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

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 106 (2014)

Heft: 4

Artikel: Einsatz numerischer Murgangsimulationen am Beispiel des integralen Schutzkonzepts Plattenbach Vitznau

Autor: Hohermuth, Benjamin / Graf, Christoph

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939760

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: 25.12.2025

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

Einsatz numerischer Murgangsimulationen am Beispiel des integralen Schutzkonzepts Plattenbach Vitznau

Benjamin Hohermuth, Christoph Graf

Zusammenfassung

Im Rahmen der Überarbeitung des Integralen Schutzkonzepts für den Plattenbach in Vitznau wurde die Wirksamkeit von Massnahmen unterstützend mit dem numerischen Murgang-Simulationsprogramm RAMMS (RApid Mass Movement System) geprüft. Dabei wurde die neue Möglichkeit zur Integration von baulichen Massnahmen im numerischen Modell (sog. No-Flux-Zellen) getestet und bewertet. Bestehende Szenariendefinitionen flossen in die Berechnungen ein. Das Modell wurde anhand von historischen Daten kalibriert. Die neu hergeleiteten Intensitätskarten weisen teils deutliche Abweichungen zu früheren Grundlagen auf und zeigen die grosse Sensitivität bezüglich des verwendeten Geländemodells und bezüglich der Eingangsdaten sowie einen untergeordneten Einfluss der Parameter des rheologischen Modells. Die Wirksamkeit der projektierten Rückhaltemassnahmen im Oberlauf konnte bestätigt und das Rückhaltevolumen optimiert werden. Die Anordnung von lenkenden Massnahmen auf dem Kegel konnte aufgrund der Simulationsresultate ebenfalls optimiert werden. Insgesamt lieferten die RAMMS-Simulationen eine objektive Grundlage zur Beurteilung der Restintensität nach Massnahmen und damit zur Beurteilung ihrer Wirksamkeit. Optimierungsmöglichkeiten im numerischen Modell bestehen jedoch weiterhin, insbesondere beim Abbruchkriterium und bei den Randzellen, damit Massnahmen im Modell besser abgebildet werden können.

1. Einleitung

Murgänge gehören zu den schnellen Massenbewegungen und sind äusserst komplex und relativ schwierig zu erfassen. Sie stellen im alpinen und voralpinen Raum in Wildbächen eine nicht zu unterschätzende Gefahr dar. Methoden und Ansätze, welche zum Erkennen und Bewerten der Prozesse beitragen, wurden in den letzten Jahrzehnten entwickelt und verbessert. Trotzdem haben grössere Ereignisse (wie z.B. im August 2005) gezeigt, dass in den Vorhersagen nach wie vor grössere Unsicherheiten bestehen. Beim Projektieren von Schutzmassnahmen muss ein Weg gefunden werden, mit den Unsicherheiten umzugehen und angepasste, solide Massnahmenvorschläge herzuleiten. Hier können die ebenfalls in den letzten Jahren entwickelten numerischen Modelle zur Beschreibung der Ausbreitung und Reichweite von Murgängen eine wichtige Rolle einnehmen, da sie es ermöglichen, verschiedene Szenarien und Annahmen rechnerisch zu testen und gegeneinander abzuwägen. Dabei sollten auch bauliche Elemente mit berücksichtigt werden können. Die genaue Vorgehensweise und die zu verwendenden Modelle sind bisher nicht näher beschrieben. Der vorliegende Artikel stellt ein weiteres Beispiel im Rahmen eines integralen Schutzkonzepts dar, wo neben dem Murgangprozess die gesamte Prozesskette, ausgehend von tiefgründigen Rutschungen bis hin zu Geschiebetransport, in den Überlegungen mit berücksichtigt werden muss.

2. Plattenbach Vitznau

Der Plattenbach entwässert ein Teilgebiet der steilen Südflanke der Rigi auf dem Gemeindegebiet von Vitznau. Der Untergrund besteht vorwiegend aus gebankten Konglomeraten. Die Hänge sind mit Moränenablagerungen und Hangsedimenten überdeckt. Das Einzugsgebiet ist mit 0.7 km^2 relativ klein. Trotzdem werden für ein 100-jährliches Ereignis beachtliche Hochwasserspitzen von 20 m^3/s erwartet. Im Einzugsgebiet des Plattenbachs befinden sich drei Rutschgebiete *(Bild 1)*, das volumenmässig grösste und aktivste Gebiet ist die Rutschung Stollenegg. Das Gerinne verläuft auf weiten Strecken auf Fels und ist teilweise tief eingeschnitten *(Bild 2)*. Auf seinem Weg in den Vierwaldstättersee passiert der Plattenbach mehrere Engstellen, er durchquert den Bahndamm der Rigibahn und ist auf dem Kegel auf einer Länge von 120 m eingedolt. Kurz vor der Mündung fliesst er im Siedlungsgebiet mit dem Mühlebach zusammen *(Bild 1)*. Die Überarbeitung des ISK Plattenbach Vitznau basiert auf dem Vorprojekt ISK Plattenbach 2011 und der Konzeptstudie ISK Vitznauer Bäche 2013. Die Wirksamkeit der Massnahmen ist zu prüfen und gegebenenfalls sind neue Massnahmen auszuarbeiten. Aufgrund der grossen Unsicherheiten in den zu erwartenden Rutschvolumina wird grossen Wert auf die konsequente Betrachtung des Überlastfalles gelegt. Ergänzend zu konventionellen ingenieurtechnischen Methoden sollen numerische Simulationen zum Prüfen der Wirksamkeit der Massnahmenvorschläge zum Einsatz kommen. Numerische Murgangsimulationsmodelle sind heute auf einem Stand, welcher einen gewinnbringenden Einsatz in der Gefahren- und Risikobewertung erlaubt. Damit können u.a. dokumentierte Ereignisse nachgerechnet (z.B. *Scheuner* 2007, *Deubelbeiss* & *Graf* 2013) oder unterstützend bei der Erstellung von Gefahrenkarten eingesetzt werden (z.B. *Scheuner et al.* 2011, *Walser* 2013, *Graf et al.* 2013). Arbeiten, die versuchen, die Wirkung von Schutzmassnahmen abzubilden, existieren nur wenige (*Graf* & *McArdell* 2008). Der Einsatz von sog. No-Flux-Zellen zur Implementierung von baulichen Massnahmen im numerischen Modell stellt diesbezüglich eine neue Möglichkeit dar (*Hohermuth* 2014). No-Flux-Zellen ermöglichen das Ausschneiden von Zellen aus dem Berechnungsgitter, wodurch bestimmte Bereiche (z.B. Dämme, aber auch Häuser) als nicht durchströmbar definiert werden. An den Zellenrändern können Kennwerte wie

