

Praxisanwendung der 3D-Hangmuren-simulation zur Bestimmung der Einwirkungen

Albrecht von Boetticher

Zusammenfassung

Der Zusammenhang zwischen einer Hangmurenauslösung und deren Gefahreneinwirkung in Form von Fließgeschwindigkeit, Fließhöhe und Dichte wird bisher durch Erfahrungswerte sichergestellt. Verlässt man deren Gültigkeitsbereich wie etwa bei seltenen Extremereignissen, bei Anprallszenarien im Steilhang, beim Einschlag von an der Oberfläche mitgetragenen Baumstämmen oder bei Prozessverkettungen mit weiteren Hangmuren, kann man inzwischen robuste Resultate mit Hilfe einer frei verfügbaren numerischen 3D-Simulationssoftware für Hangmuren und Murgänge erzielen. Wichtiger als numerisches Fachwissen ist dabei eine fachliche Beurteilung der Auslösezone und der Materialzusammensetzung der Hangmure samt Wassergehalt.

Keywords:

Hangmuren, Anprall, Fließverhalten, Oberflächenfließgeschwindigkeit, 3D-Simulation, Prozessmodellierung

Application pratique de la simulation 3D de lave torrentielle pour déterminer l'impact

Résumé

Le lien entre le déclenchement d'une lave torrentielle et ses effets de risque sous la forme de la vitesse, de la hauteur et de la densité de l'écoulement a été jusqu'à présent assuré par des valeurs empiriques. Si l'on sort de leur domaine de validité, comme dans le cas d'événements extrêmes rares, de scénarios d'impact sur des pentes raides, de l'impact de troncs d'arbres portés à la surface ou de chaînes de processus avec d'autres glissements de terrain, des résultats robustes peuvent désormais être obtenus à l'aide de logiciels de simulation numérique 3D librement disponibles pour les glissements de terrain et les laves torrentielles. Plus importante que l'expertise numérique est l'évaluation par des experts de la zone de déclenchement et de la composition matérielle de la lave torrentielle, y compris la teneur en eau.

Mots-clés

Laves torrentielles, impact, comportement de l'écoulement, vitesse d'écoulement en surface, simulation 3D, modélisation des processus.

Applicazione pratica della simulazione 3D di colate detritiche per determinarne l'impatto

Riassunto

Il rapporto tra le cause che producono una frana e i suoi effetti sul pericolo sotto forma di velocità del flusso, altezza del flusso e densità è stato finora gestito tramite valori empirici. Se si lascia la loro area di validità, come nel caso di rari eventi estremi, scenari di distacco su pendii ripidi, l'influenza di tronchi d'albero trasportati in superficie o l'effetto valanga su altre frane, è ora possibile ottenere risultati robusti con l'aiuto di software di simulazione numerica 3D liberamente disponibili per la simulazione di frane e colate detritiche. Più importante della perizia numerica è una valutazione esperta della zona di distacco e della composizione del materiale della colata detritica, compreso il contenuto d'acqua.

Parole chiave

Frane, distacco, movimento, velocità superficiale, simulazione 3D, modellizzazione

Einleitung

Seit den Hochwasserereignissen von 2005 hat sich der Blick auf die Naturgefahr Hangmuren verändert. Die umfassende Erfassung von Hangmurenereignissen und die Bereitstellung der Daten für Forschung und Praxis, wie z. B. durch die Hangmurendatenbank der WSL, hat zu einer breit aufgestellten Weiterentwicklung der Gefahrenbeurteilung geführt. Zu den innovativen Bereichen zählt auch die bisherige Entwicklung im Objektschutz, beispielsweise mit Schutznetzen. Um die Wirkung von Objektschutzmassnahmen zu beurteilen, muss die Einwirkung der Hangmure bestimmt werden. Eine erste Abstufung erfolgt auf der Grundlage von Intensitäten. Um Objektschutzmassnahmen festlegen zu können, muss jedoch schlussendlich die Einwirkung in bezüglich Fliessgeschwindigkeiten, Fliesshöhen und Dichte definiert werden, damit die Anpralldrücke und Einwirkungsbereiche bestimmt werden können. Es zeigt sich, dass die heutigen Kriterien der Hangmurenintensität (vgl. BAFU 2016) umstritten sind, da die zu Grunde gelegten Grössen aus Anrisshöhe und Ablagerungsmächtigkeit nicht ohne Weiteres im Zusammenhang mit der Einwirkung in Form von Anpralldrücken und Fliesshöhen stehen. Die Praxis erstellt diesen fehlenden Zusammenhang durch erfahrene Spezialisten, die wiederum auf eine gute Ereignisdokumentation zurückgreifen. Grössenordnungen für die Frontfliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe haben sich in der Praxis etabliert und sind anhand von Schadensbildern und zurückgerechneten Anpralldrücken und Geschwin-

digkeiten an Gebäuden überprüft worden. Diese Methodik gelangt jedoch in einigen Bereichen an ihre Grenzen:

1. Beurteilung im Hang: Die gängigen Geschwindigkeitsabschätzungen basieren zu grossen Teilen auf Hangmuren im Auslaufbereich. Die Geschwindigkeiten und Abflusstiefen im Transitbereich im Hang sind hingegen weniger gut bekannt. Experimentelle Untersuchungen im grossen Massstab liegen in der Schweiz nur für Hangmuren bei ca. 30° Hangneigung vor.
2. Die Kornzusammensetzung hat einen grossen Einfluss auf das Fliessverhalten. Man unterscheidet bei der Abschätzung der Einwirkung zwischen granularen und viskosen Hangmuren. Bei vorliegender Materialprobe ist es jedoch inzwischen möglich, eine differenziertere Unterscheidung vorzunehmen.
3. Die Ereignisdatenbank enthält kaum Aussagen über die zu erwartenden Extremereignisse mit Jährlichkeiten von 300 Jahren und mehr. Der Objektschutznachweis erfordert aber entsprechende Nachweise bei Sonderrisikoobjekten.
4. Von der Hangmure transportierte Baumstämme und Blöcke können für den Anprall massgebend werden. Diese bewegen sich jedoch im Allgemeinen nicht mit der Frontfliessgeschwindigkeit, sondern können beispielsweise mit der Oberflächenfliessgeschwindigkeit viel höhere Anprallgeschwindigkeiten erreichen, die kaum abzuschätzen sind.

Bei entsprechend hohem Schadenspotential lohnt es sich, den Punkten 1 bis 4 mit Numerischen Simulationen zu begegnen. Inzwischen steht es Ingenieurbüros offen, mit relativ kleinem Aufwand Hangmuren zu modellieren. Die Schlüsselfunktion liegt dabei in der Berücksichtigung der physikalischen Fliessprozesse: Die Suspension von Feinanteilen wird in Zonen grosser Geschwindigkeitsunterschiede dünnflüssiger (Shearthinning-Effekt), wodurch eine bereits schnell fliessende Hangmure in einem steilen Hangbereich zusätzlich deutlich mehr beschleunigen kann als eine langsam fliessende gleicher Zusammensetzung. Die Kieskomponenten dissipieren wiederum mehr Bewegungsenergie bei steigenden Drücken (Reibung zwischen Körnern), was z. B. beim Bremsvorgang im Auslauf und beim Anprall an Schutzbauten das Fliessverhalten stark beeinflusst. Beide Effekte können in dreidimensionalen Mehrphasensimulationen besser abgebildet werden als in tiefengemittelten Modellen. Letztere haben bisher die Modellierung von Massenbewegungen aufgrund begrenzter Rechenleistungen dominiert. Inzwischen sind jedoch dreidimensionale Mehrphasensimulationen von Hangmurenprozessen ohne Weiteres für Ingenieurbüros anwendbar, wie das folgende Beispiel aufzeigen soll. Für verwendbare Resultate ist dabei nicht mehr die Erfahrung für aufwendige Modellkalibrierungen massgebend, sondern wie bisher das Fachwissen zur

Beurteilung der Hangmurendisposition, Materialzusammensetzung und Ereignisgrösse. Nachfolgend beschreiben wir die entsprechende Anwendung für eine Hangmurengefährdung bei Diemtigen [BE] mit dem an der WSL & ETH entwickelten Hangmuren- und Murgangcode *debrisInter-Mixing*, der frei erhältlich ist [von Boetticher 2019].

Dokumentiertes Hangmurenereignis

Der betreffende Hang grenzt westlich an das Siedlungsgebiet Diemtigen zwischen Oberli Eggweid und Vorders Bergli / Hubel. Die steileren Bereiche mit über 31° Hangneigung sind gemäss Waldinformation im Geoportal des Kantons Bern mit etwa 80% Deckungsgrad bewaldet und gehören zum Objektschutzwald des Bundes. Etwa 1/3 der Bäume sind Nadelhölzer und die Entwicklungsstufen sind Baumholz II (41 – 50 cm Brusthöhendurchmesser) und Baumholz III (>50 cm Brusthöhendurchmesser), vgl. Abbildung 1.

