

Angewandte 3D-Murgang- und Hangmurensimulationen berücksichtigen die Materialzusammensetzung – Chancen für die Berechnung von Ereignissen im Klimawandel?

Albrecht v. Boetticher¹ (albrecht.vonBoetticher@wasserbau.ch)

¹ Staubli, Kurath & Partner AG, Zürich

Résumé

Dans les laves torrentielles, la teneur en eau et les fines déterminent les mécanismes de liquéfaction lorsque la vitesse d'écoulement augmente. En revanche, le frottement dépendant de la pression entre les grains des matériaux charriés réagit à la profondeur d'écoulement, aux pressions d'impact et aux déviations. Le logiciel gratuit debrisInterMixing contient deux phases qui se mélangent. D'une part, la rhéologie de la suspension de sable, de limon et d'argile dépendant de la vitesse de cisaillement et, d'autre part, le comportement de l'écoulement du mélange de gravier dépendant de la pression. Grâce à la puissance de calcul généralement disponible dans les bureaux d'ingénieurs, les effets des laves torrentielles et des coulées de boue en fonction des matériaux peuvent ainsi être simulés en 3D. L'article présente les applications actuelles en Suisse. Les paramètres du modèle de debrisInterMixing, qui dépendent des matériaux, ont le potentiel de prendre en compte les influences climatiques dans les simulations.

Zusammenfassung

In Murgängen bestimmen Wassergehalt und Feinanteil die Verflüssigungsmechanismen bei zunehmenden Fliessgeschwindigkeiten. Die druckabhängige Reibung zwischen den Körnern im Grobgeschiebe hingegen reagiert auf Abflusstiefe, Anpralldrücke und Umlenkungen. Die frei erhältliche Software debrisInterMixing

enthält zwei sich mischende Phasen, für die scherratenabhängige Rheologie der Sand-/Silt-/Tonsuspension einerseits und für das druckabhängige Fliessverhalten der Kiesmischung andererseits. Mit der in Ingenieurbüros üblichen Rechenleistung kann damit die materialabhängige Einwirkung von Murgängen und Hangmuren in 3D simuliert werden. Der Artikel zeigt aktuelle Anwendungen in der Schweiz. Die Materialabhängigkeit der Modellparameter in debrisInterMixing birgt das Potential, Klimaeinflüsse in den Simulationen zu berücksichtigen.

Einleitung

Das Fliessverhalten von Murgängen ist stark vom Wassergehalt und der Zusammensetzung aus Feinmaterial und Grobgeschiebe abhängig [1][2]. Wassergehalt und Feinanteil bestimmen die Verflüssigungsmechanismen bei zunehmenden Fliessgeschwindigkeiten und Scherraten, wogegen das Grobgeschiebe mit der druckabhängigen Reibung zwischen den Körnern sensitiv auf Abflusstiefe, Anpralldrücke und Umlenkungen reagiert. So sollte es nicht überraschen, wenn Murgangfliessprozesse über die Materialzusammensetzung sensitiv auf Klimaänderungen sowie Rutsch- und Sturzereignisse reagieren. Deutlicher wird auch die Bedeutung der lokalen Gerinnegeometrie durch die Rückkopplung der Rheologie mit der Fliessgeschwindigkeit und Abflusstiefe.

Wie in der FAN-Agenda 1/2020 deutlich wurde, stellt die Klimaveränderung herkömmlich bewährte Lösungsansätze im Umgang mit Naturgefahren vor Herausforderungen. Bei Murgangprozessen wurden bisher Wissenslücken über das komplexe Fliessverhalten durch den Abgleich mit historischen Ereignissen kompensiert. Aber wie verlässlich sind Erfahrungswerte in Zukunft? Das Klima bestimmt nebst dem reinen Wasseranfall auch die geomorphologischen Prozesse im Einzugsgebiet und damit die Kornzusammensetzungen im Lockermaterial. Ein verändertes Gleichgewicht zwischen dem Eintrag aus dem Einzugsgebiet, dem Beitrag aus Rutschprozessen der Gerinneflanken und dem Geschiebetransport bei Hochwassern kann sowohl die Verfügbarkeit als auch die Zusammensetzung des Materials verändern, aus dem Murgänge entstehen.

