



Heft 155, 2024

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:37761



Fachtagung Wildbäche 2024: Modellierung von Wildbachprozessen

Schalko I., Farshi D., Badoux A. (Red.)



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL



OST
Ostschweizer
Fachhochschule

Verantwortlich für die Herausgabe der Schriftenreihe
Eidg. Forschungsanstalt WSL

Verantwortlich für dieses Heft
Dr. Manfred Stähli, Leiter Forschungseinheit Gebirgshydrologie und Massenbewegung

Schriftleitung: Sandra Gurzeler, Teamleiterin Publikationen, WSL

Wir danken folgenden Personen, die im Organisationskomitee an der Ausgestaltung der Fachtagung Wildbäche 2024 mitgewirkt und als Reviewer oder Reviewerin die hier abgedruckten Fachbeiträge begutachtet haben:

Alexandre Badoux, Davood Farshi, Christoph Graf, Brian McArdell, Dieter Rickenmann, Isabella Schalko, Dany Suter

Zitiervorschlag:

Schalko I., Farshi D., Badoux A. (Red.) (2024) Fachtagung Wildbäche 2024: Modellierung von Wildbachprozessen. WSL Ber. 155. 58 S. doi.org/10.55419/wsl:37761

Korrektur: Bruno Auf der Maur, WSL

Layout: Sandra Gurzeler, WSL

ISSN 2296-3448 (Print)

ISSN 2296-3456 (Online)

Bildnachweise Titelseite (von oben nach unten):

Torrent de Pétérey, Anniviers VS, 2018 (Bild: D. Rickenmann)

Val Crènn, Acquarossa TI, 2009 (Bild: A. Badoux)

Sädelgrabe, Schangnau BE, 2014 (Bild: A. Badoux)

Bäretalbach, Davos GR, 2005 (Bild: A. Badoux)

Minstigerbach, Goms VS, 2012 (Bild: A. Badoux)

Die Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL forscht lösungsorientiert zu Wald, Landschaft, Biodiversität, Naturgefahren sowie Schnee und Eis in einer Welt im Wandel. Als Forschungsinstitut des Bundes und Teil des ETH-Bereichs verpflichtet sie sich der Exzellenz in Forschung und Umsetzung.



Diese Publikation ist Open Access und alle Texte und Fotos, bei denen nichts anderes angegeben ist, unterliegen der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0. Sie dürfen unter Angabe der Quelle frei vervielfältigt, verbreitet und verändert werden.

Heft 155, 2024

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:37761

Fachtagung Wildbäche 2024: Modellierung von Wildbachprozessen

Schalko I., Farshi D., Badoux A. (Red.)



Eidg. Forschungsanstalt für Wald,
Schnee und Landschaft WSL



Vorwort

Die Schweiz erlebte im Sommer 2024 eine Serie von Unwetterereignissen, die in mehreren Regionen verheerende Auswirkungen hatten. Starkregenfälle führten zu Hochwassern, Erdbeben und Murgängen, die nicht nur erhebliche Schäden an Infrastrukturen verursachten, sondern auch Menschenleben forderten. Diese Ereignisse verdeutlichten erneut die Dringlichkeit, unsere bestehenden Schutzsysteme und Modellierungsansätze zu verbessern und weiterzuentwickeln.

Im Rahmen der ersten Fachtagung Wildbäche, die gemeinsam vom Kompetenzbereich «Wasserbau» der OST und der Forschungsgruppe «Wildbäche und Massenbewegungen» der WSL organisiert wird, befassen sich die vorliegenden Beiträge intensiv mit der Modellierung von Wildbachprozessen. Der Fokus liegt dabei sowohl auf numerischen Simulationen als auch auf physikalischen Modellversuchen, um die komplexen hydro- und morphodynamischen Vorgänge besser zu verstehen und Gefahren präziser abschätzen zu können.

Die Unwetterereignisse des Sommers 2024 bieten einen aktuellen Bezugspunkt, um bestehende Methoden und mögliche Weiterentwicklungen bei der Modellierung von Wildbachprozessen zu diskutieren. Die Kombination aus Laborversuchen und numerischer Modellierung zeigt dabei neue Wege auf, um Schutzbauwerke zu optimieren und den realen Bedingungen besser anzupassen. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Integration von neuen Erkenntnissen, wie beispielsweise in der Modellierung der Murgänge oder des Schwemmholtztransports, unerlässlich ist, um künftige Risikovorhersagen zu verbessern.

Wir danken allen Autorinnen und Autoren für ihre wertvollen Beiträge und wünschen Ihnen eine anregende Lektüre.

Birmensdorf und Rapperswil, 15. Oktober 2024
Isabella Schalko (WSL) und Alexandre Badoux
Davood Farshi (OST)

Préface

Durant l'été 2024, la Suisse a connu une série d'intempéries avec des effets dévastateurs dans plusieurs régions. Les fortes pluies ont provoqué des inondations, des glissements de terrain et des laves torrentielles, qui ont non seulement causé des dommages considérables aux infrastructures, mais aussi des pertes en vies humaines. Ces événements ont une nouvelle fois mis en évidence la nécessité d'améliorer et de développer nos systèmes de protection et nos approches de modélisation.

Dans le cadre du premier Colloque Torrents, organisé conjointement par le Centre de Compétence en «Ingénierie Hydraulique» de la Haute École Spécialisée de Suisse Orientale (OST) et le groupe de recherche «Torrents et Mouvements de Masse» du WSL, les présentes contributions examinent en profondeur la modélisation des processus torrentiels. L'accent est mis à la fois sur les simulations numériques et sur les expériences de modélisation physique, afin de mieux comprendre les processus hydrodynamiques et morphodynamiques complexes et d'évaluer les dangers avec plus de précision.

Les intempéries de l'été 2024 constituent un point de référence actuel pour discuter des méthodes existantes et des développements possibles pour la modélisation des processus torrentiels. La combinaison d'essais en laboratoire et de modélisation numérique indique de nouvelles voies pour optimiser les ouvrages de protection et mieux les adapter aux conditions réelles. En même temps, il apparaît clairement que l'intégration de nouvelles connaissances, par exemple dans la modélisation des laves torrentielles ou du transport de bois flottant, est indispensable pour améliorer les futures prévisions de risques.

Nous remercions les rédacteurs et rédactrices pour leurs contributions et vous souhaitons une bonne lecture.

Birmensdorf et Rapperswil, le 15 octobre 2024
Isabella Schalko et Alexandre Badoux (WSL)
Davood Farshi (OST)

Sponsoren

Silber

ASA | SVV

Schweizerischer Versicherungsverband
Association Suisse d'Assurances
Associazione Svizzera d'Assicurazioni
Swiss Insurance Association

die Mobiliar

Generalagentur Rapperswil-Glarus

BRUGG
Geobru gg

Safety is our nature

GVB

Wir versichern Ihr Gebäude.

GEOTEST

Nachhaltig mehr Sicherheit.

KISSLING + ZBINDEN AG
INGENIEURE PLANER
KZ
Bern | Thun | Spl ez | Solothurn | Zürich

GEO PRÆVENT

part of Hexagon

Basler & Hofmann

Bronze

**gebäude
versicherung
st.gallen**

NIEDERER+POZZI
UMWELT AG

BÄNZIGER
PARTNER
INGENIEURE PLANER

geoformer
INGENIEURE, GEOLOGEN, PLANER
Sebastiansplatz 1 CH-3800 Brig-Glis www.geoformer.ch

IMPULS AG
Wald
Landschaft
Naturgefahren

**Emch+
Berger**

Geoplan AG

FLOTRON

SENS ALPIN

Partner



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Umwelt BAFU
Office fédéral de l'environnement OFEV
Ufficio federale dell'ambiente UFAM



Fachleute Naturgefahren
Spécialistes des dangers naturels
Specialisti in pericoli naturali



Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Association suisse pour l'aménagement des eaux
Associazione svizzera di economia delle acque

Inhalt

Vorwort	3
Einige offene Fragen bei der Modellierung und Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen	7
Dieter Rickenmann	
Erkenntnisse aus physikalischen Murgangversuchen für die Praxis	13
Catherine Berger	
Murgangexperimente mit kleinmasstäblichen Modellen Anwendungen – Herausforderungen – Grenzen	19
Christian Scheidl	
Hybride Murgangmodellierung in der Ingenieurpraxis und in der angewandten Forschung	25
Christian Tognacca	
Numerical modelling of wood transport processes in mountain rivers and torrents: a review	33
Virginia Ruiz-Villanueva	
Prise en compte des blocs rocheux et du tri granulométrique pour une analyse plus réaliste des risques torrentiels	41
Guillaume Piton	
Zweiphasenmodellierung von Murgängen für die Überprüfung von Schutzmassnahmen	49
Perry Bartelt, Brian McArdell, Yves Bühler und Christoph Graf	

Einige offene Fragen bei der Modellierung und Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen

Dieter Rickenmann

Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Schweiz

Einige ausgewählte Elemente der Gefahrenbeurteilung in Wildbacheinzugsgebieten mit Schwerpunkt auf den Gerinneprozessen werden diskutiert. Eine stichwortartige Auflistung von Themen gibt Hinweise zum Stand der Forschung und zu Defiziten. Beispielhaft werden einige Elemente etwas detaillierter betrachtet und einige konkrete Ansätze diskutiert, wie Fortschritte erzielt werden können, die für künftige Gefahrenabschätzungen hilfreich sein können. Diese Elemente betreffen folgende Themen: Magnitude-Frequenz-Beziehungen von Wildbachereignissen; Kurvenüberhöhungen und Aufprallhöhe auf Hindernisse bei Murgangabflüssen; Modellierung der potenziellen Ablagerungsflächen von Murgängen; verschiedene Strömungstypen und Prozessübergänge.

1 Einleitung

Der Umgang mit Wildbachgefahren hat in den Alpenländern eine ziemlich lange Tradition. Bei der Planung und Durchführung von Schutzkonzepten ist die berufliche Erfahrung von grosser Bedeutung. Diese Erfahrung stützt sich vor allem auf Beobachtungen bei früheren Wildbachereignissen sowie auf regelmässige Feldbegehungen in den Einzugsgebieten steiler Gerinne. Quantitative Messungen, zum Beispiel des Abflusses und der erodierten und abgelagerten Sedimente, wurden etwa ab Ende des letzten Jahrhunderts verstärkt durchgeführt. Aus der Zeit davor gibt es nur sehr wenige Daten über quantitative Methoden zur Beschreibung von Gerinneprozessen in Wildbächen. Für die Erstellung von Gefahrenkarten und Schutzkonzepten müssen die Prozessintensitäten für verschiedene statistische Wiederkehrperioden sowie das Gefahrenpotenzial quantifiziert werden. Eine Durchsicht von Fachberichten zu Gefahrenkarten und Schutzkonzepten für Wildbach- und Geschiebetransportprozesse in einem Teil der Schweiz hat gezeigt, dass eine vergleichende Bewertung oft schwierig ist, da teilweise sehr unterschiedliche Methoden für die Erstellung von Gefahrenkarten und insbesondere für die Prozessbewertung angewendet werden (Rickenmann und Badoux 2018).

Die Beurteilung von Wildbachprozessen stützt sich heute zunehmend und primär auf quantitative Ansätze, aber auch auf numerische Simulationsmodelle. Die quantitative Beschreibung der Gerinneprozesse in Wildbächen basiert in vielen Fällen auf früheren und um-

fassenden Untersuchungen zur Beschreibung ähnlicher Prozesse in relativ flachen Gerinnen oder grösseren Einzugsgebieten. Die Wahl des Ansatzes zur Gefahrenabschätzung von Wildbächen ist anerkanntermassen schwierig, da es für viele Teilprozesse unterschiedliche Ansätze zur Prozessabschätzung hydrologisch bedingter Naturgefahren gibt und da nur wenige umfassende Zusammenstellungen bestehender Methoden verfügbar sind. Dementsprechend ist die quantitative Beschreibung von Wildbachprozessen mit grossen Unsicherheiten behaftet, und es ist nicht immer klar, welche Methoden idealerweise eingesetzt werden sollten.

2 Offene Fragen in der Forschung und bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbachprozessen

Bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbachereignissen gibt es im Wesentlichen zwei Hauptkomponenten, die zu betrachten sind. Die erste Komponente (1) umfasst die Erstellung einer Magnituden-Frequenz-Beziehung (M-F-Beziehung) für solche Ereignisse, die zweite Komponente (2) betrifft das Fliess- und Ablagerungsverhalten des Wasser-Feststoff-Gemisches, zum Beispiel bei einem Murgang oder einem sedimenttransportierenden Hochwasser. Die wichtigsten Elemente dieser beiden Komponenten und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten sind in Abbildung 1 dargestellt.

In der Periode 2021 bis 2023 untersuchte eine Arbeitsgruppe der Fachstelle für Naturgefahren (FAN), wie eine hohe Qualität der Gefahrenbeurteilung von Wildbächen in der Schweiz auch in Zukunft erhalten, sichergestellt und optimiert werden kann. Die Ergebnisse der Arbeitsgruppe wurden in einem Bericht zusammengefasst (FAN 2023). Dieser Bericht enthält eine Einschätzung der aktuellen Situation der «Gefahrenbeurteilung» von Wildbächen in der Schweiz und gibt eine Reihe von Empfehlungen für mögliche zukünftige Entwicklungen. Dazu wurden bestehende Lücken und wünschenswerte Neu- bzw. Weiterentwicklungen in den Bereichen Forschung, Ausbildung (universitäre Lehrgänge und berufliche Weiterbildung) und Gefahrenbeurteilung in der Praxis identifiziert und diskutiert sowie auf Basis der Erkenntnisse der Arbeitsgruppe Massnahmenempfehlungen formuliert (s. auch Rickenmann *et al.* 2024). Tabelle 1 fasst die wesentlichen Elemente der für die quantitative Beurteilung von Wildbachprozessen not-

wendigen Themen zusammen, gibt einen kurzen Hinweis auf den Stand der Forschung und listet einige Defizite auf, die eine einfache Anwendung in der praktischen Gefahrenabschätzung erschweren.

3 Beispiele für den Forschungsbedarf in Bezug auf Sedimentverfügbarkeit und Fließverhalten

In den nächsten Jahrzehnten sind erhebliche Fortschritte im Hinblick auf ein besseres Verständnis der M-F-Beziehung (grüne Komponente (1) in Abbildung 1) für ausgewählte Einzugsgebiete und schliesslich auch im Hinblick auf die Verallgemeinerung solcher Erkenntnisse auf weitere Einzugsgebiete zu erwarten. Neue Fortschritte ergeben sich vor allem dank neuer und erschwinglicher Technologien für Feldbeobachtungen, die eine detaillierte Kartierung der Sedimentquellen und eine Bewertung der zeitlichen Veränderungen ermöglichen. Dabei können insbesondere die Auswirkungen der Niederschlagsbedingungen und der Merkmale des Einzugsgebiets auf den daraus resultierenden Sedimenttransfer und die Speicherung in einem Einzugsgebiet berücksichtigt werden. Neben den verbesserten und detaillierteren Feldbeobachtungen wird der Fortschritt auch durch das relativ neue Konzept der Berücksichtigung der Sedimentkonnektivität und der Analyse von Sedimentkaskaden unterstützt. Entsprechende Beispiele werden für kleinere und steilere Gebirgseinzugsgebiete in Martini *et al.* (2022) und für Flusseinzugsgebiete in Tangi *et al.* (2019) beschrieben. Um die Erstellung von M-F-Beziehungen zu verbessern, sind weitere Forschungsarbeiten

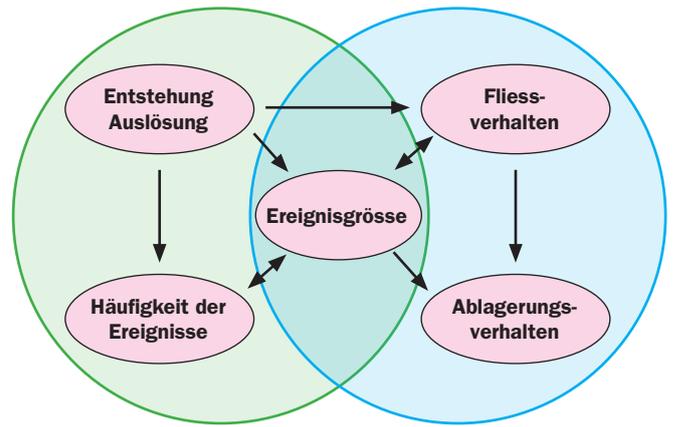


Abb. 1. Wichtige Elemente bei der Gefahrenbeurteilung von Wildbachereignissen oder gravitativen Massenbewegungen, und die Abhängigkeiten zwischen diesen Elementen (modifiziert nach Rickenmann 2016). Grün umrandet bezieht sich auf Komponente (1) und blau umrandet auf Komponente (2) der Gefahrenbeurteilung von Wildbachereignissen.

zur Beschreibung von Einzugsgebietstypen mit einer charakteristischen Sedimentverfügbarkeit erforderlich, welche das zeitliche Auftreten und die Grösse von Murgang-Ereignissen bestimmt (z.B. Zimmermann *et al.* 1997). Ebenso muss die Rolle der Sedimentspeicherung in steilen Gerinnen besser quantifiziert werden, welche einen starken Einfluss auf die grossen Schwankungen des fluvialen Geschiebetransports während Hochwasserabflüssen hat (z.B. Rickenmann 2020).

Beim Fließverhalten von Murgängen ist die Abschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeit der Murgangfront ein wichtiges Element für die Gefahrenabschätzung. Lange Zeit waren automatische Messungen

Tabelle 1. Elemente (Themen), die zur quantitativen Bewertung von Wildbachprozessen herangezogen wurden, mit einigen Stichworten zum Stand der Forschung und mit einigen Defiziten, deren Behebung zur Verbesserung der praktischen Gefahrenbeurteilung führen könnte.

Elemente (Themen)	Stand der Forschung	Wichtige Defizite im Hinblick auf Fortschritte bzw. rasche Umsetzung für die Praxis
A. Wildbachfrachten, Ereignishäufigkeit, Prozess-Typisierung		
Magnitude und Frequenz von Ereignissen (M-F-Beziehung)	M-F-Beziehung ist zentral für die Szenarienbildung und steuert u. a. den Umfang der Analyse/ num. Modellierung. Empirische Formeln zur Abschätzung von Murgang-Geschiebefracht (in FAN Skript) sind relativ grob und wurden in den 1980er und 1990er Jahren erstellt. SEDEX und Gertsch (Dissertationen Univ. Bern) sind neuer, erfordern aber Fachwissen.	(1) Aktualisierung der Datenbank mit neuen Ereignissen und Erarbeiten aktualisierter Formeln. (2) Anwendung von neuen Technologien zum besseren und häufigeren flächenhaften Monitoring von Sedimentspeicherung und -verlagerung in Wildbacheinzugsgebieten. Dazu gehören eine systematische Erfassung und Zusammenstellung von charakteristischen Wildbacheinzugsgebietskenngrößen inkl. Angaben zu Untergrund und Aufbau, lokalem Niederschlag, Bodenbedeckung, Vegetation und Landnutzung.
Typisierung von Wildbacheinzugsgebieten im Hinblick auf Magnitude-Frequenz-Beziehung	Nur sehr wenige Studien vorhanden (z.B. Altschutt- und Jungschuttwildbäche), typische Muster von Magnitude und Frequenz wurden für die Schweiz von Zimmermann <i>et al.</i> (1997) hergeleitet.	Systematische Zusammenstellungen von Wildbacheinzugsgebieten mit Ereignis- und Einzugsgebiets-Charakteristiken nötig. Link zu Forschungsbedarf bei «M-F-Beziehung».

Fortsetzung Tab. 1

Elemente (Themen)	Stand der Forschung	Wichtige Defizite im Hinblick auf Fortschritte bzw. rasche Umsetzung für die Praxis
A. Wildbachfrachten, Ereignishäufigkeit, Prozess-Typisierung		
Murfähigkeit, dominanter Prozessstyp	Einfache Unterscheidung Murgang/murgangartig/ fluvialer Transport aufgrund von Kegel- und Einzugsgebiets-Parametern	Prozesswechsel können während eines Wildbachereignisses auftreten. Zuordnung zu Prozessstyp aufgrund von Ablagerungen nicht immer eindeutig.
Prozessübergänge und Prozessketten	Einige Simulationsmodelle können Prozesswechsel berücksichtigen, bedingen aber ereignisbasierte Parameter-Einstellungen.	Modelle sind nötig mit einer soliden physikalischen Grundlage für die Simulation des Übergangs zwischen verschiedenen Prozessstypen.
B. Fluvialer Geschiebetransport		
Fliesswiderstand und Fliessgeschwindigkeit	Neuere hydraulische Ansätze zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit sind vorhanden. Trotzdem besteht grosse Variabilität des Fliesswiderstandes für gegebenen Abfluss.	Fliesswiderstand ist primär durch relative Abflusstiefe und Gefälle dominiert. Weitere Einflussfaktoren der Variabilität müssen untersucht werden (Bachbettmorphologie wie z.B. Holz im Gerinne, Stufen-Becken etc).
Korngrössen und Kornzusammensetzung	Zur Bestimmung der Korngrössenverteilung existieren Photosieving-Programme. Anwendung in Wildbachgerinnen mit vielen grossen Blöcken und organischem Material im Gerinnebett noch wenig überprüft.	Anwendungsgrenzen und Unsicherheiten dieser Programme sowie Vergleich mit anderen Methoden (Linienzahlanalyse, Wolman sampling) sind kaum bekannt für Wildbachgerinne.
Berechnung des Geschiebetransportes und der Geschiebefrachten	Neuere Ansätze zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (mit reduzierter Sohlenschubspannung) sind vorhanden.	Einfluss der Geschiebeverfügbarkeit auf Transportniveau ist noch wenig quantifiziert.
Simulationsmodelle für Geschiebetransport	Wenige 1D-Modelle vorhanden zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (mit reduzierter Sohlenschubspannung), aber keine 2D-Modelle.	Modelle wenig getestet in Wildbächen. Fast keine 2D-Simulationen gemacht zur Ablagerung bzw. Erosion auf dem Kegel ausserhalb des Gerinnes.
Ablagerung und Erosion ausserhalb des Gerinnes auf Kegel	Limitierte Beobachtungen v. a. aus Laboruntersuchungen mit natürlichen Kegelsituationen.	Mehr quantitative Beobachtungen auf natürlichen Wildbachkegeln sind nötig, in Kombination mit weiteren Laborversuchen.
Geschiebetransport in Gebirgsflüssen (steilere Abschnitte)	1D-Modelle vorhanden zur Berücksichtigung hoher Energieverluste durch Makrorauhigkeit (Sred, tau-eff), aber kaum 2D-Modelle.	Modelle in einigen Gebirgsflüssen in CH getestet. Weitere systematische Nachrechnungen sollten gemacht werden und mit Daten bzw. Abschätzungen aus Geschiebehaushaltstudien verglichen werden.
C. Murgang		
Murgangauslösung	Murgangentstehung im Gerinne ist noch wenig untersucht. Es fehlen v. a. Beobachtungen aus der Natur.	Es fehlen v. a. Beobachtungen aus der Natur, insbesondere auch automatisches Monitoring (wie z.B. in Chalk cliffs, USA).
Erosionsleistung von Murgängen	Neuere Technologien erlauben detailliertes Monitoring von Sohlenveränderungen entlang von Gerinnen. Erosionsansätze sind z.T. in Modellen implementiert, aber noch wenig getestet.	Regelmässige Bestimmung von Gerinneveränderungen bei Ereignissen. Erosions-Ansätze in Modelle mit verschiedenen Rheologien implementieren.
Fliessverhalten von Murgängen: Maximalabfluss, Fliessgeschwindigkeit, Reichweite und Ablagerungslänge auf dem Kegel	Empirische Ansätze vorhanden, z. B. Maximalabfluss als Funktion der Murgangfracht, mit Klassierung granular-schlammstromartig.	Mehr Naturbeobachtungen sind nötig, insbesondere auch mit Angaben zu Materialeigenschaften (Korngrössen, Wassergehalt), dies gilt für alle Aspekte des Fliessverhaltens.
Modelle zur Simulation des Fliessverhaltens von Murgängen	Verschiedene Rheologien sind in 2D-Modellen implementiert und in der Praxis im Einsatz. Verschiedene rheologische Ansätze können gewählt werden zur Beschreibung des Fliessverhaltens.	Eine Zuordnung der rheologischen Ansätze zu Murgangtypen in der Natur ist schwierig. Modell-Parameter müssen durch frühere (gut dokumentierte) Ereignisse rückgerechnet («kalibriert») werden. Aber: (1) Gute, umfassende Dokumentationen zu früheren Ereignissen fehlen sehr oft. (2) Systematische Vergleiche zur Auswirkung der Parameter- bzw. Modellwahl fehlen. (3) Unsicherheiten werden fast nie ausgewiesen/quantifiziert. (4) Viele Modelle sind (bestenfalls) nur in Forschungsversion vorhanden, aber nicht für Praxiseinsatz geeignet.
Murgangartiger Transport (Übergang fluvialer Transport zu Murgang)	Noch sehr wenige Untersuchungen und quantitative Beobachtungen zum murgangartigen Transport vorhanden. Ausnahmen: vereinfachte Laborversuche, qualitative Beobachtungen in der Natur.	Die Abhängigkeit eines spezifischen Prozessstypen von den Faktoren Feststoffkonzentration, Kornverteilung und Fliessenergie ist noch kaum bekannt und quantifiziert.

selten, und insbesondere in steileren Gerinneabschnitten wurden die Fließgeschwindigkeiten nach einem Ereignis auf der Grundlage der sogenannten Vortex-Gleichung für die Kurvenüberhöhung anhand von Fließspuren im Gelände geschätzt. Diese Gleichung gilt streng genommen nur für Newtonsche Flüssigkeiten, weshalb bei der Anwendung der Gleichung auf Murgänge ein Korrekturfaktor eingeführt wurde. Kurvenüberhöhungen können in gekrümmten Kanälen oder Gerinnen beobachtet werden, wenn die Fließhöhe an der inneren Kurvenseite geringer ist als die Fließhöhe an der äusseren Kurvenseite. Trotz der überragenden Bedeutung einer zuverlässigen Kenntnis dieses Korrekturfaktors für die Dokumentation vergangener Ereignisse existieren nur wenige systematische Studien, die versuchten, diesen Faktor besser einzugrenzen. Eine Studie von Scheidl *et al.* (2019) legt nahe, dass der Korrekturfaktor k für kleinere Froude-Zahlen deutlich grösser als 1 sein kann (der Wert, der für strömende Fließbedingungen von Newtonschen Flüssigkeiten gilt; Abb. 2). In vielen Dokumentationen vergangener Ereignisse wurde ein Wert von $k = 1$ verwendet, was zu einer deutlichen Überschätzung der mittleren Fließgeschwindigkeit der Murgangfront führte.

Von grosser Bedeutung ist auch ein besseres Verständnis des Übergangs zwischen verschiedenen Abflussarten im Gerinne. Dabei stellt die Quantifizierung der Bedingungen für den Übergang zwischen sedimenttrans-

portierendem Abfluss, murgangartigem Abfluss («debris flood», «hyperconcentrated flows») und Murgängen nach wie vor eine grosse Herausforderung dar. Sowohl Feld- als auch Laboruntersuchungen zu diesem Thema sind noch relativ selten. Eine aktuelle Übersichtsarbeit zu diesem Thema stammt von Church und Jakob (2020). Zu einem verwandten Thema diskutieren Jakob *et al.* (2022) die Herausforderungen bei der Erstellung zuverlässiger M-F-Beziehungen, eine Aufgabe, die noch schwieriger wird, wenn verschiedene Abflussarten beteiligt sind.

Natürlich stellt der Übergang zwischen verschiedenen Abflussarten auch die numerische Simulation von Murgängen und verwandten Prozessen vor grosse Herausforderungen. Dies gilt auch für kaskadierende Gefahrereignisse, wie zum Beispiel für das kombinierte Ereignis von 2017 am Piz Cengalo in der Südostschweiz, bei dem ein Bergsturz zunächst auf einen Gletscher traf und dann mehrere Murgänge auslöste (Mergili *et al.* 2020; Tognacca *et al.* 2019). Wie für solche «angewandten» Simulationen typisch, wurden die Modellparameter in diesen Studien durch Rückrechnung bestimmt, um eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen zu erreichen. Ergänzende Anstrengungen sind erforderlich, um Modelle mit einer stärkeren physikalischen Grundlage zu entwickeln, welche den Übergang zwischen verschiedenen Abflussarten besser simulieren können (z. B. Meng *et al.* 2022).

Simulationsmodelle von Murgängen sind eine wichtige Methode zur Abschätzung potenzieller Ablagerungsgebiete auf dem Wildbachkegel. Zur Beschreibung des Reibungsverhaltens während der Ablagerungsphase eines Murgangs werden häufig recht einfache rheologische Modelle (oder konstitutive Gesetze) verwendet. In der Regel werden die am besten passenden Modellparameter und Reibungskoeffizienten auf der Grundlage früherer ähnlicher Ereignisse zurückgerechnet. Ein einfaches analytisches Modell ist das Massenflussmodell (MF) mit nur einem einzigen Reibungskoeffizienten, der hier mit S_{MF} bezeichnet wird. Unter den numerischen Simulationsmodellen wird häufig ein Modell mit einer sogenannten Voellmy-Fluid-Rheologie (VF) verwendet, und der entsprechende basale Reibungskoeffizient wird hier mit S_{VF} bezeichnet. Es ist nicht überraschend, dass diese rückgerechneten Reibungskoeffizienten für eine gute Übereinstimmung der simulierten und beobachteten Ablagerung einen starken Zusammenhang mit der Kegelneigung, S_{fan} , oder der Geländeneigung im Ablagerungsgebiet, S_{dep} , aufweisen (Rickenmann 2005). Eine geometrische Skalierung zwischen dem Gesamt ereignisvolumen eines Murgangs und der Ablagerungsfläche ergibt einen sogenannten Mobilitätskoeffizienten k_B , der als annähernd vergleichbar mit einem Ergebnis eines grossskaligen (prototypischen) Rheometerversuchs angesehen werden kann: k_B ist ein charakteristischer Wert für das mittlere Fließverhalten während der Ablagerungsphase des Murgangereignisses, aus dem er

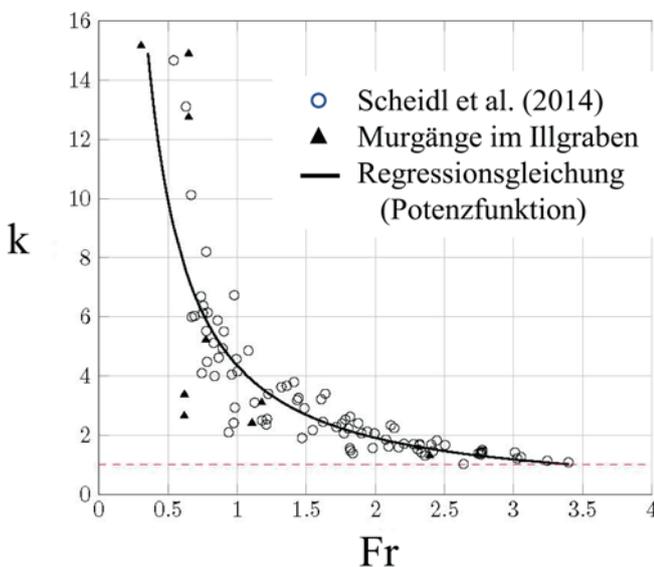


Abb. 2. Beziehung des empirisch abgeleiteten Korrekturfaktors k zur Schätzung der Murganggeschwindigkeit aus Beobachtungen zur Kurvenüberhöhung auf Grundlage der Vortex-Gleichung, dargestellt als Funktion der Froude-Zahl Fr . Die horizontale, rot gestrichelte Linie stellt einen Wert von $k = 1$ dar, wie er für strömende Fließbedingungen von Newtonschen Flüssigkeiten erwartet wird und wie er häufig für die Schätzung der Murganggeschwindigkeit aus Beobachtungen verwendet wird. Die schwarze Linie zeigt das Regressionsmodell gemäss eines Potenzgesetzes, basierend auf den Laborversuchen von Scheidl *et al.* (2014). (Abb. modifiziert nach Scheidl *et al.* 2019).

ermittelt wurde (Rickenmann und Scheidl 2023). Interessanterweise wurde festgestellt, dass die beiden genannten Reibungskoeffizienten, normiert auf die Kegel- bzw. Geländeneigung (S_{MF}/S_{fan} bzw. S_{VF}/S_{dep}), eine weitere Abhängigkeit vom Mobilitätskoeffizienten k_B aufweisen (Abb. 3 und 4). Systematischere Untersuchungen mit

grösseren Datensätzen könnten hilfreich sein, um diese Reibungskoeffizienten besser einzugrenzen und die Praxis bei der Auswahl solcher Modellparameter zu unterstützen.

4 Schlussbemerkungen

In diesem Beitrag wurden nur einige ausgewählte Elemente der Gefahrenbeurteilung in Wildbacheinzugsgebieten diskutiert. Dementsprechend werden in diesem Abschnitt über die Schlussfolgerungen die nachfolgenden Punkte hervorgehoben, um noch einmal auf einige Forschungsbereiche hinzuweisen, in denen Fortschritte für künftige Gefahrenabschätzungen sehr hilfreich sein können:

- Die Magnitude-Frequenz-Beziehungen werden von technologischen Entwicklungen profitieren.
- Es besteht die Notwendigkeit, die Verfügbarkeit und die Ausräumung von Sedimenten in Einzugsgebieten besser zu beschreiben.
- Es bedarf eines besseren Verständnisses der Beobachtungen zu Kurvenüberhöhungen und der Abschätzung der Aufprallhöhe von Murgängen (oder nicht-newtonschen Flüssigkeiten).
- Bei der Vorhersage potenzieller Ablagerungsflächen muss die Abhängigkeit der (rückgerechneten) Modellreibungskoeffizienten von der Geländeneigung und den Mobilitätskoeffizienten berücksichtigt werden.
- Die verschiedenen Abflussarten müssen auf der Grundlage von Feldbeobachtungen und von Laborversuchen besser charakterisiert werden.
- Ebenso bedarf es eines besseren theoretischen Verständnisses des Übergangs zwischen verschiedenen Abflussarten (z.B. von fluvialen Transport zu murgangartigem Transport und zu Murgängen).

