

MURDIS – EIN MURGANGMODELL

MODELLIERUNG POTENTIELLER AUSBRUCHSTELLEN UND ABSCHÄTZUNG DER AUSBREITUNG MIT HILFE EINER FESTSTOFFBILANZIERUNG

Tobias Stüdi¹, Hans Kienholz² und Serena Liener³

ZUSAMMENFASSUNG

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde das Murgangmodell MURDIS entwickelt, das sich für die Anwendung in der Praxis eignet. MURDIS soll die Ausbreitung und das Ablagerungsverhalten von Murgängen abbilden, so dass die Wirksamkeit von Schutzmassnahmen untersucht werden kann. Zentrale Elemente von MURDIS bilden die Modellierung potentieller Ausbruchstellen und die Feststoffbilanzierung. Bei der Modellierung potentieller Ausbruchstellen wird der Maximalabfluss des Murganges in Abhängigkeit der mitgeführten Feststoffmenge abgeschätzt. Das Modell geht von einer dreieckförmigen Abflussganglinie aus und berechnet den benötigten Querschnitt. Ist die Gerinnkapazität zu gering, bricht ein Teil des Murganges aus dem Gerinne aus. Ausgehend von den potentiellen Ausbruchstellen wird die Ausbreitung des Murganges modelliert. Dabei kann der Murgang Material ablagern. Die abgelagerte Kubatur wird laufend von der bisher mobilisierten Feststoffmenge subtrahiert. Der Murgang stoppt, wenn die gesamte bisher mobilisierte Feststoffmenge abgelagert ist. Das Modell liefert plausible Resultate und kann als Grundlage zur Gefahrenbeurteilung oder zur Massnahmenplanung verwendet werden.

Schlüsselworte: Murgang, Simulationsmodell, Feststoffbilanzierung

ABSTRACT

In the context of a thesis the debris flow model MURDIS was developed that is suitable for use in practice. MURDIS should model the spread and deposition behavior of debris flows to point out the effectiveness of planned protection measures. The identification of potential points of overflow and the calculation of the mass balance between mobilized and deposited debris are the two main tasks of MURDIS. In order to identify the points of overflow, the peak discharge of the debris flow is predicted as a function of the amount of transported solids. Assuming a triangular hydrograph, the model calculates the minimal cross-section that is required by the debris flow to remain in the channel. If the channel capacity is too low, the corresponding amount of debris leaves the channel. Based thereupon, the propagation of the debris flow is further modeled. Within the latter process, the deposited amount of debris is calculated continuously and subtracted from the mobilized amount of debris. The spread of the debris flow is stopped as soon as the debris is completely deposited. The model provides plausible results and can be used as a basis for risk assessments and the planning of protection measures.

Keywords: debris flow, model, mass balance

¹ Tobias Stüdi. geo7 AG, Neufeldstrasse 5-9, 3012 Bern, Schweiz (e-mail: tobias.stuedi@geo7.ch)

² Dr. Hans Kienholz. KiNaRis, Bern, Schweiz

³ Dr. Serena Liener. geo7 AG, Schweiz

EINLEITUNG

Murgänge gehören zu den effizientesten Massenverlagerungsprozessen und haben eine entsprechend grosse Zerstörungskraft. Zonen, in denen ein Konflikt zwischen der anthropogenen Nutzung und Murgängen besteht oder entstehen kann, müssen deshalb erkannt werden. Das Murgangmodell MURDIS leistet einen Beitrag dazu. Unter Berücksichtigung verschiedener Szenarien kann die Ausbreitung eines Murganges auf dem Kegel modelliert und analysiert werden.

Folgende Ziele standen bei der Entwicklung des Murgangmodells MURDIS im Vordergrund:

- Praxisorientiertes Modell: MURDIS soll sich für die Anwendung in der Praxis eignen. Die Modellparameter müssen deshalb mit einem möglichst geringen Aufwand erhoben werden können.
- Analyse verschiedener Szenarien: Mit MURDIS sollen die Auswirkungen verschiedener Szenarien analysiert werden können (z.B. unterschiedliche Ereignisabläufe, Kubaturen).
- Wirksamkeit von Schutzmassnahmen: Mit MURDIS soll die Wirksamkeit geplanter Schutzmassnahmen untersucht werden können.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in zwei Teile. In einem ersten Teil wird das Modellkonzept von MURDIS erläutert. Die Ausführungen dazu basieren auf der Diplomarbeit von Stüdi (2007). Der zweite Teil befasst sich mit den Resultaten. Es werden Simulationsergebnisse aus drei verschiedenen Einzugsgebieten vorgestellt. Durch einen Vergleich mit realen Ereignissen konnte das Modell kalibriert und die Resultate plausibilisiert werden. Aufgrund der Kalibrierung liegt für alle Parameter ein plausibler Wertebereich vor, was die Anwendung von MURDIS in weiteren Einzugsgebieten ermöglicht.

MODELLKONZEPT MURDIS

MURDIS ist ein rasterbasiertes Murgangmodell. Der Name des Modells setzt sich aus den Wörtern Murgang und Auslaufdistanz zusammen. Sämtliche Input- und Outputdateien entsprechen dem Typ „Raster“ von ESRI. Als Input wird lediglich das Digitale Höhenmodell (DHM) sowie ein Raster mit Erosionsabschnitten benötigt.

Vor der Modellierung müssen im zu untersuchenden Wildbach Zonen ausgeschieden werden, in denen im Ereignisfall Feststoffe mobilisiert werden können. Diese Zonen werden im vorliegenden Projekt als Erosionsabschnitte bezeichnet. Die Ausscheidung und Kartierung der Erosionsabschnitte sowie die Abschätzung der Kubatur, welche im Ereignisfall mobilisiert werden kann, erfolgt mittels Feldarbeit. Dabei kann beispielsweise SEDEX eingesetzt werden, eine Methodik zur Abschätzung der Feststofflieferung in Wildbächen (Frick et al., 2008). Passiert der modellierte Murgang einen Erosionsabschnitt, nimmt er die vom Benutzer abgeschätzte Feststoffmenge auf.

