

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 101 (2009)
Heft: 1

Artikel: Murgangmodellierung mit dynamisch-physikalischem und GIS-basiertem Fliessmodell
Autor: Scheuner, Thomas / Keusen, Hans Rudolf / McArdell, Brian W.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941908>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 18.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Murgangmodellierung mit dynamisch-physikalischem und GIS-basiertem Fließmodell

Fallbeispiel Rotlauigraben, Guttannen, August 2005

■ Thomas Scheuner, Hans Rudolf Keusen, Brian W. McArdell, Christian Huggel

Zusammenfassung

Während der Unwetter im August 2005 wurden in Guttannen (BE) über 500 000 m³ Geschiebe durch einen Murgang im Talboden abgelagert. Ein Rückstau bzw. eine Verlagerung der Aare aus ihrem ursprünglichen Gerinne mit anschliessender Überflutung des Dorfes waren die Folgen. Auslöser für dieses ausserordentliche Ereignis stellten nebst den intensiven Niederschlägen auch die begünstigenden hydrogeologischen Verhältnisse im Anrissgebiet dar (Geologie, Geschiebepotenzial und Permafrost). Mittels eines Fließ- und Massenbewegungsmodells (MSF) sowie eines dynamisch-physikalischen Modellansatzes (RAMMS) wurde das Ereignis nachmodelliert, um einerseits Rückschlüsse bezüglich Plausibilität und andererseits Hinweise auf die Kalibrierung des Modells zu erhalten. Die Resultate korrelieren dabei gut mit den tatsächlichen Ablagerungscharakteristiken. Die Modelle können daher für unterschiedliche Fragestellungen (z.B. bei der Gefahrenkartierung) als wertvolle Unterstützung dienen. Der Einsatz von RAMMS in der Praxis steht in Kürze bevor.

Résumé

Pendant les crues d'août 2005, plus de 500 000 m³ de matériel charrié s'est accumulé par une lave torrentielle dans le fond de la vallée près de Guttannen (BE). Les conséquences ont été une retenue, respectivement un déplacement de l'Aare hors de son lit. Les causes de cet événement extraordinaire étaient, aussi bien des précipitations fortes, que les conditions hydrogéologiques spéciales dans la zone d'arrachement (géologie, charriage potentiel et permafrost). L'événement a été modélisé avec un modèle d'écoulement topologique (MSF) et par un modèle dynamique-physique (RAMMS) dans le but d'obtenir des déductions concernant la plausibilité et des indications au sujet du calibration. Les résultats ont bien corrélié avec les caractéristiques réelles du dépôt de la lave torrentielle. D'après cela les modèles peuvent servir comme soutien précieux pour différentes questions (par exemple pour l'élaboration de cartes de dangers). La mise en pratique de RAMMS est imminente.

dauernd gefrorenen Böden (Permafrost). Als Konsequenz von Gletscherschwund und Permafrostdegradation erhöht sich das Geschiebepotenzial. Das freigelegte, unkonsolidierte Sedimentmaterial kann bei extremen Niederschlagssituationen leicht mobilisiert werden und zu Murgängen führen (Haeberli und Beniston, 1998). Zudem gehen Prognosen von häufigeren und intensiveren Starkniederschlägen bei erhöhter Schneefallgrenze in Zukunft aus (OcCC, 2007).

Diese Faktoren bzw. die sich daraus ergebenden Konsequenzen für besiedelte und bewirtschaftete Gebiete führen zu einer verstärkten Bedeutung von realistischen Modellierungssystemen, welche bei der Abschätzung von Ausmass und Intensität eines Ereignisses als Unterstützung dienen können. Die Berechnungen stellen für die Erstellung und Modifikation von Gefahrenkarten eine wichtige Grundlage dar. Nebst einer Verbesserung des Prozessverständnisses können Murgangmodelle auch von grosser Bedeutung für die Überprüfung und Optimierung von Schutzmassnahmen sein.

Ein Musterbeispiel, in welchem Gletscherrückzug bzw. spezielle Permafrostverhältnisse von grosser Bedeutung für die Auslösung eines mächtigen Murgangereignisses waren, stellt das Gebiet Homad oberhalb von Guttannen im Haslital dar. Eine mächtige, vom Gletscherrückzug seit 1850 hinterlassene Moränenbasen mit hohem Geschiebepotenzial, die Permafrostsituation, welche das abfließende Wasser oberflächennah kanalisierte und das Lockergestein vollständig sättigte, sowie die ungewöhnliche Niederschlagssituation während dem Unwetter im August 2005, stellten die hauptsächlichen Auslöser für den massiven Murgang im Rotlauigraben bei Guttannen dar. Mit einem Geschiebevolumen von mehr als einer halben Million Kubikmeter ist dies

1. Einleitung

Murgänge sind häufig auftretende Ereignisse in Gebirgsregionen und stellen für Mensch und Infrastruktur ein bedeutendes Gefahrenpotenzial dar. Sie spielen eine wichtige Rolle bei Massenabtrag und -verschiebung in Gebirgen. Nebst dem materiellen Schaden, der in der Schweiz mehrere Millionen Franken pro Jahr betragen kann, fordern Murgänge auch immer wieder Menschenleben (Zimmermann et al., 1997). Daneben stellen auch die Kosten für Instandstellung und Schutzmassnahmen für die betroffenen Gemeinden

und Kantone eine grosse finanzielle Belastung dar.

Das Gefahrenpotenzial durch Murgänge wird sich in Zukunft wahrscheinlich aus unterschiedlichen Gründen erhöhen. Die durchschnittliche jährliche Lufttemperatur in der Schweiz stieg zwischen 1901 und 2000 um 0.135 °C pro Dekade an (Rebetez und Reinhard, 2007). Dieser Erwärmungstrend wird sich auch in Zukunft fortsetzen und führt zu einem weiter anhaltenden, starken Gletscherrückzug (OcCC, 2007). Der Anstieg der Lufttemperaturen führt ferner zur Degradation von



Bild 1. Aufbränden des Murgangs am Felsrücken und Rückstau der Aare (Foto: H.R. Keusen, 24.8.2005).

eines der grössten Ereignisse in der jüngeren Geschichte der Alpen (Keusen und Schilling, 2007).