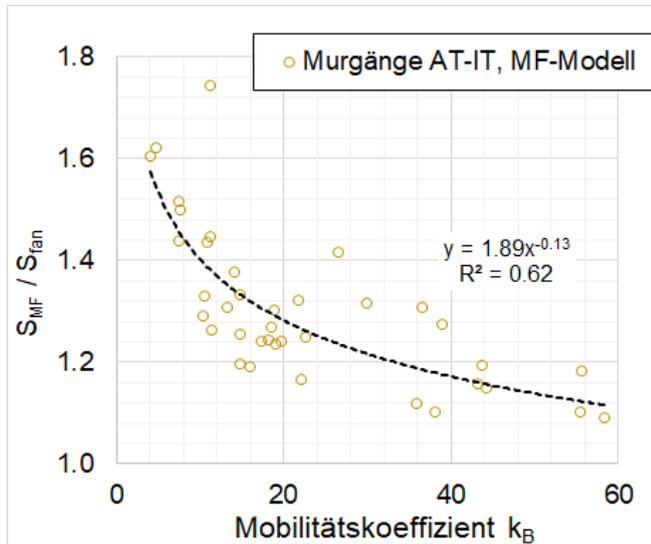


Abb. 3. Beziehung zwischen dem Verhältnis S_{MF}/S_{fan} und dem Mobilitätskoeffizienten k_B . Hier wurde das Massenflussmodell auf die Murgangereignisse angewandt, wobei der beste Reibungskoeffizient S_{MF} zurückgerechnet wurde, um mit der beobachteten Auslauflänge übereinzustimmen (Abb. modifiziert nach Rickenmann und Scheidl 2023).

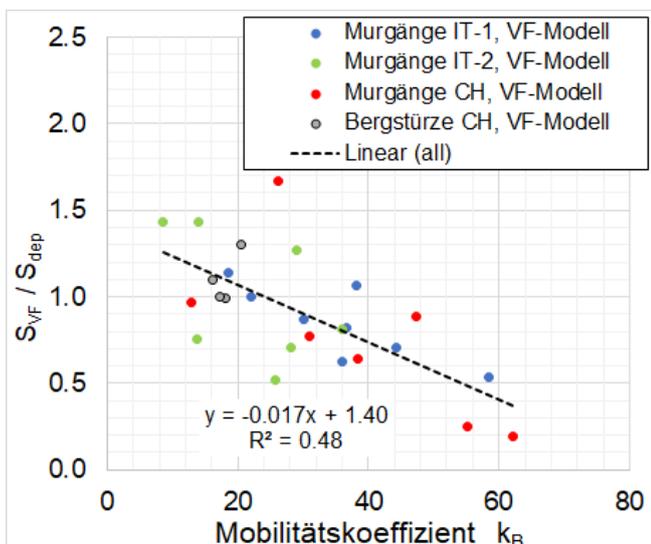


Abb. 4. Beziehung zwischen dem Verhältnis S_{VF}/S_{dep} und dem Mobilitätskoeffizienten k_B . Hier wurde die Voellmy-Fluid-Rheologie in einem numerischen Simulationsmodell verwendet, das auf die Massenflussereignisse angewandt wurde, wobei der beste Reibungskoeffizient S_{VF} zurückgerechnet wurde, um eine gute Übereinstimmung mit dem beobachteten Ablagerungsmuster zu erzielen (Abb. modifiziert nach Rickenmann und Scheidl 2023).

5 Literatur

- FAN, Fachleute Naturgefahren Schweiz (2023) Gefahrenbeurteilung Wildbäche in der Schweiz: Aktueller Stand und künftige Herausforderungen. FAN-Arbeitsgruppe «Gefahrenbeurteilung Wildbäche», Schlussbericht, November 2023. Autoren: Dieter Rickenmann, Eva Frick, Matthias Busslinger, Gabi Hunziker, Melanie Ulrich, Christoph Graf. fan-info.ch/publikationen/weitere-publikationen
- Church M., Jakob M. (2020) What is a debris flood? *Water Resour. Res.* 56, 2020WR027144. doi.org/10.1029/2020WR027144
- Jakob M., Davidson S., Bullard G., Busslinger M., Collier-Pandya B., Grover P., Lau C.-A. (2022) Debris-flood hazard assessments in steep streams. *Water Resour. Res.* 58, e2021WR030907. doi.org/10.1029/2021WR030907
- Martini L., Cavalli M., Picco L. (2022) Predicting sediment connectivity in a mountain basin: A quantitative analysis of the index of connectivity. *Earth Surf. Process. Landf.* 47, 6: 1500–1513.
- Meng X., Johnson C.G. Gray J.M.N.T. (2022) Formation of dry granular fronts and watery tails in debris flows. *J. Fluid Mech.* 943, A19.
- Mergili M., Jaboyedoff M., Pullarello J., Pudasaini S.P. (2020) Back calculation of the 2017 Piz Cengalo–Bondo landslide cascade with r.avaflow: what we can do and what we can learn. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 20: 505–520. doi.org/10.5194/nhess-20-505-2020
- Rickenmann D. (2005) Runout prediction methods. In: Jakob M., Hungr O. (Eds.) Springer Praxis books. Geophysical sciences. Debris-flow hazards and related phenomena. Berlin; Chichester: Springer. 305–324. doi.org/10.1007/3-540-27129-5_13
- Rickenmann D. (2016) Debris-flow hazard assessment and methods applied in engineering practice. *Int. J. Eros. Control Eng. (Japan)* 9: 3: 80–90. doi.org/10.13101/ijece.9.80
- Rickenmann D. (2020) Effect of sediment supply on cyclic fluctuations of the disequilibrium ratio and threshold transport discharge, inferred from bedload transport measurements over 27 years at the Swiss Erlenbach stream. *Water Resour. Res.* 56, e2020WR027741. doi.org/10.1029/2020WR027741
- Rickenmann D., Badoux A. (2018) Gefahrenbeurteilungen von Wildbächen in der Schweiz – quo vadis? Standortbestimmung und kurzer Ausblick. *Fachleute Naturgefahren Schweiz, Agenda FAN* 1/2018. 25–30.
- Rickenmann D., Scheidl C. (2023) Modelling of debris-flow deposition: Terrain slope, mobility coefficient, and back-calculated basal friction coefficient. *DFHM8, E3S Web of Conferences* 415, 07013 (2023). doi.org/10.1051/e3sconf/202341507013
- Rickenmann D., Frick E., Busslinger M., Graf C., Hunziker G., Ulrich M. (2024) Gefahrenbeurteilung von Wildbächen: Resultate der Aktivitäten einer FAN-Arbeitsgruppe. *Wasser Energ. Luft* 116: 193–200.
- Scheidl C., McArdell B.W., Rickenmann D. (2014) Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel. *Can. Geotech. J.* 52: 1–13. doi.org/10.1139/cgj-2014-0081
- Scheidl C., McArdell B., Nagl G., Rickenmann D. (2019) Debris flow behavior in super- and subcritical conditions. In: Kean J.W., Coe J.A., Santi P.M., Guillen B.K. (eds.) *AEG Special Publication* 28. 437–442. [dx.doi.org/10.25676/11124/173187](https://doi.org/10.25676/11124/173187)
- Tangi M., Schmitt R., Bizzi S., Castelletti A. (2019) The CASCADE toolbox for analyzing river sediment connectivity and management. *Environ. Model. Softw.* 119: 400–406.
- Tognacca C., Gabbi J., Cattaneo G., Beffa, C. (2019) Gravitative Prozesse in der Bondasca: Nachrechnung der beobachteten Phänomene anhand von numerischen Simulationen mit FLUMEN. *Wasser Energ. Luft* 111, 4: 235–242.
- Zimmermann M., Mani P., Romang H. (1997) Magnitude-frequency aspects of Alpine debris flows. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 90, 415–420.

Abstract

Some open questions related to the modeling and the hazard assessment of torrent processes

Some selected elements of hazard assessment in torrent catchments with a focus on channel processes are discussed. A keyword-based list of topics provides information on the state of research and deficits. By way of example, some elements are considered in more detail and some concrete approaches are discussed on how progress can be achieved that will be helpful for future hazard assessments. These elements relate to the following topics: magnitude-frequency relationships of torrential events; curve superelevation and impact height on obstacles for debris flows; modelling the potential deposition areas of debris flows; different flow types and process transitions.

Keywords: hazard assessment, torrent processes, event size, modeling, debris flows, bedload transport



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Erkenntnisse aus physikalischen Murgangversuchen für die Praxis

Catherine Berger

geo7 AG Geowissenschaftliches Büro, Bern, Schweiz

Physikalische Murgangversuche können eine wichtige Grundlage für die Projektierung von Schutzbauwerken sein und wurden beispielsweise am Fellbach, am Illgraben und am Lammbach durchgeführt. Mit den Erkenntnissen aus dem Prozessverhalten konnten Unsicherheiten reduziert, Bauwerke optimiert und Nachweise zur Funktionalität erbracht werden. Die Optimierungen betrafen die Anordnung im Gelände und die Dimensionen der Bauwerke. Dadurch konnten sowohl die Massnahmenkosten als auch der visuelle Impact reduziert werden. Ein weiterer Mehrwert ergab sich für Aktivitäten im Rahmen der Kommunikation und Partizipation zur Förderung von Verständnis und Akzeptanz. Durch die enge Zusammenarbeit in interdisziplinären Projektteams wurden unterschiedliche Kompetenzen und Erfahrungen optimal zusammengeführt.

1 Einleitung

Murgänge bedrohen insbesondere in alpinen Einzugsgebieten vielerorts Siedlungsgebiete und Infrastrukturverbindungen. Aufgrund der schnellen Fliessgeschwindigkeiten und der daraus resultierenden hohen Drücke beim Auftreffen auf Hindernisse sowie der in der Regel kurzen Vorwarnzeiten sind zum Schutz von Siedlungen primär permanente und konstruktive Massnahmen zu treffen (Jakob und Hungr 2005). Im Rahmen der Projektierung von Schutzmassnahmen am Illgraben (Gemeinde Leuk, VS), am Fellbach (Gemeinde Saas-Balen, VS) und am Lammbach (Gemeinden Brienz, Hofstetten und Schwanden, BE) zeigte sich der Bedarf für die physikalische Modellierung von Murgängen. Im Fokus der Untersuchungen standen das Prozessverhalten der Murgänge während der Interaktion mit den Bauwerken, der Nachweis der Funktionalität sowie die Optimierung der Bauwerke. Die physikalischen Modellversuche bauten dabei auf den Erfahrungen aus ähnlichen Versuchsanordnungen an der OST – Ostschweizer Fachhochschule (ehem. HSR Hochschule für Technik Rapperswil) am Institut für Bau und Umwelt auf (vgl. Speerli *et al.* 2008a, b, 2010).

Im Folgenden werden die physikalischen Murgangversuche am Fellbach, am Illgraben und am Lammbach kurz beschrieben. Bei den daraus abgeleiteten Erkenntnissen für die Praxis und Schlussfolgerungen handelt es sich um eine persönliche Einschätzung der Autorin.

2 Drei Beispiele für physikalische Modellversuche

Murgänge aus dem Fellbach (Gemeinde Saas-Balen, VS) gefährden das Dorf Saas-Balen, welches sich auf dem Schwemmkegel des Fellbachs befindet. Die Dynamik im oberen Einzugsgebiet des Fellbachs mit proglazialen Seen, Permafrost- und Gletscherprozessen ist ausserordentlich hoch und komplex. Die Kaskade aus drei Wasserfällen mit Höhen von bis zu 70 m direkt oberhalb des Schwemmkegels verursacht grosse Unsicherheiten bezüglich des Fliessverhaltens von Murgängen und den daraus folgenden Einwirkungen auf Bauwerke, welche sich unterhalb des untersten Wasserfalls befinden. Mit den physikalischen Modellversuchen wurden der Einfluss der Wasserfälle auf das Fliessverhalten von Murgängen, die resultierenden Fliessparameter sowie die Funktionalität einer Umleitung (Abb. 1) und einer Ausleitung (Abb. 2) untersucht. Die Modellversuche wurden im Massstab 1:50 durchgeführt. Die physikalischen Modellversuche sowie Hintergründe zum Projekt sind ausführlich in Bachmann *et al.* (2021) und Berger *et al.* (2020) beschrieben.

Der Illgraben (Gemeinde Leuk, VS) gehört mit mehreren Murgängen pro Jahr zu den aktivsten Wildbächen der Alpen. Grosse Murgänge gefährden das Dorf Susten und weitere Siedlungen, welche sich auf der orographisch rechten Seite des Kegels befinden. Aufgrund der Häufigkeit und Grösse der Murgänge ist ein Rückhalt der Murgänge nicht zielführend. Im Rahmen der Projektierung von Schutzmassnahmen wurde daher eine teilweise Ausleitung von Murgängen am Kegelhals auf die orographisch linke Seite in den Pfywald abgeklärt. Das projektierte Ausleitbauwerk bestand aus einer Bresche und einer Schlitzsperre, die Anordnung erfolgte in einer relativ engen Kurve am Kegelhals. Das Schutzkonzept sieht vor, dass grosse Murgänge aufgrund ihrer Trägheit und Fronthöhe in der Kurve durch die Bresche in Richtung Pfywald überfliessen und dadurch teilweise ausgeleitet werden (Abb. 3). Kleinere Murgänge fliessen durch das Ausleitbauwerk und weiter im bestehenden Gerinne. Aufgrund der Komplexität der Ausleitung in einer Kurve lag der Fokus der Modellversuche auf dem Nachweis der Funktionalität sowie der Optimierung der Trennschärfe des Ausleitbauwerks. Die Modellversuche wurden im Massstab 1:60 durchgeführt. Die physikalischen Modellversuche sowie Hintergründe zum Projekt

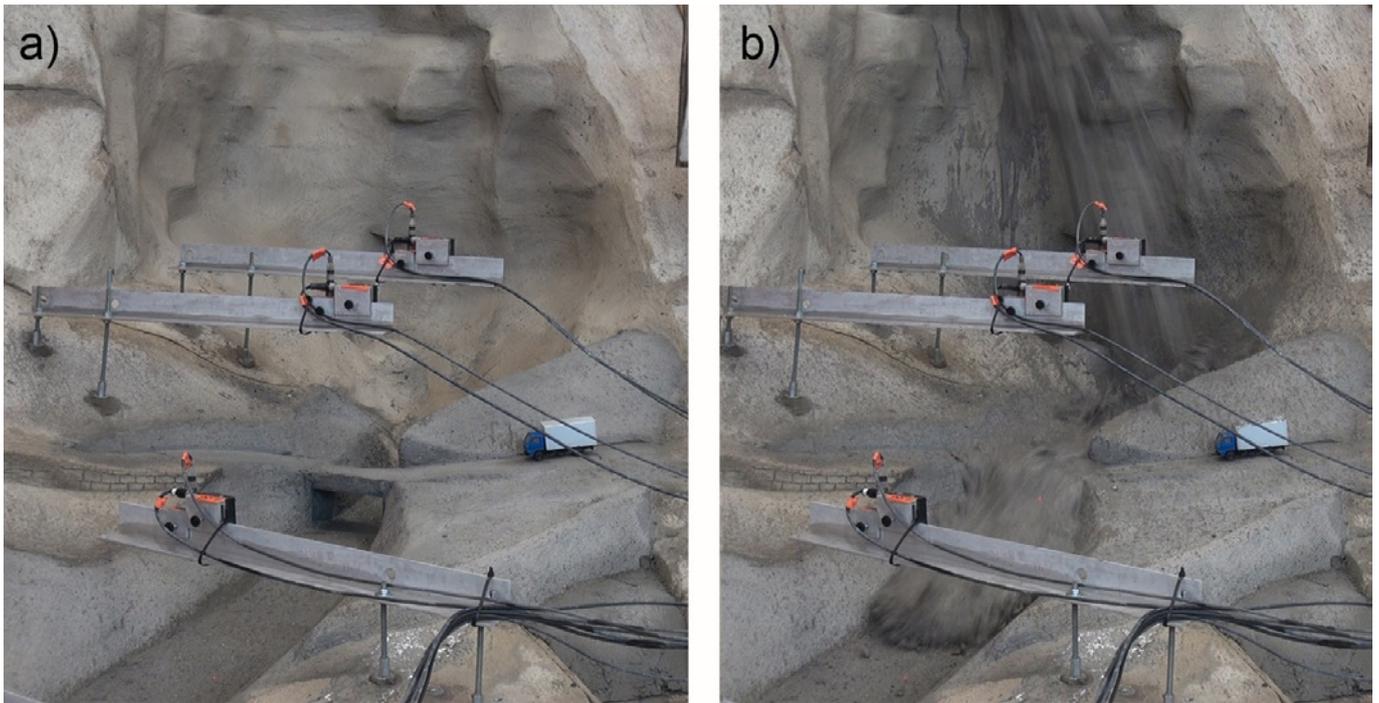


Abb. 1. Physikalische Modellversuche am Fellbach (Gemeinde Saas-Balen, VS), Variante Umleitung: a) vor und b) während eines 100-jährlichen Murgangereignisses. Fließrichtung von oben nach unten. Abbildung entnommen aus Berger *et al.* (2020).



Abb. 2. Physikalische Modellversuche am Fellbach (Gemeinde Saas-Balen, VS), Variante Ausleitung: a) vor und b) während eines 100-jährlichen Murgangereignisses. Fließrichtung von unten nach oben. Abbildung entnommen aus Berger *et al.* (2020).

sind ausführlich in Berger *et al.* (2014) und Berger *et al.* (2016) beschrieben.

Murgänge aus dem Lammbach gefährden auf dem Kegel liegende bewohnte Gebiete der Gemeinden Brienz, Schwanden und Hofstetten (BE). Aufgrund dieser Gefährdung wurde ein Schutzkonzept mit unterschiedlichen Massnahmenelementen entwickelt. Unter anderem wur-

de im Gebiet Roossi ein Geschiebesammler realisiert, welcher im Falle eines Grossereignisses das Murgangmaterial teilweise zurückhält. Die Rückhaltesperre des Geschiebesammlers soll fluviatile Ereignisse und kleinere Murschübe ohne nennenswerten Rückhalt durchleiten und grosse Murschübe teilweise zurückhalten. Der Geschiebesammler ist zu klein, um grosse Murschübe ganz

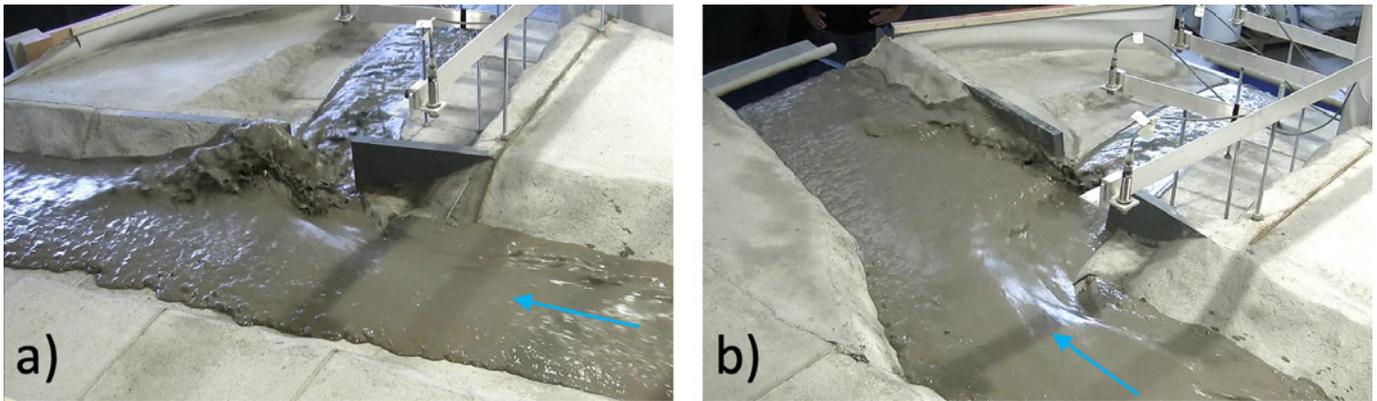


Abb. 3. Physikalische Modellversuche am Illgraben (Gemeinde Leuk, VS): a) Ausgangsgeometrie und b) optimierte Geometrie. Die grosse stehende Welle in der Ausgangsgeometrie ist gut ersichtlich, in der optimierten Geometrie ist sie fast nicht mehr vorhanden. Abbildung entnommen aus Berger *et al.* (2014).

zurückzuhalten. Deshalb wurde auch das Überfließen der Überfallsektion untersucht. Bei den Murgangversuchen für den Geschiebesammler Roossi wurde insbesondere die Ausbildung der Öffnungen und Balkenabstände des Abschlussbauwerkes untersucht. In diesem Zusammenhang spielte das abgeschätzte Grösstkorn des Murgangs eine entscheidende Rolle. Weiter wurden unterschiedliche Sohlenlagen sowie die Funktionalität bei mehreren Schüben untersucht. Die Modellversuche wurden im Massstab 1:50 durchgeführt. Die physikalischen Modellversuche sowie Hintergründe zum Projekt sind ausführlich in HSR IBU (2017) beschrieben.

3 Erkenntnisse für die Praxis

Im Rahmen der hier beschriebenen physikalischen Modellversuche wurden aussergewöhnliche Geländesituationen, deren Auswirkungen auf das Fliessverhalten von Murgängen sowie die Interaktion mit Bauwerken untersucht. Die aussergewöhnlichen Geländesituationen umfassten eine Kaskadensituation mit drei Wasserfällen wie am Fellbach und eine Kurvensituation wie am Illgraben. In Bezug auf die Interaktion mit Bauwerken wurde die Funktionalität untersucht sowie die Anordnung und Geometrie der Bauteile optimiert. Ein Schwerpunkt lag auf der Abklärung der Anströmung (Fliessparameter), Trennschärfe sowie Robustheit der Schutzbauwerke. Die Optimierungen erfolgten dabei schrittweise und Sensitivitätsanalysen rundeten die Modellversuche ab. Die physikalische Modellierung basiert auf der Vorgabe von Zielgrössen, wie zum Beispiel Fliessgeschwindigkeit, Fliesshöhe oder Murgangvolumen. Diese Zielgrössen müssen im Rahmen der Projekterarbeitung festgelegt werden. Die Murgangmischung im Modell wird so ausgelegt, dass die Zielgrössen im Modell bestmöglich nachgebildet werden können.

Für die Projektierung der Schutzmassnahmen waren die Erkenntnisse aus den physikalischen Modellversu-

chen äusserst wertvoll. Während der Versuche erfolgte eine sehr detaillierte Auseinandersetzung mit der Situation, den Murgangprozessen und dem Schutzbauwerk. Die zahlreichen Bildaufnahmen (Videos, Fotos) sowie Messungen erlaubten eine sehr detaillierte Analyse. Das Verhalten der Murgänge und die Interaktion mit den jeweiligen Bauwerken wurden sprichwörtlich vor Augen geführt. Mit den systematischen Versuchsreihen konnten unterschiedliche Murganggrössen, Rheologien und Bauwerksgeometrien betrachtet und Zusammenhänge erkannt werden. Schrittweise konnten die Bauwerke in Bezug auf ihre Anordnung und Geometrie optimiert und die Nachweise der Funktionalität und Robustheit erbracht werden. Zuvor bestandene grosse Unsicherheiten bezüglich des Fliessverhaltens in speziellen Geländesituationen (Kaskade / Kurve) konnten durch die Modellversuche stark reduziert werden.

Die Ergebnisse aus den physikalischen Modellversuchen bildeten die Grundlage für die weitere Projektierung der Schutzmassnahmen. Dabei konnten durch die optimierten Geometrien auch die Massnahmenkosten reduziert werden. Die hier beschriebenen physikalischen Modellversuche waren aufgrund ihrer räumlichen Dimensionen in der Versuchshalle, ihrer Murganggrössen und ihrer Anzahl sehr aufwändig und herausfordernd. Eine Kombination der physikalischen Modellversuche mit numerischer Modellierung, eine sogenannte hybride Modellierung, bietet Synergiemöglichkeiten für beide Verfahren. So zeigen erste Ergebnisse aus hochauflösenden 3D-Simulationen mit DebrisInterMixing und dem Vergleich mit den physikalischen Modellversuchen am Fellbach vielversprechende Resultate (Abb. 4, vgl. auch Von Boetticher *et al.* 2022). Auf diese Weise könnten beispielsweise zusätzliche Parameterkombinationen oder die Feinjustierung von Bauwerken mit spezifischer Software ausgeführt werden (vgl. z.B. die Aktivitäten von Laboratorium 3D in Biasca, TI).

Das umfangreiche Bildmaterial wurde auch im Rahmen der Kommunikation und des partizipativen

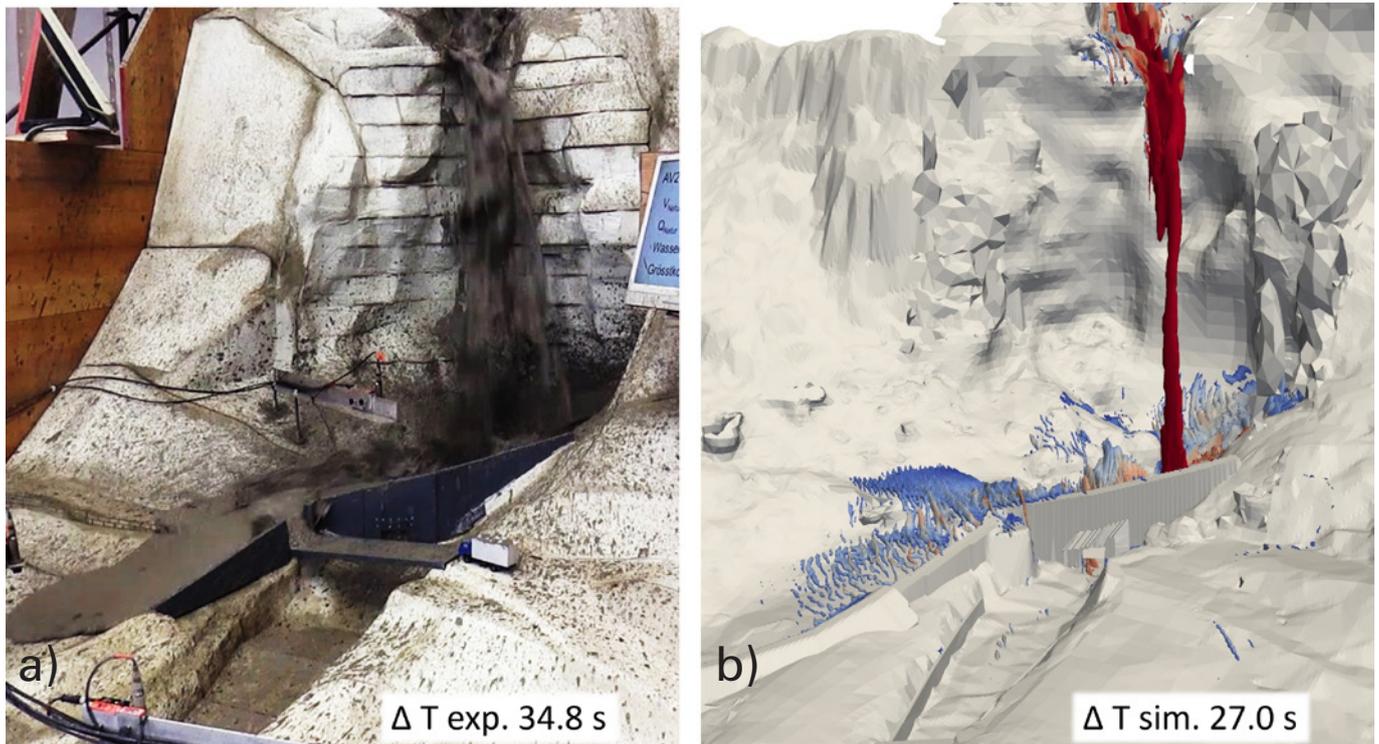


Abb. 4. Situation am Fellbach (Gemeinde Saas-Balen, VS) mit a) physikalischer Modellierung und b) numerischer Modellierung mit dem numerischen 3D-Modell DebrisInterMixing. Abbildung entnommen aus Von Boetticher *et al.* (2022).

Prozesses während der Entwicklung der Hochwasserschutzprojekte eingesetzt. Die physikalischen Modellversuche konnten ihre Funktionalität und Robustheit sehr anschaulich aufzeigen und ermöglichten eine alternative Art der Informationsvermittlung. Auch fanden Besuchstage für Vertreterinnen und Vertreter von Auftraggebern, Behörden sowie direkt Beteiligte statt, wodurch das Hochwasserschutzprojekt bereits während der Planung konkret und greifbar wurde.

4 Schlussfolgerungen

Die physikalischen Modellversuche am Fellbach, am Illgraben und am Lammbach bildeten eine äusserst wichtige Grundlage für die weitere Projektierung der Schutzbauwerke. Mit den Erkenntnissen aus dem Prozessverhalten konnten die Bauwerke optimiert und die Nachweise zur Funktionalität erbracht werden. Die Optimierungen betrafen neben der Anordnung im Gelände insbesondere die Dimensionen der Bauwerke. Dadurch konnten sowohl die Massnahmenkosten als auch der visuelle Impact reduziert werden. Ein weiterer, sehr wichtiger Mehrwert ergab sich für die Hochwasserschutzprojekte im Rahmen der Kommunikation und Partizipation. Sehr anschaulich konnten die Schutzbauwerke und deren Funktionalität präsentiert werden, wodurch Verständnis und Akzeptanz für die Massnahmen verbessert werden konnten.

Die Zusammenarbeit während der physikalischen Modellversuche zwischen dem Team der OST – Ostschweizer Fachhochschule (ehem. HSR Hochschule für Technik Rapperswil) sowie dem Planerteam war sehr eng. Resultate wurden stets gemeinsam besprochen, um daraus Schlüsse zu ziehen und das weitere Vorgehen zu definieren. Mit dieser intensiven und interdisziplinären Zusammenarbeit konnten die vorhandenen Kompetenzen und Erfahrungen bestmöglich zusammengeführt werden. Auch hier zeigt sich, dass der Mehrwert vor allem auch in der Kombination unterschiedlicher Methoden und Erarbeitung in interdisziplinären Projektteams liegt.

Dank

Physikalische Modellversuche sind echte Teamarbeit. So danke ich allen beteiligten Personen, die in irgendeiner Art und Weise zur Realisierung und schlussendlich zum Gelingen der Versuche beigetragen haben. Ein grosser Dank geht zudem an die Standortgemeinden der Hochwasserschutzprojekte, die zuständigen kantonalen Fachstellen sowie das Bundesamt für Umwelt BAFU. Ganz persönlich danke ich Dr. Jürg Speerli für seine konstruktiven Rückmeldungen zu diesem Fachartikel sowie die stets sehr offenen und erkenntnisreichen Diskussionen.

5 Literatur

- Bachmann A.-K., Speerli J., Berger C., Zimmermann F., Clausen W. (2021) Einfluss der Fellbach-Wasserfälle auf das Fließverhalten von Murgängen und auf mögliche Schutzmassnahmen. Wasserbau-Symposium, VAW Mitteilung 262: 193–201.
- Berger C., Ulrich M., Lauber G., Speerli J. (2014) Hochwasserschutz Illgraben: Ausleitbauwerk für grosse Murgänge. Wasserbau-Symposium, VAW Mitteilung 228: 453–462.
- Berger C., Christen M., Speerli J., Lauber G., Ulrich M., McArdeil B.W. (2016) A comparison of physical and computer-based debris flow modelling of a deflection structure at Illgraben, Switzerland. Proc. Int. Symp. Interpraevent. Lucerne. 212–220.
- Berger C., Bachmann A.-K., Speerli J., Zimmermann F., Clausen W. (2020) Erkenntnisse aus physikalischen Murgangversuchen für die Planung von Schutzmassnahmen. Beispiel Fellbach, VS. Wasser Energ. Luft 112, 3: 199–204.
- HSR Hochschule für Technik Rapperswil/IBU Institut für Bau und Umwelt (2017) Murgangversuche Geschiebesammler Roossi, Technischer Bericht. Projekt im Auftrag der Schwellenkorporationen Brienz, Schwanden und Hofstetten. Bericht Stand 1.7.2017. 96 S.
- Jakob M., Hungr O. (2005) Debris-flow Hazards and Related Phenomena. Springer Praxis Books. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Speerli J., Grob M., Künzi R., Wyss P., Zimmermann M., Pozzi A. (2008a) Glyssibach Brienz, Switzerland: Flood and debris flow event on August 22/23, 2005 – Protection measures against future floods and debris flows. Proc. Int. Symp. Interpraevent. Dornbirn. 384–385.
- Speerli J., Schatzmann M., Grob M., Solèr R. (2008b) Erfahrungen aus der Nachbildung der Brienzer Murgänge im physikalischen Modell. In: Minor H. (eds) Proc. Int. Symp. Neue Anforderungen an den Wasserbau, VAW Mitteilung 2007, ETH Zürich. 507–515.
- Speerli J., Hersperger R., Wendeler C., Roth A. (2010) Physical modelling of debris flows over flexible ring net barriers. In: S. M. Springman, J. Laue, L.J. Seward (eds) Proc. 7th International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Institute for Geotechnical Engineering, ETH Zürich. 1285–1290.
- Von Boetticher A., Speerli J., Berger C., Bachmann A.-K. (2022) Numerische 3D-Murgangsimulation im Vergleich zu einer physikalischen Murgangmodellierung am Beispiel des Fellbachs in Saas-Balen VS. Wasser Energ. Luft 114, 4: 239–245.