Die Modellierung lässt sich in drei Phasen unterteilen (siehe Fig. 1). In der Phase A werden die benötigten Grundlagendaten erstellt. Phase B widmet sich der Modellierung potentieller Ausbruchstellen. Dabei berechnet das Modell, wo der Murgang das Gerinne verlässt und wie viel Material an dieser Stelle aus dem Gerinne ausufert. Die potentiellen Ausbruchstellen bilden den Ausgangspunkt für die Phase C. Hier werden die Ausbreitung, die Ablagerung und die Auslaufdi

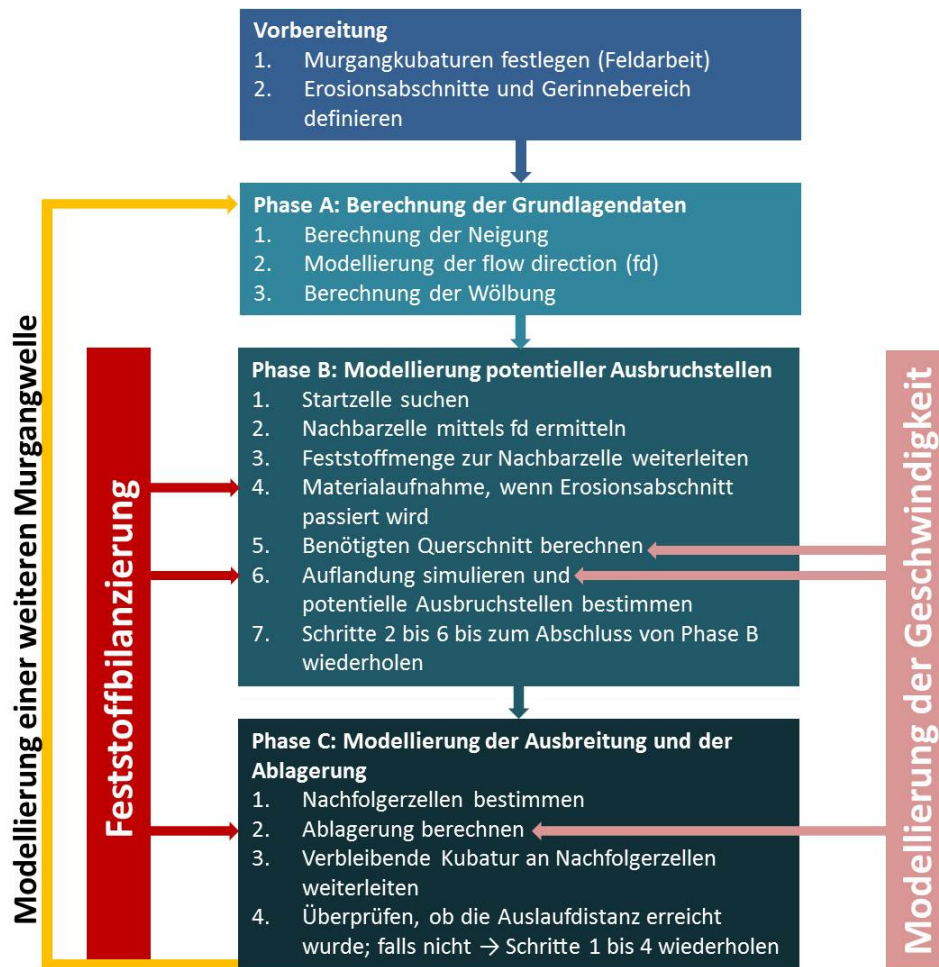


Fig. 1 Der Berechnungsablauf in der Übersicht.

Fig. 1 Overview of the calculation procedure.

Phase A: Berechnung der Grundlagendaten

In dieser Phase werden Grundlagendaten berechnet, welche für die Modellierung benötigt werden. Dabei handelt es sich um die Neigung, die „flow direction“ und die Wölbung. Sämtliche Grundlagendaten werden mit GIS-Funktionen von ESRI erstellt.

Feststoffbilanzierung

Ein zentrales Element von MURDIS bildet die Feststoffbilanzierung. Die Methode wird anhand von Fig. 2 erklärt.

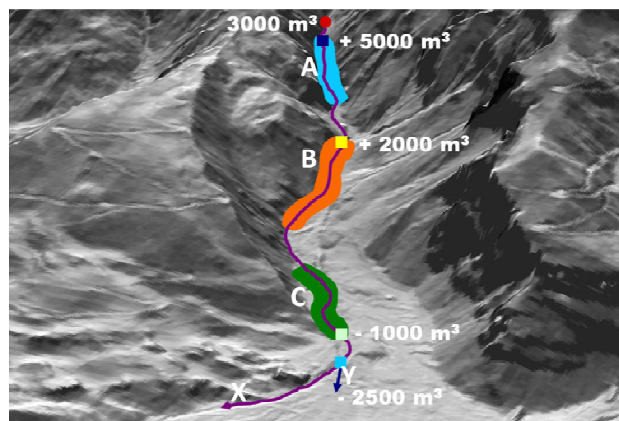


Fig. 2 Illustration zur Feststoffbilanzierung.

Fig. 2 Illustration of the mass balance.

In Fig. 2 entspricht der mit „X“ bezeichnete Pfeil dem modellierten Murgang. Die Zonen „A“ und „B“ sind Erosionsabschnitte. Dort nimmt der Murgang zusätzliches Material auf. Der Bereich „C“ entspricht einem Ablagerungsgebiet. Der Murgang startet mit einer Feststoffmenge von 3'000 m³, trifft schon bald auf den ersten Erosionsabschnitt und nimmt dort 5'000 m³ auf. Dieses Volumen wird vom Benutzer oder der Benutzerin definiert. Kurz nach dem Erosionsabschnitt „A“ trifft der Murgang auf den Erosionsabschnitt „B“ und nimmt nochmals 2'000 m³ auf. Das Volumen beträgt nun 10'000 m³. In der Zone „C“ lagert der Murgang 1'000 m³ ab. Am Ende des Ablagerungsgebietes resultiert eine Feststoffmenge von 9000 m³. Kurz nach der Zone „C“ wird eine potentielle Ausbruchsstelle modelliert. Eine Kubatur von 2500 m³ verlässt das Gerinne (Pfeil „Y“). Der Murgang fliesst nun mit einem Volumen von 6500 m³ weiter. Ein Teil davon bricht evtl. zu einem späteren Zeitpunkt aus dem Gerinne aus. Ausgehend von den potentiellen Ausbruchstellen breitet sich der Murgang aus. Dabei wird Material abgelagert. Der Murgang stoppt, wenn die gesamte bisher mobilisierte Feststoffmenge abgelagert ist.

