

MURGANGAKTIVITÄT AUF EINEM BEWALDETEN KEGEL DER SCHWEIZER ALPEN SEIT DEM SPÄTEN HOLOZÄN

LEHREN AUS DER DER VERGANGENHEIT – AUSWIRKUNGEN FÜR DIE ZUKUNFT

LATE HOLOCENE DEBRIS-FLOW ACTIVITY ON A FORESTED CONE IN THE SWISS ALPS

LESSONS LEARNED FROM THE PAST – IMPLICATIONS FOR THE FUTURE

Markus Stoffel^{1,2}

ZUSAMMENFASSUNG

Die Analyse von 1102 Bäumen auf dem bewaldeten Kegel des Wildbachs Ritigraben (Wallis, Schweizer Alpen) ermöglichte die Rekonstruktion von 123 Murgangereignissen seit AD 1570. Die Resultate deuten darauf hin, dass sich während der kühlen Sommer und infolge regelmässiger Schneefälle in höheren Lagen zwischen den 1570ern und 1860ern verhältnismässig wenig Muren zugetragen haben. Im Gegensatz dazu wird in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts verstärkte Aktivität festgestellt. Ein Maximum an Murgängen ist zwischen 1916 und 1935 zu erkennen, als infolge warm-feuchter Sommer 14 Ereignisse in 20 Jahren aufgetreten sind. Für die letzten zehn Jahre wird dagegen eine äusserst geringe Aktivität mit nur einem Ereignis am 27. August 2002 festgestellt. Da die Materialverfügbarkeit nicht als limitierender Faktor für die Auslösung von Ereignissen angesehen werden kann, muss davon ausgegangen werden, dass das Ausbleiben von Ereignissen auf fehlende Starkniederschläge zurückzuführen ist. Basierend auf unseren Resultaten und den Daten regionaler Klimamodelle dürften in Zukunft tendenziell eher weniger Ereignisse auftreten, da Starkniederschläge im Sommer seltener und eher im Frühling und Herbst vorkommen dürften.

Keywords: Murgang, Frequenz, Magnitude, Saisonalität, auslösende Faktoren, Jahrring, Dendrogeomorphologie, *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus cembra* L.

ABSTRACT

The study of 1102 trees growing on the forested cone of the Ritigraben torrent (Valais, Swiss Alps) allowed reconstruction of 123 debris-flow events since AD 1570. Records suggest that cool summers with frequent snowfalls at higher elevations prevented the release of debris flows between the 1570s and 1860s. Enhanced activity is observed at the end of the 19th

¹ Labor für Dendrogeomorphologie, Departement Geowissenschaften, Universität Fribourg, chemin du Musée 4, 1700 Fribourg, Schweiz (Tel.: +41-26-300-9015; Fax: +41-26-300-9746; email: markus.stoffel@unifr.ch)

² Climate Change and Climate Impacts (C³i), Institut des Sciences de l'Environnement, Université de Genève, route de Drize 7, 1227 Carouge, Schweiz (email: markus.stoffel@unige.ch)

century and culminated between 1916 and 1935, when warm-wet summers prevailed in the Swiss Alps and led to the release of 14 events in the Ritigraben torrent. In contrast, very low activity is observed for the last 10 years with only one debris-flow event recorded on August 27, 2002. As sediment availability does not present a limiting factor, the absence of debris-flow activity is due to an absence of triggering precipitation events. Based on our reconstruction and on results of RCM simulations, there are indications that debris-flow frequencies might continue to decrease in a future climate, as heavy precipitation events are projected to occur less frequently in summer but become more common in spring or fall.

Keywords: debris flow, frequency, magnitude, seasonality, triggers, dendrogeomorphology, tree ring, *Larix decidua* Mill., *Picea abies* (L.) Karst., *Pinus cembra* L.

EINLEITUNG

Starkniederschläge führen in den Schweizer Alpen regelmässig zu verheerenden Überschwemmungen und Murgängen, verursachen massive Schäden und fordern wiederholt auch Menschenleben. Bei der Analyse und Dokumentation der Hochwasser- und Murgangereignisse der letzten Jahre und Jahrzehnte wurde jeweils darauf hingewiesen, dass nebst der dichteren Besiedlung der Alpen und des grösseren Schadenpotentials auch die globale Erwärmung für die offensichtliche Häufung von Ereignissen verantwortlich sei (Christensen & Christensen 2007). Völlig unklar bleibt indes, wie sich ein künftiges Treibhausklima auf die Intensität, die Dauer, die Art und den Zeitpunkt von Niederschlagsereignissen und die damit verbundene Hochwasser- und Muraktivität auswirken werden (Bradzil et al. 2002).