Abstract

Insights from physical debris flow experiments for the practice

Physical modelling of debris flows can be an important basis for the planning of protective structures and were carried out, for example at the torrents Fellbach, Illgraben and Lammbach. The findings from the process behaviour were used to reduce uncertainties, optimize structures and provide proof of functionality. The optimizations concerned the arrangement in the terrain and the dimensions of the structures. As a result, both the costs of measures and the visual impact were reduced. Further added value resulted from communication and participation activities to promote understanding and acceptance. The close cooperation in interdisciplinary project teams meant that different skills and experiences were optimally combined.

Keywords: physical modelling of debris flow, case studies, practical experience, protective measures, process behavior, optimization of structures, functionality of structures



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Murgangexperimente mit kleinmasstäblichen Modellen

Anwendungen – Herausforderungen – Grenzen

Christian Scheidl

Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU University, Wien, Österreich

Kleinmasstäbliche Murgangexperimente tragen wesentlich zur Klärung komplexer Fliess- und Ablagerungsvorgänge bei, indem sie physikalische Größen in einem skalierten Modell naturähnlich, kontrollier- und wiederholbar nachbilden. In diesem Beitrag werden die Anwendungen solcher Experimente sowie die damit verbundenen Herausforderungen anhand praktischer Beispiele beschrieben. Die Experimente stützen sich auf grundlegende Prinzipien des wasserbaulichen Versuchswesens und ermöglichen die Untersuchung dynamischer Prozesse unter kontrollierten Bedingungen. Zudem wird die Relevanz der Ähnlichkeitsmechanik für die physikalische Modellierung von Murgängen erörtert. Dabei werden die Grenzen dieser Methode aufgezeigt, insbesondere hinsichtlich der Skalierungseffekte und der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Ereignisse.

1 Versuchswesen in der Murgangforschung

Murgänge sind gravitative Massenbewegungen, deren Dynamik hauptsächlich durch den Wassergehalt, das Verhältnis von feinen zu groben Partikeln sowie vom

Grad des Fließwiderstandes aufgrund der Gerinnerrauigkeit und der Gerinnegeometrie beeinflusst wird (Abb. 1).

Die experimentelle Murgangforschung stützt ihren Erkenntnisgewinn dabei auf die physikalische Modellierung, bzw. vor allem auf kleinmasstäbliche Modellversuche. Ziel ist es, relevante physikalische Größen im Modell naturähnlich nachzubilden – womit ein direkter Bezug vom Modell zur Natur besteht.

Murgangexperimente haben ihre Berechtigung, da es weltweit nur wenige Beobachtungsstationen für «natürlich» auftretende Murgänge gibt, wie beispielsweise im Illgraben, Wallis-Schweiz, im Lattenbach, Tirol-Österreich oder im Gadriabach, Südtirol-Italien. Solche Beobachtungsstationen sind grundsätzlich mit erheblichem Installations- und Wartungsaufwand verbunden, da sie für lange Zeiträume konzipiert sind. Obwohl die erhobenen Daten streng genommen nur für die jeweiligen Dispositionen gelten (klimatische Bedingungen, standortstypische Kornverteilungen und/oder vorhandene Gerinnemorphologien), sind die Erkenntnisse enorm wichtig, da sie ein natürliches Abbild widerspiegeln, also auf unskalierten Werten basieren. Aus diesem Grund sind kleinmasstäbliche Modellversuche (Abb. 2) keine



Abb. 1. Murgang. Links: Ablagerung; rechts: Matrix aus unsortierten Fein- und Grobsedimenten.



Abb. 2. Beispiele für kleinmasstäbliche Murgangversuche bzw. Versuchsaufbauten.

Alternative, sondern bieten eine zusätzliche Möglichkeit, Erkenntnisse über Murgangprozesse zu erlangen.

Die Vorteile von kleinmasstäblichen Murgangmodellen liegen in ihrer Kontrollierbarkeit und Wiederholbarkeit. Ein Nachteil ist, dass für eine korrekte Modellierung neben einer geometrischen Ähnlichkeit auch eine kinematische bzw. dynamische Ähnlichkeit gelten sollte. Das heisst, korrespondierende Zeitintervalle bzw. Kräfte in der Natur und im Modell stehen in einem konstanten Verhältnis. Das Problem ist jedoch, dass eine vollständige Ähnlichkeit bei kleinmasstäblichen Versuchen nicht erreichbar ist. Um bei fixierten geometrischen und kinematischen Ähnlichkeiten annähernd dynamische Ähnlichkeiten zu erzielen, werden daher jeweils zwei massgebliche Kräftearten berücksichtigt und zueinander in Beziehung gesetzt – woraus sich ein Modellgesetz ergibt. Die Frage, die sich daher vor der Umsetzung jedes Murgangversuches stellt, lautet: Welches sind die massgeblichen Kräftepaare, die zu einem Erkenntnisgewinn beitragen?

2 Anwendungsbeispiele

Das folgende Kapitel beschreibt die Herausforderungen, die sich aus den Ansprüchen an die geometrische und dynamische Skalierung von wissenschaftlichen Murgangversuchen ergeben und stellt Beispiele von kleinskaligen Experimenten vor, die der Autor selbst durchgeführt hat. Alle Arbeiten wurden vom Österreichischen Wissenschaftsfonds FWF zur Förderung der Grundlagenforschung finanziert und stehen damit nicht unmittelbar in Bezug zur Ingenieurspraxis oder angewandten Forschung.

2.1 Geometrische Ähnlichkeit – eine grundlegende Entscheidung

Beispiel: Analyse von Berechnungsmodellen maximaler Krafteinwirkungen von Murgängen auf der Grundlage eines kleinmasstäblichen Modellierungsansatzes (Scheidl *et al.* 2013).

Ziel dieses Projektes war es, bestehende empirische Modelle zur Berechnung maximal auftretender Kräfte aufgrund der Einwirkung von Murgängen auf vertikale Barrieren zu analysieren. Neben der Messung der potenziellen Zielgrößen (hier maximale horizontale Kräfte, Fließgeschwindigkeiten und Fließhöhen) waren zunächst grundsätzliche Überlegungen zur geometrischen Ähnlichkeit der experimentellen Murgänge notwendig. Ein nicht unwesentlicher Faktor, der sich bei späteren Versuchen immer wieder zeigte, ist die Abhängigkeit der Grösse der Versuchsanlage von der zur Verfügung stehenden Versuchsfläche. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die geometrische Ähnlichkeit zwischen dem Experiment und seinem Prototypen in der Natur neben einem bestimmten Platzbedarf auch den Aufwand für Vor- und Nacharbeiten beeinflusst. So bedingt der gewählte charakteristische Längenmassstab auch die Menge der experimentellen Murgangmischung, welche vor, während und nach den Versuchen angeschafft, bewegt und entsorgt werden muss (Abb. 3).

Der Versuchsaufbau von Scheidl *et al.* (2013) wurde in erster Linie durch die Bedingung bestimmt, den grösstmöglichen Massstab zu verwenden. Diesbezüglich musste neben der Länge und Breite der Versuchsrinne



Abb. 3. Vorhandener Platz, maximal manipulierbare Menge und verfügbare Kornverteilung beeinflussen die geometrischen Verhältnisse kleinmasstäblicher Murgangversuche. Oben links: Modell aus Scheidl *et al.* (2013); oben rechts: Modell aus Friedl *et al.* (2024).

auch die maximal mögliche Neigung aufgrund der Höhenbegrenzung mitberücksichtigt werden. Letztendlich konnte die Versuchsanlage im Massstab 1:20 realisiert werden.

In der Wahl des charakteristischen Längenmassstabes liegt ein direkter Zusammenhang mit den zu erwartenden dynamischen Grössen, da sich die zu erwartende Fließgeschwindigkeit der experimentellen Murgänge neben ihrer Abhängigkeit vom Fließwiderstand auch als Funktion von Gerinnegeometrie und Neigung darstellt.

Der gewählte charakteristische Längenmassstab findet sich im Weiteren in der Kornverteilung der experimentellen Murgangmischung wieder. Basieren die Versuche auf natürlichen Feststoffen (Sedimente), so stellt dies eine zusätzliche Herausforderung dar. Zunächst muss eine prototypische Kornverteilungskurve identifiziert und diese in einem weiteren Schritt mit natürlichen Korngrößenfraktionen definiert werden.

Diese kann zwar relativ einfach in Richtung des maximalen Korndurchmessers prototypisch modelliert werden, der Feinanteil ist jedoch durch die Skalierung und den natürlich vorkommenden Korndurchmessern limitiert. Aus diesem Grund erreicht man bei kleinen Massstäben sehr schnell Korndurchmesser, welche durch Tonminerale oder im besten Fall durch Schluff (Silt) abgedeckt werden müssen. Da manche Tonminerale quellfähig sind, also ihre Eigenschaften bei Wasserzugabe ändern, ist die Anwendung natürlicher Materialien in kleinmassstäblichen Versuchen kritisch zu betrachten (vgl. Bolliger *et al.* 2024). Möglichkeiten, den Anteil an Feinmaterial abzudecken, bestehen neben der Nutzung von Naturprodukten wie Lehmen mit hohem Schluffgehalt (Hafnerlehm, Freidrehmassen) oder Kaolin-Ton-Schluff-Gemischen auch in der Verwendung synthetischer Materialien. Letztendlich gilt zu beachten, dass der Anteil an Feinmaterial ebenfalls die Viskosität und damit wesentlich die Fliesseigenschaften bzw. den Fließwiderstand eines Murganges charakterisiert.

2.2 Dynamische Ähnlichkeit – Strömungsvorgänge unter Schwerkräfteinfluss

Beispiel: Bewertung der Aufprallkräfte von granularen Murgängen auf Brückenüberbauten (Friedl *et al.* 2024).

Für dieses Beispiel lag die Aufgabenstellung im Bau einer kleinmassstäblichen (1:30) Murgang-Versuchsanlage, mit welcher wir die Auswirkungen auf verschiedene Brückenüberbauten (Profile) kontrolliert untersuchen konnten. Ähnlich wie in den Versuchen von Scheidl *et al.* (2013) ging es in diesem Projekt um die Messung von Kräften, welche auf verschiedenen Brückenprofilen durch Einwirkung der experimentellen Murgänge auftreten.

Aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht gehen herkömmliche und weit verbreitete Ansätze zur Abschätzung der Einwirkung von Murgängen auf ein vertikales Hindernis davon aus, dass die auftretenden Kräfte im Wesentlichen proportional zu den hydrodynamischen Druckverhältnissen sind. Eine annähernd dynamische Ähnlichkeit kann daher, da Murgänge vergleichbare Prozesse wie Fließvorgänge mit freiem Wasserspiegel darstellen, mittels des Froude'schen Modellgesetzes erreicht werden. Dieses besagt, dass bei Strömungsvorgängen unter Schwerkräfteinfluss neben der geometrischen Ähnlichkeit auch die Froude-Zahl – definiert als das dimensionslose Verhältnis zwischen Gravitations- und Trägheitskräften in einer Strömung – im Modell und in der Realität gleich gross sein muss (Abb. 4).

Die Froude-Zahl (F) lässt sich über die Fließgeschwindigkeit (v) und die zugehörige Fließhöhe (h), unter Berücksichtigung der Erdbeschleunigung (g) und Gerinneneigung θ , ableiten, und sowohl im Modell als auch in der Natur relativ einfach bestimmen (Glg. 1):

$$F = \frac{v}{\sqrt{gh \cos \theta}} \quad (1)$$

Murgangversuche sind aus diesem Grund meistens «Froude-skaliert». Einen eindeutigen Froude-Bereich für Murgänge gibt es allerdings nicht. Der Grund: Murgänge sind gravitative Massenbewegungen, die aus einer Mischung aus feinen und groben Sedimenten und Wasser bestehen. Diese «einfache» Mischung erweist sich jedoch in der Natur als sehr komplex. Beobachtungen von Murgängen auf der ganzen Welt zeigen Froude-Zahlen von < 1 bis über 10 und decken dabei ein breites Spektrum phänomenologisch ähnlicher Prozesse ab, die aus unterschiedlichen Konzentrationen von Wasser, feinen und groben Sedimenten und häufig auch Wildholz bestehen (vgl. Abb. 1).

Für alle in diesem Artikel vorgestellten Anwendungsbeispiele wurden Versuche mit niedrigen Froude-Zahlen

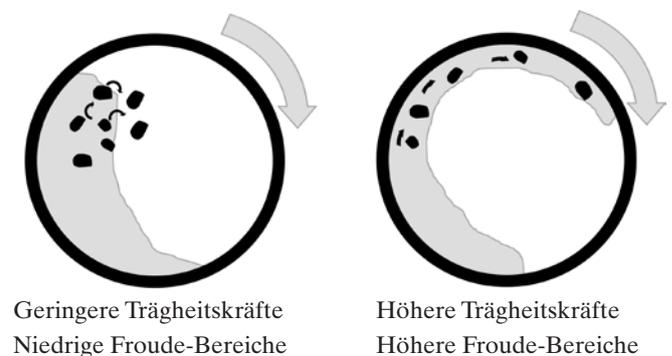


Abb. 4. Eine dynamische Annäherung zwischen Modell und Natur kann über die Froude-Zahl als dimensionsloses Verhältnis von Trägheitskräften zu Gravitationskräften in einer Strömung beschrieben werden. In Froude-Bereichen < 1 überwiegt die Schwerkraft die Trägheit des Systems (links). In hohen Froude-Bereichen wird der Einfluss der Schwerkraft geringer (rechts).

von ± 1 angestrebt. Dies ist vor allem in Rückrechnungen beobachteter Fließdynamiken von Murgängen im alpinen Raum begründet (vgl. Nagl *et al.* 2024). Im Falle der Brückenexperimente gab es jedoch auch einen praktisch relevanten Grund. Während Murgänge mit höheren Froude-Zahlen eine höhere Konzentration von Wasser und feinem Material aufweisen und daher oft gefahrlos das Abflussprofil einer Brücke passieren können, sind Murgänge im Bereich niedriger Froude-Zahlen durch grobkörnigeres Material gekennzeichnet. Diese Ereignisse können zu erheblichen Schäden bis hin zur Zerstörung der Brücke führen.

Eine Herausforderung bei den in Friedl *et al.* (2024) beschriebenen Versuchen war es den experimentellen Murgang mit der entsprechenden Fließgeschwindigkeit, der Fließhöhe, und dem Froude-Bereich, basierend auf der vorgegebenen geometrischen Ähnlichkeit an den Brückenquerschnitt (im Messbereich der Rinne) anprallen zu lassen. Neben den bereits festgelegten Geometrien (Neigung, Gerinnequerschnitt, Gerinnelänge) beziehen sich die noch zu kontrollierenden Freiheitsgrade letztendlich auf den Fließwiderstand der bewegten Murgangmischung.

Grundsätzlich lässt sich in physikalischen Modellen der Fließwiderstand durch die basale Rauigkeit der Gerinnesohle sowie durch das Verhältnis von Wasser zu Feststoffen des experimentellen Murgangmaterials beeinflussen. Es gilt die geeignetste Sohlenrauigkeit (Trägheitskräfte) und Wasserkonzentration im Verhältnis zur bestehenden Neigung und Masse (Schwerkkräfte) zu finden.

Je nach Material der Laborrinne (Holz, Metall, Polypropylen, PVC, ...) wurde die Rauigkeit der Sohle durch eine Epoxid-Sandbeschichtung oder durch den Einsatz von Sandpapier definiert.

Es stellte sich heraus, dass die Wahl des Korndurchmessers für die Epoxid-Beschichtung bzw. der Körnung des verwendeten Sandpapiers in direktem Verhältnis zum maximalen Korndurchmesser der Versuchsmischung steht. Für alle vorgestellten Anwendungsbeispiele betrug das Verhältnis maximaler Korndurchmesser zu Rauigkeitskörnung 1: 0,04 bzw. 1: 0,05.

Sind die geometrischen Verhältnisse sowie die Sohlenrauigkeit fixiert, kann die gewünschte Dynamik durch Änderung der Wasserkonzentration erreicht werden. Hierbei gilt zu berücksichtigen, dass die Änderung der Wasserkonzentration der Murgangmischung eine Änderung der Rheologie und somit direkt eine Änderung der dynamischen Ähnlichkeit bewirkt.

2.3 Dynamische Ähnlichkeit – Spezifische Modellgesetze

Beispiel: Schätzung der Geschwindigkeit von Murgängen aufgrund der Kurvenüberhöhung (Scheidl *et al.* 2014).

Während die bisher beschriebenen Modellversuche Abstraktionen geradliniger Gerinne darstellten, lag die Besonderheit des letzten Anwendungsbeispiels im Einbau zweier Richtungsänderungen bei konstanter Sohlen-



Abb. 5. Einbauen der massgeblichen Rauigkeiten in die Murgang-Versuchsrinne.

neigung. Ziel dieses Versuches war es, die Überhöhung des Murganges in den Kurven zu messen und mit der Frontgeschwindigkeit in Zusammenhang zu bringen. Die Fließgeschwindigkeit (v) lässt sich prinzipiell mit der sogenannten Vortexgleichung als Funktion der Erdbeschleunigung (g), der Gerinneneigung (θ), des Radius (R), der Gerinnebreite (B) sowie der Kurvenüberhöhung (Δh) darstellen:

$$v = \sqrt{\frac{Rg \cos \theta \Delta h}{Bk}} \quad (2)$$

Gleichung 2 beruht auf dem Gleichgewicht der lateralen Stützkkräfte, welche durch die fließende Masse an der Gerinnewand hervorgerufen werden. Bei der Herleitung der Vortexgleichung wird von einem hydrostatischen Ansatz in einem rechteckigen Gerinnequerschnitt ausgegangen, bei dem die Druckverteilung der fließenden Masse in alle Richtungen gleich ist und senkrecht auf die Gerinnewände wirkt (Abb. 6).

Für nicht rechteckige Gerinne, wie im beschriebenen Modellversuch, musste daher zunächst die Gültigkeit von Gleichung 2 aufgrund des Halbkreisquerschnittes evaluiert werden (Abb. 6).

Wenn es um die Strömung von körnigem Material geht, welches aufgrund seiner Reibungseigenschaften

eine innere Festigkeit aufweist (Savage und Hutter 1989), ist die hydrostatische Druckverteilung grundsätzlich eine unrealistische Annahme. Dies ist der Grund für die Einführung des in Gleichung 2 als k notierten Korrekturfaktors, welcher direkt proportional zu einer anisotropen Normalspannung angenommen werden kann. Der dimensionslose Proportionalitätsfaktor K beschreibt das Verhältnis zwischen horizontal (σ_h) und normal (σ_n) auf die Gerinnesohle wirkenden Kräften bzw. Spannungen und basiert häufig auf Rankines Erddrucktheorie:

$$K = \frac{\sigma_h}{\sigma_n} \quad (3)$$

Bei $K = 1$ entsprechen die wirkenden Kräfte dem Gewicht der Flüssigkeit in einem dynamischen Zustand, $K < 1$ steht für eine aktive Ausdehnung der sich bewegenden Masse, während $K > 1$ eine passive Kompression derselben beschreibt. Für Murgänge wurden typische Werte für K zwischen 0,2 und 5,0 angegeben. Im Gegensatz zum Froude'schen Modellgesetz ist die naturräumliche Nachbildung des anisotropen Proportionalitätsfaktors komplex, da sich die direkte Messung von Horizontal- und Normalspannungen sowohl in der Natur als auch bei kleinmasstäblichen Modellversuchen als schwierig erweist.

3 Erkenntnisse

Neben der geometrischen Ähnlichkeit stellt die Wahl des Modellgesetzes, in Abhängigkeit der jeweiligen Fragestellung, eine Herausforderung bei der Umsetzung kleinmasstäblicher Modellversuche dar. In diesem Artikel wurden zwei typische Modellgesetze erläutert, deren Kräfteverhältnisse eine direkte Auswirkung auf die jeweiligen Fragestellungen hatten. Für beide Kräfteverhältnisse lässt sich keine eindeutige Zuordnung für Murgänge im Allgemeinen treffen, da ihre Werte, ob sie nun auf Naturbeobachtungen oder auf Modellversuchen beruhen, eine grosse Streuung aufweisen.

Mit anderen Worten: Alle hier beschriebenen Versuche würden je nach Murgangmischung und Wassergehalt unterschiedliche Ergebnisse liefern und wären aus prototypischer Sicht korrekt. Denn: der Begriff „Murgang“ wird häufig verwendet, um ein breites Spektrum phänomenologisch ähnlicher Prozesse zu beschreiben!

Aus diesem Grund ist es wichtig, die Fließeigenschaften, welche durch kleinmasstäbliche Modellversuche naturräumlich abgebildet werden, einzugrenzen. Dafür können u. a. dimensionslose Zahlen wie die Savage- oder die Bagnold-Zahl verwendet werden. Theoretisch lassen sich so reibungs- von kollisions- und viskositätsdominierten Wasser-Feststoffströmungen unterscheiden und damit künftige Erkenntnisse besser einordnen.

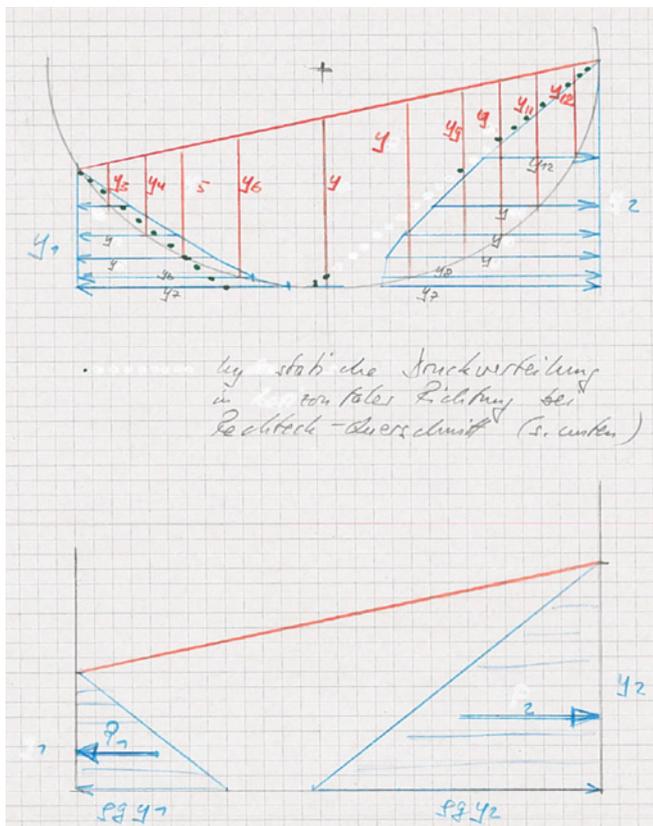


Abb. 6. Hydrostatistischer Kräfteansatz als Grundlage der Vortexgleichung (Glg. 2). Teil einer Skizze zur Ausarbeitung der Unterschiede zwischen einem Halbkreis- und Rechteckquerschnitt (© Dieter Rickenmann).

4 Literatur

- Bolliger D., Schlunegger F., McArdell B.W. (2024) Comparison of debris flow observations, including fine-sediment grain size and composition and runout model results, at Illgraben, Swiss Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 24, 3: 1035–1049. doi.org/10.5194/nhess-24-1035-2024
- Friedl C., Scheidl C., Wernhart S., Proske, D. (2024) Assessing Granular Debris-Flow Impact Forces on Bridge Superstructures. *J. Bridge Eng.* 29, 04024027. doi.org/10.1061/JBENF2.BEENG-6439
- Nagl G., Hübl J., Scheidl C. (2024) Real-scale measurements of debris-flow run-ups. *Landslides* 21: 963–973. doi.org/10.1007/s10346-023-02204-6
- Savage S.B., Hutter K. (1989) The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. *J. Fluid Mech.* 199: 177–215. doi.org/10.1017/S0022112089000340
- Scheidl C., Chiari M., Kaitna R., Müllegger M., Krawtschuk A., Zimmermann T., Proske D. (2013) Analysing Debris-Flow Impact Models, Based on a Small-Scale Modelling Approach. *Surv. Geophys.* 34: 121–140. doi.org/10.1007/s10712-012-9199-6
- Scheidl C., McArdell B.W., Rickenmann D. (2014) Debris-flow velocities and superelevation in a curved laboratory channel. *Can. Geotech. J.* 52: 305–317. doi.org/10.1139/cgj-2014-0081

Abstract

Debris-flow experiments with small-scale models: Applications, challenges, and limitations

Small-scale debris-flow experiments contribute significantly to the clarification of complex flow and deposition processes by simulating physical quantities in a scaled model similar to nature. This article describes the applications of such experiments and the associated challenges using practical examples. The experiments are based on fundamental principles of hydraulic engineering experimentation and enable the investigation of dynamic processes under controlled conditions. In addition, the relevance of similarity mechanics for the physical modelling of debris flows is discussed. The limitations of this method are highlighted, particularly with regard to scaling effects and the transferability of the results to real events in nature.

Keywords: torrent, debris flow, modelling, small-scale experiments, similarity mechanics



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Hybride Murgangmodellierung in der Ingenieurpraxis und in der angewandten Forschung

Christian Tognacca

beffa tognacca GmbH, Claro / Laboratorium3D GmbH, Biasca, Schweiz

Die Ereignisse des Sommers 2024 in verschiedenen Alpenkantonen bieten Gelegenheit, die in der Ingenieurpraxis und der angewandten Forschung verwendeten Methoden zur Risikovorhersage und -bewertung von Murgängen zu überdenken. In diesem Beitrag stellen wir verschiedene Beispiele für die Anwendung von physikalischen Modellexperimenten, numerischer Modellierung und der Kombination der beiden Ansätze, die hybriden Modellierung, vor. Dabei werden wir die Stärken und Schwächen der einzelnen Methoden im Kontext der jüngsten Ereignisse aufzeigen.

1 Einführung

Die katastrophalen Ereignisse des Sommers 2024 in den Kantonen Tessin, Graubünden, Wallis und Bern haben eindrucksvoll gezeigt, wie hoch das Risiko von Murgängen im Alpenraum ist. Diese Ereignisse haben einmal mehr bewiesen, dass die Natur immer wieder unvorhersehbar sein kann und dass ein grosses Bedürfnis besteht, die natürlichen Prozesse besser zu verstehen, um den Schutz von Menschen und Infrastruktur zu verbessern.

Zu den Instrumenten und Methoden zur Untersuchung der Phänomene und zur Bewertung der Murgangrisiken gehören die numerische Modellierung und die Versuche an physikalischen Modellen. Die Kombination dieser beiden Methoden führt zu einer hybriden Modellierung, welche die Vorteile der beiden Ansätze vereint und die Zuverlässigkeit der Ergebnisse erhöht.

2 Numerische Modellierung

Die numerische Modellierung ist spätestens seit Anfang der 2000er Jahre ein weit verbreitetes Instrument zur Risikobewertung von Murgängen. Mehrere zweidimensionale Modellierungscodes haben sich in der Ingenieurpraxis etabliert.

Die Erfahrungen mit der Anwendung dieser Methoden sind umfangreich, und die auf den Ergebnissen der numerischen Modellierung basierenden Vorhersagen gelten als relativ zuverlässig.

Die notwendigen Bedingungen für den zuverlässigen Einsatz numerischer Methoden lauten wie folgt:

- das numerische Modell wurde validiert und die rheologischen Parameter wurden anhand einer ausreichenden Anzahl gut dokumentierter Ereignisse kalibriert;
- die Szenarien wurden gründlich und nach sorgfältiger Analyse der auslösenden Mechanismen und allfälliger erosiver Phänomene entlang der Fließwege definiert;
- allfällige Sekundärprozesse sowie die Verkettung mehrerer Prozesse wurden korrekt berücksichtigt;
- die Ergebnisse wurden vor Ort plausibilisiert.

Die numerische Modellierung (insbesondere zweidimensional) ermöglicht dank immer grösserer Rechenleistung die Simulation sehr grosser Oberflächen, selbst wenn eine sehr hohe räumliche Auflösung gewählt wird. Dank der numerischen Entwicklungen halten jedoch auch dreidimensionale Codes zunehmend Einzug in die Forschung und in die Ingenieurpraxis, sowohl für ein- als auch für mehrphasige Ansätze. Im Folgenden werden einige Beispiele für die Anwendung zweidimensionaler numerischer Modellierung anhand von konkreten Fällen vorgestellt.

2.1 Beispiel Val d’Orbel

Im Juni 2019 verursachte ein Murgang mit ca. 20 000 m³ Material aus dem Val d’Orbel in Soazza (Kanton Graubünden, GR) einen grossen Rückstau in der Moesa. Dieser Rückstau bewirkte eine Umleitung der Moesa auf das rechte Ufer, wo der Abfluss die Böschung der Nationalstrasse erreichte und Erosion auf benachbarten landwirtschaftlichen Flächen verursachte (Abb. 1, beffa tognacca sagl 2019).

Das Ereignis von 2019 zeigte die problematische Wechselwirkung zwischen den Murgangablagerungen und den Ausuferungen der Moesa, die bis dahin nicht erkannt worden war.

Eine nachfolgende Analyse (beffa tognacca sagl 2022) ermöglichte eine statistische Einordnung des Ereignisses von 2019. Dem Ereignis wurde eine Wiederkehrperiode von 30 bis 100 Jahren zugeordnet.

Dank der Rekonstruktion des Ereignisses von 2019 mittels zweidimensionaler Modellierung des Murgangs

und des Abflusses der Moesa konnte das numerische Modell kalibriert und validiert werden. Basierend auf den neu definierten Szenarien und dem kalibrierten Modell wurden Simulationen für Murgänge mit einem Volumen von bis zu 40 000 m³ für 300-jährliche Ereignisse und bis zu 50 000 m³ für 1000-jährliche Ereignisse durch-



Abb. 1. Ablagerungen (ca. 20 000 m³) am Fuss des Val d’Orbel-Kegels bei Soazza (GR) und Umleitung der Moesa nach dem Ereignis im Juni 2019. Fliessrichtung der Moesa von rechts nach links.

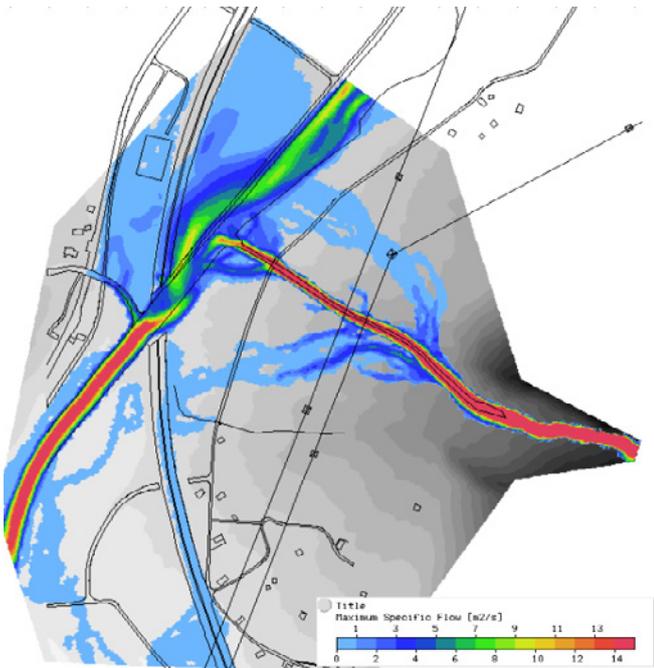


Abb. 2. Karte der max. spezifischen Abflüsse für einen Murgang mit 50 000 m³ und ein 30-jährliches Hochwasser der Moesa. Simulation mit Grenzschubspannung $t = 3500 \text{ N/m}^2$, Stricklerbeiwert $k_{St} = 10 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und Reibungsgefälle $f = 3 \%$.

geführt, jeweils unter Berücksichtigung verschiedener Abflüsse der Moesa.

Abbildung 2 zeigt die modellierte Situation für einen extremen Murgang von 50 000 m³ in Kombination mit einem 30-jährlichen Hochwasser der Moesa (319 m³/s). Die Murgänge im Val d’Orbel sind granular und wurden mit einer «Turbulent & Yield»-Rheologie (siehe Naef *et al.* 2006) mit einem Einphasenansatz modelliert.

Die Kombination eines Murgangs aus dem Wildbach und eines Hochwassers der Moesa trat im Juni dieses Jahres erneut auf. Das Murgangereignis hatte ein Volumen von etwa 45 000 m³ (siehe Abb. 3), während



Abb. 3. Ablagerungen (ca. 45 000 m³) am Fuss des Val d’Orbel-Kegels bei Soazza (GR) und Umleitung der Moesa nach dem Ereignis im Juni 2024. Fliessrichtung der Moesa von rechts nach links.

der Abfluss der Moesa auf etwa 250–300 m³/s geschätzt wurde. Das Ereignis von Juni 2024 entspricht also einem der Szenarien, welches im Rahmen der Untersuchungen zum Ereignis 2019 definiert, simuliert und durch das Ereignis 2019 validiert wurde.

Der Vergleich der vor Ort beobachteten Abflusspuren und Ablagerungen (Abb. 3) mit den modellierten Daten (Abb. 2) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Modell und Realität. Dies lässt den Schluss zu, dass die numerischen Ergebnisse zuverlässig sind und eine präzise Vorhersage möglich ist, sofern die Szenarien richtig definiert wurden und das Modell anhand früherer Ereignisse validiert werden konnte.

Eine detaillierte Analyse des Ereignisses von 2024 und der auslösenden Bedingungen wird es ermöglichen, die Jährlichkeit des Ereignisses abzuschätzen und zu überprüfen, ob eine Neubewertung der Szenarien erforderlich ist.

2.2 Beispiel Riale Scodato

Im Rahmen der Risikobewertung von Murgängen wurde die Gefahrenkarte für den Riale Scodato in Prato Sornico (Kanton Tessin, TI) 2013 auf der Grundlage von numerischen Simulationen erarbeitet (siehe beffa tognacca sagl 2013).

Auch hier handelt es sich um granulare Murgänge, die mit einem einphasigen Modell unter Verwendung einer «Turbulent & Yield»-Rheologie (siehe Naef *et al.* 2006) modelliert wurden. Die Präsenz grosser Blöcke auf dem Schwemmkegel und im oberen Teil des Einzugsgebiets veranlasste uns, die Auswirkungen der Interaktion zwischen diesen Blöcken und der Dynamik der Murgänge zu untersuchen. Daher wurden Szenarien definiert, bei denen mehrere (mindestens zwei) Murschübe aufeinander folgen und sich nach dem ersten Murschub mehrere Blöcke mit einer Grösse von bis zu 40 m³ im Flussbett ablagern (ähnlich der in der Natur beobachteten Blöcke).