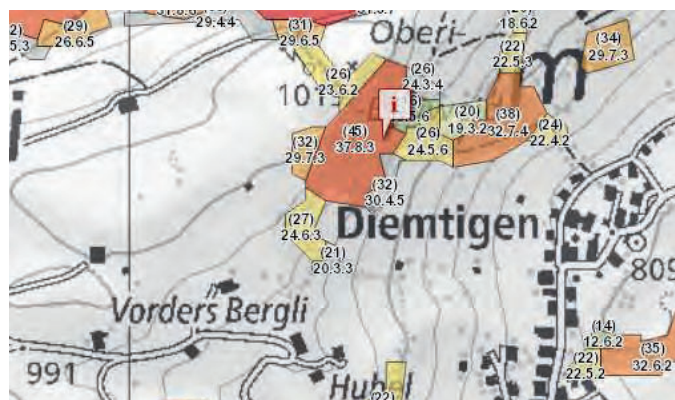


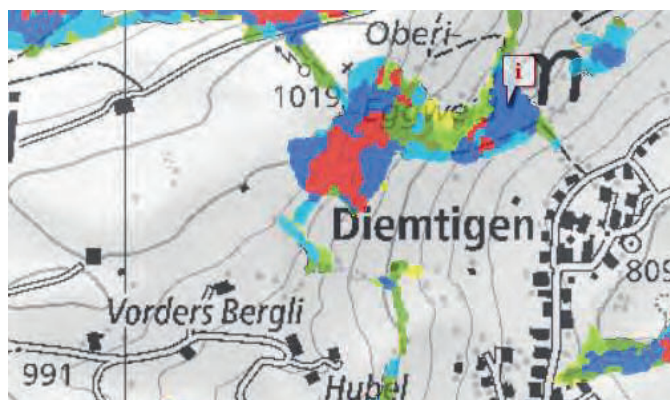
Abb. 1: Schutzwald mit 79% Deckungsgrad bestehend aus 33% Nadelholz [orange Flächen, links] gemäss Objektinformation der Waldinformation im Geoportal Kanton Bern mit Baumbestand von über 50 cm Brusthöhendurchmesser [rote Fläche, rechts]. | Fig. 1: Forêt protectrice avec un degré de couverture de 79% composée de 33% de conifères [surfaces orange, à gauche] selon l'information forestière du géoportail du canton de Berne avec une population d'arbres de plus de 50 cm de diamètre à hauteur de poitrine [surface rouge, à droite].

Die für die Hangmurenauslösung betrachteten weniger steilen Bereiche der Trogmatte bestehen aus Wiesen [keine Kuhtritte] auf Moränenmaterial mit Parabraunerden. Als Ausgangsszenario wurde ein erneuter Anriss im Bereich eines früheren Ereignisses gewählt. Im Anrissbereich entnommene Proben bis in 1 m Tiefe deuten auf hohe Tonanteile sowohl im Bt-Horizont als auch im darüber liegenden E-Horizont hin, mit 15% Sand und 20% Kies. Die 2005 hier entstandene Hangmure [Ereignis 2005-R0189 im Naturereigniskataster StorMe, siehe Abbildung 2] hatte eine Anrissmächtigkeit von 3 m, weshalb im Vergleich zur Bodenprobe mit höheren Kiesanteilen aus tieferen Schichten gerechnet werden muss. Die Hangmure entstand am Nachmittag des 22. August, nachdem innert 72 Stunden etwa 220 mm Niederschlag gefallen waren. Die Auslösezone liegt in einem Bereich mit Oberflächenabfluss gemäss Gefährdungskarte Oberflächenabfluss. Sowohl unterhalb

als auch auf gleicher Höhe benachbart befinden sich Sickerleitungsfassungen. Das Gelände weist eine ungünstige Form auf, indem es von flacheren zu steileren Bereichen übergeht [Abbildung 3], was oberhalb des Ausbruches heute noch markanter ist, als auch durch die Muldenform [Abbildung 4].

Szenario eines 300-jährlichen Ereignisses mit Folgeauslösung

Die Extremwertanalyse von MeteoSchweiz für die Messstelle Erlenbach im Simmental ergibt für eine Jährlichkeit von 300 einen Tagesniederschlag von etwa 120 mm mit Konfidenzintervall 90 mm – 200 mm, was im Mittel ca. 20% über den Ereignissen von 2005 liegt [Erlenbach 95 mm Tagesniederschlag gemäss Messdatensatz, Thun 94.7 mm gemäss Arbeitsbericht MeteoSchweiz 2006]. Als einfacher Ansatz wird angenommen, dass 20% mehr Wasser ent-