Bisherige Untersuchungen zur möglichen Entwicklung der künftigen Muraktivität basierten vorab auf der Interpretation von Chronikdaten und Klimamessreihen, die einerseits lückenhaft sind und andererseits nur sehr selten bis ins 19. Jahrhundert zurückreichen. So haben etwa Rebetz et al. (1997) Archivdaten von Murgängen im Ritigraben mit Meteodaten verglichen und stellten dabei eine Zunahme der Grosseereignisse seit 1987 fest. Marchi & Tecca (2006) verzeichneten für Italien ebenfalls eine Zunahme der Ereignisse in historischen Dokumenten im Laufe der letzten Jahrzehnte, wobei die grössere Zahl Ereignisse nicht zuletzt auch auf die grössere Verfügbarkeit von Murgangdaten zurückzuführen sei. In den Französischen Alpen schliesslich berichtet Van Steijn (1996) ebenfalls von einer hohen Muraktivität seit den 1980ern, doch scheint dort der Klimawandel nicht eine einheitliche Zunahme der Ereignisse nach sich zu ziehen (Jomelli et al. 2007).

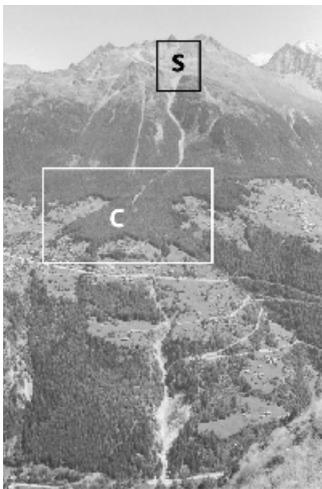
Während die vorgängig genannten Studien durchaus erste Erkenntnisse zur Rolle des Klimawandels auf die Auslösung von Murgängen zu liefern vermochten, so ist ihre Gültigkeit durch die beschränkte Anzahl Daten zu vergangenen Ereignissen und vorherrschenden Wetterverhältnissen doch stark begrenzt.

Auf waldbestandenen Kegeln lassen sich vergangene Ereignisse mit Hilfe dendrogeomorphologischer Untersuchungen rekonstruieren, um so räumliche Muster (Stoffel et al. 2006, 2008, Bollschweiler & Stoffel 2007, Bollschweiler et al. 2007, 2008a) oder die Grösse vergangener Ereignisse (Strunk 1997, Baumann & Kaiser 1999) abschätzen zu können.

Es ist daher das Ziel dieses Beitrags, die vergangene Muraktivität auf dem bewaldeten Kegel des Ritigraben (Schweiz) mit Hilfe von Jahrringanalysen zu untersuchen, um so (i) Aussagen über die Frequenz und die Saisonalität von Ereignissen treffen sowie (ii) mögliche Auswirkungen eines Klimawandels auf das Mursystem und dessen Aktivität skizzieren zu können.

UNTERSUCHUNGSGEBIET

Die Untersuchung zur vergangenen Murgangdynamik und Wachstumsanomalien in Bäumen wurde auf dem Kegel des Ritigraben im Mattertal (Wallis, Schweiz) durchgeführt. Aus Abbildung 1 ist der Verlauf des Wildbachs ersichtlich wie auch sein Anrissgebiet auf rund 2600 m ü. M., wo mittels geophysikalischer Messungen Permafrost nachgewiesen wurde (Lugon & Monbaron 1998). Auf seinem Weg ins Tal quert der Bach zwischen 1800 und 1500 m ü. M. einen Kegel (32 ha). Hier verursacht vorbei fließendes Murmaterial immer wieder Schäden an Lärchen (*Larix decidua* Mill.), Fichten (*Picea abies* (L.) Karst.) und Arven (*Pinus cembra* L.). Beim Zusammenfluss des Ritigraben mit der Matternvispa (1080 m ü. M.) fehlen Ablagerungsformen dagegen weitestgehend.



