



Albrecht v. Boetticher, Markus Moser

3D-Simulationen von Hangmuren und Murgängen in der Praxis: Wo stehen wir?

Zusammenfassung

Die im Zuge vom Klimawandel sich ändernden Starkniederschläge haben besonders auf Hochwasserprozesse in kleinen Einzugsgebieten dramatischen Einfluss. Die Sedimentdynamik reagiert darauf in noch nicht absehbarem Ausmass. Der Artikel widmet sich der zentralen Naturgefahr von Hangmuren und Murgängen. Im Zusammenhang mit alternativen Wildbachverbauungen werden heutzutage Prozessketten modelliert, die robust mit nur einem Kalibrierparameter zu belastbaren Ergebnissen führen. Voraussetzung ist, dass man Materialproben als Eingangsgrössen verwendet, und dass die scherratenabhängige Viskosität der Sand-Silt-Ton-suspension und die druckabhängige Energiedissipation der Kiesbestandteile in der Murgangmischung getrennt und räumlich 3D-aufgelöst modelliert werden. Neue Lösungsansätze widmen sich der Problematik grosser Einzelblöcke in der Murgangfront. Diese stehen im Zentrum der Forschung für diesen Sommer, um das Ereignis von Fontana (TI) im Herbstworkshop an der WSL zu modellieren.

Résumé

Les crues extrêmes, qui évoluent sous l'effet du changement climatique, ont une influence particulièrement dramatique sur les processus d'inondation dans les petits bassins versants. La dynamique sédimentaire y réagit dans une mesure qui n'est pas encore prévisible. Cet article est consacré au risque naturel majeur que constituent les coulées de boue et les coulées de débris. Dans le contexte du vieillissement des ouvrages de protection contre les torrents, on modélise aujourd'hui des chaînes de processus qui, avec un seul paramètre d'étalonnage, conduisent de manière robuste à des résultats fiables. La condition préalable est d'utiliser des échantillons de matériaux comme données d'entrée et de modéliser séparément, avec une résolution spatiale en 3D, la viscosité dépendante du taux de cisaillement de la suspension sable-limon-argile et la dissipation d'énergie dépendante de la pression des composants graviers dans le mélange de la coulée de boue. De nouvelles approches s'attaquent à la problématique des gros blocs isolés dans le front de coulée de boue. Ceux-ci sont au cœur de la recherche pour cet été, afin de modéliser l'événement de Fontana (TI) lors de l'atelier d'automne au WSL.

1. Einleitung

Wie das Naturgefahrensymposium 2025 sowie der FAN-Herbstkurs 2025 und das FAN-Forum 2026 in der Schweiz eindrücklich gezeigt haben, steigt die Naturgefahr der Feststofftransportprozesse besonders in kleinen Einzugsgebieten überdurchschnittlich an, nicht zuletzt wegen Veränderungen der mobilisierbaren Geschiebefrachten. Prozessketten mit Murgängen sind aufgrund der heterogenen Flieseigenschaften und veränderlichen Szenarien für den Experten schwer einzuschätzen. Diese unberechenbare Herausforderung bringt eine hohe Unsicherheit. Methoden und Modelle zur besseren Beschreibung der Phänomene sind Gegenstand in der Forschung und Praxis.

2. Open Source Software DIM: 3D-Murgangsimulation mit nur einem Kalibrierparameter

Open Source-3D-Simulationen können ein Teil der Lösung im Umgang mit diesen Unsicherheiten sein. Die an der WSL und ETH entwickelte Open Source Software DebrisInterMixing (kurz DIM) erfordert nur einen einzigen Kalibrierparameter und bildet die Fließprozesse anhand der Eingangsgrößen aus einer Materialprobe ab ([1]/[2]/[3]). Der Schlüssel da-

zu liegt im Modellkonzept, das für die Mehrphasensimulation die druckabhängigen Einflüsse vom Kiesanteil und die scherratenabhängigen Einflüsse der Sand-Silt-Tonsuspension mit jeweils eigenen materialabhängigen Rheologiemodellen berücksichtigt. Die Zusammensetzung der Feinanteile bestimmt die modellierte Rheologie der Sand-Silt-Tonsuspension. Das druckabhängige Verhalten der Kiesanteile wird hingegen über deren Schüttwinkel definiert.

