

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 110 (2018)
Heft: 1

Artikel: Vergleich der numerischen Simulationsmodelle für Murgänge :
Anwendung auf Wildbachkegel im Kanton Wallis
Autor: Pralong, Mélanie Raymond / Rickenmann, Dieter / Schneider, Thomas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-941574>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.03.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Vergleich dreier numerischer Simulationsmodelle für Murgänge: Anwendung auf Wildbachkegel im Kanton Wallis

Mélanie Raymond Pralong, Dieter Rickenmann, Thomas Schneider

Zusammenfassung

Drei physikalisch-basierte numerische Simulationsmodelle wurden für die Berechnungen von Murgangablagerungen auf vier Wildbachkegeln im Kanton Wallis angewendet. Bei der Kalibrierung der Modelle und bei den Simulationen zukünftiger Ereignisse zeigen die Resultate bezüglich Ablagerungsflächen, Reichweiten, Fließhöhen und Fließgeschwindigkeiten eine bedeutende Variabilität. Bei der Simulation von Szenarien möglicher zukünftiger Ereignisse wurden in vielen Fällen deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellresultaten festgestellt, insbesondere auch, was die räumliche Verteilung der simulierten Intensitätsklassen betrifft. Bei den Szenarien möglicher zukünftiger Ereignisse wurde auch der Einfluss einer unterschiedlichen Anzahl Schübe

Rickenmann et al., 2006; Rickenmann und Koch, 1997).

Für diesen Beitrag wurden drei numerische Simulationsmodelle für Murgänge, nämlich FLO-2D (O'Brien, 2012), RAMMS (Christen, 2010) und Topoflow (Idealp, 2014), auf vier Walliser Wildbachkegel angewendet. Murgänge werden in diesen Modellen als einphasiges, homogenes und inkompressibles Fluid behandelt. Dabei wurden für alle Modelle die gleichen Eingabedaten (Murgang-Ganglinie, Kegeltopografie, Szenarien) verwendet und die Simulationen von unterschiedlichen Benutzern durchgeführt. Die Resultate der Simulationsberechnungen wurden bezüglich Ereignisperimeter, Fließhöhen und -geschwindigkeiten sowie Intensitätskarten verglichen, und es konnte, darauf basierend, die Eignung der einzelnen Modelle abgeleitet werden. Für jedes Testeinzugsgebiet wurden Simulationsberechnungen für Referenzereignisse sowie für Szenarien von zukünftigen Ereignissen durchgeführt. Die Referenzereignisse dienten der Kalibrierung der Modellparameter. Die Modellparameter wurden dann in den Berechnungen der zukünftigen Ereignissen eingesetzt. Der vorliegende Artikel fasst die wichtigsten Resultate des Vergleichs zusammen.

Die Grundlage dazu bilden die technischen Fachberichte (vgl. Literaturverzeichnis).

2. Einzugsgebiete und Murgangkegel

Die vier Untersuchungsgebiete sind der Milibach, der Tännbach, der Saasbach und die Combatseline im Kanton Wallis (Bild 1). Die Untersuchungsgebiete haben unterschiedliche Charakteristika in Bezug auf die Fläche des Einzugsgebiets, die abgeschätzte Feststofflieferung, die Kegeltopografie, den Überbauungsgrad auf dem Kegel und die Magnitude (Feststofffracht) der bekannten Referenzereignisse. In Tabelle 1 sind die Einzugsgebietsfläche und die Kennwerte der Gerinne und Wildbachkegel aufgeführt.

3. Beschreibung der Modelle

3.1 RAMMS

Das numerische Simulationssystem RAMMS (RAPid Mass Movement Simulation) wurde an der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelt. Mit Hilfe von RAMMS können Fließlawinen, Steinschläge und Murgänge modelliert werden. Zudem können allfällige Schutzmassnahmen wie beispielsweise

1. Einleitung

Murgänge treten, verglichen mit anderen Naturereignissen wie z.B. Lawinen, eher selten auf, können aber zu grossen Schäden und zu Todesopfern führen. Für die Gefahrenbeurteilung des Prozesses Murgang werden in der Schweiz seit einigen Jahrzehnten vermehrt physikalisch-basierte numerische Modelle zur Simulation des Murgangfliessverhaltens eingesetzt. Mit solchen Modellen können für die Gefahrenkartierung oder für die Überprüfung und Optimierung von lokalen Schutzmassnahmen wichtige Zielgrössen wie Fließgeschwindigkeiten, Fließhöhen oder Ablagerungstiefen des Murgangs für jeden Ort im potenziellen Gefahrenraum sowie die gesamte betroffene Fläche bestimmt werden. Es existiert eine Vielzahl solcher Modelle, die sich hauptsächlich bezüglich des implementierten rheologischen Ansatzes unterscheiden. Es gibt nur wenige vergleichende Bewertungen der in der Schweiz typischerweise verwendeten Modelle (Stancanelli & Foti, 2015; Armento, 2008; Naef et al., 2006;

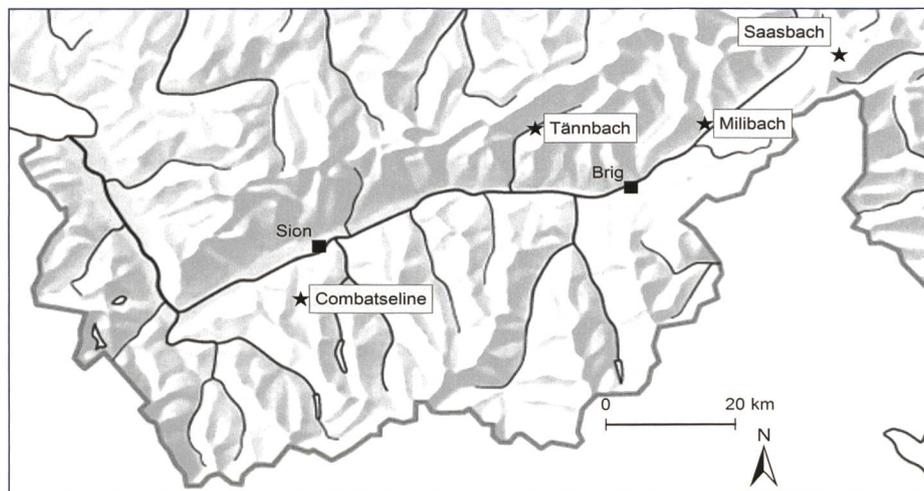


Bild 1. Lage der Untersuchungsgebiete für die Simulationen zu Murgangablagerungen (ch2mio_relief© 2017 Eidg. Vermessungsdirektion [DV033531], reproduziert mit Bewilligung von swisstopo [JA100118]).

| | Milibach | Tännbach | Saasbach | Combatseline |
|---|------------|-----------|-----------|--------------|
| Einzugsgebietsfläche (km ²) | 2.51 | 3.59 | 5.38 | 0.17 |
| <i>Gerinne Charakteristik</i> | | | | |
| Länge Hauptgerinne (m) | 2675 | 3395 | 2440 | 550 |
| Neigung (°) | 25.8 | 20.4 | 19.5 | 36.9 |
| Höhe oberhalb Kegel (m ü. M.) | 1180-2385 | 1520-2730 | 1825-2655 | 1638-1992 |
| Vorfluter | Wysswasser | Lonza | Gerebach | La Printse |
| <i>Wildbachkegel</i> | | | | |
| Länge (m) | 685 | 415 | 310 | 480 |
| Neigung (°) | 9.5 | 14.5 | 8.3 | 15.5 |
| Höhe (m ü. M.) | 1067-1180 | 1415-1520 | 1780-1825 | 1508-1638 |

Tabelle 1. Kennwerte der Gerinne und Wildbachkegel für die vier Einzugsgebiete.

Dämme in die Modellierung integriert werden. Die Simulationsumgebung besteht aus drei kommerziell erhältlichen Modulen, RAMMS::AVALANCHE (Fliesslawinen), RAMMS::DEBRIS FLOW und RAMMS::ROCKFALL (Christen et al., 2012). Mit dem Murgangmodul kann das Ausbreitungs- und Ablagerungsverhalten von Murgängen auf komplexen Terrainoberflächen modelliert werden. Murgänge werden in RAMMS als einphasiges, homogenes und inkompressibles Fluid behandelt. Das Fließverhalten wird durch den Ansatz eines sogenannten Voellmy-Fluids bestimmt, welcher auch für die Simulation von Schneelawinen verbreitet ist.

Die basale Reibung wird mit dem Voellmy-Salm-Ansatz (Salm 1993, Christen et al. 2010) in eine geschwindigkeits-unabhängige trockene «Coulomb»-Reibung (Reibungskoeffizient μ) und eine turbulente Reibung (Reibungskoeffizient ξ) aufgeteilt. Die beiden Reibungsparameter μ und ξ können nicht direkt bestimmt werden, sondern erfordern eine Kalibrierung anhand dokumentierter Ereignisse und von Analogieschlüssen aus Berechnungen in vergleichbaren Situationen. Für detailliertere Informationen zu RAMMS wird auf Christen et al. (2010) verwiesen.

