

MURGANMODELLIERUNG IM ILLGRABEN, SCHWEIZ, MIT DEM NUMERISCHEN 2D-MODELL RAMMS

MURGANMODELLIERUNG IN DER PRAXIS

Catherine Berger¹, Brian W. McArdell² und Guido Lauber³

ZUSAMMENFASSUNG

Der Illgraben im Südwesten der Schweiz ist mit mehreren Murgangereignissen pro Jahr einer der aktivsten Wildbäche der Alpen. Grosse Murgänge gefährden das Dorf Susten, welches sich auf dem Kegel des Illgrabens befindet. Im Rahmen des Projektes „Hochwasserschutz Illgraben“ wurde das numerische 2D-Modell RAMMS der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft zur Modellierung der Murgänge verwendet. Die grosse Anzahl dokumentierter Ereignisse mit Messdaten zu Murgangparametern lieferte eine optimale Ausgangslage für die Anwendung des Modells. In der Kalibrierung der Reibungsparameter an Hand charakteristischer Ereignisse wurden die besten Resultate mit der Parameterkombination $\mu=0.07$ und $\xi=400\text{m/s}^2$ erreicht. Anschliessend wurden Fliesswege und Ausbruchsstellen untersucht, mit herkömmlichen Beurteilungsmethoden verglichen und im Gelände plausibilisiert. Die Modellierungen wurden sowohl bei der Erarbeitung der Gefahrenkarte als auch zur Beurteilung von Schutzmassnahmen verwendet. Die Resultate der Modellierungen lieferten wertvolle Hinweise auf das Fliessverhalten von Murgängen und die Wirkungsweise von Schutzmassnahmen.

Keywords: Murgang, Murgangmodellierung, RAMMS, Gefahrenkartierung, Schutzmassnahmen

ABSTRACT

The Illgraben located in southwestern Switzerland experiences several debris flows per year and is one of the most active torrents in the Alps. The village Susten located on the Illgraben fan is endangered by large debris flow events. Within the project “Hochwasserschutz Illgraben”, we used the 2D numerical model RAMMS developed by the Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research to model debris flows. A large number of debris flow events is documented and information on flow parameters is available at Illgraben. Preconditions for application of RAMMS were therefore ideal. In the calibration of the friction parameters using characteristic events, best results were achieved with the parameter combination $\mu=0.07$ and $\xi=400\text{m/s}^2$. Afterwards, flow paths and outbreak locations were analyzed, compared with traditional estimates and verified in the field. Model results were used during the elaboration of the hazard map and evaluation of protection measures. The application of RAMMS in a practical project was very helpful to analyze flow paths, outbreak locations and influence of protection measures.

Keywords: Debris flow, debris flow modelling, RAMMS, hazard mapping, protection measures

¹ Dr. Catherine Berger. Emch+Berger AG Bern, Schösslistrasse 23, 3001 Bern, Schweiz (e-mail: catherine.berger@emchberger.ch)

² Dr. Brian W. McArdell. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Zürcherstrasse 111, 8903 Birmensdorf, Schweiz.

³ Dr. Guido Lauber. Emch+Berger AG Bern, Schösslistrasse 23, 3001 Bern, Schweiz.

EINLEITUNG

Murgänge stellen in Gebirgsregionen auf Grund ihrer hohen Geschwindigkeiten, Kräfte und grossen Reichweite eine wichtige Naturgefahr dar und können Personen, Siedlungen und Infrastrukturbauten gefährden. Daher muss dieser Prozess in der Gefahrenbeurteilung berücksichtigt werden und wenn notwendig sind Schutzmassnahmen zu treffen.

Murgänge gehören zu den gravitativen Massenbewegungen und bestehen aus Geschiebe, Wasser und organischem Material. Typische Murgänge können hohe Fliessgeschwindigkeiten erreichen (bis zu 15m/s), haben eine hohe Dichte (Feststoffanteil 30 bis 70%) und sehr grosse Transportkapazitäten (BWW et al., 1997; Major et al., 2005). Ein Murgangereignis läuft oft in mehreren Schüben ab, wobei auf die grobblockige Front der flüssigere, turbulente Schwanzbereich folgt. Zur Entstehung von Murgängen sind sowohl grosse Quellen an Lockermaterial als auch Wasser und steile Hänge notwendig (Costa, 1984). Schäden entstehen unter anderem auf Grund der hohen Kräfte an der Murfront, durch Erosion und Ablagerung von Lockermaterial sowohl im Bachbett als auch auf dem Kegel.

Der Illgraben im Kanton Wallis, Schweiz, ist einer der aktivsten Wildbäche der Alpen und jedes Jahr ereignen sich zahlreiche Murgänge. Das Dorf Susten befindet sich auf dem Kegel des Illgrabens und wird durch grosse Murgangereignisse gefährdet. Auf Grund dieser Gefährdung wurde im Jahre 1999 mit der Erarbeitung eines Schutzkonzeptes begonnen (Geo7, 2000; Rickenmann et al., 2001; Teyssiere und Candolfi, 2003; WSL, 2001). Im Sommer 2010 startete im Auftrag der Gemeinde Leuk das Projekt Hochwasserschutz Illgraben, Sicherheitsmassnahmen gegen Murgänge, mit dem Ziel, die Gefahrensituation unter Verwendung der neusten Beobachtungsdaten und bestehender Studien zu beurteilen, das Murgangrisiko und die Schutzdefizite zu ermitteln und darauf basierend Schutzmassnahmen zu planen.

