

Numerische 3D-Murgangsimulation im Vergleich zu einer physikalischen Murgangmodellierung am Beispiel des Fellbachs in Saas-Balen VS

Albrecht von Boetticher, Jürg Speerli, Catherine Berger, Andrea-Kristin Bachmann

Zusammenfassung

Im Rahmen des Murgangschutzprojektes am Fellbach in Saas-Balen (Wallis) wurden physikalische Murgangmodellierungen durchgeführt. Dabei ging es vor allem um den Einfluss einer Wasserfall-Kaskade auf das Fließverhalten von Murgängen unterstrom der Kaskade sowie um den Nachweis der Funktionalität von verschiedenen Varianten von Schutzbauwerken und deren Optimierung. Da der Murgangabfluss über diese Wasserfall-Kaskade sowie das Auftreffen und Weiterfließen unterhalb der Kaskade eine Extremsituation bezüglich Abflussprozesse darstellen, wurden die Ergebnisse dieser physikalischen Murgangmodellierung verwendet, um sie mit den Resultaten einer numerischen 3D-Murgangsimulation zu vergleichen. Zusätzlich wurden auch die Ergebnisse der beiden Modellierungsansätze (physikalisch und numerisch) für die Variante Ausleitung miteinander verglichen. Die Ergebnisse der beiden Modellierungsansätze zeigen eine gute Übereinstimmung.

Résumé

Dans le cadre du projet de protection contre les laves torrentielles au Fellbach à Saas-Balen (Valais), des modélisations physiques de laves torrentielles ont été réalisées. Il s'agissait notamment d'étudier l'influence d'une cascade de chutes d'eau sur le comportement d'écoulement des laves torrentielles en aval de la cascade, et de démontrer la fonctionnalité de différentes variantes d'ouvrages de protection et leur optimisation. Comme l'écoulement d'une lave torrentielle par ces chutes ainsi que l'impact et la poursuite de l'écoulement en aval de la cascade représentent une situation extrême en termes de processus d'écoulement, les résultats de cette modélisation physique des laves torrentielles ont été utilisés pour les comparer avec les résultats d'une simulation numérique 3D de laves torrentielles. En outre, les résultats des deux approches de modélisation (physique et numérique) ont également été comparés pour la variante de dérivation. Les résultats des deux approches de modélisation montrent une bonne concordance.

als mögliche Varianten ein Ausleitbauwerk oder ein Umleitbauwerk am Fuss einer Wasserfall-Kaskade vor. Die Fließverhältnisse über die Wasserfall-Kaskade, im Aufprallbereich sowie das Weiterfließen im Gerinne bzw. in der anschliessenden Bachschale sind äusserst komplex. Es wurde daher entschieden, das Fließverhalten von Murgängen über die Wasserfall-Kaskade bis in die Bachschale im Bereich des Dorfes bzw. der Schutzbauwerke mit einer physikalischen Murgangmodellierung zu untersuchen (vgl. weiterführende Informationen zum Murgang-Schutzprojekt und zu den Versuchen im WEL-Artikel *Berger et al., 2020*).

Auf Initiative des Erstautors wurde in Absprache mit der Gemeinde Saas-Balen und dem Planerteam des Murgang-Schutzprojektes entschieden, dass die Ergebnisse dieser physikalischen Modellversuche als Vergleich zu numerischen 3D-Simulationen mit dem Computermodell DebrisInterMixing herangezogen werden dürfen. Im Folgenden wird das Murgang-Schutzprojekt Fellbach kurz vorgestellt, die 3D-Simulationen mit DebrisInterMixing werden detailliert beschrieben und ein Vergleich zu den Ergebnissen aus den physikalischen Modellversuchen wird gezogen. Eine Schlussfolgerung mit einem Ausblick zum Potenzial von numerischen 3D-Simulationen mit DebrisInterMixing runden den vorliegenden Beitrag ab.

1. Einleitung

Ein Gerinneabfluss kann sich zusammen mit Lockermaterial und Feinsedimenten unter den entsprechenden Bedingungen zu einem Murgang entwickeln, eine vielerorts massgeblichen Naturgefahr in der Schweiz. Dabei bewegen sich die Kiesanteile und groben Blöcke in einer Sand- und gegebenenfalls Silt-/Ton-Suspension mit grosser Dichte. Grobe Blöcke können auf der Oberfläche der Strömung transportiert werden und sammeln sich an der Fließsfront, was zu typischerweise granularen Murgangfronten führt, die vom eher viskosen nachströmenden Material talwärts geschoben werden. Das Fließverhalten ist komplex und wird durch die druck-

abhängige Reibung zwischen den gröberen Körnern und der scherratenabhängigen Viskosität in der Suspension bestimmt. Daraus ergibt sich eine ausgeprägte Wechselwirkung zwischen Gerinnegeometrie, Fließgeschwindigkeit und Abflusstiefe. Diese beeinflusst wiederum die Druck- und Scherratenverteilung und somit das Fließverhalten des Murgangs, wodurch ein rückgekoppeltes Abflusssystem entsteht.

In der Schweiz werden vermehrt Murgang-Ausleitbauwerke als Schutzbauwerk geplant und realisiert, bei denen der räumlichen Fließstruktur eines Murgangs eine massgebende Rolle zukommt. Auch das Murgang-Schutzprojekt am Fellbach im Dorf Saas-Balen im Kanton Wallis sieht

2. Überblick zum Murgang-Schutzprojekt am Fellbach

Das Einzugsgebiet des Fellbachs wird durch seinen alpinen Charakter geprägt und erstreckt sich über 8,8 km² vom Fletschhorn auf 3982 m ü. M. bis zum Schwemmkegelhals auf 1540 m ü. M. Gletscher, Blockgletscher, mächtige Moränenablagerungen und proglaziale Seen prägen das obere Einzugsgebiet und begründen die hohe zeitliche und räumliche Dynamik. Im unteren Einzugsgebiet folgt eine typische Wildbachstrecke mit Erosions- und Ablage-