Phase B: Modellierung potentieller Ausbruchstellen

In Phase B berechnet das Modell, wo der Murgang das Gerinne verlässt und wie viel Material an dieser Stelle aus dem Gerinne auszufert. Eine Ausbruchsstelle wird ausgeschieden, wenn der Gerinnequerschnitt kleiner ist als der vom Murgang benötigte Querschnitt. Der Maximalabfluss, welcher mit Hilfe der empirisch hergeleiteten Formeln 1 und 2 von Mizuyama et. al (1992) abgeschätzt wird, spielt diesbezüglich eine entscheidende Rolle.

Feinkörniger Murgang:

$$Q_{max} = 0.0188 \times K^{0.79} \quad (1)$$

Granularer Murgang:

$$Q_{max} = 0.135 \times K^{0.78} \quad (2)$$

$Q_{max} [m^3/s]$ entspricht dem Maximalabfluss und $K [m^3]$ der Kubatur des Murganges. Die Kubatur ist aufgrund der Feststoffbilanzierung bekannt (siehe Kapitel „Feststoffbilanzierung“). Die Wassermenge wird nicht benötigt.

Das Modell geht von einer dreieckförmigen Abflussganglinie aus. Mit der Kubatur des Murganges ($K [m^3]$) und dem Maximalabfluss ($Q_{max} [m^3/s]$) kann berechnet werden, wie lange die Abflussganglinie andauern muss ($T [s]$), damit die gesamte vorhandene Feststoffmenge abfliesst (siehe Formel 3).

$$T = \frac{K \times 2}{Q_{max}} \quad (3)$$

In Fig. 3 ist eine ideale dreieckförmige Abflussganglinie als Gerade mit negativer Neigung dargestellt. Dabei wird vereinfachend davon ausgegangen, dass der Maximalabfluss mit dem Eintreffen des Murganges, dem Murkopf, auftritt und dieser im Anschluss sukzessive abnimmt. MURDIS rechnet in Zeitschritten. Deshalb wird die ideale Abflussganglinie in gleich grosse Zeitintervalle eingeteilt (abgesehen vom letzten Intervall, welches vom zweitletzten Zeitabschnitt bis zum Ende der Murgangwelle dauert). Die Dauer des Zeitintervalls wird vom Benutzer oder der Benutzerin festgelegt. Bei jedem Intervall wird der Abfluss konstant gehalten und der benötigte Querschnitt ($A [m^2]$) berechnet (siehe Fig. 3). Dieser hängt von der aktuellen Fließgeschwindigkeit ($V [m/s]$) und dem Abfluss ($Q [m^3/s]$) im entsprechenden Zeitintervall ab (siehe Formel 4).

$$A = \frac{Q}{V} \quad (4)$$

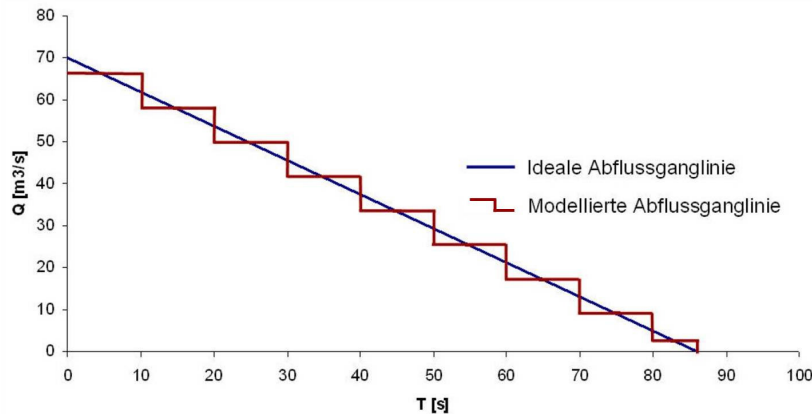


Fig. 3 Ideale Abflussganglinie als Gerade mit negativer Neigung und treppenförmige modellierte Abflussganglinie.

Fig. 3 Ideal hydrograph diagrammed as a straight line with a negative slope and modeled hydrograph as a stepped line.

Fig. 4 zeigt einen möglichen Gerinnequerschnitt. Die Zellen, welche vom modellierten Murgang in einem bestimmten Zeitintervall überströmt werden, berechnet MURDIS mit einem iterativen Verfahren. Der Algorithmus startet bei der tiefsten Zelle (C). Mit dem Höhenunterschied zum nächsthöheren Nachbarn (Zelle D) bestimmt das Modell den Querschnitt nach der ersten Iteration. Ist der aktuelle Querschnitt kleiner als der benötigte Querschnitt (siehe Formel 4), wird eine weitere Iteration durchgeführt und der nächsthöhere Nachbar (Zelle D) zur Gruppe der benötigten „Querschnittszellen“ hinzugefügt. Nun wird der aktuelle Querschnitt anhand des Höhenunterschieds zur Zelle B berechnet. Die Iteration bricht ab, wenn der aktuelle Querschnitt grösser oder gleich gross ist wie der benötigte Querschnitt.

Anhand der Fliessgeschwindigkeit, der Dauer des Zeitintervalls und der Fliesshöhe berechnet MURDIS, welche Kubatur über die einzelnen Zellen strömt. Die gesamte Feststoffmenge pro Zelle wird berechnet, indem die Kubaturen über sämtliche Zeitintervalle aufsummiert werden.