Das Ziel dieses Artikels besteht darin, das Ereignis in Guttannen zu analysieren und einen Ausschnitt der Murgangmodellierung in der Schweiz anhand von zwei Modellierungssystemen aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurde der Murgang Rotlaur mit zwei unterschiedlichen Modellansätzen nachgerechnet und auf ihre Anwendbarkeit und Eignung für spezifische Aufgabenbereiche getestet. Nach der Ereignisanalyse in Kapitel 2 werden in Kapitel 3 die verwendeten Modelle und Daten erläutert und nachfolgend in Kapitel 4 die Resultate dargestellt. Schliesslich wird eine Evaluation der Ergebnisse durchgeführt, um die Modelle auf ihre Brauchbarkeit zu prüfen. In Kapitel 5 wird ferner ein Ausblick auf weitere Entwicklungsstufen der Modelle gegeben.

2. Ereignisanalyse Rotlaur

Der Rotlaurgraben mündet oberhalb von Guttannen rechtsufrig in die Aare. In der Nacht vom 22. zum 23. August 2005, während der grossflächigen Unwetter in der Schweiz, ereignete sich hier ein Murgang mit Geschiebeablagerungen im Talboden von 550 000 m³ (vgl. Bild 1). Das Ereignis stellt damit nach Durnagel 1944 (500 000 m³) und Gerental 1987 (über 100 000 m³) den grössten Murgang in der jüngeren Geschichte der Schweizer Alpen dar.

Die Mure richtete einerseits direkte Schäden an, wie beispielsweise die Zerstörung einer Wasserfassung, die Übermuerung von Landwirtschaftsland sowie

die Übermuerung und Zerstörung der Kantonsstrasse auf einer Länge von annähernd 400 m. Dabei wurde Geschiebe von lokal bis zu 20 m Mächtigkeit abgelagert. Andererseits entstanden auch massive Sekundärschäden. Der markante Felssporn westlich der Aare (vgl. Bild 1) spielte dabei eine entscheidende Rolle. Das Aufbränden des Murganges an jenem Felsrücken führte zu einer raschen Verklauung der Aare, die in der Folge ihren Weg über die Kantonsstrasse durch das Dorf Guttannen hindurch suchte. Die Überschwemmungen im Dorf verursachten Schäden von über 3 Mio. CHF. Weitere Sekundärschäden ergaben sich durch den erhöhten Geschiebetrieb der Aare in den nachfolgenden Jahren. Dies hatte Auflandungen in der Region Innertkirchen zur Folge.

Bereits vor diesem aussergewöhnlichen Ereignis war bekannt, dass der Rotlaurgraben murefähig ist. Der grosse Murgang sowie historische Dokumente weisen darauf hin, dass hier grundsätzlich mit Murgängen gerechnet werden muss. Diese waren aber gemäss Ereigniskataster eher klein und führten nur zu kurzzeitigen Verklauungen der Aare. Die Kantonsstrasse, welche geradlinig ins Dorf hinein führt, ist zudem eine Schwachstelle. Sie bildet einen potenziellen Wasserweg für eine aus dem Flussbett gedrängte Aare (Keusen und Schilling, 2007).

2.1. Murgangauslösung

Die Gründe für dieses ausserordentliche Murgangereignis waren einerseits die starken Niederschläge, andererseits die spezielle hydrogeologische Situation im Einzugsgebiet.

Die Auswertung der Tagesnieder-

schläge des Pluviometers bei Guttannen zeigten, dass das Niederschlagsereignis mit ungefähr 170 mm in 48 Stunden am 21./22. August einen Höchstwert seit 1876 darstellt und einem ungefähr 100-jährigen Ereignis entspricht. Ferner ist zu bemerken, dass schon die erste Augushälfte mit insgesamt 141 mm Niederschlag sehr nass war und zur Sättigung des Bodens beitrug. Auch die hohe Schneefallgrenze trug ihren Anteil zu den erhöhten Abflüssen bei. So fiel am 15. August 2005 der Niederschlag noch als Schnee, zwischen dem 18. und dem 22. August ging er aber bis auf über 3000 m ü.M. als Regen nieder.

Das Einzugsgebiet Rotlaur besteht im obersten Teil aus der trichterförmigen, mit Blockschutt übersäten Karmulde des früheren Homadgletschers (Bild 2), welcher seit dem nahezu fortwährenden Rückzug ab 1850 eine mächtige Moränenbastion hinterliess. Wie die Landeskarte oder aktuelle Luftbilder dokumentieren, ist ein grosser Teil des Gletschers mit Sturzmaterial aus den umliegenden Felswänden bedeckt. Im freigelegten Gletschervorfeld deuten einige Indizien darauf hin, dass die Moränenbastion Homad unterhalb des groben Blockschutts dauernd gefroren ist. Dabei kann es sich um Permafrost oder einen zugeschütteten Toteiskörper des sich zurückziehenden Gletschers handeln. Permafrost konnte mit Hilfe der Photogrammetrie (horizontale Verschiebungen des Schuttfeldes in Talrichtung um 1.3 m/Jahr sowie eine Absenkung der Oberfläche um 0.5 m/Jahr) und Messungen der Basisschneetemperatur (BTS) nachgewiesen werden. Die Auswertung der BTS-Messungen mit UTL-3 Scientific Dataloggers (www.utl.ch) zeigen, dass sich die Temperatur nach dem Einschneien der Temperaturlogger im Dezember relativ konstant um rund -4 °C einpendelte (vgl. Bild 3). Solche Werte sind typisch für Permafrostregionen. Erst mit dem Eintreten der Schneeschmelze gegen Ende April steigt die Temperatur wieder gegen die Nullgradgrenze an. Ebenso deuten die morphologischen Geländeformen wie Stauchwulste (Bild 2) sowie das im Sommer zwischen den Blöcken untief über der gefrorenen Schicht hörbar abfliessende Wasser stark auf Permafrost bzw. Toteis im Untergrund hin. Und schliesslich ist auch in der Permafrost-Hinweiskarte ersichtlich, dass in der Moränenbastion Homad flächenhaft mit Permafrost zu rechnen ist (BAFU, 2005).

