Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 111 (2019)

Heft: 4

Artikel: Gravitative Prozesse in der Bondasca : Nachrechnung der beobachteten Phänomene anhand von numerischen Simulationen mit FLUMEN

Autor: Tognacca, Christian / Gabbi, Jeannette / Cattaneo, Giacomo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941533

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 18.10.2025

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

Gravitative Prozesse in der Bondasca

Nachrechnung der beobachteten Phänomene anhand von numerischen Simulationen mit FLUMEN

Christian Tognacca, Jeannette Gabbi, Giacomo Cattaneo, Cornel Beffa

Zusammenfassung

Am Morgen des 23. August 2017 lösten sich aus der Nordwestflanke des Pizzo Cengalo rund 3 Mio. m³ Fels. Durch eine ungünstige Prozessverkettung von Bergsturz und Gletscherverflüssigung konnte sich aus den durchfeuchteten und äusserst labilen Sturzablagerungen eine Serie von Murgängen entwickeln, welche enorme Geschiebemengen nach Bondo brachten und zu grossen Schäden an Siedlung und Verkehrsinfrastruktur führten. Für die laufende Gefahrenbeurteilung und die Ereignisbewältigung war eine gute Dokumentation der Ereignisse vom August 2017 von grosser Wichtigkeit und bietet nun die Gelegenheit, die zur Gefahrenanalyse eingesetzten numerischen Modelle zu testen. Anhand des zweidimensionalen Berechnungsmodells FLUMEN wurden die beobachteten Phänomene im Val Bondasca nachgebildet und mittels Differenzraster aus digitalen Terrainmodellen (DTM) verglichen. Die Simulationsergebnisse der verschiedenen untersuchten Prozesse zeigen generell eine sehr gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Mit dem verwendeten Zweiphasenansatz wird der Einfluss des variablen Wassergehalts auf die Fliesseigenschaften implizit berücksichtigt, was den Einsatzbereich ausdehnt und die Prognosefähigkeit erhöht.

1. Einleitung

In den vergangenen Jahren hat sich im Val Bondasca (Bregaglia, GR) eine eindrückliche Serie von Naturprozessen abgespielt, ausgelöst durch zwei Bergstürze am Pizzo Cengalo in den Jahren 2011 und 2017. Aus den mächtigen und frischen Sturzablagerungen im hinteren Val Bondasca entwickelten sich Murgänge, welche Geschiebe bis nach Bondo verfrachteten. Insbesondere das Bergsturzereignis von 2017 hatte gravierende Auswirkungen für Bondo. Durch die Erosion von Gletschereis entlang des Sturzweges konnte sich ein Teil der Sturzmasse verflüssigen und floss als gewaltiger Schuttstrom durch das gesamte Val Bondasca bis nach Bondo. In der Folge entwickelten sich aus den durchfeuchteten Bergsturz- und Schuttstromablagerungen, zunächst ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen, mehrere Murgänge, welche innerhalb von neun Tagen rund 500 000 m³ Geschiebe nach Bondo brachten und mehrere Gebäude zerstörten.

Die Ereignisse im Val Bondasca, insbesondere jene von August 2017, sind dank einer ausgesprochen guten Datengrundlage (Höhenmodellen zur Bestimmung der Ereigniskubaturen und der Ablagerungsmuster, Kenntnissen über Fliesszeiten, Abflüssen und Rheologien dank Beobachtungen) sehr gut dokumentiert und bieten eine gute Grundlage zur Verifizierung numerischer Modelle. Aufgrund dessen wurden anhand des hydrodynamisch-numerischen Berechnungsmodells FLUMEN (siehe https://www.fluvial.ch) die Murgang- und Bergsturzereignisse nachgebildet. Ebenfalls wurde der Übergang von einem Bergsturz in einen Schuttstrom mittels einer eigens für diese Anwendung konzipierten Modellerweiterung simuliert.

Konkret wurden die beiden Bergsturzereignisse von Dezember 2011 und August 2017, der unmittelbar auf den Bergsturz folgende Schuttstrom und die darauffolgenden Murgänge vom 23., 25. und 31. August 2017 simuliert (siehe *Tabelle 1*).

Dieser Artikel präsentiert die Simulationsergebnisse der in den letzten Jahren in der Bondasca aufgetretenen Phänomene, vergleicht sie mit den im Feld erhobenen Daten und gibt Aufschluss über die Modellgüte.

2. Ereignisse 2011 bis 2017

Beim Bergsturzereignis vom 27. Dezember 2011 haben sich aus der Nordostflanke des Pizzo Cengalo ca. 1.5 Mio. m³ Fels gelöst und mächtige Ablagerungen im hinteren Val Bondasca hinterlassen. Im darauffolgenden Sommer kam es, ausgelöst durch heftige Gewitterniederschläge, zu mehreren Murgangereignissen, wovon sich die meisten oberhalb der Schluchtstrecke ablagerten und Bondo nicht gefährdeten. Das Ereignis von Ende August 2012 hingegen war deutlich grösser und hat zu bedeutenden Auflandungen in Bondo mit Schäden am Campingplatz geführt. Nach den Ereignissen vom Sommer 2012 hat sich die Lage im Val Bondasca vorübergehend beruhigt. Mit dem erneuerten Bergsturz am Pizzo Cengalo von

Nr.	Höhenmodellvergleiche		Ereignisse
	Start-DTM	End-DTM	
1	DTM 2015[1)] (Situation vor Ereignissen 2017)	DTM 25.08.2017 (Situation nach Bergsturz & Murgängen vom 23.08.)	Bergsturz, Schuttstrom & Murgänge vom 23. August
2	DTM 25.08.2017 (Situation vor Murgängen vom 25.08.)	DTM 30.08.2017 (Situation nach Murgängen vom 25.08)	Murgänge vom 25. August
3	DTM 30.08.2017 (Situation nach Murgängen vom 25.08.)	DTM 05.09.2017 (Situation nach grossem Murgang vom 31.08.)	Grosser Murgang vom 31. August

Tabelle 1. Vorhandene Höhenmodell-Differenzraster zur Abschätzung der Ereigniskubaturen und zur Verifizierung der Simulationsresultate.

[1] Aufgebaut aus mehreren Datensätzen: DTM 2012 der Sturzablagerungen (ohne Murgänge 2012), DTM-AV 2003 für die Transitstrecke zwischen Laret und Prä (ohne Murgänge 2012), DTM 2015 des Wasserbauprojekts für den Kegel.

August 2017, mit 3.0 Mio. m^3 rund doppelt so gross wie der von 2011, hat sich die Situation jedoch massgeblich verschärft. Durch die massive Einwirkung des Bergsturzes wurden rund 600 000 m^3 Eis des Cengalogletschers erodiert. Aufgrund des ausserordentlich hohen Wassergehaltes konnte sich ein Teil der Sturzmasse verflüssigen und sich zu einem Schuttstrom entwickeln, der mächtige Geschiebeablagerungen im Val Bondasca hinterlassen hat und bis nach Bondo vorgedrungen ist. Durch die hohe Verfügbarkeit von durchfeuchteten Ablagerungen hat sich in der Folge ohne jegliche Beteiligung von Niederschlägen eine Serie von Murschüben ausgebildet, die enorme Geschiebemengen nach Bondo brachten und den nach den Ereignissen von 2011/12 gebauten Rückhalteraum zum Überlaufen gebracht haben. Am Abend des 31. August löste ein starker Gewitterniederschlag einen riesigen Murgang mit einer Kubatur von über 200 000 m^3 (in einem Schub!) aus, welcher massive Ablagerungen im Einmündungsbereich in die Maira hinterlassen hat und zu Überschwemmungen in Spino führte.