3.2 FLO-2D

Das Programm FLO-2D (Version FLO-2D PRO, 2012) wurde an der Colorado State University von O'Brien et al. (1993) entwickelt. Mit FLO-2D können Reinwasser- und hyperkonzentrierte Abflüsse sowie Murganggemische modelliert werden. Murgänge werden als homogenes, einphasiges nicht-lineares Bingham-Fluid behandelt. Das Fließverhalten der Murgänge wird mit einem empirischen, quadratischen rheologischen Ansatz nach O'Brien und Julien (1985) beschrieben:

$$S_f = \frac{\tau_B}{\rho gh} + \frac{F_{lam} \mu_B v}{8 \rho gh^2} + \frac{n_{man}^2 v^2}{h^{4/3}} \quad (1)$$

Dabei ist τ_B die Bingham'sche Grenzschubspannung, ρ die Materialdichte, F_{lam} der laminare Fließwiderstandskoeffizient ($F_{lam}=24$ für glatte, breite Rechteckgerinne), μ_B die sogenannte Bingham'sche Zähigkeit, n_{man} ein Rauigkeitsbeiwert analog zum Manning'schen Fließgesetz für Reinwasser, g die Erdbeschleunigung, h die

Abflusstiefe und v die Fließgeschwindigkeit. Das Reibungsgefälle S_f (bzw. die bremssende Schubspannung) in (1) setzt sich somit aus drei verschiedenen Komponenten zusammen: einem Grenzschubspannungsterm, einer Viskositätskomponente und einem Rauigkeitsterm. Letzterer berücksichtigt einerseits die Gerinnerauigkeit (n_{man}) und andererseits Turbulenzeffekte und die gegenseitige Interaktion (Kollision, Reibung, Rotation) der sich im Murgang bewegenden grobkörnigeren Partikel.

Für die Anwendung von Gleichung (1) sind Angaben zur Grenzschubspannung τ_B (2) und zur Bingham-Viskosität μ_B (3) nötig. Falls keine rheologische Analyse des Murgangmaterials vorliegt, empfiehlt O'Brien (2012) dazu folgende empirische Gleichungen:

$$\tau_B = \alpha_2 e^{(\beta_2 C_v)} \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

$$\mu_B = \alpha_1 e^{(\beta_1 C_v)} \quad [\text{Pa s}] \quad (3)$$

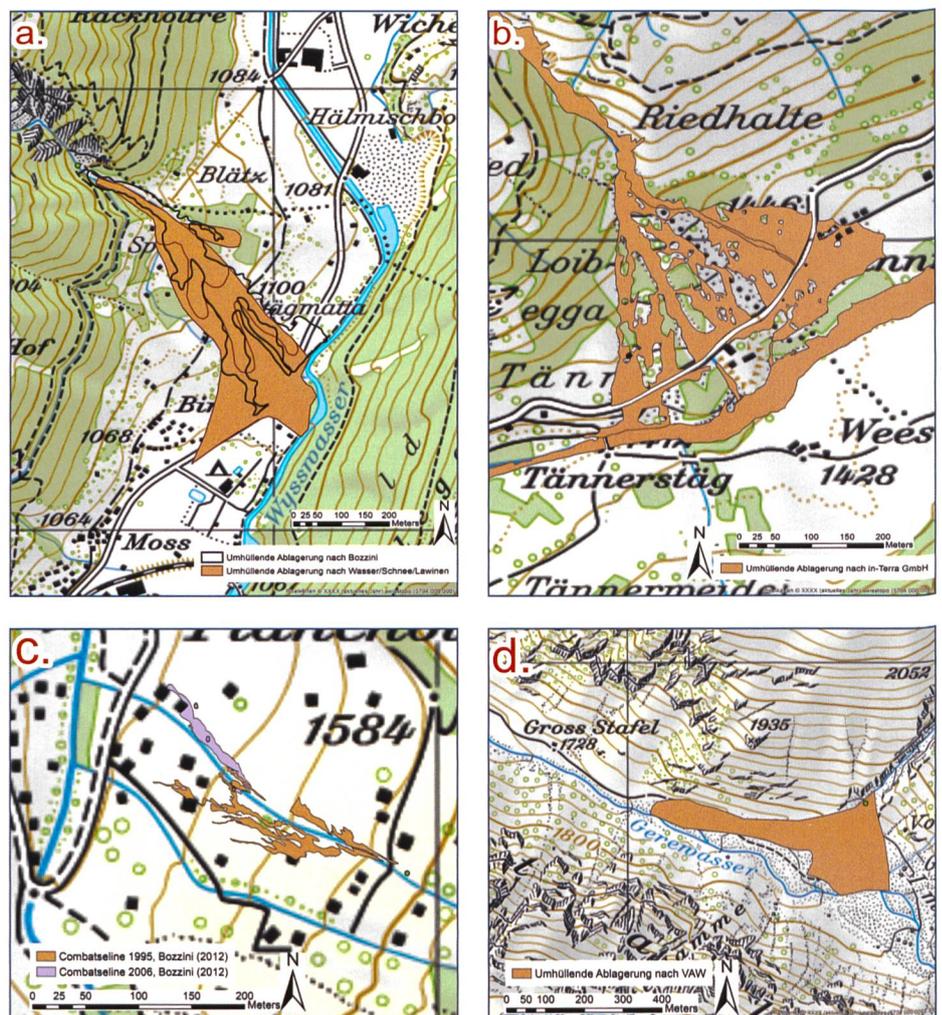


Bild 2. Umhüllende der Ablagerungen der Referenzereignisse: (a) Milibach 2002 aus wasser/schnee/lawinen (2012) (orange Fläche) und Bozzini et al. (2012) (schwarze Linie); (b) Tännbach 2011 aus Geoplan AG (2012), Bild: Büro in-Terra GmbH (orange Fläche); (c) la Combatseline 1995 aus Bozzini et al. (2012) (orange Fläche) und 2006 aus Bureau d'Etudes Géologiques SA (2006) (rosa Fläche); (d) Saasbach 1987 aus VAW (1992). Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (5704000000).

Die Koeffizienten α und β wurden empirisch bestimmt.

3.3 Topoflow

Das Modell Topoflow wurde vom Büro Idealp in Sion entwickelt. Die folgende Beschreibung basiert auf *Idealp* (2014). Die dem Modell zugrunde liegenden Gleichungen sind die tiefengemittelten Bewegungsgleichungen (Flachwassergleichungen oder Gleichungen von St.-Venant). Zur Beschreibung des Fließverhaltens von Murgängen verwendet Topoflow einen viskoplastischen rheologischen Ansatz nach *Herschel-Bulkley* (Coussot, 1997). Gemäss diesem Ansatz findet unterhalb einer bestimmten Schubspannung keine Deformation (d.h. kein Fließen) statt, und darüber verhält sich das Material als viskose Flüssigkeit. Die bremsende Schubspannung τ ist wie folgt definiert:

$$\tau = \tau_c + K\dot{\gamma}^n \quad \text{mit } n < 1 \quad (4)$$

mit τ_c = Grenzscherungsspannung, $\dot{\gamma}$ = Scherrate und n = Modellindex. Der Viskositätsparameter K wurde so gewählt dass $K = \tau_c/3$, mit den Einheiten für K in [s⁻ⁿ], $\dot{\gamma}$ in [1/s] und für τ und τ_c in [Pa].

Im einer kürzlich aktualisierten Version des Modells Topoflow wurde auch ein turbulenter Reibungsterm eingeführt (ähnlich wie beim Modell FLO-2D); diese neuere Version von Topoflow konnte für die hier vorgestellte Studie nicht berücksichtigt werden.

4. Eingangsdaten für die Modellierung und durchgeführte Simulationen

Für die Murgangmodellierungen wurden folgende Datensätze zur Verfügung gestellt: digitale Höhenmodelle SwissALTI3D (2 m Auflösung) der Kegeltopografie sowie ein an der WSL erzeugtes digitales Oberflächenmodell für das Gerinne und den nahen Kegelbereich des Wildbaches Combatseline (50 cm Auflösung), Ereignisfrachten (Murgangfrachten pro Ereignis) und Szenarien für Murgang-Ganglinien (die Feststoffe und das Wasser beinhaltend) am Kegelhalss sowie Shapefiles des umhüllenden Perimeters der Ablagerungen vergangener Ereignisse. Die umhüllenden Ablagerungen der Referenzereignisse sind in *Bild 2* gezeigt. Die Umhüllenden der Ablagerungen, referenziert mit *Bozzini et al.* (2012), wurden aus Ereignisfotos mit dem Tool zur Georeferenzierung von Schrägbildern abgeleitet (*Bozzini et al.*, 2012).

Für die Bestimmung der Murgang-Ganglinien am Kegelhalss wurde davon ausgegangen, dass bei allen Bächen gra-

nulares Fließen massgebend ist, d. h., es wurde folgender empirischer Zusammenhang zwischen der Murgangfracht (M , m³) und dem Maximalabfluss (Q_p , m³/s) nach *Mizuyama et al.* (1992) verwendet

$$Q_p = 0.135 M^{0.78} \quad (5)$$

In der Regel ist damit der ungünstigere Fall berücksichtigt, da ein grösserer Maximalabfluss Q_p zu einem früheren Ausbruch des Murgangs aus einem Gerinne führt. Für die Simulationen wird weiter angenommen, dass ein gegebener Schub mit einem gege-

benen Maximalabfluss als dreieckförmige Ganglinie am Kegelhalss beschrieben wird. Mit dieser typischen Annahme einer Dreieckganglinie kann die Schubdauer T über die Formel $M = 0.5 Q_p T$ bestimmt werden.