3. Verschiedene Modellierer, unsichere Eingangsgrößen – und dennoch vergleichbare Resultate

Im Jahr 2024 wurden am eintägigen DIM-Praxisworkshop die Vertreter verschiedener Schweizer Ingenieurbüros auf die Ereignisse von Schwanden (Glarus, 2023) angesetzt, bei welchen sich Hangmuren zu Murschüben entwickelten: Zutaten waren lediglich ausgewertete Materialproben und das Internet [4]. Gelände und Simulationsgitter wurden erstellt, wobei der Ausbruchkörper von jeder Gruppe individuell gestaltet wurde. Basis dafür lieferten lediglich die Nachrichtenmeldungen, die bereits kurz nach dem Ereignis online verfügbar waren, um eine ad-hoc-Situation zu imitieren. Zuletzt wurde das Material aus vier zur Verfügung stehenden Ma-

terialproben ausgewählt und der freie Modellparameter τ_{00} kalibriert. Dazu diente ein Videoausschnitt eines vorherigen Murschubes, aus dem sich die Fließgeschwindigkeit von Baumstämmen an der Oberfläche ablesen liess. Validiert wurden die Simulationen hingegen anhand der Frontfließgeschwindigkeit und den Auslaufflächen des darauffolgenden Hauptschubes. Bis zum Abend hatten verschiedene Gruppen Simulationen des Hauptschubes erstellt, die bezüglich Validierung nahezu gleichauf lagen. Angesichts der deutlich unterschiedlichen Szenarienbildung kann man daraus Rückschlüsse ziehen: Die Hangmurenauslösung und Murgangbildung in Schwanden scheint ein selbstgesteuerter Prozess zu sein, der durch Material und Topografie weitgehend definiert ist.

4. Rückgekoppeltes System aus Materialzusammensetzung, Fließprozess und Topografie – weder rätselhaft noch zufällig

Am DIM-Workshop 2025 stand hingegen die Murgang-Modellierung mit Zuflussganglinien im Zentrum. Auf Anregung vom Fachzentrum Wildbachprozesse (die.wildbach, Österreich) wurden zwei Murgänge aus dem Jahr 2025 im Tirol modelliert, die in benachbarten Bächen auftraten: Trotz gleicher Nie-