3. Datengrundlage

Für die Überprüfung der Simulationsergebnisse stehen mehrere digitale Terrainmodelle (DTM) zur Verfügung, welche die Ereignisse im Val Bondasca sehr gut dokumentieren (vgl. *Tabelle 1*) und Aufschluss über die Ereigniskubaturen und die Verteilung der Ablagerungen geben. Die vorhandenen Höhenmodelle werden in *Tabelle 1* aufgelistet. Einzig für die Situation vor den Ereignissen 2017 steht kein einheitliches DTM zur Verfügung und musste anhand verschiedener Datensätze aufgebaut werden. Die Ablagerungen in der Transitstrecke der Murgänge von 2012 konnten jedoch aufgrund fehlender Höhendaten nicht rekonstruiert werden und sind somit im Höhenmodell von 2015 nicht enthalten. Die räumliche Auflösung der verwendeten Höhenmodelle beträgt 1×1 m.

4. Modellannahmen

4.1 Modellaufbau

Die Modellierungen wurden mit der numerischen Berechnungssoftware FLUMEN (Eigenentwicklung, siehe www.fluvial.ch) durchgeführt, einem Finite-Volumen-Programm zur Lösung der zweidimensionalen Flachwassergleichungen auf unstrukturierten Netzen. Der Einbau von verschiedenen rheologischen Modellen erlaubt es, Massenbewegungsprozesse wie Murgänge und Bergstürze zu modellieren. Das Modell für den Bergsturz deckt den gesamten Sturzraum des Pizzo Cengalo ab. Die Modelle für die Murgänge hingegen umfassen nur den Kegelbereich vom Ende der Schluchtstrecke bis zur Einmündung in die Maira sowie einen Flussabschnitt der Maira von Sot Punt bis Spino. Das Modell für den Schuttstrom, welcher mächtige Ablagerungen in der Transitstrecke hinterlassen hat, wurde erweitert und erstreckt sich vom Ende der Bergsturzablagerungen in Laret bis nach Bondo. Ausgehend von den jeweiligen Höhendaten (vgl. *Tabelle 1*), wurden triangulierte Netze für die entsprechenden Zustände erstellt, wobei für das Modell des Kegelhalses eine Maschengrösse von 3 m^2, für das Schuttstrom- bzw. Bergsturzmodell eine räumliche Auflösung von 5 bzw. 10 m^2 gewählt wurde.

Ereignis	Kubatur [m^3]	τ [N/m^2]	k_{str} [$m^{1/3}/s$]	μ [%]	Q [m^3/s]
Bergsturz 27.12.2011	1.5 Mio.	1'000	23	28	-
Bergsturz 23.08.2017	3.0 Mio.	1'000	23	20	-
Schuttstrom 23.08.2017	545'000	8'750	10	3	300
Murgänge 23.08.2017 (9 Schübe)	9 x 24'500	1.-2. Schub 1'000 3.-9. Schub 500	10	3	250
Murgänge 25.08.2017 (2 Schübe)	2 x 22'500	1. Schub 2'500 2. Schub 1'000	10	3	400
Murgang 31.08.2017 (1 Schub)	225'000	500-4'000	10	3	850

Tabelle 2. Kalibrierte Fliessparameter (Grenzschubspannung τ, Strickler-Beiwert k_{str} und Reibungsgefälle μ) und Maximalabflüsse Q (am Kegelhals) aller nachgebildeten Ereignisse.

4.2 Modellrheologie

Zur Simulation der Rheologie aller Prozesse kam ein turbulenter Ansatz mit einer Grenzschubspannung und einem Coulomb-Reibungsterm zur Anwendung (vgl. *Naef et al.*, 2006). Dieser Ansatz beschreibt die inneren Schubspannungen infolge interpartikulärer Stösse, Turbulenzen mit einem Reibungsbeiwert nach Strickler und die Viskosität der Flüssigkeit mit einer Grenzschubspannung. Zusätzlich wird ein basaler Widerstand durch einen Coulomb-Reibungsterm, der proportional zur Normalspannung ist, verwendet.

Die Modellparameter (Grenzschubspannung τ, Reibungsbeiwert nach Strickler k_{str}, Reibungsgefälle μ) wurden anhand der Beobachtungsdaten für das jeweilige Ereignis kalibriert. Für die Murgangereignisse wurde der Reibungsbeiwert nach Strickler auf 10 $m^{1/3}/s$ und das Reibungsgefälle auf 3 % festgesetzt, welche für alle Simulationen gleich belassen wurden. Die kalibrierten Werte aller Nachsimulationen werden in *Tabelle 2* aufgelistet.

4.3 Zweiphasenmodell

Das verwendete numerische Modell FLUMEN basiert auf den vollständigen tiefengemittelten Flachwassergleichungen (vgl. [8]). Der Wassergehalt des Fluids wird in einer zusätzlichen Erhaltungsgleichung bilanziert. Mit diesem Zweiphasenansatz kann der Einfluss des Wassers auf die Rheologie implizit berücksichtigt werden. Das Fliessverhalten wird über den Wassergehalt gesteuert, indem die Fliessparameter (Grenzschubspannung, Coulomb'scher Reibungsterm) als Funktion der Wasserkonzentration definiert werden.

4.4 Abfluss und Kubatur

Die Kubaturen der verschiedenen Ereignisse wurden anhand der verfügbaren Differenzraster (vgl. *Tabelle 1*) ermittelt und sind in *Tabelle 2* aufgelistet. Die Abflüsse wurden zunächst basierend auf den beobachteten Abflüssen in der Ortschaft Prä bzw. in der Transitstrecke (vgl. [3]) für den Kegelhals definiert und wurden später in der Kalibrierungsphase bei Bedarf angepasst, um eine möglichst optimale Übereinstimmung zu erzielen.

5. Nachsimulationen

5.1 Bergsturz 2011

Mithilfe des hydrodynamischen Modells konnte ein sehr ähnliches Ablagerungsmuster wie beobachtet erzielt werden *(Bild 1)*. Die Reichweite wie auch die maximalen Ablagerungsmächtigkeiten (mit 12–13 m gemäss Simulationen und 15–16 m gemäss Beobachtungen) stimmen gut überein. Gewisse Differenzen ergeben sich jedoch bezüglich des Ablagerungsbeginns. Während beim Ereignis 2011 der Ablagerungsprozess bereits kurz unterhalb der Felsstufe (ca. 1800 m ü. M.) eingesetzt hat, zeigen die Modellierungen