Für jedes Testeinzugsgebiet wurden Berechnungen für die Referenzereignisse (*Tabelle 2*) sowie für Szenarien von zukünftigen Ereignissen (*Tabelle 3*) durchgeführt. Für mögliche zukünftige Wildbachereignisse mit angenommenen Jährlichkeiten von 30, 100 und 300 Jahren wurde eine Abschätzung der Murgangfracht durchgeführt. Dabei wurde, soweit möglich, die

| Bach | Ereignisdatum | Murgangfracht (m ³) | Umhüllende der Ablagerungen |
|--------------|------------------|---------------------------------|--|
| Milibach | 16./17. 11. 2002 | 10'000 | wasser/schnee/lawinen und WSL, Bozzini et al. (2012) |
| Tännbach | 10.10.2011 | 75'000 | in-Terra GmbH mit Geoplan Naturgefahren |
| Saasbach | 24.08.1987 | 180'000 | WSL |
| Combatseline | 30.05.1995 | 1500 | WSL, Bozzini et al. (2012) |
| | 18.05.2006 | 500 | WSL, Bozzini et al. (2012) |

Tabelle 2. Angaben zu den Referenzereignissen in den vier Untersuchungsgebieten.

| Bach | Jährlichkeit | Abgeschätzte Murgangfracht (m ³) | Szenario | Anzahl Schübe und Fracht pro Schub (m ³) |
|----------|------------------|--|----------|--|
| Milibach | M ₁₀₀ | 24'000 | Mili1 | 1 à 24'000 |
| | | | Mili2 | 3 à 8'000 |
| | M ₃₀₀ | 40'000 | Mili3 | 1 à 10'000 1 à 30'000 |
| | | | Mili4 | 4 à 10'000 |
| Tännbach | M ₁₀₀ | 43'000 | Tänn1 | 1 à 43'000 |
| | | | Tänn2 | 2 à 21'500 |
| | M ₃₀₀ | 100'000 | Tänn3 | 2 à 50'000 |
| | | | Tänn4 | 4 à 25'000 |

| | | | | |
|--------------|------------------|---------|-------|-------------|
| Saasbach | M ₃₀ | 100'000 | Saas1 | 1 à 100'000 |
| | | | Saas2 | 2 à 50'000 |
| | | | Saas3 | 4 à 25'000 |
| Combatseline | M ₃₀ | 1'100 | Comb1 | 1 à 1'100 |
| | | | Comb2 | 2 à 550 |
| | M ₁₀₀ | 2'600 | Comb3 | 2 à 1'300 |
| | | | Comb4 | 1 à 2'600 |
| | M ₃₀₀ | 5'500 | Comb5 | 2 à 2'750 |
| | | | Comb6 | 1 à 5'500 |

Tabelle 3a/b. Verwendete Szenarien mit Anzahl Schüben und Fracht pro Schub für zukünftige Ereignisse einer gegebenen Jährlichkeit für die vier untersuchten Bäche (Milibach, Tännbach, Saasbach, Combatseline).

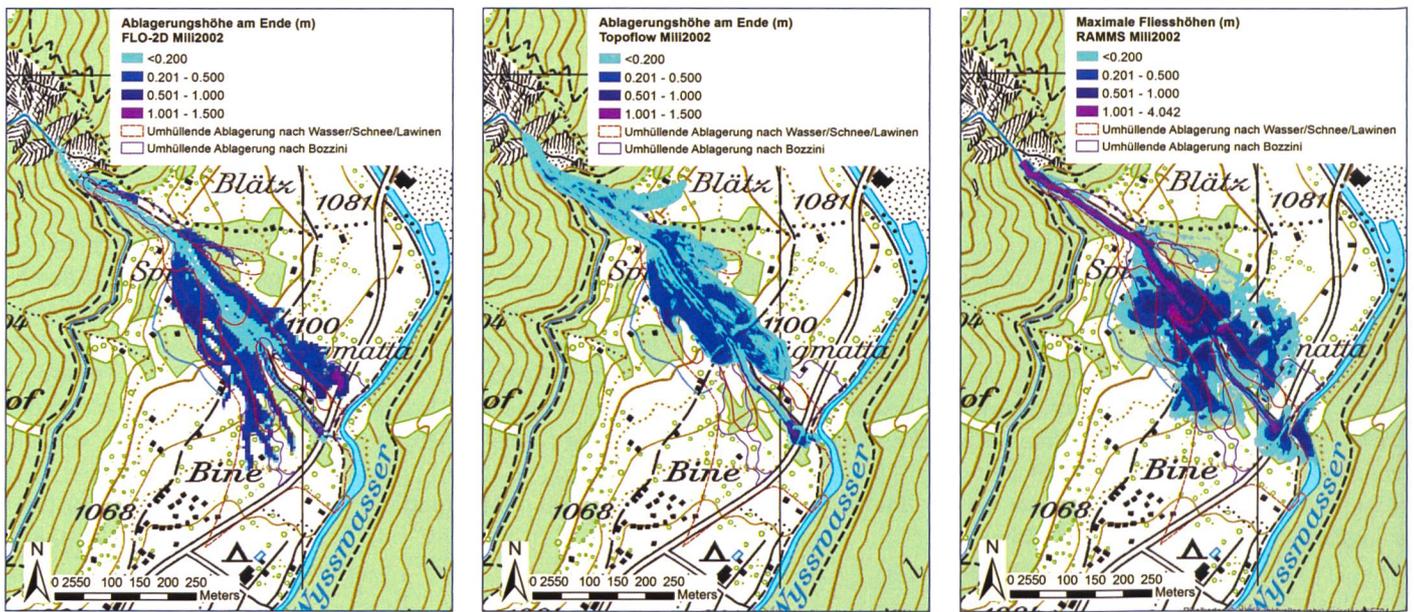


Bild 3. Simulierte Ablagerungshöhen bzw. maximale Fliesshöhen (RAMMS) für das Referenzereignis 2002 im Vergleich zur Umhüllenden der beobachteten Ablagerungen. Links: Modell FLO-2D, Mitte: Modell Topoflow, rechts: Modell RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (5 704 000 000).

| Methode | Parameter | Kriterium | Intensität |
|------------|-------------------------------|---|------------|
| BUWAL | -Ablagerungsmächtigkeit h_a | $h_a > 1\text{m}$ UND $v > 1\text{m/s}$ | stark |
| | -Fließgeschwindigkeit v | $h_a < 1\text{m}$ ODER $v < 1\text{m/s}$ | mittel |
| Rickenmann | - Fließhöhe pro Schub h_d | $h_d > 1\text{m}$ ODER $v > 1.5\text{m/s}$ | stark |
| | -Fließgeschwindigkeit v | $h_d < 1\text{m}$ UND $0.4\text{m/s} < v < 1.5\text{m/s}$ | mittel |
| | | $h_d < 0.4\text{m}$ UND $v < 0.4\text{m/s}$ | schwach |

Tabelle 4. Kriterien zur Abgrenzung der Intensitäten gemäss den Empfehlungen des BUWAL (1997) und gemäss Rickenmann (2005).

Methode «SEDEX» angewendet, welche am Geographischen Institut der Universität Bern entwickelt wurde (Frick et al., 2011; Kienholz et al., 2010). Die Angaben zu Referenzereignissen aus der Vergangenheit wurden zur Eichung bzw. Validierung der Simulationsmodelle verwendet.

5. Vergleich der Simulationsergebnisse der drei Modelle

5.1 Kalibrierung

Für die Kalibrierung der Modelle (bzw. Modellparameter) wurden die Ablagerungsflächen am Ende der Simulationen qualitativ mit den Umhüllenden der beobachteten Ablagerungsflächen vergangener Ereignisse verglichen. Für die Murgangereignisse Mili2 2002 (Bild 3), Tännbach 2011 und Saasbach 1987 entsprachen die simulierten Ablagerungsflächen teilweise gut bis sehr gut der Umhüllenden der beobachteten Ablagerungen. Beim Bach Combatseilinie waren die Murgangsvolumen der Referenzereignisse relativ klein. Zusammen mit einem sehr kleinen Gerinnequerschnitt führte das bei den Simulationsrechnungen mit allen Modellen zu Problemen mit der räumlichen Auflösung. Daher werden zu diesem Fall keine Resultate präsentiert.

Bild 3 zeigt beispielhaft die simulierten Ablagerungshöhen bzw. maximalen Fließhöhen für das Referenzereignis Mili2 2002. Die simulierten Ablagerungsflächen mit den Modellen FLO-2D (Bild 3, links) und Topoflow (Bild 3, Mitte) entsprechen relativ gut der beobachteten Umhüllenden, vor allem im Vergleich mit der Methode Bozzini (rosa Linie in Bild 3, links). Mit RAMMS werden im mittleren Kegelbereich die Fließwege auf beiden Seiten des Gerinnes breiter verteilt simuliert als mit den anderen Modellen (Bild 3, rechts). Im mittleren Kegelbereich und in der Gegend Stägmatia sind die insgesamt überflossenen Bereiche zum Teil deutlich breiter als gemäss den Beobachtungen. Der kleine Ausbruch nach links bei Kote 1130 wird mit allen Modellen wiedergegeben.

5.2 Szenarien von zukünftigen Ereignissen

Bei den Berechnungen der zukünftigen Ereignisse wurden für alle Szenarien die mit den Referenzereignissen kalibrierten Modellparameterwerte pro Bach verwendet. Bei den zukünftigen Ereignissen zeigten die Modelle FLO-2D, Topoflow und RAMMS bezüglich Ablagerungsflächen und Reichweite zum Teil ähnliche Resultate (z. B. Mi-

libach, Tännbach), aber zum Teil auch gegensätzliche Tendenzen (z. B. Saasbach).

Die Intensitätskarten wurden gemäss den Empfehlungen des BUWAL (1997) sowie gemäss den in Rickenmann (2005) vorgeschlagenen Intensitätsgrenzen bestimmt (Tabelle 4). Bei der Methode BUWAL werden zur Abgrenzung von starker und mittlerer Intensität die Ablagerungshöhen und die Fließgeschwindigkeiten benutzt. Bei der Methode Rickenmann wird zusätzlich eine schwache Intensität bestimmt. Zur Abgrenzung der Intensitäten werden in diesem Fall die (örtlich maximalen) Fließhöhen und Fließgeschwindigkeiten herangezogen.