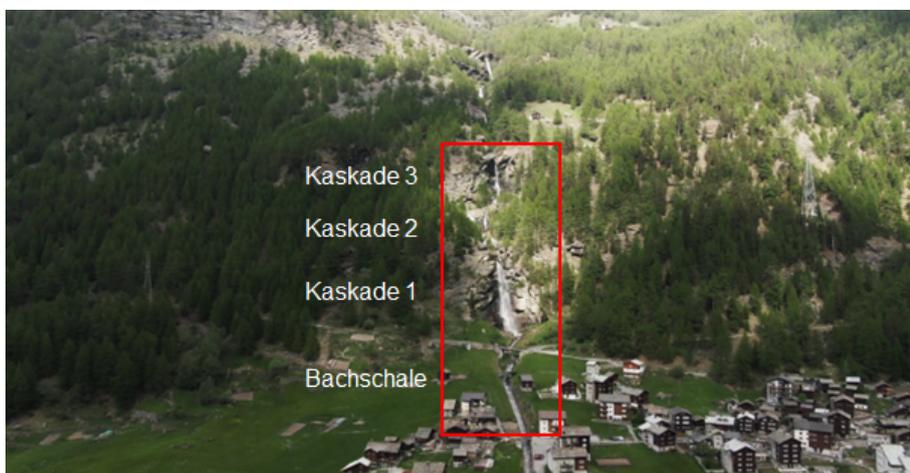


Bild 1: Projektperimeter mit Blick auf den Fellbach mit der Wasserfall-Kaskade und das Dorf Saas-Balen mit der Bachschale im Siedlungsraum.

rungsstrecken sowie einer Wasserfall-Kaskade, wobei die letzten drei Stufen Fallhöhen zwischen 25 m und 70 m aufweisen. Auf dem Schwemmkegel fliesst der Fellbach in einer künstlichen Bachschale durch das Siedlungsgebiet von Saas-Balen und mündet auf 1475 m.ü. M. in die Saaservispa (Bild 1).

In den letzten 200 Jahren ereigneten sich mehrere grosse Murgänge im Fellbach. Nach den letzten grossen Ereignissen wurden ab 1970 Schutzmassnahmen realisiert. Es besteht jedoch nach wie vor eine z. T. erhebliche Gefährdung für das Dorf Saas-Balen. Zur Reduktion der Murgang- und Hochwasserrisiken wurde ein breit angelegtes Variantenstudium durchgeführt und es kristallisierten sich die folgenden drei Hauptkonzepte heraus (Bild 2):

- **Durchleitung:**

Murgänge und geschiebeführende Hochwasser werden in einem grosszügig ausgebildeten Gerinne entlang des heutigen Fließweges über den Schwemmkegel geführt und in die Saaservispa eingeleitet. Primär aufgrund der Verklausungsrisiken bei den Brücken sowie der Rück-

stauproblematik in der Saaservispa wurde diese Massnahmenvariante als zu wenig robust beurteilt und nicht weiterverfolgt.

- **Umleitung:**

Ein Umleitbauwerk am Schwemmkegelhals unterhalb der untersten Kaskade 1 leitet den Fellbach permanent in sein neues Gerinne, das über die orographisch rechte Schwemmkegelseite verläuft und in die Saaservispa mündet. Ein massiver, befestigter Umleitdamm sowie ein auf die Murgangabflussspitze ausgelegtes Gerinne sind notwendig, damit Murgänge zuverlässig am Schwemmkegelhals umgeleitet werden. Nach Umfliessen des Siedlungsgebietes ist ein Entlastungskorridor vorgesehen, um grosse Murgänge noch im Bereich des Schwemmkegels zur Ablagerung zu bringen und das Risiko eines Rückstaus der Saaservispa zu reduzieren.

- **Ausleitung:**

Das bestehende Gerinne führt weiterhin normale Abflüsse und kleinere Hochwasser ab. Überschreitet der Abfluss eines Murgangs die Gerinnekapazität, wird die-

ser am Kegelhals unterhalb der untersten Kaskade 1 mittels Ausleitbauwerk und Dämmen an der Siedlung vorbei auf die orographisch rechte Seite des Schwemmkegels ausgeleitet. Das Ausleitbauwerk besteht aus einer Betonmauer mit Grundöffnung. Im Gegensatz zum Konzept der Umleitung wird der Prozess nicht in einem definierten Gerinne bis zur Saaservispa abgeleitet, sondern seitlich der Gebäude offen zur Ablagerung gebracht.

Für das Murgang-Schutzkonzept Fellbach wurde das 300-jährliche Murgangsszenario als massgebendes Ereignis definiert. Bei allen drei Varianten spielt der Einfluss der Wasserfall-Kaskade auf das Fließverhalten der Murgänge und deren Fließgeschwindigkeit und Fließtiefe am Kegelhals eine entscheidende Rolle für die Ausgestaltung und Dimensionierung der Schutzbauwerke. Aus diesem Grund wurden physikalische Modellversuche durchgeführt, um das Prozessverhalten der Murgänge sowie die Auswirkungen der Wasserfall-Kaskade auf die Fließparameter näher zu untersuchen und die oben skizzierten Massnahmenvarianten in Bezug auf deren Funktionalität und Geometrie zu optimieren. Die 3D-Simulationen mit DebrisInterMixing bieten die Möglichkeit, einen Vergleich zu den physikalischen Modellversuchen zu ziehen und die Interaktion von Murgängen mit den Schutzbauwerken zusätzlich zu untersuchen.

3. Zusammenfassung der physikalischen Modellierung

Die physikalische Murgangmodellierung wurde an der damaligen HSR Hochschule für Technik Rapperswil in einem Modell mit einem Massstab von 1:50 durchgeführt (IBU Institut für Bau und Umwelt, 2020). Dieser Modellmassstab wurde aufgrund der vorhandenen Platzverhältnisse

