

Prozesskaskaden

Naturgefahrenmanagement im Bahndienst



Eislawine in Tibet. Links: Die beiden 2,5 km langen Gletscher am 10. Januar 2016. Rechts: Der eine Gletscher kollabierte am 17. Juli, die Fläche des Lawinenkegels beträgt etwa 10 km². Fotos: Satellit Sentinel 2, ESA (Tages-Anzeiger vom 2.10.2016).

Inhalt

Prozesskaskaden und ihre Modellierung	3
Fels-/ Eislawinenkatastrophe in Nordostsetien, 2002	8
Sicherheit von Verkehrsträgern vor Naturgefahren am Beispiel der Rhätischen Bahn	11
Naturgefahrenalarm-Anlagen: ein neuartiger Ansatz in der Naturgefahrenstrategie der SBB	15
Renaissance strukturierter Netze in der hydraulischen Modellierung dank leistungsstarker Grafikkarten	20

Herausgeber / Editeur

FAN Fachleute Naturgefahren Schweiz

Offizielle Adresse / Adresse officielle

Nils Hählen, Abteilung Naturgefahren
Schloss 2
3800 Interlaken
Tel. 031 633 12 01, E-Mail: nils.haehlen@vol.be.ch

**Sekretariat, Administration, Kurswesen /
Secrétariat, administration, cours**

Ingenieure Bart AG, Rolf Bart,
Waisenhausstrasse 15, 9000 St. Gallen
Tel. 071 228 01 70
E-Mail: kontakt@fan-info.ch
Internet: <http://www.FAN-Info.ch>

**Redaktion FAN-Agenda /
Rédaction Agenda-FAN**

Jean-Jacques Thormann, HAFL, Zollikofen
Sonja Zraggen, Amt für Tiefbau, Kanton Uri
Alexandre Badoux, WSL, Birmensdorf
Martin Frei, MFrei Infra GmbH, Amriswil

**Meldungen, Beiträge und Anfragen FAN-Agenda an:
Informations, contributions et demandes à
l'adresse suivante:**

Jean-Jacques Thormann, Berner Fachhochschule
Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissen-
schaften HAFL, Fachgruppe Gebirgswald & Naturgefahren
Länggasse 85, 3052 Zollikofen
Tel. 031 910 21 47, Fax 031 910 22 99,
E-Mail: jean-jacques.thormann@bfh.ch

Zielsetzung der FAN

Die Tätigkeit der FAN steht im Dienste der Walderhaltung und dem Schutz vor Naturgefahren. Sie widmet sich insbesondere dem Thema Weiterbildung bezüglich Lawinen-, Erosions-, Wildbach-, Hangrutsch- und Steinschlaggefahren. Die ganzheitliche, interdisziplinäre Beurteilung und Erfassung von gefährlichen Prozessen sowie die Möglichkeiten raumplanerischer und baulicher Massnahmen stehen im Zentrum.

Mitgliedschaft bei der FAN

Die Mitglieder der FAN sind Fachleute, welche sich mit Naturgefahren gemäss Zielsetzung der Arbeitsgruppe befassen. Total umfasst die FAN über 400 Mitglieder aus der ganzen Schweiz. Mitgliedschaftsanträge sind an den Präsidenten oder Sekretär zu richten. Die Mitgliedschaft in der FAN kostet Fr. 100.– / Jahr und steht allen Fachleuten aus dem Bereich Naturgefahren offen. Bedingung ist zudem, dass jeweils innerhalb von drei Jahren einmal vom Kursangebot Gebrauch gemacht wird.

Objectif de la FAN

La FAN est au service de la conservation des forêts et de la protection contre les dangers naturels. Elle se consacre en particulier au thème du perfectionnement dans le domaine des dangers que représentent les avalanches, l'érosion, les torrents, les glissements de terrain et les chutes de pierres. Elle met aussi l'accent sur deux aspects importants: des évaluations et des relevés globaux et interdisciplinaires des processus dangereux, et les mesures possibles en matière d'aménagement du territoire et de génie forestier.

Adhésion à la FAN

Les membres de la FAN sont des spécialistes qui s'occupent de dangers naturels conformément aux objectifs du groupe de travail. La FAN comprend au total plus de 400 membres, répartis dans toute la Suisse. Les demandes d'adhésion doivent être adressées au président ou au secrétaire. L'adhésion à la FAN coûte fr. 100.– / an. Elle est ouverte à tous les spécialistes des dangers naturels. Une seule condition imposée est de fréquenter tous les trois ans au moins l'un des cours proposé.

Vorwort

Liebe Leserinnen, liebe Leser

Liebe Mitglieder der FAN

Nach einem gelungenen Herbstkurs zu Veränderungen im Periglazial und den daraus resultierenden Prozessketten freuen wir uns, dieses Thema auch in der aktuellen FAN-Agenda wieder aufzunehmen: Ein erster Artikel zu Prozesskaskaden und ihrer Modellierung zeigt die Bedeutung der Interaktion zwischen verschiedenen Prozessen auf und erläutert an einem Beispiel, wie man der Herausforderung bei der Beurteilung und Modellierung von verketteten Gefahrenprozessen begegnen kann. Ergänzend dazu veranschaulicht ein Beitrag über die Fels-/Eislawinenkatastrophe 2002 im Kaukasusgebirge solche Prozessverkettungen und deren möglichen Folgen. Naturgefahren machen auch vor Bahnbetrieben keinen Halt: Die Betroffenen müssen die Prozesse, deren Interaktionen sowie mögliche Auswirkungen stets im Auge behalten. Am Beispiel der Rhätischen Bahn wird aufgezeigt, wie Tourismus und Naturgefahren zusammenhängen und welche Herausforderungen damals und heute besonders relevant sind. Ebenfalls wird ein neuartiger Ansatz in der Naturgefahrenstrategie der SBB vorgestellt, welcher es erlaubt, nebst baulicher und organisatorischer Massnahmen Züge im Ereignisfall automatisch zu alarmieren. Am Ende der Agenda folgt schliesslich ein Beitrag über die hydraulische Modellierung, welche dank neuester Technik sehr hohe räumliche Auflösungen erlaubt.

Auch die FAN-Agenda wartet mit einer kleinen Neuerung auf: Am Anfang der einzelnen Beiträge finden Sie nun jeweils eine Zusammenfassung auf französisch.

Beim Lesen wünschen wir Ihnen viel Vergnügen!

Prozesskaskaden und ihre Modellierung

Holger Frey (Geographisches Institut, Universität Zürich, holger.frey@geo.uzh.ch)

Christian Huggel (Geographisches Institut, Universität Zürich)

Demian Schneider (Geographisches Institut, Universität Zürich / jetzt: Tiefbauamt Kanton Bern, Oberingenieurkreis IV, Burgdorf)

Yvonne Schaub (Geographisches Institut, Universität Zürich / jetzt: Prorektorat Medizin und Naturwissenschaften, Universität Zürich)

Javier García Hernández (Crealp, Zentrum für alpine Umweltforschung, Sion)

César Portocarreo (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña INAIGEM, Huaraz/Peru)

Contexte

En haute montagne, les dangers naturels ne sont souvent pas limités à un processus unique et isolé, mais sont plutôt constitués d'enchaînements de processus qui interagissent. De telles successions de processus représentent un défi particulier pour l'évaluation, la modélisation des dangers et notamment pour leur cartographie. A travers l'exemple d'un débordement d'un lac glaciaire dans les Andes péruviennes, cet article illustre un tel enchaînement de processus et aborde différents aspects de la modélisation et de la cartographie des dangers pour ce type de phénomènes. Ce travail a été réalisé dans le cadre du „Proyecto Glaciares“ financé par la DDC. Il a été publié par Schneider et al. en 2014.

Hintergrund

Naturgefahren im Hochgebirge lassen sich häufig nicht auf einen einzelnen, isolierten Prozess beschränken, sondern beinhalten viel mehr ganze Ketten von interagierenden Prozessen. Solche Prozesskaskaden stellen eine besondere Herausforderung an die Beurteilung und Modellierung der Gefahrenprozesse und nicht zuletzt auch an deren Kartierung. Am Beispiel eines Ausbruchs eines Gletschersees in den Peruanischen Anden wird in diesem Artikel eine solche Prozesskette erläutert und auf verschiedene Aspekte der Modellierung und Gefahrenkartierung solcher Phänomene eingegangen. Diese Arbeit wurde im Rahmen des von der DEZA finanzierten „Proyecto Glaciares“ durchgeführt und wurde von Schneider et al. (2014) publiziert.