sprechend das Stauwasser im Boden steigern. Bei gleichmässigem Terrain kann grob vereinfacht für einen fiktiven [zur Ausbruchmitte hin linear verlaufenden] StauhORIZONT die Stauwasserzunahme um 20% zu einer analogen vergrösserten Ausdehnung des instabilen Bodenbereiches in jede Richtung führen. Aufgrund des breiten Konfidenzintervalls für die Niederschlagsmenge eines 300-Jährlichen Ereignisses wird als Sicherheit ein gegenüber 2005 rund dreifach erhöhtes Auslösevolumen angesetzt. Als massgebendes Ereignis wird eine spontane Rutschung von 1000 m³ oberhalb des Anrisses von 2005-R-0189 angenommen [zwischen 950 und 960 m ü. M.]. Aufgrund der alten Rutschung fehlt hier der stabilisierende Böschungsfuss, der Wasseraustritt und die ungünstige Geländeform sind jedoch weiterhin vorhanden. Die Anrissmächtigkeit wird wie im Ereignis von 2005 mit 3 m angenommen.

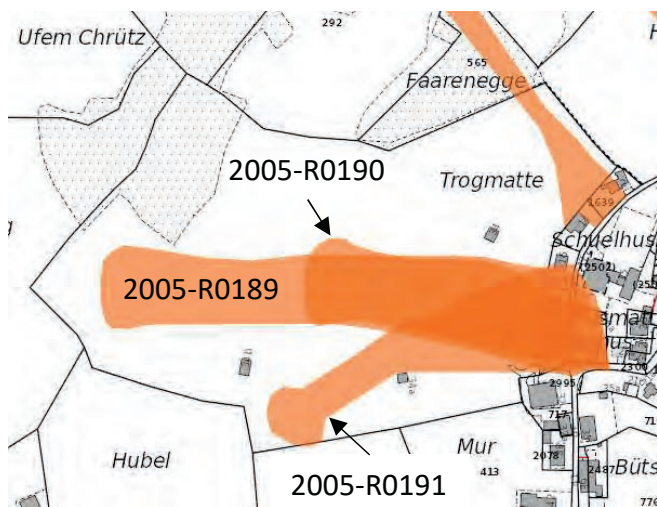


Abb. 2: Historische Ereignisse im Untersuchungsgebiet. Für das 300-jährliche Szenario werden Auslösungen aus den Anrissbereichen von 2005-R0189 und 2005-R0191 (Folgeauslösung) kombiniert. | Fig. 2: Événements historiques dans la zone d'étude. Pour le scénario à 300 ans, les déclenchements des zones de rupture de 2005-R0189 et 2005-R0191 (déclenchement séquentiel) sont combinés.

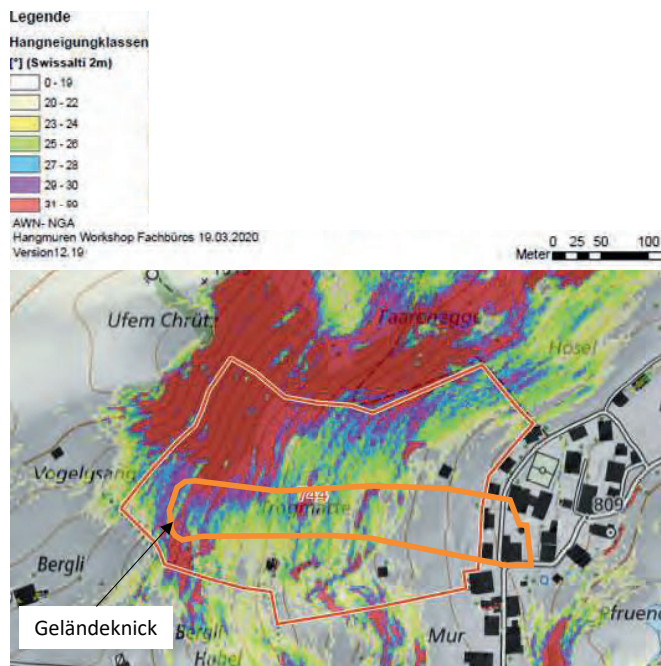


Abb. 3: Kritische Hangneigung mit ungünstiger Topografie im Auslösebereich von 2005-R0189 (orange Linie: Umriss gemäss Ereigniskataster). | Fig. 3: Inclinaison critique de la pente avec une topographie défavorable dans la zone de déclenchement de 2005-R0189 (ligne orange : contour selon le cadastre des événements).