Das Murmaterial im Ritigraben besteht aus stark zerrütteten metamorphen Graniten und Gneisen. Während die einzelnen Schübe an der Front eines aktiven Blockgletschers entstehen, so wird der grösste Teil des transportierten Materials in der Rinne mobilisiert. Die Muraktivität ist aufgrund der hohen Lage des Anrissgebiets auf die Monate Juni bis September beschränkt (Stoffel et al. 2005a) und aktuelle Ereignisse scheinen vorab durch lang anhaltende Niederschläge im Herbst und weniger durch Sommergewitter ausgelöst zu werden. Archivdaten reichen bis 1922 zurück und umfassen zehn Einträge. Das „mit Abstand grösste Ereignis“ soll sich 1993 zugetragen haben, als durch elf Murschübe 60'000 m³ Material verfrachtet wurden und die Rinne auf dem Kegel teils mehr als 10 m eingetieft wurde (Zimmermann et al. 1997).

Abb1: Der Ritigraben entspringt auf 2600 m ü. M. (S) und quert den bewaldeten Kegel (C), bevor er in die Matternvispa mündet.

Fig1. The Ritigraben torrent takes its source (S) at 2600 m a.s.l., passes through a forested cone (C), before converging with the main Matternvispa river.

MATERIAL UND METHODEN

Auf dem intermediären Murkegel des Ritigraben weist eine Mehrheit der Jahrhunderte alten Nadelbäume Wachstumsanomalien infolge Murgangaktivität auf (d. h. schräggestellte Stammachsen, Verschüttung des Stammfusses, Köpfung, Wurzelzerstörung oder –freilegung, Wunden; Stoffel & Bollschweiler 2008). Basierend auf einer detaillierten geomorphologischen Karte des Kegels und anhand einer äusseren Begutachtung der Bäume

wurden 1102 Bäume ausgewählt, die durch vergangene Muraktivität Schaden genommen haben. Mit Zuwachsbohrern wurden alsdann mindestens zwei Bohrkerne pro Baum gezogen (insgesamt 2246 Bohrkerne; max. 40 cm lang, Ø 6 mm). Zusätzlich zu den gestörten Bäumen wurden 102 in ihrem Wachstum ungestörte Referenzbäume beprobt.

Im Jahrringlabor wurden die Bohrkerne auf Holzträger geklebt und geschliffen, Jahrringe gezählt sowie die Jahrringbreiten mit einem LINTAB-Messtisch und der Software TSAP 3.0 (Rinntech 2007) mit einer Präzision von 1 µm vermessen. Die Messkurven der „Murgangsbäume“ wurden alsdann mit jenen der Referenzbäume abgeglichen, um so Störungen, die den gesamten Bestand betreffen (z. B. Insektenepidemien oder klimatische Einflüsse), von räumlich begrenzten Murgangschäden unterscheiden zu können (Cook & Kairiukstis 1990).

Auf den Wachstumskurven wurde vorab nach abrupten Wachstumseinbrüchen und –schüben gesucht (Schweingruber 2001) und im Falle schräggestellter Baumachsen nach exzentrischem Wachstum (Fantucci & Sorriso-Valvo 1999). Schliesslich wurden die Bohrkerne auch noch unter dem Binokular untersucht, um weitere Anzeichen vergangener Muraktivität in der Form von Kallusgewebe und traumatischen Harzkanalreihen in der Nähe von Wunden festzustellen (Stoffel et al. 2005b, 2006, Perret et al. 2006, Bollschweiler et al. 2008a, b).

Da Nadelbäume nach erfolgter Verletzung direkt mit der Ausbildung von Kallusgewebe oder traumatischen Harzkanalreihen beginnen, kann das Auftreten vergangener Ereignisse mit bis zu monatlicher Genauigkeit rekonstruiert werden (Stoffel et al. 2005c, Stoffel & Beniston 2006, Stoffel, 2008). Die dadurch gewonnenen Resultate zum saisonalen Auftreten der Muren wurden in einem weiteren Schritt mit den Daten der seit 1863 existierenden lokalen Meteorstation Grächen sowie mit Archiveinträgen zu Hochwasserereignissen in den Walliser Alpen (Lütschg-Lötscher 1926, Röthlisberger 1991) verglichen.

RESULTATE

Die Analyse der Murgangsbäume erlaubte die Rekonstruktion von 2263 Wachstumsanomalien infolge vergangener Muraktivität auf dem Kegel des Ritigraben. Die detaillierte Analyse der Anomalien und die räumliche Verteilung der Schäden erlaubt die Rekonstruktion von insgesamt 123 Murgangereignissen für die letzten 440 Jahre.