Seeausbruch Laguna 513, 11. April 2010

Am Morgen des 11. April 2010 löste sich in der steilen SW Flanke des Mt. Hualcán in der Cordillera Blanca, Peru, eine Fels-Eislawine von einem geschätzten Volumen von 300'000 bis

400'000 m³ und stürzte in den See 513 direkt unterhalb des Gletschers (Abb. 1). Aufgrund von Temperaturdaten hochgelegener Meteorstationen in der Region und unter Berücksichtigung der polythermalen Hängegletscher sowie der Gratsituation kann im Anrissgebiet

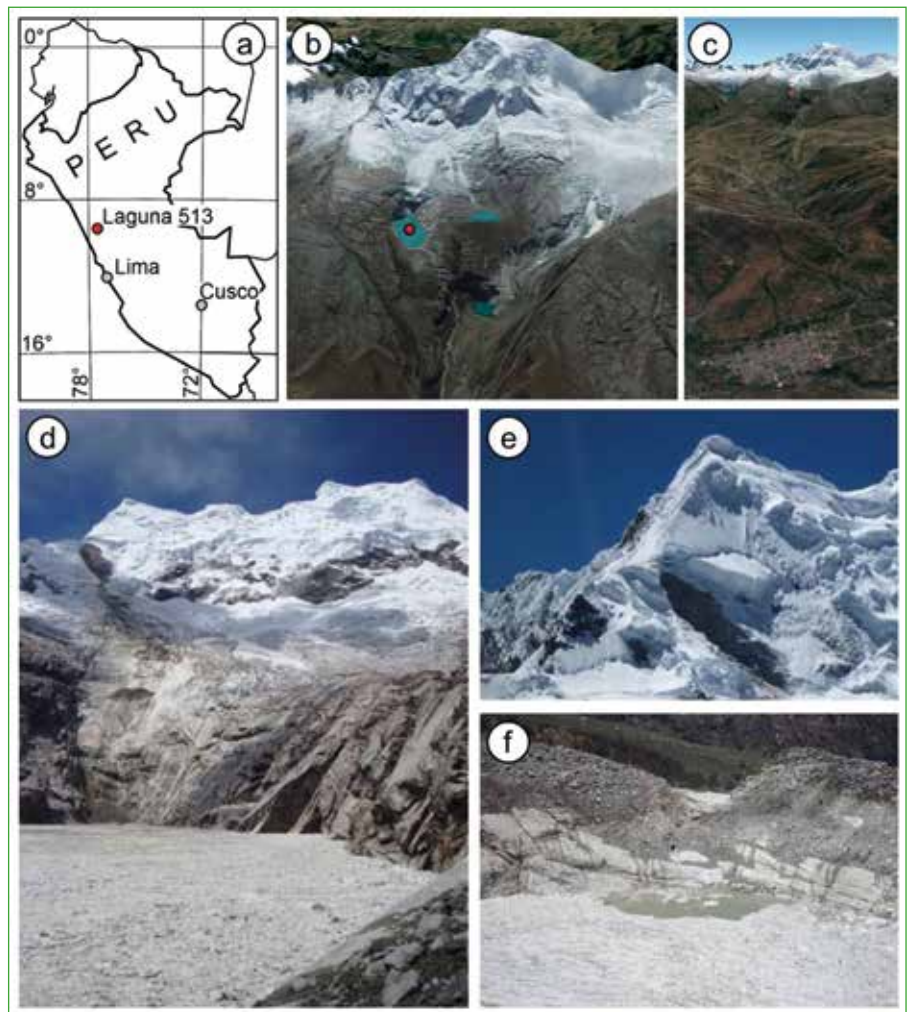


Abbildung 1: Seeausbruch Laguna 513, Peru, am 11. April 2010. (a) Übersichtskarte und Lage; (b) Schrägansicht Laguna 513 (roter Punkt) und Mt. Hualcán (GoogleEarth); (c) Schrägansicht Carhuaz (Vordergrund), Rio Chucchün, Laguna 513 (roter Punkt) (GoogleEarth); (d) Lawinenanriss und -transportspuren und schwimmende Eisblöcke am Tag nach dem Ereignis; (e) Anrisszone; (f) Felsdamm und Wellenspuren, Freibord > 20 m. Fotos d-f von C. Portocarrero, 12. April 2010.

von Untergrundtemperaturen um 0°C, sprich warmen Permafrostbedingungen, ausgegangen werden (Carey et al. 2012). Die durch die Lawine ausgelöste Flutwelle erreichte beim Felsdamm dieses Sees eine Höhe von über 25 - 30 m, überspülte diesen somit um 5-10 m und führte so zu einem Seeausbruch (Carey et al. 2012). Die Flutwelle erodierte auf dem Weg ins Tal viel Lockermaterial und verdoppelte so das Volumen der überschwappenden Welle von ca. 50'000 m³ auf ein Murgangvolumen von rund 100'000 m³ (Schneider et al. 2014). Nebst starker Seitenerosion entlang des Laufes des Rio Chucchún führte dieser Ausbruch in der Stadt Carhuaz und einigen kleineren Gemeinden zu diversen Schäden. Es wurden Brücken zerstört, Strassen und Wege beschädigt, Ackerland überflutet und übersart, die Wasser- und Energieversorgung unterbrochen und das Ereignis löste Panik und grosse Unsicherheit in der Bevölkerung aus.

Modellierung

Die Modellierung von Prozessketten, wie sie beispielsweise bei Ausbrüchen von Gletscherseen als Folge eines Lawinenaufschlags auftreten, stellt diverse Ansprüche an die Modelle, die zur Evaluierung der verschiedenen Prozesse verwendet werden. Einerseits müssen die involvierten Prozesse mit häufig sehr beschränkten Eingabedaten möglichst realistisch physikalisch basiert simuliert werden können; andererseits müssen die numerischen Modelle untereinander kompatibel sein, sprich die Resultate des einen Modells müssen den Anforderungen an die Eingabedaten des Folgemodells genügen.

Für den Fall des Ausbruchs der Laguna 513 wurde die Prozesskette in drei Schritten modelliert (Schneider et al. 2014): (i) die Fels-Eislawine mit RAMMS, (ii) die Wellenbildung und die Überspülung des Dammes mit IBER, und (iii) der eigentliche Seeausbruch mit sei-

nen sich ändernden Charakteristika wiederum mit RAMMS (Abb. 2). RAMMS ist ein physikalisch basiertes, dynamisches Modell, welches die 2D Flachwassergleichungen löst und die Fließcharakteristika mittels des Voellmy Ansatzes mit einem Parameter für die trockene Coulomb Reibung μ und einem turbulenten Reibungsparameter ξ simuliert. Aufgrund von Volumen, Dichte und Eintrittsgeschwindigkeit der RAMMS-Lawinenmodellierung wurde die Impulswelle im See mittels der Methode von Heller et al. (2008), auf empirischen Zusammenhängen basierend, berechnet. IBER ist ein hydrodynamisches Modell zur Simulation turbulenter instabiler Oberflächenströmungen.

Die mit IBER erarbeiteten Resultate wurden in einen Hydrographen der überschwappenden Welle umgewandelt, welcher wiederum als Startparameter für die folgende Flutmodellierung mit RAMMS diente (Schneider et al. 2014).

Die Ablagerungen im Gelände sowie kurz nach dem Ereignis aufgenommene, hochauflösende Satellitenbilder zeigen verschiedene Erosions- und Ablagerungsmuster, die auf sich ständig ändernde Fließcharakteristik (Rheologie) des Murgangs schliessen lassen (Abb. 3). Diesem Verhalten wurde Rechnung getragen, indem für die Modellierung des

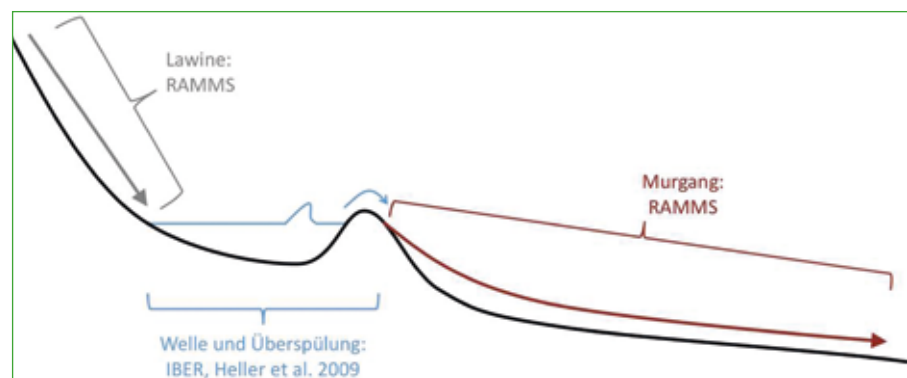


Abbildung 2: Kaskade der involvierten Prozesse und verwendete Modelle zur Modellierung



Abbildung 3: Erosions- und Ablagerungsmuster der verschiedenen Fließcharakteristika. (1) Erosion von Lockermaterial im Bereich des Dammes; (2) Übersarung bei Neigungsabnahme vor Flachstück; (3) Erosions- und Sedimentationsspuren in einem steileren Abschnitt oberhalb der Stadt Carhuaz. Quelle: Carey et al. 2012.