5.3 Zukunftsszenario Mili2

Die Resultate der Simulationen für das mögliche zukünftige Ereignis Mili2 beim Mili2bach mit einem Gesamtvolumen von 24 000 m³, aufgeteilt in drei Schübe à 8 000 m³ sind in den Bildern 4 bis 6 dargestellt. Die maximalen Fließhöhen (Bild 4) wurden bei den Modellen FLO-2D und RAMMS bei mehreren Schüben jeweils mit Bezug auf das ursprüngliche Terrain dargestellt, d. h., die Fließhöhen sind als Summe der Ablagerungshöhen der verschiedenen Schübe und der maximalen Fließhöhen des letzten Schubes berechnet worden. Beim Modell Topoflow handelt es sich hingegen für jede Zelle um den maximalen Wert über die verschiedenen Schübe. Somit sind die Fließhöhen in Bild 4 für die Modelle FLO-2D und RAMMS von der Darstellung her generell grösser als für das Modell Topoflow. Diese unterschiedlichen Darstellungen müssen beim Vergleich der Resultate beachtet werden.

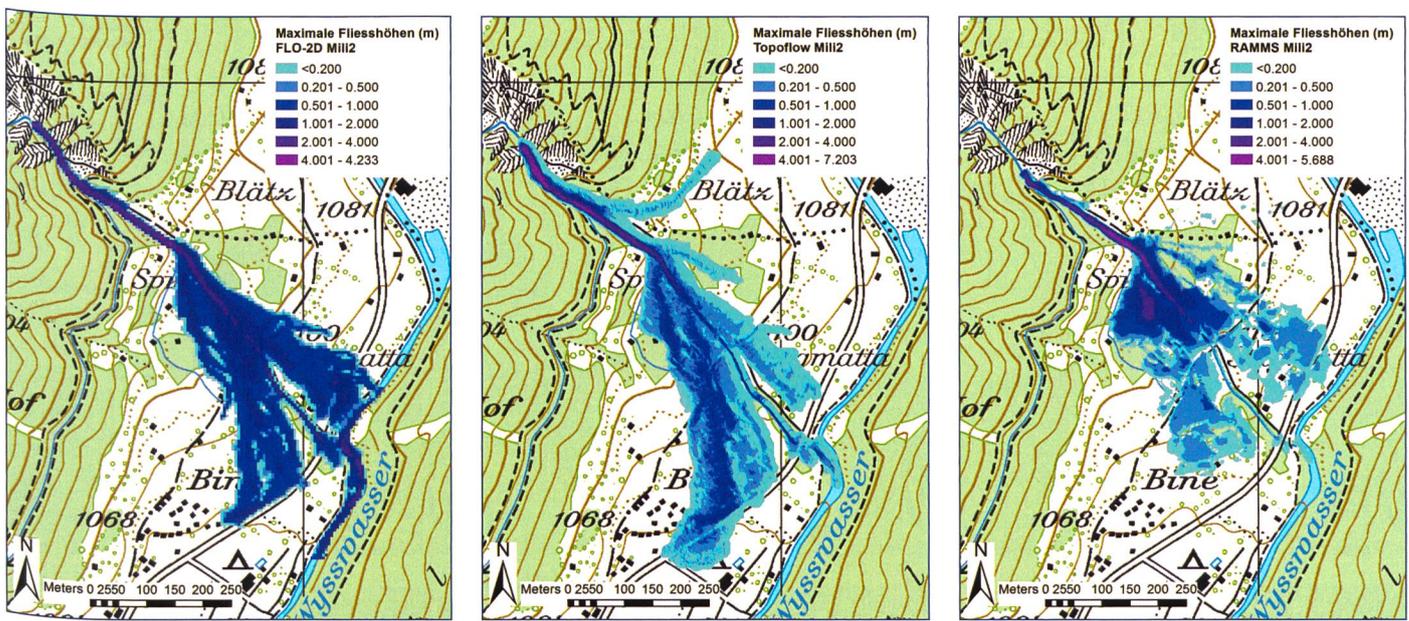


Bild 4. Maximale Fliesshöhen für das Zukunftsszenario Mili2, berechnet mit den drei Modellen: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (570400000).

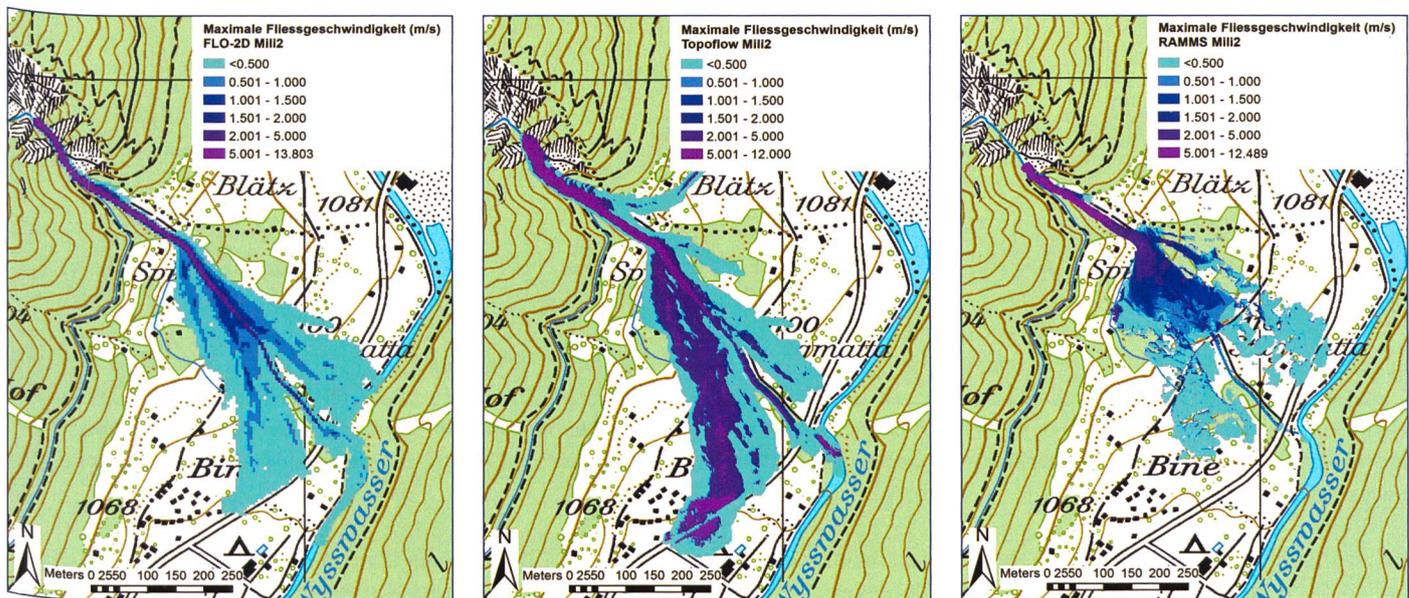


Bild 5. Maximale Fliessgeschwindigkeiten für Mili2, berechnet mit den drei Modellen: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (570400000).

Beim Modell FLO-2D sind maximale Fliesshöhen > 2 m (violette bis rote Farben) einzig im oberen Gerinnebereich vorhanden. Auf dem Kegel werden Werte zwischen 1.5 und 2 vereinzelt simuliert, ansonsten sind die Fliesshöhen unter 1 m. Das Modell RAMMS simuliert ähnliche Fliesshöhen. Maximale Fliesshöhen > 2 m werden im oberen Gerinne und auf der oberen rechten Kegelhälfte simuliert. Auf der ganzen unteren Kegelhälfte werden Fliesshöhen < 1 m modelliert. Bei Topoflow sind die maximalen Fliesshöhen über die verschiedenen Schübe im oberen Gerinne vergleichbar oder etwas grösser als bei FLO-2D und RAMMS. Auf dem Kegel nehmen sie nach aussen und nach unten von 2 auf 0 m ab. Diese Werte würden, wenn sie wie bei FLO-2D und RAMMS mit den Ablagerungshö-

hen der früheren Schübe kumuliert wären, insgesamt höher ausfallen als bei den anderen zwei Modellen. Der Vergleich der maximalen Fliesshöhen für das Szenario Mili1 mit einem Schub à 24000 m³ (keine Abbildung) zeigt ebenfalls, dass das Modell Topoflow tendenziell höhere maximale Fliesshöhen simuliert als FLO-2D und RAMMS. Fliesshöhen > 2 m sind bei den Modellen FLO-2D und RAMMS fast ausschliesslich im oberen Gerinnebereich zu treffen. Beim Modell Topoflow sind Fliesshöhen von 2 bis 3 m bis zur unteren Kegelhälfte vorhanden. Beim Modell FLO-2D sind Werte < 1 m auf dem unteren Kegelbereich zu beobachten. Bei Topoflow werden Werte < 1 m in den äusseren Ablagerungsbereichen simuliert. Beim Modell RAMMS nehmen die Fliesshöhen vom Gerinne nach aussen und Rich-

tung unterer Kegel schnell ab und zeigen auf dem ganzen Kegel verbreitet Werte < 1 m.

Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten sind in Bild 5 dargestellt. Beim Modell FLO-2D werden Fliessgeschwindigkeiten > 1.5 m/s fast ausschliesslich im Gerinne erzeugt (dunkelblaue bis rote Farben in Bild 5 links). Fliessgeschwindigkeiten < 1.5 m/s dominieren ausserhalb des Gerinnes im mittleren und unteren Kegelbereich (blaue bis hellblaue Farben). Das Modell Topoflow ergibt deutlich höhere Fliessgeschwindigkeiten. Fliessgeschwindigkeiten > 3 m/s werden entlang des Gerinnes und in den Hauptstrichen der Ablagerungen vor allem auf der rechten Kegelenseite simuliert (rötliche Farben in Bild 5, Mitte). Fliessgeschwindigkeiten < 1.5 m/s sind vor allem bei den An-

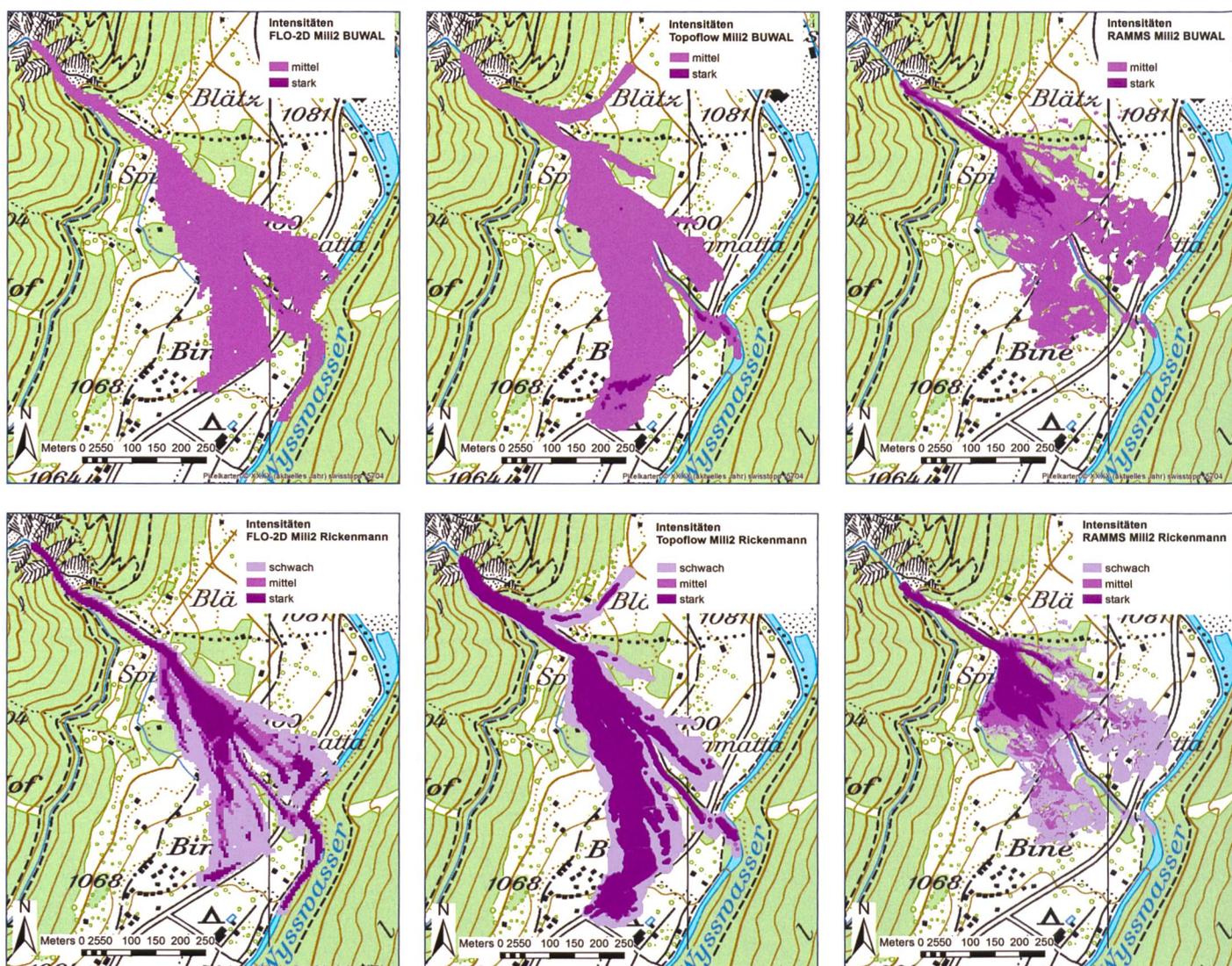


Bild 6. Intensitätskarten gemäss den Empfehlungen des BUWAL (oben) und gemäss Rickenmann (2005) (unten) für das Zukunftsszenario Mili2: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (570400000).

haltezone der Murgänge, d. h. den Randzonen der Ablagerungen, zu finden. Beim Modell RAMMS (Bild 5, rechts) werden Fließgeschwindigkeiten > 1.5 m/s im Gerinne und auf dem obersten Kegelbereich simuliert (dunkelblaue bis rote Farben). Fließgeschwindigkeiten < 1.5 m/s (blaue bis hellblaue Farben) treten im mittleren und unteren Kegelbereich auf.

Die Intensitätskarten sind in Bild 6 dargestellt. Mit dem Modell FLO-2D zeigt die Intensitätskarte nach BUWAL ausschliesslich mittlere Intensitäten, während bei der Methode Rickenmann eine stärkere Differenzierung mit grösseren Flächen in starker und auch schwacher Intensität resultiert (Bild 6, links). Mit dem Modell RAMMS ist bei der Methode BUWAL der grösste Teil des Kegels von mittlerer Intensität betroffen. Bei der Methode Rickenmann ist eine Differenzierung von überwiegend starker Intensität im oberen Kegelbereich und überwiegend schwacher Intensität im unteren Kegelbereich

feststellbar (Bild 6, rechts). Mit dem Modell Topoflow sind die berechneten Intensitäten nach der Methode Rickenmann generell (deutlich) stärker und die höheren Intensitäten flächenmässig vor allem gegen den unteren Kegelteil ausgedehnter als mit den zwei anderen Modellen (Bild 6, Mitte).

5.4 Zukunftsszenarien Saas1, Saas2 und Saas3

Die deutlichsten Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellresultaten wurden beim Saasbach festgestellt. Die simulierte Murgangfracht betrug bei den drei Szenarien $100\,000$ m³, aufgeteilt in einen Schub à $100\,000$ m³ (Saas1), zwei Schübe à $50\,000$ m³ (Saas2) und vier Schübe à $25\,000$ m³ (Saas3). Bei der Simulation mit einem Schub (Saas1) wurde mit FLO-2D über 90 % des Gesamtgeschiebevolumens in den oberen zwei Dritteln des Kegels abgelagert (Teysseire & Candolfi, 2014). Hingegen zeigen die simulierten Ablagerungen mit den Modellen Topoflow und RAMMS

eine ähnliche Ausdehnung wie für das simulierte Referenzereignis. Bei den Simulationen mit mehreren Schüben (Saas2 und Saas3) wird mit FLO-2D eine grössere Reichweite erzielt. Das Modell Topoflow zeigt hier die entgegengesetzte Tendenz. Beim Modell RAMMS sind die Umhüllenden der Ablagerungen für alle drei simulierten Zukunftsszenarien sehr ähnlich. Die Fließhöhen und Ablagerungshöhen unterscheiden sich jedoch deutlich.

Die maximalen Fließhöhen für das Szenario Saas1 sind in Bild 7 dargestellt. Beim Modell FLO-2D (Bild 7, links) betragen die Fließhöhen auf den oberen zwei Dritteln des Kegels > 4 m. Die Fließhöhen nehmen dann auf kurzer Distanz rasch ab. Beim Modell Topoflow konzentrieren sich Fließhöhen > 4 m entlang dem Gerinne auf dem obersten Kegelbereich. Fließhöhen 2–4 m sind fast auf den ganzen Kegel zu beobachten und Werte < 2 m werden in den äusseren und unteren Bereichen simuliert. Bei RAMMS sind Fließhöhen > 2 m auf

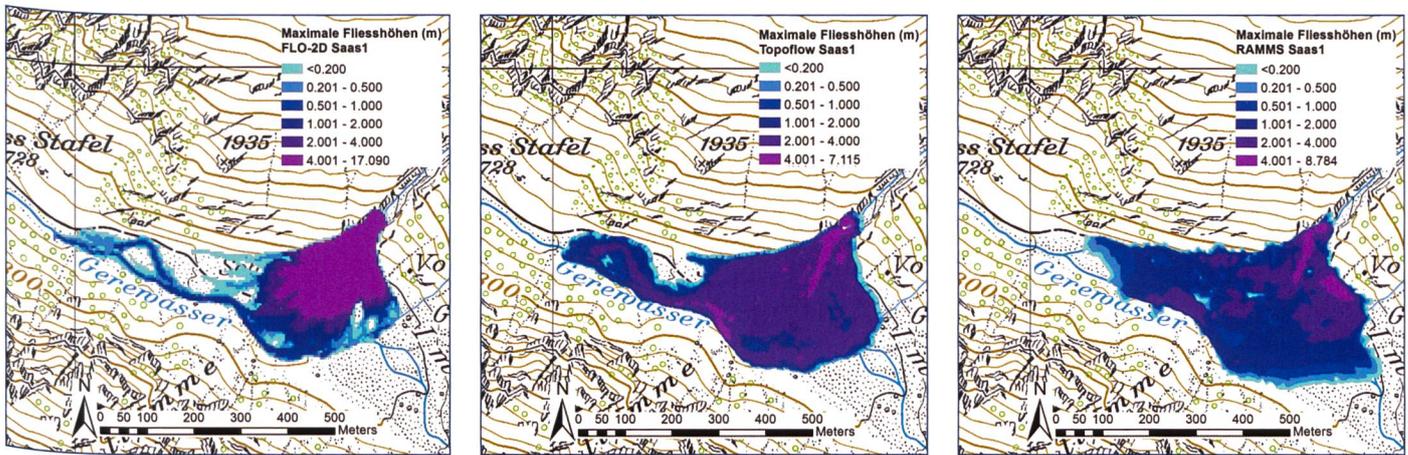


Bild 7. Maximale Fliesshöhen für das Zukunftsszenario Saas1, berechnet mit den drei Modellen: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (5704000000).