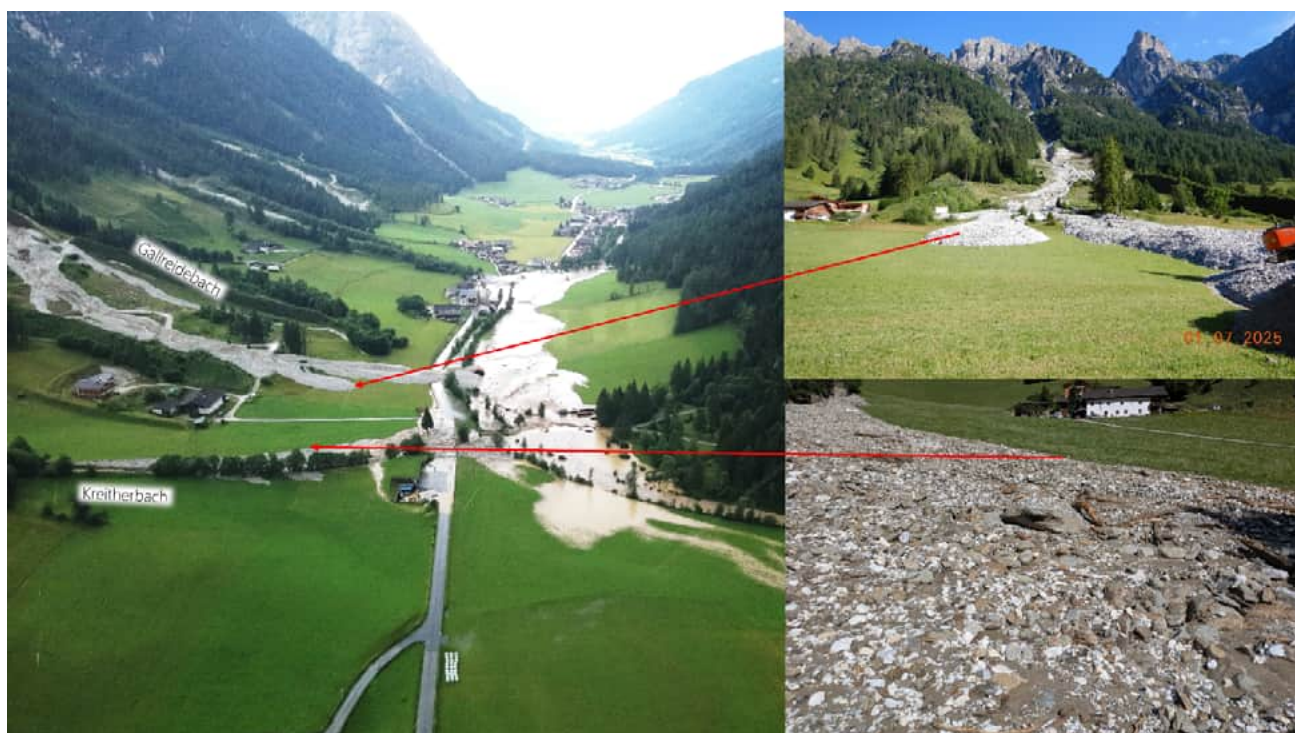


Bild 1: Murgangablagerungen mit sehr unterschiedlichen Ausprägungen in Gallreidebach und Kreitherbach nach dem Ereignis am 30.06.2025.

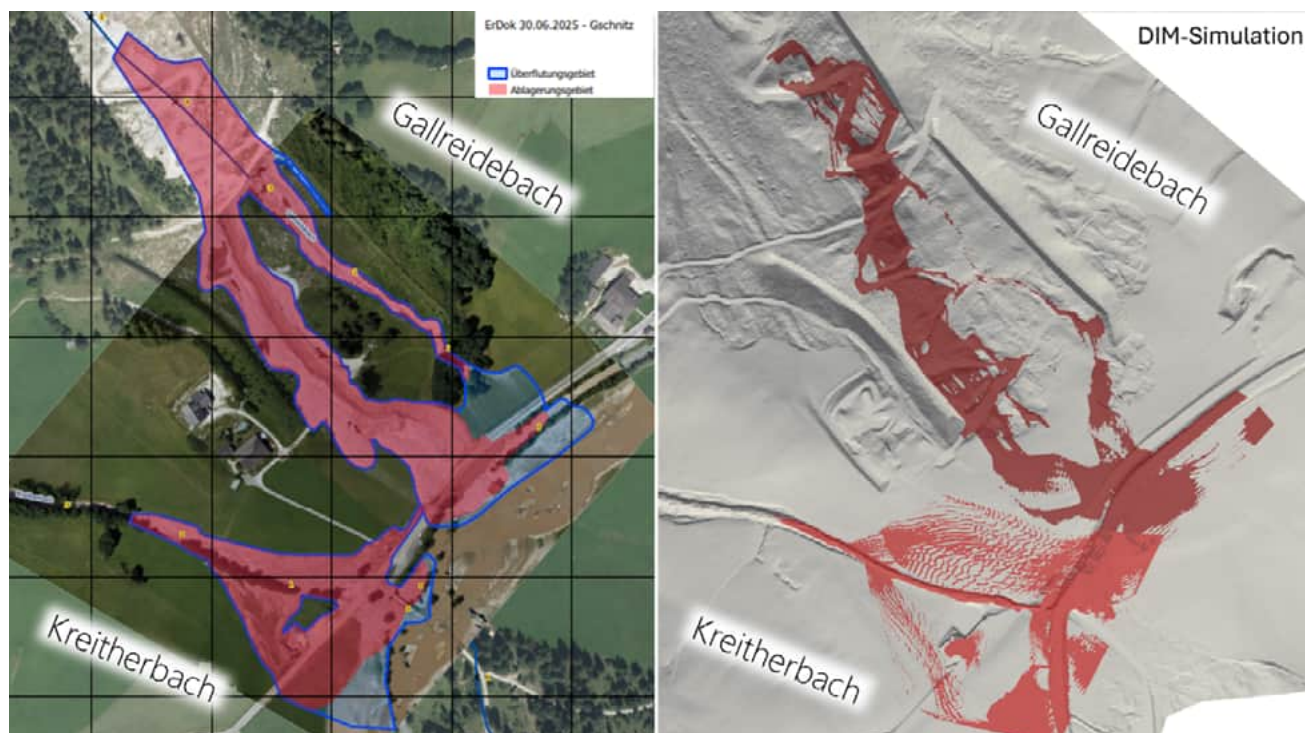


Bild 2: Das Ablagerungsgebiet der beiden Bäche in der Ereignisdokumentation (links) im Vergleich zu den abgebildeten simulierten Ausbreitungen (rechts) vom Kreitherbach (Markus Moser & Alain Duss) und vom Gallreidebach (Albrecht v. Boetticher).

derschlagsbelastung und nahezu identischer Geomorphologie entwickelte der Kreitherbach einen schnell fließenden Murschwall mit abrupter Murausschüttung am Schwemmkegel

und Bildung eines Murfächers, wogegen der Gallreidebach als langsam fließende Kalkschuttmure einen verzweigten Fließweg mit hohen Levées ausbildete (Bild 1).