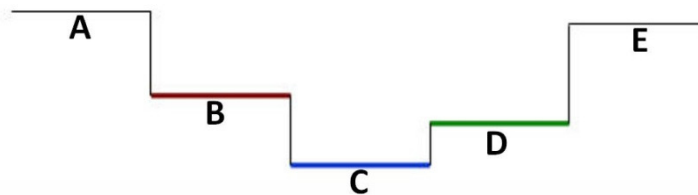


Fig. 4 Schematische Darstellung eines hypothetischen Querschnitts.

Fig. 4 Schematic representation of a hypothetical cross-section.

Das Gerinne wird von der Benutzerin oder dem Benutzer definiert und umfasst in Fig. 4 die Zellen B bis D. Eine Ausbruchsstelle wird ausgeschieden, wenn die Feststoffmenge der Zellen A respektive E grösser als 0 m^3 ist. Die entsprechende Kubatur wird in der Phase C zur Modellierung der Ausbreitung verwendet.

Berechnung der Geschwindigkeit

Die Geschwindigkeitsberechnung findet während den Phasen B und C statt. Das Modell verwendet die Geschwindigkeit bei der Berechnung des benötigten Querschnitts und bei der Modellierung der Ablagerung (siehe Fig. 1). Die Basis der Geschwindigkeitsberechnung liefert das 2-Parametermodell von Perla et. al (1980). Dieses wurde zur Berechnung der Geschwindigkeit und der Auslaufstrecke von Schneelawinen entwickelt und beruht auf dem Lawinenmodell von Voellmy (1955). Das Fliessverhalten von Murgängen zeigt eine gewisse Ähnlichkeit mit demjenigen von Fliesslawinen.

Deshalb liegt der Schluss nahe, bei der Murgangmodellierung die gleichen Ansätze wie bei der Modellierung von Lawinen zu verwenden. Das 2-Parametermodell von Perla et. al (1980) wurde von Gamma (2000) leicht modifiziert und zur Simulation von Murgängen eingesetzt. Mit seinem Ansatz hat Gamma (2000) gute Resultate erzielt, weshalb die Geschwindigkeit im Modell MURDIS mit dem gleichen Ansatz modelliert wird. Das Geschwindigkeitsmodell berücksichtigt die beiden Reibungsparameter μ und M/D . Der Parameter μ beschreibt primär die Gleitreibung zwischen Murgang und Gerinne und der M/D -Parameter wird als Mass für die innere Reibung verwendet.

Phase C: Modellierung der Ausbreitung und der Ablagerung

Das Modell MURDIS berechnet die Ausbreitung mit Hilfe der multiple flow directions for debris flows (mfd) nach Zimmermann (1997) und Gamma (2000). Die Arbeit von Holmgren (1994) floss stark in die Entwicklung der mfd ein. Sein Ansatz ist aber auf die Hydrologie ausgerichtet und musste für die Modellierung von Murgängen angepasst werden. In steilem Gelände folgen natürliche Murgänge der Falllinie. Es findet keine Ausbreitung statt. Im flachen Gelände hingegen breiten sich Murgänge stark aus. In den Gefällsbereichen dazwischen findet ein Übergang des Ausbreitungsverhaltens statt. Hinter dem mfd-Algorithmus von Zimmermann (1997) und Gamma (2000) stecken folgende Ideen: Der Benutzer definiert ein Grenzgefälle, ab welchem eine Ausbreitung stattfinden soll. Ist die Neigung grösser als das Grenzgefälle, folgt der Murgang der Falllinie. In flacheren Umgebungen stehen mehrere Nachbarzellen zur Auswahl. Die Wahrscheinlichkeit, dass eine gewisse Zelle als Nachfolger ausgewählt wird, berechnet der mfd-Algorithmus anhand der Gefällsverhältnisse und der aktuellen Fliessrichtung des Murganges. Für die entsprechenden Formeln wird auf die Arbeit von Gamma (2000) verwiesen.

Der mfd-Algorithmus weist den potentiellen Nachbarzellen eine Wahrscheinlichkeit zu. Im vorliegenden Modell wird die Feststoffmenge proportional zu den Wahrscheinlichkeiten an die Nachbarzellen weitergeleitet. Im Beispiel von Fig. 5 leitet die Zelle A 50% des Materials nach unten-links, 10% nach unten und 40% nach unten-rechts. 60% der Feststoffmenge von Zelle B fliessen nach unten und 40% nach unten-rechts. Dadurch erhalten die Zellen „C“ 2500 m³, „D“ 500 m³, „E“ 3200 m³ (2000 m³ + 1200 m³) und „F“ 800 m³. Mit dem gewählten Verfahren findet eine Ausbreitung statt. Dies deshalb, weil das Material an mehrere Zellen weitergeleitet wird.

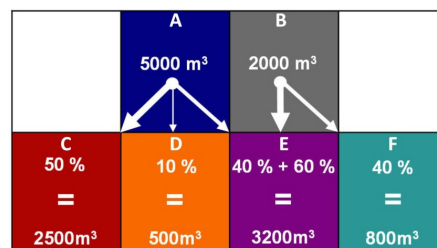


Fig. 5 Schematische Darstellung zur Modellierung der Ausbreitung.

Fig. 5 Schematic diagram of modeling the spread.

Natürliche Murgänge lagern Feststoffe ab, wenn die Fliessgeschwindigkeit unter einen gewissen Schwellenwert sinkt (Takahashi, 1991). Aufgrund von Beobachtungen ist bekannt, dass die Ablagerungsmächtigkeit mit abnehmender Fliessgeschwindigkeit zunimmt. Im Modell MURDIS wird diesem Verhalten mit der "Geschwindigkeitsablagerung" Rechnung getragen. Die "Geschwindigkeitsablagerung" wird durch 4 Parameter gesteuert. Deren Werte werden durch die Benutzerin oder den Benutzer festgelegt.