Fliesshöhe oder Fliessgeschwindigkeit als Eingangsgrössen für die Dimensionierung der Schutzbauwerke ausgelesen werden. RAMMS liefert eine objektive Grundlage zur Beurteilung der Restintensität nach Massnahmen und damit zur Beurteilung der Wirksamkeit von Massnahmen.

3. Grundlagen

Im Rahmen des VP ISK Plattenbach (2011) wurde zum ersten Mal eine gründliche Gefahrenbeurteilung im Perimeter des Plattenbachs erstellt. Dabei wurde eine umfassende Abschätzung des Feststoffpotenzials durchgeführt. Da der Plattenbach weitgehend auf Fels verläuft, können Feststoffeinträge durch Sohlenerosion vernachlässigt werden. Massgebend sind Geschiebeeinträge aus den drei Rutschgebieten im Einzugsgebiet *(Bild 1, Tabelle 1)*.

Ausgehend von der Beurteilung der hydrologischen und geologischen Verhältnisse wurden die Murgangszenarien in *Tabelle 2* definiert. Die erwartete Anzahl Schübe wurde gutachterlich festgelegt, wobei die resultierenden Schubvolumina eine obere Grenze darstellen. Das maximale Schubvolumen ist durch die Transportkapazität des Plattenbachs und nicht durch die Feststoffeinträge limitiert. Der zugehörige Spitzenabfluss und die Fliessgeschwindigkeit wurden empirisch nach *Rickenmann* (1999) ermittelt. Die resultierende Abflussspitze im 100-jährlichen Murgangereignis ist mit 130 m^3/s mehr als sechsmal grösser als die Hochwasserspitze im Rheinwasserfall.

RAMMS wird am WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung, SLF, entwickelt (www.wsl.ch/ramms). Die Simulationsumgebung besteht aus drei kommerziell erhältlichen Modulen, RAMMS::AVALANCHE (Fliesslawinen), RAMMS::DEBRIS FLOW und neu RAMMS::ROCKFALL (*Christen et al.* 2012). RAMMS::AVALANCHE wird bereits seit einigen Jahren erfolgreich für die Simulation von Fliesslawinen verwendet (z.B. *Christen et al.* 2010). Mit dem Murgangmodul kann das Ausbreitungs- und Ablagerungsverhalten von Murgängen auf komplexen Terrainoberflächen modelliert werden. Die Berechnung von Fliesstiefe und -geschwindigkeit liefert die Eingangsgrössen zur Bemessung von Schutzbauwerken (*Graf & McArdell* 2008 und *Graf & McArdell* 2011). Anwendungen von RAMMS in der Gefahrenkartierung finden sich in *Scheuner et al.* 2011, *Graf et al.* 2013 und *Walser et al.* 2014. Murgänge werden in RAMMS als einphasiges, homogenes und inkompressibles Fluid behandelt. Basis für die Berechnungen sind die Grundgleichungen für Energie- und Massenerhaltung aus der Kontinuumsmechanik. Durch Annahme einer hydrostatischen Druckverteilung und der Integration über die Fliesstiefe ergeben sich daraus die tiefengemittelten 2D-Flachwassergleichungen. Die Rheologie der Murgänge wird nach dem Ansatz von Voellmy-Salm berücksichtigt. Der Reibungsterm nach *Voellmy-Salm* $S_f=(S_{fx},S_{fy})^T$ beinhaltet einen geschwindigkeitsunabhängigen Coulomb-Term für die trockene Reibung μ und einen geschwindigkeitsabhängigen Term für die turbulente Reibung ξ, siehe Gleichung (1).

$$S_{fx} = n_{Ux}\left[\mu g_z H + \frac{g||U||^2}{\xi}\right] \text{ und } S_{fy} = n_{Uy}\left[\mu g_z H + \frac{g||U||^2}{\xi}\right] \quad (1)$$

Für detailliertere Informationen zur Numerik von RAMMS wird auf *Christen et al.* (2010) verwiesen. Die beiden Reibungsparameter μ und ξ können nicht direkt bestimmt werden, sondern erfordern eine Kalibrierung anhand dokumentierter Ereignisse und Analogieschlüssen aus Berechnungen in vergleichbaren Murganggerinnen. Zur Erstellung von Intensitätskarten werden die berechnete Fliesstiefe und die Fliessgeschwindigkeit pro Gitterzelle miteinander verschnitten und gemäss den Intensitätsklassen der Empfehlung Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten (*BUWAL* 1997) klassifiziert. Liegen überhaupt keine dokumentierten Ereignisse für eine Kalibrierung vor, kann näherungsweise $\mu = \tan \alpha$ angenommen werden, wobei α das Gefälle auf dem