Abb2: Jahrring-basierte Rekonstruktion der Murgangaktivität auf dem Kegel des Ritigraben zwischen AD 1566 und 2005.

Fig2: Tree-ring based reconstruction of debris flow activity at Ritigraben between AD 1566 and 2005.

Somit konnte die Anzahl bekannter Ereignisse um einen Faktor zwölf verdichtet und die Frequenzreihe um dreieinhalb Jahrhunderte verlängert werden (Abb. 2). Aus den Daten geht auch hervor, dass sich Phasen mit zahlreichen Ereignissen mit solchen geringer Aktivität abwechseln. Eine Häufung von rekonstruierten Murgängen ist vorab in den 1870ern, 1890ern und zwischen 1916 und 1935 augenfällig.

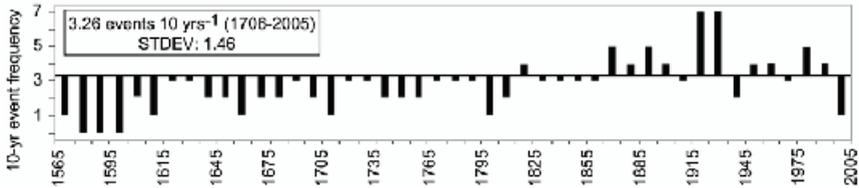


Abb3: Rekonstruierte 10-Jahresfrequenzen der Murgangereignisse zwischen AD 1566 und 2005. Resultate sind als Abweichungen von der mittleren Dekadenfrequenz der letzten 300 Jahre (1706–2005) dargestellt.

Fig3: Reconstructed 10-yr frequencies of debris-flow events between AD 1566 and 2005. Data are presented as variations from the mean decadal frequency of debris flows of the last 300 yrs (1706–2005), corresponding to the mean age of trees sampled.

In Abb. 3 wird die rekonstruierte Frequenz in Zehnjahresabschnitte zusammengefasst und mit der durchschnittlichen Frequenz seit 1706 verglichen (= 3.26 Ereignisse pro zehn Jahre). Die Resultate deuten darauf hin, dass die Muraktivität während der “Kleinen Eiszeit” (1570–1900; Grove 2004) zumeist unterdurchschnittlich war und dass ein Anstieg in der Frequenz erst nach dem letzten grossen Vorstossen der Alpengletscher in den 1860ern verzeichnet wird. Diese Periode verstärkter Aktivität dauerte bis ins frühe 20. Jahrhundert an und erreichte ihren Höhepunkt zwischen 1916 und 1935, als innert 20 Jahren 14 Murgänge aus den Jahrringserien rekonstruiert werden konnten. Danach nahm die Aktivität im Ritigraben tendenziell ab. Eine sehr geringe Aktivität wird für den letzten Zehnjahresabschnitt (1996–2005) festgestellt, als lediglich ein Murgang (27. August 2002) aufgetreten ist. Zusammen mit den Zehnjahresabschnitten 1706–1715 und 1796–1805 weisen die letzten zehn Jahre die geringste Murgangaktivität der letzten 300 Jahre auf.

Die Saisonalität der vergangenen Ereignisse wurde aufgrund der Position der Verletzungen und Harzkanalreihen innerhalb des Jahrrings festgelegt und die Resultate mit Meteodaten und Archiveinträgen zu Hochwasserereignissen verglichen. Abbildung 4 zeigt die Saisonalität der Murgänge auf und deutet auf ein saisonal frühes Auftreten von Ereignissen vor 1900 hin. Dies trifft insbesondere für die Zeit von 1850–1899 zu, wenn mehr als 70% der Ereignisse im Juni und Juli auftraten und kein Murgang im September verzeichnet wurde.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts hat sich die Muraktivität zu den Monaten August und September hin verlagert – seit 1962 ist kein Murgang mehr im Juni aufgetreten. Basierend auf unseren Rekonstruktionen scheint es auch, dass bei Niederschlagsereignissen im Mai oder Oktober die tiefen Temperaturen und der damit verbundene Schneefall sowie der gefrorene Boden im Anrissgebiet (>2600 m ü. M.) die Auslösung von Muren verunmöglichen.