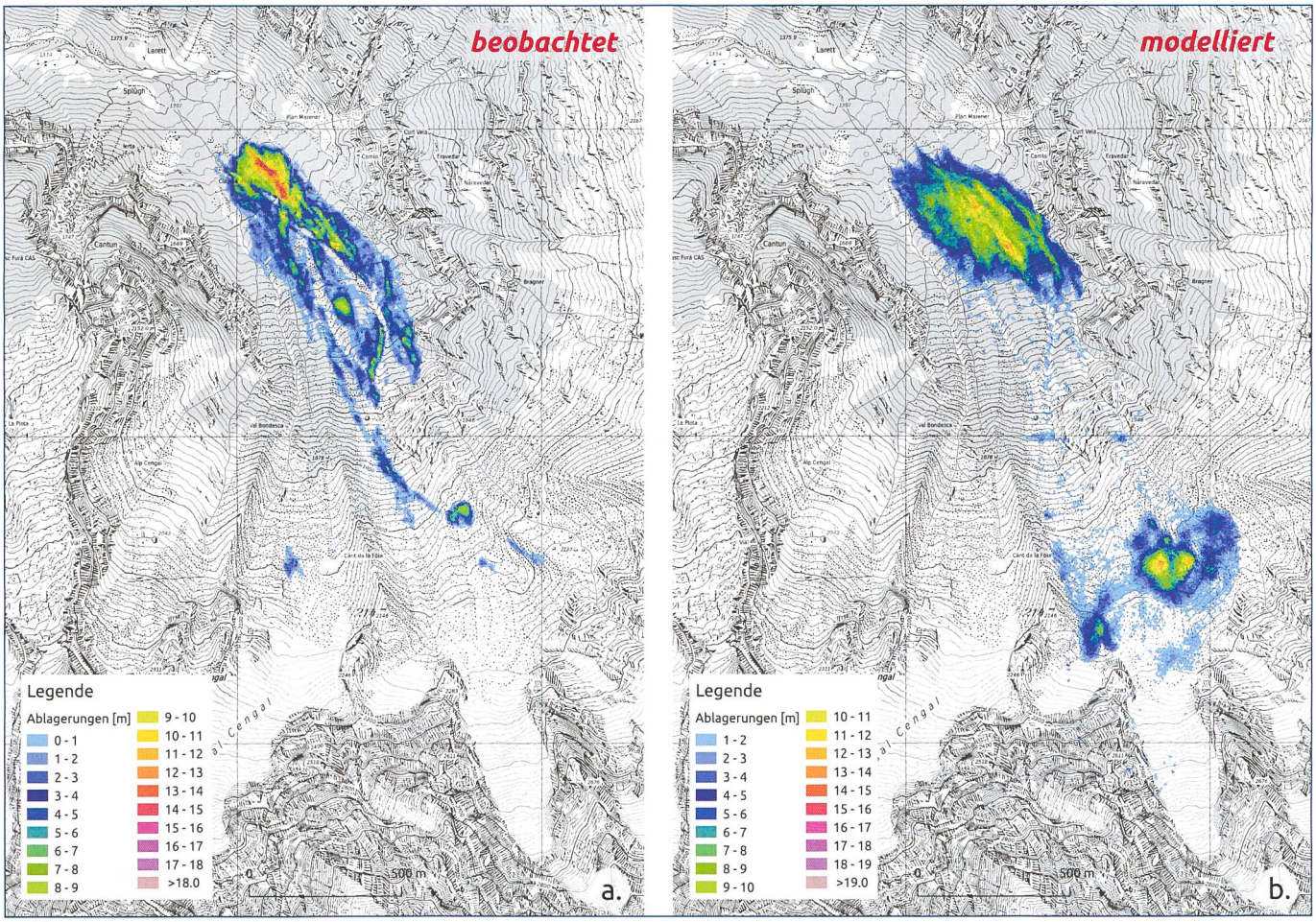

Bild 1. (a) Beobachtete und (b) modellierte Ablagerungen des Bergsturzes am Pizzo Cengalo von 2011.

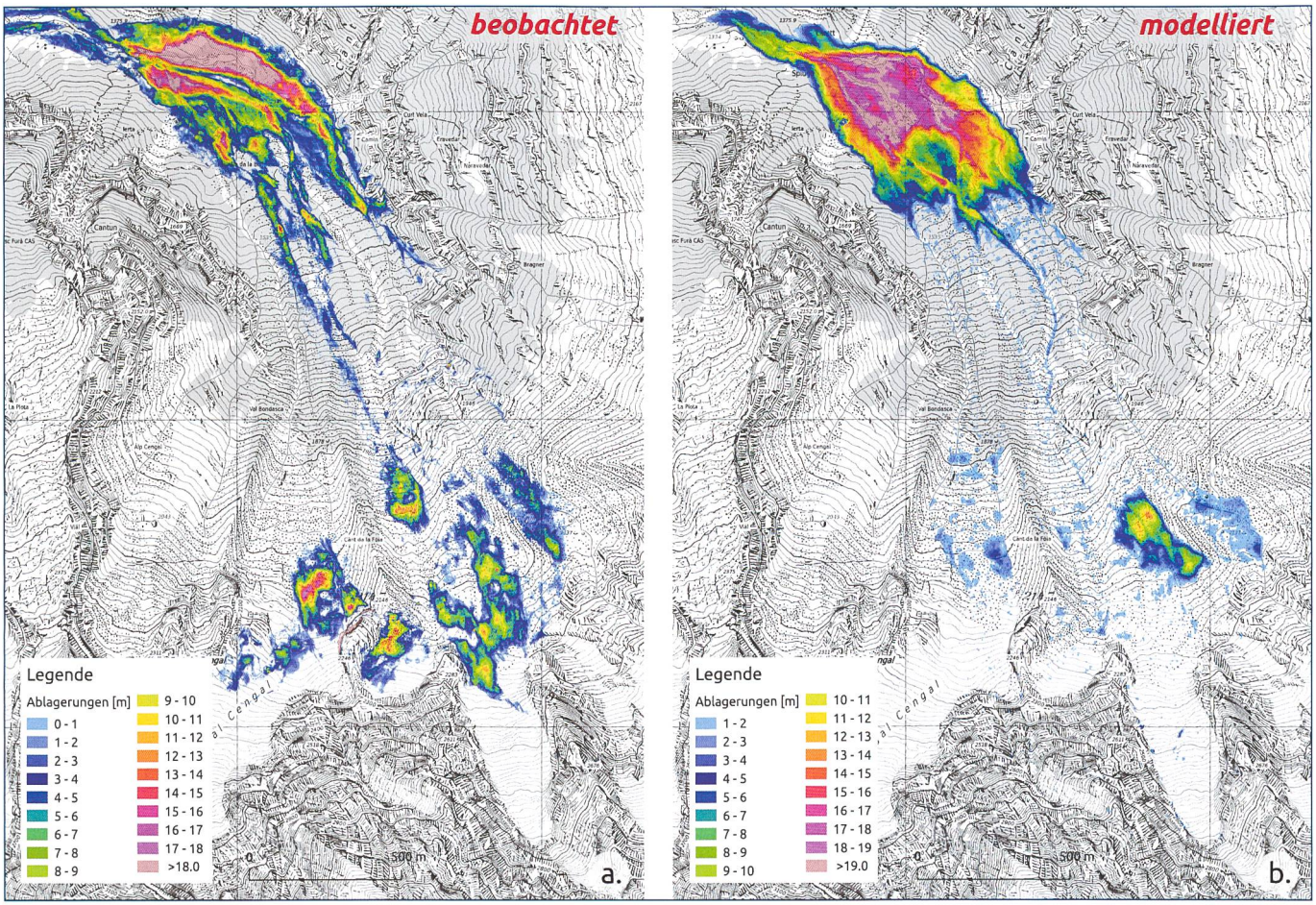

Bild 2. (a) Beobachtete und (b) modellierte Ablagerungen des Bergsturzes am Pizzo Cengalo von 2017.