Die spezielle Geologie und Geomorphologie stellten weitere Gründe für die Ereignisauslösung dar. Zum einen be-



Bild 2. Moränenbastion Homad mit Anrisszone und deutlich sichtbaren Stauchwulsten (Foto: H.R. Keusen).

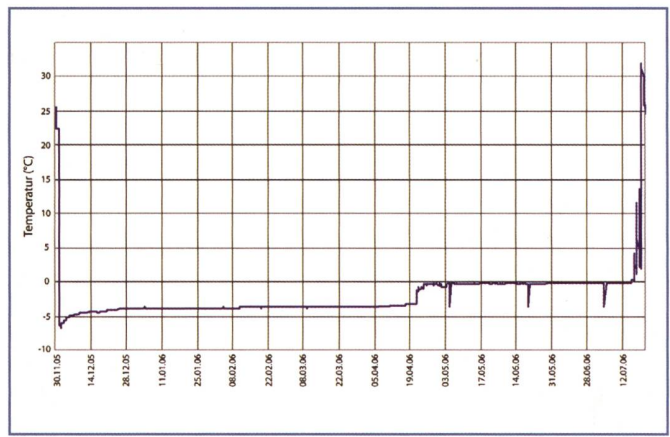


Bild 3. Gemessene Basisschneetemperaturen (BTS) im Winter 05/06 in der Karmulde Homad.

stehen die Flanken des Felskessels Homad aus geringdurchlässigem kristallinem Gestein, wodurch mit hohen Abflusskoeffizienten gerechnet werden muss. Zum anderen ist in der Region um den Rotlaubach ein massives Geschiebepotenzial vorhanden. Mächtige Schuttdepots aus sandig-siltigen Kiesen mit hohem Glimmeranteil, welche wenig kohäsiv und damit wasserempfindlich bzw. erosionsanfällig sind, ermöglichten erst die Mobilisation der Mure in ihrem Ausmass.

Der eigentliche Auslöser war das über dem stauenden Permafrost abfließende Wasser, welches sich im Felstrichter gesammelt hatte. Die grosse Wassermenge trat an der Front des Permafrosts in den Gehängeschutt aus und löste den Murgang aus. Der Murgang ist dabei in mehreren Teilschüben abgelaufen, wie einerseits Feldaufnahmen (Levéés) und andererseits die Beobachtungen von Ortsansässigen hinweisen.

2.2 Materialparameter

Betrachtet man die Massenbilanz des Murganges, so kann das Gerinne grob in vier Bereiche eingeteilt werden (Bild 4). Im höchst gelegenen Abschnitt D unterhalb der Karmulde fand eine intensive Erosion statt. 170 000 m³ Geschiebe wurden aus dem steilen Abhang der Moränenbastion mitgerissen. Im nachfolgenden schmalen und steilen Bereich C liegt das Bachbett im wenig durchlässigen Fels. Die Murenschübe konnten hier eine grosse kinetische Energie aufbauen, mit welcher sie auf dem Kegel ein Volumen von 320 000 m³ erodierten (Abschnitt B). Diese tiefgreifende Kegelerosion trug massgeblich zum grossen Impact des Murganges bei und stellte ein in diesem Mass bis anhin ungewohntes Phänomen dar, welches aber in künftigen Gefahrenanalysen zu berücksichtigen ist. Die Erosion im Kegelbereich des Rotlaubi-

grabens hinterliess einen Graben mit nahezu senkrecht abfallenden, zum Teil bis 20 m hohen Flanken. Die Querschnittsflächen reichen bis zu 500 m². Im untersten Abschnitt A fand schliesslich die Hauptablagerung von 520 000 m³ Geschiebe statt. Die Differenz über das ganze Gerinne zwischen Erosion und Deposition von 40 000 m³ rührt einerseits daher, dass ein Teil der ersten Schübe von der Aare bereits wegtransportiert wurde und andererseits die photogrammetrische Methode zur Bestimmung der Geschiebebilanz auch kleine Ungenauigkeiten aufweist.

3. Modelle und Daten

3.1 Digitale Höhenmodelle (DHM)

Die Topographie ist für die verwendeten Modelle Grundvoraussetzung, um gute Resultate zu erzielen. In der vorliegenden Arbeit wurden digitale Höhenmodelle mit

einer Maschenweite von 25, 10 und 2 m verwendet. Zu erwähnen ist das hochpräzise digitale Terrainmodell der amtlichen Vermessung (DTM-AV) mit einer Auflösung von 2 m, welches aus Airborne-Laser-Scanning-Daten (LIDAR) erstellt wurde. Es gibt die rohe und unverbaute Topographie der Bodenoberfläche wieder, deckt aber nur Gebiete unterhalb von 2000 m ü.M. ab. Infolge dieser Einschränkung wurde für das hoch gelegene Anrissgebiet Homad ein grobmaschigeres Höhenmodell (10 m Auflösung, Amt für Geoinformation des Kantons Bern) mit bilinearem Interpolationsverfahren verbessert und angehängt. Da die LIDAR-Datenaufnahme vor dem Ereignis im Rotlaugraben durchgeführt wurde, stellte das Ingenieurbüro Flotron AG (Meiringen) kurz nach dem Ereignis ein hochpräzises Höhenmodell mit 1 m Auflösung durch die photogrammetrische Methode her. Mit einem hochauflösenden Hö-