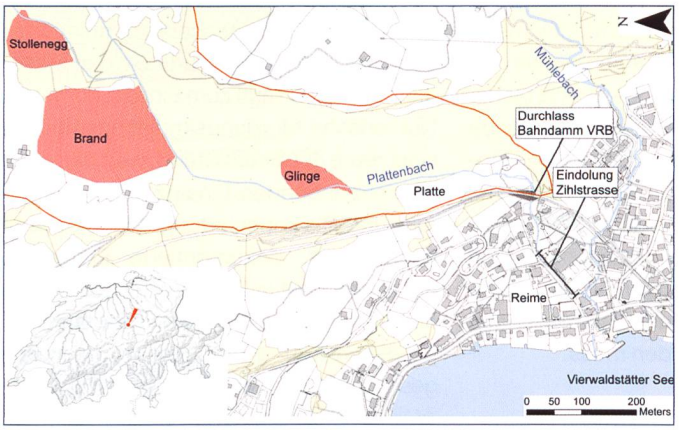

Bild 1. Übersichtsplan Plattenbach. Das Einzugsgebiet ist durch die rote Linie abgegrenzt. Die Rutschgebiete sind in Rot hinterlegt.

Bild 2. Plattenbach im Bereich kurz vor dem Durchlass Bahndamm VRB mit Blick auf den Bereich «Platte». Das Gerinne verläuft in diesem Bereich mehrheitlich eingeschnitten im Fels.

	Wiederkerhperiode			
Geschiebeeintrag [m^3]	**R=30a**	**R=100a**	**R=300a**	**Extremereignis**
Stollenegg	5'000	15'000	22'500	35'000
Brand	30	1'500	8'000	40'000
Glinge	10	200	800	4'000
Total	**5'040**	**16'700**	**31'300**	**79'000**

Tabelle 1. Feststoffpotenzial der drei Rutschgebiete für verschiedene Jährlichkeiten. Quelle VP ISK Plattenbach 2011.

Szenario	**G_{30}**	**G_{100}**	**G_{300}**	**G_{Extrem}**
Ereignisvolumen [m^3]	5'040	16'700	31'300	79'000
Anzahl Schübe [-]	2	3	4	3
Schubvolumen [m^3]	2'520	5'567	7'850	26'333
Spitzenabfluss [m^3/s]	70	130	170	420
Fliessgeschwindigkeit [m/s]	5.7	7.0	7.7	10.4

Tabelle 2. Definition der Murgangszenarien für die Überarbeitung des ISK Plattenbach. Quelle IG Bäche Vitznau.

Kegel beschreibt (*Genolet* 2002, *Scheuner et al.* 2011). Der turbulente Reibungsbeiwert ξ wird dann variiert, bis plausible Fliessgeschwindigkeiten erreicht werden. Die Fliessgeschwindigkeiten können z.B. aus Spuren einer Kurvenüberhöhung errechnet oder mit empirischen Formeln abgeschätzt werden, z.B. nach *Rickenmann* (1999). Grundlage für alle Simulationen ist das digitale Geländemodell (DGM). In den vorliegenden Untersuchungen wurden Datenpunkte aus einer LIDAR-Überfliegung verwendet. Aus den Punktinformationen wurde mit dem ANUDEM-Algorithmus (*Hutchinson et al.* 2011) ein Geländeraster erstellt, in dem die Fliesswege eingehalten werden. Als Vergleich wurde zusätzlich mit dem DGM der amtlichen Vermessung (Quelle Dienststelle Raum und Wirtschaft rawi Kanton Luzern) gearbeitet. Beide Geländeraster wurden mit einer Auflösung von 1 × 1 m verwendet und bei einer Begehung vor Ort überprüft. Zusätzlich standen für den Plattenbach terrestrische Vermessungsdaten von Querprofilen als Vergleich zur Verfügung. Der Einfluss der DGM-Auflösung und seiner Qualität auf die resultierenden Intensitäten wurde mit einer Sensitivitätsanalyse untersucht. Zu hohe Auflösungen können nebst dem hohen Rechenaufwand auch zu einer Scheingenauigkeit führen weil sich das Gelände seit der Erfassung oder während einem Ereignis im Gerinnebereich verändert und von der Rechengrundlage abweicht. Eine zu geringe Auflösung kann dazu führen, dass ein Gerinne mit bescheidener mittlerer Breite bei einem Geländeraster von mehreren Metern nur noch mangelhaft abgebildet wird.