Numerische Modelle, mit welchen sowohl der Prozess als auch die Interaktionen mit Schutzbauten analysiert werden können, liefern wichtige Informationen für Praxisanwendungen. Im Projekt Hochwasserschutz Illgraben wurde das zweidimensionale Modell RAMMS verwendet, welches von der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL entwickelt wurde. Die Resultate der Modellierung wurden in Kombination mit herkömmlichen Methoden und Abschätzungen verwendet. In den nachfolgenden Kapiteln zeigen wir, wie das Murgangmodell in der Praxis angewendet wurde und diskutieren dessen Vor- und Nachteile während der Modellierung und bei der Interpretation der Resultate.

DER ILLGRABEN

Der Illgraben mit einer Einzugsgebietsgrösse von 10.4km² (Abb. 1) befindet sich im Südwesten der Schweiz und reicht vom Gipfel des Illhorns (2716 m ü.M.) bis zur Mündung des Illgrabens in die Rhone (610 m ü.M.). Das Klima ist mild-gemässigt, stark durch den Standort in einem inneralpinen Tal geprägt und die jährlichen Niederschlagssummen sind relativ gering (700mm im Tal und bis 1700mm in den Gipfelbereichen). Starkniederschläge, welche oft zu Murgängen führen, ereignen sich vor allem im Sommer (Hürlimann et al., 2003).

Das Einzugsgebiet besteht aus Sedimenten der Trias. Eine grosse, durch einen Bruch versetzte Antiklinale trennt die Kalzite und Dolomite auf der Westseite von den Quarziten, eingelagerten Dolomiten und Schiefen auf der Nordseite des Illhorns (Gabus et al., 2008). Der Hauptgraben folgt dieser Antiklinale (Schlunegger et al., 2009). Fels und Schuttflächen bedecken 44% des Einzugsgebietes, 42% sind mit Wald und 14% mit Gras bewachsen (Badoux et al., 2009).

Jedes Jahr ereignen sich mehrere Murgänge und eine grosse Vielfalt an unterschiedlichen Murgangtypen wurde beobachtet (Badoux et al., 2009). Die Murgänge stammen aus dem sehr steilen Teileinzugsgebiet (4.6km²) an der Nordflanke des Illhorns (Abb. 1). Ausgelöst werden die Murgänge vorwiegend dann, wenn grosse Wassermengen am Fuss einer Felswand auf Sedimentablagerungen treffen (McArdell et al., 2007) oder wenn Sediment in steilen Runsen mobilisiert wird (Berger et al., 2011).

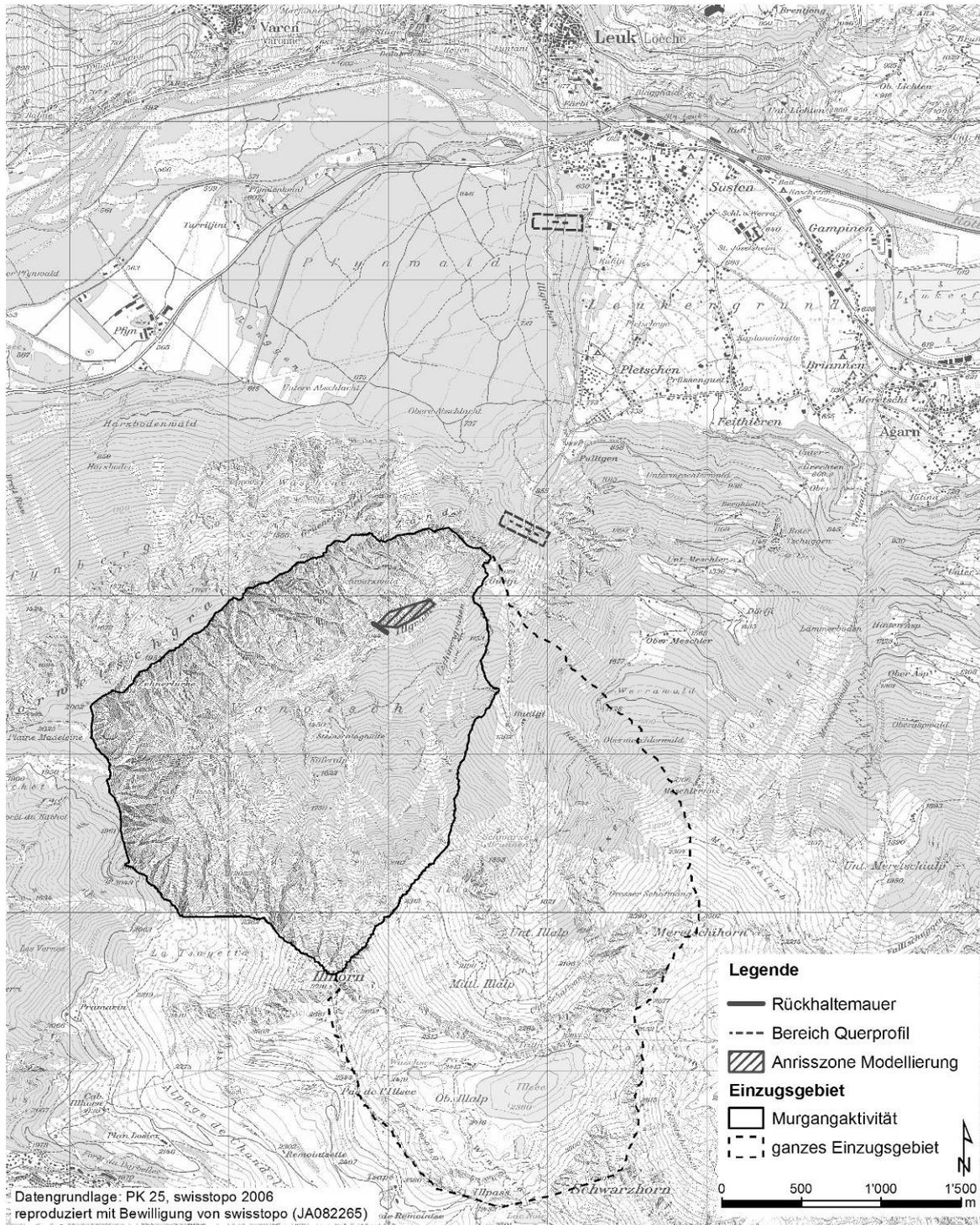


Abb. 1 Übersichtskarte Illgraben mit Einzugsgebiet, Teileinzugsgebiet mit Murgangaktivität, Standort Rückhaltemauer, Querprofile und Anrisszone für die Modellierung.