	Bergsturz 2011		Bergsturz 2017	
	beobachtet	simuliert	beobachtet	simuliert
Max. Mächtigkeiten	15-16 m	12-13 m	30-32 m	19-20 m
Ende Sturzablagerungen	1'460 m ü.M.	1'450 m ü.M.	1'340 m ü.M.	1'320 m ü.M.
Beginn Sturzablagerungen	1'620 m ü.M.	1'790 m ü.M.	1'580 m ü.M.	1'590 m ü.M.

Tabelle 3. Vergleich der beobachteten und simulierten Sturzablagerungen der Bergstürze von 2011 und 2017.

	beobachtet	simuliert
Transitstrecke	495'000 m³	457'000 m³
Schlucht	30'000 m³[1)]	45'000 m³
Kegel	32'000 m³[1)]	23'000 m³

Tabelle 4. Die beobachteten und modellierten Ablagerungsvolumina des Schuttstroms für drei Abschnitte entlang der Bondasca.

	beobachtet	simuliert
Lera	6-8 m	4-5 m
oberhalb Sperre Prä	10-12 m	6-8 m
unterhalb Sperre Prä	20-25 m	16-17 m
oberhalb alte Brücke	10-12 m	7-9 m

Tabelle 5. Beobachtete und modellierte Ablagerungsmächtigkeiten des Schuttstroms für ausgewählte Standorte. Die beobachteten Ablagerungsmächtigkeiten müssten noch um den Betrag der Murgangablagerungen von 2012 korrigiert werden, die im DTM 2015 nicht enthalten sind.

erste Ablagerungen 400 m weiter unten (ab ca. 1640 m ü. M.). Folglich liegen die simulierten Ablagerungen an der Front etwas konzentrierter vor, als es tatsächlich beobachtet wurde.

5.2 Bergsturz 2017

5.2.1 Ablagerungsmuster

Auch die Simulationen des Bergsturzes von 2017 zeigen bezüglich der Reichweite und der Ausdehnung der Ablagerungen eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen *(Bild 2)*. Der Ablagerungsprozess setzt praktisch auf der gleichen Höhenkote, ca. 200 m unterhalb der Felsstufe, ein (im Gegensatz zu den Modellierungen vom Ereignis 2011) und endet auf Höhe Lumbardui. In den Simulationen hingegen sind die Ablagerungen über die gesamte Talbreite in etwa gleichmässig verteilt, während sich gemäss den Messungen die mächtigsten Ablagerungen eher auf der orografisch rechten Seite konzentrieren. Diese Differenz trägt auch dazu bei, dass mittels der Simulationen geringere maximale Ablagerungsmächtigkeiten erreicht werden, als beobachtet wurden (vgl. *Tabelle 3*). Der grosse Graben, welcher mitten durch die Sturzablagerungen verläuft, ist auf die nachfolgenden Murgänge bzw. den Schuttstrom zurückzuführen und ist nicht von Bedeutung für den Vergleich.

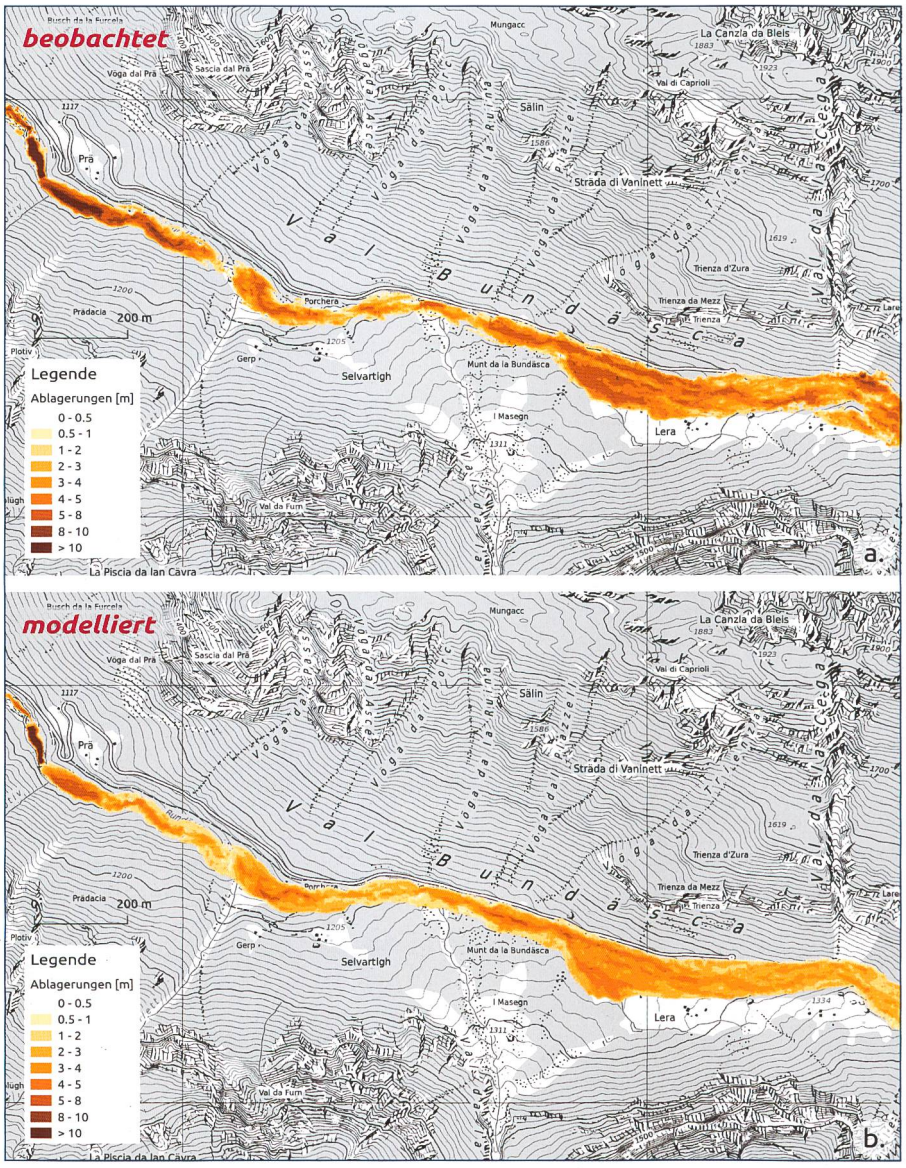

Bild 3. (a) modellierte und (b) beobachtete Ablagerungsmächtigkeiten des Schuttstroms vom 23. August 2017 in der Transitstrecke zwischen Laret und Prä. Die beobachteten Ablagerungen müssten noch um den Betrag der Murgangablagerungen von 2012 korrigiert werden, da diese im DTM 2015 nicht enthalten sind.

[1] Gutachterlich festgelegt (siehe [3]).

5.2.2 Fliesszeiten

Dank der seismischen Aufzeichnungen des Schweizerischen Erdbebendienstes kann die Fliesszeit des Bergsturzes vom 23. August 2017 rekonstruiert werden. Um 09:30:12 wurde die mechanische Instabilität am Pizzo Cengalo ausgelöst, zwischenzeitlich wurden maximale Geschwindigkeiten von über 80 m/s erreicht, und um 09:31:42 kam die Sturzmasse oberhalb von Laret zum Stillstand. Innerhalb von 1.5 Minuten wurde eine Strecke von rund 3.6 km zurückgelegt (Fallhöhe: ca. 1600 m, horizontale Distanz ca. 3.0 km). Die mittlere Geschwindigkeit der Front lag bei rund 40 m/s. Die Simulationen zeigen mit einer Gesamtfliesszeit von ca. 1.7 Minuten sehr ähnliche Fliessgeschwindigkeiten wie beobachtet auf.