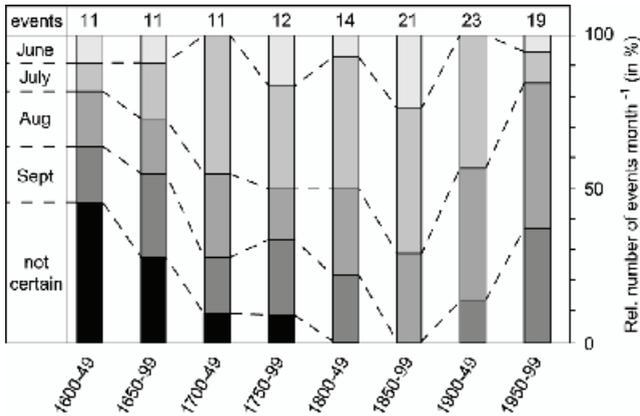


Abb4: Die Saisonalität (JJAS) vergangener Murgangereignisse wurde anhand von Harzkanalreihen in der Nähe von Verletzungen sowie durch einen Abgleich mit Archivdaten rekonstruiert.

Fig4: Seasonality (JJAS) of past debris-flow activity as inferred from the intra-annual position of rows of traumatic resin ducts (TRD) in the tree ring as well as on archival data.

DISKUSSION

In der vorliegenden Studie wurden durch die Untersuchung von 1102 Lärchen, Fichten und Arven insgesamt 123 Murgangereignisse seit 1570 rekonstruiert. Ein Vergleich der rekonstruierten Murgänge mit regionalen Klima- und Wetterdaten (Pfister 1999) zeigt deutlich auf, dass zwischen 1570 und 1860 aufgrund der kühleren Sommer mit regelmässigem Schneefall bis in tiefere Lagen offenbar nur wenige Muren losgelöst werden konnten. Im Gegensatz dazu scheinen die tendenziell wärmeren Temperaturen sowie die überdurchschnittlichen Regenmengen im Sommer und Herbst zwischen 1864 und 1895 zu günstigeren Auslösebedingungen im Anrissgebiet geführt haben. Die Zunahme in der Frequenz lässt sich insbesondere auch zwischen 1916–1935 beobachten, als während warm-feuchten Sommern nicht weniger als 14 Murgangereignisse in den Jahrringserien rekonstruiert werden konnten.

Die vorliegende Frequenz für den Ritigraben deckt sich auch weitgehend mit Archivdaten zu Hochwassern in Flüssen der Schweizer Alpen (Lütschg-Lötscher 1926, Röthlisberger 1991). Wie im Untersuchungsgebiet sind auch in den Chroniken nur wenige Ereignisse während der “Kleinen Eiszeit” anzutreffen. Im Gegensatz zur Murrinne Ritigraben beginnt die Zunahme in der Hochwasserfrequenz in den Schweizer Flüssen aber bereits in den 1830ern (Pfister 1999), also drei Jahrzehnte bevor die Murgangaktivität im Mattertal zunimmt.

Das saisonale Auftreten der Murgänge hat im Laufe der Zeit ebenfalls Veränderungen erfahren. Die Jahrringdaten deuten auf eine Verschiebung der Muraktivität im 20. Jahrhundert von Juni und Juli in Richtung August und September hin – Ereignisse im Juni fehlen seit 1962 ganz. Ein Vergleich der Murfrequenz mit Archivdaten zu Überschwemmungen in benachbarten Gewässern lassen zudem den Schluss zu, dass zwischen den 1860ern und bis in die 1980er lokal begrenzte Sommergewitter für die Auslösung der Muren zuständig waren.

Lang anhaltende und ausgiebige Niederschläge im späten Sommer und Herbst werden vorwiegend durch Tiefdruckgebiete im Golf von Genua und die damit verbundene Staulage entlang des Alpenrückkamms verursacht und waren für die Murgangereignisse von 1987, 1993 und 1994 verantwortlich. Vom 14. bis 16. Oktober 2000 verursachte das Genatief erneut sehr grosse Schäden im Kanton Wallis, der bereits gefrorene Boden und der einsetzende Schneefall in den Anrissgebieten des Mattertals verhinderten jedoch das Auslösen von Murgängen aus dem Periglazialbereich des Ritigraben (>2600 m ü. M.).