Seeausbruchs mit RAMMS, den beobachteten Spuren entsprechend, fünf verschiedene Fließabschnitte mit unterschiedlichen Reibungsparametern definiert wurden. Diese Parameter wurden aufgrund der geschätzten Korngrößenverteilung und des Wasseranteils bestimmt und anschliessend so kalibriert, dass die Ausdehnung des Murgangs in der Modellierung den beobachteten Erosions- und Ablagerungsspuren entspricht (Schneider et al. 2014). Die RAMMS Resultate der Lawinen- und Murgangmodellierung mit den verschiedenen Fließabschnitten und mit den unterschiedlichen Fließrheologien und ihren entsprechenden Reibungsparametern sind in Abb. 4 dargestellt.

Gefahrenkartierung

Zwecks einer Gefahrenkartierung für Ausbrüche der Laguna 513 wurden neben dieser Rekonstruktion des Ereignisses vom 11. April 2010 noch zwei weitere, grössere Szenarien mit dem gleichen Vorgehen modelliert (Abb. 4). Als Orientierung dienten die für die Schweiz erarbeiteten Richtlinien zur Gefahrenkartierung von Massenbewegungen mit drei verschiedenen Szenarien unterschiedlicher Dimensionen (klein, mittel, gross). Aufgrund der Seltenheit und oft auch Einmaligkeit von grossen Fels-Eislawinen wurde in diesem Fall allerdings bewusst auf die Angabe von Jährlichkeiten verzichtet. Da sich 1991 bereits ein Ereignis ähnlicher Grösse ereignet

hat, wurde die Fels-Eislawine von 2010 mit einem Volumen von 450'000 m³ als kleines Szenario festgelegt. Für das mittlere und das grosse Szenario wurden Lawinenvolumina von 1 Mio m³, bzw. 3 Mio m³ angenommen. Diese Werte stützen sich einerseits auf eine Analyse der geomorphologischen Eigenschaften und den beobachteten Veränderungen der vergletscherten SW Flanke des Mt. Hualcán ab (Schaub et al. 2015) und entsprechen andererseits auch vergleichbaren Situationen mit Abgängen grosser Lawinen in anderen Gebirgsregionen. Die RAMMS Resultate für die Lawinen und die Murgangmodellierung der drei Szenarien sind in Abb. 4 wiedergegeben. Tabelle 1 zeigt die Lawinenvolumina,

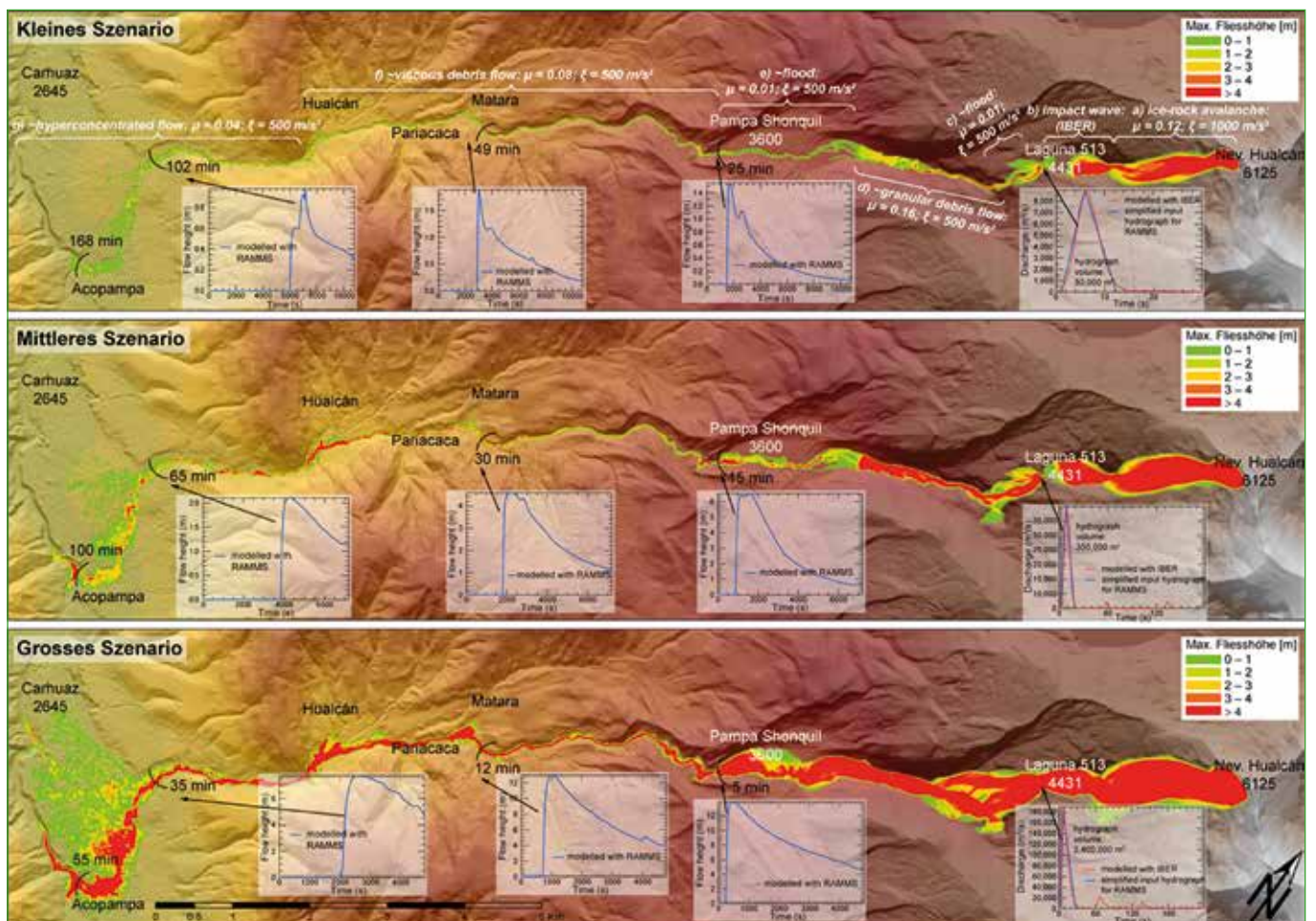


Abbildung 4: RAMMS Ergebnisse der Lawinen- und Murgangs-Fließhöhen der drei Szenarien (s. Tabelle 1). Im obersten Tableau (kleines Szenario) sind die verschiedenen Fließabschnitte mit den unterschiedlichen Reibungsparametern eingetragen, die für alle drei Szenarien verwendet wurden. Die drei Fließhöhen-Hydrographen beziehen sich auf Punkte in der Mitte des Gerinnes. Bei den Abflusshydrographen am Dammb sind sowohl die mit IBER berechneten Überschwapphydrographen (rot) wie auch die für die RAMMS Modellierung verwendeten Auslösehydrographen (blau) gezeigt. Abgeändert von Schneider et al., 2014.

Tabelle 1: Charakteristika der Massenbewegungen für die drei Szenarien. Das kleine Szenario entspricht der Rekonstruktion des Seeausbruchs vom April 2010.

Szenario	Volumen Fels-Eislawine (Input RAMMS)	Volumen Überschwappwelle (IBER Resultat)	Abflussspitze Überschwappwelle (IBER Resultat)	Murgangvolumen (= 2x Überschwappwelle) (Input RAMMS)
klein	45'000 m ³	50'000 m ³	9'000 m ³ s ⁻¹	100'000 m ³
mittel	1'000'000 m ³	350'000 m ³	40'000 m ³ s ⁻¹	700'000 m ³
gross	3'000'000 m ³	2'400'000 m ³	180'000 m ³ s ⁻¹	4'800'000 m ³



Abbildung 5: Bestimmung der Gefahrenpotentiale aufgrund der RAMMS Ergebnisse, die für jedes der drei Szenarien in eine Intensitätskarte umgewandelt werden. Diese drei Intensitätskarten wiederum werden, entsprechend der Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios, in Gefahrenniveaus übersetzt.

die Überschwappvolumina und Abflussspitzen beim Damms sowie die Grösse der resultierenden Murgänge. Für Letztere wurden ein Schuttanteil von 50% festgelegt, was wegen der nahezu unbeschränkten Verfügbarkeit von erodierbarem Lockermaterial im Gerinne und aufgrund von Analogien zu vergleichbaren Ereignissen realistisch erscheint.