Als ungünstige Prozesskette wird zudem angenommen, dass dieses 300-jährliche Bemessungsereignis auf der Höhe der Auslösezonen von 2005-R-0190 und 2005-R-0191 die Bodenstabilität nachteilig beeinflusst und es in diesem Bereich zu entsprechenden weiteren Auslösungen kommen kann. Die Simulation ergab, dass das Bemessungsereignis auf die Auslösezone von 2005-R-0191 trifft, weshalb das Ereignis 2005-R-0191 als Folgeauslösung modelliert wurde. Die zusätzliche modellierte Auslösung im Anrissbereich von 2005-R-0191 wurde bei abklingender Überdeckung rund 10 s nach dem Eintreffen des Bemessungsereignisses aktiviert, um der mobilisierenden Wirkung der Sohlschubspannung der ersten Hangmure Rechnung zu tragen und zugleich einen gewissen Zeitbedarf für die Veränderung der lokalen variablen Disposition zuzulassen.



Abb. 4: Überwachte Ausbruchstelle von 2005-R0189 (rote Linie: Anrisskanten). | Fig.4: Zone de rupture recouverte de 2005-R0189 (ligne rouge : tracé de la rupture).

Das Bemessungsereignis auf die Auslösezone von 2005-R-0191 trifft, weshalb das Ereignis 2005-R-0191 als Folgeauslösung modelliert wurde. Die zusätzliche modellierte Auslösung im Anrissbereich von 2005-R-0191 wurde bei abklingender Überdeckung rund 10 s nach dem Eintreffen des Bemessungsereignisses aktiviert, um der mobilisierenden Wirkung der Sohlschubspannung der ersten Hangmure Rechnung zu tragen und zugleich einen gewissen Zeitbedarf für die Veränderung der lokalen variablen Disposition zuzulassen.

Methode: 3D Simulation

Die Auslösung wurde mit dem an der ETH und WSL entwickelten frei zugänglichen, dreidimensionalen Hangmuren- und Murgangcode *debrisInterMixing* modelliert, der zudem zukünftig auch als *ecorisQ*-Tool bereitgestellt wird (www.ecorisq.org/ecorisq-tools). Als Modellgrundlage benötigt man ein digitales Höhenmodell (hier *SwissAlti3D* von *Swisstopo*) und Angaben zur Materialzusammensetzung. Der freie Modellparameter zur Gitterkalibrierung wurde in diesem Beispiel anhand eines Hangmurenversuchs in *Veltheim* [AR] kalibriert (von *Boetticher* 2012), bei welchem unterhalb der Auslösung in etwa die gleiche Hangneigung wie unterhalb des Anrisses von 2005-R-0189 vorlag. Der Modellparameter wurde so gewählt, dass eine Simulation mit einer eher granularen Mischung eines Hangmurenversuchs aus *Veltheim* auf ca. 30 m Fliessweg unterhalb der Auslösezone von 2005-R-0189 wie in *Veltheim* eine Frontgeschwindigkeit von ca. 10 m/s entwickelt (Abbildung 5). Anschliessend wurde die Simulation mit der Materialzusammensetzung des Bemessungsereignisses wiederholt (Abbildung 6), basierend auf den im Anrissbereich entnommenen Bodenproben.

Die Gitterauflösung wurde für dieses Beispiel mit 30 cm Zellkantenlänge horizontal und 25 cm Zellhöhe vertikal sehr grob gehalten. Für ein finales Bemessungsereignis sollten kleinere Zellabmessungen verwendet werden, vor allem im Auslöse- und Einwirkungsbereich.

Resultate

Die modellierte Hangmure fließt mit grosser Geschwindigkeit als relativ konzentrierte Masse über den steilen Hang ab und erreicht nach 15 Sekunden die Auslösezzone von 2005-R-0191 (Abbildung 7). Anschliessend folgt die Simu-



Abb. 5: Beschleunigungsstrecke mit einer Materialmischung entsprechend der Versuche in Veltheim zur Kalibrierung anhand der Frontfliessgeschwindigkeit [Farblegende entsprechend Oberflächenfliessgeschwindigkeit U [m/s]]. | Fig.5: Tronçon d'accélération avec un mélange de matériaux selon les tests effectués à Veltheim pour un calibrage basé sur la vitesse d'écoulement frontale [légende de couleur correspondant à la vitesse d'écoulement en surface U [m/s]].