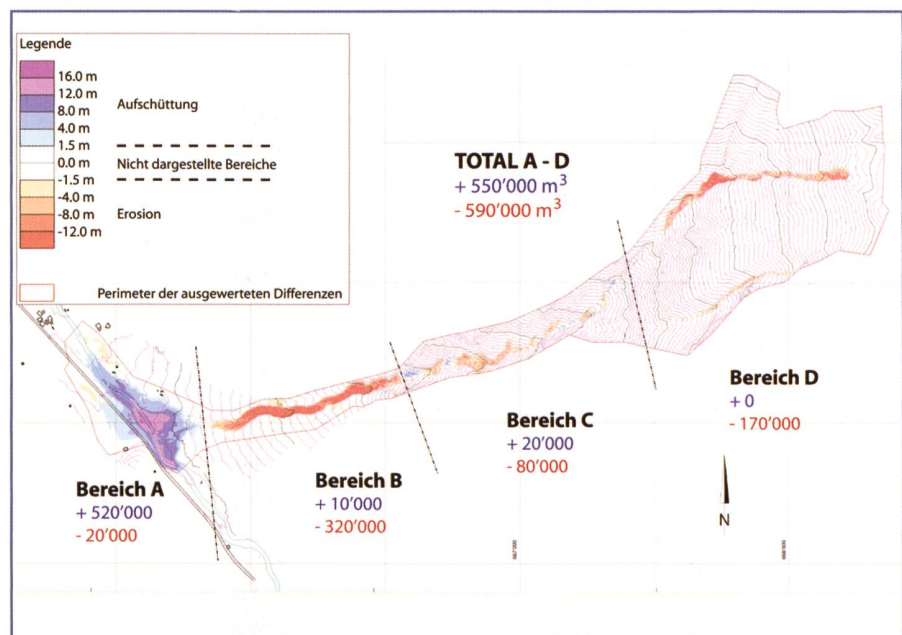


Bild 4. Geschiebebilanz des Murganges Rotlaui erstellt durch photogrammetrische Auswertung.

henmodell vor und nach dem Ereignis kann somit der Einfluss von Erosion bzw. eines veränderten Gerinneverlaufes auf die Modellierungsergebnisse aufgezeigt werden.

3.2 Modified single-flow direction model (MSF)

Eine der ersten und einfachsten Berechnungsmethoden, um Fliessrichtungen von Massenbewegungen zu berechnen, stellte der sogenannte D8-Algorithmus dar (O'Callaghan und Mark, 1984). Dabei kann die bewegte Masse von einer Ausgangszelle zu einer der acht Nachbarzellen – entweder angrenzend oder diagonal – in der Richtung des grössten Gefälles fliessen. In einem Single-flow-direction-Modell wird die Fliessrichtung durch eine zentrale Linie mit einer Pixelbreite dargestellt, welche dem grössten Gefälle folgt. Da nun aber in flacheren Gebieten Murgänge häufig vom steilsten Fliessweg abweichen und eine Abflussverbreiterung sowie Ablagerung von Sediment seitlich des Hauptflusses stattfindet, wurde in einem erweiterten Modell (modified single-flow direction model, MSF) eine Funktion integriert, wonach eine gewisse abweichende Fliessrichtung möglich ist. Abweichungen von 45° vom steilsten Gefälle werden dabei mit einem Widerstand modelliert, d.h., je mehr der berechnete Murgang vom steilsten Gefälle abweicht, desto höher der Widerstand. Eine weitere Funktion übersetzt den Widerstand in Wahrscheinlichkeiten, sodass Flächen, die mit höherer oder tieferer Wahrscheinlichkeit von der Mure potenziell betroffen sind, ausgeschieden werden können (Huggel et al., 2003).

Um die Reichweite der Mure zu definieren, wurde das Konzept des Pauschalgefälles angewendet. Für jede Zelle, welche potenziell vom Murgang betroffen wird, berechnet der Algorithmus das Verhältnis zwischen dem aktuellen Höhenunterschied und der Horizontalstanz entlang dem Fliessweg bis zur Zelle. Unterschreitet dabei der errechnete Wert einen vorher festgelegten Grenzwert, so wird die Mure gestoppt. Untersuchungen haben gezeigt, dass das Pauschalgefälle bei granularen Murgängen, wie sie in den Alpen üblich sind, kaum je 11° unterschreitet, individuell aber unterschiedlich ausfallen kann (Rickenmann und Zimmermann, 1993).

Da MSF kein dynamisch-physikalisches Modell darstellt, sondern ausschliesslich auf durch die Topographie bestimmten Abflusswegen beruht, werden vom Modellierungssystem weder Ablagerungshöhen noch Fliessgeschwindigkeiten berechnet, sondern nur die Ausbreitung einer potenziellen Mure.

3.3 RAMMS

RAMMS steht für Rapid Mass Movements. Dieses Software-Paket wird gegenwärtig am Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt und wird drei Prozesse der schnellen Massenbewegung (Murgänge, Steinschläge und Lawinen) sowie Schutzmassnahmen in einem Werkzeug kombinieren bzw. modellieren. Dadurch ist eine integrale Evaluation der Schutzmassnahmen durchführbar, da diese oft auch gegen Prozesse schützen, für welche sie ursprünglich nicht vorgesehen wurden. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellten Resultate beruhen auf dem Lawinenmodul. Die Gründe der Benutzung des Lawinenmoduls für Murgänge liegen einerseits darin, dass bereits verschiedene Autoren auf das ähnliche Fliessverhalten von Lawinen und Murgängen verwiesen und auch erfolgreich modelliert haben (u.a. Swartz et al., 2003) und andererseits das Murgangmodul zur Zeit der Studie noch nicht für praktische Anwendungen bereitstand.

Das verwendete Modul beruht auf dem Reibungsmodell nach Voellmy. Es ist als sogenanntes Block-Modell zu klassifizieren, d.h., die bewegende Masse wird als Block aufgefasst, auf dessen Schwerpunkt alle Kräfte angreifen (Tiefenbacher, 2003). Für die vorliegende Arbeit waren vor allem die berechneten Parameter Abflussgeschwindigkeit, Abflusstiefe sowie Reichweite und Ausdehnung relevant. Die Geschwindigkeit ist dabei von der Fliesshöhe, der Neigung und den Reibungsparametern abhängig. Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse zeigte auf, dass die beiden Reibungskoeffizienten das Verhalten der modellierten Murgänge stark beeinflussen. Der Faktor der turbulenten Reibung quantifiziert den Verlust an kinetischer Energie, welcher durch Reibung zwischen den Partikeln und dem Boden entsteht. Die Geschwindigkeit der bewegten Masse wird massgeblich durch diesen Faktor beeinflusst. Geometrie und Rauigkeit der Bodenoberfläche bestimmen dabei die Höhe des Wertes. Die trockene Reibung hängt dagegen zum einen von den Materialeigenschaften ab (u.a. Dichte und Wassergehalt) und zum anderen vom Druck senkrecht zur Bodenoberfläche. Je grösser hierbei der Wassergehalt oder die Fliesshöhe, desto kleiner der Faktor der trockenen Reibung.