Maximale Fliesshöhen und -geschwindigkeiten gemäss der RAMMS Modellierungen der drei Szenarien wurden verwendet, um die Intensitäten zu bestimmen (Abb. 5). Diese Intensitätskarten wurden dann in Gefahrenstufen übersetzt (Abb. 5). Die generalisierte, vorläufige Gefahrenkarte wurde aufgrund mehrerer Geländebegehungen bereinigt und angepasst, wobei insbesondere kleinräumige Strukturen wie zum Beispiel Brücken und andere Bauwerke berücksichtigt wurden, die im verwendeten digitalen Geländemodell (räumliche Auflösung von 8 m) nicht repräsentiert sind. Zudem wurden neben den drei Gefahrenstufen „gering“, „mittel“, „gross“ noch zwei weitere Gefahrenstufe, „sehr gross“ und „Restgefährdung“, ausgedehnt (Abb. 6),

um eine bessere Konsistenz mit der bestehenden, älteren Gefahrenkarte zu erreichen, aber auch um den peruanischen Richtlinien zu entsprechen und nicht zuletzt auch um die Kommunikation zu vereinfachen. Die Zone mit „sehr grosser“ Gefährdung entspricht dem Gerinne und dem 2010 stark überschwemmten Gebiet. „Restgefährdung“ wurde den Flächen auf dem Schuttfächer zugewiesen, die gemäss RAMMS Modellierungen von den

drei Szenarien nicht betroffen sind, wo eine Überschwemmung aber nicht abschliessend ausgeschlossen werden kann. Ebenso wurden die Farben der verschiedenen Zonen den nationalen Richtlinien angepasst. Schliesslich wurde diese definitive Gefahrenkarte von den zuständigen Behörden und der Gemeinde Carhuaz als neue offizielle Gefahrenkarte für Ausbrüche der Laguna 513 genehmigt und als rechtlich bindendes Dokument anerkannt.

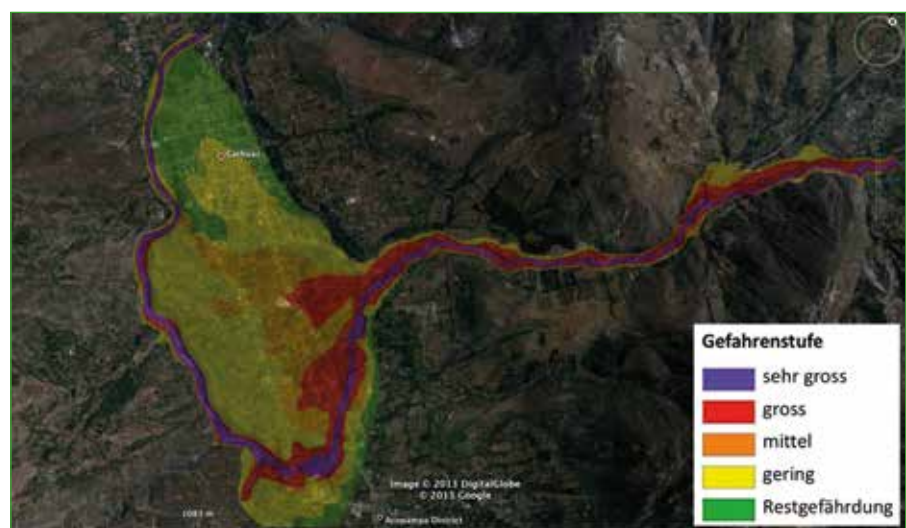


Abbildung 6: Ausschnitt aus der definitiven, im Gelände korrigierten und angepassten Gefahrenkarte für Seeausbrüche. Hintergrundbild GoogleEarth.

Diskussion und Fazit

Für die individuellen Prozesse, die bei Naturgefahren, insbesondere im Hochgebirge, oft in ganzen Prozessketten zusammenhängen, existiert eine Vielzahl von Modellen unterschiedlicher Komplexitäten und Eigenschaften. Entscheidend für die zuverlässige Modellierung von Prozesskaskaden ist die Verfügbarkeit der benötigten Eingabedaten sowie die Kompatibilität der Modelle untereinander. Im hier gezeigten Beispiel eines Gletscherseeausbruches wurden die physikalisch basierten Modelle RAMMS und IBER verwendet und durch empirische Methoden ergänzt. Mögliche Alternativen für die Modellierung von Gletscherseeausbrüchen mittels Kopplung mehrerer Modelle zeigen zum Beispiel Somos-Valenzuela et al. (2016). Es existieren aber auch Modellansätze, welche alle Komponenten dieser Prozesskaskaden in einem Modell simulieren (z.B. r.avaflow, siehe <http://www.avaflow.org>).

Numerische Modelle wie sie hier verwendet wurden, liefern hochaufgelöste, quantitative Resultate, die sich direkt in Intensitäten und schliesslich in Gefahrenstufen übersetzen lassen. Es ist jedoch wichtig festzuhalten, dass solche computerbasierten Modellierungen die detaillierte Arbeit im Gelände nicht ersetzen können, da Ungenauigkeiten der verwendeten digitalen Geländemodelle, Unsicherheiten in der Parameterwahl, modellinhärenten Vereinfachungen und numerische Instabilitäten etc. entscheidende Auswirkungen auf die Modellresultate haben können.

Die grösste Unsicherheitsquelle stellt jedoch oft die Definition der Szenarien dar. Gerade bei seltenen, häufig einmaligen Ereignissen wie Ausbrüche von moränengedämmten Seen, können keine Frequenz-Magnituden Beziehungen zur Wahrscheinlichkeitsbestimmung beigezogen werden, wie sie beispielsweise im Hochwasserschutz aufgrund vergleichs-

weise sehr guter Datengrundlagen verwendet werden. Zudem fehlt infolge der dynamischen Entwicklung und raschen Veränderungen der Umweltbedingungen im Hochgebirge oft eine historische Präzedenz. Für die Kalibrierung und Validierung der Modelle ist es sehr hilfreich, wenn ein dokumentiertes, vergangenes Ereignis beigezogen werden kann, wie das im Fall des Ausbruchs der Laguna 513 der Fall ist, wo die Wellenspuren und die Überschwemmungsgebiete zur Kalibrierung von IBER bzw. RAMMS verwendet werden konnten. Fehlt eine solche Referenz, wird die Parameterwahl für die Modelle erschwert und die Unsicherheiten erhöht (vgl. z.B. Somos-Valenzuela et al. 2016). Die Durchführung zahlreicher Modellläufe kann helfen, die Sensitivitäten der Modelle auf einzelne Parameter abzuschätzen, um so auch die zugehörigen Unsicherheiten quantifizieren zu können. Schaub et al. (2015) führten eine solche Analyse am Beispiel der Laguna 513 durch und konnten zeigen, dass die Unsicherheiten der Szenariendefinition die Unsicherheiten der Modellkoppelungen deutlich übertreffen. Hier können solche probabilistischen Modellierungen helfen, die Unsicherheiten der Szenariendefinition zu reduzieren. Allerdings ist in den meisten existierenden Richtlinien für Gefahrenkarten eine bestimmte Anzahl Szenarien mit definierten Eintretenswahrscheinlichkeiten bzw. Jährlichkeiten vorgeschrieben. Am Beispiel der Rekonstruktion des Ausbruchs der Laguna 513 vom April 2010 sowie der Modellierung möglicher Gefahrenszenarien kann das Potential der Kopplung numerischer Modelle zur Simulation von Prozessketten sehr gut demonstriert werden. Es zeigt aber gleichzeitig auch deren Limitierungen auf sowie die Notwendigkeit von Expertenwissen. Einerseits zur Bestimmung von Unsicherheiten und andererseits zur Erstellung einer Gefahrenkarte als wichtiges Endprodukt für die lokalen Behörden und die Bevölkerung.

Literatur

- Carey, M., Huggel, C., Bury, J., Portocarrero, C. & Haeblerli, W. 2012. An integrated socio-environmental framework for climate change adaptation and glacier hazard management: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change* 112 : 733–767. DOI: 10.1007/s10584-011-0249-8.
- Heller, V., Hager, W.H. & Minor, H.-E. 2008. Rutscherzeugte Impulswellen in Stauseen, VAW, ETH Zürich.
- Schaub, Y., Huggel, C. & Cochachin, A. 2015. Ice-avalanche scenario elaboration and uncertainty propagation in numerical simulation of rock-/ice-avalanche-induced impact waves at Mount Hualcán and Lake 513, Peru. *Landslides*. DOI: 10.1007/s10346-015-0658-2.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S. & García, J. 2014. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences* 35 : 145–155. DOI: 10.5194/adgeo-35-145-2014.
- Somos-Valenzuela, M.A., Chisolm, R.E., Rivas, D.S., Portocarrero, C. & McKinney, D.C. 2016. Modeling a glacial lake outburst flood process chain: the case of Lake Palcacocha and Huaraz, Peru. *Hydrology and Earth System Sciences* 20 : 2519–2543. DOI: 10.5194/hess-20-2519-2016.