4. Simulation von Massnahmen

Zum Schutz des Siedlungsgebiets vor Murgängen sieht die Konzeptstudie Integrales Schutzkonzept Vitznauer Bäche 2013 am Plattenbach bauliche Massnahmen zum Rückhalt von Geschiebe in Kombination mit einem Überlastkorridor entlang der Zihlstrasse auf dem Kegel vor. Der Rückhalt soll gemäss Konzept im Gebiet Brand und am Bahndamm stattfinden *(Bild 1)*. Das Ziel der Arbeit (*Hohermuth* 2014) bestand darin, numerische Murgangsimulationen in den Prozess der Massnahmenprojektierung einzubinden und dabei die Wirkung von Massnahmen in RAMMS abzubilden. Bisherige Untersuchungen haben gezeigt, dass Lenk- und Rückhaltedämme, die im Geländemodell nachgebildet werden, im Modell deutlich zu früh überströmt werden (*Graf* & *McArdell* 2008 und *Graf* & *McArdell* 2011). Die neue Funktion der No-Flux-Zellen in der neusten Version von RAMMS soll hier deutliche Verbesserungen schaffen. Basis für die eingangs erwähnte Kalibrierung der Reibungsparameter ist das einzige dokumentierte Murgangereignis im Plattenbach von 1910. Durch intensive Niederschläge wurde damals eine Rutschung in Gebiet Stollenegg ausgelöst, was in der Folge zur Bildung einer Gerinnemure führte. Dokumentiert ist die Ablagerung von 15 000 m^3 Material auf dem Kegel, wodurch das alte Schulhausareal und das Gebiet Reimen (vgl. *Bild 1*) 1–2 m hoch mit Schutt überdeckt wurden (Ereignisdokumentation ISK Plattenbach Vitznau). Angaben über die Anzahl Schübe, Fliessgeschwindigkeit oder -tiefe fehlen, wie das häufig der Fall ist. Die Fliesseigenschaften von Murgängen sind von mehreren Parametern (Vorsättigung, Wassergehalt, Materialzusammensetzung usw.) abhängig und können sogar innerhalb eines Ereignisses variieren (*Graf et al.* 2013). Um die ganze Bandbreite an erwarteten Ereignissen abzudecken, wurde ein Parameterbereich für die Simulationen bestimmt. Für den Plattenbach wurde μ = 0.1–0.15 [-] und ξ = 100–400 m/s^2 verwendet, was einen eher granularen Murgang beschreibt.

Die im Vorprojekt bestimmten Kennwerte für Volumen und Anzahl Schübe *(Tabelle 2)* wurden für die Simulationsberechnungen in RAMMS unverändert übernommen. Gestartet wurden die Berechnungen unterhalb der beiden Rutschgebiete Stollenegg und Brand *(Bild 1)* mit einem Inputhydrographen. Liegen keine weiteren Informationen vor, wird von einem 3-Punkte-Hydrograph ausgegangen. Für kanalisierte Gerinnemuren liefert der Inputhydrograph bessere Resultate, wohingegen die Startbedingung «Block Release» bei flächigen Murgängen empfohlen wird (*Deubelbeiss* & *Graf* 2013).

5. Resultate

Qualität, Aktualität und Auflösung des DGM sind von entscheidender Bedeutung für die Güte der Resultate. Aus der Studie wurde klar ersichtlich, dass Qualität und Auflösung des digitalen Geländemodells einen deutlich höheren Einfluss auf die Simulationsresultate hat als die beiden Reibungsparameter μ und ξ. Die Sensitivitätsanalyse des DGM zeigt, dass Auflösungen gröber als 5 × 5 m das schmale, tief eingeschnittene Gerinne nicht genügend genau abbilden, wodurch Ausbrüche aus dem Gerinne zu früh simuliert werden. Für Berechnungen im Siedlungsgebiet werden Geländedetails für den Plattenbach erst bei einer Auflösung von 1 × 1 m korrekt dargestellt. Wichtiger als die Auflösung scheint die Qualität der Geländedaten zu sein. *Bild 3* zeigt eindrücklich die Auswirkungen von Geländedetails auf den modellierten Fliessweg. Das DGM der amtlichen Vermessung zeigt in der eingekreisten Markierung eine Brücke, wo in Wirklichkeit keine besteht. Zum Vergleich

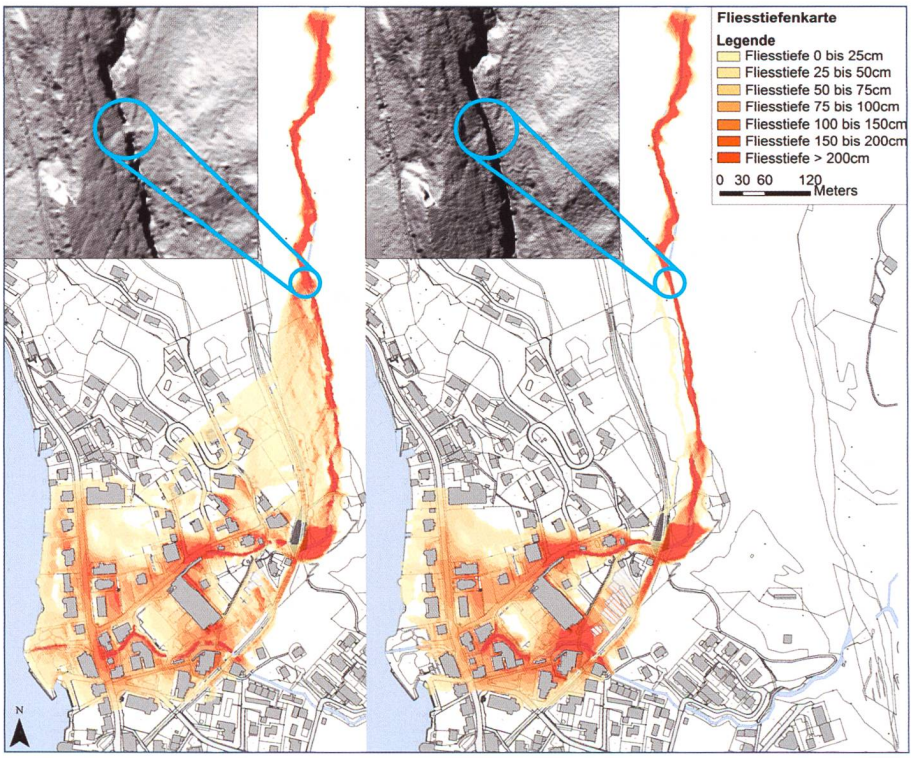

Bild 3. Fliesstiefe für 10 000 m Schubvolumen, berechnet auf dem DTM-AV (links) und dem DTM-LIDAR (rechts). Die Bildausschnitte zeigen jeweils einen Ausschnitt aus den verwendeten Geländemodellen, beide mit 1 × 1m Auflösung.

ist rechts in *Bild 3* die «korrekte» Abbildung im DGM aus den LIDAR-Punktinformationen gezeigt.