Durch Hinzufügen von weiteren Einflussparametern wurden die ursprünglich von Voellmy entwickelten Gleichungen von Salm et al. (1990) verfeinert. Unter anderem nutzen sie die Breite und Neigung

des Anrissgebietes als Grundlage für die Berechnung der Endgeschwindigkeit. Des Weiteren findet nun auch der aktiv-passive Fließdruck Berücksichtigung, welcher die Menge an entzogener Energie quantifiziert, wenn das Geschiebematerial in die Länge gezogen oder gestaut wird.

Bei der Integration des Voellmy-Salm-Modelles in RAMMS wurden ausserdem wichtige kontinuumsmechanische Ansätze (u.a. Fliesshöhen-Mittelung und kontinuierliche Strömung) eingefügt. Die leitenden Gleichungen stellen dabei die Massen- und Impulserhaltung dar. Durch den kontinuumsmechanischen Ansatz der kontinuierlichen Strömung wird der Fliesskörper zudem als flüssiges Kontinuum mit konstanter mittlerer Dichte oder anders ausgedrückt als homogenes, inkompressibles einphasiges Medium behandelt (Christen et al., 2005).

Eine verbesserte Version von RAMMS wird zurzeit am WSL intensiv getestet. Die Modifikationen, namentlich die Verwendung von neu vier- anstatt dreiseitigen Zellen als Berechnungsgrundlage sowie eine neue numerische Gleichung zweiter Ordnung, verbessern den Einsatz von hoch aufgelösten Höhenmodellen, wodurch genauere Resultate vor allem in stark kanalisierter Topographie zu erwarten sind. Das Modellierungssystem wird zudem in der Lage sein, Erosion zu berücksichtigen. Diese Funktion wird zur Zeit in laufenden Forschungsarbeiten am WSL/GIUZ auf ihre Plausibilität überprüft.

4. Resultate

4.1 MSF

Die überaus kurze Berechnungszeit sowie die Qualität der Resultate sprechen bei MSF für die Verwendung eines hoch aufgelösten Höhenmodells. Die Modellierung zeigt zwar die Bildung eines relativ breiten Murkegels, die grössten Wahrscheinlichkeiten liegen aber in der tatsächlich betroffenen Region des Ereignisses (vgl. rote Umrandung in *Bild 5*, oben). MSF konnte allerdings die grossflächigen Ablagerungen im untersten Kegelbereich nicht wiedergeben, welche letztlich zum Rückstau der Aare führten. Der Grund dafür liegt darin, dass der Modellansatz keine Fliessenergien berücksichtigt und daher kein Aufwärtsfliessen der Mure möglich ist. Auch Fliesshöhen werden von MSF nicht berechnet, wodurch keine Geschiebeakkumulationen entstehen können und somit im Gegensatz zu RAMMS selbst der kleine Höhenunterschied zwischen Talboden und Kantonsstrasse unüberwindbar

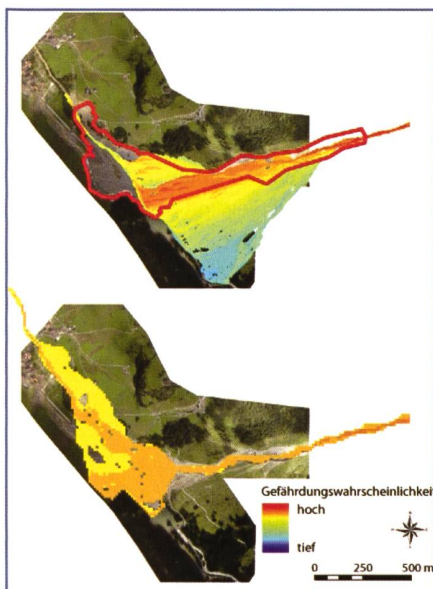


Bild 5. Resultate mit dem Modellansatz MSF auf Basis DTM-AV vor dem Ereignis (oben) und nach dem Ereignis (unten). Der rote Umriss stellt die tatsächliche Ablagerung dar.

bleibt. Die Mure fließt am tiefsten Punkt, d.h. entlang des Flusslaufes, talabwärts.

Verwendet man die Topographie, wiesiesich nach dem Ereignis präsentierte, d.h., das Gerinne durch erosive Prozesse stark übertieft wurde, wird die wahre Ausbreitung gut nachgebildet (Bild 5, unten). Infolge der nahezu senkrecht abfallenden Uferseiten des Gerinnes auf dem Kegel bot sich der Mure keine Möglichkeit mehr, seitlich auszubrechen. Dies zeigt die grosse Bedeutung und Herausforderung, Erosion in Modellansätze zu integrieren.

4.2 RAMMS

Bei RAMMS lohnt es sich aus Gründen des Berechnungsaufwandes nebst hoch auflösenden Höhenmodellen auch fallweise ein DHM mit 10 oder sogar 25 m Maschenweite einzusetzen, um erste wichtige Information bezüglich Schwachstellen oder gefährdeten Gebieten zu erhalten. Dort können nachfolgend vertiefte Analysen mit Modellierungen, aber auch Feldbegehungen (u.a. als Verifikation) durchgeführt werden.