Fels- / Eislawinenkatastrophe in Nordostsetien, 2002

Sonja Zraggen (Amt für Tiefbau Kanton Uri, Abteilung Wasserbau, sonja.zraggen@ur.ch)
 Christian Huggel (Universität Zürich, Geographisches Institut)
 Regula Frauenfelder (Norwegian Geotechnical Institute, Oslo)

Résumé

Un événement exceptionnel s'est produit dans les montagnes du Caucase (Russie) en septembre 2002. Une partie importante d'un glacier s'est mise à glisser pour former une immense avalanche rocheuse / de glace. Les masses de roche et de glace ont endigué l'entrée d'une gorge se situant 20 km plus bas dans la vallée, créant ainsi plusieurs lacs le long de rivières. À l'aval de la gorge, l'avalanche s'est poursuivie sous forme d'une coulée de boue sur une distance de 15 km. Plus de 100 personnes sont décédées et des bâtiments ainsi que des routes importantes ont été complètement détruits.

Zusammenfassung

Im September 2002 ereignete sich ein aussergewöhnliches Ereignis im Kaukasusgebirge (Russland). Ein Grossteil eines Gletschers rutschte ab und bildete in der Folge eine riesige Fels- / Eislawine. 20 km weiter talabwärts stauten sich die Fels- / Eismassen an einem Schluchteingang und dämmten darauf Flüsse zu mehreren Seen auf. Unter der Schlucht setzte sich die Lawine in Form einer Schlammlawine für weitere 15 km fort. Über 100 Menschen wurden getötet sowie Gebäude und wichtige Strassen vollständig zerstört.

Die Katastrophe kam in der Nacht: Im Süden Russlands hat sich ein Gletscher von einem Berggipfel gelöst und bis zu 100 Menschen unter sich begraben. SPIEGEL Online 21.09.2002

Am Abend des 20. September 2002 löste sich eine Fels- und Eismasse von ca. 10 Mio. m³ aus der von Hängegletschern bedeckten Nordostflanke des Dzhimarai-Khokh (4780 m ü.M.). Der Gipfel des Dzhimarai-Khokh liegt im Kasbekmassiv in der Russischen Republik Nordossetien (Nordkaukasus) an der Grenze zu Georgien (Abb. 1).

Durch den Aufprall der Masse auf den darunterliegenden Kolkagletscher wurde dieser grösstenteils mobilisiert. In der Folge bildete sich eine ausserordentlich grosse Fels- / Eislawine von etwa 100 Mio. m³, welche mit einer Geschwindigkeit von bis zu einigen 100 km/h

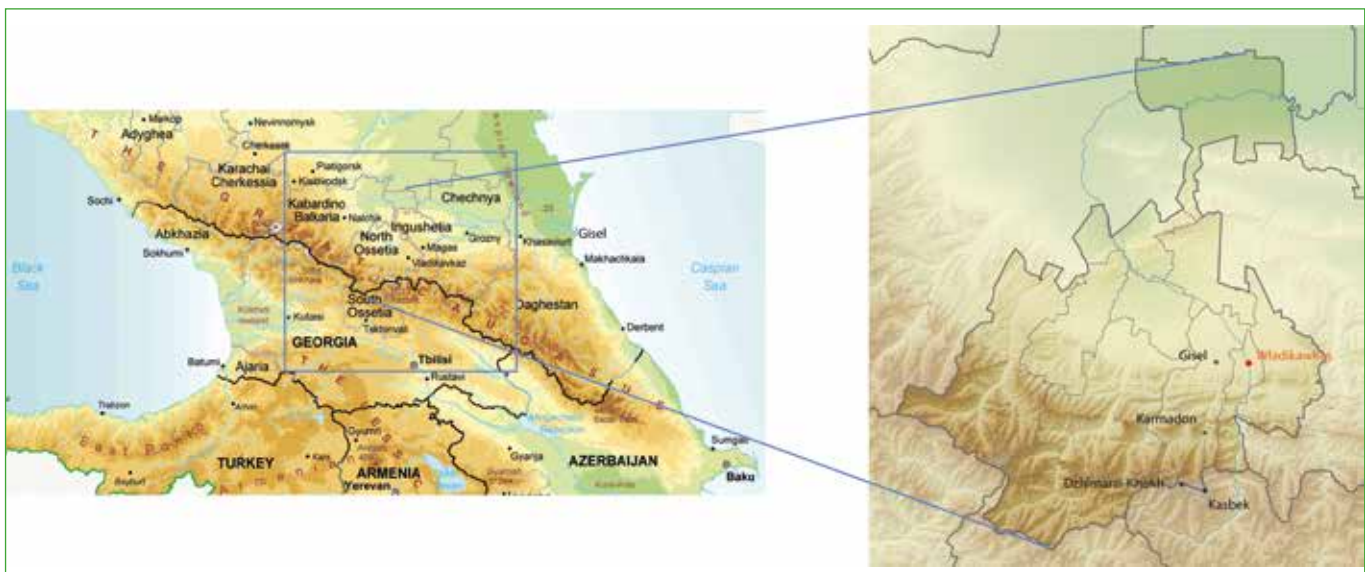


Abbildung 1: Geographische Lage von Nordossetien (Frankfurter Allgemein / Manana Kurtubadze, Wikimedia)

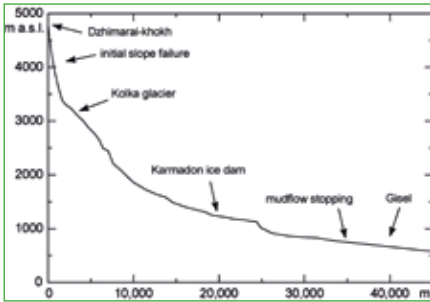


Abbildung 2: Längsprofil der Fels-/Eislawine bzw. der unterhalb des Rückstaus gebildeten Schlammlawine (Huggel et al., 2005)

das Tal herunter raste. Bei der ca. 20 km weiter talabwärts gelegenen Genaldon Schlucht bei Karmandon wurde der grösste Teil der Lawine zurück gestaut. Ein Teil der Masse setzte den Weg jedoch als Schlammlawine im Gerinnebett des Genaldon für weitere 15 km fort. Erst kurz vor der Siedlung Gisel im Haupttal kam die Schlammlawine zum Stillstand (Abb. 2). Das Volumen der Schlammlawine wurde auf 5 Mio. m³ geschätzt.

Durch den Rückstau im Hochtal von Karmadon bildete sich ein riesiger Eis-/Schuttdamm von ca. 100 Mio. m³, welcher wiederum den

Abfluss der Bäche hemmte und zur Bildung mehrerer Seen führte.

Das Ereignis hinterliess ein unvergleichliches Bild der Verwüstung. Der Karmadon Weiler Nischni mit mehr als 20 Häusern wurde von der meterhohen Lawine verschüttet. Über die Hälfte der 125 getöteten Menschen starben hier. Die anderen Todesopfer starben durch die Einwirkungen der Schlammlawine talabwärts. Zudem wurden wichtige Strassen und andere wichtige Infrastruktur vollständig zerstört. Der Sachschaden wurde auf 19 Mio. US\$ geschätzt.