Die Ganglinien und Materialproben, sowie ein hochaufgelöstes Gelände davor und danach, wurden vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung zur

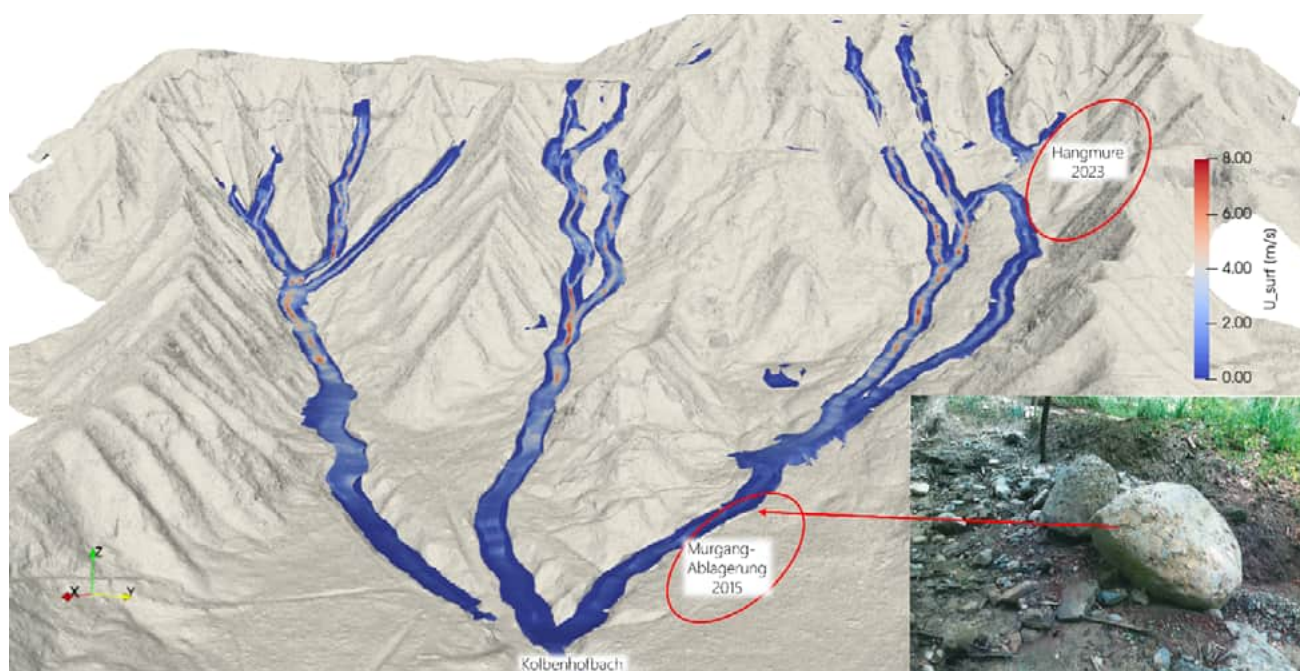


Bild 3: Schnappschuss aus der Simulation der Prozesskette Hangmuren → Erosion der Wildbachverbauungen → Murgang am Kolbenhofbach in Zürich. Die Farbskala zeigt die Oberflächenfließgeschwindigkeit. Dunkelblau ist nicht erodiertes oder bereits wieder abgelagertes Gerinnematerial.