Alle Szenarien wurden in einem Ereignisbaum dokumentiert, auf dessen Grundlage dann die Gefahrenkarte erstellt wurde.

Die Abbildungen 4 und 5 zeigen die Gefahrenkarten für die beiden untersuchten Situationen. Die erste stellt die Situation ohne den Einfluss der Blöcke entlang der Kegelstrecke dar, während die zweite Karte die Gefährdungslage unter Berücksichtigung der Blöcke zeigt. Diese sind in der Lage, die Kapazität des Gerinnes zu behindern und können daher zu Übermurungen entlang der gesamten Strecke führen.

Die Gefahrenkarte, die das Phänomen der Blockablagerungen berücksichtigt, wurde als am realistischsten angesehen und diente daher als Grundlage für die Erstellung des offiziellen Gefahrenzonenplans.

Das Niederschlagsereignis Ende Juni 2024 im Valle Maggia betraf auch das Einzugsgebiet des Riale Scodato und löste einen grossen Murgang aus. Das Ereignis zeigte, dass der Murgang nicht zu einer Blockablagerung auf dem Kegel führte, wie es in der Gefahrenkarte angenommen wurde (siehe Abb. 6). Die vor Ort beobachteten Ablagerungen zeigen keine grösseren Verkläuerungen, so dass sich der Murgang gemäss den verstopfungsfreien Szenarien verhielt (siehe Abb. 4). Der Murgang erfasste lediglich das Gerinne, die Kantonsstrasse und die unmittelbar angrenzenden Gebiete.

Im Falle des Ereignisses im Scodato erwiesen sich daher die Szenarien, die den Einfluss grosser Felsblöcke berücksichtigen, als zu pessimistisch. Andererseits wurden in anderen Bächen des Maggiatals während desselben Niederschlagsereignisses zyklische Blöcke zu Tale getragen, die die Strömungsdynamik beeinflussten (siehe Abb. 9 und Kap. 2.4).

Das Beispiel Scodato zeigt, dass sekundäre Prozesse wie die Ablagerung grosser Blöcke einen wichtigen Einfluss auf die Risikobeurteilung haben können, jedoch de-

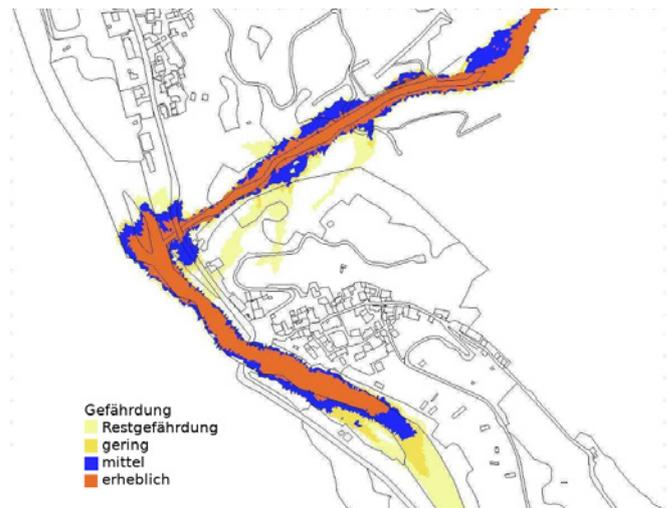


Abb. 4. Gefahrenkarte betreffend Murgänge am Riale Scodato (TI) für Szenarien ohne Blockablagerungen am Kegel.

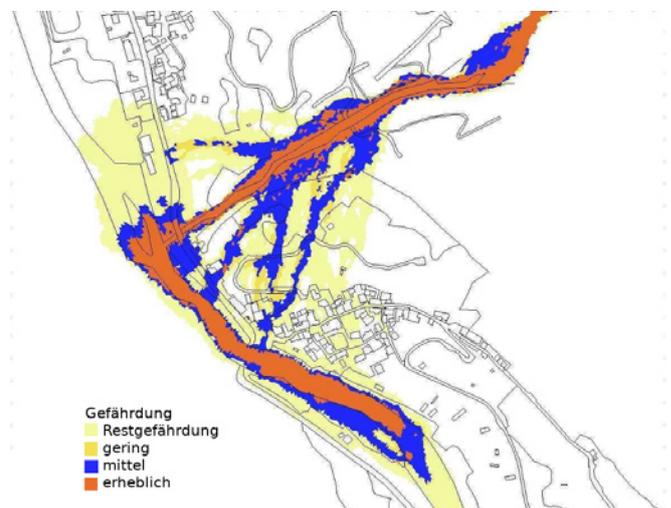


Abb. 5. Gefahrenkarte betreffend Murgänge am Riale Scodato (TI) für Szenarien, die das Vorhandensein von Blöcken von bis zu 40 m³ auf dem Schwemmkegel berücksichtigen.



Abb. 6. Ablagerungen im Riale Scodato (TI) und in der Maggia nach den Ereignissen vom Juni 2024. Fliessrichtung der Maggia von oben nach unten.

ren genaue Definition im Einzelfall schwierig ist. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass die Zufallskomponente von Naturphänomenen eine wesentliche Rolle spielt und ein einzelnes Ereignis nicht unbedingt repräsentativ ist.

2.3 Beispiel Bondasca

Die Bondasca-Ereignisse nach dem Bergsturz am Piz Cengalo (GR) im August 2017 wurden detailliert dokumentiert (Gabbi *et al.* 2019) und ermöglichten eine präzise Rekonstruktion der Murgänge und eine weitere Validierung der zweidimensionalen numerischen Modelle (Tognacca *et al.* 2019). Diese Modelle waren zuvor zur Definition von Gefahrenzonen und zur Dimensionierung von Schutzmassnahmen nach dem ersten Bergsturz im Jahr 2011 verwendet worden (siehe beffa tognacca sagl 2014).

Die Abbildungen 7 und 8 zeigen die beobachteten und mit einem zweidimensionalen Code numerisch re-

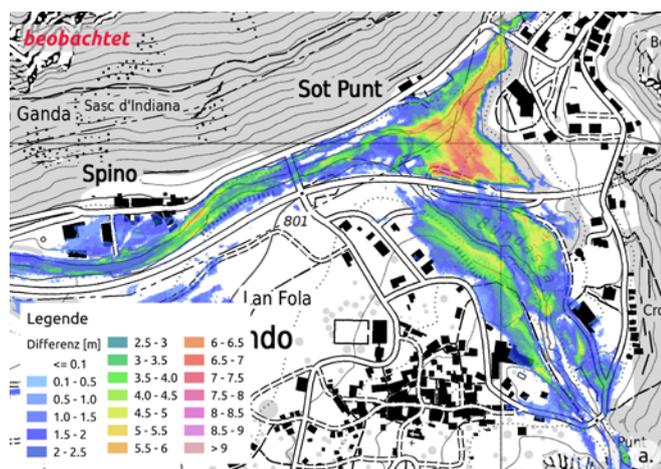


Abb. 7. In Bondo (GR) beobachtete Ablagerungen nach den Ereignissen in der Bondasca im Jahr 2017 (Tognacca *et al.* 2019).

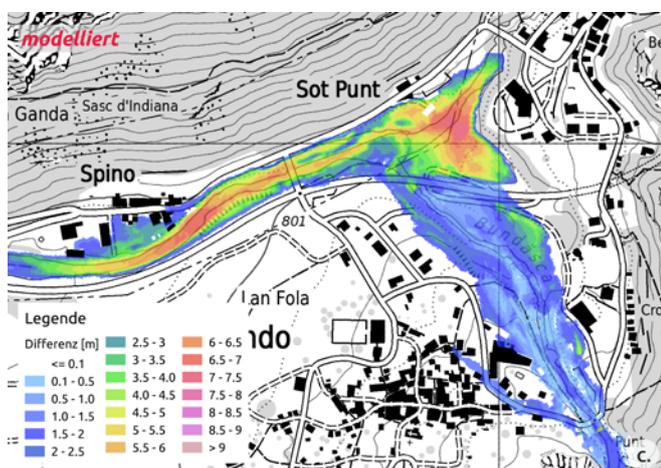


Abb. 8. Numerische Rekonstruktion der in Bondo (GR) beobachteten Ablagerungen nach den Ereignissen in der Bondasca im Jahr 2017 (Tognacca *et al.* 2019).

konstruierten Ablagerungen. Mit demselben Code konnten sowohl der Bergsturz vom Cengalo als auch der grosse Schuttstrom, der sich durch Remobilisierung der bereits vorhandenen Ablagerungen unmittelbar nach dem Bergsturz entwickelte, sehr gut rekonstruiert werden (siehe Tognacca *et al.* 2019).

Der Fall Bondasca ist ein Beispiel dafür, dass die Murganggefährdung auf dem Schwemmkegel richtig prognostiziert werden kann. Die numerischen Modelle haben sich als gültig und zuverlässig erwiesen, was die Realisierung wirksamer Schutzmassnahmen ermöglicht hat. Das Ereignis von 2017 stellte jedoch eine unerwartete Überlastsituation dar und brachte etwa 50 % mehr Volumen als in den zuvor angenommenen Worst-Case-Szenarien (siehe beffa tognacca sagl 2013).

2.4 Grenzen der numerischen Modellierung

Die Natur ist nach wie vor komplexer, als es die Wissenschaft und die Ingenieurpraxis mit numerischen Modellen abbilden und beschreiben können, selbst unter Berücksichtigung aller bisherigen Erfahrungen. Diese Erkenntnis hat sich auch nach den Ereignissen des Sommers 2024 in verschiedenen Schweizer Kantonen bestätigt.

Zusätzlich zu dem, was in den vorhergehenden Kapiteln beschrieben wurde, möchten wir zwei exemplarische Ereignisse hervorheben, die uns in ihrer Intensität und Komplexität erstaunt haben und zeigen, welche Schwierigkeiten bei der numerischen Modellierung noch zu überwinden sind.

Das erste Beispiel ist der gewaltige Murgang von Fontana im Val Bavona (TI). Dieser Murgang, der sich im Larèchia-Tal (ca. 4,5 km²) entwickelte, erreichte enorme Abflussspitzen (geschätzter Abflussquerschnitt von mehr als 1000 m²) und transportierte Blöcke von extremem Ausmass ins Tal. Der grösste (siehe Abb. 9) hatte ein Volumen von etwa 8000 m³ und nahm eine Fläche von etwa 680 m² ein. Zudem wurden zahlreiche weitere Blöcke, die etwa die Grösse eines Einfamilienhauses hatten, bis zum Schwemmkegel verfrachtet.

Das zweite Beispiel ist der Murgang, der sich am 21. Juni 2024 in der Valascia in Mesocco (GR) ereignet hatte. Das Unwetter löste in den Bächen des gesamten Tals zahlreiche massive Murgänge aus.

Der Murgang im kleinen Einzugsgebiet der Valascia (0,4 km²) erreichte Abflussspitzen von schätzungsweise 400 bis 600 m³/s, die grosse Schäden an der Kantonsstrasse verursachten und auch die Nationalstrasse vorübergehend blockierten (siehe Abb. 10). Der Abfluss zeichnete sich durch eine grosse Menge an Holz (ca. 700 m³) im Verhältnis zum Gesamtvolumen des Abflusses aus.

Das Holzvolumen spielte eine entscheidende Rolle für die Strömungsdynamik entlang der gesamten Fliess-



Abb. 9. Ein zyklischer Block mit einer Höhe von etwa 12 m, der während des Ereignisses am 29./30. Juni 2024 in Fontana (TI) herunterstürzte (Foto: Corriere del Ticino). Eine Person (in rot eingekreist) am Fusse des Blocks veranschaulicht die beeindruckende Grösse des Blocks.

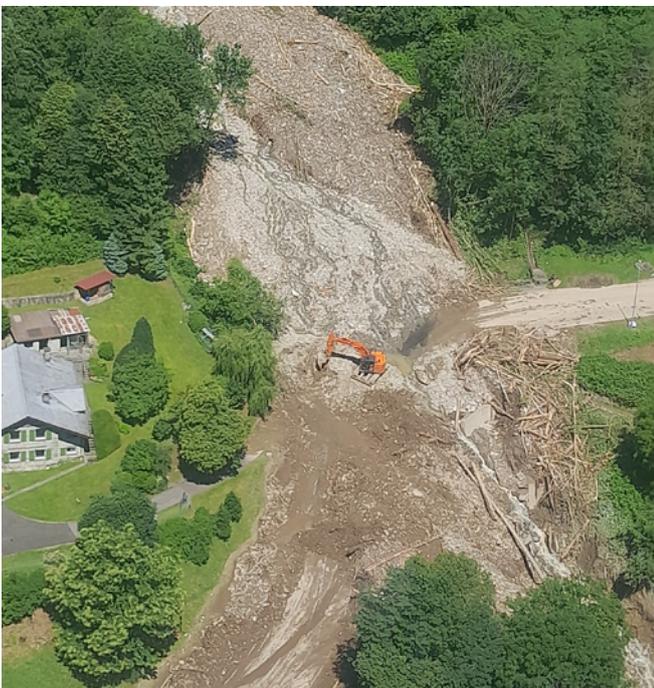


Abb. 10. Ablagerungen des Valascia-Murgangs auf der Kantonsstrasse in Mesocco (GR) während des Ereignisses vom 21. Juni 2024.

strecke. Die Analyse der Holzablagerungen entlang des Wildbachs deutet darauf hin, dass sich das Holz frühzeitig an der Front der Strömung ansammelte, die sich im obersten Teil des Einzugsgebiets bildete. Es ist daher anzunehmen, dass das Holz die rheologischen Eigenschaften der Strömung und damit auch die maximale Fließgeschwindigkeit mitbestimmt hat. Das Holz wurde auch im unteren Teil des Baches an den Ufern abgelagert, wo es zur Bildung von Levées beigetragen und die Abflusssektion vergrößert hat.

Sowohl die Präsenz von zyklischen Blöcken als auch das Vorhandensein von Holz haben einen wichtigen Einfluss auf die Dynamik von Murgängen und bestimm-

men deren Abfluss- und Ablagerungseigenschaften. Dies muss bei der Risikobewertung und bei der Definition und Dimensionierung von Schutzbauten berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung dieser Elemente erfolgt derzeit jedoch hauptsächlich in der Forschung und hat bislang noch keine breite Anwendung in der Ingenieurpraxis gefunden.

3 Physikalische Modellierung

Die physikalische Modellierung ist eine Methode, die seit mehr als einem Jahrhundert im Flussbau erfolgreich eingesetzt wird. Seit den 1990er Jahren, nach den katastrophalen Ereignissen von 1987 in den Zentral- und Ostalpen (BAW/LHG 1991), wird dieses Instrument auch an Schweizer Hochschulen für die Untersuchung von Murgängen entwickelt und eingesetzt.

Physikalische Modelle erlauben, mit einem gewissen Grad an Idealisierung, die massstabsgetreue Nachbildung natürlicher Prozesse. Sie ermöglichen es daher, Phänomene zu visualisieren, zu beobachten und zu quantifizieren. Dies fördert ein tieferes Verständnis der physikalischen Prozesse und der komplexen Wechselwirkungen zwischen ihnen und der Infrastruktur. Daher ist die physikalische Modellierung auch ein ideales Kommunikations- und Partizipationsmittel für alle Projektbeteiligten, einschliesslich Bauherren, Grundeigentümern, Gemeinden, kantonalen und eidgenössischen Verwaltungen sowie Umweltverbänden.

In den nächsten beiden Abschnitten werden zwei Beispiele für die physikalische Modellierung mit unterschiedlichem Idealisierungsgrad vorgestellt.

3.1 Maschänserrüfe

Ein typisches Prototyp-Modell wurde an der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) der ETH Zürich zur Untersuchung der Fließ- und Ablagerungsprozesse viskoser Murgänge im Rückhalteraum der Maschänserrüfe (Trimmis, GR) realisiert (Schatzmann *et al.* 2007, Abb. 11).

Die Versuche wurden mit einer Mischung aus Sand und Ton mit Wasser durchgeführt und die Abflüsse ins Modell wurden mit einer speziellen Pumpe erzeugt.

Die durchgeführten Versuche erlaubten ein vertieftes Prozessverständnis und die Optimierung der Form und Abmessungen des offenen Rückhaltesystems. Die Versuche haben allerdings auch die Grenzen der physikalischen Modellierung hinsichtlich der Skalierbarkeit der Resultate gezeigt. Besonders auffallend war der Einfluss der Sohlenrauheit in den Entlastungskanälen auf den Durchfluss durch den Sammler bzw. auf die Entlastungscharakteristik der Kanäle und auf das Rückhaltevermö-



Abb. 11. Rückhaltebecken der Maschänserrüfe (GR) im Modell 1:60 an der VAW (siehe Schatzmann *et al.* 2007).

gen des Bauwerks. Aus diesem Grund wurde die Rauheit der Kanäle stark variiert, indem zur Untersuchung der Sensitivität der Resultate sogar eine Plastikfolie in die Kanäle verlegt wurde (siehe rechtes Gerinne in Abb. 11). Seit der Realisierung der Bauwerke 2004 haben verschiedene Ereignisse gezeigt, dass die im Modell beobachteten Prozesse die Realität tatsächlich gut abgebildet haben.

3.2 Beispiel Modellfamilie

Die Untersuchung der Fliess- und Ablagerungsprozesse von Murgängen wurde in einem idealisierten physikalischen Modell in drei verschiedenen Modellmassstäben (1:25 siehe Abb. 12, 1:50 und 1:100) durchgeführt. Mit dieser Modellfamilie konnte nachgewiesen werden, dass



Abb. 12. Ablagerungen eines 20000 m³-Murgangs im Modell im Massstab 1:25 im Laboratorium3D.

die Fliess- und Ablagerungsprozesse in einem trapezförmigen Gerinne und auf einer flachen Ebene in den drei untersuchten Massstäben in der Natur gleich skaliert werden können (Tognacca *et al.* 2024). Die Frage der Skalierbarkeit der komplexen Wechselwirkungen zwischen Strömung und einer Sperre mit vertikalen Balken wird zurzeit detailliert untersucht. Erste Analysen zeigen hingegen, dass die Resultate in den drei Modellmassstäben nicht gleich skaliert werden können.

3.3 Grenzen der physikalischen Modellierung

Neben der Begrenzung der Grösse des Modells, das in einem Labor Platz finden muss, und dem erheblichen Arbeitsaufwand für die Durchführung der Experimente, bringt das Experimentieren mit physikalischen Modellen auch Einschränkungen hinsichtlich der Skalierbarkeit der physikalischen Prozesse vom Modellmassstab auf den Prototyp mit sich (siehe z. B. Choi *et al.* 2024).

4 Hybride Modellierung

Die Grenzen der physikalischen und numerischen Modellierung können zumindest teilweise überwunden werden, indem sie im Rahmen des hybriden Modellierungsansatzes parallel angewendet werden. Die grundlegenden Vorteile des hybriden Ansatzes sind:

- Die komplexe Physik der Phänomene wird im physikalischen Modell nachgebildet, trotz der Schwierigkeiten der Skalierbarkeit der Ergebnisse. Das (zumindest qualitative) Verständnis der Prozesse kann dadurch rasch vertieft werden und es wird klar, welche Phänomene im numerischen Modell berücksichtigt werden sollen.
- Die Daten des physikalischen Modells können zur Validierung der Numerik verwendet werden. Je mehr Messungen am physikalischen Modell durchgeführt werden, desto besser kann die Repräsentativität des numerischen Modells überprüft werden.
- Aufgrund ihrer Vielseitigkeit erlaubt die numerische Modellierung nach erfolgreicher Validierung eine effiziente und zügige Untersuchung verschiedener Parameter und die Analyse zahlreicher Szenarien, selbst bei räumlich und zeitlich sehr umfangreichen Modellen.

Im folgenden Beispiel stellen wir einen typischen Fall vor, in dem die Hybridisierung eines physikalischen und eines numerischen Modells robuste Antworten für ein konkretes Projekt lieferte.

4.1 Beispiel Steinlaur

Im Rahmen der Realisierung der neuen Autobahn entlang des Lungernsees (Kanton Obwalden, OW) wurde der Bau eines Rückhalteraums im See vorgeschlagen. Eine kurze Literaturrecherche ergab, dass bisher keine spezifischen physikalischen Modellexperimente zur Abflussdynamik mit einem Übergang zwischen Luft- und Unterwasserphase durchgeführt worden sind. Selbst die üblicherweise für Murgänge verwendeten zweidimensionalen numerischen Codes können diese Phänomene nicht abbilden. Dreidimensionale mehrphasige Codes befinden sich noch in der experimentellen Phase und bieten ohne ausreichende Validierung nicht die erforderliche Zuverlässigkeit.

Die Durchführung von Experimenten an einem physikalischen Modell wurde daher als sinnvoll erachtet. Aufgrund des begrenzten Budgets wurde jedoch ein relativ kleiner Modellmassstab (1:100) gewählt. Ziel der Experimente war es, die Phänomene, die beim Übergang eines Murgangs von der Luft- in die Unterwasserphase auftreten, qualitativ zu untersuchen (siehe Laboratorium3D 2022 und Abb. 13). Aufgrund möglicher Skaleneffekte wurde frühzeitig beschlossen, die physikalische Modellierung durch eine numerische Modellierung unter

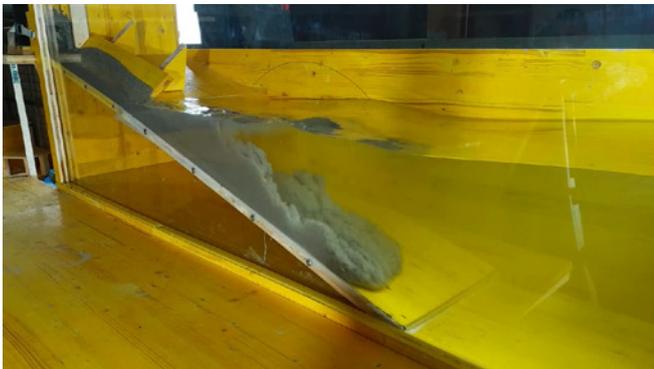


Abb. 13. Murgang beim Übergang zwischen Luft- und Unterwasserphase, physikalisches Modell im Massstab 1:100 im Laboratorium3D.

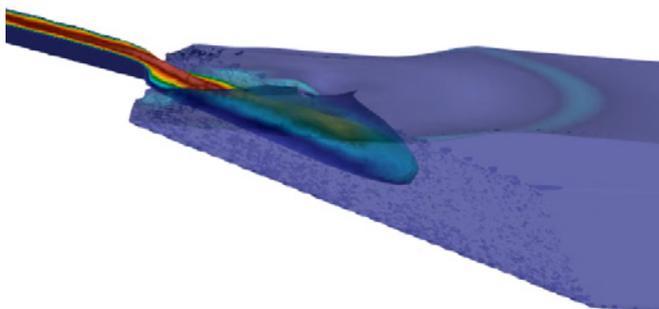


Abb. 14. Murgang beim Übergang zwischen Luft- und Unterwasserphase, 3D-numerische Modellierung mit OpenFOAM.

Verwendung eines dreidimensionalen Mehrphasencodes mit der Software OpenFOAM zu ergänzen (Abb. 14). Dies ermöglicht die gleichzeitige Modellierung mehrerer Flüssigkeiten mit verschiedenen Rheologien, newtonschen und nicht-newtonschen, innerhalb desselben Modells.

Die Experimente an einem physikalischen Modell im Massstab 1:100, das aus einem 50 cm langem Gerinne und anschliessend einer 100 cm langen Unterwasserebene besteht, haben gezeigt, dass die Murgänge, die aus einem Gerinne in einen See eindringen, auch unter Wasser weiterfliessen. Trotz einer gewissen Verlangsamung der Front kurz nach dem Auftreffen auf die ruhende Wassersäule bewegen sie sich weiter in Richtung Seegrund. Dies steht im Gegensatz zum gewöhnlichen Geschiebetransport, bei dem das Material bei Erreichen des Gewässers durch das plötzliche Nachlassen der Sohlenschubspannungen sofort abgelagert wird.

Die qualitativen Erkenntnisse aus den physikalischen Versuchen wurden genutzt, um die Plausibilität der Resultate der komplexen numerischen Modelle zu prüfen. Nach Überprüfung der Plausibilität wurde eine numerische Parameterstudie durchgeführt und die Geometrie des Rückhalteraums optimiert.

5 Folgerungen und Ausblick

Numerische Modellierungen und physikalische Modellversuche stellen ein vereinfachtes Abbild der Realität dar, weshalb ihre Ergebnisse stets kritisch hinterfragt werden müssen. Dies ist einerseits auf die impliziten Grenzen der Methoden zurückzuführen. Andererseits spielt auch die Definition der Randbedingungen für die Modellierungen eine entscheidende Rolle. Die hybride Modellierung kombiniert physikalische und numerische Ansätze und bietet so ein umfassendes Abbild der Realität, womit die Grenzen beider Methoden erweitert, jedoch nicht vollständig eliminiert werden können.

Ein Vergleich mit Beobachtungen und Messungen in der Natur bleibt allerdings für alle Methoden unabdingbar. Durch eine umfassende, detaillierte und multidisziplinäre Analyse der jüngsten Ereignisse in der Schweiz sollen fundierte Daten gewonnen werden, die ein vertieftes Verständnis der Prozesse ermöglichen.

Die erworbenen Kenntnisse werden eine wichtige Grundlage für eine weitere Validierung von physikalischen und numerischen Modellen bilden und somit einen wichtigen Beitrag für die künftige Beurteilung von Naturgefahrenrisiken und für die Entwicklung von Schutzkonzepten und -massnahmen liefern.

6 Literatur

- Choi C.E., Ng C.W.W., Liu H. (2024) Flume Modeling of Debris Flow. In: Jakob M., McDougall S., Santi P. (Eds) *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Springer. doi.org/10.1007/978-3-031-48691-3_4.
- beffa tognacca sagl (2019) Val d'Orbel e Moesa a Soazza – Misure urgenti a protezione della N13. Rapporto all'attenzione dell'Ufficio tecnico dei Grigioni, Manutenzione delle strade, Circondario 2, Mesocco.
- beffa tognacca sagl (2014) Riale Bondasca – Bondo. Valutazione dei pericoli a seguito di eventi alluvionali e di colate detritiche – Rapporto all'attenzione dell'Ufficio forestale e dei pericoli naturali dei Grigioni.
- beffa tognacca sagl (2013) Riale Scudau – Lavizzara, Prato Sornico, Carta dei pericoli a seguito di colate detritiche. Rapporto all'attenzione dell'Ufficio dei corsi d'acqua, Bellinzona.
- beffa tognacca sagl (2022) Val d'Orbel – Soazza, Valutazione pericolo ed esposizione dell'autostrada N13 in caso di colate, Rapporto all'attenzione dell'Ufficio federale delle strade USTRA, Bellinzona.
- Bundesamt für Wasserwirtschaft / Landeshydrologie und -geologie (1991) Ursachenanalyse der Hochwasser 1987, Ergebnisse der Untersuchungen und Schlussbericht.
- Gabbi J., Tognacca C., Keiser M. (2019) Gravitative Prozesse in der Bondasca – Von der Gefahrenbeurteilung zur Umsetzung der Schutzmassnahmen. *Wasser Energ. Luft* 111, 2: 77–84.
- Iverson R.M., George D.L. (2024) Numerical Modeling of Debris Flow: A Conceptual Assessment. Jakob M., McDougall S., Santi P. (Eds) In: *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Springer. doi.org/10.1007/978-3-031-48691-3_5.
- Laboratorium3D sagl (2022) Neue Autobahnbrücke Steinlaur – Physikalische und numerische Modellierung. Interner Bericht zuhanden Bau- und Raumentwicklungsdepartement Obwalden.
- Naef D., Rickenmann D., Rutschmann P., McArde B. (2006) Comparison of flow resistance relations for debris flows using a one-dimensional finite element simulation model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 6: 155–165.
- Schatzmann M., Tognacca C., Bezzola G.R., Bischoff A. (2007) The Maschänserrüfe project – a robust concept of debris flow discharge and volume control. *Proc. 4th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation “Mechanics, Prediction and Assessment”*. Chengdu, China, Chen&Mayor (eds). 669–679.
- Tognacca C., Gabbi J., Cattaneo G., Beffa, C. (2019) Gravitative Prozesse in der Bondasca: Nachrechnung der beobachteten Phänomene anhand von numerischen Simulationen mit FLUMEN. *Wasser Energ. Luft* 111, 4: 235–242.
- Tognacca C., Edmaier K., Toschini E., Benagli M., Maddalena G., Bachmann A., Busslinger M., Speerli J. (2024) Scalability Investigation of Physical Debris Flow Experiments using a Model Series. *Interpraevent 2024 – Vienna*.

Abstract

Hybrid debris-flow modelling in engineering practice and applied research

The events of summer 2024 in different Alpine cantons provide an opportunity to reflect on the methods of risk prediction and assessment for debris flows used in engineering practice and applied research. In particular, we present various examples of the application of physical model experiments, numerical modelling and the combination of the two approaches in hybrid modelling. The strengths and limitations of the different methods are also presented in the light of recent events.

Keywords: Debris flow, numerical models, physical models, natural hazard assessment



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Numerical modelling of wood transport processes in mountain rivers and torrents: a review

Virginia Ruiz-Villanueva

University of Bern, Institute of Geography, Berne, Switzerland

Models have been developed for decades to simulate debris flows and water floods in mountain rivers and torrents. Yet, these models typically consider only water and inorganic sediment. However, rivers and torrents in forested mountains can naturally carry large quantities of uprooted trees and trunks (i.e., large wood). But, unlike modelling debris flows and floods, modelling wood transport has only recently been attempted. The development of such models has significantly accelerated in recent years, but until now, no review has summarised their state of the art. This paper aims to introduce the different types of flows including wood in mountain rivers, explains how wood moves, describes existing models and their main characteristics, and expands on one of them, called Iber-Wood.

1 Sediment-wood-water flows in mountain rivers and torrents

Mountain rivers and torrents are prone to intense and short precipitation events, leading to rapid hydrological responses and the coupling between hillslope and channel processes triggering flows (e.g., Comiti and Mao 2012). Several classifications exist to characterize flows in mountain rivers based on solid concentration, sediment grain size distribution, speed, and shear strengths. Brenna *et al.* (2021) distinguished between debris flows, hyperconcentrated flows, debris floods, and water flows.

These classifications consider inorganic sediment as the only component of the solid fraction, neglecting the role of organic material like large wood. In forested mountain rivers, floods and flows can naturally carry uprooted trees and trunks (e.g., Comiti *et al.* 2016), which are often observed in debris-flow deposits (Fig. 1). The wood material is supplied by mass movement processes on slopes, and erosion and widening of channel banks.

A similar approach to classifying flows in mountain catchments according to the sediment concentration and behaviour can be used to classify flows with wood, as they may be transported differently. Pioneering flume experiments defined three wood transport regimes (Braudrick *et al.* 1997): uncongested, semi-congested, and congested. In an uncongested wood transport regime, individual pieces of wood move in a flow without interacting with each other. In contrast, semi-congested and congested wood transport refer to wood being transported in cohorts or a single carpet-like mass, respectively, partially or entirely occupying the cross-sectional area of the channel (Braudrick *et al.* 1997). These transport mechanisms were defined initially for floating wood; however, wood may also be transported by sliding or dragging, submerged or not on the channel bed (Haga *et al.* 2002). Moreover, flows in which wood is the main solid fraction and in which wood is not only floating but dragging have also been described recently in mountain streams worldwide (Ruiz-Villanueva *et al.* 2019). These hypercongested wood-laden flows are two- or three-phase flows (de-



Fig. 1. Debris-flow deposit with a significant amount of large wood in (a) the Sädelgrabe (Emmental, Switzerland) in 2014 and in (b) a small stream in the Rocky Mountains (Colorado, USA) in 2022 (Photos: Virginia Ruiz-Villanueva).

pending on the sediment concentration), in which the wood phase moves in a mass of several layers occupying the entire wetted cross-section, spanning the whole channel width. Wood pieces interact and are frequently oriented perpendicular and oblique to the flow direction, moving, rolling, or sliding on the riverbed, like a slurry flow (Ruiz-Villanueva *et al.* 2019; Fig. 2).

The observations and quantifications of wood-laden flows are scarce, but they may occur more frequently than previously thought, as stressed by the recent review by Koyanagi *et al.* (2023), which provides an overview of the research on wood-laden debris flows in Japan since the 1980s. Therefore, it is essential to distinguish between different flows and consider the proportion of wood, which relates to the flow-specific dynamics and, therefore, hazard characteristics. Classifications, like the ternary diagram shown in Figure 2, could help to do that and thus could be used to define better management strategies.

2 Large wood transport

Wood and inorganic sediment share similarities in initial motion or entrainment, but the physics of wood transport may differ due to differences in wood piece shape, density, and size (Braudrick *et al.* 1997). Wood can move in various ways, such as floating, sliding, rolling, and pivoting. The primary driving forces in wood transport are usually drag and gravitational forces (Braudrick and Grant 2000; Haga *et al.* 2002). Rafferty (2017) proposed a more detailed analysis, including buoyancy, lifting, and anchoring forces in addition to the drag and friction forces, to define a safety factor and assess the stability of wood structures. Generally, wood entrainment is a function of four wood piece characteristics: length, diameter, density (or specific weight), and orientation; and three hydraulic characteristics: slope, flow velocity, and water depth (Fig. 3).

The presence of roots may increase the resisting forces (Gippel 1995), and rooted wood pieces with attached wads often remain partially submerged due to their two contact points with the bed (Fig. 3a). They are more likely to tilt and rotate, with roots pointing upstream. Once entrained, wood pieces move downstream, turning and changing their orientation. Wood-wood interactions are crucial in semi-congested or congested wood transport, and wood-channel banks or beds. Wood pieces can get trapped, form jams (Fig. 3b), or push and entrain deposited wood. The interaction between wood pieces and the channel bed and banks is particularly relevant in mountain streams, where wood pieces are larger than the channel width, and the channel bed is rough due to macro-roughness elements like boulders and coarse sediment (Fig. 4).