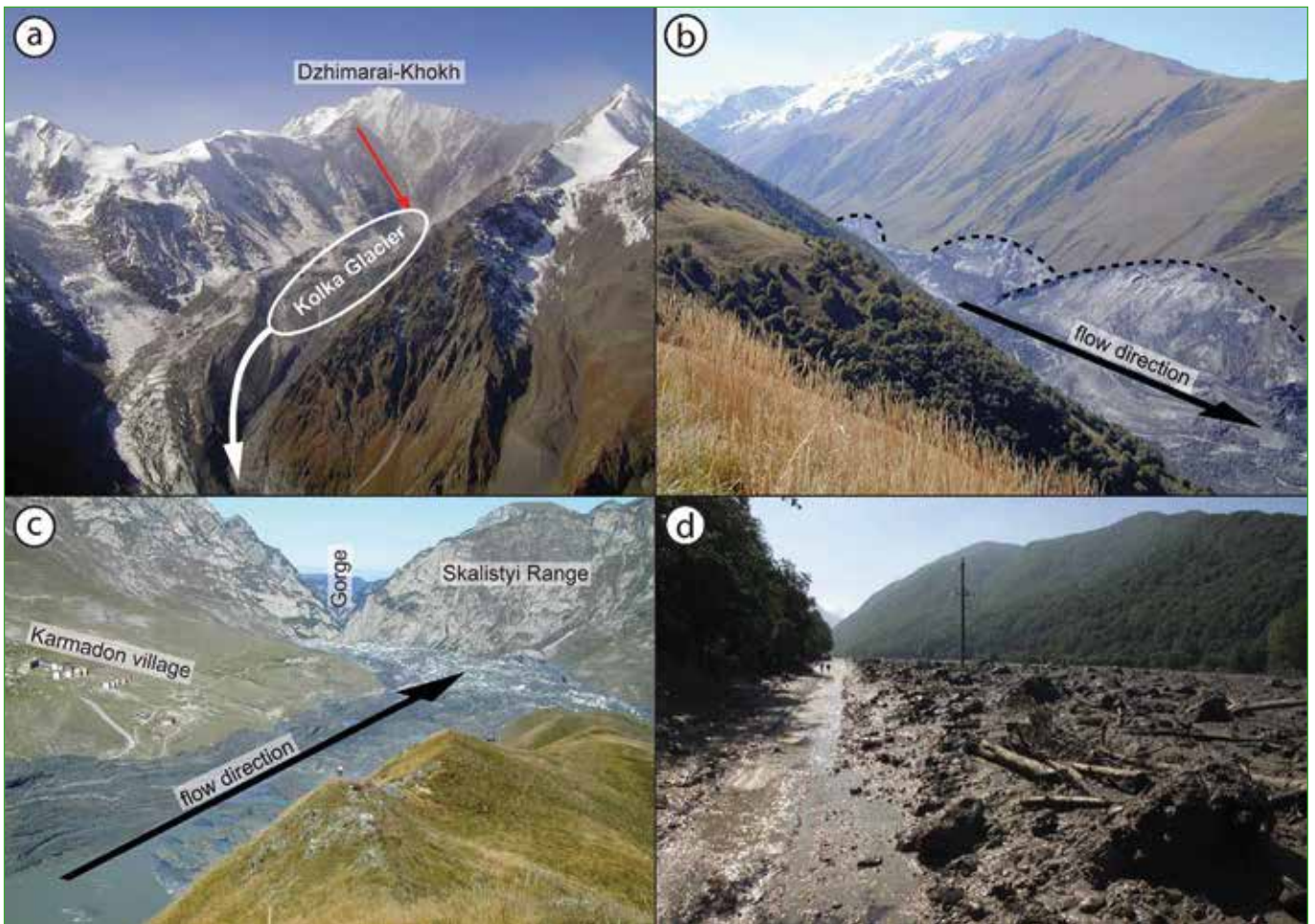


Abbildung 3: Verschiedene Abflusssektionen der Fels- / Eislawine bzw. Schlammlawine (Fotos: Igor Galushkin, 22. September 2002, Grafik: Demian Schneider):
 a) Anrissgebiet & Kolkagletscher
 b) Fliessweg der Fels- / Eislawine
 c) Hauptablagerungsgebiet (Karmadon Gebiet)
 d) Überreste der Schlammlawine entlang des Genaldon Flusses

Nach dem ersten Schock galt es abzuklären, ob weiterhin eine Gefahr für das Karmadon Gebiet bestand. Auf Grund der abgeschiedenen Lage und der Unzugänglichkeit erfolgte die Gefahrenbeurteilung im Anrissgebiet mittels Satellitenbilder und Helikopterflügen. Die NASA bietet ein Satellitenbilder-Angebot, speziell zur Bewältigung von Katastrophen, an. Dank der speditiven Zusammenarbeit mit der NASA konnten schnell gute lokale Bilder aus dem All aufgenommen werden. Die Analysen ergaben, dass keine weiteren Ereignisse aus den glazialen Gebieten zu erwarten waren. Wie sich zeigte, stellten die durch den Eis- / Schuttdamm aufgestauten Seen die grösste Gefahr dar. Bis Ende September 2002 wiesen die Seen ein Wasservolumen von insgesamt 5-10 Mio. m³ auf. Auf Grund der Ausbruchsgefahr der Seen bestand weiterhin eine akute Bedrohung für die talabwärts liegenden Siedlungen.

Für die Überwachung der vom Eisdamm gestauten Seen, die sich rasch vergrösserten, wurden neben Bodenmessungen Bilder des Satelliten ASTER eingesetzt. In Kombination mit topographischen Messungen konnten mit diesen Daten die Veränderungen der Seen und des Eisdamms analysiert und beurteilt werden. Zudem wurde ein automatisches Alarmsystem installiert, welche den Zufluss und den Abfluss des Damms überwachte.

Die Gründe, warum der Kolkagletscher durch den Aufprall der Fels- / Eislawine fast komplett

abgesichert wurde und so zu einem Ereignis von aussergewöhnlichem Ausmass führte, sind spekulativ. Die Spuren im Feld sowie Zeugenaussagen weisen auf einen sehr hohen Wasseranteil in der Lawine hin. Am Grund des Gletschers müssen grosse Mengen an Wasser vorhanden gewesen oder während des Ereignisses entstanden sein. Ausserdem ist der Kolkagletscher ein Surge Gletscher. Das heisst, er weist immer wieder Perioden mit erhöhten Fliessgeschwindigkeiten auf. Im Sommer 2002 wurden Anzeichen einer erhöhten Geschwindigkeit beobachtet. Zudem kommen im Kasbekmassiv warme Quellen vor. Der Name Karmadon bedeutet „warmes Wasser“. Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass der Gletscher durch die Überlast der Trigger-Lawine in Kombination mit dem Surge-Verhalten und dem vorhandenem Wasser abgesichert wurde und sich so in eine Lawine von solchem Ausmass entwickeln konnte.

Während der grösste Teil der Lawine durch die Genaldon Schlucht gestoppt wurde, bildeten weiter abströmendes Wasser und Sedimente eine Schlammlawine. Berichterstattungen sowie Anhaltspunkte im Feld weisen auf eine umgehende bzw. zeitgleiche Bildung der Schlammlawine und des Rückstaus der Hauptmasse hin. Es wurden Fliesshöhen von ca. 10 Metern festgestellt und die Abflussgeschwindigkeit wurde auf 5-10 m/s geschätzt. Die Ablagerungen bestanden aus Schlamm, Sand, Kies und Schwemmh Holz. Eisablagerungen wurden keine verzeichnet. Feldaufnahmen

legen zudem nahe, dass grosse im Flussbett vorhandene Sedimentmengen (Ablagerungen des Sommerhochwasser 2002) durch den Schlammstrom remobilisiert wurden. Interessanterweise wurde in Gisel während des Ereignisses keine erhöhten Abflüsse beobachtet.

Es war das dritte Mal binnen hundert Jahren, dass ein Teil des Kolkagletschers abbrach. Im Jahr 1902 hatte ein Gletscherabbruch das Dorf Genal ausgelöscht. Mehrere Dutzend Personen wurden damals getötet. In den 1960er Jahren wurde das Anwachsen des Gletschers von Wissenschaftlern beobachtet und die Behörden bauten Barrieren. Diese sorgten dafür, dass der Schaden beim zweiten Abbruch des Gletschers 1969 geringer ausfiel. In den 1970er Jahren wurden diese Beobachtungen allerdings wieder eingestellt.

Literatur

Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeberli, W., Kääh, A., Polkvoj, A., Galushkin, I. & Evans, S.G. 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Science* 5: 173-187.

Schneider, D. 2011. On Characteristics and Flow Dynamics of Large Rapid Mass Movements in Glacial Environments. *Schriftenreihe Physische Geographie: Glaziologie und Geomorphodynamik* 61.

Sicherheit von Verkehrsträgern vor Naturgefahren am Beispiel der Rhätischen Bahn

Ralph Rechsteiner (Rhätische Bahn, Chur, ralph.rechsteiner@rhb.ch)

Résumé

Depuis sa construction il y a plus de 125 ans, les chemins de fer rhétiques ont une vocation fortement touristique. Lors du choix du tracé l'intégration optimale dans le terrain était primordiale. Le grand défi d'un tracé de ligne ouvert dans un paysage montagneux réside dans son exposition aux dangers naturels bien plus prononcée qu'en plaine. Grâce à la prévoyance des ingénieurs de l'époque, les chemins de fer maîtrisent bien les dangers naturels et qu'ils ont été largement épargnés par de gros événements. Après le bon choix au niveau du tracé, des investissements conséquents ont été réalisés en continu au niveau de l'entretien de l'infrastructure. La gestion des dangers naturels revêt une importance particulière pour la direction et le conseil d'administration. Une manière d'agir proactive, prévoyante et respectant une approche basée sur les risques est exigée et promue.