Fig. 1 Overview map including the catchment and subcatchment with debris flow activity, location of the large sediment retention basin, cross sections and initiation zone for modeling.

Im Jahre 1961 ereignete sich ein Bergsturz mit einem Volumen von ca. 3.5 Mio. m³ (Gabus et al., 2008). Dieses Ereignis führte zu einer Häufung von Murgängen. In der Folge wurde zwischen 1967 und 1969 im mittleren Bereich des Illgrabens eine grosse, heute hinterfüllte Rückhaltemauer gebaut (Lichtenhahn, 1971; Abb. 1) und das Gerinne unterhalb bis zur Mündung in die Rhone mit weiteren 28 Sperren stabilisiert.

Der Kegel des Illgrabens weist einen Radius von ca. 2km auf und das Gefälle beträgt 8% bis 10%. Auf der rechten Seite befindet sich das Dorf Susten (Gemeinde Leuk), die linke Seite wird durch den Pfynwald (Naturschutzgebiet) bedeckt. Auf Grund der sehr hohen Murgangaktivität betreibt die Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL) seit 2000 eine automatische Beobachtungsstation (Rickenmann et al., 2001; Hürlimann et al., 2003; McArdell et al., 2007).

DAS 2-D SIMULATIONSMODELL RAMMS

RAMMS ist ein zweidimensionales numerisches Simulationsmodell und wurde an der WSL entwickelt. Der Murgangprozess wird mit Hilfe der Flachwassergleichung für granulare Ströme im dreidimensionalen Terrain dynamisch modelliert und Fliesshöhen, Fliessgeschwindigkeiten und Drücke werden als Rasterdaten ausgegeben. In diesem Projekt wurde auf Grund der Ähnlichkeiten zwischen Murgängen und Lawinen das Lawinenmodul (RAMMS::avalanche) verwendet. Das Murgangmodul wurde erst kürzlich veröffentlicht. Die Berechnungen beruhen auf denselben Grundlagen.

Ein Voellmy-fluid Reibungsmodell beschreibt das Reibungsverhalten des Fliessprozesses und besteht aus zwei Reibungsparametern: die trockene Coulomb-Reibung (μ) und die turbulente Reibung (ξ , Schleppkraft bzw. Geschwindigkeitsquadrat). Zur Erzielung von realitätsnahen Abbildungen eines Murganges muss das Modell mit Hilfe von historischen Daten kalibriert werden.

KALIBRIERUNG DES MODELLS

Eine grosse Anzahl Murgangereignisse wurde dank der Beobachtungstätigkeit der WSL seit 2001 aufgezeichnet. Diese Ausgangslage ist für die Verwendung eines Modelles optimal, jedoch sehr häufig bei Anwendungen in der Praxis nicht vorhanden. Für die Arbeiten im Rahmen dieses Projektes wurden 34 Murgangereignisse von 2001 bis 2010 berücksichtigt (Studien von Hürlimann et al., 2003; Berger, 2010 und Glassey, 2010).

Für die Auswertung wurden Wiederkehrperioden bestimmt (maximale Ereignisvolumen pro Jahr berücksichtigt) und die Beziehungen zwischen Ereignisvolumen, Fronthöhe, Frontgeschwindigkeit und Abfluss analysiert. Auf dieser Grundlage wurden charakteristische Ereignisse (Tab. 1) definiert, welche in der Kalibrierung des Modells möglichst gut reproduziert werden sollten. Diese Murgänge mit Volumen von 50'000m³ sowie 100'000m³ entsprechen einer Wiederkehrperiode von 1 bzw. 30 Jahren. Im Nachfolgenden wird immer das gesamte Murgangvolumen inklusive Feststoff- und Wasseranteile angegeben.

Tab. 1 Charakteristische Murgangereignisse zur Kalibrierung des Murgangmodelles.

Tab. 1 Characteristic debris flow events for the calibration of the debris-flow model.

Parameter	Volumen 50'000 m ³	Volumen 100'000 m ³
Frontgeschwindigkeit auf dem Kegel	4 - 6 m/s	6 - 8 m/s
Fliesshöhe bei Sperre 27	1.5 - 2 m	2.5 - 3 m
Maximaler Abfluss	75 - 125 m ³ /s	100 - 200 m ³ /s

Für die Modellierungen wurde als Basis das digitale Terrainmodell (DTM) mit einem 2.5m-Raster verwendet (DTM AV der swisstopo, 2005). Das ganze Murgangvolumen mit einer Dichte von 2000kg/m³ (typischer Wert für Murgänge im Illgraben) wurde dabei in der Anrisszone mobilisiert. Die Anrisszone befand sich für alle Modellierungen im unteren Bereich des Einzugsgebietes und ist in Abb. 1 dargestellt.