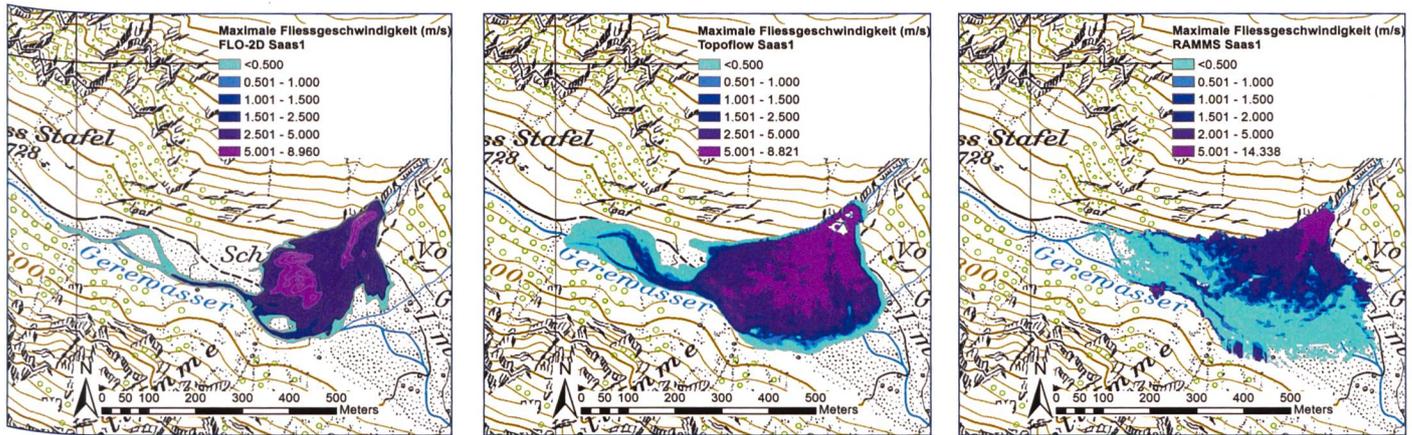


Bild 8. Maximale Fliessgeschwindigkeiten für Saas1, berechnet mit den drei Modellen: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (5704000000).

dem oberen Kegel und in gewissen Zonen auf dem unteren Kegel anzutreffen. Zwischen diesen Zonen und im äusseren Ablagerungsbereich sind Werte < 1.5 m simuliert. Bei Szenarien mit mehreren Schüben ist der Vergleich mit Topoflow schwierig, da die Werte nicht mit den Ablagerungshöhen der früheren Schübe kumuliert wurden. Das Modell RAMMS zeigt mit mehreren Schüben generell kleinere Fliesshöhen als FLO-2D. Das Modell Topoflow zeigt mit mehreren Schüben in gewissen Bereichen des Kegels höhere maximale Fliesshöhen als das Modell RAMMS.

Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten für Saas1 sind in Bild 8 dargestellt. (Bei Saas2 und Saas3 werden bei allen Modellen mit kleineren Schubvolumen die Fliessgeschwindigkeiten kleiner; keine Abbildung hier.) Beim Modell FLO-2D werden Fliessgeschwindigkeiten > 5 m/s im Gerinne entlang und auf dem oberen und mittleren Kegelbereich simuliert. In den Randzonen und auf dem unteren Ablagerungsbereich werden Fliessgeschwindigkeiten < 3 m/s simuliert. Bei Topoflow konzentrieren sich Fliessgeschwindigkeiten > 5 m/s ebenfalls im oberen und mittleren Kegelbereich und nehmen nach unten ab. Bei RAMMS wer-

den Fliessgeschwindigkeiten > 5 m/s nur auf dem obersten Kegelbereich simuliert. Die maximalen Fliessgeschwindigkeiten nehmen dann vom oberen Kegelbereich bis zum unteren regelmässig ab.

Die Intensitätskarten für Saas1 sind in Bild 9 dargestellt. Mit dem Modell FLO-2D ist bei der Methode Rickenmann bei allen Szenarien praktisch der ganze Kegel von starker Intensität betroffen (Bild 9, unten links). Bei der Methode BUWAL sind infolge der enormen Geschiebemengen die Intensitäten teils stark und teils mittel (Bild 9, oben links). Mit dem Modell RAMMS ist bei Saas1 ein ähnliches Bild zu beobachten (Bild 9, rechts). Bei den Szenarien Saas2 und Saas3 (Abbildungen nicht gezeigt) fallen mit RAMMS grössere Gebiete in die schwache und mittlere Intensität. Mit dem Modell Topoflow ist bei der Methode Rickenmann ebenfalls praktisch der ganze Kegel von starker Intensität betroffen, bei der Methode BUWAL fällt auf, dass die Intensitätsstufen räumlich umgekehrt verteilt sind als bei den anderen zwei Modellen. Die mittleren Intensitäten konzentrieren sich auf dem oberen Kegelbereich, und die starken Intensitäten treten nur auf der unteren Kegelhälfte auf. Der Grund dafür

ist, dass die simulierten Ablagerungshöhen mit Topoflow im oberen Kegelbereich unter 1 m liegen und im unteren Kegelbereich am mächtigsten sind. Dort übertreffen die Fliessgeschwindigkeiten ebenfalls die Abgrenzung zu starker Intensität.

5.5 Einfluss der Anzahl Schübe

Für jeden Bach und jede Jährlichkeit wurden für ein gegebenes Murgangvolumen zwei bis drei Szenarien mit unterschiedlicher Anzahl Schübe und Fracht pro Schub simuliert (siehe Tabelle 3). Die Resultate dieser simulierten Zukunftereignisse mit verschiedenen Schüben sind zum Teil sehr unterschiedlich. Die Fliessgeschwindigkeiten werden bei allen Modellen mit kleineren Schubvolumen kleiner. Bei mehreren Schüben und kleineren Schubvolumen werden für eine gleiche Rheologie im Allgemeinen die betroffenen Flächen kleiner. Beim Modell Topoflow ist diese Beobachtung am stärksten ausgeprägt. Die betroffenen Flächen werden systematisch deutlich kleiner und die Reichweiten viel kürzer. Dafür wird eine starke Auffächerung der Schübe im unteren Ablagerungsbereich festgestellt. Mit dem Modell FLO-2D ist beim Saasbach überraschend das Gegenteil der Fall.

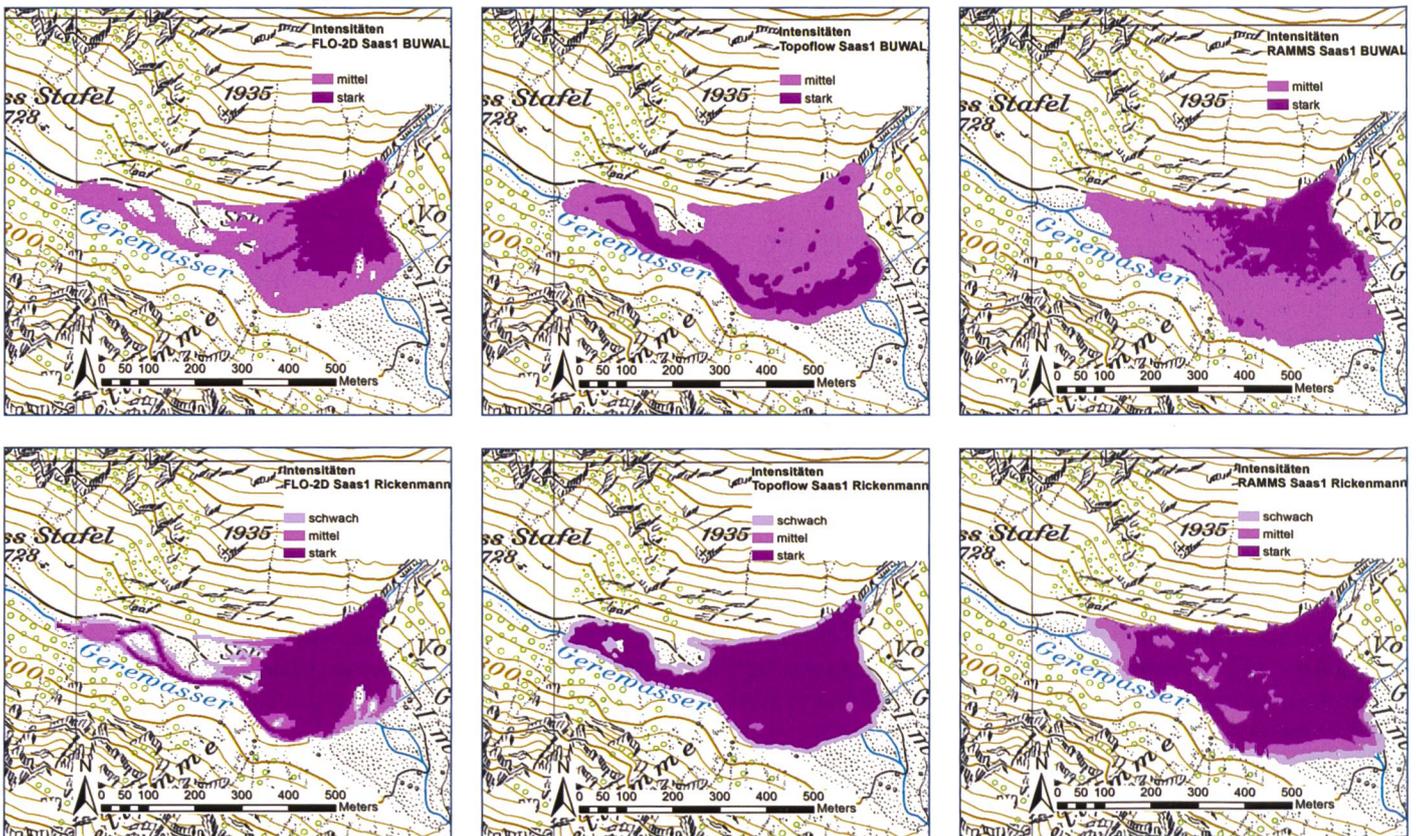


Bild 9. Intensitätskarten gemäss den Empfehlungen des BUWAL (oben) und gemäss Rickenmann (2005) (unten) für das Zukunftsszenario Saas1: links: FLO-2D, Mitte: Topoflow, rechts: RAMMS. Kartendaten: pixmaps © 2017 Bundesamt für Landestopografie swisstopo (570400000).