3 Numerical models of flows and large wood

Fluid flow and sediment transport models have been widely used for decades (e.g., Hardy 2013), conceptualizing processes like debris flows and water floods using mathematical expressions and physical laws. The complexity of these models has increased due to our understanding of these phenomena and advancements in technology and computation capabilities (Trujillo-Vela *et al.* 2022). The importance of advances in modelling is undeniable, as models are nowadays essential tools for effective risk management and land-use planning.

However, unlike debris flows, floods, and sediment transport, modelling wood transport has only recently been attempted. The first attempts did not include wood as an explicit element in numerical models but instead simulated its effects or used hydraulic models' outputs to compute wood entrainment and motion (e.g., Merten *et al.* 2010). Table 1 summarizes the existing models and their main characteristics.

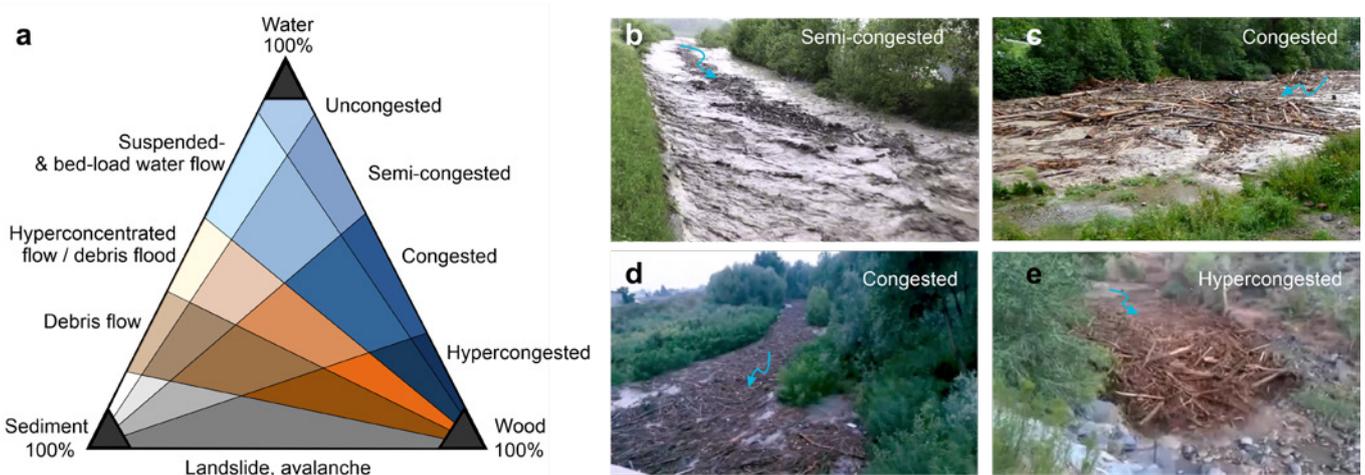


Fig. 2. (a) Ternary diagram of sediment-water-wood flow types as defined by Ruiz-Villanueva *et al.* (2019); (b) semi-congested wood transport during a flood in the Laui River in 2017 (Switzerland); congested transport during a flood in (c) the Zulg River in 2012 (Switzerland) and in (d) the Triesting River in 2014 (Austria); and (e) hypercongested wood transport in the North Creek in 2012 (USA).

Different approaches have been developed to simulate wood transport, mostly by water flows. Only a few attempts, such as the model presented by Lancaster *et al.* (2003), proposed an approach to account for the effect of wood on debris-flow propagation. These authors proposed a simplified model of debris-flow runout within a landscape evolution model to simulate different wood-debris flow interactions and explore the effects of wood entrainment and deposition on the debris-flow runout lengths. The model simulated rainfall, triggering landslide and debris-flow propagation, fluvial transport, and tree fall. Similar approaches were later proposed by Shrestha *et al.* (2009 and 2012); however, these authors did include the motion of the wood in their model, not just its effect on the flow, and the model was validated with flume experiments.

Stockstill *et al.* (2009) attempted to simulate wood transport by water in rivers by combining a 2D hydrodynamic model with a 3D discrete element model using dilated spheres. The floating objects were transported according to flow forces, rotating, colliding, and interacting with structures and the channel. The hydrodynamic and the discrete element models were separate computer codes (i.e., they were not coupled), they were validated using flume experiments, but have not been applied to an actual river.

Similarly, other researchers combined the outputs from hydraulic models with a discrete element model without coupling them. Mazzorana *et al.* (2011) used a raster-based approach in a GIS environment, while Zischg *et al.* (2018) used an unstructured mesh. One im-

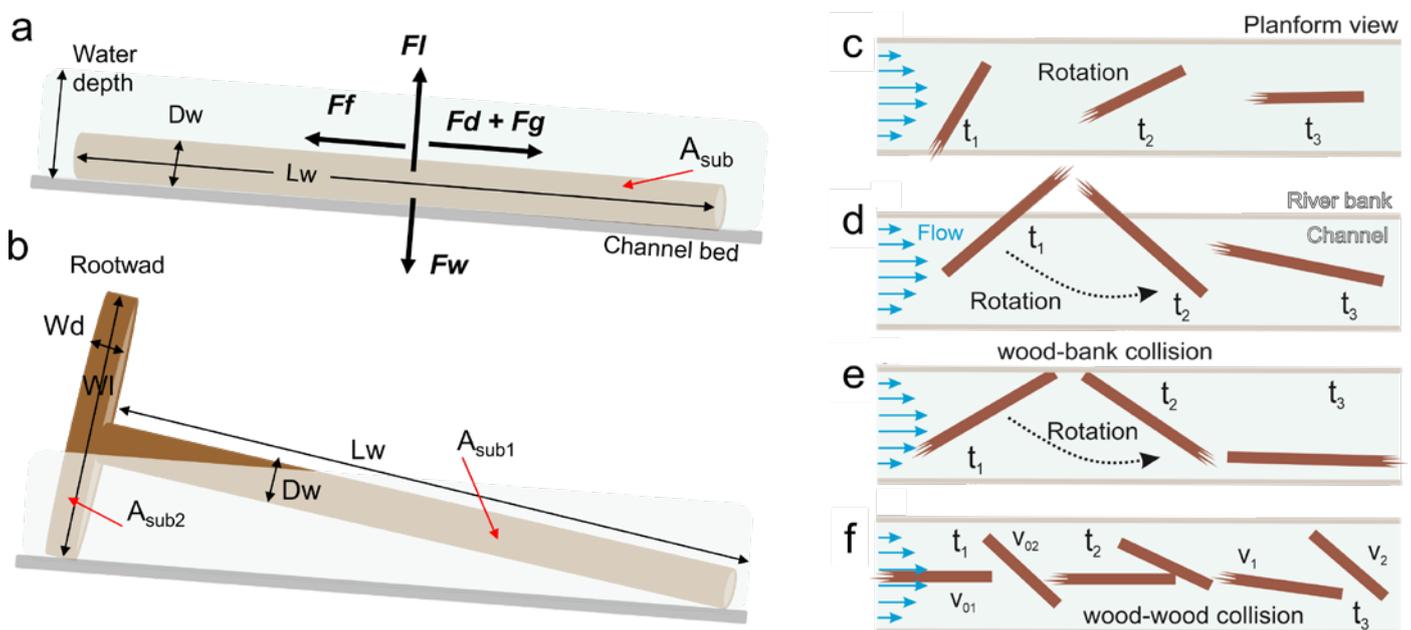


Fig. 3. Forces acting on a submerged wood piece assuming it as (a) a cylinder and (b) with a root wad as an additional cylinder. Lw and Dw are the piece length and diameter, respectively, and A_{sub} is the submerged area of the log perpendicular to the piece length. Wd and Wl are the length and diameter of the root wad, with two submerged areas, A_{sub1} (submerged trunk) and A_{sub2} (submerged root). The drag and gravitational force (Fd and Fg) act in the downstream direction, with the friction force (Ff) in the opposite direction. Fl and Fw are the lifting force and effective weight, respectively; (c) rotation of a piece of floating wood according to the flow velocity field across a channel; (d) entrainment and rotation of a piece partially emerged and lying on the river bank; (e) wood-bank collision and wood rotation; (f) wood-wood collision at different time steps t and with wood velocity v .

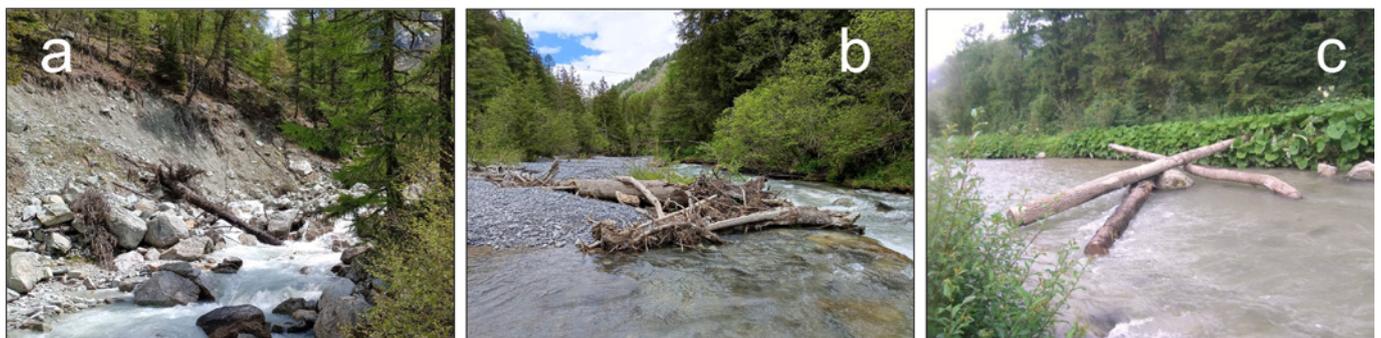


Fig. 4. (a) Bank failure and an uprooted wood lying partially on the channel of the Arpitettaz stream (Valais, Switzerland) in 2023; (b) large wood accumulation retained by a large trunk in the Spöl River (Graubünden, Switzerland) in 2022 (Photos: Virginia Ruiz-Villanueva); (c) three wood pieces retained by a large boulder in the Rienz River (Italy) in 2012 (Photo: Ana Lucía).

Table 1. Models developed to simulate wood transport in debris and water flows. na: not available.

Reference	Software name and availability	Spatial dimensionality	Coupled processes	Space discretisation	Validation and application
Lancaster <i>et al.</i> 2003	Channel-Hillslope Integrated Landscape Development (CHILD)	2D finite volume	Debris flows, including the effects of wood entrainment and deposition (not coupled)	Triangulated irregular network (TIN)	Limited validation, field observations
Stockstill <i>et al.</i> 2009	Adaptive hydraulics (ADH) system	2D finite element	Hydrodynamics, shallow water equations, wood pathways (not coupled)	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach solved on a mesh	Flume experiments
Mazzorana <i>et al.</i> 2011	Outputs from 2D Sobek Rural WL/Delft Hydraulics + ArcGIS	2D finite differences	Hydrodynamics, shallow water equations, wood pathways (not coupled)	Eulerian + object-oriented model or cell to cell pathway delineation solved on a grid	Limited validation
Shrestha <i>et al.</i> 2009, 2012	na	2D, na	Debris flows + wood transport, one-way coupled	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach	Flume experiment
Ruiz-Villanueva <i>et al.</i> 2014	Iber Wood, available at: <i>Iberaula.es</i>	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations + morphodynamics (bedload and suspended sediment transport) + wood transport (roots, floating, sliding), fully coupled	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach, solved with structured and unstructured meshes	Flume experiments, field observations. Applied in rivers of different morphologies
Amicarelli <i>et al.</i> 2015	Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)	3D	Hydrodynamics, shallow water equations + wood transport	mesh-less	Flume experiments
Persi <i>et al.</i> 2017	ORSA2D_WT	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations + wood transport (floating), one-way coupled	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach, solved with structured and unstructured meshes	Flume experiments by Ruiz-Villanueva <i>et al.</i> (2014), limited field observations
Kang and Kimura 2018	Nays2DH, available in <i>i-ric.org</i>	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations + morphodynamics (bedload and suspended sediment transport) + wood transport (roots, floating, sliding)	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach of spheres solved in a regular grid	Flume experiments. Applied in a few rivers of different morphologies
Zischg <i>et al.</i> 2018	LWDsimR, available in <i>zenodo.org/records/1296733</i>	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations, wood recruitment + pathways (not coupled)	Eulerian + object-oriented model or cell-to-cell pathway delineation solved on an unstructured mesh	Limited validation
Ruiz-Villanueva <i>et al.</i> 2019	Iber Wood, available at: <i>Iberaula.es</i>	2D finite volume	2D Hydrodynamic model enhanced to simulate non-Newtonian flows, hyperconcentrated wood-laden flows	Eulerian	Limited field observations
Xiong <i>et al.</i> 2020	na	1D finite volume	Hydraulics + wood transport, coupled	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach	Flume experiments
Persi <i>et al.</i> 2021	ORSA2D	2D finite volume	Advection-diffusion equation in a 2D hydrodynamic model for congested wood transport	Eulerian	Flume experiments
Xiong <i>et al.</i> 2022	na	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations + floating objects transport (vehicles), fully coupled	Eulerian + 3D multi-sphere method (MSM) DEM model solved on a regular grid	Flume experiments
Kang <i>et al.</i> 2022	Nays2DFlood available in <i>i-ric.org</i>	2D finite volume	Debris flows, shallow water equations + advection and diffusion of the sediment-water mixture, shear-stress, and entrainment-erosion	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach	Limited field observations
Finaud-Guyot <i>et al.</i> 2023	SW2D, available in <i>sw2d.imria.fr</i>	2D finite volume	Hydrodynamics, shallow water equations + wood transport, not coupled	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach solved with unstructured mesh	Flume experiments
Sansen <i>et al.</i> 2024	na	1D	Hydrodynamics, shallow water equations	Eulerian + Discrete Element Lagrangian approach	Flume experiments by Ruiz-Villanueva <i>et al.</i> (2014)

portant difference between these two models and others is that they also included a simplified simulation of wood supply by simulating single trees in the mesh that could be eroded and entrained into the flow based on the hydrodynamics. However, the recruitment mechanisms relied on a probabilistic approach and an empirical coefficient calculated based on the flow depth and flow velocity. Cylinders represented the wood pieces, floating or sliding but not interacting with each other, rotating, or colliding. These models have been applied to real rivers, but only on a scenario-based framework with limited validation.

The first model that fully coupled the hydrodynamics with the wood transport was developed by Ruiz-Villanueva *et al.* (2014a). They coupled a 2D hydrodynamic and morphodynamic model with a Lagrangian discrete element model that simulated wood as cylinders (with and without roots), moved by the hydrodynamic forces acting on their centre of mass. Wood pieces float, slide or drag, rotate, collide (non-elastic), deposit and remobilize according to the hydrodynamics and turbulence; they interact with each other, with infrastructures and the topography. The presence of wood affects the hydrodynamics and thus the morphodynamics by adding a wood-related drag term to the Saint-Venant equations. The model has been validated using diverse flume experiments and has been applied in various rivers where field observations were available (see the next section for further details).

Similar approaches followed that also combined a 2D hydrodynamic model with Lagrangian discrete elements. The model presented by Persi *et al.* (2017) assumes wood as cylinders without roots and computes the hydrodynamic forces to drive motion by flotation or sliding, rotation and collision (elastic) with other wood pieces or channel banks. The model is not coupled, so the wood does not influence the hydrodynamics. The initial validation was done by comparing the flume experiments by Ruiz-Villanueva *et al.* (2014a) with analytical solutions; further, field observations were used (Persi *et al.* 2019). Kang and Kimura (2018) presented a model that used spheres to form a piece of wood with or without roots, moved by the hydrodynamic forces floating, sliding or rolling, initially without considering collisions, which were implemented later (Kang *et al.* 2021). The model is fully coupled, adding a drag force exerted by the wood on the flow. Flume experiments were used for validation, and a few applications to actual rivers have been made.

Also assuming wood as spheres, Xiong *et al.* (2020) initially developed a non-coupled 1D and later a coupled 2D model (Xiong *et al.* 2022) to transport floating objects (not specifically wood, but vehicles). Collisions and rotation were only implemented in the 2D model, which was validated using flume experiments and applied to a case study.

Two 2D Lagrangian models have been presented recently by Finaud-Guyot *et al.* (2023) and Sansen *et al.* (2024). Still in the initial stages, these models are not fully

coupled and only consider the flotation of cylinders that may collide.

3D models have also been proposed to simulate the transport of particles (not necessarily wood) in a fluid. Amicarelli *et al.* (2015) used the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) framework, a mesh-less Computational Fluid Dynamics (CFD) technique for free-surface and multi-phase flow modelling, to reproduce fluid-solid and solid-solid interactions. Still, the validation and application of such complex models remain challenging.

The models mentioned are suitable for simulating uncongested and semi-congested wood transport, but the simulation of congested or hypercongested wood transport mechanisms is only beginning to develop. Congested wood transport can be reproduced by a linear momentum equation containing tangential stress acting on the interface between the wood carpet and the water layer (Bocchiola *et al.* 2002). This force can be added to hydraulic models to reproduce the effects of the wood on the flow but not the transport of the wood itself. Ruiz-Villanueva *et al.* (2019) enhanced the capabilities of their proposed 2D model to simulate hypercongested wood-laden flows using different rheological equations and field-recorded videos. Persi *et al.* (2021) proposed a one-way coupled hydrodynamic advection-diffusion model to simulate congested wood transport, which was validated with flume experiments.

4 Iber wood: modelling hydrodynamics, morphodynamics and wood dynamics

Iber is a 2D hydrodynamic model developed by the Universities of Catalunya and La Coruña in Spain for simulating free surface flow in rivers (Bladé *et al.* 2014; *iberaula.es*). It solves hydrodynamics based on the 2D Saint-Venant equations and uses an explicit finite volume scheme on unstructured meshes. Iber can solve subcritical and supercritical flows and changes in flow regimes typical of mountain rivers. It includes a mass conservative wetting and drying algorithm, several RANS-type turbulence models, and the Exner equation to simulate morphodynamics with various equations for sediment transport, as well as internal structures like bridges, gates, weirs, and culverts. It is widely used for research and practical purposes in hydro-morphodynamics, flood hazard, risk evaluation, ecohydraulics, fish habitats, pollution, and water quality. Analytical solutions, laboratory tests, and field measurements have extensively validated the model.

In 2014a, Ruiz-Villanueva *et al.* developed Iber-Wood, coupling a Lagrangian framework to Iber that fully coupled hydrodynamics to transport individual wood elements at short timescales. The initial motion of these elements is based on force balance, with gravitational and drag forces acting in the flow direction

and friction in the opposite direction. The parameters involved in force balance include wood density, length, diameter, angle with respect to the flow direction, water level, submerged area, and friction and drag coefficients. The transport mechanism, floating or dragging, and log velocity are computed with these parameters. Interactions between the wood and river geometry, other wood pieces, and internal conditions like bridges are possible. The module is fully coupled, meaning that the presence of wood affects the hydrodynamics and vice versa, as explained by an additional drag in the Saint-Venant equations. The model was initially validated using flume experiments, focusing on floating non-rooted logs' motion, rotation, and velocity (Ruiz-Villanueva *et al.* 2014a). Further validation was conducted using a wide braided flume, examining the motion and behaviour of floating and dragging logs' trajectories, accumulation in jams, and the effect of roots or unsteady states on travel distances (Ruiz-Villanueva *et al.* 2020).

The first applications to study cases focused on exploring the interaction and accumulation of wood with bridges and the effect of bridge blockage on flood hazard and risk (Ruiz-Villanueva *et al.* 2014b and 2014c). The model was used in a scenario-based approach to identify critical bridges along a river crossing a small town in Spain (Fig. 5). Results showed that the deposition of wood at bridges caused the reduction of the channel cross-sectional area, triggering a backwater effect and increasing the damage potential or risk up to 50 %. At a different site, in a mountain river in Poland with reaches of contrasting morphologies, the model was used to

explore the factors controlling wood transport, deposition and bridge clogging (Ruiz-Villanueva *et al.* 2016a, 2016b, 2017). The model results revealed that braided multi-thread morphologies were natural wood retention zones, and channelised and narrow river reaches showed an artificially increased wood transport capacity and competence (Fig. 5). These studies also illustrated how wood preferential accumulation zones within a river corridor change through time, according to the flood magnitude, with the floodplain as the expected natural depositional area during high-magnitude floods (Fig. 5).

Recent developments included the effect of secondary currents in bended channels to better reproduce the wood trajectories in meandering rivers (Innocenti *et al.* 2023). The model has also been used to investigate flow-wood-sediment interactions; as the model is fully coupled, the input of wood into the flow also affects the sediment transport, and the erosion of the channel bed and banks may cause the deposited wood to be re-entrained in the flow (Bladé *et al.* 2016). Moreover, the model could reproduce how the accumulation of wood towards bridges may lead to scouring and aggradation (Mazzorana *et al.* 2023).

Despite its potential, Iber-Wood is a deterministic model aimed at simulating a quasi-stochastic and complex process, and therefore contains limitations and uncertainties (Baas 2017). It is important to acquire good knowledge about the site and as much information and observations about wood-related processes as possible for the proper set-up, calibration, and validation of the model. Still, Iber-Wood's greatest strength lies in the

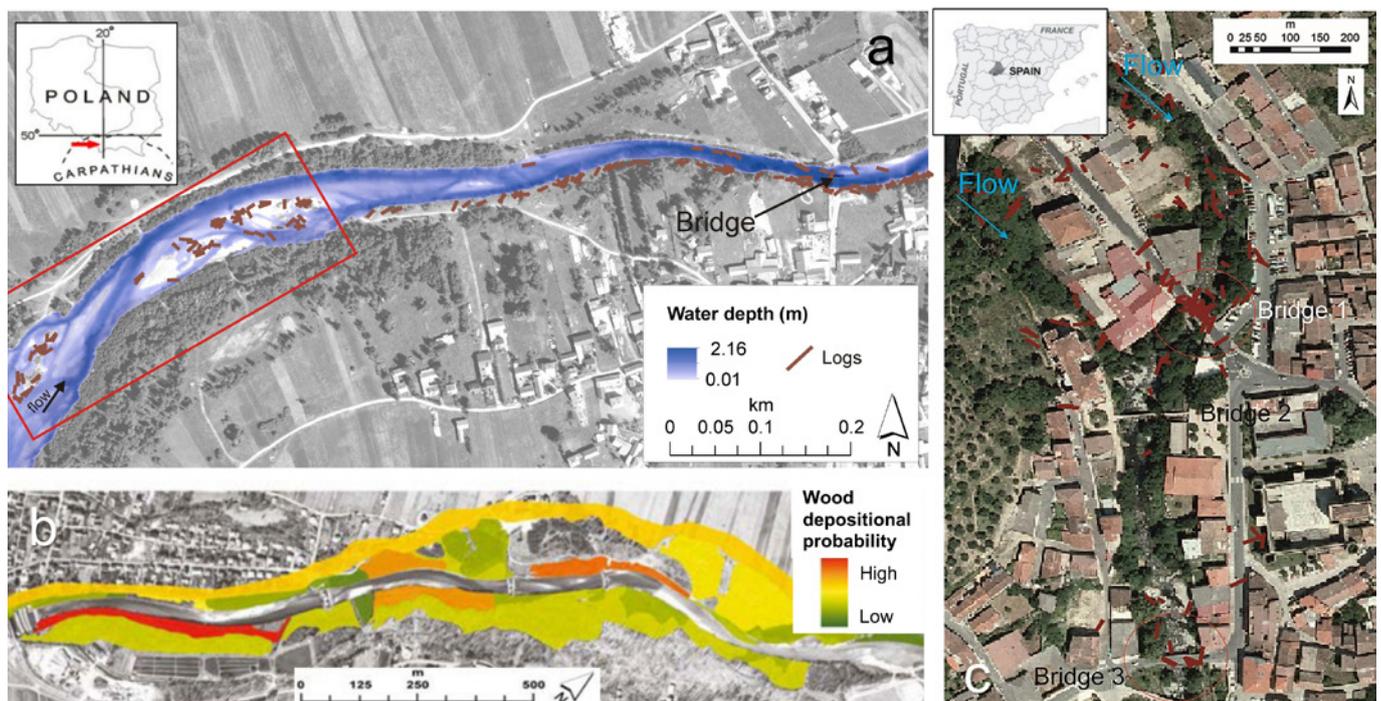


Fig. 5. Examples of applications of Iber-Wood to explore (a) wood transport and bridge clogging (Ruiz-Villanueva *et al.* 2017) and (b) wood deposition (Ruiz-Villanueva *et al.* 2016b), and (c) to identify critical bridges trapping wood (Ruiz-Villanueva *et al.* 2014c).

potential to test hypotheses and run multiple scenarios, whose results can be analysed fully at any space and time, thus helping to understand processes that are difficult to observe in real rivers.

5 References

- Amicarelli A., Albano R., Mirauda D., Agate G., Sole A., Gualdini R. (2015) A Smoothed Particle Hydrodynamics model for 3D solid body transport in free surface flows. *Comput. Fluids* 116: 205–228. doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.04.018
- Baas A.C.W. (2017) Models in Geomorphology. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1–6. doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0882
- Bladé E., Cea L., Corestein G., Escolano E., Puertas J., Vázquez-Cendón E., ... (2014) Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30, 1: 1–10. doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004
- Bocchiola D., Catalano F., Menduni G., Passoni G. (2002) An analytical–numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels. *J. Hydrol.* 269: 65–78. [doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00195-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00195-6)
- Braudrick C.A., Grant G.E. (2000) When do logs move in rivers? *Water Resour. Res.* 36: 571–583. doi.org/10.1029/1999WR900290
- Braudrick C.A., Grant G.E., Ishikawa Y., Ikeda H. (1997) Dynamics Of Wood Transport In Streams: A Flume Experiment. *Earth Surf. Process. Landf.* 22: 669–683.
- Brenna A., Marchi L., Borga M., Ghinassi M., Zaramella M., Surian N. (2021) Sediment–water flows in mountain catchments: Insights into transport mechanisms as responses to high-magnitude hydrological events. *J. Hydrol.* 602: 126716. doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126716
- Comiti F., Mao L. (2012) Recent advances in the dynamics of steep channels. In: Church M., Biron P.M., Roy A.G. (Eds) *Gravel bed rivers: Processes, tools, environments*. New York: Wiley-Blackwell. 353–377 doi.org/10.1002/9781119952497.ch26
- Comiti F., Lucía A., Rickenmann D. (2016) Large wood recruitment and transport during large floods: A review. *Geomorphology* 269: 23–39. doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.016
- Finaud-Guyot P., Hétier M., Rousseau, A. (2023) Numerical modeling of large debris transport during floods. 2023. hal-04009769v3. Preprint.
- Gippel C.J. (1995) Environmental Hydraulics of Large Woody Debris in Streams and Rivers. *J. Environ. Eng.* 121: 388–395. [doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1995\)121:5\(388\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1995)121:5(388))
- Haga H., Kumagai T., Otsuki K., Ogawa S. (2002) Transport and retention of coarse woody debris in mountain streams: An in situ field experiment of log transport and a field survey of coarse woody debris distribution. *Water Resour. Res.* 38: 1-1-1–16. doi.org/10.1029/2001WR001123
- Hardy R.J. (2013) Process-based sediment transport modeling. In: Shroder J. (Ed. in Chief), Baas A.C.W. (Ed.) *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Academic Press. Vol. 2, Quant. Model. Geomorphol. 147–159.
- Innocenti L., Bladé E., Sanz-Ramos M., Ruiz-Villanueva V., Solari L., Aberle J. (2023). Two-Dimensional Numerical Modeling of Large Wood Transport in Bended Channels Considering Secondary Current Effects. *Water Resour. Res.* 59: 1–16. doi.org/10.1029/2022WR034363
- Kang T., Kimura I. (2018) Computational modeling for large wood dynamics with root wad and anisotropic bed friction in shallow flows. *Adv. Water Resour.* 121: 419–431. doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.09.006
- Kang T., Kimura I., Onda S. (2021) Application of computational modeling for large wood dynamics with collisions on moveable channel beds. *Adv. Water Resour.* 152. doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.103912
- Kang T., Jang C.-L., Kimura I., Lee N. (2022) Numerical Simulation of Debris Flow and Driftwood with Entrainment of Sediment. *Water* 14, 3673. doi.org/10.3390/w14223673
- Koyanagi K., Yamada T., Ishida, K. (2023) Rediscovering wood-laden debris flow studies: A perspective from Japan. *Earth Surf. Process. Landf.* 48: 104–118. doi.org/10.1002/esp.5511
- Lancaster S.T., Hayes S.K., Grant G.E. (2003) Effects of wood on debris flow runout in small mountain watersheds. *Water Resour. Res.* 39. doi.org/10.1029/2001WR001227
- Mazzorana B., Hübl J., Zischg A., Largiadier A. (2011) Modeling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Nat. Hazards* 56: 425–449. doi.org/10.1007/s11069-009-9492-y
- Mazzorana B., Bahamondes Rosas D., Montecinos L., Ruiz-Villanueva V., Rojas I. (2023) Explorando la respuesta hidrodinámica de un río altamente perturbado por erupciones volcánicas: el Río Blanco, Chaitén (Chile). *Ing. Agua* 27: 73–92. doi.org/10.4995/ia.2023.18866
- Merten E., Finlay J., Johnson L., Newman R., Stefan H., Vondracek B. (2010) Factors influencing wood mobilization in streams. *Water Resour. Res.* 46. doi.org/10.1029/2009WR008772
- Murray A.B. (2013) Which models are good (enough), and when? In: Shroder J. (Ed. in Chief), Baas, A.C.W. (Ed.) *Treatise on Geomorphology*. San Diego, CA: Academic Press. Vol. 2, Quant. Model. Geomorphol. 50–58.
- Persi E., Petaccia G., Sibilla, S. (2017) Woody debris transport modelling by a coupled DE-SW approach. *Nat. Hazards.* doi.org/10.1007/s11069-017-2891-6
- Persi E., Petaccia G., Sibilla S., Bentivoglio R., Armanini, A. (2021) A one-way coupled hydrodynamic advection-diffusion model to simulate congested large wood transport. *Hydrology* 8: 1–20. doi.org/10.3390/hydrology8010021

- Persi E., Petaccia G., Sibilla S., Lucía A., Andreoli A., Comiti F. (2019) Numerical modelling of uncongested wood transport in the Rienz river. *Environ. Fluid Mech.* doi.org/10.1007/s10652-019-09707-8
- Rafferty M. (2017) Computational Design Tool for Evaluating the Stability of Large Wood Structures. Technical Note TN-103.2. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, National Stream & Aquatic Ecology Center. 27 p
- Ruiz-Villanueva V., Bladé E., Sánchez-Juny M., Marti-Cardona B., Díez-Herrero A., Bodoque J.M. (2014a) Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *J. Hydroinform.* 16: 1077–1096. doi.org/10.2166/hydro.2014.026
- Ruiz-Villanueva V., Bodoque J.M., Díez-Herrero A., Bladé E. (2014b) Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Nat. Hazards* 74: 967–987. doi.org/10.1007/s11069-014-1222-4
- Ruiz Villanueva V., Bladé Castellet E., Díez-Herrero A., Bodoque J.M., Sánchez-Juny M. (2014c). Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods. *Earth Surf. Process. Landf.* 39: 438–449. doi.org/10.1002/esp.3456
- Ruiz-Villanueva V., Mazzorana B., Bladé E., Bürkli L., Iribarren-Anacona P., Mao L., ... (2019) Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surf. Process. Landf.* 44, 1694–1709. doi.org/10.1002/esp.4603
- Ruiz-Villanueva V., Gamberini C., Bladé E., Stoffel M., Bertoldi W. (2020) Numerical Modeling of Instream Wood Transport, Deposition, and Accumulation in Braided Morphologies Under Unsteady Conditions: Sensitivity and High-Resolution Quantitative Model Validation. *Water Resour. Res.* 56: 1–22. doi.org/10.1029/2019WR026221
- Ruiz-Villanueva V., Wyzga B., Hajdukiewicz H., Stoffel M. (2016a) Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. *Earth Surf. Process. Landf.* 41: 446–459. doi.org/10.1002/esp.3832
- Ruiz-Villanueva V., Wyzga B., Zawiejska J., Hajdukiewicz M., Stoffel, M. (2016b) Factors controlling large-wood transport in a mountain river. *Geomorphology* 272: 21–31. doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.004
- Ruiz-Villanueva V., Wyzga B., Mikuś P., Hajdukiewicz M., Stoffel M. (2017) Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: the Długopole bridge in the Czarny Dunajec River, Poland. *Earth Surf. Process. Landf.* 42. doi.org/10.1002/esp.4091
- Sansen D., Archambeau P., Piroton M., Erpicum S., Dewals B. (2024) Lagrangian description for the drift of large floating debris in rivers during floods: EGU2024, 17477.
- Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y., Zhang H. (2009) Numerical Simulation on Debris-Flow With Driftwood and Its Capturing Due To Jamming of Driftwood on a Grid Dam. *Annu. J. Hydraul. Eng. JSCE* 53: 169–174.
- Shrestha B.B., Nakagawa H., Kawaike K., Baba Y., Zhang H. (2012) Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans. *Nat. Hazards* 61: 577–602. doi.org/10.1007/s11069-011-9939-9
- Stockstill R.L., Daly S.F., Hopkins M.A. (2009) Modeling Floating Objects at River Structures. *J. Hydraul. Eng.-Asce* 135: 403–414. doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:5(403)
- Trujillo-Vela M.G., Ramos-Cañón A.M., Escobar-Vargas J.A., Galindo-Torres S.A. (2022) An overview of debris-flow mathematical modelling. *Earth-Sci. Rev.* 232. doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104135
- Xiong Y., Mahaffey S., Liang Q., Rouainia M., Wang G. (2020) A new 1D coupled hydrodynamic discrete element model for floating debris in violent shallow flows. *J. Hydraul. Res.* 58: 778–789. doi.org/10.1080/00221686.2019.1671513
- Xiong Y., Liang Q., Tong X., Zheng J., Wang, G. (2022) Modelling Floating Debris Transport in a Flash Flood Event. *Proceedings of the IAHR World Congress*: 327–334. doi.org/10.3850/IAHR-39WC252171192022121
- Zischg A., Galatioto N., Deplazes S., Weingartner R., Mazzorana B. (2018) Modelling Spatiotemporal Dynamics of Large Wood Recruitment, Transport, and Deposition at the River Reach Scale during Extreme Floods. *Water* 10: 1134. doi.org/10.3390/w10091134

Zusammenfassung

Numerische Modellierung von Holztransportprozessen in Gebirgsflüssen und Wildbächen: ein Überblick

Seit Jahrzehnten werden Modelle entwickelt, um Murgänge und Hochwasserereignisse in Gebirgsflüssen und Wildbächen zu simulieren. Diese Modelle berücksichtigen jedoch in der Regel nur Wasser und anorganisches Sediment. Flüsse und Wildbäche in bewaldeten Einzugsgebieten können jedoch auch grosse Mengen an entwurzelten Bäumen und Stämmen (z.B. Schwemmholz) mit sich führen. Im Gegensatz zur Modellierung von Murgängen und Hochwasserereignissen hat die Modellierung des Holztransports erst seit kurzem begonnen. Die Entwicklung solcher Modelle hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt, aber bis jetzt gab es noch keine Übersicht über den aktuellen Stand der Technik. In diesem Beitrag werden die verschiedenen Arten von Strömungen, insbesondere Holz in Gebirgsflüssen, vorgestellt, es wird erklärt, wie sich Holz bewegt, es werden die bestehenden Modelle und ihre wichtigsten Merkmale beschrieben, und eines dieser Modelle, Iber-Wood, wird näher erläutert.