Verfügung gestellt. Die Teilnehmer konnten in Zweiergruppen jeweils den einen oder anderen Bach modellieren, inklusive individuell gewählten Erosionsbereichen. Kalibriert wurde der einzige freie Modellparameter τ_{00} im Abschnitt einer Kurvenüberhöhung mit entsprechendem seitlichem Ausbruch (Kreitherbach), und auf einer Fliesswegverzweigung beim Kreuzen der Strasse (Gallreidebach). Die beiden Resultate aus dem Workshop in *Bild 2* zeigen im Vergleich zur Ereignisdokumentation eine klare Nachbildung des so gegensätzlichen Fliessverhaltens. Dies, obwohl sich die beiden Modelle nur um 0,8 Prozent im Wassergehalt unterscheiden und für τ_{00} derselbe Wert gewählt wurde. τ_{00} trägt in erster Linie der Gitterauflösung Rechnung und der damit verbundenen Präzision beim Berechnen der Scherraten. Da beide Modelle die gleiche Gitterauflösung hatten, genügte eine Kalibration von τ_{00} , um die unterschiedlichen Fliesswege beider Murgangereignisse nachzubilden. Für die Feianteile wurde ein Wassergehalt aus den Materialproben anhand der Atterberg-Grenzen und der Kornzusammensetzung hergeleitet, der in diesem Fall für beide Ereignisse nahezu denselben Wert ergab. Möglicherweise eine Folge dessen, dass beide Ereignisse bezüglich Feinanteil aus der gleichen Geomorphologie und Niederschlagsbelastung entstanden.

Das vom Modell erfasste unterschiedlich ausgeprägte Fliess- und Ablagerungsverhalten der beiden Ereignisse beruht einzig auf dem rückgekoppelten System zwischen Gerinnetopografie, lokaler Druckverteilung im Murgangmaterial, lokalen Geschwindigkeitsgradienten und der Viskosität bzw. Energiedissipation der Murgangmischung. Im Umkehrschluss zeigt sich darin jedoch auch, wie essenziell die 3D-Struktur der Fliessbewegung ist, und das ohne deren Rückkopplung an Druck und Geschwindigkeit/Viskosität das Murgangfliessverhalten weder vorhergesagt noch erklärt werden kann.

5. Kettenreaktion mit alternden Wildbachverbauungen

Beim Kreitherbach geht man davon aus, dass Hangmuren eine Prozesskette zur Murgangbildung auslösten. Das Ereignis war nach ca. 30–60 Sekunden vorbei. Oberhalb von Zürich können sich am Uetliberg in ähnlicher Weise Hangmuren – Murgang-Prozessketten bilden. Beispielsweise hat sich im Gerinne vom Kolbenhofbach sehr feines Material hinter den verrotteten Holz-Wildbachverbauungen an-

gesammelt, das bei einer seitlich zufließenden Hangmure mobilisiert werden kann. Je nach Wassergehalt kann die damit einhergehende erhöhte Transportkapazität in einer Kettenreaktion die verfallenen Schwellen erodieren und Murgänge bilden. Im Jahr 2012 traten Hangmuren im Einzugsgebiet vom Kolbenhofbach auf und 2015 bildete sich ein Murgang. Die nicht-triviale Prozesskette von Hangmuren und versagenden Sperren wird daher derzeit mit entsprechenden DIM-Simulationen untersucht, die anhand eines grossen Hangmureneignisses von 2023 kalibriert wurden (*Bild 3*).

6. Entwurf und Design moderner Schutzbauten

Nebst Prozessketten aus Hangmure, Murgang und Rückstau mit Hochwasser am Vorfluter können die 3D-Simulationen mit DIM zum Detaildesign von Schutzbauwerken herangezogen werden. Beispielsweise sollte der Entwurfsprozess von Streichwehr-Ausleitungen in Ablagerungsflächen wegen der komplexen 3D-Hydraulik von Beginn an durch numerische Untersuchungen begleitet werden. Wie die Projekte zur Murgangausleitung am Lienzerbach in Altstätten (SG) [5] oder am Fellbach in Saas-Balen (VS) [6] gezeigt

haben, empfiehlt sich in jedem Fall, eine experimentelle Laboruntersuchung mit DIM-Simulationen vorzudimensionieren. Nach den Versuchen kann der finale Bauwerksentwurf mit DIM-Simulationen auf den Massstab 1:1 hochskaliert werden, um den Massstabeffekt der Laborversuche abzuschätzen. Dieser verändert sich zu einem ausgeprägten Phänomen, sobald Murgangsperrern hinzukommen (Folie 26 in [7]). Der «Elefant» im Raum der Modellierer ist dabei die Fluid-Struktur-Interaktion der grossen Einzelblöcke mit der Murgangmischung und dem Durchlass.