Der Grund dafür ist schwierig abzuschätzen (Teyssie & Candolfi, 2014). Mit dem Modell RAMMS sind die Unterschiede beim Tännbach und beim Saasbach sehr gering.

Die Intensitäten gemäss BUWAL zeigen bei FLO-2D und RAMMS wenige Unterschiede bei einer Variation der Anzahl Schübe. Bei Topoflow werden die Intensitäten mit zunehmender Anzahl Schübe und abnehmendem Schubvolumen vor allem im mittleren Ablagerungsbereich grösser, d. h., grosse Flächen weisen eine starke statt eine mittlere Intensität auf. Der Grund dafür sind die grösseren Ablagerungshöhen bei mehreren Schüben.

Die Intensitätskarten nach Rickenmann zeigen bei RAMMS bei grösseren Schubvolumen und weniger Schüben grössere Intensitäten, d. h., die Flächen starker und mittlerer Intensitäten werden grösser. Bei FLO-2D ist diese Tendenz einzig beim Milibach zu beobachten. Beim Tännbach und beim Saasbach ergeben sich bei unterschiedlicher Anzahl Schübe wenige Unterschiede. Bei Topoflow hat die Anzahl Schübe wenig Einfluss auf das Muster der Intensitäten nach Rickenmann, einzig die Umhüllende ändert sich.

5.6 Weitere typische Merkmale der Simulationsresultate

Die Modelle FLO-2D und Topoflow zeigen im Vergleich zu RAMMS bei allen Szenarien kompaktere betroffenen Flächen. Das Modell RAMMS simuliert generell breitere Flächen, vor allem in den unteren Kegelbereichen. Bei den Fliessgeschwindigkeiten zeigt das Modell FLO-2D bei allen Bächen ausser beim Saasbach maximale Fliessgeschwindigkeiten grösser als 5 m/s nur im oberen Gerinnebereich. Die Fliessgeschwindigkeiten nehmen im Gerinne und auf dem Kegel schnell ab. In den unteren Kegelbereichen sind maximale Fliessgeschwindigkeiten kleiner 1.5 m/s typisch. Das Modell RAMMS zeigt ausser beim Tännbach nur im Gerinnebereich und auf dem oberen Kegelbereich maximale Fliessgeschwindigkeiten grösser als 2 m/s. Das Modell Topoflow zeigt generell höhere maximale Fliessgeschwindigkeiten als die Modelle FLO-2D und RAMMS. Maximale Fliessgeschwindigkeiten grösser als 5 m/s werden bei allen vier Bächen im Gerinne und auch ausserhalb davon bis in den unteren Kegelbereich simuliert. Das Modell Topoflow simuliert tendenziell vor allem im unteren Kegelbereich grössere Fliesshöhen. Die Werte können je nach Szenario zum Teil deutlich grösser sein als bei den anderen Modellen. Bei den Intensitäten fällt

beim Modell Topoflow auf, dass mit der Methode Rickenmann jeweils fast der ganze Kegel von der starken Intensität betroffen ist und die Kategorie mittlere Intensität bei den meisten Szenarien kaum vorhanden ist. Dies hängt mit den eher hohen simulierten maximalen Fliessgeschwindigkeiten zusammen. Bei FLO-2D fallen mit der Methode BUWAL die betroffenen Flächen fast ausschliesslich in die Kategorie mittlerer Intensität. Das Modell RAMMS zeigt mit beiden Methoden BUWAL und Rickenmann eine stärkere Differenzierung der Intensitäten.

6. Diskussion

Bei der Kalibrierung der Referenzereignisse wurden für jedes Einzugsgebiet verschiedene Szenarien betrachtet. Damit wurde für jeden Bach eine Bandbreite plausibler Modellparameter bestimmt. Die rheologischen Parameter variieren im Allgemeinen für ein gegebenes Einzugsgebiet von Ereignis zu Ereignis je nach Materialzusammensetzung und Wasseranteil sowie innerhalb eines Murgangschubes von der Front bis zum Schwanz. Die Bestimmung der ganzen Bandbreite plausibler Parameterwerte kann nur über eine lange Reihe von Naturbeobachtungen im entsprechenden Gebiet oder über eine umfassende rheologische Materialanalyse erfolgen. Eine gute Schät-

zung der rheologischen Parameter bzw. Reibungsbeiwerte ist für Anwendungen wie die Gefahrenzonenkartierung jedoch von grosser Bedeutung.

Die meisten Zukunftseignisse wurden nur mit einem Satz von Modellparametern simuliert. Jedoch wurde für jeden Wildbachkegel eine zusätzliche Simulation für ein gegebenes Szenario mit unterschiedlichen Modellparametern durchgeführt. Für diese Szenarien wurde der Einfluss verschiedener Parameter auf die Resultate beurteilt. Dabei zeigte sich, dass kleine Variationen der Modellparameter nur kleine Veränderungen der Modellresultate hervorriefen. Grössere Variationen hatten entsprechende Wirkungen auf die Resultate. Bei den Zukunftseignissen zeigte sich, dass für ein gegebenes Volumen verschiedene Szenarien (verschiedene Anzahl Schübe und Fracht pro Schub) einen z. T. beträchtlichen Einfluss auf die Resultate haben. Die betroffenen Flächen waren zum Teil sehr verschieden und die Intensitätskarten auch. Szenarien sind für die endgültige Bestimmung der Gefahrenzonen äusserst wichtig.

Der Vergleich der Simulationsresultate der numerischen Modelle FLO-2D, Topoflow und RAMMS zeigte bezüglich Ablagerungsflächen und Reichweiten zum Teil ähnliche Resultate, aber zum Teil auch gegensätzliche Tendenzen. Mit RAMMS wurden über die vier betrachteten Einzugsgebiete generell breitere Flächen als mit den anderen Modellen simuliert. Dies hängt möglicherweise mit der implementierten Numerik der verwendeten Version 1.3 zusammen, wie der Vergleich der Simulationsresultate der Modelle RAMMS und DAN-3D (Hungr und McDougall, 2009), welche beide den Voellmy-Fluid-Ansatz verwenden, für den Milibach suggeriert (Raymond Pralong und Rickenmann, 2015). Zumindest für das Referenzereignis 2002 im Milibach scheinen die seitlich etwas kompakteren simulierten Ablagerungsflächen mit FLO-2D und Topoflow realistischer zu sein als die mit RAMMS simulierten Ablagerungsflächen.

Der Vergleich der simulierten Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten zeigte bemerkenswerte Unterschiede zwischen den Modellen. Die Fliessgeschwindigkeiten liegen bei den Modellen FLO-2D und RAMMS grundsätzlich in einem vergleichbaren Bereich, beim Modell Topoflow sind sie hingegen zum Teil deutlich grösser und nehmen zudem erst im untersten Ablagerungsbereich über ein relativ kurze Fliessdistanz deutlich ab. Im Modell Topoflow wird das von Coussot (1997) formulierte, für hochkonzentrierte, feinmaterialrei-

che bzw. viskose Murgänge konzipierte Herschel-Bulkley-Modell angewendet. Mit diesem Ansatz wurden bei eindimensionalen Simulationen von Murgängen in den französischen Alpen über grosse Bereiche des Fliessweges deutlich zu grosse Fliessgeschwindigkeiten simuliert (Malet et al., 2004; Remaitre et al., 2005). Es zeigte sich bei den vier betrachteten Einzugsgebieten unserer Studie, dass mit dem rein viskoplastischen Modell Topoflow zum Teil tendenziell zu grosse Fliessgeschwindigkeiten und Fliesshöhen simuliert werden (Raymond Pralong und Rickenmann, 2015). Wegen der viskoplastischen Rheologie wird der Masseschwerpunkt weiter unten auf den Kegeln abgelagert als bei den anderen Modellen. Ein ähnliches Problem trat bei Murgangsimulationen in einer anderen Studie mit dem RASH3D code (Pirulli und Sorbino, 2008) mit einer rein «frikationalen Rheologie» auf, bei welcher kein turbulenter Fliesswiderstandsterm vorhanden ist, so wie das auch bei der Bingham- oder Herschel-Bulkley-Rheologie der Fall ist (vgl. auch Rickenmann und Koch, 1997). In den Modellen FLO-2D, Topoflow und RAMMS ist je eine andere Murgangrheologie implementiert. Dies erklärt einen Teil der beobachteten Unterschiede in den Modellresultaten. Die gewählte numerische Lösung der Gleichungen spielt ebenfalls eine Rolle.

Auch aufgrund der Resultate dieser Studie wurde das Modell Topoflow weiterentwickelt und ein turbulenter Reibungsterm eingebaut (ähnlich wie beim Modell FLO-2D). Die Resultate dieser neueren Modellversion konnten in dieser Studie nicht berücksichtigt werden. Gemäss den Entwicklern sollen damit insbesondere die Fliessgeschwindigkeiten und die Fliesshöhen ähnlicher wie bei den anderen Modellen sein.

7. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die drei physikalisch-basierten numerischen Simulationsmodelle FLO-2D, Topoflow und RAMMS wurden für die Berechnungen von Murgangablagerungen auf vier Wildbachkegeln im Kanton Wallis angewendet. Bei der Kalibrierung der Modelle und bei den Simulationen zukünftiger Ereignisse zeigen die Resultate bezüglich Ablagerungsflächen, Reichweiten, Fliesshöhen und Fliessgeschwindigkeiten eine bedeutende Variabilität.