Angaben zur räumlichen Verteilung der Intensität und Fliesstiefe eines Murganges sind essenzielle Grundlagen für die Projektierung von Massnahmen und der Gefahrenzonenbestimmung. Numerische Simulationen liefern eine objektive Grundlage zur Erstellung von Intensitätskarten. Diese helfen bei der Erkennung von Schwachstellen im System in Abhängigkeit der Wiederkehrperiode. *Bild 4* zeigt die Intensitäten für ein 300-jährliches Ereignis, bei dem mit einer Verklausung des Durchlasses unter dem Bahndamm gerechnet werden muss und in der Folge ein Einstau und Bruch des Dammes erfolgt. Daraus resultieren starke Intensitäten entlang der Zihlstrasse, welche u.a. das neue Schulhaus betreffen.

Auf Basis der Intensitätskarten für den IST-Zustand wurden bauliche Massnahmen entworfen und mit RAMMS getestet. Nur wenn die Restintensitäten nach Umsetzung der Massnahmen bekannt sind, kann die intensitätsbasierte Schutzzielmatrix gemäss der Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren des Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (*BUWAL* 2005) wirklich umgesetzt werden. Mit RAMMS kann die Restintensität für unterschiedliche Volumen eines Rückhaltebauwerks mit wenig Aufwand berechnet werden. Für die Sperre Brand hat die Untersuchung gezeigt, dass ein Rückhalt von 31 000 m^3 (entspricht G300) nötig ist, um die geforderten Intensitäten nicht zu überschreiten. Zusätzlich ermöglicht die Betrachtung des Extremereignisses das Ausscheiden eines Überlastkorridors, in dem durch organisatorische Massnahmen das Schadenspotenzial weiter reduziert werden kann. Am Plattenbach wurden entlang der Zihlstrasse Objektschutzmassnahmen für den kombinierten Schutz vor Hochwasser und Murgängen geprüft. Die Wirksamkeit der geplanten Objektschutzmassnahmen für Murgangereignisse wurde in RAMMS untersucht. Im Speziellen wurde darauf geachtet, dass sich durch eine Massnahme die Gefährdung für andere Objekte nicht erhöht. Unter dieser Rahmenbedingung wurde die Anordnung der Leitmauern in RAMMS optimiert. Die *Bilder 5a* und *5b* zeigen die Fliesstiefen für ein Ereignis aus der Rutschung Glinge mit den Objektschutzmassnahmen vor und nach der Optimierung. Die Lenkwirkung der Massnahmen kann im Modell gut abgebildet werden, wodurch sich die Lage und Anordnung der Schutzmauern optimieren lässt. Die Simulationen liefern mit der Fliesstiefe und -geschwindigkeit die nötigen Grundlagen zur Ermittlung der Mauerhöhe und der statischen Bemessung.