- Minimale Ablagerungsmächtigkeit: $H_{min} [m]$
- Maximale Ablagerungsmächtigkeit: $H_{max} [m]$
- Geschwindigkeit für minimale Ablagerungsmächtigkeit: $VH_{min} [m / s]$
- Geschwindigkeit für maximale Ablagerungsmächtigkeit: $VH_{max} [m / s]$

Ist die Geschwindigkeit grösser als VH_{min} findet keine Ablagerung statt. Erreicht die Geschwindigkeit des Murganges den Wert von VH_{min} , wird mit der minimalen Ablagerungsmächtigkeit $H_{min} [m]$ abgelagert. Ist die Geschwindigkeit des Murganges kleiner oder gleich VH_{max} , entspricht die

Ablagerungsmächtigkeit dem Wert von H_{max} . Liegt die Geschwindigkeit zwischen VH_{min} und VH_{max} , wird die Ablagerungsmächtigkeit linear interpoliert (siehe Fig. 6).

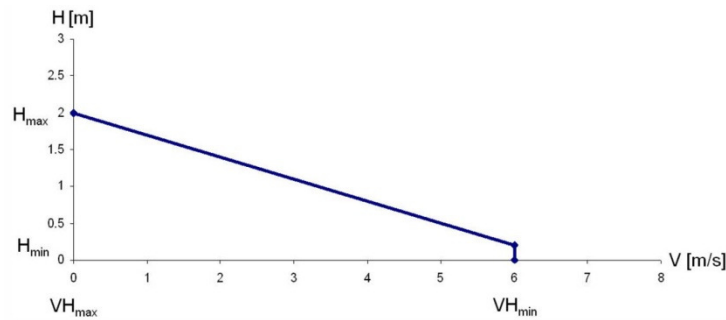


Fig. 6 Die Ablagerungsfunktion.

Fig. 6 The deposition function.

Wurde die gesamte Feststoffmenge abgelagert, welche in der Phase B das Gerinne verlassen hat, wird die Phase C beendet. MURDIS bietet die Möglichkeit, mehrere Murgangswellen zu modellieren. Jede Welle wird nach dem gleichen Schema modelliert. Die Simulation endet, wenn die Phase C der letzten Welle abgeschlossen ist. Über die Variation von Anzahl und Grösse der einzelnen Wellen können mit MURDIS unterschiedliche Ereignisabläufe analysiert werden.

RESULTATE

Kalibrierung des Modells anhand verschiedener Ereignisse

Im Rahmen der Diplomarbeit von Stüdi (2007) wurde das Modell in fünf verschiedenen Wildbachgebieten getestet. In jedem dieser Gebiete fand ein grösseres Murgangereignis statt. Im Idealfall stand ein Orthofoto zur Verfügung. Dieses diente dazu, den modellierten Murgang mit dem realen Murgang zu vergleichen und das Modell zu kalibrieren. Wie Fig. 1 zeigt, konnte mit MURDIS das Ereignis gut abgebildet werden. Grössere Abweichungen zwischen Simulation und Ereignis sind im Bereich der Nummern 1 und 2 festzustellen. Nachstehend werden die Gründe dafür erklärt.

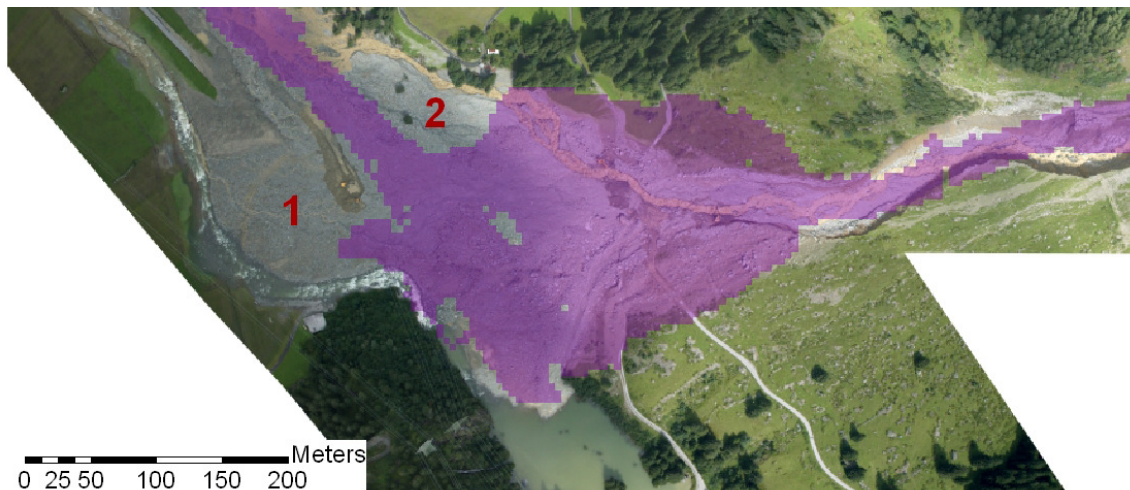


Fig. 7 Vergleich zwischen Modellierung (violett) und extremem Murgangereignis (rund 500'000m³) im Rotlauibach bei Guttannen aus dem Jahr 2005. Die Nummern 1 und 2 markieren die Bereiche mit den grössten Abweichungen zwischen Modell und Ereignis. (Orthofoto: Flotron AG)

Fig. 7 Comparison between the model output (purple) and a 2005 debris flow event that mobilized ~500'000m³ of debris. Site: Rotlauibach near Guttannen, Switzerland. The numbers 1 and 2 indicate areas with discrepancies between model output and the debris flow event. (Orthophoto: Flotron AG)

Zone 1 liegt jenseits des früheren Gerinnes der Aare. Der natürliche Prozess lief höchstwahrscheinlich so ab, dass das Gerinne kontinuierlich aufgefüllt wurde. Als die Vertiefung eingeebnet war, hatte das

Geschiebe die Möglichkeit, auf die andere Seite der Aare zu gelangen. Dieses Verhalten kann mit dem verwendeten Ablagerungsmodell nicht abgebildet werden. Es wäre ein Zufall, wenn das Modell an einer gewissen Stelle genau so mächtig ablagern würde, dass die Vertiefung eingeebnet wird. Aus diesem Grund bleibt in solchen Situationen entweder ein Graben bestehen oder die modellierten Ablagerungen sind so mächtig, dass sie den Weg auf die andere Seite des Gewässers versperren. Deshalb blieb die Zone 1 vom modellierten Murgang verschont. Die zweite modellierte Welle brach auf der rechten Seite des Rotlaubaches aus. Aufgrund der Gefällsverhältnisse floss ein grosser Teil des Materials auf direktem Weg Richtung Aare und ein kleinerer Teil strömte der Zone 2 zu. Letztere Materialmenge reichte nicht aus, um die Zone 2 zu erreichen. Dies deshalb, weil vor der Zone 2 die gesamte Kubatur abgelagert werden konnte und der modellierte Murgang zum Stillstand kam.

