos führen kann. Aufgrund von unterschiedlichen Nutzungsinteressen werden derartige Ereignisse oft auch intensiver wahrgenommen. Die Betrachtung der Geländemorphologie kann auf intensive Murgänge aus der Vergangenheit hindeuten, wobei solche Ereignisse heute aufgrund intensiver Besiedelung und Nutzung des Naturraums meist als besondere Gefahr gesehen und dann oftmals als »Extrem« eingestuft werden. Während z. B. früher in Kellern meist nur geringwertige Güter gelagert waren, sind heute wertvolle Einrichtungen situiert, die natürlich auch einen großen Schaden im Ereignisfall nach sich ziehen. Früher wurden Siedlungen teilweise aufgegeben (z. B. Umhausen im Ötztal), was heute eher kaum umsetzbar erscheint. Aussagen zur möglichen Entwicklung des Lebensraums sind in Glade et al. (2014) zu finden.

19.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

19.6.1 Analyse

Um fundierte Aussagen über zukünftige Murgangereignisse zu treffen, ist es essentiell aus Vergangenheit und aktuellen Ereignissen zu lernen. Hierfür spielt die Dokumentation und das Monitoring von Muren eine große Rolle. Extremereignissen muss dabei besonderes Augenmerk geschenkt werden, zum einen weil es seltene Ereignisse sind, und zum anderen, weil extreme Schadereignisse meist durch ungewöhnliche Umstände, wie Prozessüberlagerung oder Kaskadeneffekte, ausgelöst werden (siehe Definition von extremen Muren in Kapitel 19.1.2).

In diesem Zusammenhang wäre es günstig, die hydro-meteorologischen Bedingungen in Kombination mit dem jeweiligen Auslösemechanismus von Muren besser zu verstehen, was der Modellierung zukünftiger Ereignisse direkt zugutekommt. Dazu sind Untersuchungen der Entstehungszone nötig. Besonders stellt sich die Frage der Feststoff-Mobilisierung im Zusammenspiel mit der Bodenfeuchte, die selten in Wildbacheinzugsgebieten gemessen wird. Ebenso wurde die Erosion im Gerinne bisher wenig untersucht. In höheren Lagen spielen unter Umständen die freigewordenen Flächen durch den Gletscher-

rückgang und dem Auftauen von Permafrost eine Rolle. Neue Möglichkeiten der Niederschlagsaufzeichnung und -prognose werden voraussichtlich eine probabilistische, regionale Murenwarnung ermöglichen. Extremereignisse vorherzusagen wird schwierig bleiben.

19.6.2 Schutzmaßnahmen

Für eine weitere Verbesserung zum Schutz vor Muren ist die Weiterentwicklung von neuen und Überprüfung von vorhandenen Schutzmaßnahmen nötig. Dort wo als Leitprozess Muren festgelegt sind, ist zu überprüfen, ob die Bemessungsgrößen dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen. In Bezug auf den Überlastfall ist zu prüfen, ob die Standsicherheit gegeben ist. In gewissen Fällen wäre wahrscheinlich auch eine Neubeurteilung der Bemessungsgrößen aufgrund Änderungen im Einzugsgebiet wünschenswert.