Die heutigen Möglichkeiten zur Erkundung der Erosionsflächen und des verfügbaren Lockermaterials sind einen grossen Schritt weitergekommen. Beispielsweise wurde auf die komplett veränderte Ausgangslage der Murgangbildung bei der Ereignisbewältigung in Bondo (GR) mit Befliegungen und Rapid Mapping (zeitnahe Erfassung, Aufbereitung und Zurverfügungstellung von Geodaten) reagiert. Im Jahr 2017 wurden fünf Befliegungen des Kegelbereichs durchgeführt und aus den Aufnahmen digitale Geländemodelle erstellt, die unmittelbar in Modellierungen und

Beurteilung des neuen Gefahrenpotentials einfließen. Nachfolgend zeigen wir Beispiele, bei denen die Erhebungen zur Materialzusammensetzung, Kubatur und Geländebeschaffenheit direkt in heutigen 3D-Modellierungen berücksichtigt werden, um das Fließverhalten unter Berücksichtigung der vorgenannten Abhängigkeiten zu beurteilen. Die hierfür verwendete Software debrisInterMixing (DIM) [6] [7] (an der WSL und ETH entwickelt und frei verfügbar) enthält nebst einer getrennten Luftphase zwei sich mischende Phasen, für die scherratenabhängige Rheologie der Sand-/Silt-/Tonsuspension einerseits und für das druckabhängige Fließverhalten der Kiesmischung andererseits.

Der vorliegende Artikel zeigt, wie mit in Ingenieurbüros üblicher Standardausrüstung die Hangmuren- und Murgangeinwirkung gestützt auf die Materialzusammensetzung in 3D simuliert wird, womit auch die Auswirkung topographischer und klimatischer Änderungen erfasst werden.

Methodik

Durch die Bindung der Modellparameter an die Kenngrößen einer Materialprobe kann debrisInterMixing mit nur einem freien Kalibrierparameter verwendet werden. Ausgehend von einem geologischen Fachgutachten werden Bodenproben entnommen, die das zu erwartende Material für die Simulation charakterisieren. Probenentnahmen sollten bei Hangmuren aus verschiedenen Entnahmetiefen bis 2 m im Anrissbereich stammen. Bei Murgängen sind für Einwirkungsabschätzungen Ablagerungen früherer Ereignisse im Untersuchungsperimeter aussagekräftiger, da sich ein Teil der Korngrössensortierung vom Fließprozess darin wiederfindet. Die erforderliche Anzahl der Proben hängt vom Detaillierungsgrad der Untersuchung ab. Die Eingabeparameter erfordern die Dichte der Materialmischung, die

volumetrische Feststoffkonzentration und deren Tonanteil (allenfalls mit einem Vergrößerungsfaktor in Abhängigkeit von der Tonmineralogie). Für die Rheologie der Kiesanteile ist ein Reibungswinkel oder in grober Näherung ein Schüttwinkel erforderlich, und für die korrekte Aufteilung in Kiesphase und Suspension der Kiesanteil, z.B. basierend auf dem Anteil einer Siebkurve mit $d > 2$ mm.

Das Simulationsgitter wird anhand der Gelände- und Gerinnegeometrie samt Schutzbauten aus einer Oberflächendatei im STL-Format (Stereolithografie) generiert. Bei Hangmuren sollte zudem der Auslösekörper ebenfalls im STL-Format gegeben sein, es können aber auch einfache Auslösekörper in debrisInterMixing definiert werden. Murgänge erfordern hingegen einen festgelegten Zuflussquerschnitt mit aus dem Fachgutachten abgeleiteten Fließhöhen und Fließgeschwindigkeiten.

In einem ersten Durchlauf wird der freie Modellparameter an die Gitterauflösung angepasst und kalibriert. Dafür eignen sich gutachterliche Aussagen bekannter Ereignisse zur Fliesstiefe- und Fließgeschwindigkeit, zur Auslaufdistanz oder zur Kurvenüberhöhung. In diesem Schritt sollte die Simulation auch anhand von Erfahrungswerten überprüft werden, wie sie beispielsweise in [3] enthalten sind. Fehlen entsprechende Anhaltspunkte, kann ein Gelände- oder Gerinneabschnitt mit Ähnlichkeiten zu einer bekannten Hangmuren- bzw. Murgangssituation herangezogen werden, um den gitterabhängigen Modellparameter anhand dieser zu kalibrieren.

In einem zweiten Durchlauf wird das Gitter an mangelhaften Stellen verfeinert und die Simulation wiederholt, die Ergebnisse ausgewertet, plausibilisiert und interpretiert.