Anwendung des Modells

In der Kalibrierungsphase konnte jedem Parameter ein plausibler Wertebereich zugewiesen werden. Dadurch wurde es möglich, das Modell in anderen Gebieten anzuwenden. Im Anschluss werden die Resultate von drei verschiedenen Einzugsgebieten vorgestellt.

Sundgraben bei Sundlauenen (Kanton Bern, Schweiz)

In Fig. 8a sind die Resultate von drei verschiedenen Murgangmodellierungen für den Sundgraben bei Sundlauenen dargestellt. Dabei wurde mit einer konstanten Kubatur von 80'000 m³ modelliert. Die Ablagerungsmächtigkeiten wurden allerdings variiert, was sich einerseits auf die Ausscheidung potentieller Ausbruchstellen und andererseits auf die Ausbreitung sowie die Reichweite des Murganges auswirkt. Die Reichweite wird beeinflusst, weil die Auslaufdistanz über die Feststoffbilanzierung bestimmt wird, welche wiederum von der Ablagerung abhängt. Aufgrund der Modellierung ist davon auszugehen, dass die Schlüsselstellen im Bereich der Brücke (siehe Nummer 1) und dem obenliegenden Gerinneabschnitt liegen. Ein Ausbruch ist sowohl auf der orographisch linken als auch auf der rechten Seite möglich. Das Modell bestätigt in dieser Hinsicht die Erkenntnisse der Feldbeurteilung. Aufgrund einer Verflachung der Gerinnesohle wurde eine Auflandung mit anschliessendem Ausbruch angenommen. Dieser Prozess wird im Modell ebenfalls ersichtlich. Die Verflachung führt zu einer Reduktion der Geschwindigkeit, was mit einer Zunahme der Ablagerungsmächtigkeiten verbunden ist. Diese Auflandung ermöglicht den Ausbruch aus dem Gerinne. Fig. 8b visualisiert die Ablagerungsmächtigkeiten einer Modellierung. Kleine Ablagerungsmächtigkeiten unter 3 m sind in hellgrauer Farbe dargestellt. Grosse Ablagerungsmächtigkeiten über 3 m sind an der dunkelgrauen Farbe zu erkennen. Die Auflandung im Bereich von Nummer 1 und im obenliegenden Gerinneabschnitt ist auf Fig. 8b gut zu erkennen.

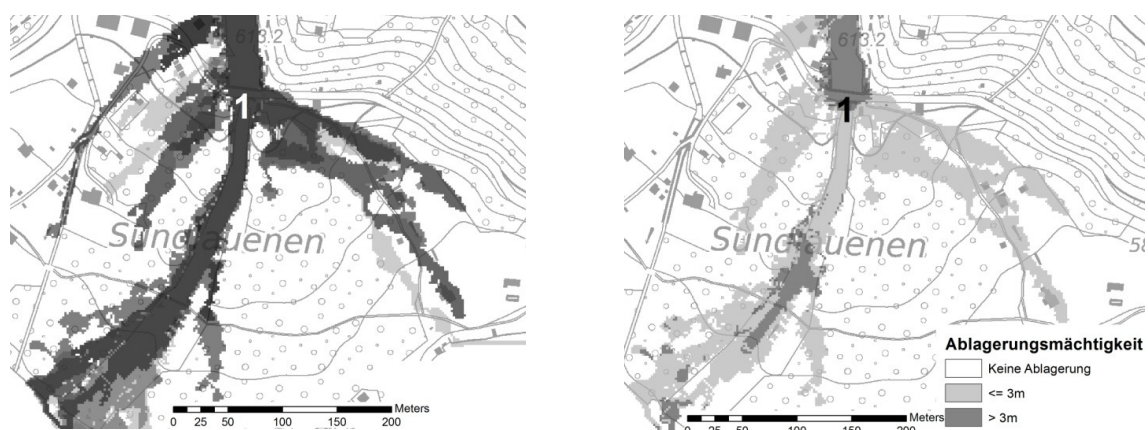


Fig. 8a & 8b Murgangmodellierung für den Sundgraben bei Sundlauenen. Überlagerung dreier Modellierungen mit einer Kubatur von jeweils 80'000 m³ (Fig. 8a, links) und modellierte Ablagerungsmächtigkeiten einer einzigen Modellierung (Fig. 8b, rechts). (Karte: Kanton Bern)

Fig. 8a & 8b Model output for Sundgraben near Sundlauenen. Overlay of three model runs with a volume of 80'000 m³ each (Fig. 8a, left) and modeled deposition thicknesses of a single model run (Fig. 8b, right). (Map: Canton of Bern)

Fig. 9a zeigt eine Modellierung mit einer Kubatur von 80'000 m³ unter Berücksichtigung von Schutzmassnahmen. Die Schutzmassnahmen wurden über das digitale Höhenmodell in das Modell integriert. Im Bereich der Nummer 1 sowie im oben- und untenliegenden Gerinneabschnitt wurde das Gerinne verbreitert und abgesenkt. Aufgrund der grösseren Gerinnekapazität verlässt der modellierte Murgang das Gerinne im Bereich der Nummer 1 nicht. Deshalb wird eine grössere Geschiebemenge in den unteren Kegelbereich transportiert, was einen Ausbruch auf der orographisch linken und rechten Seite sowie die anschliessende Übermuerung des Kegels zur Folge hat. Fig. 9b zeigt die Intensitätskarte für ein 100-jährliches Ereignis mit einer Kubatur von 80'000 m³, ebenfalls unter Berücksichtigung von Schutzmassnahmen. Die Intensitätskarte basiert auf der Annahme, dass die Brücke bei der Nummer 1 im Ereignisfall verklaut. Dies hat einen Ausbruch auf der orographisch linken sowie auf der rechten Seite mit anschliessender Übermuerung des Kegels zur Folge. Entsprechend resultiert auf der Intensitätskarte eine grosse Fläche mit hoher Intensität (Fig. 9b, dunkelgraue Fläche). Ein Vergleich zwischen Fig. 9a und 9b zeigt wesentliche Unterschiede zwischen der Modellierung und der Intensitätskarte. Diese Differenzen sind auf die Verklautung der Brücke zurückzuführen, welche im Modell nicht abgebildet werden kann.