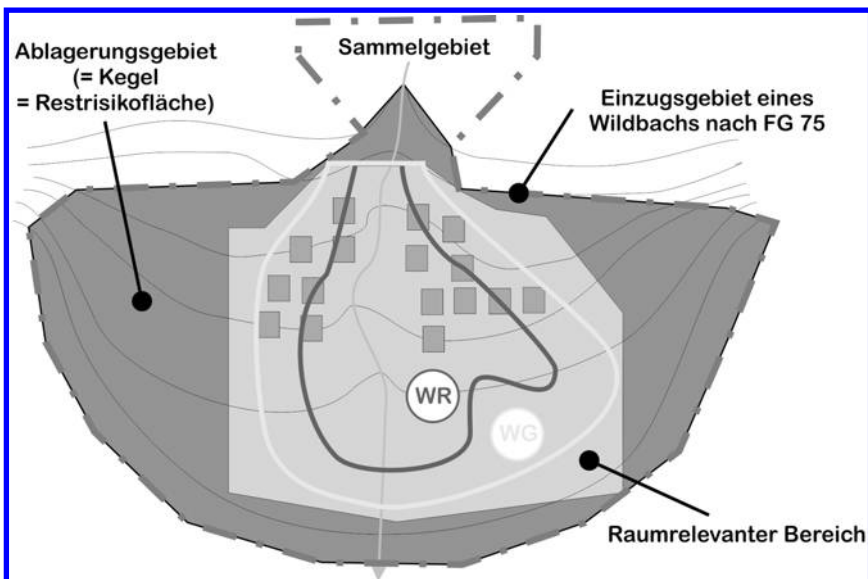


Abbildung 07: Ablagerungskegel eines Wildbachs als Teil des Einzugsgebiets, ausgewiesen als Restrisikofläche.

Figure 07: The fan of a torrent as part of the watershed represents the area of residual risk.
Quelle: Kaitna et al.

Die Eigenvorsorge zum Schutz vor Muren wird eher nur im distalen Ablagerungsbereich relevant, da im proximalen Bereich mit sehr hohen Einwirkungskräften zu rechnen ist. In diesem Bereich ist eher eine Aussiedelung rat-

sam. Hinsichtlich Extremereignissen sind Eigenvorsorgemaßnahmen mit sehr großen Kosten verbunden und daher eher nicht realisierbar.

Um die Funktion von Schutzmaßnahmen im Kegelbereich zu gewährleisten, wäre es sinnvoll für das Gerinne mehr Platz zur Verfügung zu stellen (etwa ein Betreuungstreifen, oder Sicherheitstreifen entlang des Gerinnes). Das würde den verantwortlichen Ingenieuren einen höheren Handlungsspielraum für zukünftige Maßnahmen oder zur Bewältigung von Extremereignissen geben. Ein weiterer Vorschlag wäre den gesamten potentiellen Ablagerungsraum der Wildbäche (d. h. gesamter Kegel), wie im Forstgesetz definiert, auch als Wildbach Einzugsgebiet abzugrenzen (Abbildung 07). Dieser Bereich könnte unabhängig von der Abgrenzung der Gefahrenzonen als Restrisikobereich definiert werden, was vor allem für Extremereignisse relevant wäre.

Danksagung

Wir möchten uns bei Dr. Markus Stoffel und einem unbekanntem Reviewer für die konstruktiven Kommentare bedanken.

Literatur

- Auer, I., 2001. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001. Öklim, digitaler Klimaatlas Österreichs: eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas. Leykam, CD-ROM. <https://books.google.at/books?id=OKOiDAEACAAJ>.
- Aulitzky, H., 1992. Die Sprache der Stummen Zeugen. International Conference Interpraevent Bern, 6, S. 139–174.
- Baer, P., Huggel, C., McArdell, B.W., Frank, F., 2017. Changing debris flow activity after sudden sediment input: a case study from the Swiss Alps. *Geology Today*, 33(6), S 216–223.
- Beniston, M., 2006. August 2005 intense rainfall event in Switzerland: Not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophysical Research Letters*, 33(5), L05701. <https://doi.org/10.1029/2005GL025573>.
- Berti, M., Martina, M., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., Pizziolo, M., 2012. Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117, F04006. DOI: 10.1029/2012JF002367.
- Berti, M., Simoni, A., 2005. Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff. *Landslides*, 2, S. 171–182. DOI: 10.1007/s10346-005-0062-4.

- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M., 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, S. 194–205. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.
- Braun, M., Kaitna, R., 2016. Analysis of meteorological trigger conditions for debris flows on a daily time scale. In: S.A. Makarov, J.V. Atutova, A.I. Shekhovtsov (Hrsg.), *Fourth International Conference – Debris flows: risks, forecast, protection*. Publishing House of Sochava, Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russland.
- Breien, H., Blasio, F.V. de, Elverhøi, A., Høeg, K., 2008. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 5, S. 271–280. DOI: 10.1007/s10346-008-0118-3.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.-L., Willett, S.D., Hu, J.-C., Horng, M.-J., Chen, M.-C., Stark, C.P., Lague, D., Lin, J.C., 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426, S. 648–651.
- Devoli, G., Kleivane, I., Sund, M., Orthe, N.K., Ekker, R., Johnsen, E., Colleuille, H., 2015. Landslide early warning system and web tools for real-time scenarios and for distribution of warning messages in Norway. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2, S. 625–629.
- Enigl, K., Matulla, C., Schlögl, M., Schmid, F., 2019. Derivation of canonical total-sequences triggering landslides and floodings in complex terrain. *Advances in Water Resources* (in Begutachtung).
- Evans, S.G., Bishop, N.F., Smoll, L.F., Murillo, P.V., Delaney, K.B., Oliver-Smith, A., 2009. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108, S. 96–118. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.06.020.
- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamann, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.C., Perzl, F., Peticzka, R., Prager, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., A. Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 557–600.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2013. 21st century climate change in the European Alps – a review. *Science of the Total Environment*, 493, S. 1138–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5, S. 3–17. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1.
- Heiser, M., Scheidl, C., Hübl, J., 2019. Completeness Analysis of the Austrian Torrential Event Catalogue. Accepted in *Landslides*.
- Hübl, J., Beck, M., Kyriazis, G., Sauermoser, C., Frankl, D., 2016. Ereignisdokumentation. IAN Report 185. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (unveröffentlicht).
- Hübl, J., Beck, M., Zöchling, M., Moser, M., Kienberger, C., Jenner, A., Forstlechner, D., 2016. Ereignisdokumentation 2015. IAN Report 175(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).

- Hübl, J., Eisl, J., Schraml, K., Chiari, M., Ornetsmüller, C., Braito, S., Heidger, C., 2012. Ereignisdokumentation 2012, Lorenzgerbach. IAN Report 150(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).
- Hübl, J., Sitter, F., Totschnig, R., Schneider, A., Krawtschuk, A., 2009. Historische Ereignisse: Zusammenstellung und Analyse dokumentierter Ereignisse in Österreich bis 2009. IAN Report 111(4). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).
- Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeblerli, W., Käab, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, S., 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, S. 173–187. DOI: 1684-9981/nhess/2005-5-173.
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., Hutchinson, J., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, S. 221–238.
- Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent (Hrsg.), 2009. Alpine Naturkatastrophen. Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwässer. Leopold Stocker Verlag, Graz, 124 S.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36, S. 1897–1910.
- Iverson, R.M., George, D.L., 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470, S. 20130819. DOI: 10.1098/rspa.2013.0819.
- Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Pech, P., 2006. Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, 85(1), S. 119–137. DOI: 10.1007/s10584-006-9209-0.
- Kaitna, R., Huber, T., 2017. Debris flow activity in permafrost regions in Austria during the 20th century. In: M. Mikos, N. Casagli, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides. Diversity of Landslide Forms*, 4, S. 707.
- Keiler, M., Knight, J., Harrison, S., 2010. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 368, S. 2461–2479. DOI:10.1098/rsta.2010.0047.
- Kienholz, H., 1995. Gefahrenbeurteilung und -bewertung. Auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 146(9), S. 701–725.
- Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Stricker, J.N.M., 2007. Rainfall Measurement Using Radio Links from Cellular Communication Networks: rapid communication. *Water Resources Research*, 43(3), W03201. DOI: 10.1029/2006WR005631.
- Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H., Lee, S.Y., 2004. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering Geology*, 71(1/2), S. 49–61.
- Llasat, M.C., Rigo, T., Ceperuelo, M., Barrera, A., 2005. Estimation of Convective Precipitation: The Meteorological Radar versus an Automatic Rain Gauge Network. *Advances in Geosciences*, 2, S. 103–109.
- Lugon, R., Stoffel, M., 2010. Rock-glacier dynamics and magnitude-frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 73(3/4), S. 202–210. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.06.004.