Simulationen für Bondo

Im Projektwettbewerb «Bondo - Neugestaltung Verbauungen Bondasca und Mera und neue Verkehrsanlagen» im Herbst 2019 hatte ein Team anhand der dreidimensionalen Murgangmodellierung die Verbauungen am Rückhalteraum der Bondasca entwickelt und einen weiteren Rückhalteraum am Zusammenfluss zwischen Bondasca und Mera entworfen. Die Herangehensweise setzte den Fokus gezielt auf das Zusammenspiel aus Kornzusammensetzung, Fließverhalten und Gerinnegeometrie, um die Gefährdung der Brückenverklauung an der Kantonsstrasse zu minimieren. So wurde der bestehende Rückhalteraum oberhalb der Bondascabrücke mit einem Fangdamm ausgestattet, der vor allem die Grobblecke der Murgangfront abfangen sollte, bevor der Murgang unter der Bondascabrücke hindurch zur Mera weitergeleitet wird. Unter der Bondascabrücke wäre ab einer für die Unterlieger gefährlichen Ereignisgröße Murgangmaterial über ein Streichwehr in ein zweites Rückhaltebecken geflossen und hätte aus diesem Wasser verdrängt. Dieses vom Streichwehrüberfall im zweiten Rückhalteraum verdrängte Wasser wäre kontinuierlich in den Mündungsbereich der Bondasca geströmt, um die Murgangfront hier zu verflüssigen und einen Rückstau bis unter die Brücke zu vermeiden.

Eine erste 3D-Modellierung mit debrisInterMixing diente der Bestimmung des Murgangausmasses, welches die Mera mit $10 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasserführung [1] entsprechend dem üblichen Murgangspülbetrieb des Elektrizitätswerks der Stadt Zürich (ewz) aufnehmen kann, ohne im angrenzenden Unterwasser Schäden zu verursachen.

Hierfür wurde der Zufluss von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ Wasser in der Mera ab Promontogno bis Spino mit einer RANS-Turbulenzsimulation modelliert, auf

die ein viskoser Murgang mit einer maximalen Frontgeschwindigkeit bei der Bondascabrücke traf (debrisInterMixing mit einer Sand-Ton Suspension als Zufluss der Bondasca und dem Zufluss von Wasser in der Mera mit Turbulenzmodellen aus OpenFOAM [5]). Beurteilt wurde, ob das Murgang-Wasser-Gemisch im Folgenden vom Gerinne bis Spino abgeführt werden kann (Abbildung 1).

Die konzeptionelle Wirkungsweise des Fangdamms wurde mit Simulationen mehrerer langsamer Murgangschübe untersucht (Abbildung 2), die teilweise hohe Kieskonzentrationen an der Murgangfront aufwiesen (Abbildung 3). Die Bereiche hoher Kieskonzentration und entsprechend niedriger Schlammkonzentration galten dabei als Tracer für Bereiche mit Grobkies und größeren Blöcken.

Entwurf für den Überlastfall

Eine ähnliche Thematik mit Rückhalteraum für das Grobgeschiebe der Front und einem "Bypass" für das verflüssigte Folgematerial wurde in einer Konzeptstudie zur Neugestaltung eines Geschiebesammlers am Giessenbach in Küsnacht am Rigi (SZ) mit debrisInterMixing untersucht. Das anhand der Modellierung entwickelte Rückhaltebauwerk hätte im Überlastfall das nachfolgende Material ohne Grobgeschiebe über eine Schulter mit Streichwehr entlastet (Abbildung 4).

Simulationen einer Murgang-Ausleitstelle

In den laufenden Studien zur Optimierung einer Murgangausleitstelle setzt man nebst der dreidimensionalen Auslaufmodellierung auf eine genaue räumliche Modellierung des Ausleitbauwerks, um das Zusammenspiel der druckabhängigen Verfestigung und der scherratenabhängigen Verflüssigung mit der Ausleitgeometrie abzustimmen. Nebst der Ausleitstelle decken die Simulationen eine