Die Reibungsparameter μ und ξ wurden so gewählt, dass mit den Simulationen die Kennwerte der charakteristischen Ereignisse (Tab. 1) sowie das beobachtete Fliessverhalten möglichst gut reproduziert werden. Zuerst wurde das Ereignis mit einem Gesamtvolumen von 50'000m³ modelliert. Die besten Simulationsergebnisse wurden mit der Parameterkombination $\mu=0.07$ (entspricht dem mittleren Kegelgefälle) und $\xi=400\text{m/s}^2$ erzielt. Maximale Frontgeschwindigkeiten / Fliesshöhen am

Kegelhals und im unteren Drittel des Kegels (Sperre 27), wie sie in RAMMS ausgegeben werden können, sind als Beispiel in Abb. 2 dargestellt.

Für das Ereignis mit $100'000\text{m}^3$ Murgangmaterial wurden die besten Resultate mit der Parameterkombination $\mu=0.07$ und $\xi=400\text{m/s}^2$ erzielt. Auf Grund der grossen Distanz vom Kegelhals bis in das untere Drittel des Kegels und der seitlichen Ausbrüche mit Materialverlusten waren die Frontgeschwindigkeiten bei Sperre 27 bei beiden Kalibrierungsereignissen ähnlich. Höhere ξ -Werte hätten zu höheren Geschwindigkeiten am Kegelhals geführt, jedoch nur einen geringen Einfluss auf die Geschwindigkeit im unteren Kegelbereich ausgeübt und wurden daher nicht berücksichtigt.

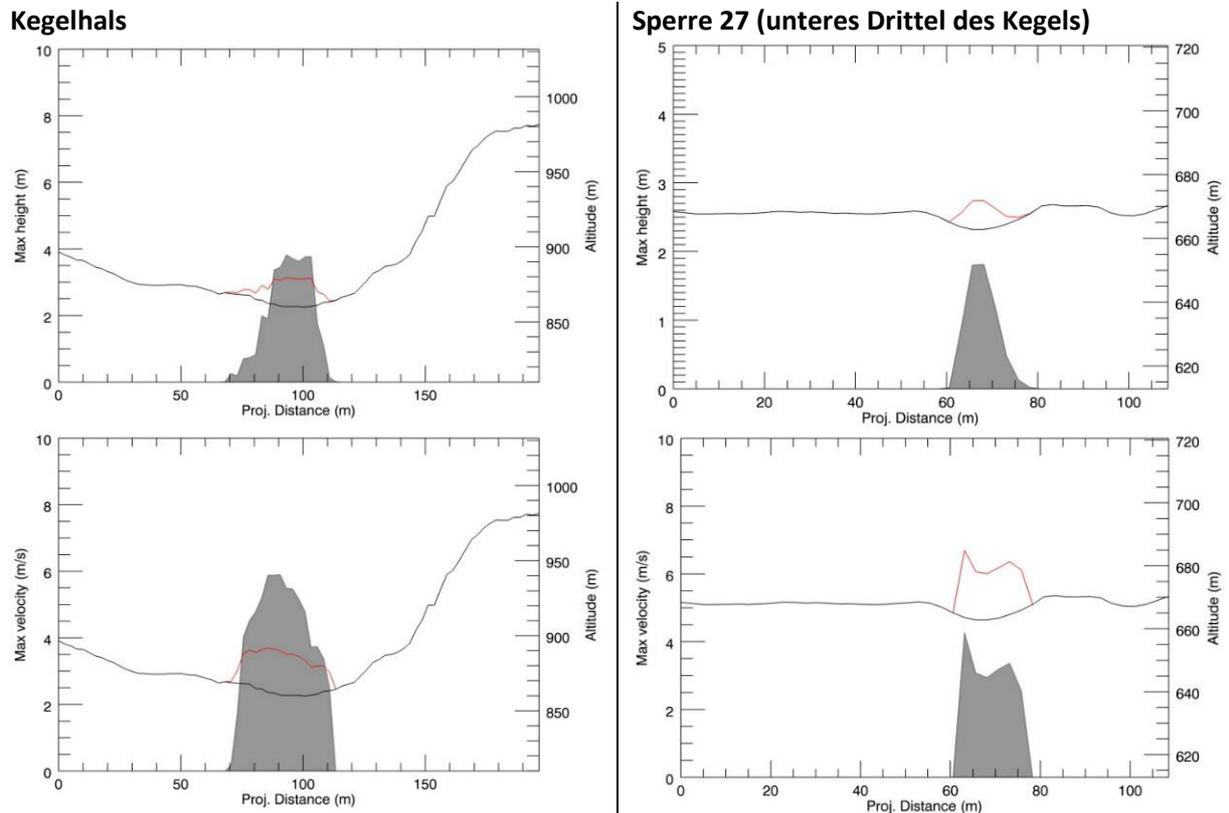


Abb. 2 Maximale Fliesshöhe und maximale Geschwindigkeit der Simulation mit einem Volumen von $50'000\text{m}^3$, $\mu=0.07$, $\xi=400\text{m/s}^2$ am Kegelhals (linke Spalte) und auf dem unteren Drittel des Kegels bei Sperre 27 (rechte Spalte). Die maximale Fliesshöhe und Geschwindigkeit (graue Fläche) beziehen sich auf die linke Y-Achse, das Terrain auf die rechte Y-Achse. Für die rote Linie wird die Fliesshöhe 10-fach respektive die Fliessgeschwindigkeit 5-fach überhöht und auf das Terrain addiert.

Fig. 2 Maximum flow height and velocity with the parameter combination volume= $50,000\text{m}^3$, $\mu=0.07$, $\xi=400\text{m/s}^2$ at the apex of the fan (left) and on the lower third of the fan at check dam 27 (right). Maximum flow height and velocity (grey area) refer to the left y-axis, the terrain refers to the right y-axis. The red line represents the flow height and velocity, which are exaggerated 5-times and 10-times, respectively, and added to the terrain elevation.