Da RAMMS auch die Spezifikation von Geschiebekubaturen unterstützt, stellt sich hier nun die Frage, ob ein Murgangereignis schubweise oder mit der total mobilisierten Masse modelliert werden soll. Analysen ergaben, dass die Modellierung von solch grossen Ereignissen in einem einzigen Schub nur teilweise zielführend ist, da durch das immense Geschiebeaufkommen die Feinheiten der Topographie keine entscheidende Rolle mehr spielen

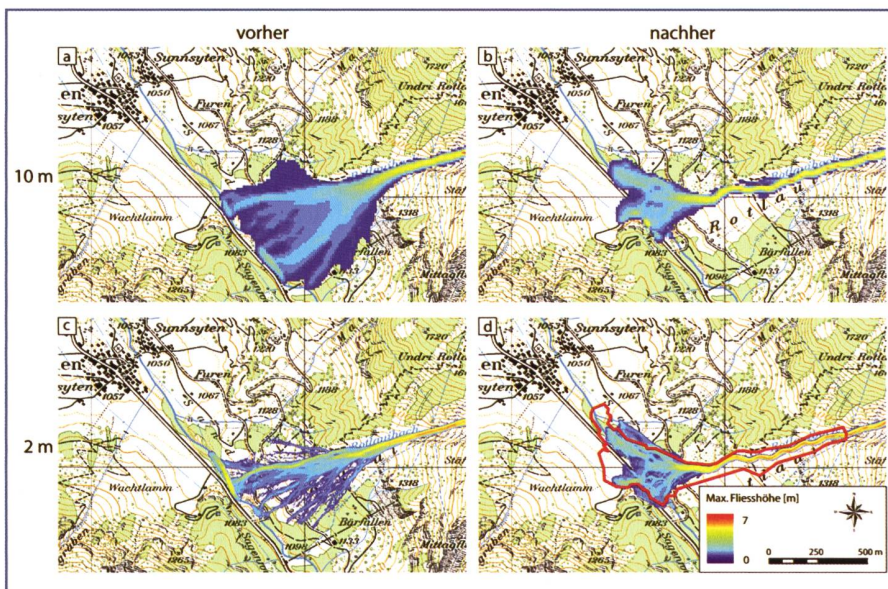


Bild 6. Resultate mit RAMMS basierend auf einem DHM10 vor bzw. nach dem Ereignis (a bzw. b) sowie auf einem DTM-AV vor und nach dem Ereignis (c bzw. d). Das Murgangsvolumen beträgt jeweils 50 000 m³. Reproduziert mit Bewilligung der swisstopo (JA082265).

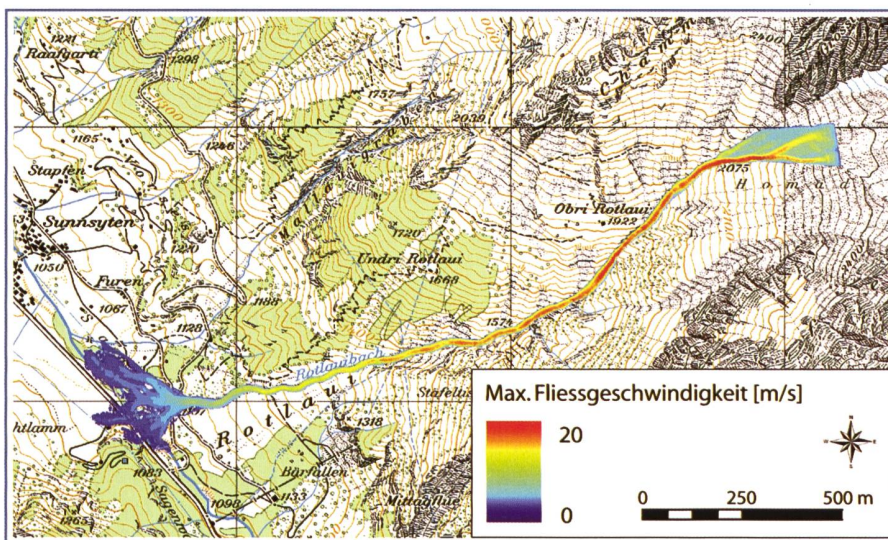


Bild 7. Mit RAMMS berechnete Fließgeschwindigkeit des Murganges (swisstopo JA082265).

und unrealistisch grossflächige Ablagerungen die Folge sind. Allerdings ist mit dieser Methode im Sinne einer «worst case»-Analyse eine Abschätzung der Ablagerungsmächtigkeit möglich, was für mögliche Sekundäreffekte (z.B. Flussrückstau) von grosser Bedeutung sein kann.

Bei RAMMS müssen zudem, wie in Abschnitt 3.3 erwähnt, die Dichte der bewegten Masse sowie die turbulente und trockene Reibung bestimmt werden. Diese stellen die massgeblich sensitiven Parameter dar. Diese Faktoren wurden aus Feldbegehungen, Gesprächen mit Murgangsspezialisten sowie Angaben aus Fachliteratur hergeleitet und an diversen Ereignissen geeicht.

Vergleicht man Modellierungsre-

sultate, welche auf Höhenmodellen mit 10 bzw. 2 m Maschenweite sowie der Topographie vor bzw. nach dem Ereignis basieren, so zeigt sich, dass sie einen massgeblichen Einfluss auf die Berechnungen ausüben. Mit einem angenommenen maximalen Schubvolumen von 50 000 m³, welcher die Aare ein erstes Mal aufstaute, sowie dem DHM10 als Berechnungsgrundlage, ist ersichtlich, dass zwar ein Grossteil der Mure im vorhandenen Gerinne des Rotlaugraben abfließt, am Kegelhals aber trotzdem infolge des noch untiefen Gerinnes bzw. der nicht modellierbaren Erosion ausbricht und annähernd der Falllinie folgend bis in den Talgrund vorstösst (Bild 6a). Benutzt man hingegen ein Höhenmodell, in welchem die massive

Erosion im Gerinne bereits berücksichtigt wurde, so ergeben sich äusserst realitätsnahe Resultate (*Bild 6b* und *d*). Die Ungenauigkeiten, wie in *Bild 6a* aufgezeigt, müssen u.a. bei der Planung von Schutzmassnahmen oder der Gefahrenkartierung verhindert werden. Verwendet man daher ein DTM-AV, dann bricht die Mure nur noch marginal aus dem Gerinne aus und lagert sich grösstenteils in der tatsächlich betroffenen Region ab. Die Resultate geben die Realität besser wieder, da nebst der Ausbreitung auch die Ablagerungsmächtigkeit (vgl. *Bild 6c*) deutlich realistischer modelliert werden.

Die Fliessgeschwindigkeiten stützen die getroffenen Annahmen, welche zur massiven Kegelerosion geführt haben. Im mittleren, steilen Gerinneabschnitt erhöhte sich die Fliessgeschwindigkeit der Mure stark (*Bild 7*). Ab dem Kegelhals reduzierte sich diese rasch, einerseits infolge der Gefällsabnahme und andererseits durch die Erosionstätigkeit (Scheuner, 2007).