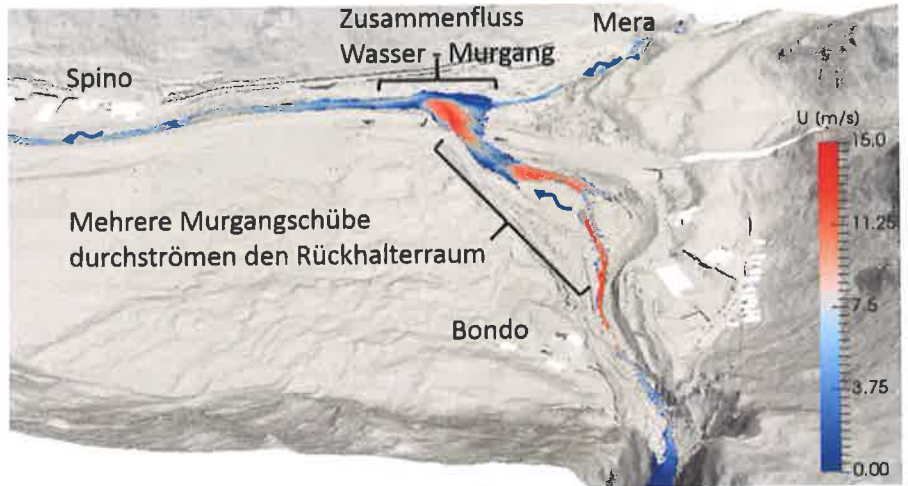


Abbildung 1: Kombinierte Modellierung Murgang-Flussströmung zur Bestimmung kleiner / häufiger Ereignisse anhand der Kapazität der Mera mittels einer 3D-Mehrphasensimulation. Blickrichtung von oberhalb der Bondasca flussabwärts.



Abbildung 2: Simulation mehrerer Murgangschübe zu Beginn (links) und nach etwa 1 Minute (rechts). Blickrichtung flussaufwärts.

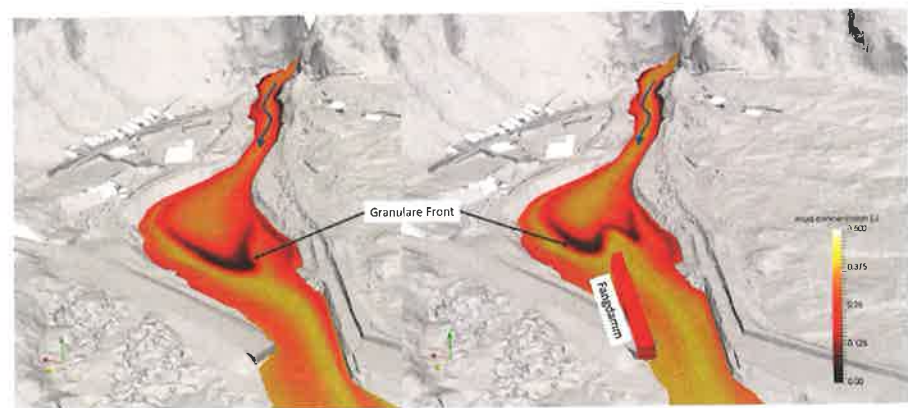


Abbildung 3: «Proof of concept» zur Abspaltung der granularen Front durch einen Fangdamm (rechts) die andernfalls den Durchlass blockieren könnte (links) mittels einer 3D-Mehrphasensimulation. Blickrichtung flussaufwärts.

Fläche von rund 120 000 m² ab, um den Ablagerungsprozess des ausgeleiteten Materials abzubilden. Das Gitternetz bestand aus rund 7,25 Millionen Zellen mit Abmessungen von durchschnittlich 0,25 x 0,25 x 0,15 m bis 75

cm über Terrain und doppelt so grober Auflösung darüber. Das Bemessungsereignis war mit Kubatur, Kornzusammensetzung, Frontfließgeschwindigkeit und Fliesstiefe vorgegeben, anhand

dessen der freie Modellparameter kalibriert wurde. Die Simulationen zielen auf eine Reihe offener Fragen der Auftraggeber ab: Wie funktioniert die Ausleitstelle? Benötigt man oberhalb der Ausleitung eine seitliche Mauer gegen ungewollte Austritte? Sind weitere Schutzmassnahmen im Ausleithang erforderlich? Fliesst das Material bis über Strassen hinter dem Ablagerungsraum? Wie kann die Ausleitstelle optimiert werden?