Schlüsselwörter: Schwemmholz, numerische Modellierung, Holztransport, Iber-Wood, Verklausung



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Prise en compte des blocs rocheux et du tri granulométrique pour une analyse plus réaliste des risques torrentiels

Guillaume Piton

Université Grenoble Alpes, INRAE, CNRS, IRD, Grenoble INP, IGE, Grenoble, France

Les crues torrentielles sont caractérisées par un transport très intense de sédiment et d'éventuels blocs rocheux par charriage ou lors d'épisodes de laves torrentielles. L'obstruction des ouvrages par les blocs est difficile à prédire mais peut avoir des effets significatifs sur la répartition spatiale des dépôts. Ce court article décrit synthétiquement un nouvel outil accessible en ligne (sur le site platrisk.ige.inrae.fr), nommé MCB³ (Modeling of Clogging by Boulders of Barriers and Bridges – Modélisation de l'obstruction par les blocs des barrages et ponts). Cet outil permet des modélisations simplifiées des flux de lave torrentielle à travers des ouvrages (barrage filtrant, pont) et permet de caractériser leur efficacité de piégeage et d'atténuation des débits de pointe ou les probabilités de blocages des ouvertures.

1 Introduction

Les cours d'eau torrentiels, torrents et rivières torrentielles, sont caractérisés par un transport solide intense composé principalement de sédiment, mais aussi de bois flottant. Ce transport solide modifie la morphologie des chenaux par des érosions et dépôts, interfère avec les conditions d'écoulement au droit des ouvrages (barrages, ponts, digues), générant des conditions de débordement différentes et plus compliquées à prédire que dans le cas des cours d'eau fluviaux (au transport solide moins intense). Les écoulements débordants des cours d'eau torrentiels peuvent par ailleurs générer des dommages aggravés, par comparaison aux inondations fluviales, à cause des affouillements et impacts entraînant des dommages structuraux aux bâti et infrastructures. Les cours d'eau torrentiels génèrent donc des dommages particuliers et l'étude des aléas et risques associés doit intégrer l'analyse du transport solide et ses conséquences associées (Vázquez-Tarrío *et al.* 2024).

Le transport solide dans les cours d'eau torrentiels apparaît principalement sous la forme de deux processus d'écoulement (MTECT 2023): (i) le charriage qui correspond au transport d'éléments grossiers entraînés sur le fond des lits par un écoulement d'eau turbide; mais aussi (ii) les laves torrentielles qui prennent la forme d'un mélange monophasique de boue, de graviers, de blocs rocheux et de bois flottant. Le charriage génère des éro-

sions latérales et des affouillements très destructeurs ainsi que des débordements par engravement des chenaux et des ponts (éventuellement précédé d'obstruction par le bois flottant). Les dommages sont ensuite surtout le fruit de divagations des écoulements et d'affouillement des bâtiments et infrastructures. Les laves torrentielles génèrent des dommages plutôt par obstruction des ouvrages, impact sur les bâti et infrastructures et engravement de ces derniers. Prédire les zones préférentielles de dépôt, les zones probables de divagation et la probabilité d'obstruction des ponts est donc très utile à l'étude des aléas et risques torrentiels.

L'identification des zones exposées aux aléas torrentiels et la prédiction du fonctionnement d'un ouvrage (piège à sédiment, chenal endigué) sont des exercices compliqués impliquant la compilation de sources d'informations hétérogènes (archives historiques, analyses géomorphologiques empiriques, approches calculatoires plus ou moins sophistiquées). La modélisation numérique est un outil parmi d'autres dans ces approches (Jakob 2021).

Des outils de modélisation hydro-sédimentaire sont ainsi régulièrement mis en œuvre pour affiner la compréhension du fonctionnement des lits torrentiels, par exemple pour estimer les dépôts dans un tronçon ou un bassin (Kaitna *et al.* 2011; Bernard *et al.* 2019). Ces approches simulent la dynamique des dépôts et des niveaux d'écoulements au passage des singularités (seuil, orifice). Ils n'intègrent toutefois généralement pas explicitement les obstructions progressives liées aux blocs rocheux et au bois flottant. Les effets du tri granulométrique sur la dynamique des dépôts sont aussi usuellement négligés par ces approches qui, dans la plupart des cas, caractérisent les sédiments charriés seulement par un diamètre de grain unique ou les laves torrentielles par des paramètres rhéologiques moyens (e.g. contrainte de cisaillement seuil, vitesses critiques de dépôts et d'érosion). Dans un travail récent de modélisation hydro-sédimentaire 2D de processus de charriage, Gonzales de Linares *et al.* (2022) ont montré que le réalisme de la simulation pouvait être significativement amélioré en intégrant le tri granulométrique et son effet sur le frottement dans chaque maille. La géomorphologie simulée en intégrant ces processus, notamment la largeur des chenaux et l'étalement des écoulements, était ainsi

beaucoup plus proche de celle observée lors d’essais sur modèle réduit. La potentialité de cette approche est en cours d’exploration via un travail de thèse à l’Institut des Géosciences de l’Environnement de Grenoble. Le format court du présent article ne permet pas de rentrer plus en détail dans ces considérations et le lecteur intéressé est invité à lire la publication de Gonzales de Linares *et al.* (2022).

La présence de blocs rocheux de taille variée a aussi un effet très significatif sur les obstructions des ponts et dalots. Il est usuellement considéré que les ratios entre le diamètre des blocs D (axe b en général) et les dimensions d’un orifice (largeur w_0 et hauteur a) permettent de discriminer les cas de blocage très probable (pour $w_0/D < 1.5$ et $a/D < 1$) des cas de blocage improbables (pour $w_0/D > 3$ et $a/D > 2$). Ces critères très simples sont utiles pour caractériser des ouvrages clairement sous-dimensionnés mais ils sont insuffisants dans les cas intermédiaires où les blocages sont possibles mais incertains. Pourtant de nombreux ponts et barrages filtrants entrent dans cette catégorie et l’expérience confirme qu’ils ne s’obstruent pas systématiquement (Carladous *et al.* 2022).

Des outils de simulation numérique multiphasique existent et permettent de simuler des mélanges de fluides et de solides représentant potentiellement des laves torrentielles (e.g. Canelas *et al.* 2017). Ces outils sophistiqués sont toutefois encore difficiles à prendre en main et demandent des temps de calcul prohibitifs, peu compatibles avec les besoins des ingénieurs. Un cadre de modélisation simplifié a été proposé par Piton *et al.* (2022) afin d’analyser le fonctionnement des pièges à sédiments (efficacité de piégeage et d’atténuation des débits de pointe). Cet outil a été repris et étendu afin de permettre aussi l’analyse de plusieurs ouvrages en série, y compris les probabilités de blocages au niveau des ponts soumis au passage de laves torrentielles. Le présent article décrit synthétiquement le fonctionnement de cet outil, nommé MCB³ (Modeling of Clogging by Boulders of Barriers and Bridges – Modélisation de l’obstruction par les blocs des barrages et ponts) qui est accessible en ligne sur la plateforme platrisk.ige.inrae.fr.

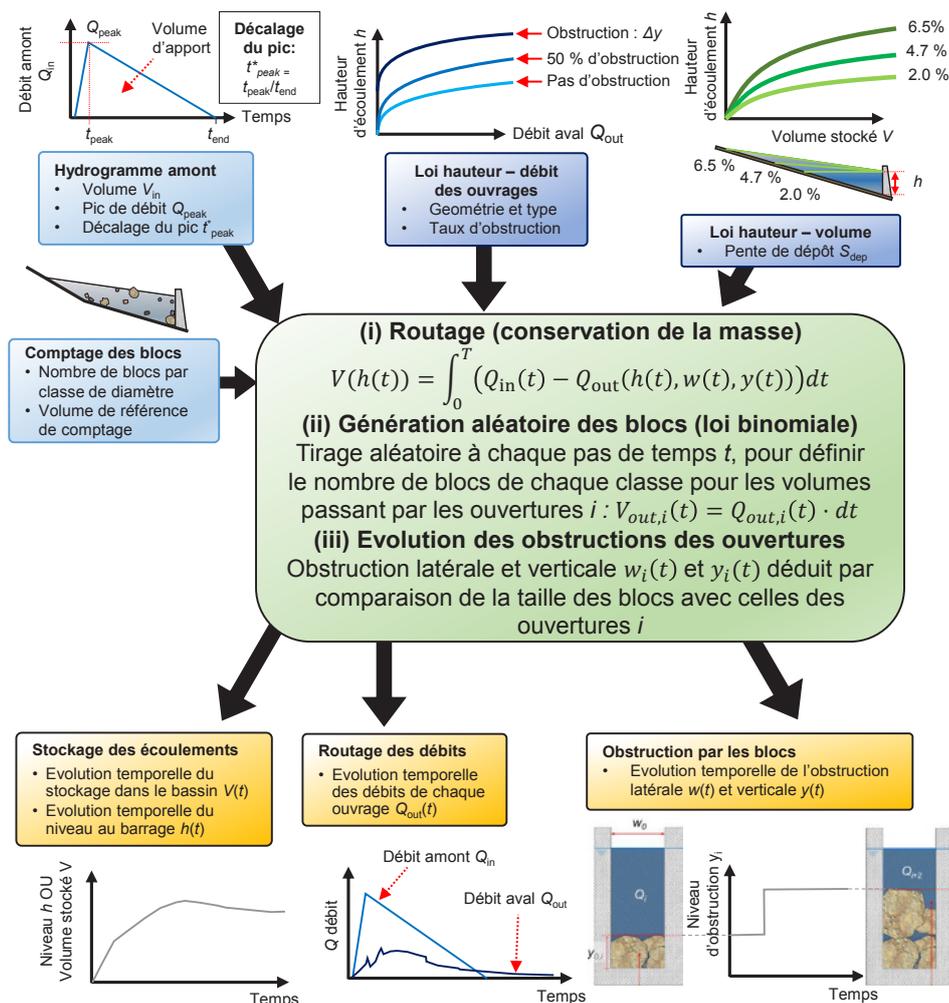


Fig. 1. Schéma de synthèse du fonctionnement du modèle MCB³ (adapté de Piton *et al.* 2022).

2 Modélisation simplifiée des interactions entre ouvrages et laves torrentielles

L'outil MCB³ repose sur une approche simplifiée, de type «réservoir», analogue à un simulateur d'écroulement de crue dans un barrage (CFBR 2013). Ce type de modèle se base sur:

- Un hydrogramme amont $Q_{in}(t)$ issu du bassin versant (hypothèse simplifiée d'hydrogramme triangulaire) ou issu de l'ouvrage amont simulé dans l'outil;
- Une loi hauteur – volume $V(h)$ du bassin de retenue (plusieurs sont produites pour différentes pentes de dépôt). La loi $V(h)$ est déduite directement de la largeur du chenal et de sa pente pour le cas des ponts.
- Une loi hauteur – débit sortant $Q_{out}(h)$.

Le modèle résout ensuite une simple équation de conservation de la masse en calculant à chaque pas de temps la part de débit entrant stocké dans la retenue, faisant ainsi varier la cote de retenue et le volume associé, et la part de débit sortant de la retenue pour ladite cote.

Cette approche est reprise dans l'outil MCB³ (Fig. 1) dont la spécificité principale est d'inclure une simulation explicite aléatoire et progressive de l'obstruction des ouvertures (seuils et orifices) par les blocs rocheux.

Afin d'alimenter les étapes de génération aléatoire des blocs, les hypothèses suivantes sont utilisées:

- La présence de blocs tentant de passer à un instant donné par une ouverture est déduit d'un tirage aléatoire suivant une loi binomiale comptant, pour chaque classe de taille de blocs, le nombre de «vrai» blocs parmi les volumes élémentaires (du volume d'un bloc) passant à travers l'ouverture (les autres volumes élémentaires étant de la boue et des blocs de classe de taille différente). Le nombre moyen de vrais blocs de chaque classe de taille, paramètre

unique de la loi binomiale, est calibré par des comptages de présence moyenne de blocs des différentes classes de taille pour un volume de référence (Fig. 2). Cette approche est utilisée au niveau du premier ouvrage simulé. Le nombre de blocs arrivant aux ouvrages aval est déduit du nombre de blocs passant les ouvrages précédents.

- Pour l'arrêt ou le passage des blocs, les critères suivants sont utilisés:
 - Les blocs dont le diamètre $D > a$ obstruent l'ouvrage et réduisent sa largeur;
 - Les couples de blocs dont le diamètre cumulé $D + D' > w_0$ obstruent la base de l'ouverture et élèvent le niveau de base des écoulements.

Plus de détails sur les algorithmes utilisés et les limites et hypothèses du modèle sont fournies dans l'article original (Piton *et al.* 2022). Cette approche de modélisation est très simplifiée puisqu'elle ne simule pas explicitement le phénomène d'étalement et de remplissage du bassin de retenue en amont du barrage.

De la même manière que pour les barrages, les sections arbitraires et plus ou moins complexes des ponts doivent être décomposées en sections élémentaires (Fig. 3f et g) constituées d'orifices rectangulaires, de seuils à paroi verticale et de seuils trapézoïdaux.

Notons qu'il est implicitement fait l'hypothèse que les lois d'orifices et de seuils s'appliquent aux ponts ce qui sous-entend que l'écoulement est sub-critique en amont de ces derniers (Froude < 1). L'outil surestime ainsi la capacité d'atténuation des ponts situés sur des chenaux suffisamment raides et/ou lisses pour que les écoulements accélèrent jusqu'à atteindre un régime super-critique (Froude > 1). Dès lors que l'ouvrage est partiellement obstrué et que la section débitante est réduite, l'hypothèse Froude < 1 est sans doute plus raisonnable,

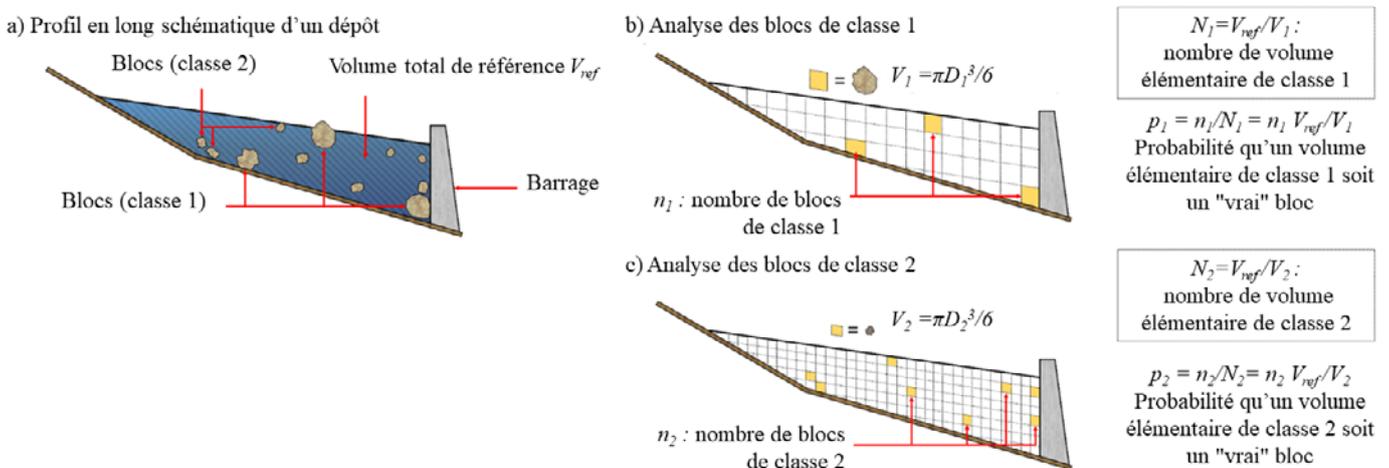


Fig. 2. Schéma explicatif des comptages de blocs et de la détermination des probabilités p_i qu'un volume élémentaire donné soit réellement un bloc de classe i ; a) profil en long schématisé d'un dépôt de lave torrentielle de volume V_{ref} ; b) comptage du nombre de blocs et de volumes élémentaires de classe 1; c) comptage du nombre de blocs et de volumes élémentaires de classe 2 (traduit et adapté de Piton *et al.* 2022).

mais cela n'a pas été démontré par des simulations ou expériences dédiées.

Notons aussi que l'écoulement est considéré homogène et monophasique, l'approche n'est donc applicable qu'aux écoulements de laves torrentielles et pas aux crues de charriage. Les éventuelles concentrations de blocs au front des bouffées de laves torrentielles ne sont pas directement modélisées (mais des simulations peuvent être menée avec un volume limité à celui du front et un plus grand nombre moyen de blocs par volume de lave torrentielle p_i). Aucune hypothèse n'est par ailleurs faite sur la rhéologie de la lave torrentielle, mais son caractère plus ou moins visqueux influence tout de même le paramètre de pente moyenne des dépôts S_{dep} : les laves plus visqueuses et/ou plus riches en blocs rocheux se déposant à des pentes plus raides.

Les paramètres utilisés étant toutefois incertains parce qu'à la fois variables entre évènements (incertitude

aléatoire) et mal documentés (incertitude épistémique), il est primordial de mener des analyses de propagation d'incertitude pour étudier la variabilité des indicateurs de fonctionnement des ouvrages (débits relargués, volumes piégés, niveaux atteints, taux d'obstruction des ouvertures) dans la gamme de variation probable des paramètres d'entrée. L'outil MCB³ intègre nativement la possibilité de mener deux types d'analyses:

- Analyse d'évènements sans propagation d'incertitude: les paramètres d'entrée sont constants et la répétition de simulation permet de caractériser la variabilité aléatoire du fonctionnement de l'ouvrage en lien avec le seul tirage aléatoire de la présence des blocs rocheux;
- Analyse d'évènement avec propagation d'incertitude (approche possibiliste, voir Piton *et al.* 2022): s'ajoute alors à l'effet aléatoire de la présence des blocs, celle de la variabilité des paramètres d'entrée.

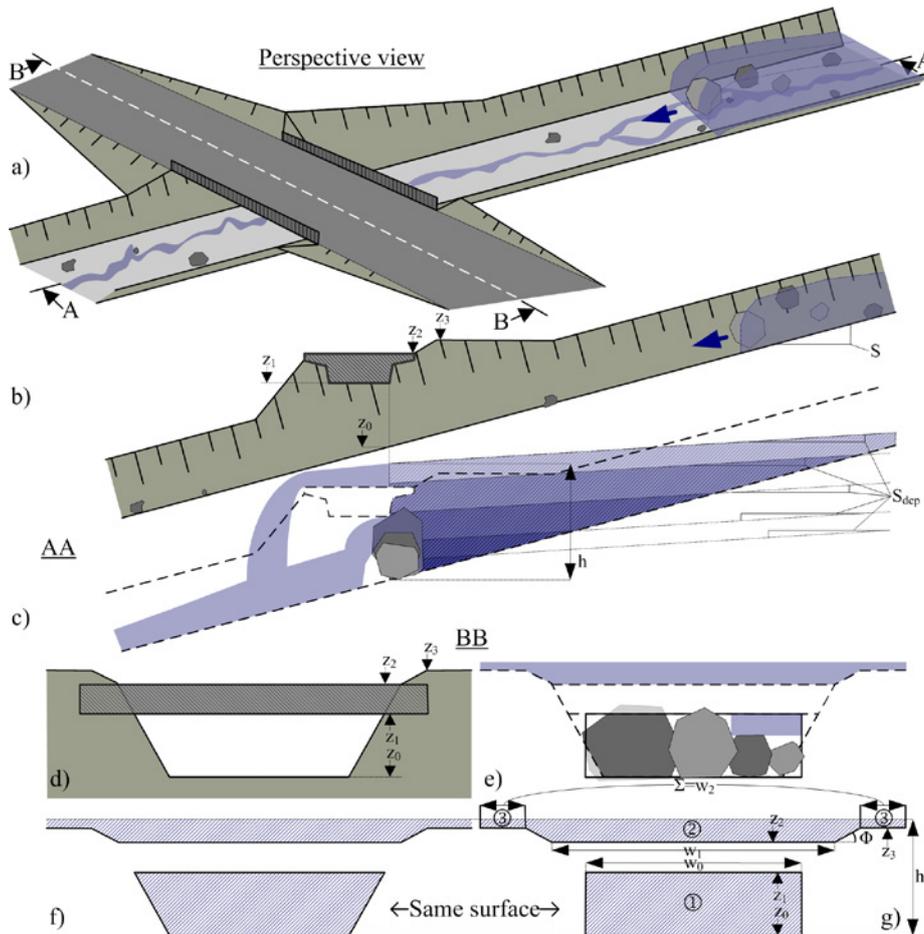


Fig. 3. Conceptualisation de la modélisation d'un pont dans MCB³; a) vue en perspective schématisée d'un pont et d'une bouffée de lave torrentielle; b) profil en long de l'ouvrage; c) profil en long schématisique du remplissage à pente constante du chenal en amont du pont pour une hauteur d'écoulement h variable; d) profil en travers de l'ouvrage; e) profil en travers schématisique d'un ouvrage partiellement obstrué, les sections bleues représentent les sections débitantes pour l'état d'obstruction représenté; f) profil en travers schématisique de la section débitante maximale réelle; g) profil en travers schématisique de la section débitante maximale telle que modélisée par MCB³ (composition de seuils à parois verticales, de seuils trapézoïdaux et d'orifices rectangulaires ayant des sections, largeurs et hauteurs proches des sections réelles afin de présenter une débitance équivalente et une propension similaire à l'obstruction par les blocs).

Certains sites d'études montreront un comportement assez «robuste», c'est-à-dire une relativement faible variabilité de fonctionnement malgré des données d'entrées variables, quand d'autres auront des comportements plus changeants. L'outil produit automatiquement des graphiques synthétiques, présentant de façon assez complète la variabilité des résultats de simulation.

3 Exemple d'application: le torrent du Saint-Martin

Un cas d'étude simple illustre succinctement l'utilisation du modèle MCB³. Le torrent du Saint-Martin est situé en France, dans la vallée de la Maurienne au niveau du village de Saint-Martin-de-la-Porte. Deux ouvrages sont représentés dans le modèle: un barrage à fente construit en 1987 (largeur: 6 m, hauteur: 7 m) localisé 45°14'40.9"N

6°27'07.3"E et le pont situé sur la route en aval (largeur: 12 m, hauteur: 3.9 m).

Un évènement courant (période de retour environ décennale) est d'abord simulé en propageant les incertitudes sur les paramètres d'entrée (paramètre: min | valeur la plus probable | max; volume: 5000 | 8000 | 15000 m³; débit de pointe: 16 | 23 | 37 m³/s). La Figure 4 compile les séries temporelles principales décrivant le fonctionnement des ouvrages.

L'hydrogramme entrant dans le barrage amont Q_{in} est atténué par l'ouvrage (Fig. 4a, les débits de pointe diminuent d'environ 3–8 %) puis transféré au second ouvrage où l'atténuation est marginale (Fig. 4b, les 1^{er} et 2^{ème} panneaux sont quasiment identiques). La fente du barrage amont s'obstrue pour environ un dixième des évènements (Fig. 4a, 4^{ème} panneau, lignes pointillées montrant le niveau d'obstruction) générant un piégeage de volumes de 1000–2000 m³ (Fig. 4a, 3^{ème} panneau); mais

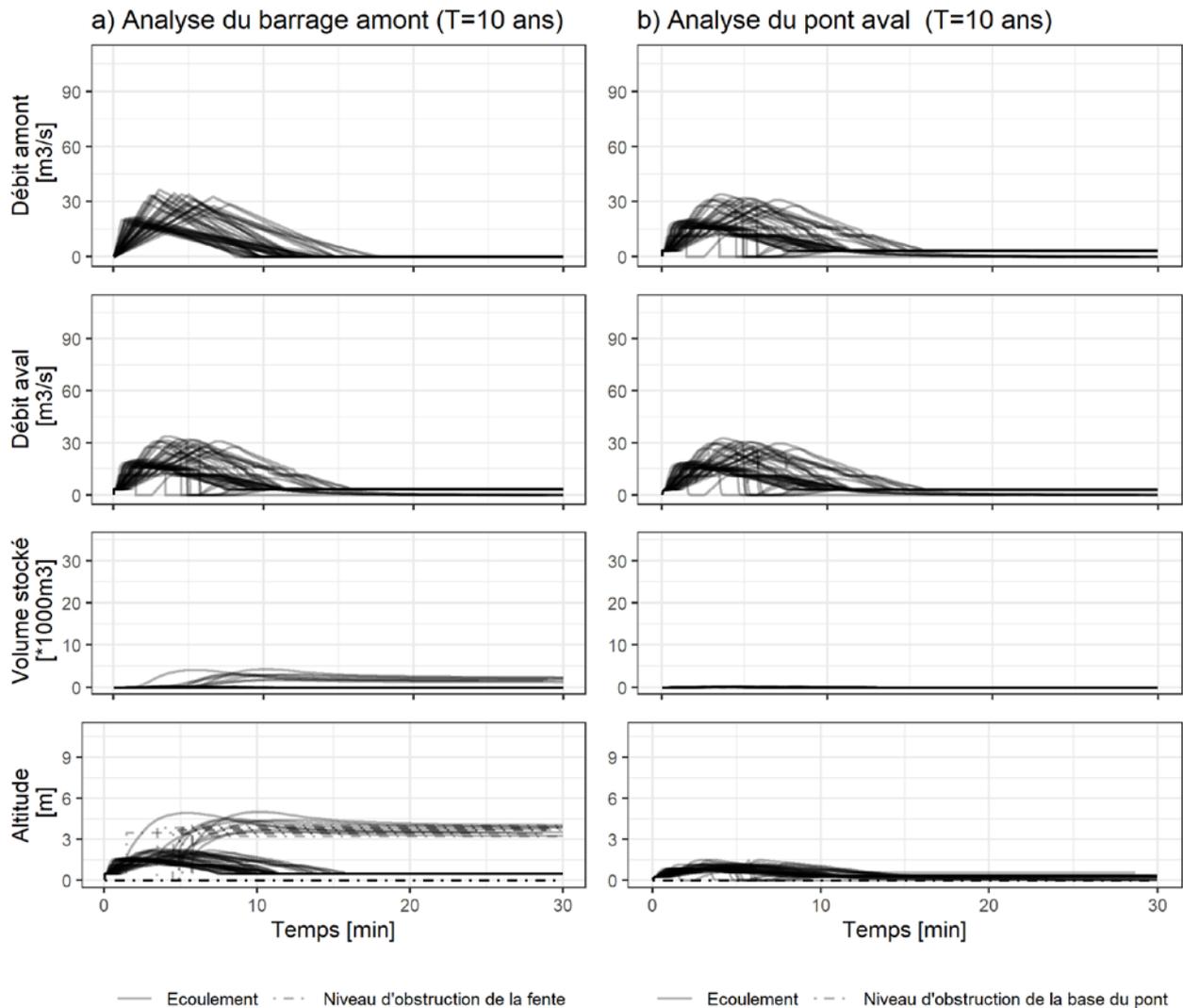


Fig. 4. Simulations de 25 évènements décennaux y compris propagation d'incertitude, série temporelles des paramètres décrivant a) le barrage amont et b) le pont aval. La première ligne décrit les débits entrant dans l'ouvrage Q_{in} , la seconde les débits sortants Q_{out} , la troisième les volumes stockés et la dernière les niveaux d'écoulement et d'obstruction.

les neuf dixième des évènements passent sans obstruction (niveau et volume résiduel nuls). Au niveau du pont, aucun cas de blocage n'apparaît sur 25 simulations de ce genre d'évènement courant. Le phénomène est ainsi considéré très peu probable. Le stockage estimé au pont pour les évènements est marginal mais serait un artefact (comme discuté plus haut) dans la mesure où les écoulements ne ralentissent vraisemblablement pas au droit de l'ouvrage en l'absence d'obstruction.

Des simulations menées sur un évènement plus fort, par exemple centennal (volume: 20 000 | 30 000 | 60 000 m³; débit de pointe: 47 | 65 | 112 m³/s), montrent à contrario une tendance à l'obstruction de tout ou partie de la fente du barrage amont dans neuf dixième des simulations générant des diminutions brusques des débits aval (Fig. 5). Cette obstruction piège 1000–5000 m³ en cas d'obstruction partielle (<70 % d'obstruction, 40 % des simulations) et 8000–13 000 m³ en cas d'obstruction forte (>90 % d'obstruction, 45 % des simulations). Ceci

atténue les débits de pointe de 6–13 % pour une obstruction partielle et de 13–45 % pour une obstruction forte. Au niveau du pont, l'outil prédit aussi un changement de fonctionnement par rapport à l'évènement courant avec environ un cinquième des simulations montrant une obstruction totale, un tiers montrant une obstruction partielle (33–66 % d'obstruction) et moins de 45 % des simulations montrant une absence d'obstruction comme en fonctionnement courant. L'atténuation de débit au niveau du pont est marginale (<7 %) pour les obstructions nulles et partielles et <25 % pour les obstructions totales.

4 Remarques conclusives

Le type de résultat que l'outil MCB³ fournit permet d'affiner les analyses et la compréhension du comportement des bassins versants torrentiels. Il permet de simuler le fonctionnement des ouvrages filtrants et de vérifier leur

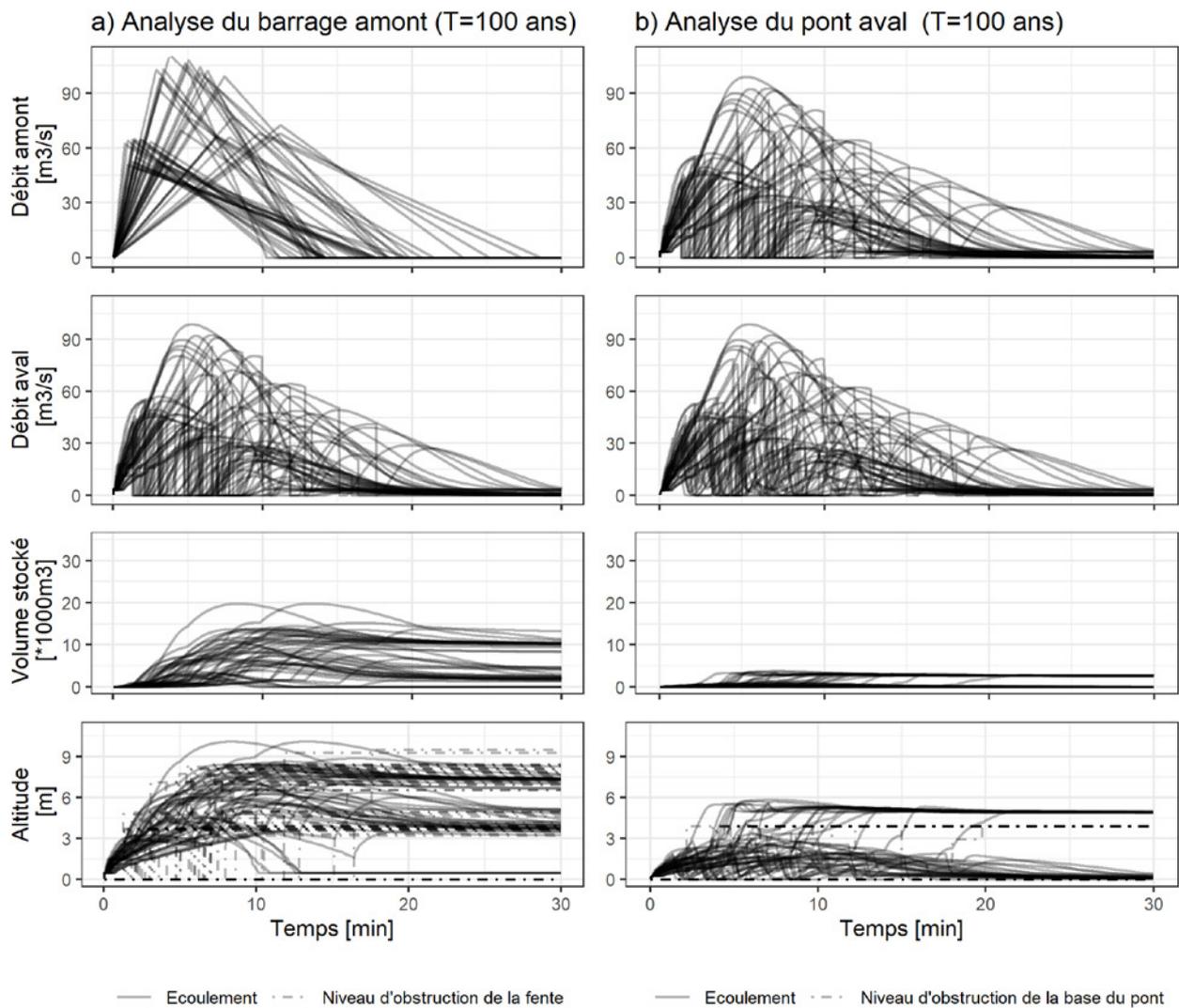


Fig. 5. Simulations de 25 évènements centennaux y compris propagation d'incertitude, série temporelles des paramètres décrivant a) le barrage amont et b) le pont aval. La première ligne décrit les débits entrant dans l'ouvrage Q_{in} , la seconde les débits sortants Q_{out} , la troisième les volumes stockés et la dernière les niveaux d'écoulement et d'obstruction.

capacité à atténuer les débits de pointe et/ou à éventuellement piéger des volumes de lave torrentielle. Au droit des ponts son application vise plutôt à caractériser les taux d'obstruction par les blocs. Le modèle peut être utilisé pour caractériser l'efficacité d'un barrage à protéger un pont contre le risque d'obstruction ou un chenal débordant si le débit de pointe dépasse une certaine valeur. Bien que peu de paramètres soient nécessaires pour mener des simulations, une certaine incertitude vis-à-vis des caractéristiques des événements est irréductible (e.g. débit de pointe pour un volume donné, nombre de blocs rocheux, pente de dépôt). L'outil intègre nativement la capacité de mener des simulations explorant l'effet de ces incertitudes. Son interface en ligne facilite enfin son utilisation. Nous espérons que MCB³ trouvera sa place dans l'ensemble des outils que les spécialistes des risques associés aux laves torrentielles déploient dans leurs analyses.