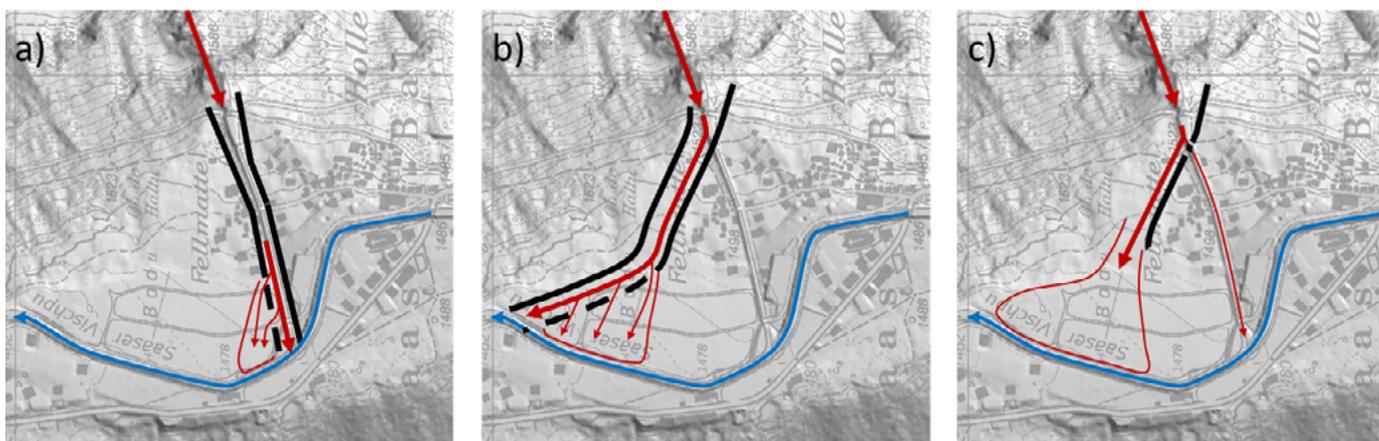


Bild 2: Schematische Darstellung der drei Hauptkonzepte a) Durchleitung, b) Umleitung und c) Ausleitung. Datengrundlage: Übersichtsplan/Relief DTM des Kantons Wallis.

im Labor gewählt. Limitierend war vor allem die zur Verfügung stehende Höhe im Labor. Das physikalische Modell wies eine Höhe von über 5 m auf (Bild 3). Erfahrungen aus anderen physikalischen Murgangmodellierungen haben gezeigt, dass mit einem Modellmassstab von 1:50 die physikalischen Prozesse ausreichend genau nachgebildet werden können.

Die Hauptergebnisse der physikalischen Murgangmodellierung lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Fließgeschwindigkeit über die Wasserfall-Kaskade nimmt sowohl mit grösserem Murgangvolumen als auch bei höheren Wasseranteilen in der Murgangmischung zu. Die Zusammensetzung der Korngrößen in der Murgangmischung hat hingegen keinen grossen Einfluss auf die Fließgeschwindigkeit. Ein grösseres Grösstkorn führt jedoch zu grösseren Fronthöhen. Eine wesentliche Erkenntnis ist, dass die Fließgeschwindigkeit in der Bachschale praktisch unabhängig von den Fließbedingungen oberhalb der Wasserfall-Kaskade ist. Bei Fließgeschwindigkeiten oberhalb der Wasserfall-Kaskade von 11,5 bis 16,5 m/s stellen sich in der Bachschale Fließgeschwindigkeiten von 6,5 bis 8 m/s ein. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass der Murgang bei der untersten Kaskade 1 in einen Pool trifft, welcher eine ähnliche Wirkung wie ein Tosbecken hat. Der Murgang wird in diesem Pool abgebremst und muss sich zuerst wieder aufbauen, bevor er im nachfolgenden Gerinne weiterfließt. Die Fließeigenschaften im Gerinne unterhalb der Wasserfall-Kaskade und in der nachfolgenden Bachschale sind daher vor allem vom dortigen Längsgefälle, den Rauigkeitsverhältnissen und der Querschnittsgeometrie abhängig. Die Abflussspitze wurde durch die Wasserfall-Kaskade hingegen nicht massgeblich beeinflusst. Das Risiko für eine Verklauung der Strassenbrücke zu Beginn der Bachschale wird als hoch eingestuft. Als Konsequenz daraus muss das Umleit- oder das Ausleitbauwerk oberhalb dieser Strassenbrücke angeordnet werden (Bild 4).

Der Nachweis der Funktionalität für die beiden Varianten Umleitung und Ausleitung konnte erbracht und Optimierungen an den einzelnen Varianten konnten vorgenommen werden. Insbesondere bei der Variante Ausleitung konnten die Geometrie der Grundöffnung und der Abstand der vertikalen Stäbe in der Grundöffnung auf das vorhandene Grösstkorn in der Murgangmischung ausgelegt werden. Im Rahmen des Mitwirkungsprozesses wohnte eine Delegation aus Saas-Balen einem physikali-