Auf der Intensitätskarte wurden am linken und rechten Rand des Kegels Flächen mit geringer Intensität ausgeschieden (Fig. 9b, hellgraue Flächen). Diesen Flächen liegt ein Austritt von Wasser und geringen Geschiebemengen im Bereich der Nummer 1 sowie im obenliegenden Gerinneabschnitt zugrunde. Folglich wird hier nicht von einer Übermuerung, sondern von Überschwemmung und Übersarung ausgegangen. MURDIS simuliert lediglich den Murgangprozess, weshalb die Flächen mit geringer Intensität nicht abgebildet werden.

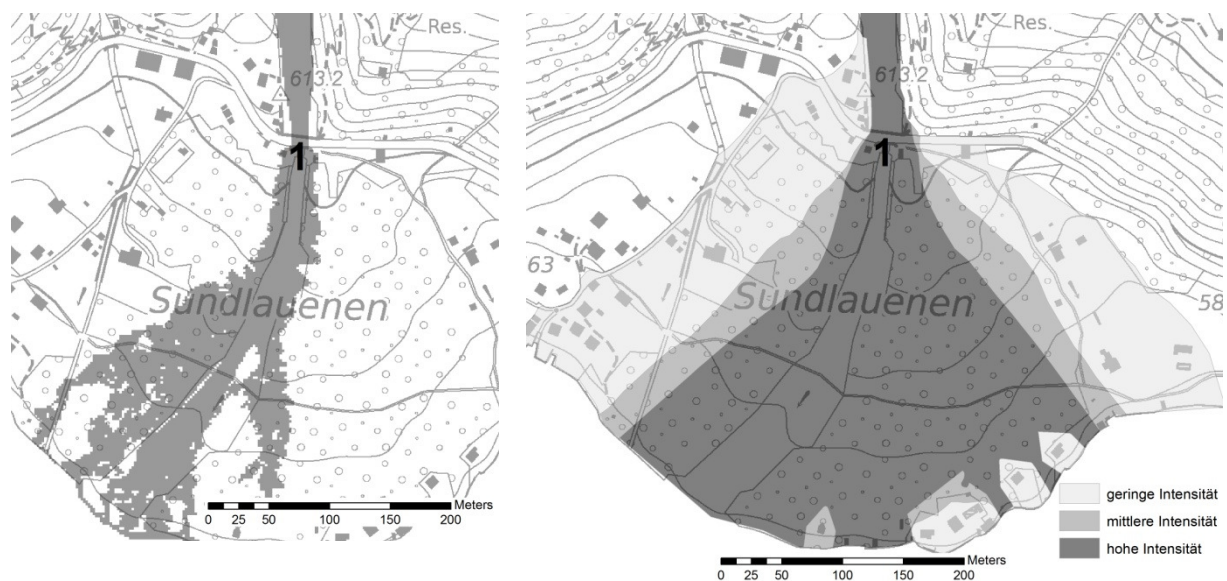


Fig. 9a & b Modellierung mit einer Kubatur von 80'000 m³ unter Berücksichtigung von Schutzmassnahmen (Fig. 9a, links) und Intensitätskarte für ein 100-jährliches Ereignis mit einer Feststoffmenge von ebenfalls 80'000 m³ (Fig. 9b, rechts). Die Intensitäten sind hier in Grautönen dargestellt. (Karte: Kanton Bern, Intensitätskarte: geo7 AG, Bern)

Fig. 9a & b Model output with a volume of 80'000 m³ with taking into account protection measures (Fig. 9a, left) and intensity map of a 100-year event that mobilizes 80'000 m³ of debris (Fig. 9b, right). The intensities are shown in gray tones. (Map: Canton Bern, intensity map: geo7 AG, Bern)

Gurbsbach bei Schwenden (Kanton Bern, Schweiz)

In Fig. 10 ist das Resultat zweier Modellierungen für den Gurbsbach bei Schwenden dargestellt. Die dunkelgraue Farbe visualisiert ein 100-jährliches Ereignis mit einer Feststoffmenge von 15'000m³. Die hellgraue Fläche zeigt ein 300-jährliches Ereignis mit einer Kubatur von 24'000m³. Der mit MURDIS simulierte Ausbruch nach links (Nummer 1) ist bei einem Ereignis 2005 aufgetreten und hat beim untenliegenden Haus zu Schäden geführt. Die Abbildung zeigt, wie sich die Feststoffbilanzierung auf die Reichweite des Murganges auswirkt. Die Auslaufdistanz des 300-jährlichen Ereignisses ist deutlich grösser als diejenige des 100-jährlichen Ereignisses. Diese Differenz

ist auf die unterschiedliche Kubatur zurückzuführen. Weil beim 300-jährlichen Ereignis mehr Feststoffe transportiert werden, dauert es länger, bis die gesamte Geschiebefracht abgelagert ist, weshalb der Murgang eine grössere Auslaufdistanz erreicht. Dieses Resultat ist plausibel, denn in der Realität erreichen Murgänge mit grösseren Kubaturen ebenfalls eine grössere Auslaufdistanz.