5.3 Schuttstrom 2017

5.3.1 Massenbilanzen

Die Auswertung der Massenbilanzen zeigt, dass die simulierten Ablagerungen in der Transitstrecke (Ende der Bergsturzablagerungen bis Beginn der Schluchtstrecke) gut mit den Beobachtungen übereinstimmen. Gemäss der Höhenmodellauswertung wurden in der Transitstrecke rund 495 000 m^3 abgelagert, während die Simulationen für diesen Abschnitt ein Ablagerungsvolumen von 457 000 m^3 ergeben *(Tabelle 4)*. Die Massenbilanzen in der Schluchtstrecke und auf dem Schwemmkegel können aufgrund fehlender Höhenmodelldaten nur mit gutachterlichen Abschätzungen verglichen werden. Diese ergeben wie auch für die Transitstrecke eine gute Übereinstimmung, wobei das Modell die Ablagerungen in der Schluchtstrecke generell überschätzt, während die Ablagerungen auf dem Kegel etwas unterschätzt werden *(Tabelle 4)*.

5.3.2 Ablagerungsmuster

Die Simulationen des Schuttstroms weisen ein ähnliches Ablagerungsmuster wie beobachtet auf mit mächtigen Ablagerungen in Lera, Selvartigh und Prä *(Bild 3)*. Während die Ausbreitung des Schuttstroms vom Modell relativ gut wiedergegeben wird, sind die Ablagerungsmächtigkeiten tendenziell etwas zu gering, dies insbesondere im Bereich der Sperre bei Prä, aber auch bei Lera, wo die simulierten Ablagerungen mit 4 bis 5 m etwas kleiner ausfallen als gemäss den Differenzrastern (6 bis 8 m, *Tabelle 5*). Diese Abweichungen sind jedoch nicht nur auf die Modellierungen zurückzuführen, sondern kommen teilweise auch durch Unsicherheiten im Höhenmodell zustande (Murgangablagerungen von 2012 mit rund 120 000 m^3 fehlen; vgl. *Kapitel 3*, die Massenbilanzen aus *Tabelle 4* wurden hingegen entsprechend korrigiert).

Die Ablagerungsmächtigkeiten am oberen und unteren Ende der Schluchtstrecke stimmen in der Grössenordnung mit den Beobachtungen überein, werden jedoch, wie auch in der Transitstrecke, generell etwas unterschätzt (vgl. *Tabelle 5*).

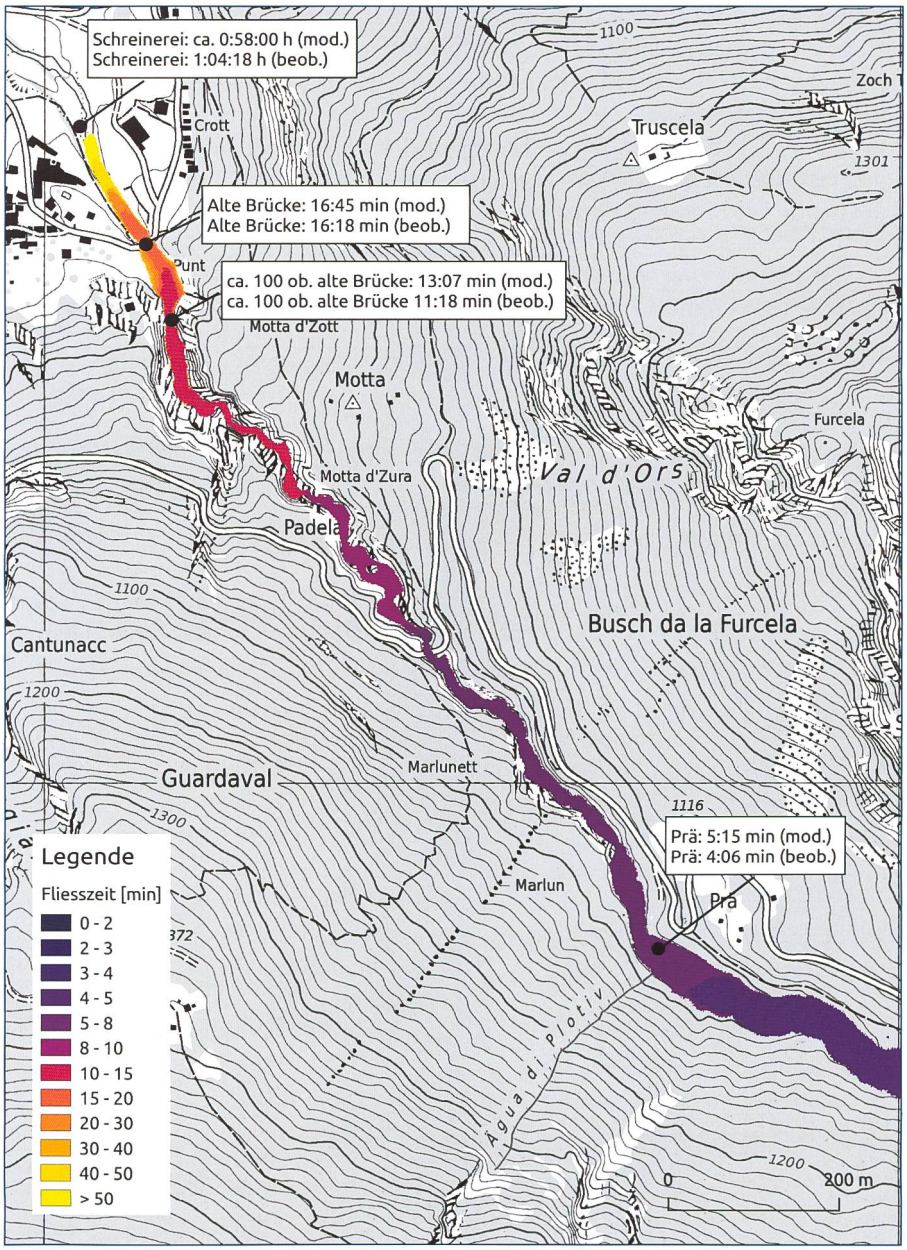

Bild 4. Modellierte Fliesszeiten des Schuttstroms vom 23. August 2017 im Vergleich zu den beobachteten.

5.3.3 Fliesszeiten

Ein Vergleich der Fliesszeiten zeigt, dass auch diese gut miteinander übereinstimmen. In Prä trifft der Schuttstrom gemäss Simulationen nach ca. 5 Minuten ein, wobei die beobachtete Fliesszeit rund 1 Minute weniger beträgt *(Bild 4)*. Auf Höhe der alten Brücke am Kegelhals trifft die simulierte Welle gleichzeitig wie die beobachtete ein. Auch die starke Abnahme der Fliessgeschwindigkeiten von der alten Brücke bis zur Schreinerei kann mittels des Modells abgebildet werden. Die modellierte Murwelle erreicht die Schreinerei nach knapp einer Stunde Fliesszeit und stimmt mit den Beobachtungen sehr gut überein.