Zusammenfassung

Seit ihrem Bau vor über 125 Jahren ist die Rhätische Bahn (RhB) sehr touristisch orientiert. Bei der Linienführung wurde zur Bahnbauteit darauf geachtet, dass sich das Trasse optimal in das Gelände einfügt. Die grosse Herausforderung der offenen Linienführung in einer Gebirgslandschaft ist, dass der Verkehrsträger den Naturgefahren stärker ausgesetzt ist als eine Bahn im Flachland. Der Weitsicht der damaligen Ingenieure ist es zu verdanken, dass die Bahn die Naturgefahren gut im Griff hat und vor grossen Ereignissen weitestgehend verschont geblieben ist. Nach

dem weitsichtigen Bau der Bahn wurde weiterhin viel Aufwand in den Unterhalt der Anlagen gesetzt. Das Naturgefahrenmanagement wird auf Stufe Geschäftsleitung und Verwaltungsrat sehr hoch eingestuft. Es wird ein proaktives, vorausschauendes Handeln gefordert und gefördert, welches sich auf risikobasierte Ansätze abstützt.

Weshalb Tourismus und Naturgefahren eng zusammenhängen

Seit ihrem Bau vor über 125 Jahren ist die Rhätische Bahn (RhB) sehr touristisch orientiert. Bei der Linienführung wurde zur Bahnbauteit darauf geachtet, dass sich das Trasse optimal in das Gelände einfügt, und dass möglichst wenig Tunnels erstellt werden müssen. Ausschlaggebend waren dabei nicht

primär die Kosten, sondern das Ziel, den Reisenden mit der offenen Linienführung einen optimalen Ausblick auf die landschaftlichen Schönheiten zu ermöglichen. Aufgrund dieses Konzeptes wurde beispielsweise beim Bau der Berninabahn die Variante mit einer Überquerung des Passes auf über 2250 m ü.M. einer langen Tunnelvariante vorgezogen (Abbildung 1). Gesamthaft befinden sich etwa 30% des Streckennetzes der RhB über 1500 m ü. M.

Die RhB lebt weiterhin von diesem touristischen Pioniergedanken und die Strecke zwischen Thusis und Tirano wurde sicherlich nicht zuletzt darum im Jahre 2008 in das Unesco Weltkulturerbe aufgenommen. Die grosse Herausforderung der offenen Linienführung in einer Gebirgslandschaft ist, dass



Abbildung 1: RhB Berninalinie bei Alp Grüm mit Palüglletscher (Foto RhB)



Abbildung 2: Bahndienst im Einsatz mit der Schneesleuder bei Ospizio Bernina (Foto RhB)

der Verkehrsträger den Naturgefahren stärker ausgesetzt ist als eine Bahn im Flachland. Der Weitsicht der damaligen Ingenieure ist es zu verdanken, dass die Bahn die Naturgefahren gut im Griff hat und vor grossen Ereignissen weitestgehend verschont geblieben ist. Es wurde darauf geachtet, den Schneeverwehungen bestmöglich auszuweichen und trotz teilweise deutlich höheren Kosten wurden Lawinen- und steinschlaggefährdete Stellen umfahren. Terrainanschnitte wurden möglichst vermieden um die Stabilität der Hänge nicht zu verringern (Abbildung 2). Das Trasse wurde dazu oftmals auf Auffüllung mit talseitigen Stützmauern erstellt. Lange Zeit hatte die RhB noch damit zu kämpfen, dass Raubbau an den Wäldern betrieben worden ist. Dies machte umfangreiche Aufforstungen kombiniert mit der Erstellung von Schutzverbauungen notwendig.

Naturgefahrenmanagement hat bei der RhB kein Mauerblümchendasein

Das Naturgefahrenmanagement hat die RhB wie oben erwähnt schon immer stark beschäftigt. Nach dem weitsichtigen Bau der Bahn wurde weiterhin viel Aufwand in den Unterhalt der Anlagen und beispielsweise in die Säuberung von Felspartien gesetzt. Dank dem grossen Bestand an Mitarbeitern in den Aussenbezirken konnten diese Arbeiten in Eigenregie ausgeführt werden. Ab den 1980er Jahren musste die Anzahl Mitarbeiter laufend reduziert werden. Dies hatte auch eine Verringerung des Unterhaltes der Anlagen zur Folge. Es wurde vermehrt reaktiv mit Naturgefahren umgegangen - Eingriffe erfolgten zunehmend aufgrund von Ereignissen. In den letzten 10 Jahren hat sich der Umgang mit Naturgefahren nochmals grundlegend verändert. Das Naturgefahrenmanagement wird auf Stufe Geschäftsleitung und Verwaltungsrat sehr hoch eingestuft. Es wird ein proaktives, vorausschauendes Handeln gefordert und gefördert,

welches sich auf risikobasierten Ansätzen abstützt. Die Risikobeurteilungen, Massnahmen zur Schliessung von Schutzlücken sowie Planung von Erneuerungen / Instandsetzungen erfolgen zentral von Chur aus.

Für operative Entscheide sind jedoch lokale Kenntnisse von Wetter und Gefahrensituationen zentral. Die Verantwortung für die Streckenoffenhaltung und auch für den operativen Unterhalt der Schutzbauten obliegt deshalb den insgesamt sechs Bahndienstregionen. Vorsorgliche Streckenschliessungen aufgrund von Naturgefahren werden - allenfalls nach Rücksprache - ebenfalls durch die Bahndienstregionen entschieden. Diese sind dezentral organisiert und verfügen über eigenes, lokales Personal, welches gut vernetzt ist. Dadurch besteht dort grosse Kompetenz und grosses Wissen, wo in kurzer Zeit Entscheide getroffen werden müssen.

Die Pfeiler des proaktiven Naturgefahrenmanagements

Der Ausbaustandard bei den Verbauungen - und somit der Schutz der RhB - ist bei der RhB aufgrund der kontinuierlichen Auseinandersetzung mit Naturereignissen bereits heute sehr hoch. Werden alle bestehenden Verbauungen wie Mauern, Schutznetze, Lawinenrechen usw. aneinandergereiht, kommt man auf dem 384 km langen Netz der RhB auf rund 58 Kilometer Schutzwerke, welche grösstenteils weit oberhalb der Gleise stehen und gar nicht sichtbar sind. Zusätzlich sind nochmals 42'000 m² Verbauungen vorhanden, welche sich nicht in Länge ausdrücken lassen (flächige Lawinenanrissverbauungen usw.). Zusätzlich zu den Schutzbauten wird die Strecke laufend überwacht (Streckenläufer, Inspektion von Felsflächen etc.) und sämtliche Bauwerke (z. B. Bachdurchlässe) sowie der Schutzwald werden unterhalten. Durch all diese Massnahmen kann die RhB einen grossen Schutz von Kunden und Mitarbeitern gewährleisten.



Abbildung 3: Offene Linienführung bei Brusio (Foto RhB)

Die RhB baut ihr proaktives Naturgefahrenmanagement auf den drei Pfeilern Ereigniskataster, Schutzbautenkataster und Risikohinweiskarte auf. Die Instrumente wurden alle in enger Zusammenarbeit mit dem kantonalen Amt für Wald und Naturgefahren entwickelt.

Seit 2007 beteiligt sich die RhB am kantonalen Ereigniskataster. Es wurden alle bekannten Ereignisse seit dem Bahnbau rückwirkend aufgearbeitet und in den Ereigniskataster integriert. Mittlerweile sind von der RhB ca. 1'000 Ereignisse erfasst.

Ende 2011 wurde zudem der Schutzbautenkataster der RhB fertiggestellt. In knapp zweijähriger Arbeit wurden alle Schutzbauten im Eigentum der RhB nach Standort, Grösse, Art, Zustand etc. erfasst und im geografischen Informationssystem (GIS) hinterlegt.

Den dritten Pfeiler im Naturgefahrenmanagement bildet die Risikohinweiskarte, welche in den Jahren 2012/2013 erstellt wurde (Abbildung 4). Diese Karte teilt das Streckennetz der RhB in unterschiedliche Risikoklassen ein.

Zusätzlich wurden die Gebiete definiert, in welchen während der nächsten fünf bis zehn Jahren Schutzlücken zu schliessen sind, sogenannte Hotspots.

Wichtig im langfristigen Risikomanagement der RhB sind aber auch die Pflege des Schutzwaldes sowie der vorausschauende Unterhalt

der bestehenden Schutzbauten. Die Schutzbauten werden nach dem Handbuch KufI des AWN kontrolliert und unterhalten. Dabei wird die RhB durch verschiedene Forstdienste im Kanton unterstützt.