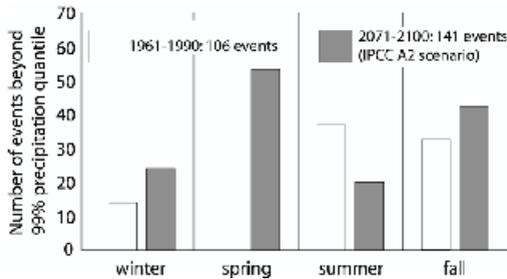


Abb5: Anzahl Starkniederschläge in den Schweizer Alpen jenseits des 99%-Quantils (≥ 60 mm/Tag) im jetzigen (1961–1990) und in einem zukünftigen Treibhausklima (2071–2100), basierend auf dem IPCC A2-Szenario.

Fig5: Number of heavy precipitation events beyond the 99% quantile in the Swiss Alps under current (1961–1990) and in a greenhouse climate (2071–2100) based on the IPCC A2 scenario.

Die rekonstruierte Verschiebung der Muraktivität vom Sommer hin zum frühen Herbst geht mit einer beobachteten Abnahme der Starkniederschläge im Sommer und einer leichten Zunahme der herbstlichen Niederschlagsintensitäten im 20. Jahrhundert einher (Schmidli & Frei 2005). Basierend auf Simulationen des dänischen Klimamodells HIRHAM und unter der Annahme, dass sich bis ins Jahr 2100 die CO_2 -Konzentration der Atmosphäre im Vergleich zur vorindustriellen Zeit verdoppelt haben wird (IPCC-Szenario A2, siehe Nakićenović et al. 2000), dürften sich die Extremniederschläge mit mehr als 60 mm pro Tag noch weiter vom Sommer in Richtung Frühling und Herbst verschieben. Abbildung 5 illustriert diese Verschiebung und zeigt ebenfalls auf, dass die Zahl der Extremniederschläge in einem künftigen Treibhausklima um mehr als 30% zunehmen dürfte.

Die Klimaveränderung und die Zunahme der Extremniederschläge müssen jedoch nicht zwingend zu einer Zunahme in der Frequenz führen – im Gegenteil: Denn in einem künftigen Frühling und Herbst dürften die Temperaturen um 4–7 °C unter den aktuellen Sommertemperaturen verbleiben und durch Schneefälle im Anrissgebiet viel Wasser zurückgehalten werden. Wenn man zusätzlich bedenkt, dass Starkniederschläge in einem künftigen Sommerklima tendenziell seltener auftreten dürften, so kann sogar davon ausgegangen werden, dass im Ritigraben in Zukunft weniger Murgangereignisse verzeichnet werden dürften als dies in der Vergangenheit der Fall war. Aber auch wenn in Zukunft Ereignisse weniger häufig auftreten sollten, so muss in einem Treibhausklima doch mit sehr – wenn nicht sogar ausserordentlich – grossen Sommerereignissen gerechnet werden. Dies vor

allem deshalb, weil bei wärmeren Temperaturen mehr Feuchte transportiert und potentiell ein höherer Abfluss generiert werden kann.

Die Auslösung von Muren hängt aber nebst der Verfügbarkeit von Wasser auch vom Vorhandensein erodierbaren Materials im Anrissgebiet und entlang der Rinne ab. Trotz des Grossereignisses vom September 1993 mit elf Schüben und einem Volumen von rund 60'000 m³ (Zimmermann et al. 1997) stellt die Materialverfügbarkeit zurzeit keinen limitierenden Faktor im Ritigraben dar, weil (i) während der letzten Jahrzehnte jeweils nur rund 10% des Materials aus dem Periglazialbereich losgelöst wurden und (ii) die übersteilten Rinnenwände im Bachverlauf nach dem Ereignis von 1993 teilweise kollabierten und so Material für neue Ereignisse bereitstellen.

Die Verfügbarkeit erodierbaren Materials könnte sich zudem infolge der Klimaerwärmung merklich verändern. Vorausgesetzt, dass sich die Lufttemperaturen bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um mehrere Grade erwärmen (wie dies vom IPCC A2-Szenario vorhergesagt wird, Nakićenović et al. 2000), so dürften vor allem auch im Permafrostkörper (Blockgletscher) des Anrissgebiets drastische Veränderungen auftreten. Basierend auf Temperaturmessungen in Bohrlöchern im Anrissgebiet sind die Permafrost-Temperaturen bereits jetzt verhältnismässig hoch (Herz et al. 2003) und es muss mit einer Beschleunigung der Bewegungsraten des Blockgletschers gerechnet werden. Dadurch könnte in absehbarer Zukunft auch im Anrissgebiet mehr Material zur Verfügung gestellt werden.