rücksichtigt werden kann. Der Einfluss der groben Partikel auf die Wellenbildung und somit auf den Freibord wird damit berücksichtigt, zudem erlaubt dieser Detaillierungsgrad die Bestimmung von Anpralldrücken. Steine von über 20 cm Korndurchmesser und Blöcke sind jedoch weiterhin im Modell nicht enthalten, obwohl diese die Fließfront dominieren. Groblöcke können jedoch zukünftig als «Resolved-CFD-DEM» durch die Kopplung an den Diskrete-Element-Code YADE [10] (vgl. Ende

folgte in einem Hangbereich mit 30° Hangneigung anhand der Frontfließgeschwindigkeit. Der freie Modellparameter wurde so gewählt, dass bei einer Materialzusammensetzung entsprechend einem Versuch von Veltheim (AG) [12] die simulierte Fließgeschwindigkeit der in Veltheim gemessenen Geschwindigkeit entsprach. Es handelte sich bei diesem Referenzexperiment um eine künstlich ausgelöste Hangmure im Skalenbereich zwischen Labor und Natur.

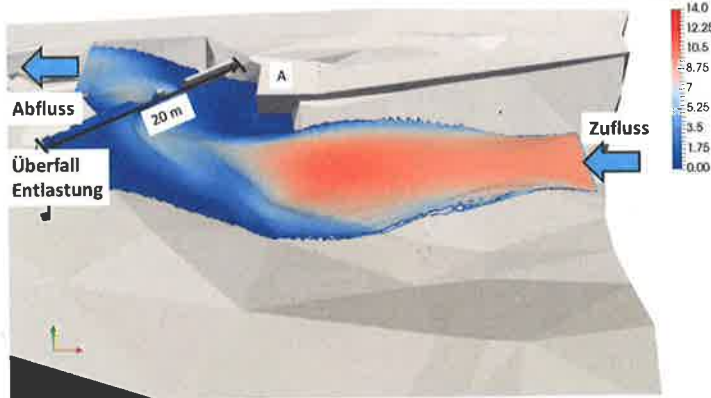


Abbildung 4: Simulation des Überlastfalls am Giessenbach bei Küsnacht am Rigi SZ. Die Bauwerksgeometrie beinhaltet auch gesicherte Zugänge zu den Arbeitsplattformen (A) für die Intervention mit Baggern.

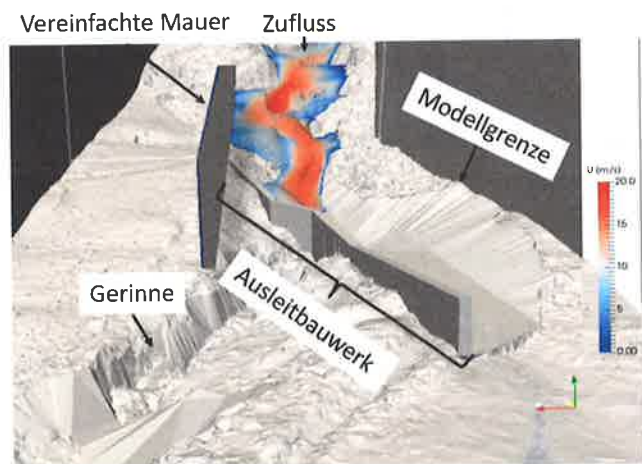


Abbildung 5: Simulation des angepassten Ausleitbauwerks vor dem Erstanprall. Die «vereinfachte Mauer» gegen ungewollte seitliche Austritte wird anschliessend auf die erforderliche Grösse reduziert. Blickrichtung flussaufwärts.

Modelliert wurden bisher zwei Bauwerksvarianten, eine dritte ist in Bearbeitung. Aufgrund der Modellresultate wurden die Varianten in der Geometrie optimiert und mit zusätzlichen Bauwerken ergänzt (Abbildung 5). Zudem wurde in zwei Simulationen der Fließ- und Ablagerungsprozess eines grossen Einzel-schubes mit jenen von zwei kleineren Schüben verglichen, vor allem hinsichtlich der Wirkung von Schutzmassnahmen im Ausleithang.

In weiteren Detailstudien wird die Simulation des finalen Ausleitbauwerks gegebenenfalls um rund 200t Grobkies und Bollensteine ergänzt, die als vierweg-gekoppelte Partikel in der modellierten Murgangfront eingebettet werden, was mit debrisInterMixingLP [8] be-

Folgeabschnitt) berücksichtigt werden.