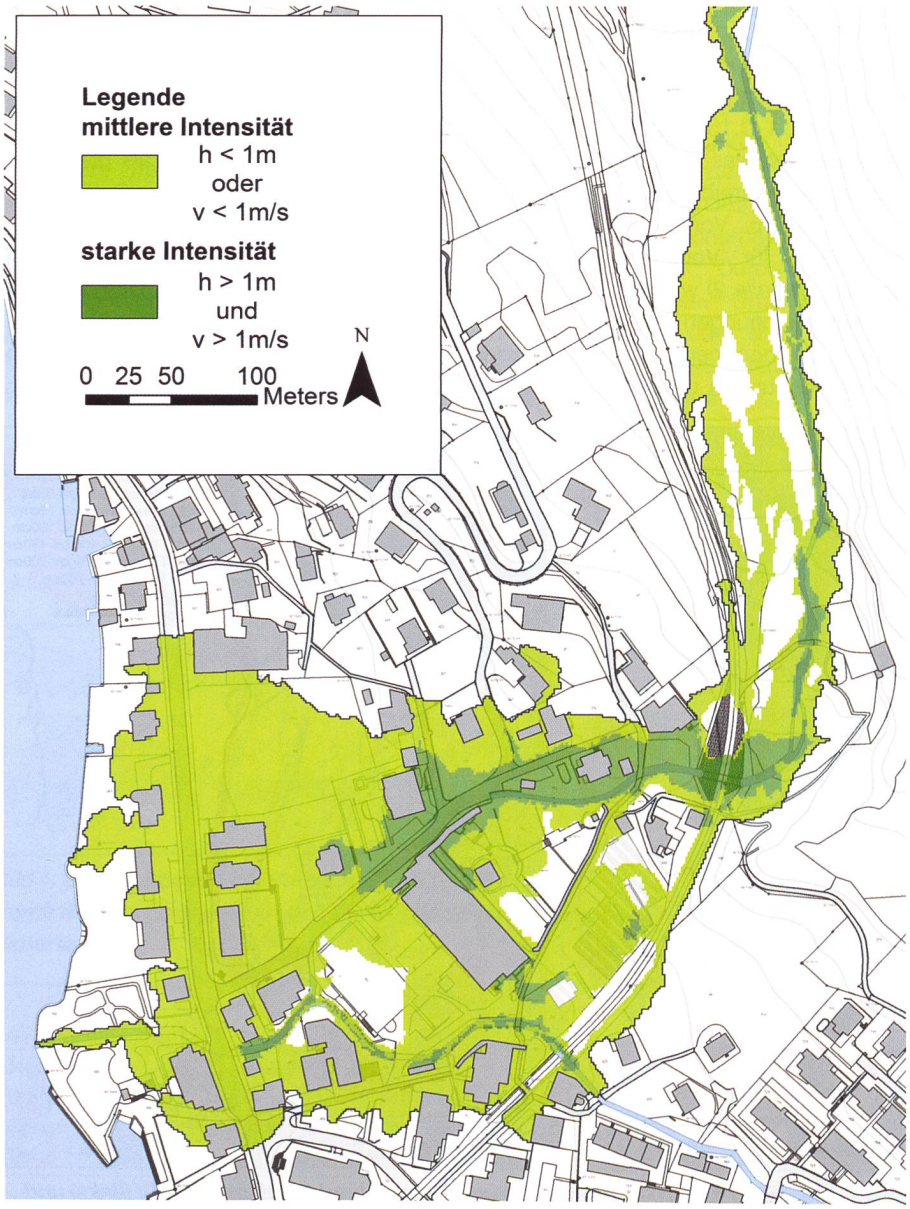

Bild 4. Intensitätskarte im IST-Zustand für 300-jährliche Ereignisse auf Basis der Berechnungen in RAMMS.

Im Gebiet des Plattenbachs wurde ein Bruchszenario für den Bahndamm der Rigibahn und für die geplante Sperre im Gebiet Brand untersucht. Das Sperrenbauwerk im Gebiet Brand fällt aufgrund seiner Stauhöhe unter die Stauanlagenverordnung (StAV). Als erste Abschätzung der Auswirkungen eines Bruchs wurde ein Bruchszenario gemäss StAV gerechnet. Im Basisdokument zu den Unterstellungskriterien der StAV werden folgende Annahmen getroffen (*BWG* 2002):

1) Die Sperre ist bis zum Stauziel gefüllt, für Geschiebesammler bedeutet dies bis zur Oberkante der Überlaufschwelle.
2) Das Versagen erfolgt instantan, bei Betonbauwerken wird ein Bruch der gesamten Mauer angenommen, bei dem ohne zeitliche Verzögerung die ganze Sperrenfläche freigegeben wird (Momentanbruch). Zur Umsetzung dieses Szenarios in RAMMS werden in einer ersten Simulation mit Sperre die Ablagerungshöhen und das Volumen hinter der Sperre ermittelt. Für die zweite Simulation wird vorgängig die Bresche gemäss den Vorgaben der StAV aus dem Damm ausgeschnitten, respektive bei Betonsperren das ganze Bauwerk entfernt. Mit der Startbedingung «Block release» hat RAMMS die Möglichkeit, eine Auslösehöhe vorzugeben. Das Material beschleunigt beim Start der Simulation aufgrund der vorgegebenen potenziellen Energie schlagartig Richtung Tal. Der Ablauf des Bruchs der Sperre Brand ist in *Bild 6* illustriert.

Die Abbildung der Interaktion mit

den Massnahmen im Überlastfall ist in RAMMS nur begrenzt möglich. Die Wirkung einer Sperre im überströmten Zustand kann nicht im Modell abgebildet werden, weil die Energiedissipation beim Anprall einer Mure an einem Bauwerk nicht berücksichtigt wird. Die Objektschutzmassnahmen können nur als nicht durchströmbare Zellen aus dem Modell ausgeschnitten werden. Ein Überströmen der Leitmauern ist damit im Modell nicht möglich. Flussbauliche Bauwerke können aufgrund fehlender innerer Randbedingungen nicht direkt im Modell umgesetzt werden. Durchlässe können nur entweder als offenes Gerinne oder vollständig verklaust abgebildet werden. Die zugrund liegenden Flachwassergleichungen würden ein Ausbreiten des Murganges simulieren, bis kein Gradient in der Fliesstiefe mehr besteht. Murgänge stoppen jedoch mit Verlandungswinkeln, die deutlich von der Horizontalen abweichen. In RAMMS wird die Ausbreitung gestoppt, wenn die aktuelle Impulssumme unter einen bestimmten Wert (5–10%) der maximalen Impulssumme fällt. Diese nicht physikalische Modellierung des Ablagerungsverhaltens kann zu oszillierenden Geschwindigkeiten und numerischer Diffusion an den Rändern der Ablagerungen führen. Dadurch kann der Ausbreitungsbereich überschätzt werden. Kritische Stellen sollten darum immer manuell auf numerische Diffusion geprüft werden. Im Zustand nach Bau der Sperre Brand werden nur noch durch die Rutschung Glinge Feststoffe in den Plattenbach eingetragen. Durch den deutlich geringeren Eintrag ändert sich die Hauptprozessart von Murgängen zu fluvialem Geschiebetransport. Die einphasige Modellierung in RAMMS kann die Interaktion mit dem Gewässer nicht abbilden. In diesem Fall erfolgte die Berechnung mit BASEMENT, einem 2D-hydrodynamischen Modell, in dem der Geschiebetransport über empirische Transportgleichungen berücksichtigt wird (www.basement.ethz.ch).