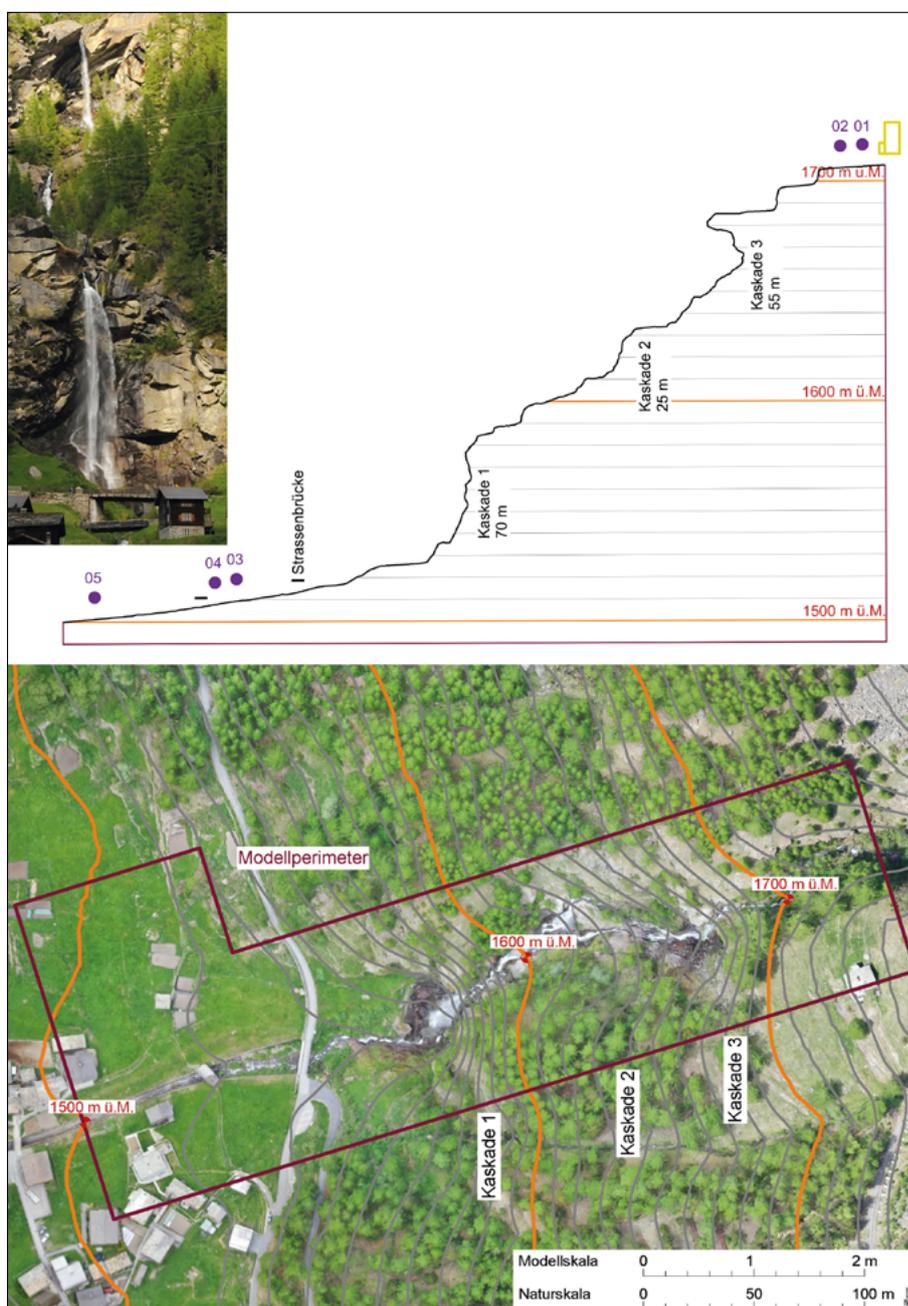


Bild 3: Modellperimeter und Längsgefälle des physikalischen Modells. Im Längsprofil markieren die Punkte 1 bis 5 die Messquerschnitte und das Symbol □ den Murgangtank (Berger et al., 2020).

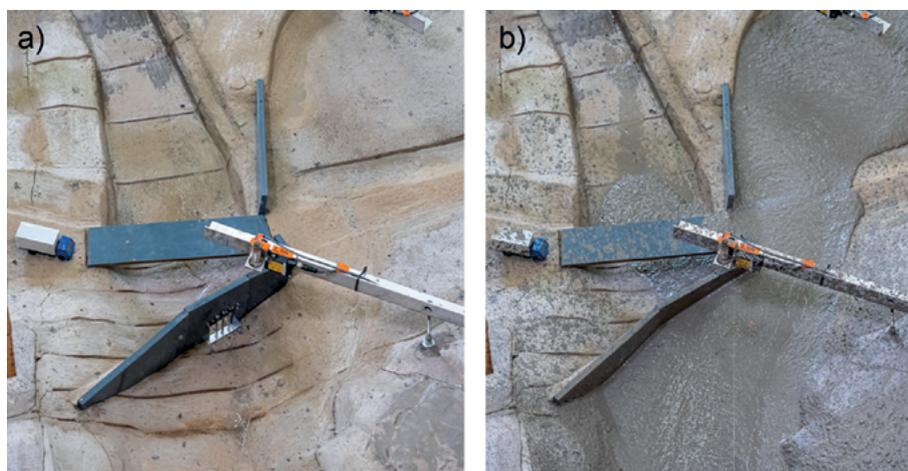


Bild 4: Draufsicht auf das Ausleitbauwerk (a) vor und (b) nach einem Versuch (Berger et al., 2020).

schen Modellversuch bei, wodurch ein wichtiger Beitrag zur Akzeptanz des Murgang-Schutzprojektes geleistet werden konnte.

4. Methodik der 3D-Murgang-simulation

4.1 Scherraten- und Druckabhängigkeit – ein Hauptbestandteil der Murgangrheologie

Das Simulationstool DebrisInterMixing verfolgt die Strategie, möglichst wenig freie Kalibrierparameter zuzulassen. Auf diese Weise sollen Resultate verschiedener Anwender vergleichbar gemacht werden. Die Unsicherheiten der Modellierung basieren somit eher auf den diskutierbaren Unsicherheiten der Ereignisgrösse, Materialzusammensetzung und dem Erosions- und Ablagerungsverhalten und weniger auf der Unsicherheit aus der Vielfalt frei wählbarer Modellparameter.

Diese Strategie der an die Materialzusammensetzung gebundenen Parameter fordert, dass man die wesentlichen Prozesse des fließenden Murganggemisches detailliert simuliert. Dadurch kann das Modell auf Kalibrierparameter, die für all die vernachlässigten Phänomene eintreten müssen, verzichten. Eine Schlüsselrolle spielt die scherraten- und druckabhängige Viskosität der Mischung, wenn es darum geht, die räumliche Interaktion der Fließbewegungen von Murgängen zu simulieren. Die frei zugängliche Software DebrisInterMixing, nachfolgend kurzerhand als DIM bezeichnet, leitet die Rheologie der scherratenabhängigen Sand-, Silt- und Tonsuspension aus der Materialzusammensetzung ab. Für die Berücksichtigung der druckabhängigen Reibung zwischen Kieskörnern wird in DIM der Schüttwinkel des Murgangmaterials als Eingangsgrösse verwendet (vgl. nächster Abschnitt). Auf dieser Grundlage lassen sich Murgänge mit genügend Feinanteilen gut modellieren. Solange der Fokus auf dem Fließverhalten des Gesamt ereignisses liegt und nicht auf lokalen Anpralldrücken einzelner Komponenten, kann DIM ohne Partikelkopplungen die Ereignisse nachbilden und Ergebnisse mit einheitlicher und nachvollziehbarer Qualität liefern, wie an diversen Simulationen von Labor- und Feldversuchen gezeigt wurde (von Boetticher et al., 2017a, von Boetticher 2020, Li et al., 2022).

Für Murgänge mit wenig Feinanteilen liefern die Kornkollisionen einen grösseren Beitrag zur Energievernichtung. Um diesen Einfluss abzubilden, können die Korn-zu-Korn-Kollisionen mit der an DIM gekoppelten Partikelsimulation aus diskreten Ku-

gelementen berücksichtigt werden (von Boetticher et al., 2017b).