Die Analyse der räumlichen Verteilung von Bäumen, die gleichzeitig auf ein Ereignis reagieren, und die Datierung der Ablagerungen auf der Kegeloberfläche (Stoffel et al. 2008) lassen weitere Schlüsse auf die vergangene Muraktivität zu. So fällt auf, dass sich Ausbrüche aus der aktuellen Rinne fast ausschliesslich oberhalb 1650 m ü. M. zugetragen haben und in der Vergangenheit mit grosser Regelmässigkeit aufgetreten sind. Die häufigen Gerinneverlagerungen waren möglich, weil vor 1993 seit mindestens 100 Jahre kein Ereignis mehr zu massiver Erosion und zur Eintiefung der Rinne auf dem Kegel geführt hat. Durch den allmählichen Einsturz der aktuellen Rinne und der instabilen Levées seit 1993 muss jedoch davon ausgegangen werden, dass künftige Ereignisse ohne Massnahmen zur Rinnenstabilisierung erneut durch alte Rinnen über den Kegel fließen und Gebäude bedrohen dürften.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Aufgrund unserer Jahrringrekonstruktionen, aufgrund der Materialverfügbarkeit und basierend auf den existierenden Klimamodellen muss davon ausgegangen, dass sich Murgänge in einem künftigen Klima wegen der vorhergesagten Verschiebung der Starkniederschläge eher im Herbst zugetragen werden und tendenziell weniger häufig vorkommen dürften. Durch das weniger häufige Auftreten von Ereignissen dürfte sich das Gerinne zwischen den Schüben stärker verfüllen und bei Starkniederschlägen mehr Material zur Verfügung stellen. Insbesondere bei Starkniederschlägen im Sommer könnten so eher seltene, dafür aber sehr grosse Ereignisse auftreten, die auf dem Kegel und bei der Mündung des Ritigraben in die Mattervispa Schäden an Strasse, Bahn und Gebäuden anrichten könnten.

Nebst den mittel- und langfristigen Veränderungen in der Saisonalität, Grösse und Frequenz von Ereignissen sollte auch den kurzfristigen Veränderungen im aktuellen Gerinneverlauf Beachtung geschenkt werden: Die Rinne hat sich im Bereich des Kegels seit der starken

Eintiefung von 1993 teilweise wieder verfüllt, an anderen Stellen weisen die seitlichen Levées Schwachstellen auf, was bei einem künftigen Grossereignis durchaus zu Ausbrüchen und der Reaktivierung von alten Rinnen und im unteren Bereich des Kegels zu Schäden an Gebäuden und Verkehrswegen führen könnte. Eine Stabilisierung und Aufrechterhaltung der aktuellen Rinne und deren Einhänge könnte dagegen bewirken, dass auch künftige Murgänge im Gerinne verbleiben und Schäden auf dem Kegel und an Hab und Gut verhindert werden können.

DANK

Diese Arbeit wurde teilweise durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU), die Dienststellen für Wald und Landschaft (DWL) und Strassen und Flussbau (DSF) sowie das RP6-EU-Projekt „Ensembles“ finanziert. Der Autor schuldet Delphine Conus, Michael A. Grichting, Igor Lièvre und Gilles Maître seinen aufrichtigen Dank für die Mitarbeit im Gelände und Labor sowie Michelle Bollschweiler für die sorgfältige Durchsicht des vorliegenden Manuskripts.

LITERATUR

- Baumann, F., Kaiser, K.F. (1999): "The Multetta debris fan, Eastern Swiss Alps: A 500-year debris flow chronology". *Arct. Antarc. Alp. Res.*, 31(2): 128-134.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M. (2007): "Debris flows on forested cones – reconstruction and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland." *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, 7: 207-218.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Schneuwly, D. M. (2008a): "Dynamics in debris-flow activity on a forested cone – a case study using different dendroecological approaches." *Catena*, 72: 67-78.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Schneuwly, D. M., Bourqui, K. (2008b): „Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows.“ *Tree Physiol.*, 28: 255-263.
- Bollschweiler, M., Stoffel, M., Ehmisch, M. & Monbaron, M. (2007): "Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods." *Geomorphology* 87: 337-351.
- Bradzil, R., Glaser, R., Pfister, C., Stangl, H. (2002): "Floods in Europe – a look into the past." *Science Highlights Pages News* 10.
- Cook, E.R., Kairiukstis, L.A. (1990): "Methods of dendrochronology – applications in the environmental sciences." London: Kluwer.
- Christensen, J.H., Christensen, O.B., (2007): „A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century.“ *Clim. Change* 81(1): 7-30.
- Fantucci, R., Sorriso-Valvo, M. (1999): "Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy)." *Geomorphology* 30: 165-174.
- Grove, J.M. (2004): "Little Ice Ages: ancient and modern." London: Routledge.
- Herz, T., King, L., Gubler, H. (2003): "Microclimate within coarse debris of talus slopes in the alpine periglacial belt and its effects on permafrost." In: M. Philipps, S.M. Springman, L.U. Arenson (eds.), *Permafrost. Proc. 8th Int. Conf. on Permafrost*, Zurich, 21-25 July 2003. Rotterdam: Balkema.
- Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Pech P. (2007): "Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps)." *Clim. Change* 85 (1-2): 119-137.