7. Der Elefant im Murgang – die Wirkung der grossen Einzelblöcke

Im Murgangereignis von Fontana (TI) wurde 2024 ein rund 8000 m³ grosser Block mobilisiert und rund 360 m weit auf den Schuttkegel hinausgeschoben (*Bild 4*). Das vergleichsweise bescheidene Gerinne oberhalb wurde bis zu 40 m tief erodiert. Solche Situationen erfordern die Berücksichtigung der einzelnen Blöcke mit all ihren geometrischen Details. Die Kollision der Einzelblöcke untereinander, deren Interaktion mit der Gerinnetopografie und deren Rückstauereffekt auf das nachströmende Murgangmaterial müssen



Bild 4: Mobilisierter Einzelblock von Fontana (TI), rot umrandet eine Person als Grössenvergleich.

vom Modell mit allen lokalen Effekten erfasst werden. Für das Wechselspiel mit der Murgangmischung muss jedoch auch der Einfluss der lokalen Strömungskraft an der Blockoberfläche auf dessen Gesamtbewegung berücksichtigt werden. Bisher konnte mit dimYade solch eine «resolved-CFD-DEM»-Simulation nur für quaderförmige Blöcke realisiert werden [3]. Neu kann mit dimHFDIB ein beliebig geformter Block in die Murgangmischung gesetzt werden [8]. Die Blockgeometrie wird aus Oberflächendateien im STL-Format eingelesen, ein Standardformat der 3D-Drucker, das beispielsweise mit QGIS aus Laserscans generiert werden kann. Dieser neuen DIM-Erweiterung aus der Forschung wird im September beim entsprechenden DIM-Workshop an der WSL auf den Zahn gefühlt beim Versuch, die Ereignisse von Fontana nachzumodellieren. Womöglich immer noch mit nur einem Kalibrierparameter. 💧

Quellen:

- ▷ [1] A. von Boetticher, J. M. Turowski, B. W. Mc Ardell, D. Rickenmann, and J. W. Kirchner, «Debrisintermixing-2.3: a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters–part1: Model description,» *Geoscientific Model Development*, vol. 9, no. 9, pp. 2909–2923, 2016
- ▷ [2] A. von Boetticher, J. M. Turowski, B. W. Mc Ardell, 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, 2017
- ▷ [3] A. von Boetticher, J. Speerli, and C. Berger, «Shear-thinning, coulomb friction and grain collisions in debris-flow waterfalls: Applications of a 3D phase mixture model with a single calibration parameter and a complex 4-way coupled resolved cfd-dem approach,» in *E3S Web of Conferences, Proceedings of 8th International Conference on Debris-Flow Hazard Mitigation DFHM8*, vol. 415, 2023
- ▷ [4] A. von Boetticher, «Drei Tage für Schwanden! – Aufwand und Praxistauglichkeit der 3D-Murgangmodellierung mit nur einem Kalibrierparameter,» *FAN-Agenda*, vol. Heft, no. 2, pp. 26–32, 2024.
- ▷ [5] A. von Boetticher: Angewandte 3D-Murgang- und Hangmurensimulationen berücksichtigen die Materialzusammensetzung, in: *FAN-Agenda 2/2020*
- ▷ [6] A. von Boetticher, J. Speerli, C. Berger, A. Bachmann, F. Zimmermann, und W. Clausen, «Numerische 3D-Murgangsimulation im Vergleich zu einer physikalischen Murgangmodellierung am Beispiel des Fellbachs in Saas-Balen VS» *WEL*, vol. Heft, no. 4, pp. 239–245, 2022
- ▷ [7] C. Tognacca, «Hybride Murgangmodellierung in der Ingenieurpraxis und in der angewandten Forschung» *Fachtagung Wildbäche (2024)*, <https://www.fachtagungwildbaeche.ch/2024-de/>
- ▷ [8] Auf murgang.org wird der source-code, tutorials / workshops und alle neuen Entwicklungen zu DIM bzw. DIMP bereitgestellt.

Autoren:

- ▷ **Dr. Albrecht von Boetticher**,
Staubli, Kurath & Partner AG, Bachmattstrasse 53,
8048 Zürich, albrecht.vonboetticher@wasserbau.ch
- ▷ **DI Markus Moser**, Gebietsbauleiter / Leiter
Fachzentrum Wildbachprozesse bei die-wildbach.at,
markus.moser@die-wildbach.at