Die Hintergründe zum Murgang-Solver DebrisInterMixing sind in von Boetticher et al. (2016) zusammengefasst. Der aktuelle Code kann unter von Boetticher (2019) bezogen werden.

4.2 Reduzierter Kalibrieraufwand für eine Kies-Rheologie und eine Schlamm-Rheologie

Die Modellparameter von DIM sind massgeblich durch die Materialzusammensetzung vorgegeben. Eine Phase repräsentiert die scherratenabhängige Sand-, Silt- und Tonsuspension und wird durch eine scherratenabhängige Rheologie abgebildet. Deren Eigenschaften werden aus Korngrössenverteilung, Wassergehalt, Dichte und Tonmineralogie abgeleitet. Die vom Druck und von der Scherrate abhängige Reibung des feinen Kiesgemisches wird mit einer Rheologie modelliert, deren Parameter aus dem Schüttwinkel des granularen Materials abgeleitet werden. In der Regel bleibt nur ein freier Modellparameter τ_{00} zur Kalibration, der die Abhängigkeit der Scherratenberechnung von der Zellgrösse berücksichtigt und die Fließgrenze beeinflusst. τ_{00} wird anhand von vorhandenen Ablagerungsflächen, beobachteten Abflusstiefen und Fließgeschwindigkeiten oder mittels Spuren der Kurvenüberhöhung vergangener Murgänge kalibriert. Je nach Ton- und Wassergehalt eignet sich ein Startwert in der Grössenordnung von 100 Pa. Aufgrund der beim Fellbach relativ grob gewählten Gitterauflösung führte die Kalibration zu einem τ_{00} von 500 Pa.

5. Extremfall Fellbach: Simulation und Versuch durch hohe Scherraten und Druckgradienten auf dem Prüfstand

5.1 Die Modellierung mit einfacher Kalibration: eine Prüfung ohne Massstabseffekt

Der Sonderfall der Murgangausleitung am Fellbach ist ein Extremfall der Rückkopplung zwischen Rheologie und Geometrie: Der Murgang stürzt über eine Wasserfall-Kaskade und fliesst dann in einer Bachschale weiter. Auf die plötzliche Verflüssigung durch extreme Scherraten und Druckabfälle bei der Beschleunigung über den Wasserfall folgen schlagartige Verfestigungen des Materials im Aufprallbereich am Fuss der untersten Kaskade 1 aufgrund der druckbedingten Reibung zwischen den Körnern. Für die Skalierbarkeit der Laborversuche entstehen daraus Unsicherheiten. Aus diesem Grund wurde die Möglichkeit einer Modellierung der Ausleitung mit DIM und einem Vergleich der Resultate begrüsst.

5.2 Kalibrierung auf den zeitlichen Ablauf der Wasserfall- und Gerinneprozesse

Die Simulation mit DIM wurde auf die Fließzeit der Front zwischen der Überfallkante der Kaskade 1 und den Ort in der Bachschale beim Beginn der Gebäude für den Ist-Zustand kalibriert (Bild 5). Dieser Abschnitt enthält alle massgebenden Bereiche des Prozessraums. So muss die Summe der Basisvorgänge im physikalischen Versuch und in der Computersimu-

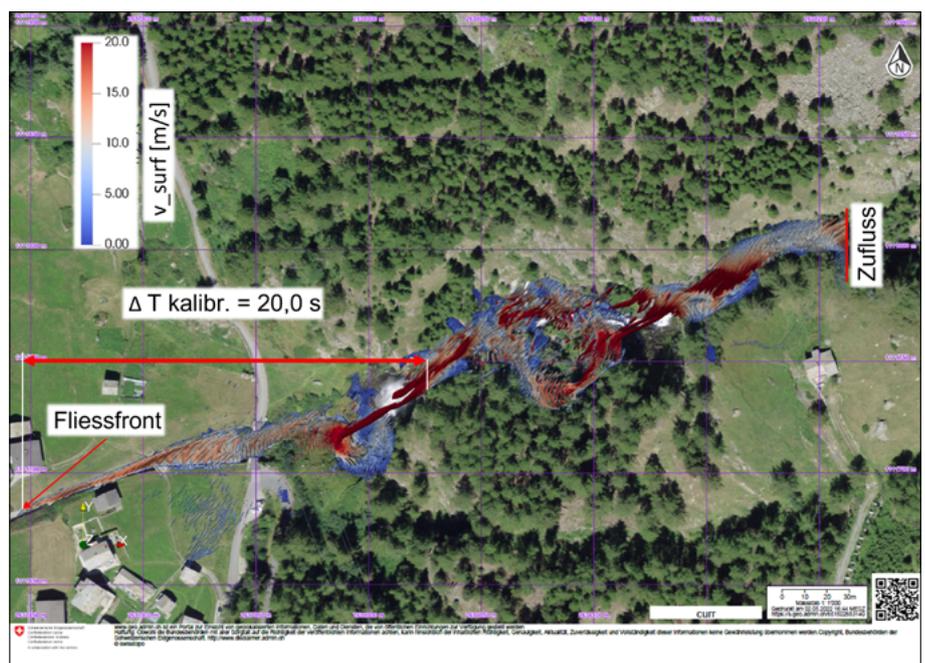


Bild 5: Kalibrierung von τ_{00} auf die Fließzeit der Front im Ist-Zustand.

lation die gleichen Zeiträume beanspruchen: Die Verflüssigung im Wasserfall, die Verfestigung und der Aufstau im Pool, der anschliessende beschleunigte Zustrom ins Gerinne sowie der Abfluss in der Bachschale. Der Parameter τ_{00} wurde für alle Modellierungen auf 500 Pa angepasst, sodass die Fliesszeit der Front zwischen Wasserfall und Gebäuden mit 20 s im Bereich der entsprechenden Werte der physikalischen Versuche zu liegen kam (20,5 und 21,4 s). Bezüglich Fliessenergien liegt diese Wahl auf der sicheren Seite.

5.3 Auswertung der einzelnen Prozesse samt Schutzbauwerk

Nach «globaler» Kalibration folgte eine Prüfung der verschiedenen Prozessaspekte anhand der numerischen Simulation mit dem Ausleitbauwerk: Dabei wurde die Übereinstimmung mit den Fliessformen im physikalischen Versuch untersucht. Die detaillierte Übereinstimmung trotz globaler und einfacher Kalibration mit nur einem Parameter bestätigt die Aussagekraft der Untersuchungen, unabhängig von Massstabeffekten. Allerdings wurde die Geometrie der Grundöffnung ohne Stäbe in die numerische Simulation integriert.