5.4 Bergsturz-Schuttstrom-Simulationen

Mittels des neu entwickelten Zweiphasenmoduls von FLUMEN konnte der Übergang von einem Bergsturz in einen Schuttstrom prozessnah nachgebildet werden *(Bild 5)*. Anhand einer internen Quelle im Bereich des Cengalogletschers wird der Sturzmasse Wasser zugefügt, wobei sich das Wasser im Verlauf der Sturzbewegung

in der Bergsturzmasse verteilt und sich präferenziell an der Sturzfront ansammelt. An der Front werden Wasserkonzentrationen von 25 bis 35 % erreicht, welche ausreichend gross sind, um einen Teil der Bergsturzmasse instantan zu verflüssigen. Gemäss den Simulationen entsteht ein Schuttstrom mit einer Kubatur von 690 000 m^3, der in der Grössenordnung des beobachteten Schuttstroms (545 000 m^3) liegt.

Die Simulationen haben gezeigt, dass der kritischste Punkt der Vorgang der Wasser- bzw. Eisaufnahme ist (Ort, Zeitpunkt und Dauer der Wasserzugabe). Erfolgt die Wasseraufnahme in konzentrierter Form, kann ein Schuttstrom in der 2017 beobachteten Grösse ausgelöst werden. Geschieht die Wasseraufnahme jedoch über eine grössere Fläche bzw. eine längere Zeitspanne, verteilt sich das Wasser gleichmässiger über die Sturzmasse und die Konzentrationen an der Front fallen zu gering aus, um in einen Schuttstrom überzugehen.

5.5 Murgänge 2017

5.5.1 Murgänge vom 23. August 2017

Der Schuttstrom sowie die darauffolgenden neun Murschübe vom 23. August 2017

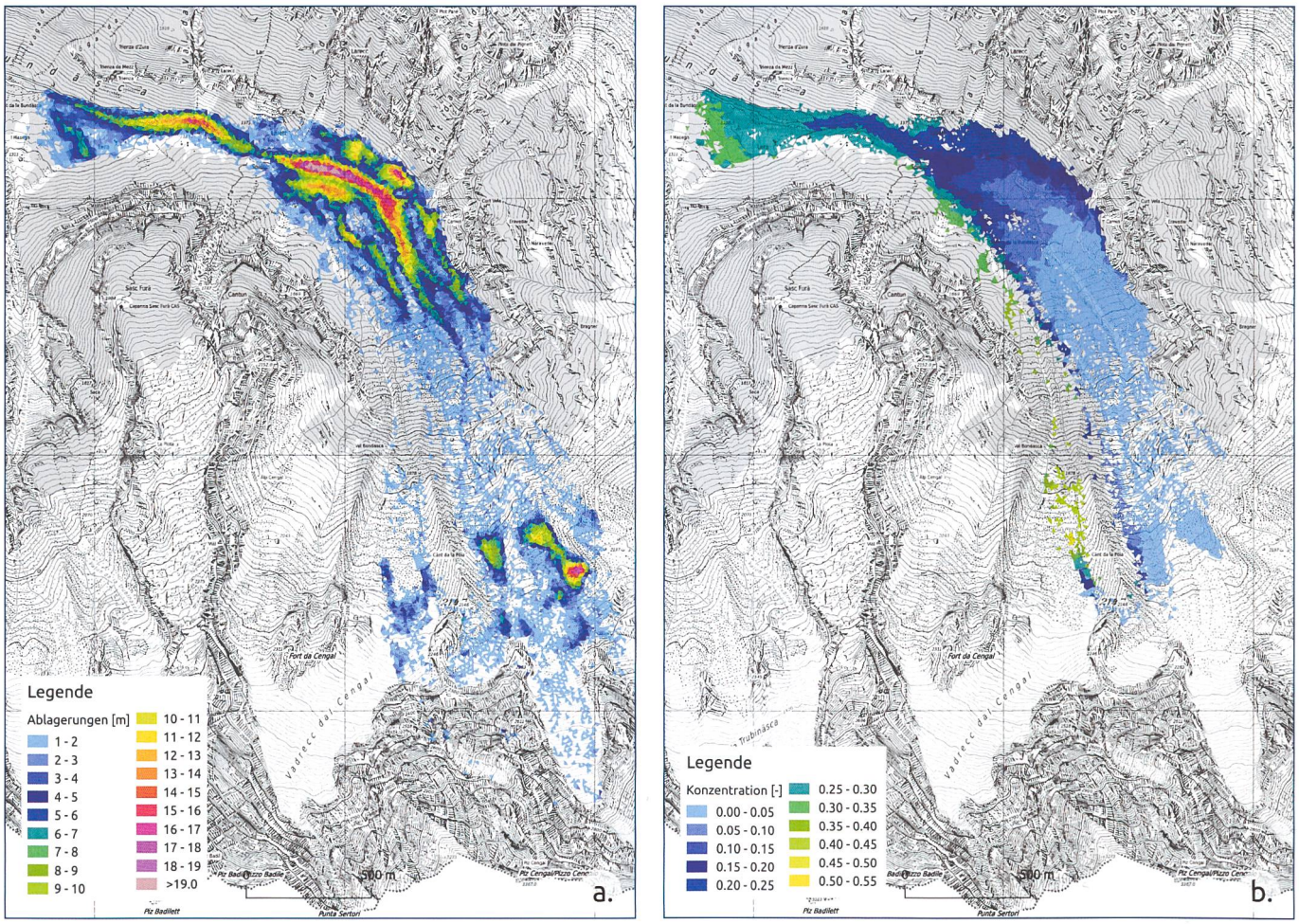

Bild 5. Ergebnisse der kombinierten Bergsturz-Schuttstrom-Simulationen mit (a) den modellierten Ablagerungsmächtigkeiten und (b) den Wasserkonzentrationen am Ende der Simulation.

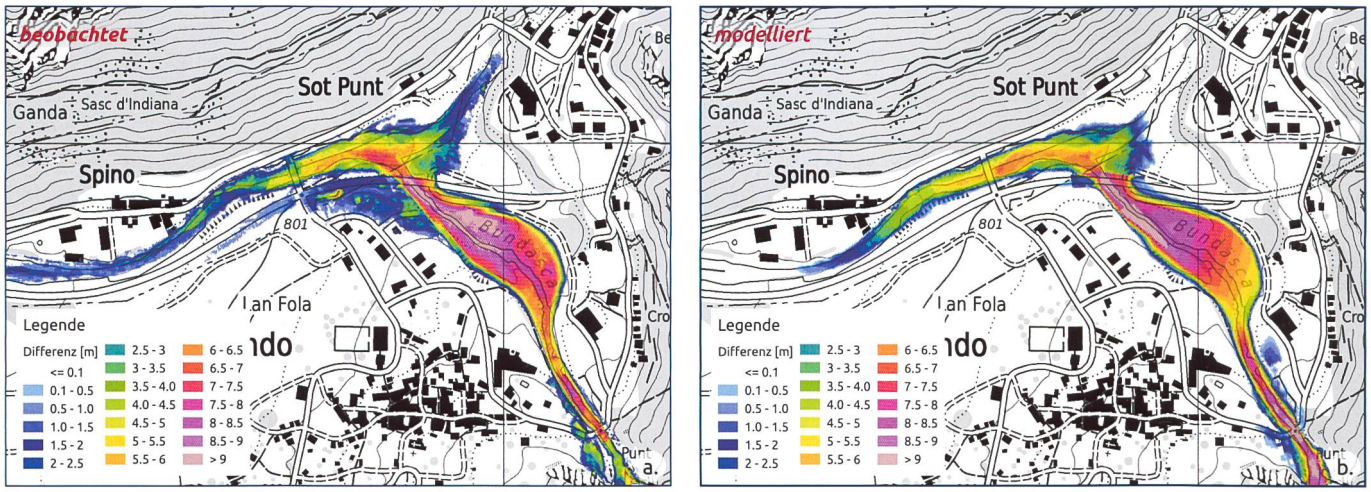

Bild 6. (a) Beobachtete und (b) modellierte Ablagerungsmächtigkeiten des Schuttstroms und der neun Murschübe vom 23. August 2017. Eine optimale Übereinstimmung wurde mit dem «Turbulent-Coulomb Ansatz» mit einer Grenzschubspannung von 8750 N/m^2 für den Schuttstrom und 500 bis 1000 N/m^2 für die nachfolgenden Murschübe erzielt sowie mit einem Reibungsgefälle von 3 %.