Remerciement

Ce travail est mené avec le soutien financier de la DGPR (Direction Générale de la Prévention des Risques) du MTECT (Ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires) au travers des accords-cadres DGPR-INRAE 2023 et 2024. L'auteur souhaite remercier Dieter Rickenmann et Alexandre Badoux pour leur relecture détaillée de cet article.

5 Références

- Bernard M., Boreggio M., Degetto M., Gregoret C. (2019) Model-based approach for design and performance evaluation of works controlling stony debris flows with an application to a case study at Rovina di Cancia (Venetian Dolomites, Northeast Italy). *Sci. Total Environ.* 688: 1373–1388. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.468
- Canelas R.B., Domínguez J.M., Crespo A.J.C., Gómez-Gesteira M., Ferreira R.M.L. (2017) Resolved Simulation of a Granular-Fluid Flow with a Coupled SPH-DCDEM Model. *J. Hydraul. Eng.* 143, 06017012. [doi.org/10.1061/\(asce\)hy.1943-7900.0001331](https://doi.org/10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001331)
- Carladous S., Piton G., Kuss D., Charvet G., Paulhe R., Morel M., Quefféléan Y. (2022) Chap. 13: French Experience with Open Check Dams: Inventory and Lessons Learnt Through Adaptive Management. In: Li Z., Li P., Yu Y., Shi P., Piton G. (eds) *Check Dam Construction for Sustainable Watershed Management and Planning*. Wiley Online Library, 247–266.
- CFBR (2013) *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages [Dam spillway design guidelines]*. Comité Français des Barrages et Réservoirs. barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2013_evc.pdf
- Gonzales de Linares M., Ronzani F., Recking A., Mano V., Piton G. (2022) Coupling Surface Grain-Size and Friction for Realistic 2D Modelling of Channel Dynamics on Massive Bedload Deposition. In: Gourbesville P., Caignaert G. (Éd.) *Advances in Hydroinformatics*, Springer Water. Singapore: Springer Nature. 795–808.
- Jakob M. (2021) Debris-Flow Hazard Assessments: A Practitioner's View. *Environ. Eng. Geosci.* 27: 153–166. doi.org/10.2113/EEG-D-20-00110
- Kaitna R., Chiari M., Kerschbaumer M., Kapeller H., Zlatic-Jugovic J., Hengl M., Hübl J. (2011) Physical and numerical modelling of a bedload deposition area for an Alpine torrent. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 11: 1589–1597. doi.org/10.5194/nhess-11-1589-2011
- MTECT (2023) *Guide méthodologique pour l'élaboration des plans de prévention des risques d'inondation des cours d'eau torrentiels*. Ministère de la Transition Ecologie et de la Cohésion des Territoires. 128 pp. ecologie.gouv.fr/prevention-des-inondations
- Piton G., Goodwin S.R., Mark E., Strouth A. (2022) Debris Flows, Boulders and Constrictions: A Simple Framework for Modeling Jamming, and Its Consequences on Outflow. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* 127. doi.org/10.1029/2021JF006447
- Vázquez-Tarrío D., Ruiz-Villanueva V., Garrote J., Benito G., Calle M., Lucía A., Díez-Herrero A. (2024) Effects of sediment transport on flood hazards: Lessons learned and remaining challenges. *Geomorphology* 446, 108976. doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108976

Abstract

Consideration of boulders and grain size sorting for a more realistic analysis of debris flow and debris flood risks

Debris floods and debris flows are characterized by very intense sediment and boulder transport. Blockage of structures by boulders is difficult to predict, but can have significant effects on the spatial distribution of deposits. This short article summarily describes a new tool available online (at platrisk.ige.inrae.fr), called MCB³ (Modeling of Clogging by Boulders of Barriers and Bridges). This tool enables simplified modeling of debris flows through structures (open check dams, bridges) and characterizes their effectiveness in trapping and attenuating peak flows, or the probability of openings becoming blocked.

Keywords: debris flows, debris floods, boulders, clogging, bridge, debris basins



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Zweiphasenmodellierung von Murgängen für die Überprüfung von Schutzmassnahmen

Perry Bartelt¹, Brian McArdell², Yves Bühler¹ und Christoph Graf²

¹WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, Davos, Schweiz

²Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, Birmensdorf, Schweiz

Die Ereignisse Ende Juni 2024 haben gezeigt, dass neue, konsistente Methoden zur Bewertung von Murgang-Schutzmassnahmen benötigt werden. Die Wahl geeigneter Gefahrenszenarien und die Modellierung der Murgänge sind zentral, um Schutzmassnahmen effektiv zu planen. Ein neues numerisches Zwei-Schichten-Modell, das feste und flüssige Phasen trennt, wurde eingesetzt, um die komplexe Dynamik von Murgängen besser nachzubilden. Zwei Fallstudien im Val Gresta (GR) und in Sorte (GR) zeigen realistische Ergebnisse und verdeutlichen die Bedeutung der Erosion für die Mobilität von Murgängen. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass künftige Schutzmassnahmen differenziertere Informationen zum Fliessverhalten erfordern. Eine stetige Verbesserung der Modelle durch eine gründliche Analyse vergangener Ereignisse ist entscheidend, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Gefahrenbewertung zu gewährleisten.

1 Einleitung

Die Schweiz hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Anstrengungen unternommen, um Schutzmassnahmen zur Minderung der Murganggefahr zu entwickeln. Zahlreiche Wildbäche wurden untersucht, um potenzielle Gefahrengebiete zu kartieren und Massnahmen wie Schutzbauten mit Rückhaltebecken, Sperren und Ablenkdamme sowie flexible Barrieren zu errichten. Die jüngsten Murgangereignisse in der Schweiz während der intensiven Regenfälle Ende Juni 2024 haben eindeutig die Bedeutung dieser Aufgabe unterstrichen. Zwei besondere Probleme sind dabei aufgetaucht:

Das erste Problem betrifft die Auswahl geeigneter Gefahrenszenarien für die Dimensionierung und Planung von Schutzmassnahmen. Der Murgangschutz ist besonders herausfordernd, da er die Definition realistischer Volumen-Frequenz-Beziehungen für eine bestimmte Region und einen bestimmten Wildbach erfordert. Das Problem wird durch die Erosionsproblematik (Iverson *et al.* 2011, Iverson 2012) weiter verkompliziert. Es erfordert ein quantitatives Wissen über die Erodierbarkeit von lockeren Wildbachbett-Sedimenten. Anders als beim Lawinenproblem, bei dem jährliche Aufzeichnungen von Ereignissen eine vertrauenswürdige Basis für mathematische Beziehungen liefern (Erosionshöhen können leicht mit Neuschneehöhen verknüpft werden;

Wiederkehrperioden können definiert werden), enthält das Murgangproblem wesentlich grössere Unsicherheiten, einschliesslich der Festlegung extremer Niederschlagsmengen und der Bestimmung des Anteils des Niederschlags, welcher Teil des Murgangabflusses wird. Die Kombination der Definition geeigneter Anfangs- und Erosions-Randbedingungen bedeutet, dass es in der Praxis eine grosse Bandbreite möglicher Annahmen und Methoden gibt, die zur Formulierung von Schutzmassnahmen angewendet werden können.

Das zweite Problem ergibt sich aus dem ersten. Die Modellierung von Murgängen wird zunehmend wichtiger, da sie möglicherweise die einzige Methode ist, um verschiedene Gefahrenszenarien umfassend zu untersuchen (Iverson 1997). Modelle können Wildbäche einem «Stresstest» (Belastungstest) unterziehen, um die Anfangs- und Erosionsvolumen zu bestimmen, die zu einer Überlastung bestehender Schutzmassnahmen führen würden. Die Murgangexperten müssen gut begründete Stressniveaus (Volumen-Frequenz-Beziehungen) definieren, realistische Erosionsbedingungen festlegen und gut getestete numerische Modelle entwickeln, die in der Lage sind, basierend auf diesen Bedingungen genaue Vorhersagen zu treffen. Diese Kombination von Methoden wird massgeblich bestimmen, wie effektiv die Schweiz den Murgangschutz in einem sich wandelnden Klima angeht, da Klimaszenarien in spezifische ingenieurtechnische Gefahrenszenarien mit extremen Niederschlagsmengen übersetzt werden müssen.

In diesem Artikel wenden wir ein numerisches Murgangmodell an, um zwei Wildbäche einem Belastungstest zu unterziehen und Schutzmassnahmen zu überprüfen. Das Modell verwendet nicht die oft verwendete einphasige Rheologie (Voellmy), sondern berücksichtigt sowohl den wassergesättigten, festen Anteil als auch den freien, mit Feinsediment gesättigten Wasseranteil. Die Trennung der zwei unterschiedlichen Phasen ist notwendig, um die Ablagerung und Entwässerung von Murgängen zu simulieren. Ein weiterer Vorteil ist die engere Eingrenzung bei der Auswahl der rheologischen Parameter. Die Erosionsalgorithmen von Frank *et al.* (2017) und Könz *et al.* (2024) wurden angepasst, um die Erosion von wassergesättigten Sedimenten im Gerinnebett einzubeziehen. Wir nutzen zwei aktuelle Murgangereignisse, um die Bedeutung der Auswahl von Gefahrenszenarien zu demonstrieren. Das erste ist ein kleines Murgangereignis, welches

an der CERC-Murgang-Versuchsanlage bei Val Gresta (GR) erfasst wurde. Es dient zur Festlegung der Modellparameter, welche die Trennung der festen und flüssigen Massen steuern. Die zweite Fallstudie ist das jüngste Ereignis in Sorte im Misox (GR). Das Ereignis wird mit und ohne Erosion simuliert, und die Ergebnisse werden mit der einphasigen Modellierung (RAMMS::DEBRISFLOW; Christen et al. 2010) verglichen.

2 Zwei-Schichten-Murgangmodell

Wie in Abb. 1 dargestellt, unterteilen wir den Murgang in zwei Schichten (Meyrat et al. 2022, 2023, 2024). Die erste Schicht (Index 1) besteht aus Felsblöcken und Geröll (Höhe h_s , Dichte ρ_s); der Zwischenraum zwischen

den Feststoffen ist mit einer schlammigen Flüssigkeit (Höhe $h_{f,1}$, Dichte ρ_f) und Luft (Höhe h_a , Dichte ρ_a) gefüllt. Wenn der Porenraum mit Wasser gefüllt ist, wird er als vollständig gesättigt betrachtet. Die zweite Schicht (Index 2) besteht vollständig aus einer schlammigen Flüssigkeit (Höhe $h_{f,2}$, Dichte ρ_f). Wir haben daher zwei Flüssigkeiten im Murgang: die sogenannte gebundene Flüssigkeit (bonded fluid) in der Geröll- oder Murgangschicht und das freie Wasser (free fluid) in der Flüssigkeits- oder Wasserschicht. Die beiden Schichten können sich unabhängig voneinander bewegen, was die Simulation der Ablagerung der festen Phase und der Entwässerung der freien Phase ermöglicht. Bereiche in der Überflutungszone können entweder von der festen Phase des felsigen Sediments (Übermuring) oder nur von der freien schlammigen Flüssigkeit bedeckt werden.

Die Gesamtmasse (M_1) der ersten Schicht mit der Dimension kg/m^2 beträgt

$$M_1 = M_s + M_{f,1} + M_a = \rho_s h_s + \rho_f h_{f,1} + \rho_a h_a = \rho_s \left(h_s + \frac{\rho_f}{\rho_s} h_{f,1} + \frac{\rho_a}{\rho_s} h_a \right) = \rho_1 (h_s + h_{f,1} + h_a). \quad (1)$$

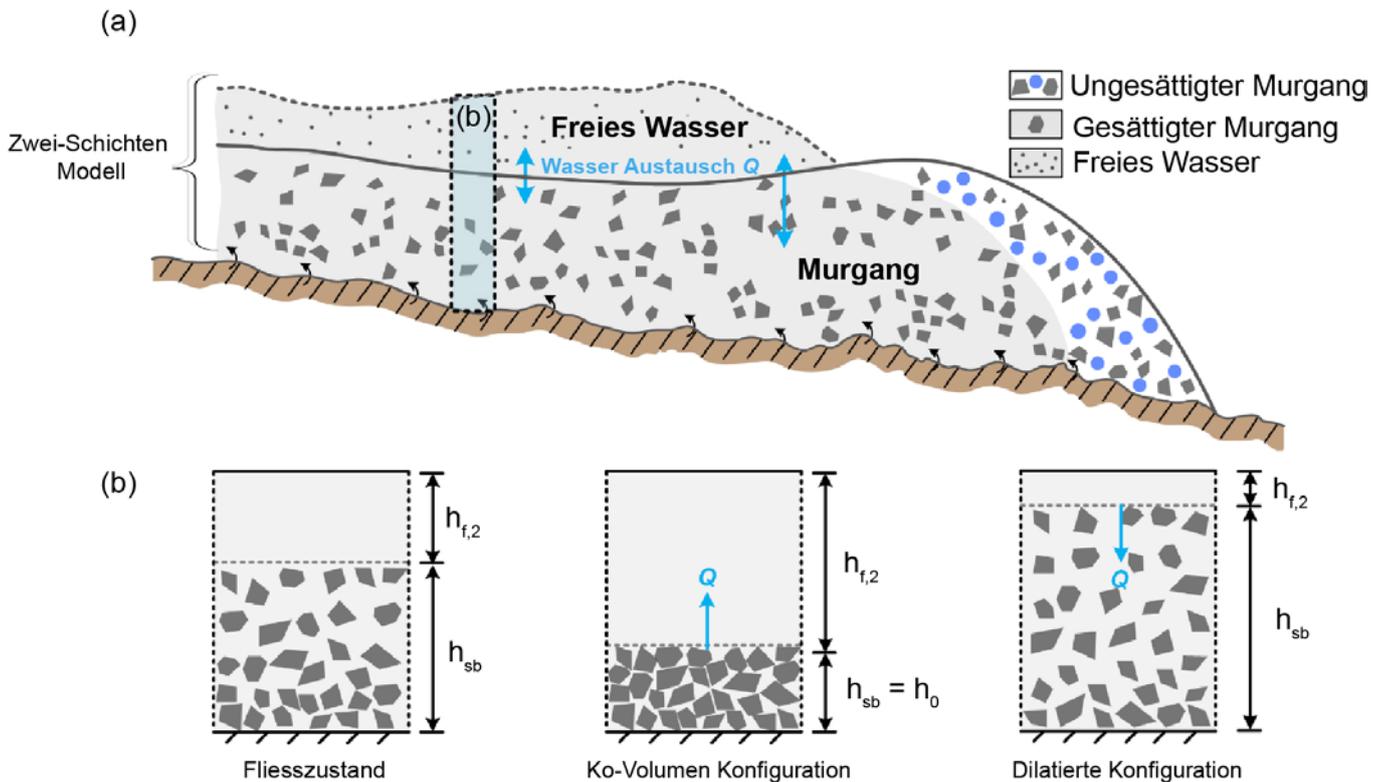


Abb. 1. (a) Der Murgang besteht aus zwei Schichten: der Murgangschicht (1), die feste Gesteine und gebundene Flüssigkeit enthält, und (2) der freien Wasserschicht. (b) Die feste Phase kann konfigurationsbedingte Veränderungen durchlaufen, die zu unterschiedlichen dilatierten und nicht dilatierten Fließzuständen führen. Die Ko-Volumen-Konfiguration charakterisiert die dichteste Packung des festen Gesteinsmaterials (Sediment). Es findet ein Massenaustausch zwischen der gebundenen und der freien Wasserschicht statt.

Die Dichte der Murgangsschicht kann in Bezug auf die unterschiedlichen Höhen von Feststoffen, gebundener Flüssigkeit und Luft ausgedrückt werden,

$$\rho_1 = \frac{\rho_s h_s + \rho_f h_{f,1} + \rho_a h_a}{h_s + h_{f,1} + h_a} \quad (2)$$

wobei $h_{f,1} + h_a = h_v$; h_v , der gesamte Hohlraum im fließenden Murgang ist. Wie wir sehen werden, ändert sich der Hohlraum je nach Grad der Dilatation des fließenden Feststoffs. Darüber hinaus berücksichtigen die Volumen- und Massenanteile die sich ändernde Konfiguration des festen Sediments. Die Gesamtmasse (M_2) der zweiten Schicht ist

$$M_2 = M_{f,2} = \rho_f h_{f,2} \quad (3)$$

und die Gesamtmasse des Murgangs ist daher

$$M = M_1 + M_2 = M_s + M_{f,1} + M_{f,2} + M_a = \rho_s h_s + \rho_f (h_{f,1} + h_{f,2}) + \rho_a h_a. \quad (4)$$

Da die Masse der Murgangsmischung aus unterschiedlichen Mengen an Feststoffen, Flüssigkeit und Luft besteht, können wir zwei zusätzliche Höhen definieren: die «reale» Höhe (h_{sb}) und die Pseudohöhe (h_1) der Murgangsschicht,

$$h_{sb} = h_s + h_{f,1} + h_a \quad h_1 = h_s + \frac{\rho_f}{\rho_s} h_{f,1} + \frac{\rho_a}{\rho_s} h_a \quad (5)$$

Der Vollständigkeit halber kann die Höhe der zweiten Schicht der freien Flüssigkeit auch als $h_2 = h_{f,2}$ geschrieben werden. Wir formulieren drei Massenbilanzgleichungen für die erste Schicht, die gebundenen und freien Flüssigkeiten,

$$\frac{\partial h_1}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h_1 \vec{v}_1) = \frac{\rho_f}{\rho_s} Q + \frac{\rho_e}{\rho_s} E \quad (\text{Murgangsschicht}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial h_{f,1}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h_{f,1} \vec{v}_1) = Q + \phi E \quad (\text{Gebundene Flüssigkeit}) \quad (7)$$

$$\frac{\partial h_{f,2}}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h_{f,2} \vec{v}_2) = -Q. \quad (\text{Freie Fluidschicht}) \quad (8)$$

In diesen Gleichungen ist Q der Massenaustausch zwischen der gebundenen und der freien Flüssigkeit; E ist die Erosionsrate des Sediments und ϕ der volumetrische Flüssigkeitsanteil der Erosionsschicht,

$$\phi = \frac{\rho_e - \rho_s}{S_a \rho_f + (1 - S_a) \rho_a - \rho_s} S_a. \quad (9)$$

Tabelle 1 zeigt die Volumen- und Massenanteile des Zwei-Schichten-Modells in Bezug auf die definierten Fließhöhen und Dichten. Es wird angenommen, dass die Bodensedimente vollständig oder teilweise gesättigt sind (S_a). Die Geschwindigkeit jeder Fließschicht (\vec{v}_1, \vec{v}_2) wird durch die Impulsbilanzgleichungen bestimmt,

$$\frac{\partial (h_1 \vec{v}_1)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h_1 \vec{v}_1 \otimes \vec{v}_1 + \frac{g h_1^2}{2} I) + g h_1 \vec{\nabla} (J + \frac{\rho_f}{\rho_s} h_2) = -\frac{\vec{S}_1}{\rho_s} + \frac{\rho_f}{\rho_s} \vec{P} \quad (10)$$

$$\frac{\partial (h_2 \vec{v}_2)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (h_2 \vec{v}_2 \otimes \vec{v}_2 + \frac{g h_2^2}{2} I) + g h_2 \vec{\nabla} (J + h_1) = -\frac{\vec{S}_2}{\rho_f} + \vec{P}. \quad (11)$$

wobei die rechte Seite den Reibungswiderstand (\vec{S}_i) für jede Schicht $i = 1, 2$ enthält. Die Gerinneneigung wird durch «J» angegeben; die anderen Gradiententerme berücksichtigen die Oberfläche des Murgangs, die das Vorrücken des freien Wassers über die sperrige Murgangfront behindert, die oft höher ist als das Murgangende (Murgangschwanz). Darüber hinaus modellieren wir die Blockierungseffekte der felsigen Murgangfront. Hierbei wenden wir eine Voellmy-Rheologie für die Mischung mit zwei Parametern (μ_i, ζ_i) für jede Schicht an,

$$\vec{S}_i = (\mu_i g_z h_i + \frac{g \|v_i\|^2}{\xi_i}) \rho_i \vec{e}_i. \quad (12)$$

Wir nehmen typischerweise an, dass die Coulomb-Reibung der Murgangsschicht ungleich null ist ($0 < \mu_1 \leq 0,3$) die Coulomb-Reibung der Flüssigkeitsschicht gleich null ist ($\mu_2 = 0$) und die geschwindigkeitsquadratabhängige Reibung für die Murgang- und freien Flüssigkeitsschichten gleich ist ($\xi_1 = \xi_2$). In diesem Fall enthält das Modell nur zwei freie Parameter (μ_1, ξ_1). Der Vektor \vec{e}_i stellt sicher, dass die Reibung immer in die entgegengesetzte Richtung der Fließgeschwindigkeit wirkt. Der Vektor \vec{P} ist die Rate des Impulsaustauschs, die mit der Massenänderung Q verbunden ist,

$$\vec{P} = \begin{cases} Q\vec{v}_2 & \dot{h}_{sb} > 0 \\ Q\vec{v}_1 & \dot{h}_{sb} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

Um den Massen- Q und Impulsaustausch \vec{P} zwischen den Murgangsschichten zu bestimmen, wenden wir die Kornfließ-Theorie (Haff 1983) an und berechnen die Konfigurationsenergie D des festen Murgangmaterials,

$$D = (\rho_s - \rho_f)h_s g_z \frac{1}{2}(h_{sb} - h_0). \quad (14)$$

Da wir die Flüssigkeitsdichte von der Feststoffdichte abziehen, nehmen wir eine vollständig gesättigte Murgangsschicht an. Die Konfigurationsenergie D wird durch eine Produktions- (Parameter α) und Verfalls- (Parameter β) bestimmt (siehe Haff 1938),

$$\frac{\partial D}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (D\vec{v}_1) = \alpha \dot{W}_f - \beta D. \quad (15)$$

Der Murgangkörper dehnt sich mit zunehmender Scherarbeit $\dot{W}_f = \vec{S}_1 \cdot \vec{v}_1$ aus; jedoch nimmt die Ausdehnung mit den kollisionalen Eigenschaften der Materialien in der Murgangsschicht ab. Wir finden $\alpha = 0,2$ und $\beta = 0,07$ /s als geeignete Werte für zahlreiche modellierte Fälle. Der Abklingparameter β ist im Vergleich zu Schneelawinen klein, ein Hinweis auf elastische Wechselwirkungen zwischen dem festen Sediment und dem Auftrieb. Der Massenaustausch Q_1 steht in Zusammenhang mit der Änderung der Konfigurationsenergie D und somit dem Unterschied zwischen den Hohlräumen und den gebundenen Wasserhöhen,

$$\int_{t_0}^{t_0+\Delta t} dQ_1 = h_v - h_{sb}. \quad (16)$$

Ein weiterer Prozess der Freiwasserproduktion entsteht durch die Wasserdiffusion, die vom Wasserpotenzialgradienten innerhalb des Murgangs abhängt:

$$Q_2 = \kappa \sqrt{\left(\frac{\partial h_{f,1}}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial h_{f,1}}{\partial y}\right)^2}, \quad (17)$$

wobei κ (m/s) der Faktor ist, der die Diffusionsrate steuert. Dieser Prozess tritt während der gesamten Bewegung des Murgangs auf und steuert die Entwässerungsrate in der Ablagerungsphase.

Tab. 1. Volumen- und Massenanteile.

Symbol	Formulierung	Bedeutung
$V_s, V_{f,1}, V_{f,2}, V_a$	$\frac{1}{h_s+h_{f,1}+h_{f,2}+h_a}[h_s, h_{f,1}, h_{f,2}, h_a]$	Volumetrischer Anteil
$M_s, M_{f,1}, M_{f,2}, M_a$	$\frac{1}{\rho_s h_s + \rho_f (h_{f,1} + h_{f,2}) + \rho_a h_a}[\rho_s h_s, \rho_f h_{f,1}, \rho_f h_{f,2}, \rho_a h_a]$	Massenanteil

3 Fallstudie bei Val Greva

Die WSL hat eine Murgang-Beobachtungsstation im Wildbacheinzugsgebiet Val Greva in der Nähe des Dorfes Madulain (GR) im Engadin eingerichtet (Abb. 2). Aufgrund seiner relativ geringen Grösse konnten Drohnen (UAS) eingesetzt werden, um aktuelle und räumlich hochauflösende digitale Höhenmodelle zu erstellen. Während einer Regenperiode am 27. August 2023 trat im benachbarten Wildbach (Val Purschigl) ein Murgang auf, der einen Teich auf dem Golfplatz von Zuoz füllte, der als kleines Rückhaltebecken diente. Glücklicherweise war der Wildbach auch im digitalen Höhenmodell

des Val Greva enthalten. Unmittelbar nach dem Ereignis, am 31. August 2023, wurde ein Drohnenflug organisiert, der es uns ermöglichte, den Verlauf des Murganges nachzuverfolgen und das Murgangsvolumen zu messen, einschliesslich einer Bestimmung der stark variierenden Erosionstiefen. Das Drohnen-Orthophoto zeigte auch eine gewisse Entwässerung des Murganges, insbesondere in der Auslaufzone um den Teich (Abb. 2).

Wir simulierten den Murgang in Val Purschigl sowohl mit dem RAMMS-Ein-Phasen-Modell als auch mit dem Zwei-Schichten-Modell. Wir starteten die Simulationen jeweils mit demselben Anfangsvolumen (1000 m^3) und einem Spitzenabfluss von $40 \text{ m}^3/\text{s}$ (gesam-

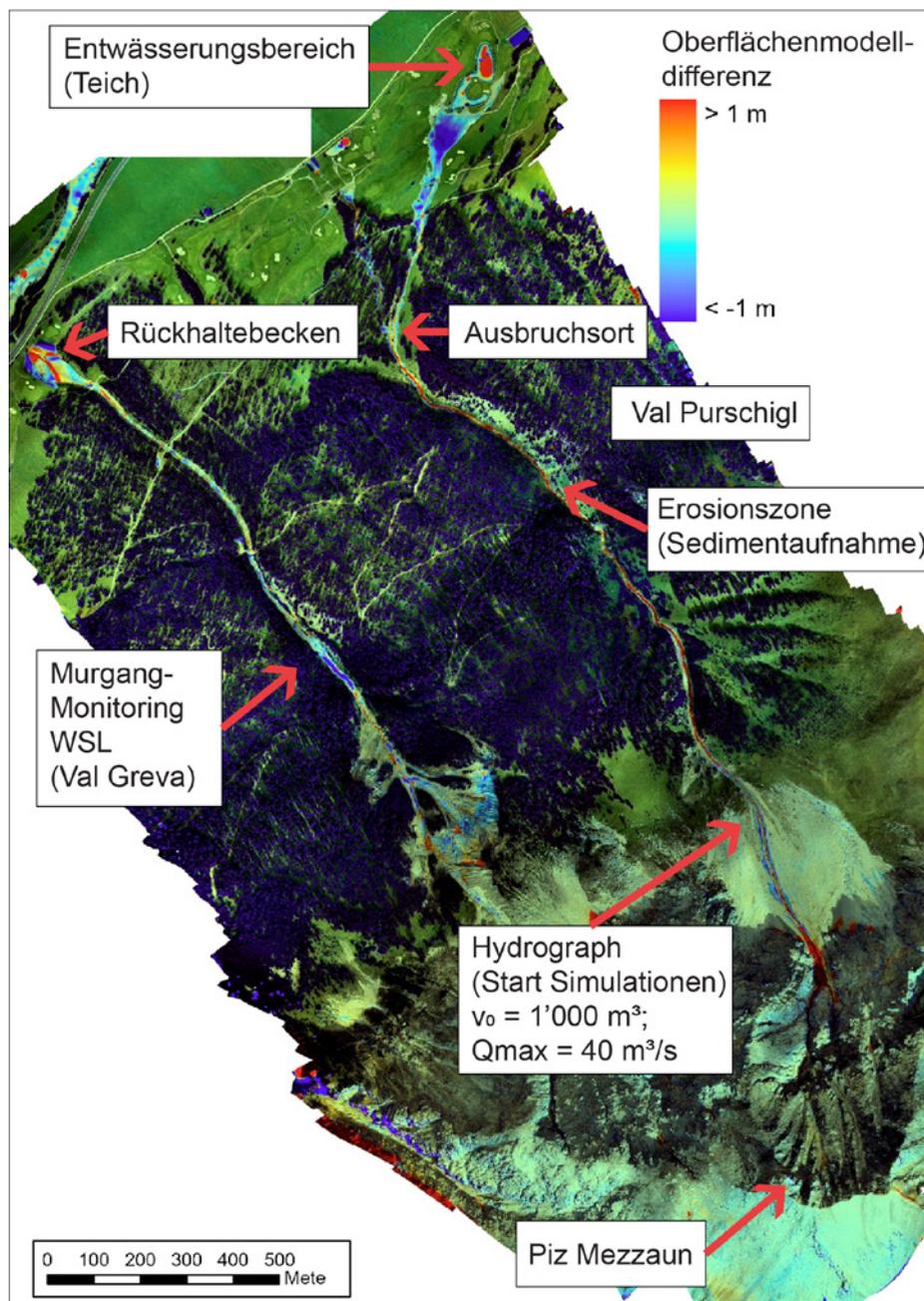


Abb. 2. Orthophoto nach dem Murgang bei Val Greva im Val Purschigl, welches den Unterschied zwischen den Höhenmodellen vor und nach dem Ereignis zeigt (negative Werte, blau = Ablagerungen; positive Werte, rot = Erosion).

te Hydrographzeit $t = 50$ s). Der Hydrograph wurde am Fuss der nördlichen Sturzschutthalde des Piz Mezzaun zwischen 2300 m und 2400 m positioniert. Frühere Besuche vor Ort und eine Luftbildanalyse deuteten auf Murganginitiation an dieser Stelle hin. Wir gaben dieselben Voellmy-Reibungsparameter für den Ein-Phasen-Murgang ($\mu = 0,15$, $\zeta = 200$ m/s²) und die feste Schicht des Zwei-Schichten-Modells an (die Coulomb-Reibung der Flüssigkeit ist null). Die Ereignisse wurden mit und ohne Erosionseintrag simuliert. Im Ein-Phasen-Modell betrachten wir nur trockenes erodierbares Sediment, während im Zwei-Schichten-Modell eine Schüttdichte angegeben wird, die es uns ermöglicht, einen 100 %igen Sättigungsgrad des erodierten Sediments zu definieren. Ausserdem fügt der Erosionseintrag im Zwei-Schich-

ten-Modell zusätzliches Wasser zum Murgang hinzu. Die Simulationen wurden auf einer digitalen Geländegrundlage von 0,5 m (eigene Erfassung mittels UAV) und einer numerischen Gitterauflösung von 1,0 m durchgeführt.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 3 dargestellt. Alle Modelle sagen zwei Ausbrüche voraus, die entstehen, nachdem der Wildbach auf den Kegel fliesst. Geländeformen und Vegetationsnarben zeigen, dass dies ein realistisches Ergebnis ist. Offensichtlich existierten diese Fliesswege bereits in der Vergangenheit. Die Schwachstelle befindet sich bei der Querung des Wanderwegs. Der Brückenquerschnitt war anscheinend nicht ausreichend für die Ereignisgrösse. Ein Teil des Murgangs folgt dem angestammten Gerinneverlauf im zentralen Teil des Kegels.