5.4 Numerische 3D-Modellierung

Um den für 3D-Simulationen relativ grossen Prozessraum abzudecken, wurden feinere Gitterauflösungen in die Freifallabschnitte mit gröberen Gitterstrukturen kombiniert, da im freien Fall der Druck- und Scherrateneinfluss geringer ist. Das Gitter bestand aus rund 11,2 Millionen Zellen mit einer Kantenlänge von 15 bis 20 cm in Bereichen, die näher als 2,2 m zur Sohle oder Wänden liegen, und rund 60 cm Kantenlänge in Bereichen mit grösserem Abstand zur Sohle oder Wänden. Im Zuge dieser numerischen Studie ist diese Auflösungsgenauigkeit ausreichend. Bei Bemessungssimulationen würde in Sohlnähe eine zusätzliche feinere Zellschicht zum Einsatz kommen.

Als Szenario für die Simulation wurde die Mischung mit grossen Fliessgeschwindigkeiten gewählt. Um den Einfluss der vernachlässigten groben Blöcke zu minimieren, wurde die Mischung mit kleinem Grösstkorn gewählt. Im Gegensatz zum physikalischen Versuch wurde der 300-jährliche Abfluss in der Simulation mit $300 \text{ m}^3/\text{s}$ kontinuierlich zugeführt. Im physikalischen Versuch wurde die Murgangfracht über einen Tank (Bild 3) ins Modell eingebracht. Durch rasches Öffnen eines Schiebers beim Tank ergoss sich der Murgang mit einer typischen Front in das Modell. Mit

zunehmender Entleerung des Tanks nahm der Murgangabfluss aus dem Tank ab.

Mit DIM richtet sich der Zeitschritt nach der Courant-Zahl, wobei das Murgangmaterial in einem Rechenschritt maximal um eine halbe Zellenlänge weiterfliessen kann. Die gesamte Simulation lief auf 24 Prozessoren über rund 23 Tage.

6. Resultatvergleich physikalische Modellierung mit numerischer 3D-Simulation

Der folgende Vergleich basiert auf der Auswertung zweier Ansichten, die im physikalischen Versuch mit 25 fps (Frames per second) aufgezeichnet wurden. Sobald die Fliessfront im physikalischen Versuch einen charakteristischen Punkt erreichte, wurde verglichen, wann und wie die numerische Simulation den gleichen Zustand erreicht. Die Zeitskala «delta T» bezeichnet den Zeitunterschied ab Erreichen der Oberkante der Kaskade 3 (Bild 3), wobei die gemessene Zeit im physikalischen Versuch mit dem Ansatz von Froude mit einem Faktor $\sqrt{50}$ von der Modellzeit in die Realzeit umgerechnet wurde. In der vollmassstäblichen numerischen Simulation sind

modellerte Zeit und Realzeit identisch. In der Simulation mit DIM wird die Fliessoberfläche als Grenze in der Volumenkonzentration von Luft und Murgangmaterial bestimmt. Dieser Übergang zwischen Luft und Murgangmischung ist in größeren Zellen der Simulation weniger scharf definiert. Des Weiteren wird Murgangmaterial mit grosser Luftdurchmischung nicht dargestellt. Aus beiden Gründen «verschwindet» beispielsweise die Visualisierung des simulierten Murgangmaterials im Wasserfall in Bild 8 und taucht im Auffangbecken wieder auf. Eine «Tropfen»- oder «Streifenbildung» in den Visualisierungen der Fliessoberfläche ist ein typisches Artefakt der Volume-of-Fluid-Methode.

Die Trajektorie und der Auftreffpunkt bei Kaskade 3 sind in der numerischen Simulation und im physikalischen Versuch nahezu gleich, ebenso die seitliche Ausbreitung an den Umlenkuffern mit der entsprechenden Kurvenüberhöhung nach Kaskade 2 (Bild 6). Die Fliesszeit der Front bis zur Oberkante von Kaskade 1 wird in der numerischen Simulation überschätzt. Insgesamt ist der Ausleitprozess bis zum Ende des ersten Damms mit 15 s in der numerischen Simulation gegenüber 18,1 s im phy-