- Lütschg-Lötscher, O. (1926): „Über Niederschlag und Abfluss im Hochgebirge: Sonderdarstellung des Mattmarkgebietes: ein Beitrag zur Fluss- und Gletscherkunde der Schweiz.“ Zürich: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband.
- Lugon, R., Monbaron, M. (1998): „Stabilité des terrains meubles en zone de pergélisol et changements climatiques. Deux études de cas en Valais: Le Ritigraben (Mattertal) et la moraine du Dolent (Val Ferret).“ Zürich: vdf Hochschulverlag AG.
- Marchi, L., Tecca P.R. (2006): “Some observations on the use of data from historical documents in debris-flow studies.” *Nat. Hazard* 38: 301-320.
- Nakićenović, N. et al. (2000): “IPCC Special Report on Emissions Scenarios”. Cambridge: Cambridge University Press.
- Perret, S., Stoffel, M., Kienholz, H. (2006): “Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – a dendrogeomorphological case study.” *Geomorphology* 74(1-3): 219-231.
- Pfister, C. (1999): „Wetternachhersage. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen.“ Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.
- Rebetez, M., Lugon, R., Baeriswyl, P.A. (1997): “Climatic change and debris flows in high mountain regions: The case study of the Ritigraben torrent (Swiss Alps).” *Clim. Change* 36: 371-389.
- Rinntech. 2007. <http://www.rinntech.com/Products/Lintab.htm>.
- Röthlisberger, G. (1991): „Chronik der Unwetterschäden in der Schweiz.“ *Ber. Forsch'anst. WSL* 330: 1-122.
- Schmidli, J., Frei, C. (2005): “Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century.” *Int. J. Climatol.* 25: 753-771.
- Schweingruber, F.H. (2001): „Dendroökologische Holzanatomie.“ Bern, Stuttgart, Wien: Paul Haupt.
- Stoffel, M. (2008): “Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts.” *Dendrochronologia*: in press.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M. (2008): “Tree-ring analysis in natural hazards research – a state of the art.” *Nat. Hazard. Earth. Syst. Sci.* 8: in press.
- Stoffel, M., Beniston, M. (2006): “On the incidence of debris flows from the early Little Ice Age to a future greenhouse climate: A case study from the Swiss Alps.” *Geophys. Res. Letter* 33: L16404.
- Stoffel, M., Conus, D., Grichting, M.A., Lièvre, I., Maître, G. (2008): Unraveling the patterns of late Holocene debris-flow activity on a cone in the Swiss Alps: chronology, environment and implications for the future. *Glob. Planet. Change*: in press.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Hassler, G.R. (2006): “Differentiating events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach.” *Earth Surf. Process. Landf.* 31(11): 1424-1437.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Conus, D., Grichting, M.A., Raetzo, H., Gärtner, H.W., Monbaron, M. (2005a): “400 years of debris-flow activity and triggering weather conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland.” *Arct. Antarct. Alp. Res.* 37(3), 387-395.
- Stoffel, M., Schneuwly, D., Bollschweiler, M., Lièvre, I., Delaloye, R., Myint, M. & Monbaron, M. (2005b): “Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology.” *Geomorphology* 68(3-4): 224-241.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M., Perret, S. (2005c): “Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach.” *Z. Geomorphol.* 49(1): 89-106.
- Strunk, H. (1997): “Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods.” *Catena* 31, 137-151.

- Van Steijn, H. (1996): "Debris flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe." *Geomorphology* 15: 259-273.
- Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. (1997): „Murgangefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz.“ Zürich: vdf Hochschulverlag AG.