Der Rückstau der Aare konnte mit RAMMS gut nachmodelliert werden. Am Felssporn bei der Kantonsstrasse brandet der Murgang richtiggehend auf. Die dadurch entstandenen massiven Gesschiebeablagerungen von mehreren Metern Mächtigkeit führten zu ebendieser Rückstausituation.

5. Schlussfolgerungen und Ausblick

Der Murgang im Rotlauigraben am 22. August 2005 ist mit Ablagerungen von über 500 000 m³ eines der grössten Ereignisse in der jüngeren Geschichte der Schweizer Alpen. Vor allem der Rückstau der Aare und die Überflutung des Dorfes Guttannen führten zu grossen Schäden. Speziell bei der Mure im Rotlauigraben ist der Umstand, dass über 300 000 m³ Gesschiebe im oberen Bereich des Talschuttkegels erodiert wurde.

Die auslösenden Faktoren dieses Ereignisses waren

- der intensive Niederschlag, welcher infolge hoher Schneefallgrenze bis über 3000 m ü.M. als Regen fiel,
- die hohen und konzentrierten Abflusskoeffizienten infolge der hydrogeologischen Gegebenheiten und der Permafrostsituation,
- die mächtigen und erosionsanfälligen, glimmerreichen Gehängeschuttdepots sowie
- das grosse Gefälle des ganzen Gerinnes, insbesondere aber der steilen Moränenbastion.

Die Voraussetzungen für weitere

Murgänge im Einzugsgebiet Rotlaur sind gegeben. So ereignete sich bereits im Juli 2006 ein erneutes Ereignis mit schätzungsweise 30 000 m³ Gesschiebe. Daher wurde die kurz nach dem Ereignis erstellte Notstrasse über den Murkegel durch eine nachhaltige Schutzmassnahme, namentlich die Verlegung der Kantonsstrasse aus dem Gefahrenbereich heraus, ersetzt. Die Strasse wird nun auf einem erhöhten Damm geführt. Durch diese Massnahme wird der Aare der benötigte Raum gegeben, um bei weiteren Murgängen und nachfolgenden Verklausungen auszuweichen, ohne Strasse und Dorf zu überfluten.

Die Modellierungen des Ereignisses mit MSF und RAMMS lieferten in der vorliegenden Arbeit ansprechende Resultate. Ihre Eignung liegt aber in unterschiedlichen Aufgabenbereichen. Mit MSF sind infolge der einfachen Handhabung innert kurzer Zeit zufriedenstellende Resultate erzielbar und man erhält rasch einen ersten Überblick über potenziell gefährdete Gebiete. Modellierungen über grössere Gebiete sind möglich. Die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten stellt somit ein potenzielles Einsatzgebiet dar.

RAMMS ist demgegenüber komplexer in der Anwendung, infolgedessen ist aber auch der Informationsgehalt der Modellierungen höher (Abflusshöhe und -geschwindigkeit als Modelloutput). Anwendungsbereiche liegen beispielsweise in der Überprüfung der Wirksamkeit von Schutzmassnahmen oder in der Unterstützung von Fachspezialisten bei der Erstellung oder Revision von Gefahrenkarten, da RAMMS in der Lage ist, Szenarien mit unterschiedlichen Murenfrachten zu berechnen. Da die Reibung infolge Bodeneigenschaften oder Wassergehalt miteinbezogen wird, erfordert der Umgang mit RAMMS aber einiges mehr an Erfahrung und Fachwissen. Im Gegensatz zum grossflächigen Anwendungsbereich von MSF, konzentriert man sich mit RAMMS auch vielmehr auf ausgesuchte murfähige Gerinne. In Zusammenarbeit mit der WSL testet zurzeit die GEOTEST AG die Verwendung von RAMMS zur Unterstützung bei der Erarbeitung von Gefahrenkarten. Erste interne Anwendungen ergaben vielversprechende Resultate.

Eine wichtige Erkenntnis der vorliegenden Arbeit stellt auch die Wichtigkeit und die unterschiedliche Verwendung von digitalen Höhenmodellen dar. MSF berücksichtigt lediglich die Topographie und arbeitet nicht explizit mit Fliessvolumen. Modellierungen mit hochauflösenden DHM (1–2 m) sind problemlos möglich. Die

Auswahl des DHM sollte jedoch in jedem Fall der Fragestellung angepasst werden (Stolz und Huggel, 2008). Die Bedeutung der Auswahl der geeigneten DHM gilt prinzipiell auch für RAMMS. Mit engmaschigen DHM kann etwa der Einfluss von kleinräumigen Hindernissen auf die Abflusswege erfasst und mitberücksichtigt werden. Allerdings können Modellierungen mit hoch aufgelösten DHM auch eine zu hohe Genauigkeit vortäuschen. In der Realität können Gerinne durch einzelne Schübe zugeschüttet oder durch Gerinneerosion kanalisiert werden, wodurch die Fliesswege von Muren massgeblich beeinflusst werden. Auf dem Kegel des Rotlauigrabens wurde die Topographie stark von erosiven Kräften beeinflusst und lässt daher Modellierungen mit der ursprünglichen Gerinnetopologie mit einer gewissen Unsicherheit zurück. Im Fallbeispiel Guttannen hätten zwar die Regionen der Hauptablagerungen und ein Rückstau der Aare in Kombination mit einer gutachterlichen Feldbegehung erkannt werden können, trotzdem weicht der simulierte Murkegel in einigen Regionen bezüglich Ausmass und Mächtigkeit von der Realität ab.

Bei der Abklärung des Gefahrenpotenzials von möglichen Murgängen und der Erstellung von Gefahrenkarten ist das Modell RAMMS somit ein aussagekräftiges Hilfsmittel für die Unterstützung der gutachterlichen Beurteilung.

Zugriff auf die Modellierungssysteme

Für MSF ist das Geographische Institut der Universität Zürich (C. Huggel) und für RAMMS die Eidg. Forschungsanstalt WSL (B. W. McArde) zu kontaktieren.