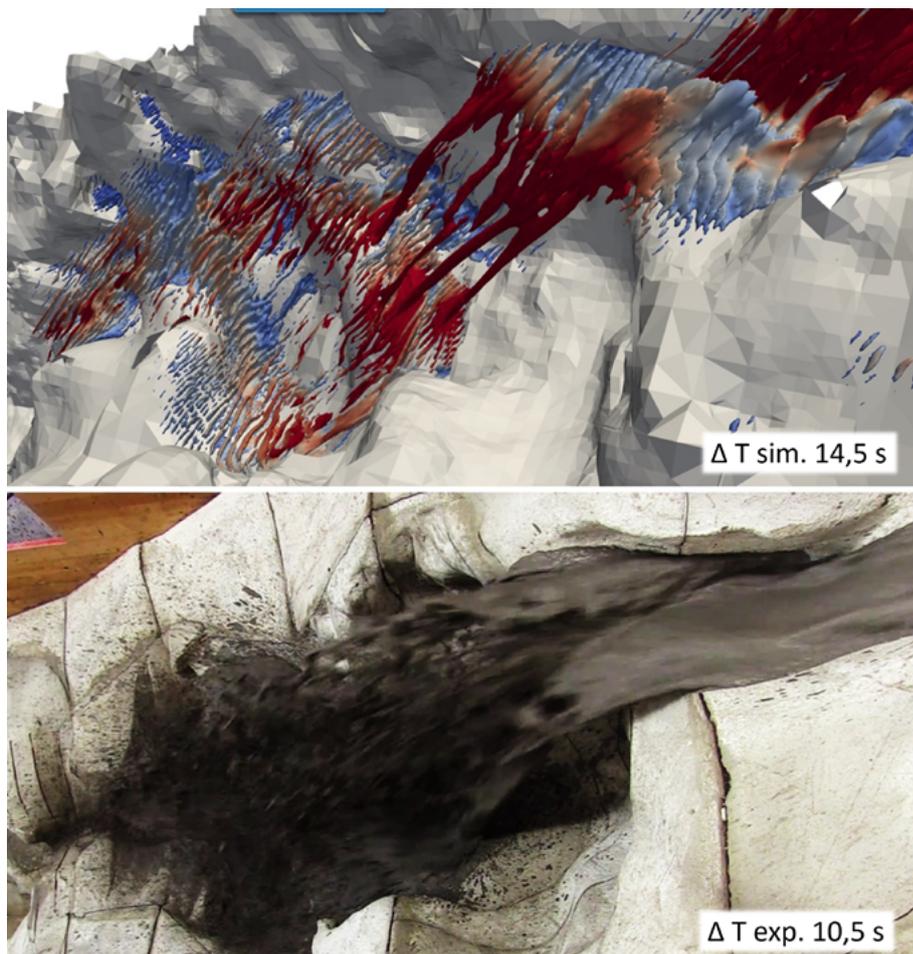


Bild 6: Ausbreitung des Murgangs über die Kaskaden 3 und 2 bis zum Erreichen der letzten Wasserfalloberkante (Foto aus IBU Institut für Bau und Umwelt, 2020).

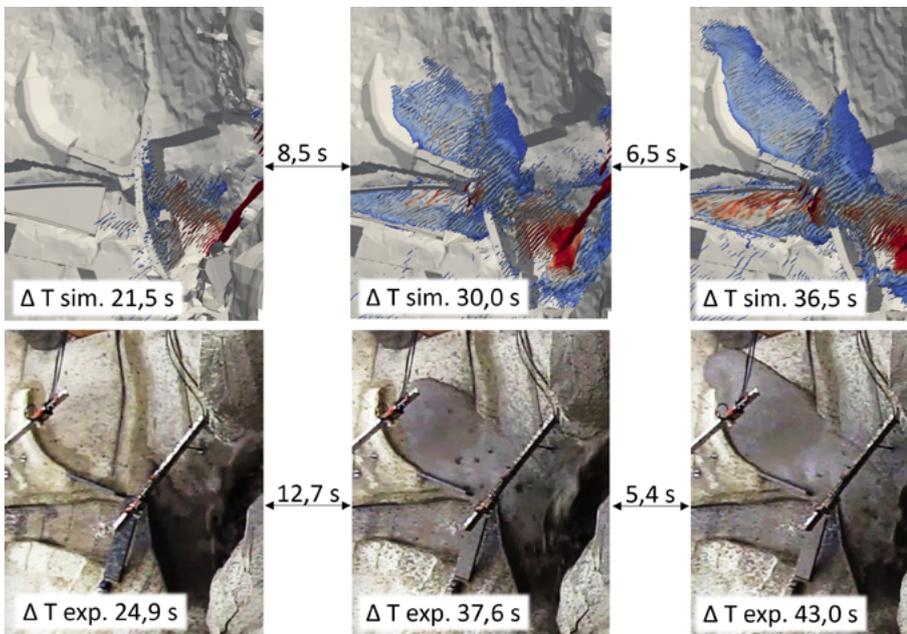


Bild 7: Vergleich dreier Zustände im Ausleitprozess mit 8,5 und 6,5 Sekunden Zeitabstand (Simulation, oben) bzw. 12,7 und 5,4 Sekunden (Versuch, unten) (Fotos aus IBU Institut für Bau und Umwelt, 2020).

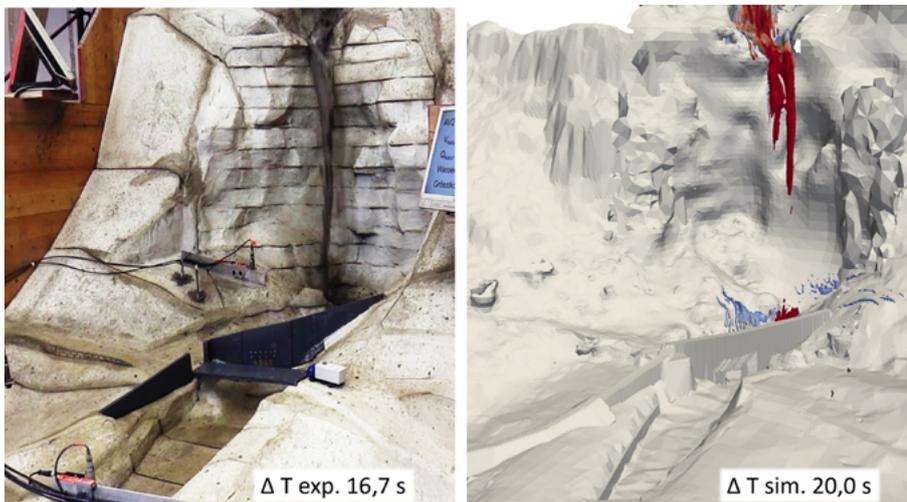


Bild 8: Ankunft am Fuss der untersten Kaskade 1 (Foto aus IBU Institut für Bau und Umwelt, 2020).

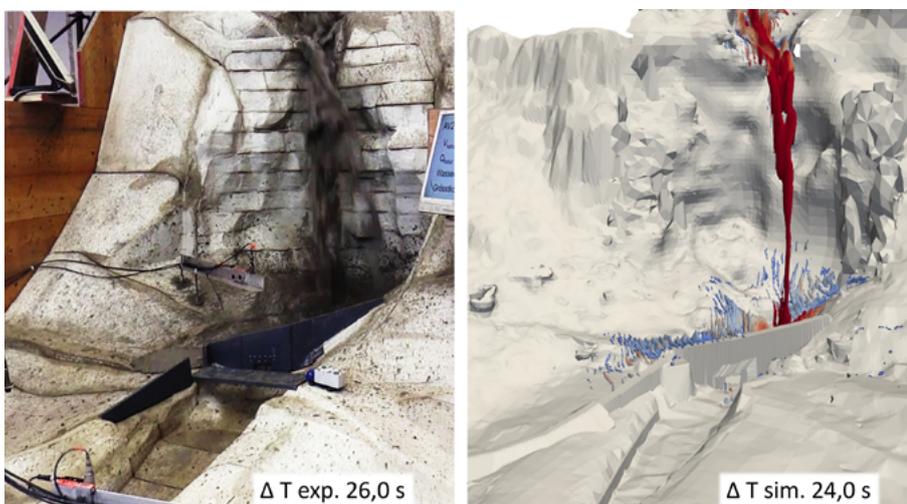


Bild 9: Momentaufnahmen der Ausleitung. Im Bereich der Strasse kommt es in der Fließbewegung der Front zu Verzögerungen (Foto aus IBU Institut für Bau und Umwelt, 2020).

sikalischen Versuch zeitlich gut abgebildet und stimmt in der räumlichen Ausbreitung sehr gut überein (Bild 7).