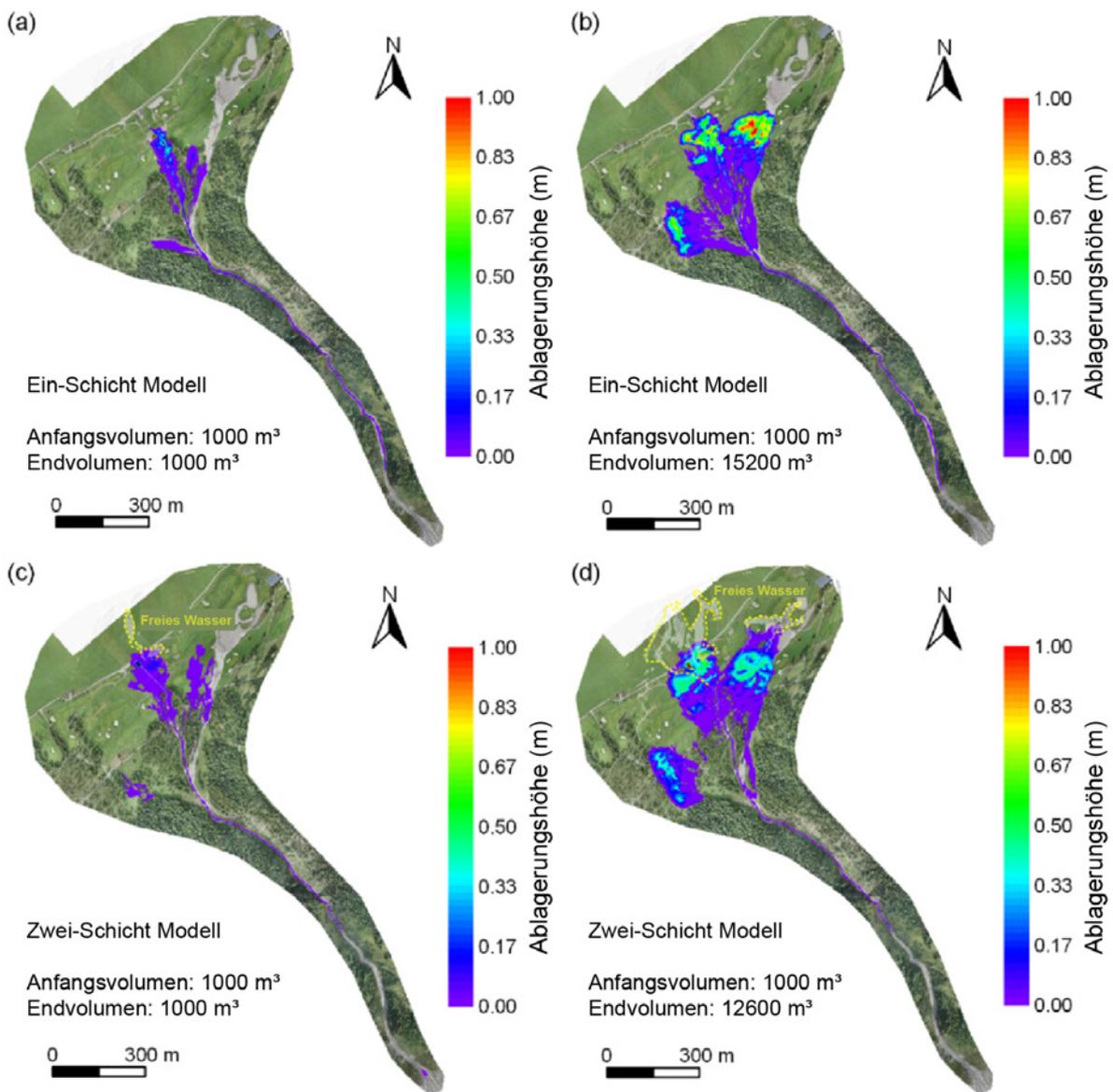


Abb. 3. Simulationsergebnisse Val Purschigl. Die oberen beiden Figuren zeigen die Simulationsergebnisse für das Ein-Schicht-Modell ohne (a) und mit (b) Erosion. Die unteren Figuren zeigen die Ergebnisse der Zwei-Schichten-Simulation ohne (c) und mit (d) Erosion. Die gelben gestrichelten Linien repräsentieren den freien Wasserabfluss.

Tab. 2. Modellparameter.

Symbol	Wert	Bedeutung
μ_i	$\mu_1 = 0,15; \mu_2 = 0,00$	Coulomb-Reibung
ξ_i	$\xi_1 = 200 \text{ m/s}^2; \xi_2 = 200 \text{ m/s}^2$	Turbulente-Reibung
k	$k = 10 \text{ m/s}$	Entwässerung
α, β	$\alpha = 0,2; \beta = 0,07/\text{s}$	Grain Flow

Die Simulationsergebnisse ohne Erosionseintrag scheinen sowohl die Auslaufweite als auch die Ablagerungshöhen zu unterschätzen; Simulationen mit Erosionseintrag scheinen die Ablagerungshöhen und die Ausbrüche zu überschätzen. Wir haben dieselben Völlmy-Reibungskoeffizienten für das Ein-Schicht- und das Zwei-Schichten-Modell angewendet. Die Position des festen Schutts im Zwei-Schichten-Modell ist an der richtigen Stelle, ebenso wie die Bildung von freiem Wasserabfluss. Das Ein-Schicht-Modell, mit den gleichen Reibungskoeffizienten, unterschätzt die Auslaufweite, was darauf hinweist, dass die Flüssig-Fest-Interaktion im Zwei-Schichten-Modell zu einer höheren Mobilität des Murganges beiträgt. Die Menge an freiem Wasser in den Simulationen wird nicht direkt angegeben, sondern ergibt sich aus der Spezifikation einer 100 %igen Sättigung im Eingabe-Hydrographen und den Erosionseintragsbedingungen.

4 Fallstudie Sorte

Wir untersuchten das Murgangereignis, das am 21. Juni 2024 die Siedlung Sorte südlich von Lostallo im Misox (GR) getroffen hat, mit zwei Hauptzielen: (a) die Unterschiede zwischen Ein-Phasen- und Zwei-Schichten-Modellen zu vergleichen und (b) die Auswirkungen von Simulationen mit und ohne Erosionseintrag zu bewerten. Der Murgang trat während des extremen Regenwetters auf der Alpensüdseite Ende Juni 2024 auf. Er überrannte den zentralen Teil des Wildbachkegels und zerstörte mehrere Gebäude (Abb. 4). Einige Gebäude wurden von der Murgangswelle nur knapp verschont und blieben unbeschädigt, was auf einen komplexen Ereignisablauf und Ablagerungsprozess hinweist. Die feste Phase des Murgangs erreichte direkt den Fluss Moesa, wobei freie Flüssigkeitsablagerungen deutlich sichtbar um die festen Ablagerungsbereiche zu sehen sind. Detaillierte Abklärungen des Ereignisablaufes sind zum Zeitpunkt unserer ersten Untersuchungen noch im Gange und fließen nicht in diese Analyse ein.

Wir simulierten den Murgang (Hauptereignis, welches die Gebäude zerstörte) von Sorte auf einer digitalen Geländegrundlage von 0,5 m (SwissSURFACE3D, Stand 2020) und einer numerischen Gitterauflösung von 1,0 m unter Verwendung sowohl des Ein-Phasen- als auch des Zwei-Schichten-Modells. Wir starteten die Simulatio-

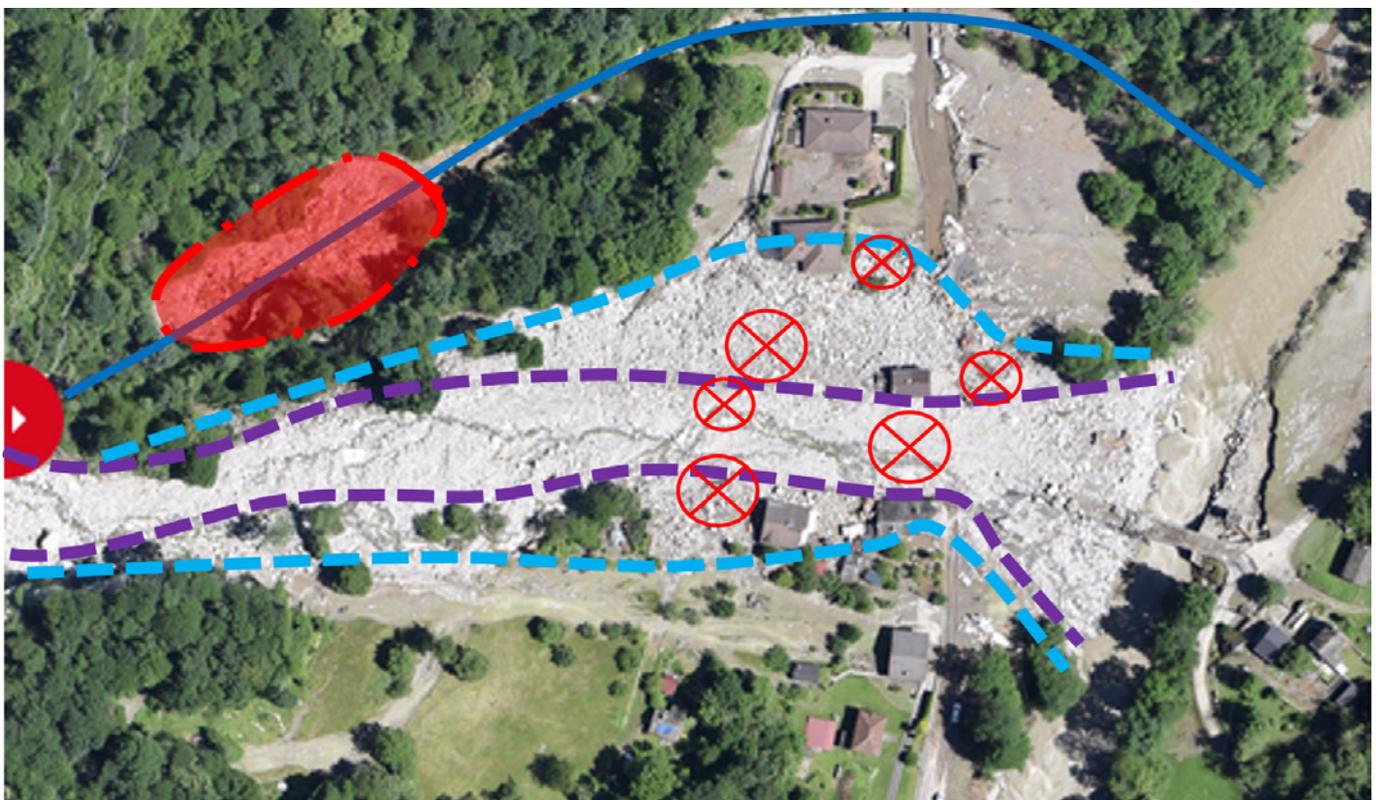


Abb. 4 Swisstopo-Bild der Zerstörung im Ortsteil Sorte in der Gemeinde von Lostallo, Misox, Schweiz. Ein Murgang (violett) überrollte (hellblau) die Siedlung und zerstörte (rote Kreuze) mehrere Gebäude. Beachten Sie das teilgefüllte Rückhaltebecken (rot) und den ursprünglichen Bachlauf (dunkelblau) nördlich des Dorfes ohne eindeutige Murgangspuren. Foto © Swisstopo

nen mit einem $V_0 = 20\,000\text{ m}^3$ -Hydrographen und einem Spitzenabfluss von $400\text{ m}^3/\text{s}$. Ebendieser Wert basiert auf einer semi-analytischen Beziehung zwischen dem maximal zu erwartenden Abfluss und einem bestimmten Ereignisvolumen (Rickenmann 1999). Diese eher extremen Bedingungen basieren auf dem grossen und steilen Einzugsgebiet und den Nachereignis-Fotografien, die einen etwa 40 m breiten, stark erodierten Abflussquerschnitt im unteren Gerinneabschnitt zeigen, was auf einen aussergewöhnlich intensiven Abfluss hinweist. Im Zwei-Schichten-Modell variierte die Dichte des Abflusses im Laufe der Zeit, beginnend mit einer granularen Front und einem flüssigeren Ende. Die gesamte Abflusszeit betrug etwas mehr als 100 s . Im Vergleich zum Beispiel beim Val Gresta wählten wir etwas höhere Reibungswerte ($\mu = 0,20$, $\zeta = 200\text{ m/s}^2$), um das grosse, blockige Sediment zu modellieren und dem deutlich steileren Kegel

Rechnung zu tragen. Wir nahmen einen Entwässerungskoeffizienten von $\kappa = 10\text{ m/s}$ an.

Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 5 für die Modellläufe mit Erosion dargestellt. Im Ein-Schicht-Modell wurden insgesamt $43\,100\text{ m}^3$ Sediment zusätzlich erodiert, während im Zwei-Schichten-Modell eine etwas grössere Menge durch den Murgang erodiert wurde, nämlich $49\,500\text{ m}^3$. Da die Erosion vom Fließverhalten des Murgangs abhängt, erodieren die beiden Modelle unterschiedliche Sedimentmengen, obwohl sie mit den exakt gleichen Anfangsmengen gestartet sind. Abbildung 5a zeigt das mit dem Ein-Schicht-Modell berechnete Wirkungsgebiet. Obwohl es beidseits Ausbrüche gibt, erreicht die Masse den Siedlungsbereich nicht. Sie stoppt ausserhalb der Siedlung im Bereich des Geschiebesammlers. Der Geschiebesammler wird dabei überfüllt. Abbildung 5b zeigt die Ergebnisse des Zwei-Schicht-

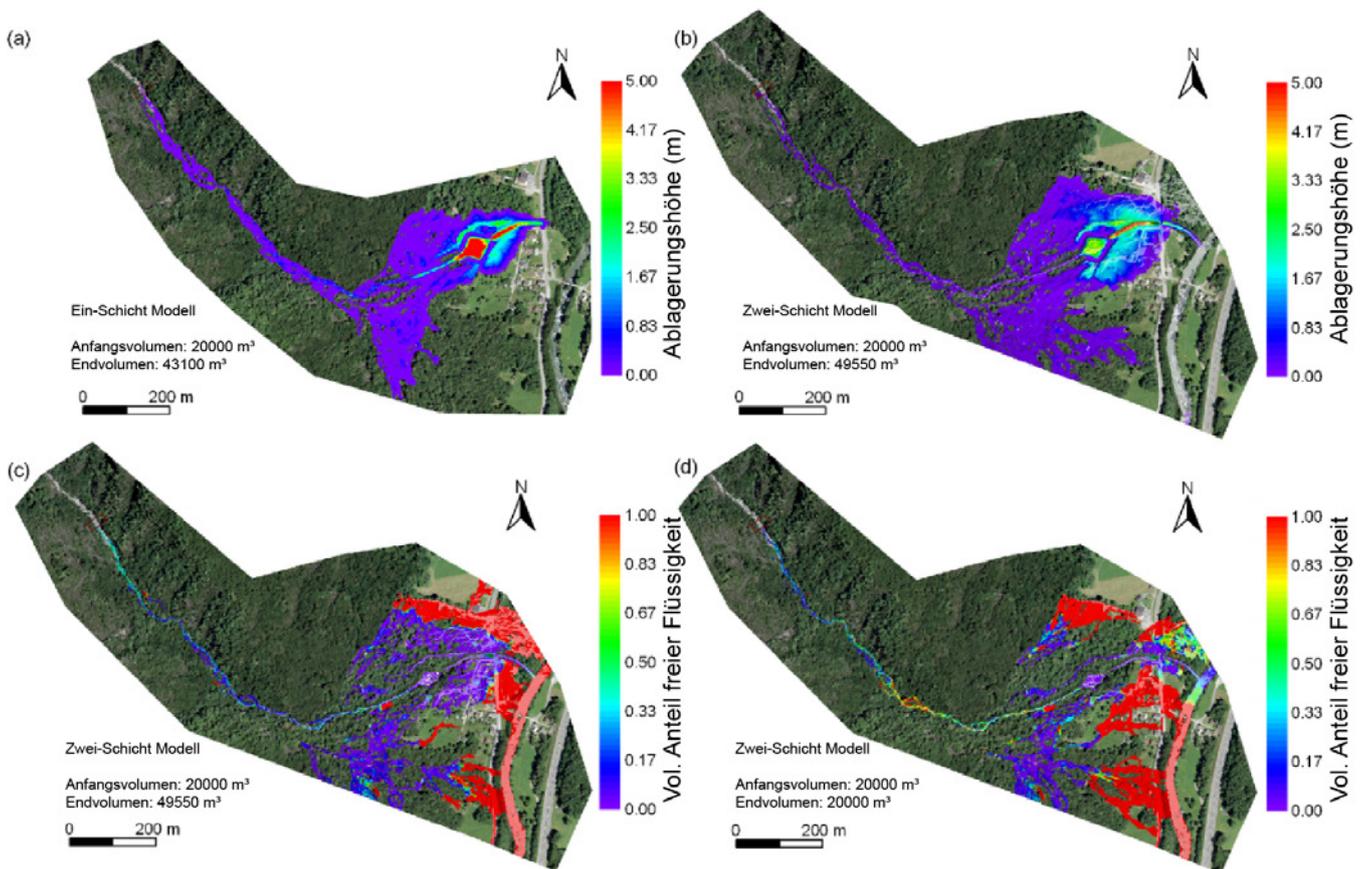


Abb. 5. Simulation des Ereignisses Sorte in der Gemeinde von Lostalio (GR) mit und ohne Erosion von Sedimenten. (a) Simulationsergebnisse unter Verwendung des Ein-Phasen-Modells und Erosion von Sedimenten (Anfangsvolumen $V_0 = 20\,000\text{ m}^3$ und Erosionsvolumen $43\,100\text{ m}^3$). Der Murgang erreicht die Häuser nicht. (b) Simulation unter Verwendung des Zwei-Schichten-Modells und Erosion von Sedimenten (Anfangsvolumen $V_0 = 20\,000\text{ m}^3$ und Erosionsvolumen $49\,500\text{ m}^3$). Festes Geröll lagert sich in den Häusern ab. (c) Volumetrischer Anteil der freien Flüssigkeit (rot = 100%). Der Murgang beginnt auf der Kantonsstrasse zu entwässern. (d) Volumetrischer Anteil der freien Flüssigkeit für das Zwei-Schichten-Modell ohne Erosion von Sedimenten. Der Murgang entwässert oberhalb der Häuser, festes Geröll erreicht das Dorf nicht. Sowohl das Ein-Phasen- als auch das Zwei-Schichten-Modell scheinen in diesen ersten Auswertungen das Ereignis nicht ganz korrekt darzustellen: die berechneten Ablagerungen befinden sich zu weit im Norden. Dies deutet darauf hin, dass die Modellierung des Ausbruchs von Murgangmaterial ein aktuelleres DEM erfordert oder dass entweder vorausgegangene Ereignisse einen grösseren Einfluss auf das Fließverhalten hatten, als es ein DEM Stand 2020 erfassen kann oder im Ereignisablauf Veränderungen zu Stande kamen, die in unseren bisherigen Simulationen noch nicht vollständig berücksichtigt wurden.

ten-Modells; das feste Sediment in der Zwei-Schichten-Rheologie ist mobiler und erreicht die Kantonsstrasse sowie den nördlichen Teil der Siedlung, obwohl es die gleichen Reibungswerte wie das Ein-Schicht-Modell hat. Der Murgang entwässert in der Siedlung (Abb. 5c). Die freie Flüssigkeit fliesst zum Vorfluter und überschwemmt dabei einen beträchtlichen Teil der Siedlung und der Kantonsstrasse. In den Zwei-Schichten-Simulationen ohne Erosion erreicht das feste Sediment die Siedlung nicht und der Murgang entwässert oberhalb der Häuser (Abb. 5d), was darauf hinweist, dass auch im Fall ohne Erosion ein Teil der Siedlung überschwemmt worden wäre.

5 Diskussion und Schlussfolgerungen

Wir haben zwei aktuelle Murgang-Fallstudien mit einem zweischichtigen numerischen Modell simuliert. Dieses Modell trennt den Murgang in eine gemischte Feststoff-Flüssigkeits-Schicht und eine freie Flüssigkeitsschicht. Die Murgangschicht besteht aus dichtem, felsigem Sediment, das die Flüssigkeitsphase in den Zwischenräumen zwischen dem festen Geröll einfängt und verhindert, dass sich die Flüssigkeit mit einer anderen Geschwindigkeit als die feste Phase bewegt. Folglich beschreibt eine einzige Impulsgleichung die Bewegung dieser Phase. Die freie Flüssigkeitsschicht ist eine Mischung aus Wasser und feinen Sedimenten, die entsteht, wenn die eingeschlossene Flüssigkeit aus dem sich bewegenden festen Geschiebe herausgepresst wird. Wenn der Murgang zu stoppen beginnt, verkleinert sich der Porenraum zwischen den felsigen Sedimenten, was zur Entwässerung des Murgangs führt. Das Modell ermöglicht die frühe Ablagerung der festen Phase, das Entweichen der Flüssigkeit und die weitere Bewegung der freien Flüssigkeit. Dieser Prozess erzeugt Überschwemmungswellen, die oft grosse Gebiete überfluten und weit über die Reichweite der festen Phase hinausgehen. Wir sprechen hier von fluvialen Weiterverfrachten von Murgang-Ablagerungen (fluvial reworking). Solches Fliessverhalten haben wir in der Praxis häufig beobachtet, einschliesslich der in diesem Artikel vorgestellten Fallstudien. Beide Fallstudien liefern Beweise für diesen Prozess. Allerdings zeigt das Schadensbild in Sorte in diesen Bereichen sehr grosse und zahlreiche Felsblöcke, und es muss weiter untersucht werden, wie diese Geschiebemassen in den zentralen Teil des Kegels gelangt sind.

Wir können die Gefahrenzone nicht länger durch die Modellierung einer einzigen Phase beschreiben; stattdessen müssen wir die komplexe Feststoff-Flüssigkeits-Zusammensetzung des Murgangs anerkennen. Die Einführung eines zweischichtigen Modells bietet Naturgefahrenfachleuten ein neues Werkzeug, um die inhärente Komplexität von fliessenden Murgängen zu erfassen.

Das zweischichtige Modell ist eine physikalisch genauere Beschreibung eines Murganges. Es sind aber weitere und umfangreichere Untersuchungen erforderlich, insbesondere mit Daten über die Entwässerung des Murgangs. Es wird damit möglich, sowohl die Ablagerung des Sediments als auch den Strömungsweg der durch die Entwässerung des Murgangs entstehenden Flüssigkeit vorherzusagen. Eine solche Zweiteilung kann die Planung und Gestaltung von Schutzmassnahmen erheblich beeinflussen, da unterschiedliche Kriterien für die unterschiedlichen Dichten und das Strömungsverhalten der beiden Schichten erforderlich sind. In Zukunft könnte es möglich werden, das wirkliche Verhalten von fliessenden Murgängen noch detaillierter zu modellieren, einschliesslich der Levée-Bildung an den seitlichen Begrenzungen sowie der (temporären) Stauung oder dem Stehenbleiben von Murgängen mit festem Geröll, was wiederum die Bildung und anschliessende Freisetzung von freier Flüssigkeit im Wildbachgerinne oder auf dem Wildbachkegel induziert. Das zweischichtige Modell liefert somit Simulationsergebnisse, die erheblich von denen traditioneller Ein-Phasen-Modelle abweichen. Ein wichtiger Befund ist, dass Ausbrüche bei geringeren Fliessvolumina auftreten könnten, was erhebliche Auswirkungen auf die Gefahrenbeurteilung in der Praxis haben könnte.

Derzeit verwenden Ein-Schicht-Modelle Reibungsparameter, die fallweise kalibriert werden müssen. Es scheint jedoch, dass die Reibung durch die Flüssigkeits-sättigung des fliessenden Geschiebes gesteuert wird. Wenn wir die Struktur (Flüssig-Feststoff-Zusammensetzung) eines Murgangs von der Front bis zum Schwanz simulieren können, wird es möglich sein, konstante Reibungswerte anzuwenden, die sich nur mit dem Wassergehalt ändern. In dieser Studie haben wir nur ein Set von Reibungsparametern mit zwei Reibungswerten verwendet, ohne eine Parameteroptimierung durchzuführen. Die Aufteilung des Murgangs in feste und freie Flüssigkeitsschichten ermöglicht es Naturgefahrenfachleuten, Modellszenarien auszuwählen, die besser mit den geologischen Gegebenheiten, den Wildbacheigenschaften und den allgemeinen klimatischen Bedingungen eines spezifischen Standorts übereinstimmen. Dieses Ergebnis ist bedeutsam, da es bei der Gefahrenbeurteilung von Murgängen, im Gegensatz etwa zu Schneelawinen, oft einen Mangel an genügenden und nützlichen historischen Daten gibt.

Die Simulation von Murgängen mit Zwei-Schichten-Modellen ist nicht ohne Nachteile. Wir haben ein Erosionsmodell angewendet, das auf experimentellen Messungen basiert, aber ursprünglich für Ein-Phasen-Modelle entwickelt wurde (vgl. auch Könz *et al.* 2024). Unsere Simulationsergebnisse zeigten, wie empfindlich die Ergebnisse auf die gegebene Dichte und Sättigung des erodierten Sediments reagieren. Murgangfachleute stehen nun vor der schwierigen Aufgabe, nicht nur die

Erodierbarkeit des Wildbachsediments zu definieren (Parameter E), sondern auch die Materialeigenschaften des Sediments. Dazu gehören die Massendichte (Porenraum) und der Wassergehalt bzw. das Sättigungsmass. Diese Eigenschaften sind selten bekannt und können lokal stark variieren. Zukünftige Simulationsrichtlinien müssen entwickelt werden, um Erosionsraten und maximale Erosionstiefen zu quantifizieren, dabei jedoch flexibel genug sein, um der grossen Variabilität, die Wildbächen inhärent ist, Rechnung zu tragen.

Das ultimative Ziel unserer Arbeit ist es, robuste Methoden zu entwickeln, um Wildbachbeurteilungen und implementierte Schutzmassnahmen Belastungstests, sogenannten «Stresstests», zu unterziehen. Dieser Prozess umfasst zwei wesentliche Komponenten: (1) die Formulierung von Volumen-Frequenz-Beziehungen, welche die Erosion von Sedimenten einbeziehen, und (2) die Entwicklung numerischer Modelle, die diese Volumen-Frequenz-Beziehungen nutzen, um die Gefährdung durch Murgänge genau vorherzusagen. Die Anwendung von Zwei-Schichten-Modellen könnte ein Schritt in diese Richtung sein. Dennoch stehen die Naturgefahrenexperten in der Schweiz nun vor einer gewaltigen Herausforderung, deren Bewältigung wahrscheinlich Jahre in Anspruch nehmen wird. Es besteht Unsicherheit darüber, ob die vorhandenen historischen Murgangbeobachtungen ausreichende Daten für diese Aufgabe liefern. Der einzige gangbare Weg nach vorne beinhaltet eine gründliche Untersuchung und Rückberechnung vergangener Murgangereignisse, um ein umfassendes Verständnis aufzubauen und die Vorhersagemodelle zu verbessern. Dieser zeitintensive und langfristige Ansatz ist entscheidend, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit zukünftiger Murgangefahrenbewertungen sicherzustellen.

6 Literatur

- Christen M., Kowalski J., Bartelt P. (2010) RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. *Cold Reg. Sci. Technol.* 63, 1–2: 1–14. doi.org/10.1016/j.coldregions.2010.04.005
- Frank F., McArdell B.W., Oggier N., Baer P., Christen M., Velli A. (2017) Debris-flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchments, Switzerland: sensitivity testing of field-data-based entrainment model. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 17, 5: 801–815.
- Haff, P.K. (1983) Grain flow as a fluid-mechanical phenomenon. *J. Fluid Mech.* 134: 401–430.
- Iverson, R.M. (1997) The physics of debris flows. *Rev. geophys.* 35, 3: 245–296.
- Iverson R.M. (2012) Elementary theory of bed-sediment entrainment by debris flows and avalanches. *J. Geophys. Res.: Earth Surf.* 117(F3).
- Iverson R.M., Reid M.E., Logan M., LaHusen R.G., Godt J.W., Griswold J.P. (2011) Positive feedback and momentum growth during debris-flow entrainment of wet bed sediment. *Nat. Geosci.* 4, 2: 116–121.
- Könz A.L., Hirschberg J., McArdell B.W., Mirus B.B., de Haas T., Bartelt P., Molnar P. (2024) Debris-flow entrainment modelling under climate change: Considering antecedent moisture conditions along the flow path. *Earth Surf. Process. Landf.* 49, 10: 2950–2964. doi.org/10.1002/esp.5868
- Meyrat G., McArdell B., Ivanova K., Müller C., Bartelt P. (2022) A dilatant, two-layer debris flow model validated by flow density measurements at the Swiss Illgraben test site. *Landslides* 19, 2: 265–276.
- Meyrat G., McArdell B., Müller C.R., Munch J., Bartelt P. (2023) Voellmy-type mixture rheologies for dilatant, two-layer debris flow models. *Landslides* 20, 11: 2405–2420.
- Meyrat G., Munch J., Cicoira A., McArdell B., Müller C.R., Frey H., Bartelt P. (2024) Simulating glacier lake outburst floods (GLOFs) with a two-phase/layer debris flow model considering fluid-solid flow transitions. *Landslides* 21, 3: 479–497.
- Rickenmann D. (1999) Empirical relationships for debris flows. *Nat. Hazards* 19, 1: 47–77. doi.org/10.1023/A:1008064220727

Abstract

Two-phase modeling of debris flows for the assessment of protection measures

The recent events in late June 2024 have clearly demonstrated the need for new and consistent methods to assess debris flow protection measures. The selection of appropriate hazard scenarios and the modeling of debris flows are crucial for effective protection planning. A new numerical two-phase model was applied to better replicate the complex dynamics of debris flows by separating solid and liquid phases. Using two case studies in Val Gresta (GR) and Sorte (GR), the model shows realistic results and highlights the significance of erosion for the mobility of a debris flow. The modeling results indicate that future protection measures must rely on more detailed information regarding the flow behavior of solid and liquid phases. Continuous improvement of models based on a thorough analysis of past events is essential to ensure the accuracy and reliability of hazard assessment.

Keywords: debris flow, erosion, hazard assessment, numerical modelling, protection measures, RAMMS, two-phase model



Alle Inhalte stehen, sofern nicht mit © gekennzeichnet, unter der Creative-Commons-Lizenz CC BY 4.0 und dürfen unter Angabe der Quelle frei genutzt und verändert werden.

Verzeichnis der neusten WSL Berichte

Natural debris flows and field experiments in Kazakhstan. Rickenmann D., Yafyazova R.K., McArdell B.W., Stepanov B. (2024) WSL Ber. 154. 142 p.

Umweltbericht 2021–2023. Environmental Report 2021–2023. Zurlinden A. (2024) WSL Ber. 153. 56 S. doi.org/10.55419/wsl:37359

Digitale Seillinienplanung mit Seilaplan. SEILAPLAN Version 3.5. Ramstein L., Moll P., Schweier J., Bont L. (Eds) (2024). WSL Ber. 152. 43 S. doi.org/10.55419/wsl:37355

Situazione fitosanitaria dei boschi 2023. Dubach V., Blaser S., Dennert F., Beenken L., Stroheker S., Sanasilva, ... (2024) WSL Ber. 151: 67 p.

Protection des forêts – Vue d’ensemble 2023. Dubach V., Blaser S., Dennert F., Beenken L., Stroheker S., Sanasilva, ... (2024) WSL Ber. 150: 67 S.

Überwachung von besonders gefährlichen Schadorganismen für den Wald – Jahresbericht 2023. Surveillance des organismes nuisibles particulièrement dangereux pour la forêt – Rapport annuel 2023. Monitoraggio degli organismi nocivi particolarmente pericolosi per il bosco – Rapporto annuale 2023. Queloz V., Beenken L., Hölling D., Ruffner B., Dubach V., Cornejo C., ... (2024) WSL Ber. 149. 51 S.

Waldschutzüberblick 2023. Dubach V., Blaser S., Dennert F., Beenken L., Stroheker S., Sanasilva, ... (2024) WSL Ber. 148. 67 S.

Geschäftsbericht der Eidg. Forschungsanstalt WSL 2023. Eidg. Forschungsanstalt WSL (Hrsg.) (2024) WSL Ber. 147. 97 S. doi.org/10.55419/wsl:36152

Météo, manteau neigeux et danger d’avalanche dans les Alpes suisses. Année hydrologique 2022/23. Pielmeier C., Zweifel B., Techel F., Marty C., Stucki T. (2024) WSL Ber. 146. 42 p. doi.org/10.55419/wsl:36150

Schnee und Lawinen in den Schweizer Alpen. Hydrologisches Jahr 2022/23. Pielmeier C., Zweifel B., Techel F., Marty C., Grüter S., Stucki T. (2024) WSL Ber. 145. 86 S. doi.org/10.55419/wsl:36046

Aus Störungen und Extremereignissen im Wald lernen. Bebi P., Schweier J. (Eds.) (2023) WSL Ber. 144. Forum für Wissen 2023. doi.org/10.55419/wsl:35217

Technical report. Equations for improving the accuracy of Decagon MPS-2 matric potential readings in dry soils. Walthert L., Cobos D.R., Schleppi P. (2023) WSL Ber. 143. 27 p. doi.org/10.55419/wsl:33724

Inventaire forestier national suisse. Manuel pour l’enquête auprès du service forestier dans le cadre du cinquième relevé 2018–2026. Düggelein C., Abegg M., Allgaier Leuch B., Bischof S., Bont L., Cioldi F., ... (2023) WSL Ber. 142. 78 p. doi.org/10.55419/wsl:35654

Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Befragung der Forstdienste im Rahmen der fünften Erhebung 2018–2026. Düggelein C., Abegg M., Allgaier Leuch B., Bischof S., Bont L., Cioldi F., ... (2023) WSL Ber. 141. 76p. doi.org/10.55419/wsl:35032

+4 °C et plus: les paysages suisses face au changement climatique. Tobias S., Siegrist E.G., Bütikofer L., Bürgi M., Liechti K., Reynard E., ... (2023) WSL Ber. 140. 53 p. doi.org/10.55419/wsl:35310

+4 °C und mehr: Schweizer Landschaften im Klimawandel. Tobias S., Siegrist E.G., Bütikofer L., Bürgi M., Liechti K., Reynard E., ... (2023) WSL Ber. 139. 54 S. doi.org/10.55419/wsl:35308

Situazione fitosanitaria dei boschi 2022. Dubach V., Dennert F., Blaser S., Beenken L., Hölling D., Stroheker S., ... (2023) WSL Ber. 138. 77 p.

Protection des forêts – vue d’ensemble 2022. Dubach V., Dennert F., Blaser S., Beenken L., Hölling D., Stroheker S., ... (2023) WSL Ber. 137. 77 p.