ANWENDUNG FÜR DIE GEFAHRENBEURTEILUNG

Für die Gefahrenbeurteilung werden in der Schweiz gemäss Vorgaben des Bundes Intensitätskarten für verschiedene Wahrscheinlichkeiten bzw. Wiederkehrperioden eines Ereignisses erstellt und zu einer Gefahrenkarte verschnitten (BWW et al., 1997).

Die für den Illgraben verwendeten Szenarien sind $100'000\text{m}^3$, $250'000\text{m}^3$ und $500'000\text{m}^3$ Murgangmaterial für häufige, seltene und sehr seltene Ereignisse. Da das Niveau des Bachbettes im Illgraben sehr variabel ist (Berger, 2010 und Berger et al., 2011), wurde das Ausgangshöhenmodell DTM AV im Gerinnebereich modifiziert, um diesen Gegebenheiten Rechnung zu tragen. Die

Simulationen der seltenen und sehr seltenen Ereignisse wurden mit der Reibungsparameterkombination $\mu=0.07$ und $\xi=400\text{m/s}^2$ durchgeführt und lieferten insgesamt gute Resultate. Die Austrittsstellen, wo Murgänge aus dem Gerinne ausbrachen, wurden direkt in RAMMS mit Querprofilanalysen ausgewertet und beurteilt (Ausbruch plausibel oder effektiv nur ein seitliches Überschwappen). Anschliessend wurden die Modellierungsdaten zur Visualisierung und detaillierten Betrachtung in einem GIS aufbereitet und Fliesswege auf dem Kegel untersucht (Beispiel in Abb. 3). Schlussendlich wurden die Simulationsresultate mit traditionellen Abschätzmethoden plausibilisiert. Dabei wurden zum einen die Geschwindigkeit und Reichweite gemäss Rickenmann (1999) bestimmt. Zum anderen wurde die Kapazität des Gerinnes an Hand des Höhenmodells an zahlreichen Querprofilstandorten ermittelt, Bereiche mit geringeren Kapazitäten wurden als mögliche Schwachstellen identifiziert und die bei den Simulationen durchflossenen Flächen wurden mit der vorhandenen Querschnittfläche verglichen. Als zentraler und anschliessender Punkt folgte die Beurteilung der Modellierungsergebnisse und Abschätzungen im Feld. Zum Schluss wurden die Intensitätskarten erstellt und aus dem Verschnitt dieser Karten resultierte die Gefahrenkarte.

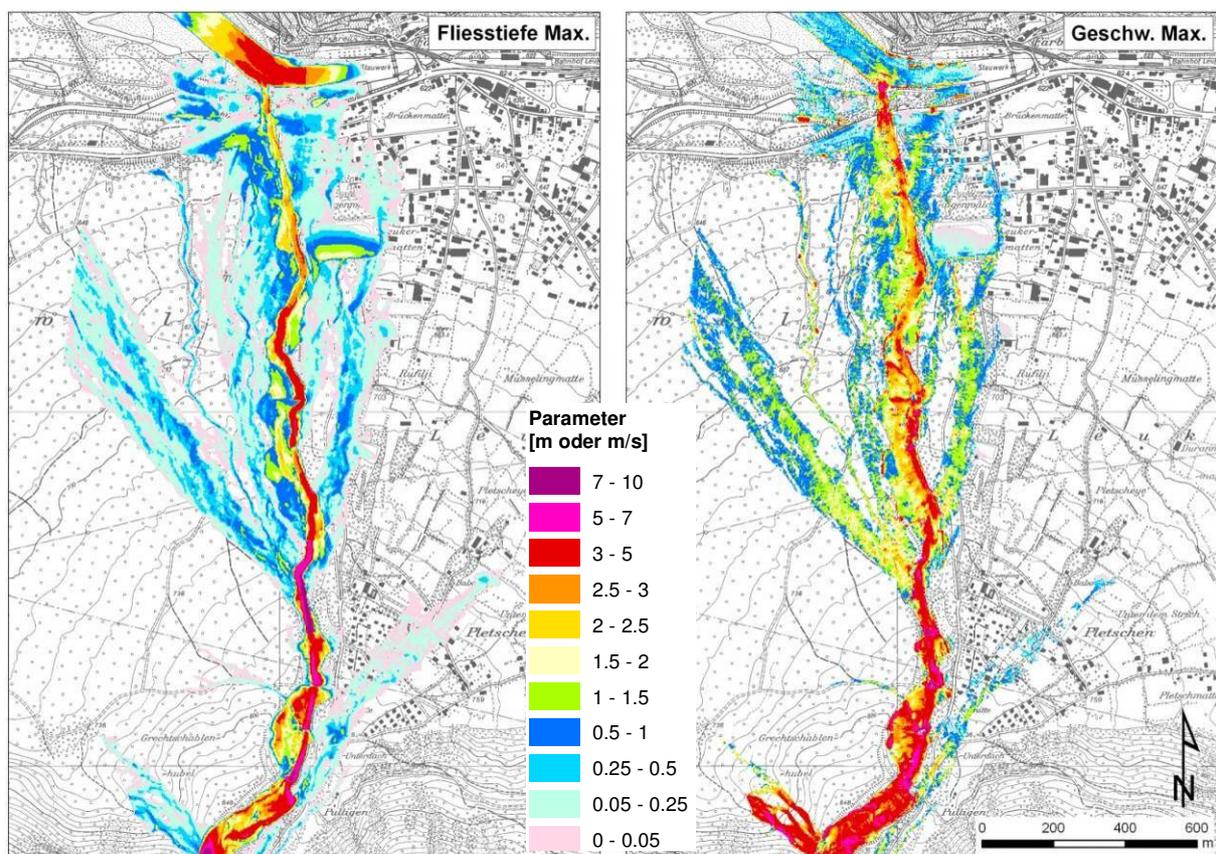


Abb. 3 Murgangsimulation für ein Ereignis in zwei Schüben ($2 \times 250'000\text{m}^3$), maximale Fliesstiefe (links) und Geschwindigkeit (rechts). Der erste Schub wurde auf dem DTM mit erhöhter Sohlenlage modelliert, im 2. Schub wurde die Ablagerung aus dem ersten Durchgang berücksichtigt.