- Marra, F., Nikolopoulos, E.I., Creutin, J.D., Borga, M., 2014. Radar Rainfall Estimation for the Identification of Debris-Flow Occurrence Thresholds. *Journal of Hydrology*, 519, S. 1607–1619. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.039.
- McGuire, L.A., Rengers, F.K., Kean, J.W., Staley, D.M., 2017. Debris flow initiation by runoff in a recently burned basin: Is grain-by-grain sediment bulking or en-masse failure to blame? *Geophysical Research Letters*, 44(14), S. 7310–7319. DOI: 10.1002/2017GL074243.
- Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., Pudasaini, S.P., 2017. r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), S. 553–569.
- Mikoš, M., Četina, M., Brilly, M., 2004. Hydrologic conditions responsible for triggering the Stože landslide, Slovenia. *Engineering Geology*, 73, S. 193–213. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.011.
- Moser, M., Hohensinn, F., 1983. Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, 19(3), S. 185–211.
- Mostbauer, K., Kaitna, R., Prenner, D., Hrachowitz, M., 2018. The temporally varying roles of rainfall, snowmelt and soil moisture for debris flow initiation in a snow-dominated system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, S. 3493–3513. DOI: 10.5194/hess-22-3493-2018.
- Nikolopoulos, E.I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., Borga, M., 2014. Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology*, 221, S. 286–297. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.015.
- ONR 24800, 2009. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung (Protection works for torrent control – Terms and their definitions as well as classification). Österreichisches Normungsinstitut.
- Peres, D.J., Cancelliere, A., Greco, R., Bogaard, T.A., 2018. Influence of uncertain identification of triggering rainfall on the assessment of landslide early warning thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(2), S. 633–646. DOI: 10.5194/nhess-18-633-2018.
- Pfitscher, M., Kaitna, R., Hübl, J., 2016. Towards an empirical method to determine an engineering design peak discharge for debris flows. 13th International Congress Interpraevent Lucerne, S. 232–233.
- Pierson T.C., 1986. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: A.D Abrahams (Hrsg.), *Hillslope Processes*. Allen & Unwin, Boston, S. 269–296.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.-C., Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, S. 17–66.
- Prenner, D., 2018. The influence of climate change on debris flow trigger conditions from a hydro-meteorological perspective. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien, 97 S. (unveröffentlicht).
- Prenner, D., Hrachowitz, M., Kaitna, R., 2019. Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of the Total Environment*, 658, S. 958–972. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.206

- Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19(1), S. 47–77.
- Rickenmann, D., 2014. Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. *WSL Berichte*, 9, 108 S.
- Salio, P., Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., Vila, D., 2015. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, 163, S. 146–161. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.11.017.
- Schwanghart, W., Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M., Korup, O., 2016. Uncertainty in the Himalayan energy-water nexus: estimating regional exposure to glacial lake outburst floods. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074005. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074005.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Beniston, M., 2011. Rainfall characteristics for periglacial debris flows in the Swiss Alps: past incidences-potential future evolutions. *Climatic Change*, 105(1/2), S. 263–280. DOI: 10.1007/s10584-011-0036-6.
- Stoffel, M., Huggel, C., 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*, 36(3), S. 421. DOI: 10.1177/0309133312441010.
- Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M., Gobiet, A., 2014. Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change*, 122(1/2), S. 141–155. DOI: 10.1007/s10584-013-0993-z.
- Take, W., Bolton, M., Wong, P., Yeung, F., 2004. Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes. *Landslides*, 1, S. 173–184. DOI: 10.1007/s10346-004-0025-1.
- Theule, J.I., Liebault, F., Loye, D., Laigle, D., Jaboyedoff, M., 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 731–749.
- Zanuttigh, B., Lamberti, A., 2007. Instability and surge development in debris flows. *Reviews of Geophysics*, 45, RG3006. DOI: 10.1029/2005RG000175.