haben ca. 220 000 m³ Material nach Bondo verfrachtet, welches vorwiegend im Rückhaltebecken sowie im Einmündungsbereich der Maira zur Ablagerung kamen. *Bild 6* zeigt die kumulierten Ablagerungen aller Ereignisse des 23. August der Beobachtungen sowie der Simulationsresultate. Eine optimale Übereinstimmung wurde mit dem Turbulent-Coulomb-Ansatz mit einer Grenzschubspannung von 8750 N/m² für den Schuttstrom und von 500 – 1000 N/m² für die nachfolgenden Murschübe erzielt, wobei ein Reibungsgefälle von 3 % verwendet wurde. Das Ablagerungsmuster kann mittels des hydrodynamischen Modells sehr gut nachgebildet werden. Abweichungen sind oberhalb der Bondasca-Brücke zu erkennen. Dies ist vermutlich dem rückstauenden Einfluss der Brückenplatte (inkl. massivem Geländer) zuzuschreiben.

5.5.2 Murgänge vom 25. August 2017

Der Murgang vom 25. August mit zwei aufeinanderfolgenden Schüben hat rund 55 000 m³ in das Becken eingetragen. Die Kapazität des Rückhaltebeckens war zu diesem Zeitpunkt bereits vollständig erschöpft, und es kam insbesondere auf der orografisch linken Seite zu Übermurungen. Die Ablagerungen mit Mächtigkeiten von bis zu 3 m erstrecken sich von der Schreinerei bis zur Brücke Spizzarun. Auch in den Simulationen sind diese linksseitigen Ablagerungen ersichtlich. Allerdings kommt gemäss den Simulationen mehr Geschiebe im Rückhaltebecken zur Ablagerung (insbesondere rechtsseitig), während die Ablagerungen oberhalb der Malojastrasse zwischen der Brücke Spizzarun und der Bondasca-Brücke fehlen.

5.5.3 Murgang vom 31. August 2017

Der grosse Murgang vom Abend des 31. August, welcher durch kräftige Gewitterniederschläge ausgelöst wurde, hat insbesondere im Einmündungsbereich der Maira hohe Ablagerungen hinterlassen mit Mächtigkeiten von bis zu 8 m *(Bild 8a)*. Im Bereich des Rückhaltebeckens bildeten sich linksufrig natürliche Levées, welche den Murgang kanalisiert und grossflächigere Überflutung des Dorfes verhindert haben. Erste Modellversuche mit konstanter Rheologie haben keine befriedigende Ergebnisse geliefert. Bei Verwendung einer eher zähflüssigen Rheologie mit einer Grenzschubspannung von 2500 N/m² konnten zwar die Ablagerungen im Kegelbereich abgebildet werden, allerdings treten in Spino keine Ausuferungen auf. Mit einer dünnflüssigen Rheologie (Grenzschubspannung von 1000 N/m²) können zwar die Übersarungen in Spino modelliert werden, sie gehen jedoch mit viel zu ausgedehnten Ausuferungen auf dem Kegel einher. Eine deutliche Verbesserung konnte mit der Anwendung eines Zweiphasenmodells erzielt werden, bei welchem die Fliesseigenschaften durch die Bilanzierung des Wassergehaltes variieren. Somit kann der granulare Charakter der Murgänge mit einer hohen Feststoffkonzentration an der Front und deutlich flüssigerer Konsistenz im hinteren Bereich abgebildet werden. Für die Modellierung des Ereignisses vom 31. August wurde mit zwei Quellen am unteren Ende der Schlucht gearbeitet, welche

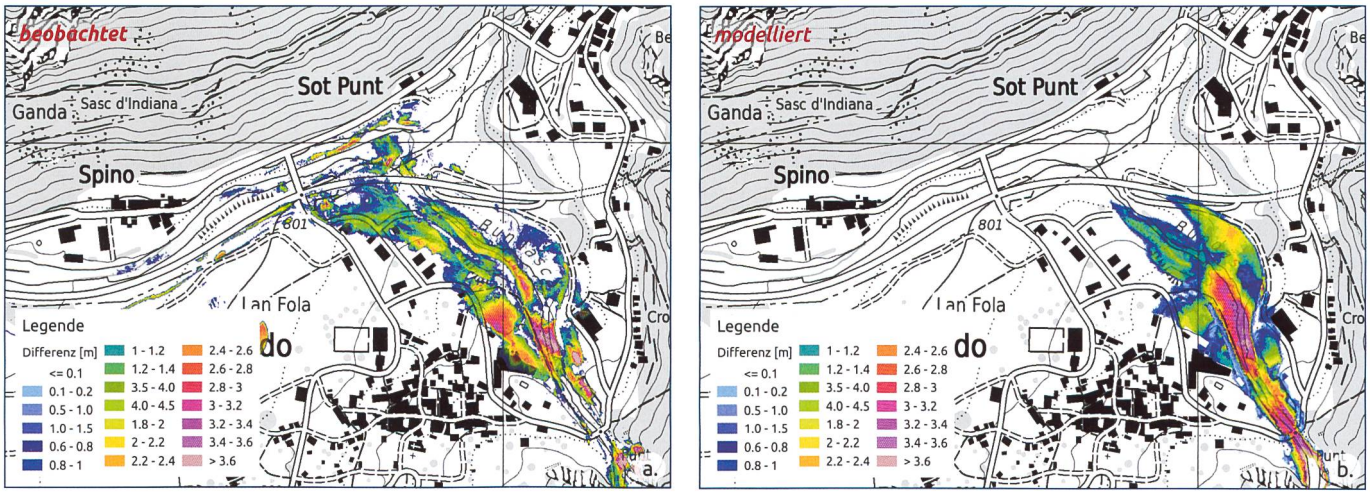

Bild 7. Beobachtete (a) und modellierte (b) Ablagerungsmächtigkeiten der zwei Murschübe vom 25. August 2017. Der Turbulent-Coulomb-Ansatz mit einer Grenzschubspannung von 2500 N/m² für den ersten und 1000 N/m² für den zweiten Schub sowie mit einem Reibungsgefälle von 3 % hat die beste Übereinstimmung ergeben.