Fig. 3 Debris flow simulation for an event with two surges ($2 \times 250,000\text{m}^3$), maximum flow height (left) and velocity (right). The first surge was modeled on the DTM with an increased level of the channel bed, deposition of the first surge was considered in the second run.

ANWENDUNG FÜR DIE BEURTEILUNG VON SCHUTZMASSNAHMEN

RAMMS kann auch dazu verwendet werden, den Einfluss von Schutzmassnahmen auf das Fliessverhalten von Murgängen darzustellen und auf diese Weise helfen, die Wirksamkeit einer Massnahme zu beurteilen. So können unterschiedliche Ausführungsvarianten im Modell getestet und wichtige Hinweise auf Stärken und Schwächen einer Massnahme geliefert werden.

Im Illgraben wurde unter anderem untersucht, ob durch die Anpassung des Gerinneverlaufes und die Ausbildung einer Bresche grosse Murgänge am Kegelhals teilweise in den Pfywald ausgeleitet werden können. Neben dem Schutz der Siedlungsbereiche und Infrastrukturanlagen würde durch die gelegentliche Übermuerung des Pfywaldes auch ein natürlicher Prozess gefördert und die Dynamik erhöht.

Diese Variante hat den Vorteil, dass unterhalb der Ausleitung nur noch geringe Massnahmen notwendig wären (punktuelle Erhöhung der Böschung, damit die Abflusskapazität des bestehenden Gerinnes erhöht wird und die Ausleitung nicht zu oft erfolgt). Des Weiteren würden grosse Murgänge nicht mehr gefährlich nahe am Dorf vorbeifliessen und im Überlastfall ebenfalls eine Ausleitung in Richtung Pfywald erfolgen.

Für eine erste Beurteilung wurden der Verlauf und die Kapazität des Gerinnes sowie die Bresche im Höhenmodell angepasst (Abb. 4). Oberhalb der Bresche wurde ein grosszügiger Querschnitt gewählt, unterhalb folgte eine Einengung zur Dosierung der Murgänge. Auf diese Weise konnte das Fliessverhalten ein erstes Mal dargestellt (Abb. 4) und Rückschlüsse auf die Funktionsweise und auf den Anteil des ausgeleiteten Geschiebe konnten gezogen werden. Im Rahmen des Vorprojektes wird das Höhenmodell weiter angepasst und Murgänge mit unterschiedlichen Volumen und Eigenschaften werden simuliert.

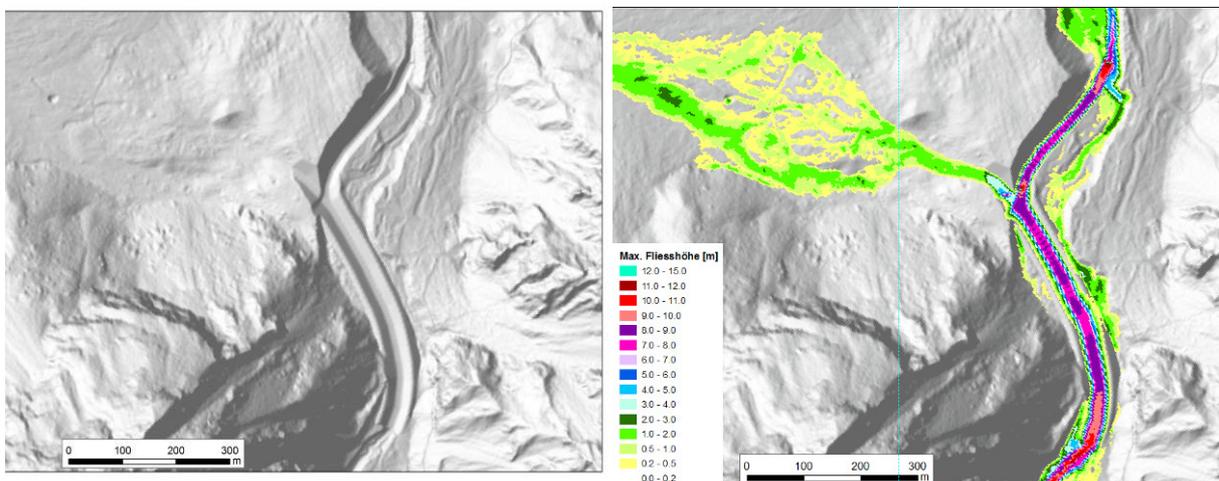


Abb. 4 Angepasstes Höhenmodell zur Simulation einer Ausleitung am Kegelhals (links) und Modellierung eines Murschubes mit einem Volumen von $250'000\text{m}^3$ auf der Basis des angepassten DTMs.

Fig. 4 Adjusted DTM to model a partial diversion of the debris flow at the apex of the fan (left) and resulting maximum flow height of a debris flow with a volume of $250,000\text{m}^3$ modeled on adjusted DTM.