Anwendung für Hangmuren und Ausblick

Dem am FAN-Herbstkurs 2019 auf der Schwägalp (Kanton Appenzell) formulierten generellen Kritikpunkt, dass numerische Modelle für Hangmuren und Rutschprozesse mit zu grossen Unsicherheiten bei der Parameterwahl einhergehen würden, kann mit der Materialabhängigkeit begegnet werden [9]. So wurde für den Hangmuren-Workshop, des Amtes für Wald und Naturgefahren (Kanton Bern, geplant für den 12. November 2020), ein mögliches Extremereignis in Diemtigen BE modelliert, mit Modellparametern basierend auf Bodenproben im Anrissgebiet [11]. Die Kalibration er-

Bei einer Nachmodellierung der Hangmure in Eriz (BE, STOREME-Nr. 2012-RNS-0001) wurde hingegen die Auslaufdistanz als Kalibriergrösse verwendet (Abbildung 6).

2019 begann die Zusammenarbeit mit der Fachhochschule des Kantons Bern (HAFL) im Zuge des am FAN-Herbstkurs 2019 auf der Schwägalp (Kanton Appenzell) evaluierten Handlungsbedarfs im Umgang mit spontanen Rutschungen und Hangmuren. Der Anpralldruck als guter «Kandidat», um die sich als unbefriedigend erwiesenen Parameter "Ablagerungsmächtigkeit" und "mobilisierte Masse" als Intensitätskriterium abzulösen [9], erfordert eine entsprechende Abbildung der Fließprozesse im Transitbereich. Der Anprall-

druck unterliegt somit ebenfalls den Schlüsselfaktoren der scherratenabhängigen Rheologie der Sand-/Silt-/Tonsuspension einerseits und dem druckabhängigen Fließverhalten der Kiesmischung andererseits. In Zusammenarbeit mit der Berner Fachhochschule wird debrisInterMixing (DIM) an den granularen Partikelcode YADE [10] gekoppelt (DIM-Yade), um den Anpralldruck von Hangmuren simulieren zu können. Dies geschieht in Analogie zu debrisInterMixingLP [8], mit welchem bereits der fundamentale Unterschied im Anprallverhalten granularer und viskoser Mischungen modelliert wurde [8]. YADE erlaubt jedoch durch das «Verkleben» einzelner Partikel die Nachbildung grösserer Strukturen. Die Strömungskräfte auf der Oberfläche eines Blockes können damit simuliert werden (Resolved CFD-DEM) und ebenso das lokale Strömungsfeld bzw. der Rückstau, den die Bewegung eines Blockes verursacht. Vor allem in Hinblick auf Anprallkräfte und Verklausungen öffnet diese Modellierung neue Möglichkeiten der Gefahrenbeurteilung auch für Murgänge.

Fazit

Mit der heutzutage in Ingenieurbüros üblichen IT-Ausrüstung können dreidimensionale Murgang- und Hangmurensimulationen ausgeführt werden, welche die scherratenabhängige Rheologie der Sand-/Silt-/Tonsuspension einerseits und das druckabhängige Fließverhalten der Kiesmischung andererseits berücksichtigen. Die Rückkopplung zwischen Fließverhalten, Materialzusammensetzung und Gerinne- bzw. Bauwerksgeometrie kann damit erfasst werden. Die Einwirkung ist damit in erster Linie realistisch von Material und Topografie abhängig. Die von der Materialzusammensetzung vorgegebenen Eingabegrößen reduzieren die Modellkalibrierung auf einen freien Parameter, was einen wichtigen weiteren Vorteil mit sich bringt: Ändert sich in einem Einzugsgebiet die Materialzusammensetzung