Bei der Kalibrierung stimmten die mit den drei Modellen simulierten Ablagerungsflächen für die Murgangereignisse Milibach 2002, Tännbach 2011 und Saasbach 1987 teilweise gut bis sehr gut mit der

Umhüllenden der beobachteten Ablagerungen überein. Beim Bach Combatseline traten hingegen bei allen Modellen Schwierigkeiten auf, vor allem wegen der hohen Auflösung des digitalen Höhenmodells. Das Ereignis Combatseline 1995 konnte einigermaßen reproduziert werden, das Ereignis 2006 dagegen nur sehr schlecht. Aus diesen Gründen konnten für den Fall Combatseline die Zukunftseignisse nicht sinnvoll verglichen werden.

Bei den zukünftigen Ereignissen wurden beim Saasbach die deutlichsten Unterschiede zwischen den verschiedenen Modellresultaten festgestellt. Simulationen für ein gleiches totales Murgangvolumen, aber mit unterschiedlicher Anzahl Schübe und verschiedenen Schubvolumen zeigten generell für eine gleiche Rheologie kleinere betroffene Flächen für kleinere Schubvolumen. Die Intensitätskarten wurden gemäss den Empfehlungen des BUWAL (1997) bzw. gemäss den in Rickenmann (2005) vorgeschlagenen Intensitätsgrenzen bestimmt. Bei der Methode BUWAL fallen die betroffenen Flächen bei allen Szenarien und allen Modellen überwiegend in die Kategorie mittlere Intensität. Bei der Methode Rickenmann fallen bei allen Szenarien und allen Modellen grössere Gebiete auch in die Kategorie starke Intensität. Je nach Bach und Szenario waren deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung der simulierten Intensitätsklassen festzustellen.

In den Modellen FLO-2D, Topoflow und RAMMS ist je eine andere Murgangrheologie implementiert. Dies erklärt einen Teil der beobachteten Unterschiede in den Modellresultaten. Eine sorgfältige Kalibrierung der Modelle anhand vergangener Ereignisse erlaubt eine Beurteilung der Sensitivität des Modellverhaltens und damit eine bessere Einschätzung der Simulationsresultate. Leider fehlen in vielen Fällen Referenzereignisse. Eine gute Kenntnis des angewandten Modells und der auftretenden Prozesse ist erforderlich, um die Resultate kritisch interpretieren zu können.

Verdankung

Wir danken der Dienststelle für Strasse, Verkehr und Flussbau des Kantons Wallis für das Mandat zur Durchführung dieser Studie. Wir bedanken uns auch bei den drei Ingenieurbüros, welche im Rahmen der Studie die Simulationen mit den verschiedenen Modellen durchführten: Ingenieurbüro Teyssie & Candolfi AG, Dipl. Bauing. ETH/SIA/USIC, 3930 Visp, Modellierung mit FLO-2D; IDEALP sa, Ingénierie pour le Développement en Environnement ALPin, 1950 Sion, Modellierung mit Topoflow; François-Xavier Marquis Sàrl, bureau d'études ingénieurs géologues hydrologues

hydrogéologues, 1870 Monthey, Modellierung mit RAMMS.

Literatur

Technische Berichte (unveröffentlicht)

François-Xavier Marquis Sàrl (2014): *Projet VS-WSI «Simulation von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*, Simulations pour les torrents de Combatseline, Tännbach, Milibach et Saasbach. Mandat n° 1394.

Idealp SA (2014): *Projet VS-WSL «Simulation von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*, Simulations pour les torrents de Combatseline, Tännbach, Milibach et Saasbach. Rapport technique.

Raymond Pralong, M., Rickenmann, D. (2015). *Hydralp-WSL-Projekt »Simulationen von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*. Synthesebericht: Vergleich von numerischen Simulationen von Murgängen auf vier Wildbachkegeln des Kantons Wallis. Bericht zuhanden der Dienststelle für Strassen- und Flussbau des Kantons Wallis.

Raymond Pralong, M., Rickenmann, D. (2014a). *Hydralp-WSL-Projekt «Simulationen von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*. Zwischenbericht Etappe 2: Simulation von Murgangablagerungen mit dem numerischen Modell DAN 3D. Bericht zuhanden der Dienststelle für Strassen- und Flussbau des Kantons Wallis.

Raymond Pralong, M., Rickenmann, D. (2014b). *Hydralp-WSL-Projekt «Simulationen von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*. Zwischenbericht Etappe 2: Simulation von Murgangablagerungen mit dem numerischen Modell TopRunDF. Bericht zuhanden der Dienststelle für Strassen- und Flussbau des Kantons Wallis.

Rickenmann, D. (2005): *Hangmuren und Gefahrenbeurteilung*. Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Wasser und Geologie, Biel.

Rickenmann, D., Raymond Pralong, M., Abächerli, A. (2013). *Hydralp-WSL-Projekt «Simulationen von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Erstellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis»*. Zwischenbericht Etappe 1: Übersicht zum Projekt, Einzugsgebiete und Grundlagendaten. Bericht zuhanden der Dienststelle für Strassen- und Flussbau des Kantons Wallis.

Teyssie & Candolfi AG (2014): *Simulation von Murgangablagerungen im Hinblick auf die Er-*

stellung von Gefahrenkarten – Vergleich von Methoden anhand von Fallbeispielen im Kanton Wallis, Programm FLO-2D, Technischer Bericht. Bericht Nr. 2215-1.

VAW (1992): *Murgänge 1987*, Dokumentation und Analyse. Bericht Nr. 97.6 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich.

Zusätzlich verwendete Literatur

Armento, M., Genevois, R., Tecca, P. (2008): *Comparison of numerical models of two debris flows in the Cortina d'Ampezzo area, Dolomites, Italy*. *Landslides* (2008) 5, 143–150.

Bozzini, C., Conedera, M., Krebs, P. (2012): *A New Monoplotting Tool to Extract Georeferenced Vector Data and Orthorectified Raster Data from Oblique Non-Metric Photographs*. *International Journal of Heritage in the Digital Era* 1, 3, 500–518.

BWW/BRP/BUWAL (1997): *Empfehlungen: Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten*. Herausgeber: Bundesamt für Wasserwirtschaft (BWW), Bundesamt für Raumplanung (BRP), Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), EDMZ Nr. 804.201d, Bern, 32p.

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.

Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Glover, J., Schweizer, A., Graf, C., McArdell, B.W., Gerber, W., Deubelbeiss, Y., Feistl, T., Volkwein, A. (2012) *Integral Hazard Management Using a Unified Software Environment – Numerical Simulation Tool «RAMMS» for Gravitation Natural Hazards*, 12th Congress Interpraevent 2012.

Coussot, P. (1997): *Mudflow Rheology and Dynamics*. IAHM Monograph Series. AA. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 255p.

Frick, E., Kienholz, H., Romang, H. (2011): *SEDEX*. Anwenderhandbuch. Geographica Bernensia, P 42, 128 S., ISBN 978-3-905835-27-4.

Hungr, O., McDougall, S. (2009): *Two numerical models for landslide dynamic analysis*. *Computers & Geosciences*, 35, 978–992.

Kienholz, H., Frick, E., Gertsch, E. (2010): *Assessment tools for mountain torrents: SEDEX© and bed load assessment matrix*. *Proceedings International Symposium Interpraevent in Pacific Rim, Taipei, Taiwan*, pp. 245–256.

Malet, J.P., Maquaire, O., Locat, J., Remaitre, A. (2004): *Assessing debris flow hazard associated with slow moving landslides: methodology and numerical analyses*. *Landslides*, 1, 83–90.

Naef, D., Rickenmann, D., Rutschmann, P., McArdell, B.W. (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.

O'Brien, J.S. (2012): *FLO-2D PRO, GDS Manual, Mapper Manual, Reference Manual und Data Input Manual*.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y. (1985): *Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows*, *Proceedings of the ASCE Specialty Conference on the Delineation of landslide, Flash Flood and Debris Flow Hazards in Utah*, Utah Water Research Lab. Series UWRL/G-85/03, 260–279.

O'Brien, J.S., Julien P.Y., Fullerton, W.T. (1993): *Two-dimensional water flood and mudflow simulation*. *J. Hydraul. Eng.* 119(2), 244–261.

Pirulli, M., Sorbino, G. (2008): *Assessing potential debris flow runoff: a comparison of two simulation models*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 8, 961–971.

Remaitre, A., Malet, J.P., Maquaire, O., Ancey, C., Locat, J., (2004): *Flow behaviour and runoff modelling of a complex debris flow in a clay-shale basin*. *Earth Surf. Proc. Land.*, 30, 479–488.

Rickenmann, D., Koch, T. (1997): *Comparison of debris flow modelling approaches*. In C.-L. Chen (ed.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*; *Proceedings 1st International DFHM Conference*, San Francisco, CA, USA, August 7–9, 1997, 576–585. New York: American Society of Civil Engineers.

Rickenmann, D., Laigle, D., McArdell, B.W., Hübl, J. (2006): *Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events*. *Computat. Geosci.*, 10, 241–264.

Salm, B. (1993): *Flow, flow transition and runoff distances of flowing avalanches*. *Ann. Glaciology* 18, 221–226.

Stancanelli, L.M., Foti, E. (2015): *A comparative assessment of two different debris flow propagation approaches – blind simulations on a real debris flow event*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 735–746.

Anschrift der Verfasser

Dieter Rickenmann, Mélanie Raymond Pralong
Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft, WSL, Zürcherstr. 111
CH-8903 Birmensdorf
dieter.rickenmann@wsl.ch

Thomas Schneider, Canton du Valais, Département de la mobilité, du territoire et de l'environnement, Section Hydrologie-Hydrogéologie-Géologie, Rue des Creusets 5, Bâtiment Mutua, CH-1950 Sion