BEURTEILUNG DES MODELLS

Die Modellierung der Murgänge mit RAMMS war sowohl für die Gefahrenbeurteilung als auch für die Beurteilung einer Ausleitung grosser Murgänge sehr hilfreich. Die Simulationen wurden vor allem dazu verwendet, Fliesswege darzustellen, das Fliessverhalten zu analysieren und Schwachstellen zu identifizieren.

Die Ausgangslage zur Modellierung von Murgängen war im Illgraben ideal. Dank der sehr häufigen Murgangereignisse und langjährigen Beobachtungstätigkeit der WSL konnte auf eine sehr grosse Ereignisdatenbank zurückgegriffen werden. Dies ermöglichte eine gute Kalibrierung des Modelles auf einer soliden Datenbasis. Dies ist jedoch bei den meisten Projekten, bei denen Murgänge simuliert werden, nicht der Fall. Oft sind nur wenige oder gar keine Ereignisse dokumentiert, die sehr wichtige Kalibrierung des Modells wird dadurch erschwert und die Unsicherheiten in der Beurteilung sind daher grösser.

Die grosse zu simulierende Fläche (Distanz Anrissgebiet bis Mündung in die Rhone ca. 4km) bei einer Rastergrösse von 2m führte dazu, dass die Simulationen sehr lange dauerten und grosse

Datenmengen generiert wurden. Diese langen Rechenzeiten (z.T. >36h) führten zu einer grossen Verzögerung vom Modellstart bis zur Bewertung einer Simulation.

Wurde die Anrisszone weiter oben im Einzugsgebiet definiert, so hatte diese einen grossen Einfluss auf die Modellierungsergebnisse und andere Reibungsparameter hätten gewählt werden müssen. Zur Minimierung der Rechendauer musste jedoch die Anrisszone möglichst weit unten lokalisiert werden, dabei aber am Kegelhals realistische Geschwindigkeiten erzielend. Für die weiteren Untersuchungen der Ausleitung wird ein Hydrograph verwendet werden. Dieser ermöglicht, die Ganglinie eines erwarteten Murgangs vorzudefinieren und somit den Startpunkt näher an den Ort des Interesses zu verlegen.

Eine bessere Auflösung des Höhenmodells war für den Illgraben nicht vorhanden. Auf Grund der langen Rechenzeiten und grossen Datenmengen wäre im Rahmen dieses Projektes eine Verwendung solcher Daten nicht möglich gewesen. Ein gröberes Raster hätte bei ersten Kalibrierungsdurchläufen helfen können. Für die definitiven Simulationen wurde aber das DTM AV verwendet, damit die besten Resultate erzielt werden konnten.

Ein Überschwappen wurde oft beobachtet. Damit Schwachstellen effektiv identifiziert werden konnten, mussten diese Bereiche detailliert untersucht und mit den Querprofilauswertungen des Höhenmodells verglichen werden. Ohne diese Überprüfung wäre die Anzahl Schwachstellen zu gross gewesen. Ein Beispiel für seitliches Überschwappen ist in Abb. 5 dargestellt.