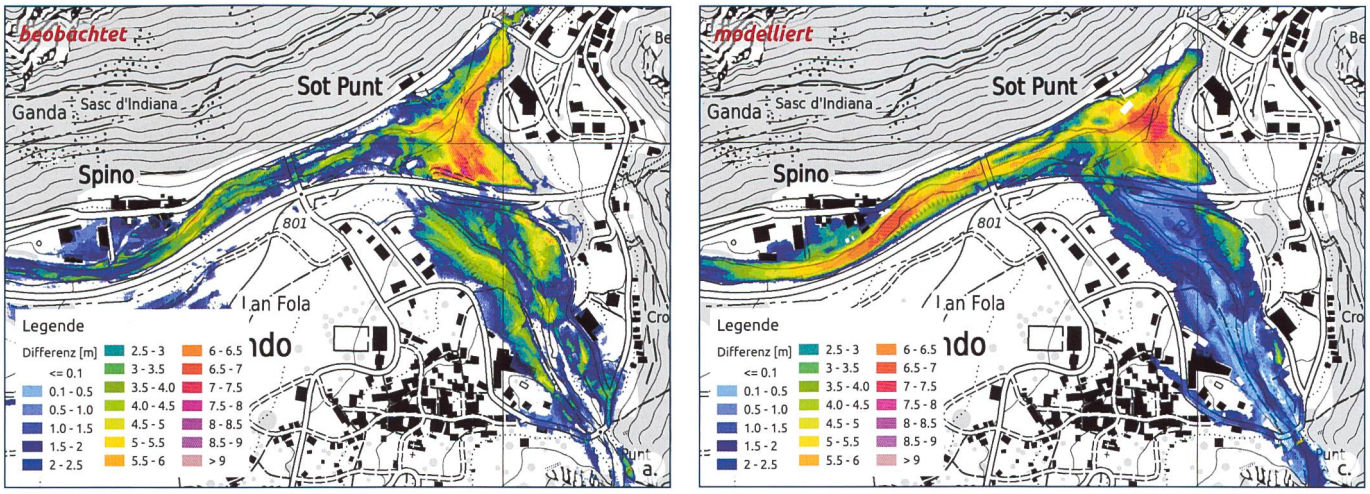

Bild 8. (a) Beobachtete und (b) modellierte Ablagerungsmächtigkeiten des grossen Murgangs vom 31. August 2017.

den Zustand der Murgangwellen am Ausgang der Schlucht nachbilden: eine erste kleinere, zähflüssige Welle mit einer Grenzschubspannung von 4000 N/m^2 und eine zweite grössere, dünnflüssigere Welle mit einer Grenzschubspannung von 500 N/m^2, die kurz hintereinander anspringen. Dank dieser Vorgaben stimmen die Ablagerungsmuster deutlich besser mit den Beobachtungen überein (vgl. *Bild 8b*). Das Material mit hoher Feststoffkonzentration lagert sich im Bereich des Auffangbeckens ab und bildet in den randlichen Bereichen Levées aus, welche ein Ausbrechen des nachfolgenden, dünnflüssigen Materials in Richtung Dorf verhindern. Das dünnflüssige Material fliesst kanalisiert durch die Levées ab und führt im Raum Spino zu den beobachteten Ausuferungen.

6. Fazit

Die durchgeführten Nachsimulationen der Bergsturz- und Murgangereignisse im Val Bondasca der vergangenen Jahre zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Die Ausdehnung der Ablagerungen, die Mächtigkeiten sowie die räumliche Verteilung der Ablagerungen können mittels der Modelle gut wiedergegeben werden. Auch der Schuttstrom und dessen Fliesszeiten konnten mittels des numerischen Modells sehr gut abgebildet werden. Die modellierten Ablagerungsmächtigkeiten werden in der Transitstrecke durch das Modell leicht unterschätzt, sind jedoch teilweise auf das Fehlen der Murgangablagerungen von 2012 im Ausgangshöhenmodell zurückzuführen. Mittels des Zweiphasenmodells ist es gelungen den Übergang eines Bergsturzes in einen Schuttstrom zu simulieren. Die Simulationen lassen darauf schliessen, dass das erodierte Eis des Cengalogletschers entscheidend zur Verflüssigung der Sturzmasse beigetragen hat. Die Modellierungen zeigen jedoch auch, dass der Übergang eines Bergsturzes in einen Schuttstrom ein sehr komplex abzubildender Prozess ist und sehr sensitiv auf den genauen Ort und Zeitpunkt der Wasser- bzw. Eisaufnahme reagiert. Vielversprechend sehen die Resultate der Murgangsimulationen mittels des Zweiphasenmodells aus. Dank den variablen Fliesseigenschaften konnten die beim Ereignis vom 31. August beobachteten randlichen Levées nachgebildet werden, welche die Murgangmasse kanalisiert und grössere Schäden im Dorf verhindert haben. Mit der implementierten Modellerweiterung in FLUMEN konnte der spezifische Einfluss des Wassers auf die Rheologie der Murgänge prozessnah nachgebildet werden.

Danksagung:
Wir bedanken uns bei der Gemeinde Bregaglia, dem Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden und dem Tiefbauamt Graubünden für die sehr angenehme Zusammenarbeit und den wertvollen fachlichen Austausch.

Literatur:

[1] *beffa tognacca gmbh* (2013): Riale Bondasca–Bondo–Valutazione dei pericoli a seguito di eventi alluvionali e di colate detritiche. Bericht im Auftrag des Amt für Wald und Naturgefahren, Südbünden.

[2] *beffa tognacca gmbh* (2015): Riale Bondasca e Fiume Maira, Bondo – Opere di premunizione – Progetto di massima e valutazione costi-benefici. Bericht im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.

[3] *beffa tognacca gmbh* (2018): Val Bondasca – Ereignisanalyse 2017 und Szenariendefinition. Bericht im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Südbünden.

[4] *beffa tognacca gmbh* (2018): Val Bondasca/Maira – Gefahrenbeurteilung Murgang und Hochwasser. Bericht im Auftrag des Amtes für Wald und Naturgefahren, Südbünden.

[5] *beffa tognacca gmbh* (2018): Folgeprojekt Bergsturz Piz Cengalo 2017 – Verbauungen Bondasca und Maira. Vorstudie im Auftrag der Gemeinde Bregaglia.

[6] *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.

[7] *Gabbi, J., Tognacca, C., Keiser, M.* (2019): Gravitative Prozesse in der Bondasca – von der Gefahrenbeurteilung zur Umsetzung der Schutzmassnahmen, «Wasser Energie Luft», 2/2019, S. 74–84.

[8] *Beffa C.* 1994: Praktische Lösung der tiefengemittelten Flachwassergleichungen. VAW Mitteilung Nr. 133, ETH Zürich.

Anschrift der Verfasser:
Dr. dipl. Ing. ETH *Christian Tognacca*,
beffa tognacca gmbh, In Carèe Ventivi 27,
CH-6702 Claro, ctognacca@fluvial.ch
Dr. Msc. Erdw. ETH *Jeannette Gabbi*,
beffa tognacca gmbh, In Carèe Ventivi 27,
CH-6702 Claro, jgabbi@fluvial.ch
Dipl. Ing. ETH *Giacomo Cattaneo*,
beffa tognacca gmbh, In Carèe Ventivi 27,
CH-6702 Claro, gcattaneo@fluvial.ch
Dr. dipl. Ing. ETH *Cornel Beffa*,
beffa tognacca gmbh, Bahnhofstrasse 13A,
CH-6422 Steinen, *cbeffa@fluvial.ch*