Literatur

- BAFU (2005): Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung der Schweiz. <http://www.bafu.admin.ch/naturgefahren/06140/06149/index.html?lang=de>. Zugriff: 03.06.2008. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Christen, M., Bartelt, P. und Gruber, U. (2005). Numerical calculation of snow avalanche runout distances. Computing in Civil Engineering, Proceedings of the 2005 International Conference in Cancun, Mexico.
- Haeberli, W. und Beniston, M. (1998): Climate Change and its Impacts on Glaciers and Permafrost in the Alps
In: Ambio, Vol. 27, Nr. 4, 258–265.
- Huggel, C., Käab, A., Haeberli, W. und Krummenacher, B. (2003). Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier

lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth Sciences*, Vol. 3, 64–662.

Keusen, H.R. und Schilling, M. (2007): Guttannen – Murgang Rotlauri (Lösungsorientierte lokale Ereignisanalyse). Geotest AG, Zollikofen.

O'Callaghan, J. und Mark, D. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision Graphics and Image Proceedings*, Vol. 28, 323–344.

OCC (2007): Klimaänderung und die Schweiz 2050 – Erwartete Auswirkungen auf Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft.

Rebetez, M. und Reinhard, M. (2007): Monthly air temperature trends in Switzerland 1901–2000 and 1975–2004. In: *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 91, 27–34. DOI 10.1007/s00704-007-0296-2

Rickenmann, D. und Zimmermann, M. (1993): The 1987 debris flows in Switzerland – documentation and analysis. In: *Geomorphology*, Vol. 8, Nr. 23. 175–189.

Salm, B., Burkard, A. und Gubler, H. (1990). Be-

rechnung von Fliesslawinen – Eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen. Mitteilungen des Eidgenössischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung.

Scheuner, T. (2007): Modellierung von Murgangereignissen mit RAMMS und Vergleich durch GIS-basiertes Fließmodell. Diplomarbeit am Geographischen Institut der Universität Zürich.

Stolz, A. und Huggel, C. (2008): Debris flows in the Swiss National Park: The influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results. In: *Landslides*, Vol. 5, 311–319.

Swartz, M., McArde, B. und Bartelt, P. (2003). Interpretation of the August 2000 Schipfenbach debris flow event using numerical models. Mitteilungen der Versuchsanstalt VAW der ETH Zürich. Jahrestagung der SGMG: Turbulenzen in der Geomorphologie, Erstfeld. Vol. 184, 51–60.

Tiefenbacher, F. (2003). Vom konstitutiven Verhalten fließenden Schnees. Dissertation an der Philosophisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Basel.

Zimmermann, M., Mani, P. und Gamma, P. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. Schlussbericht NFP 31, Zürich.

Anschrift der Verfasser

Thomas Scheuner (ehemals GIUZ/WSL) und Hans Rudolf Keusen

Geotest AG, Birkenstrasse 15

CH-3052 Zollikofen

thomas.scheuner@geotest.ch

hansrudolf.keusen@geotest.ch

Brian W. McArde

Eidg. Forschungsanstalt WSL

Zürcherstrasse 111, CH-8903 Birmensdorf

brian.mcardell@wsl.ch

Christian Huggel

Geographisches Institut der Universität Zürich

GIUZ, Winterthurerstrasse 190

CH-8057 Zürich

christian.huggel@geo.uzh.ch

Schwemmholz-Management Kleine Emme und Reuss

R. Hunziker, H. Kaspar, S. Stocker, D. Müller

Zusammenfassung

Bei Hochwasser mitgeführtes Schwemmholz stellt an der Kleinen Emme und an der Reuss ein grosses Problem dar, weshalb die Thematik in einer kantonsübergreifenden Studie angegangen wurde. Unter dem Titel «Schwemmholz-Management» wurde auf dem Abschnitt Malters bis Bremgarten ein Konzept erarbeitet, welches folgende Fragestellungen behandelt:

- Bestimmung der zu erwartenden Schwemmholzmengen
- Analyse der Problemstellen
- Erarbeitung von Massnahmentypen für den Rückhalt und die Entnahme von Schwemmholz
- Vorschläge für Standorte zur Realisierung von Massnahmen und Kombination dieser Standorte (verschiedene Varianten)

1. Einleitung

Das Hochwasser an der Kleinen Emme und der Reuss im Jahr 2005 zeichnete sich durch eine ausserordentlich grosse Abflussspitze und ein sehr grosses Schwemmholzaufkommen aus. Die Kleine Emme schwemmte ca. 3500 m³ Holz (Festvolumen) in die kritischen Abschnitte bei Emmen und Littau, wo es zu Schwemmholzablagerungen mit grossen Schäden kam. Grosse Schäden entstan-

den auch bei Brücken oberhalb Malters und in Reussbühl. In der Reuss kam es bei den Wehren in Perlen, Bremgarten und Windisch zu grossen Schäden.

Die vier Anliegerkantone und das Bundesamt für Umwelt (BAFU) beschlossen in der Folge, ein Schwemmholz-Management aufzubauen. Dieses hat zum Ziel, die durch Schwemmholz verursachten Überflutungen und Schäden an den Brücken und Wehren in Zukunft zu verhin-

dern. Die Massnahmen sollen zwischen Malters und Bremgarten realisiert werden (Bild 1, links). Man geht dabei von drei unterschiedlichen Strategien aus:

- Reduktion des Holzaufkommens im Einzugsgebiet
- Rückhalt und Entnahme in der Kleinen Emme und der Reuss
- Schadloses Durchleiten an den kritischen Stellen

Während die Reduktion des Holzaufkommens Sache der Waldbesitzer ist, konzentrierten sich die für die Kleine Emme und die Reuss Verantwortlichen auf den Rückhalt, die Entnahme und das schadlose Durchleiten. Bei der Strategie «Rückhalt und Entnahme» werden die drei Massnahmentypen Wehre, Aufweitungen und Seitenarme, auf welche im Rahmen dieses Artikels eingegangen wird, unterschieden. Für das schadlose Durchleiten von Holz sind bauliche Massnahmen an den Brücken und Wehren nötig, um Verklausungen möglichst zu verhindern. Auf diese Massnahmen wird im vorliegenden Artikel nicht eingegangen.