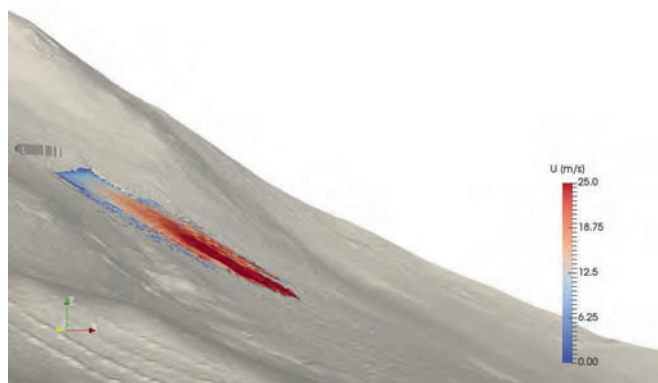


Abb. 6: Beschleunigungsstrecke mit der Zusammensetzung entsprechend der lokalen Materialproben. | Fig. 6: Tronçon d'accélération avec la composition selon les échantillons de matériaux locaux.

lation dem historischen Fliessweg von 2005-R-0191 und verteilt sich über eine grössere Fläche. Nach 26 Sekunden wurde in der Simulation ein Bereich beim Anriss von 2005-R-0191 mit Hangmurenmaterial zusätzlich verfüllt, um so eine Folgeauslösung zu imitieren (Abbildung 8). Während die erste modellierte Hangmure in einer leichten Senke vor dem Ortsbeginn grösstenteils abgebremst wird, entwickelt die Folgeauslösung grosse Geschwindigkeiten (Abbildung 9) und verteilt sich entsprechend dem historischen Ereignis-

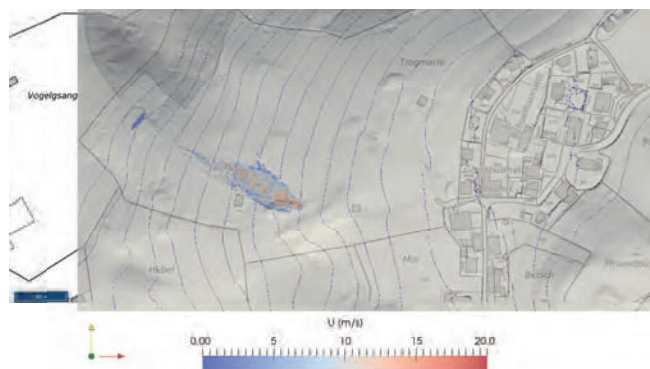


Abb. 7: Situation mit Höhenlinien [10 m Äquidistanz] und der in der Auslösezzone von 2005-R-0191 eintreffenden Bemessungshangmure 15 Sekunden nach der Auslösung. | Fig.7: Situation avec les courbes de niveau [équidistance de 10 m] et la coulée de dimensionnement

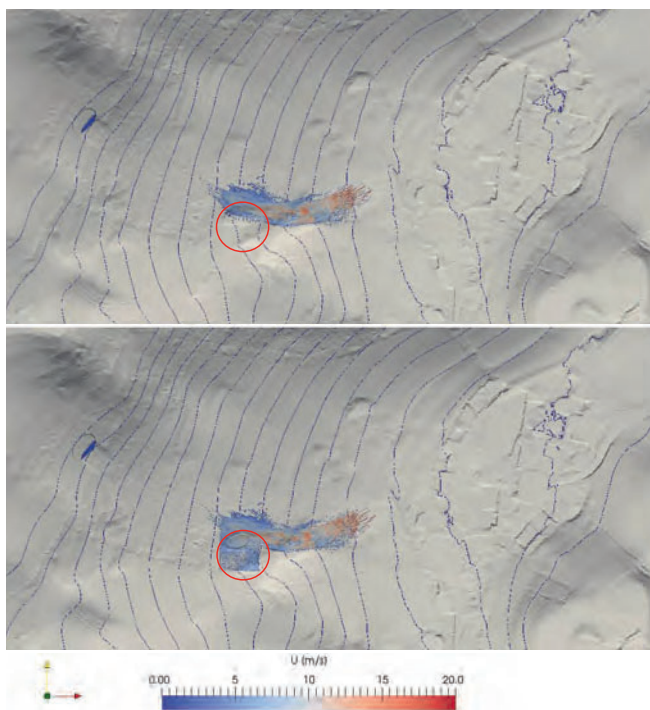


Abb. 8: Im Zeitpunkt der Folgeauslösung (oben) 26 Sekunden nach der Auslösung wird durch Verfüllen des alten Anrissbereichs von 2005-R-0191 [roter Kreis] mit Hangmurenmaterial (unten) eine Folgeauslösung imitiert. | Fig. 8: Au moment du déclenchement séquentiel (en haut), 26 secondes après le déclenchement, un déclenchement séquentiel est imité en remplissant la zone de l'ancienne rupture 2005-R-0191 [cercle rouge] avec des matériaux de laves torrentielles [en bas].

nis von 2005-R0191 (Abbildung 10). Schliesslich erreicht das Szenario die Siedlung mit Fliesshöhen von weniger als 0.5 m und 3-4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit (Abbildung 11).