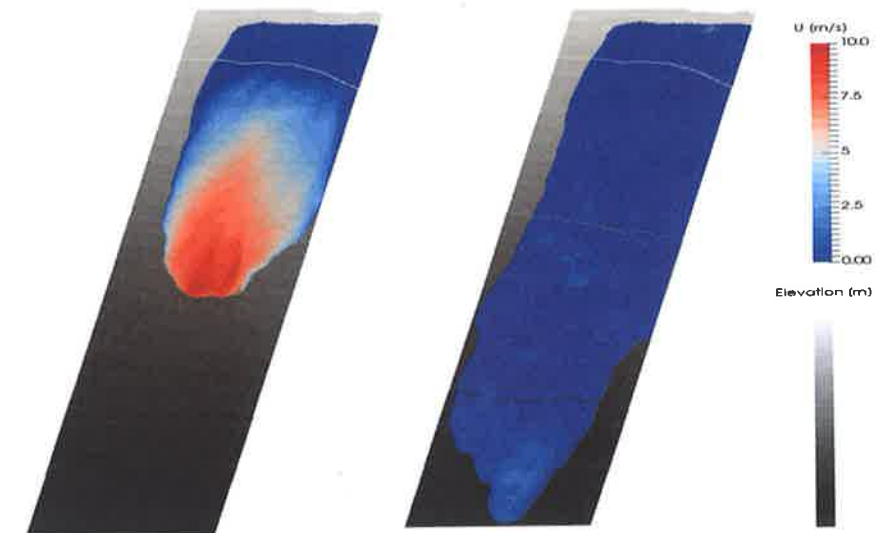


Abbildung 6: Nachmodellierung einer Hangmure bei Eriz, Kt. Bern, mit debrisInterMixing kalibriert auf die maximale Auslaufdistanz (rechts) zur Bestimmung der maximalen Fließgeschwindigkeit (links).

aufgrund sich verändernden Klimarandbedingungen oder durch unterschiedliche Lockermaterialzusammensetzungen (beispielsweise nach Bergstürzen), kann dieser Einfluss auf Murgangfließprozesse mit debrisInterMixing berücksichtigt werden, um bisherige Erfahrungswerte zum Murgangverhalten kritisch zu hinterfragen. Um die Prozesse mit der erforderlichen Qualität aufzulösen, sollten jedoch die Zellen des Simulationsgitters 25 cm Kantenlänge nicht überschreiten. Diese Anforderung ist mehr eine Bedingung der akkuraten Strömungssimulation als eine Frage der Terrainauflösung, es kann durchaus mit digitalen Geländemodellen mit gröberer Rasterauflösung gearbeitet werden. Dieses sollte aber aktuell sein.

Literatur

- [1] Daniel Weber: Untersuchungen zum Fließ- und Erosionsverhalten granularer Murgänge, ETH-Dissertation Nr. 15321 (2004)
- [2] Marcel Hürlimann, Brian W. McArdeil & Christian Rickli: Field and laboratory analysis of the runout characteristics of hillslope debris flows in Switzerland. *Geomorphology*, 232, 20-32. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.11.030>
- [3] A. B. Prochaska, P. M. Santi, J. D. Higgins, S. H. Cannon: A study of methods to estimate debris flow velocity, *Landslides*, (2008)
- [4] Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2017 - Abfluss, Wasserstand und Wasserqualität der Schweizer Gewässer, BAFU (2018)
- [5] OpenFOAM, <https://openfoam.com/>, (2020)
- [6] A. von Boetticher, J. M. Turowski, B. W. McArdeil, D. Rickenmann, M. Hürlimann, Ch. Scheidl, J. W. Kirchner: DebrisInterMixing-2.3:

a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters-Part 2: Model validation with experiments, in: *Geosci. Model Dev.*, 10, 3963–3978, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-3963-2017>, (2017).

[7] Three-dimensional debris flow simulation tool debrisInterMixing. EnviDat WSL Repository: <https://www.envidat.ch/dataset/three-dimensional-debris-flow-simulation-tool-debrisintermixing>.

[8] A. von Boetticher, B. W. McArdell, D. Rickenmann, J. W. Kirchner: Four-way coupling of a three-dimensional debris flow solver to a Lagrangian Particle Simulation: method and first results, in: 19th EGU General Assembly, EGU2017, proceedings from the conference held 23-28 April, 2017 in Vienna, Austria., p.13605

[9] B. Loup, S. Wohlwend: FAN-Fachleute Naturgefahren, Fazit des Herbstkurses 2019

[10] A. Albaba, M Schwarz, C. Wendeler, B. Loup & L. Dorren (2019): Numerical modeling using an elastoplastic-adhesive discrete element code for simulating hillslope debris flows and calibration against field experiments. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2339–2358, 2019, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2339-2019>

[11] A. v. Boetticher: Praxisanwendung der 3D-Hangmurensimulation zur Bestimmung der Einwirkung, *Ingenieurbiologie*, Mitteilungsblatt Nr. 3 (Okt. 2020)

[12] L. Bugnion, Brian W. McArdell, Perry Bartelt & Corinna Wendeler: Measurements of hillslope debris flow impact pressure on obstacles, in: *Landslides* 9, 179–187 (2012). <https://doi.org/10.1007/s10346-011-02944>