Bild 8 erfasst den Augenblick, bei dem die Fließfront in den Pool unterhalb der untersten Kaskade 1 auftrifft und Bild 9 den Moment, an dem das Murgangmaterial aus dem sich füllenden Pool und Gerinne Richtung Ausleitbauwerk fließt und über die Strasse ausgeleitet wird. Ein grosser Zeitunterschied kann im Füllprozess des Pools festgestellt werden. Dies ist möglicherweise eine Folge der gleichmässigen Zuflussmenge in der Simulation gegenüber eines sich einstellenden Ganglinienabflusses im physikalischen Versuch.

Im Bereich der Strassenquerung kommt die Front nahezu zum Stillstand, bevor sie durch einen nachfolgenden Schub wieder mobilisiert wird (Bild 10). Dies ist möglicherweise ein Effekt der lokal geringen Neigung und der entsprechenden vorübergehenden Verfestigung durch abnehmende Scherraten. Die einzelnen Zeitschritte im Ausleitraum sind daher als Vergleich für Frontfließgeschwindigkeiten nicht geeignet.

Die druckabhängige Rheologie begrenzte die Durchflussmenge im Durchlass an der Bachsohle trotz steigender Pegel im Pool. Dieser Effekt trat in der Simulation in Erscheinung, obwohl der Durchlass an der Bachsohle im Schutzbauwerk ohne Stäbe modelliert wurde, und ohne dass die Durchlassverkläusung mit gekoppelten Partikeln berücksichtigt wurde.

7. Schlussfolgerungen/Ausblick

Das Murgang-Fließverhalten konnte in den Computer-Simulationen mit DebrisInterMixing mit scherraten- und druckabhängigen Rheologien in seinem mit der räumlichen Strömung rückgekoppelten Materialverhalten abgebildet werden. Der physikalische Modellversuch und die Computersimulation zeigen bis in lokale Details eine gute Übereinstimmung. Vor allem gilt dies über eine Sequenz von Extremsituationen, wie sie in der Fellbach-Wasserfall-Kaskade, der Bachsohle und Ausleitung anzutreffen sind.

Da in der numerischen Simulation der Massstabeffekt wegfällt und die beiden Ansätze vergleichbare Resultate liefern, wird die Skalierbarkeit von physikalischen Modellversuchen im Massstab 1:50 für derartige Murgangmodellierungen bestätigt.

Bei zukünftigen Fragestellungen scheint eine Voro Optimierung mit DebrisInterMixing sinnvoll, um die Anzahl Versuche im physikalischen Modellversuch zu reduzieren. Bei guter Übereinstimmung zwischen phy-



Bild 10: Der Murgang bildet wieder eine kontinuierlich fortschreitende Front (Foto aus IBU Institut für Bau und Umwelt 2020).

sikalischen Versuch und Computersimulation können zudem im Computermodell flächendeckend Einzelheiten untersucht werden, die im physikalischen Versuch gegebenenfalls eine zu aufwändige Messtechnik oder eine zu grosse Geländeabdeckung erfordern würden.

Danksagung

Wir danken der Gemeinde Saas-Balen und dem Kanton Wallis für den Auftrag zu einer physikalischen Murgangmodellierung des Fellbachs sowie für die Erlaubnis zur Verwendung der Grundlagen- und Versuchsdaten, um die numerischen Modellierungen durchzuführen und diese mit den Versuchsergebnissen zu vergleichen.

Quellen

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 Energie Luft*, 112 (2020), 199-205.
 von Boetticher, A., Turowski, J.M., McArdell, B.W., Rickenmann, D., Kirchner, J.W. (2016). DebrisInterMixing-2.3: a finite volume solver for three-dimensional debris-flow simulations with two calibration parameters-Part 1: Model description, *Geosci. Model Dev.*, 9, 2909–2923.
 von Boetticher, A., Turowski, J.M., McArdell, B.W., Rickenmann, D., Hürlimann, M., Scheidl, Ch., Kirchner, J.W. (2017a). DebrisInterMixing-2.3: a finite volume solver for three-dimensional debrisflow simulations with two calibration parameters-Part 2: Model validation with

experiments, *Geosci. Model Dev.*, 10, 3963-3978.
 von Boetticher, A., McArdell, B.W., Rickenmann, D., Kirchner, J.W. (2017b). Four-way coupling of a three-dimensional debris flow solver to a Lagrangian Particle Simulation: method and first results, *Geophys. Res. Abstracts Vol. 19*, EGU2017-13605, EGU, Vienna, Austria.
 von Boetticher, A. (2019). Three-dimensional debris flow simulation tool debrisInterMixing. *EnviDat*. WSL-repository, doi:10.16904/envidat.143.
 von Boetticher, A. (2020). Angewandte 3D-Murgang- und Hangmurensimulationen berücksichtigen die Materialzusammensetzung - Chancen für die Berechnung von Ereignissen im Klimawandel?, *FAN-Agenda 2/2020*, 19-24.
 IBU Institut für Bau und Umwelt (2020). Technischer Bericht Murgangversuche Fellbach, HSR Hochschule für

Technik Rapperswil, 28. August 2020. (unveröffentlicht).
 Li, R., Teng, Y. (2022). An improved DebrisInterMixingFoam for debris flow simulation: numerical investigation and application, *Nat Hazards*.
<https://doi.org/10.1007/s11069-022-05376-x>.

Autorinnen und Autoren:

Albrecht von Boetticher, Staubli, Kurath & Partner AG, Bachmattstrasse 53, 8048 Zürich, albrecht.vonboetticher@wasserbau.ch
 Jürg Speerli, Andrea-Kristin Bachmann, Ingenieurbüro Speerli GmbH, Fuchsberg 11, 8846 Willerzell, speerli@iswb.ch, bachmann@iswb.ch
 Catherine Berger, geo7 AG, Neufeldstrasse 5–9, 3012 Bern, catherine.berger@geo7.ch