Diskussion

Im Gegensatz zum Ereigniskataster (Abbildung 2) verläuft der Fliessweg der simulierten Hangmure südlicher. Eine Überprüfung mit Fotos vom Ereignis zeigt, dass tatsächlich das Ereignis 2005-R0189 südlich an der Hangmure 2005-R0190 vorbei dem simulierten Fliessweg gefolgt ist (Abbildung 12). Die Folgeauslösung verhält sich im Fliess-

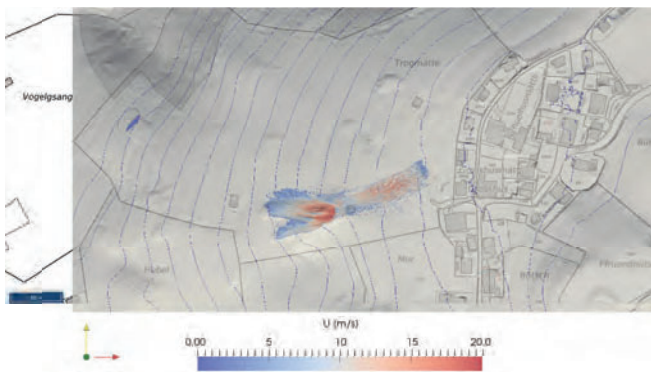


Abb. 9: Entstehung einer neuen Front aus der Folgeauslösung (30 s nach der Erstauslösung), während sich die erste Hangmure im flachen Bereich vor dem Ortsbeginn verteilt. | Fig. 9: Émergence d'un nouveau front à partir du déclenchement séquentiel (30 secondes après le déclenchement initial), tandis que la première coulée de boue est distribuée dans la zone plate avant le début de la localité.

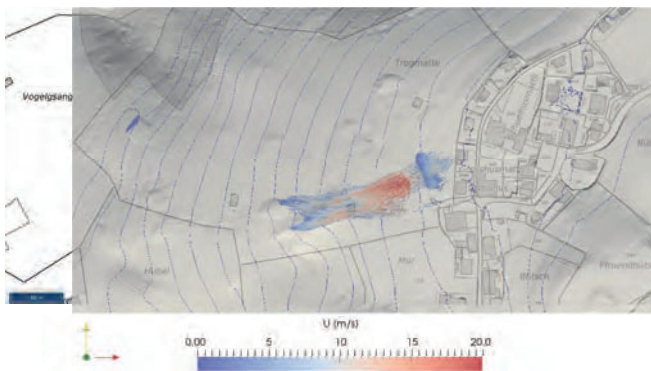


Abb. 10: Die erste Hangmure wird grösstenteils in einer leichten Senke bei 830 m ü. M. am Ortsbeginn abgebremst. Das Material der Folgeauslösung verteilt sich vermehrt über die Breite, analog zum Ereignis 2005-R0191 (35 s nach der Erstauslösung). | Fig. 10: La première coulée est fortement ralentie dans une légère cuvette à 830 m s.m. au début de la localité. Les matériaux du déclenchement séquentiel sont de plus en plus répartis sur la largeur, de manière analogue à l'événement 2005-R0191 (35 secondes après le déclenchement initial).

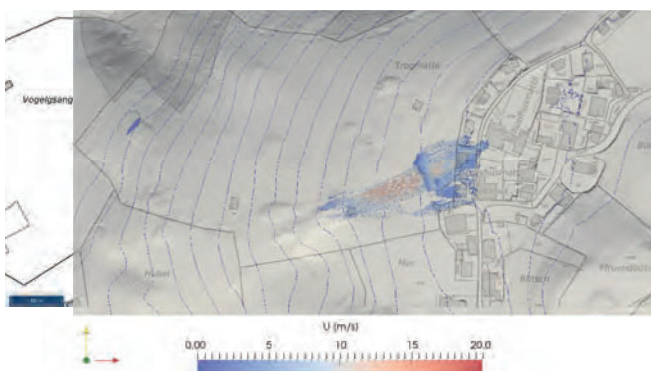


Abb. 11: Eindringen ins Siedlungsgebiet mit 3-4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit und weniger als 0.5 m Fliesshöhe. | Fig. 11: Pénétration dans la zone d'habitations

weg ebenfalls passend zur historischen Dokumentation (Abbildung 2 und 10). Die modellierten Fließwege scheinen somit plausibel. Die Fließgeschwindigkeiten erreichen im Transitbereich mit 13 m/s deutlich grössere Werte als

bei vielen Fachleuten erfahrungsgemäss angenommen werden würde, entwickeln im Siedlungsraum mit 3-4 m/s Frontfliessgeschwindigkeit und geringer Fliesshöhe jedoch wieder eine Intensität, die zur Praxiseinschätzung passt. Das vorgestellte Szenario veranschaulicht eine konservative Abschätzung eines 300-jährlichen Hangmurenereignisses und liefert zu jedem Zeitpunkt nebst der Frontfliessgeschwindigkeit und Fliesstiefe auch die entsprechenden Oberflächenfliessgeschwindigkeiten. Nebst der damit definierbaren Einwirkung auf Bauten aus Anpralldruck und Einwirkungshöhe kann der Anprall von beispielsweise auf der Fliessoberfläche getragenen Baumstämmen mit der richtigen Dynamik berücksichtigt werden.