6. Diskussion

Nach der Kalibrierung der Reibungsparameter kann RAMMS den mutmasslichen Fliessweg und die Ablagerungen des Ereignisses 1910 plausibel wiedergeben. Die Sensitivitätsanalyse hat gezeigt, dass das Geländeraster aus den hochaufgelösten Lidar-Daten bei 1 × 1 m Auflösung die Fliesswege adequat abbildet. Die Intensitätskarten aus RAMMS zeigen Abweichungen zu den bestehenden Intensitätskarten, wobei die Unterschiede auf ein

Bild 5a. Fliesstiefen für ein Ereignis aus dem Gebiet Glinge. Die erste Variante der Objektschutzmassnahmen führt zu erhöhten Fliesstiefen am Gebäude in der Markierung.

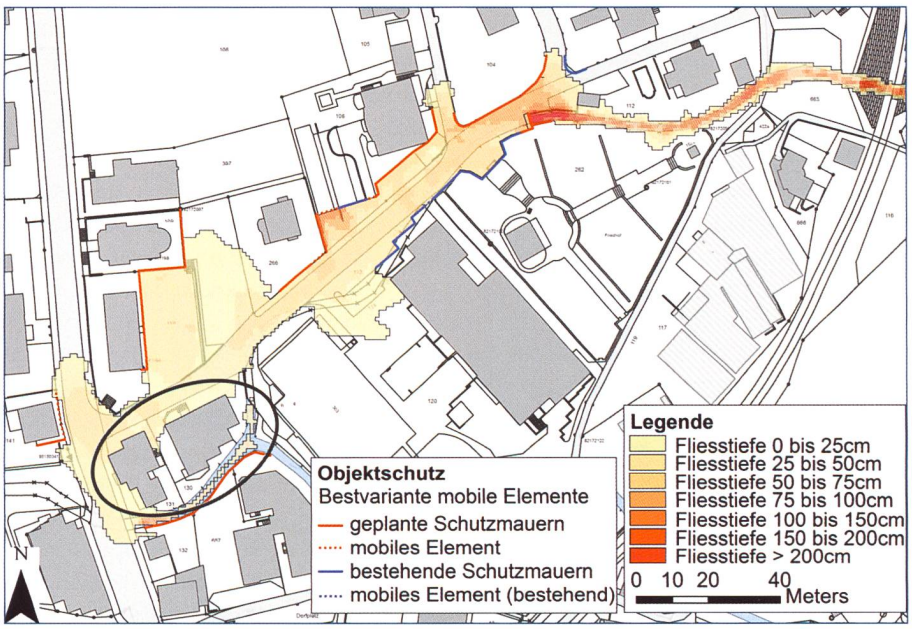

Bild 5b. Fliesstiefen für ein Ereignis aus dem Gebiet Glinge. Die optimierte Anordnung führt nicht zur Erhöhung der Fliesstiefen für andere Gebäude. Die Gebäude in der Markierung liegen leicht erhöht und nehmen keinen Schaden.

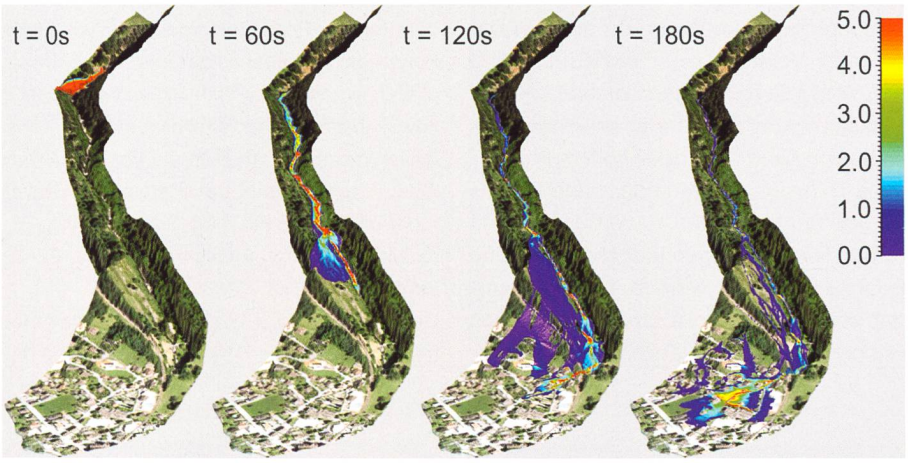

Bild 6. Fliesstiefe für den Momentanbruch der Sperre Brand bei Füllung bis Stauziel zu verschiedenen Zeitpunkten.

Artefakt im Geländemodell der amtlichen Vermessung zurückgeführt werden können. *Graf & McArdell* (2008) weisen darauf hin, dass die Wiedergabe der exakten Geometrie von Lenkmassnahmen im Modell meist nicht möglich ist. Die Verwendung von No-Flux-Zellen ermöglicht auch die Abbildung komplexer Geometrien im Modell. Bei Anwendungen im Siedlungsgebiet begrenzt die Grösse der Rasterzellen den Detailgrad der Lenkmauern. RAMMS erlaubt die Berechnung der Fliesstiefe und -geschwindigkeit an Bauwerken, die Resultate müssen jedoch immer auf numerische Artefakte überprüft werden. Die numerischen Simulationen bieten keinen Ersatz für die ingenieurstechnischen Ansätze zur Bemessung von Massnahmen, vielmehr sollen beide Methoden ergänzend eingesetzt werden.

7. Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass numerische Simulationen einen erheblichen Beitrag zur Projektierung von Massnahmen liefern können. Die Kenntnis der Restintensität nach der Umsetzung von Massnahmen erlaubt es, die Massnahmen auf die Schutzziele gemäss *BUWAL* (2005) auszulegen. Im vorliegenden Projekt wurde durch die Simulationen die maximale Kapazität des Gerinnes auf der Platte berechnet, wodurch auf Massnahmen zur Steigerung der Gerinnekapazität verzichtet werden konnte. Weiter hat sich gezeigt, dass das nötige Rückhaltevolumen der Sperre Brand deutlich grösser ist, als in der Konzeptstudie geplant. Die Simulation des Extremereignisses erlaut die Ausscheidung eines Überlastkorridors und die genauere Planung organisatorischer Massnahmen. Aus Sicht der Autoren wäre es wünschenswert, dass numerische 2D-Simulationen im Bereich des Murgang- und Wildbachverbaus ebenso Standard werden, wie sie es im klassischen Hochwasserschutz bereits heute sind. In der neusten Version von RAMMS::DEBRIS FLOW wurde unter anderem auch die Berücksichtigung von Kohäsion eingeführt. Kohäsion kann im Modell helfen, numerische Diffusion zu verhindern und so das Ablagerungsverhalten zu verbessern. Mit dieser Funktion liegen jedoch noch keine Erfahrungen vor, weitere Untersuchungen sollen diese Lücke schliessen. An den Rändern der No-Flux-Zellen treten numerische Effekte auf, die aktuell noch von Hand korrigiert werden müssen. Hier sind noch Arbeiten am Modell nötig.

Dank

Unser Dank gilt den Mitarbeitern *Jörn Heilig* und *Marcel Budry* der HOLINGER AG, welche die Masterarbeit von *Benjamin Hohermuth* (*Hohermuth* 2014) als Projektpartner mitbetreut haben. Wir danken *Marc Christen* (SLF) für die kritische Durchsicht und Korrektur des vorliegenden Artikels.

Literatur

BWG (2002) Bundesamt für Wasser und Geologie, Sicherheit der Stauanlagen, Basisdokument zu den Unterstellungskriterien, Berichte des BWG, Serie Wasser. Biel 2002.

BUWAL (1997) BWW, BRP. Empfehlungen. Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten.

BUWAL (2005) ARE, BWG. Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren.

Christen, M., Kowalski, J., Bartelt, P., (2010). RAMMS: Numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology, Vol. 63, 1-2, pp. 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 Envioronment – Numerical Simulation Tool «RAMMS» for Gravitation Natural Hazards, 12th Congress Interpraevent 2012.

Deubelbeiss, Y., Graf, C. (2013). Two different starting conditions in numerical debris flow models – Case study at Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland). In: Graf, C. (Red.) 2013: Mattertal – ein Tal in Bewegung. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft 29. Juni bis 1. Juli 2011, St. Niklaus. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 125–138.

Genolet, F. (2002). Modélisation de laves torrentielles: Contribution à la paramétrisation du modèle Voellmy-Perla. Postgraduate thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Schweiz

Graf C., McArdell B. (2008). Simulation of debris flow runout before and after construction of mitigation measures: an example from the Swiss Alps. Proceedings of the International Conference on DEBRIS FLOWS: Disasters, Risk, Forecast, Protection. Pyatigorsk, Russia, 22–29 September 2008, 233–236.

Graf, C., McArdell, B.W. (2011). Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In: Lambiel C.; Reynard E.; Scapozza, C. (eds) La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, 3–5 septembre 2009, Olivone. Géovisions no 36. Lausanne, Université de Lausanne Institut de Géographie. 245–258.

Graf, C., Deubelbeiss, Y., Bühler, Y., Meier, L., McArdell, B.W., Christen, M., Bartelt, P. (2013). Gefahrenkartierung Mattertal: Grundlagenbeschaffung und numerische Modellierung von Murgängen. In: Graf, C. (Red.) Mattertal – ein Tal in Bewegung. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft 29. Juni bis 1. Juli 2011, St. Niklaus. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 85–112.

Hohermuth, B., 2014. Intrgrales Schutzkonzept Plattenbach Vitznau. Murgangsimulationen mit RAMMS. Masterarbeit Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (Prof. Dr. *R. Boes, Ch. Graf* [WSL]).

Hutchinson, M.F., Xu, T., Stein, J.A. (2011). Recent Progress in the ANUDEM Elevation Gridding Procedure. Geomorphometry 2011, edited by T. Hengel, I.S. Evans, J.P. Wilson and M. Gould, pp. 19–22. Redlands, California, USA.

Integrales Schutzkonzept Vitznauer Bäche, Technischer Bericht. IG Bäche Vitznau (HOLINGER AG, NDR Consulting GmbH), Februar 2013.

Rickenmann, D. (1999). Empirical relationships for debris flows, Nat. Hazards 19 (1999): 47–77

Scheuner, T., Schwab, S., McArdell, B.W., (2011). Application of a two dimensional numerical model in risk and hazard assessment in Switzerland. Italian Journal of engineering geology and environment. 2011-03:993.1001

Integrales Schutzkonzept Plattenbach Vitznau, Technischer Bericht Vorprojekt. Hollinger AG/beffa tognacca gmbh/Keller+Lorenz AG, Mai 2011.

Walser, M., Huggel, C., McArdell, B.W., Graf, Ch. (2014). Gefahrenkartierung von Murgängen – Numerische Modellsimulationen im Vergleich zu empirischen, analytischen Methoden. «Wasser Energie Luft», 106. Jahrgang, 2014, Heft 3.

Anschrift der Verfasser:

Benjamin Hohermuth, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich, hohermuth@vaw.baug.ethz.ch

Christoph Graf, Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) Birmensdorf, christoph.graf@wsl.ch