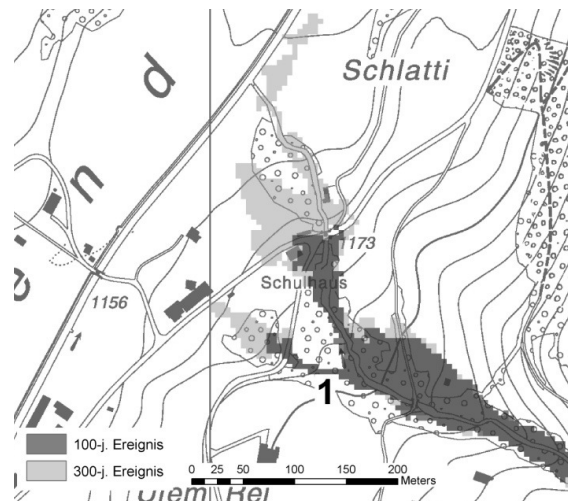


Fig. 10 Murgangmodellierungen für den Gurbach bei Schwenden. Vergleich zwischen einem 100-jährlichen Ereignis (dunkelgrau) und einem 300-jährlichen Ereignis (hellgrau). (Karte: Kanton Bern)

Fig. 10 Model output for Gurbach near Schwenden. Comparison between a 100-year event (dark gray) and a 300-year event (light gray). (Map: Canton of Bern)

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Nach Stüdi (2007) verwendet MURDIS einfache empirisch-statistische Ansätze, welche wichtige Eigenschaften von Murgängen abbilden. Von zentraler Bedeutung sind Zusammenhänge in Bezug auf die Materialeigenschaften und die mobilisierte Feststoffmenge, was bei der Modellierung potentieller Ausbruchstellen berücksichtigt werden konnte. Der Murgang verlässt das Gerinne, falls die Gerinnekapazität nicht ausreicht. In diesem Zusammenhang spielt der Maximalabfluss eine wichtige Rolle. Dessen Abschätzung erfolgt in Abhängigkeit der mobilisierten Feststoffmenge und der Materialeigenschaften. Das Modell unterscheidet zwischen granularen und feinkörnigen Murgängen. Ferner wurde mit dem Ansatz der Feststoffbilanzierung ein direkter Zusammenhang zwischen der mobilisierten Feststoffmenge, der Ablagerung und der Abschätzung der Auslaufdistanz realisiert.

In der Kalibrierungsphase wurde das Modell in fünf verschiedenen Gebieten getestet und mit realen Ereignissen verglichen. Dadurch konnte jedem Parameter ein plausibler Wertebereich zugewiesen werden, was die Anwendung in anderen Gebieten ermöglicht. MURDIS wird der Zielsetzung eines praxisorientierten Murgangmodells gerecht. Aufgrund der Erkenntnisse aus der Kalibrierungsphase lässt sich das Modell mit geringem Aufwand in weiteren Gebieten anwenden.

Geplante Schutzmassnahmen lassen sich über das Digitale Höhenmodell in der Simulation berücksichtigen. Ein Beispiel dafür wurde für den Sundgraben vorgestellt. Aufgrund einer Verbreiterung und Absenkung des Gerinnes wurde ein Ausbruch im oberen Kegelbereich verhindert. Am Beispiel des Gurbach wird ersichtlich, wie die Feststoffmenge die Auslaufdistanz des Murganges beeinflusst. In anderen Fällen kann sich die Feststoffmenge über den Maximalabfluss auf die Ausscheidung der Ausbruchstellen auswirken. Ähnliche Effekte treten auf, wenn Grösse und Anzahl der Murgangwellen verändert werden.

Die Resultate verdeutlichen, dass das Modell den weiteren Zielsetzungen gerecht wird. Mit MURDIS können verschiedene Szenarien und Ereignisabläufe untersucht sowie die Wirksamkeit von geplanten Schutzmassnahmen analysiert werden. Vergleiche mit realen Ereignissen zeigen, dass das Modell plausible Resultate liefert. Das Resultat der Modellierung stellt aber immer die Realisierung eines möglichen Szenarios dar. Wie bei jedem Modell wird der natürliche Prozess vereinfacht, weshalb

Unterschiede zwischen Realität und Modell zu erwarten sind. Die Resultate aus dem Sundgraben weisen auf diesen Umstand hin. Im Modell kann die Verklausung der Brücke nicht abgebildet werden, weshalb grosse Differenzen zwischen Simulation und Intensitätskarte entstehen. Dementsprechend müssen die Grenzen der Modellierung jeweils berücksichtigt und die Resultate auf deren Plausibilität überprüft werden. Dennoch kann MURDIS den Prozess der Gefahrenbeurteilung wesentlich unterstützen. Die Erkenntnisse einer Feldbegehung lassen sich mit dem Modell plausibilisieren und stellen die Gefahrenbeurteilung auf eine solidere Basis.

REFERENZEN

- Frick E., Kienholz H., Roth H. (2008). SEDEX – eine Methodik zur gut dokumentierten Abschätzung der Feststofflieferung in Wildbächen. *Wasser Energie Luft* 2: S. 131-136.
- Gamma P. (2000). dfwalk - Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung. Dissertation, Geographisches Institut, Universität Bern.
- Holmgren P. (1994). Multiple flow direction algorithms for runoff modelling in grid based elevation models: an empirical evaluation. *Hydrological Processes* 8: S. 327-334.
- Mizuyama T., Kobashi S., Ou G. (1992). Prediction of debris flow peak discharge. *Proc. Int. Symp. Interpraevent* 4: S. 99-108.
- Perla R., Cheng T.T., McClung D.M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. *Journal of Glaciology* 94: 197-207.
- Stüdi T. (2007). MURDIS – Ein Murgangmodell. Modellierung potentieller Ausbruchstellen und Abschätzung der Ausbreitung mit Hilfe einer Feststoffbilanzierung. Diplomarbeit, Geographisches Institut, Universität Bern.
- Takahashi T. (1991). Debris flow. *IAHR Monograph Series*, Balkema, Rotterdam.
- Voellmy A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung* 12: 159-165, 15: 212-217, 17: 246-249, 19: 280-285.
- Zimmermann M. (1997). Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. Vdf Hochschulverlag AG, ETH Zürich.