Grosse Anforderungen werden jedoch nach wie vor an die Beurteilung des Auslösebereiches gestellt. In vielen Hängen ist die oberflächennahe Schicht derart inhomogen, dass die Materialzusammensetzung eines angenommenen Anrissbereiches deutlich von einem benachbarten Ausbruch abweichen kann. Vor allem der Tonanteil hat zusammen mit dem angenommenen Wassergehalt einen grossen Einfluss auf das Fließverhalten. Die daraus entstehende Ungewissheit ist jedoch sowohl für Beurteilungen mit Modellierung als auch ohne Modellierung die gleiche, und sollte bei entsprechendem Schadenpotential kein Argument sein, auf eine 3D-Simulation der Fließwege und Einwirkungen zu verzichten. Zwar können bisher kaum Prognosen darüber



Abb. 12: Sicht auf den Ereignishang mit deutlichen Spuren der Ereignisse 2005-R0189 und 2005-R0190 (Bild aus Ereigniskataster, Erhebung durch Jakob Werren). | Fig.12: Vue sur la pente des événements avec les traces évidentes des événements 2005-R0189 et 2005-R0190 (image du cadastre des événements, enquête de Jakob Werren).

gemacht werden, wann sich wo Hangmuren ereignen. Für die Beurteilung eines Schutzobjektes ist aber der Bereich der massgebenden Gefährdung im Hang über die Fließwegmodellierung klar begrenzt und definiert den Bereich für die Entnahme von Bodenproben.

Folgerungen

Die Steigerung der Rechenleistungen handelsüblicher PC's erlaubte in jüngster Vergangenheit, die physikalischen Fließprozesse von Hangmuren soweit zu berücksichtigen, dass bei einem vertretbaren Aufwand gute Resultate ohne langwierige Kalibrierprozesse gewonnen werden können. Voraussetzung ist jedoch nebst einem digitalen Höhenmodell eine gut abgestützte Erhebung der Materialzusammensetzung aus Bodenproben und eine umfassende fachliche Beurteilung der Auslösezone, Ereignisgrösse und deren Jährlichkeit. Der Fließprozess und die Einwirkungen auf Bauten bezüglich Fließhöhe, Frontfließgeschwindigkeit und Oberflächenfließgeschwindigkeit sind hingegen aus der Modellierung für jeden Bereich erhältlich. Bei entsprechendem Schadenpotential und wenig Erfahrungswerten für die angedachten Szenarien lohnt sich eine entsprechende numerische Beurteilung des Fließ- und Anprallverhaltens.

Verdankung

Speziellen Dank möchte ich den Organisatoren des Feld-Workshops «Gefahrenbeurteilung Hangmuren» des Amtes für Wald des Kantons Bern (Abteilung Naturgefahren) aussprechen, der dieses Frühjahr in Diemtigen BE hätte stattfinden sollen. Obwohl dieser Corona-bedingt bisher nicht durchgeführt werden konnte, lieferte er die Grundlage für die vorgestellte Modellierung.

Literaturverzeichnis

BAFU (Hrsg.) [2016]. Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608: 98 S.

MeteoSchweiz [2006]. Starkniederschlagsereignis August 2005, Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, 211, 63 pp.

von Boetticher, A. [2012]. Flexible Hangmurenbarrieren: Eine numerische Modellierung des Tragwerks, der Hangmure und der Fluid-Struktur-Interaktion. Diss. TU München, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Statik TU München, Volume 19 [2013-01] ISBN 978-3-8440-1616-1

von Boetticher, A. [2019]. Three-dimensional debris flow simulation tool debrisInterMixing. EnviDat. doi:10.16904/envidat.143

Kontaktadresse

Albrecht von Boetticher, dipl. Bauing ETHZ, Dr. Ing.
Staubli, Kurath & Partner AG
Bachmattstrasse 53
8048 Zürich
Telefon +41 43 336 40 50
E-Mail albrecht.vonboetticher@wasserbau.ch



Albrecht von Boetticher