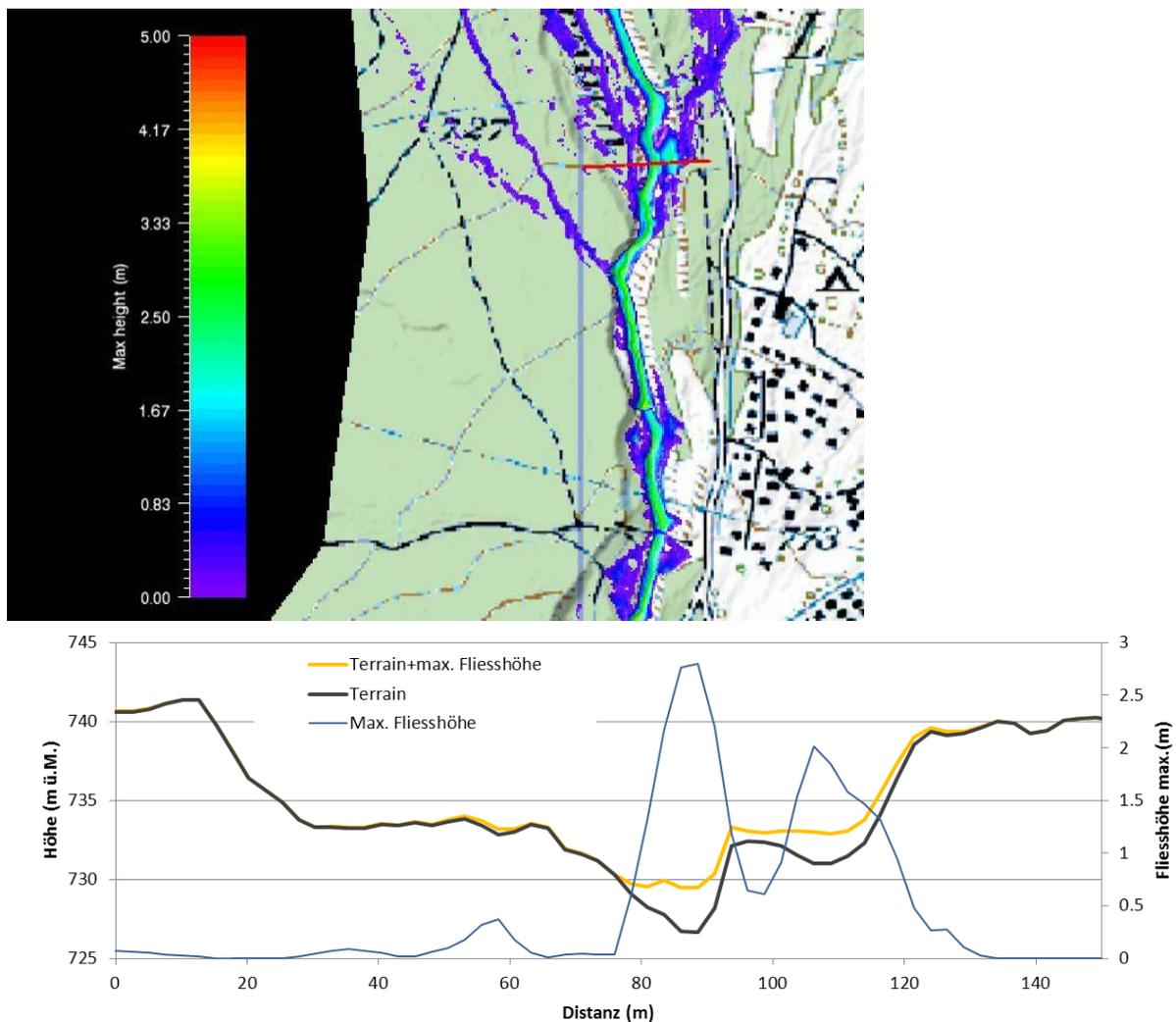


Abb. 5 Seitliches Überschwappen bei einer Simulation mit einem Volumen von $50'000\text{m}^3$, $\mu=0.07$, $\xi=400\text{m/s}^2$. Standort des Querprofils (oben) und dazugehörige Fliesshöhe (unten).

Fig. 5 Lateral spill over observed at a simulation with the parameter combination $\text{volume}=50,000\text{m}^3$, $\mu=0.07$, $\xi=400\text{m/s}^2$. Location of the cross section (above) and corresponding flow height (below).

FAZIT UND AUSBLICK

Die Modellierung der Murgänge mit RAMMS ermöglichte eine detaillierte Untersuchung der Fliesswege, Schwachstellen und Massnahmenvarianten. Die gute Ereignisdatenbank führte zu einer optimalen Ausgangslage. Ohne Grundlagendaten zu einem Bach, wie es in der Praxis jedoch oft der Fall ist, wird die Anwendung eines Modells jedoch viel schwieriger und die Unsicherheiten nehmen zu.

Die kritische Interpretation und Verifizierung der Modellierungsergebnisse im Gelände ist von grundlegender Bedeutung. Zudem müssen Computermodellierungen stets mit herkömmlichen Beurteilungsmethoden und Abschätzverfahren verifiziert werden. Dies auch, weil zurzeit noch keine Richtlinien zur Anwendung von dynamischen Computermodellen für die Erstellung von Gefahrenkarten existieren.

REFERENZEN

- Badoux A., Graf C., Rhyner J., Kuntner R., McArdell B.W. (2009). A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Nat. Hazards* 49: 517-539.
- Berger C. (2010). Debris flow entrainment and sediment transfer processes at the Illgraben catchment, Switzerland. Dissertation am geologischen Institut der Universität Bern, Bern.
- Berger C., McArdell B.W., Schlunegger F. (2011). Sediment transfer patterns at the Illgraben catchment, Switzerland: Implications for the scales of debris flow activities. *Geomorphology* 125: 421-432.
- BWW, BRP, BUWAL (1997). Empfehlungen Naturgefahren, Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Bern.
- Costa J.E. (1984). Physical geomorphology of debris flows. In: Costa J.E., Fleisher P.J. (eds), *Developments and applications in geomorphology*, Springer, New York, pp 268–317.
- Gabus J.H., Weidmann M., Bugnon P.-C., Burri M., Sartori M., Marthaler M. (2008). Geologische Karte Sierre, LK 1278, Blatt 111, 1:25'000, in *Geologischer Atlas der Schweiz*, Bern.
- Geo7 (2000). Geomorphologie und Geschiebelieferung (unveröffentlichter Bericht), Bern.
- Glassey T. (2009). Hydrology and check dams analysis in the debris flow context of Illgraben torrent (VS). Masterarbeit an der ETH/EPFL. Zürich und Lausanne, 2009.
- Hürlimann M., Rickenmann D., Graf, C. (2003). Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. *Can. Geotech. Journal* 40: 161-175.
- Major J.J., Pierson T. C., Scott K. M. (2005). Debris Flows at Mount St. Helens, Washington, USA. In: M. Jakob and O. Hungr (eds), *Debris-flow Hazards and Related Phenomena*, pp. 685-731, Springer, Berlin.
- McArdell B.W., Bartelt P., Kowalski J. (2007). Field observations of basal forces and fluid pore pressure in a debris flow. *Geophys. Res. Lett.* 34, L07406, doi:10.1029/2006GL029183: 4 pp.
- Rickenmann D. (1999). Empirical Relationships for Debris Flows. *Nat. Hazards* 19: 47-77.
- Rickenmann D., Hürlimann M., Graf C., Näf D., Weber D. (2001). Murgang-Beobachtungsstationen in der Schweiz. *Wasser Energie Luft* 93(1/2): 1-8.
- Schlunegger F., Badoux A., McArdell B.W., Gwerder C., Schnydrig D., Rieke-Zapp D., Molnar P. (2009). Limits of sediment transfer in an alpine debris-flow catchment, Illgraben, Switzerland, *Quat. Sci. Rev.* 28: 1097–1105, doi:10.1016/j.quascirev.2008.10.025.
- Teyssere & Candolfi (2003). Schutzkonzept Illgraben (unveröffentlichter Bericht), Visp.
- WSL (2001). Simulation des Fliessverhaltens (unveröffentlichter Bericht), Birmensdorf.