Kurzfristige Handlungsfähigkeit bleibt wichtig

Trotz allem proaktiven Handeln lässt es sich nicht vermeiden, dass kurzfristige Massnahmen insbesondere bei speziellen Wetterkonstellationen oder bei sich abzeichnenden Naturereignissen notwendig werden. Bei Lawinengefahr entscheiden dezentral organisierte RhB-Lawinenkommissionen über die zu treffenden Massnahmen, wie beispielsweise Streckensperrungen. Diese Kommissionen befinden sich derzeit im Aufbau. Bei allen Gefahrensituationen gilt, dass jede Mitarbeiterin und jeder Mitarbeiter der RhB die Anordnung für eine Streckenschliessung veranlassen kann, wenn entsprechende Gegebenheiten vorhanden sind.



Abbildung 4: Die RhB in der gebirgigen Landschaft der Ruinaulta (Foto RhB)

Im Falle eines erhöhten Risikos von Naturereignissen trifft die Rhätische Bahn verschiedene Vorkehrungen:

- Der Pikettdienst wird aufgestockt (Lawinen, Winterdienst)
- Die Streckenwärter, welche das Trasse kontrollieren, werden vermehrt und gezielter eingesetzt
- Bei akuter Gefährdung werden Bahnwagen während der Betriebszeit aufgestellt
- Kontrollfahrten werden durchgeführt
- Die Zugsgeschwindigkeit wird allenfalls reduziert
- Strecken können gesperrt werden
- Überwachungsstellen werden aufgestellt
- Der Kontakt zu den verschiedenen Kommissionen wird aktiviert
- Es wird in Krisenstäben mitgewirkt

Die wichtigsten Massnahmen nebst dem

Schutz des Verkehrsträgers liegen in der bestmöglichen Organisation der Hilfskräfte für den Ereignisfall. Die RhB hat einen eigenen Krisenstab und ist bei grossen oder überregionalen Ereignissen auch im kantonalen Krisenstab vertreten. Das Zusammenspiel der Betreiber der Verkehrsträger (RhB, kantonales Tiefbauamt) untereinander und mit den verschiedenen Blaulichtorganisationen und den eingesetzten Gremien / Stäben ist von zentraler Bedeutung und wird laufend geübt.

Herausforderungen, welche uns beschäftigen

Die Rhätische Bahn ist heute im Naturgefahrenmanagement gut aufgestellt. Die Instrumente für langfristiges, vorausschauendes und für kurzfristiges Handeln haben sich bewährt und sind etabliert. Die grosse Herausforderung für die Zukunft wird vor allem

die Instandhaltung und –setzung der bestehenden Schutzverbauungen sein. Bei jedem Verbaungsgebiet wird sich die Frage stellen, ob es noch notwendig ist, 1:1 Instand gestellt oder durch ein neues Konzept mit modernen Verbauungen ersetzt werden soll. Bei der grossen Anzahl bestehender Schutzverbauungen wird der finanzielle Bedarf gross sein.

Trotz aller Vorkehrungen werden sich Naturereignisse mit Unfällen in einer Gebirgslandschaft auch in Zukunft nicht vermeiden lassen. Dank der Kombination von proaktiver Planung und der dezentralen Organisation mit effizienter Eingriffsmöglichkeit bei kurzfristiger Handlungsnotwendigkeit verfügt die RhB jedoch über ein umfassendes Naturgefahrenmanagement, welches die Sicherheit der Reisenden und der eigenen Mitarbeiter mit höchster Priorität behandelt.

Naturgefahrenalarm-Anlagen: ein neuartiger Ansatz in der Naturgefahrenstrategie der SBB

Raphael Worni (SBB, Natur und Naturrisiken, Bern / jetzt: GEOTEST AG, Zollikofen, raphael.worni@geotest.ch)

Résumé

En plus de mesures constructives et organisationnelles, les CFF mettent en œuvre des systèmes de détection des dangers naturels (NGA) informant automatiquement les trains en cas d'événement. L'utilisation de ces systèmes permet une réduction significative d'accidents liés à des collisions avec des déraillements. Les capteurs des installations d'alarme sont installés dans les filets de protection et y détectent des accélérations, des déplacements et l'actionnement des freins à câble (figure 1). Par le biais d'une station de référence, les données récoltées sont envoyées au service d'exploitation des CFF, où est générée une alarme et opérée l'intervention au niveau du trafic ferroviaire. Les systèmes de détection NGA ont été mis en service au niveau de la stratégie intégrale des dangers naturels afin de (i) couvrir des événements de surcharge au niveau des filets de protection, (ii) pour sécuriser des sites dangereux difficilement protégeables par d'autres mesures et (iii) comme moyen financièrement efficace pour réduire les risques pour les personnes. L'utilisation d'une technologie des capteurs complexe et de radiocommunication couplée au système d'alarme d'exploitation est unique, et par ce biais les CFF jouent un rôle de précurseur en la matière.

Zusammenfassung

Zum Schutz vor gravitativen Naturgefahren setzt die SBB neben baulichen und organisatorischen Massnahmen auch Naturgefahrenalarm-Anlagen (NGA-Anlagen) ein, die im

Ereignisfall die Züge automatisch alarmieren. Durch den Einsatz von NGA-Anlagen können Anprallunfälle mit Zugsentgleisungen signifikant reduziert werden. Die Sensoren einer NGA-Anlage werden in Schutznetzen installiert und detektieren dort Beschleunigungen, Lageänderungen und das Laufen von Seilbremsen (Abbildung 1). Via Basisstation werden diese Daten an den Betrieb der SBB gesendet, wo daraus ein Alarm generiert wird und die Intervention auf den Zugverkehr vorgenommen wird. NGA-Anlagen werden im Rahmen der integralen Naturgefahrenstrategie der SBB eingesetzt, (i) um seltene und grosse Überlastereignisse von Schutznetzen abzudecken, (ii) um kaum verbaubare Gefahrenstellen zu sichern und (iii) als kostenwirksames Mittel um die Personenrisiken zu senken. Der Einsatz von

komplexer Sensorik und Funktechnologie mit Anbindung an das betriebliche Alarmierungssystem ist einzigartig, und die SBB nimmt damit eine Vorreiterrolle ein.

Einleitung

Gravitative Naturgefahren bedrohen seit jeher die Bahninfrastruktur und den Zugverkehr der SBB (und anderer Bahnunternehmen) und zahlreiche Naturgefahrenereignisse haben in der Vergangenheit zu beträchtlichen Schäden und zu Streckenunterbrüchen geführt (Müller und Worni, 2016). Die Auswertung von Naturgefahrenereignissen hat gezeigt, dass vor allem bei Zugsentgleisungen Personen zu Schaden kommen. Verschüttete Gleise stellen ein hohes Risiko für Anprallunfälle und Zugsentgleisungen dar und waren in der Vergan-



Abbildung 1: Sensor einer NGA-Anlage, welcher Einschläge in der Steinschlagschutzanlage detektiert und die aufgezeichneten Daten per Funk an eine Basisstation weiterleitet.



Abbildung 2: Zugsentgleisungen durch Anprall – gestern und heute. Oben: Zugsentgleisung bei der SBB durch Anprall mit Murgangablagerungen an der Rigi Nordlehne im Jahr 1934. Unten: Zugsentgleisung bei einem Regionalzug der Deutschen Bahn nach dem Anprall mit einer Rutschmasse in Rheinland-Pfalz im Juni 2016 (Spiegel Online, 2016).

genheit immer wieder Ursache für Zugsunfälle (SBB, 2014; 2015; siehe auch Beispiele in Abbildung 2).

Das primäre Schutzziel der SBB bezüglich Naturgefahren besteht im Wesentlichen darin, das individuelle Todesfallrisiko $< 10^{-5}$ zu halten, und den Zugverkehr vor Ereignissen mit einer Wiederkehrdauer von mindestens 100 Jahren zu schützen. Um dies zu erreichen, erstellt die SBB eine Vielzahl von verschiedenen Schutzbauwerken, überwacht regelmässig kritische Naturgefahrenzonen und setzt organisatorische Massnahmen ein, wie beispielsweise die automatische Alarmierung vor Naturgefahren. Die situativ angepassten Massnahmenkonzepte sind Teil der risikobasierten Naturgefahrenstrategie der SBB, mit dem Ziel effektive und kostenwirksame Schutzmassnahmen zu realisieren.

Um die zur Verfügung stehenden Mittel zum Schutz vor Naturgefahren optimal einzusetzen, sind möglichst genaue Kenntnisse über die netzweiten Risiken nötig. Aus diesem Grund hat die SBB die individuellen und kollektiven

Personenrisiken auf dem ganzen SBB-Streckennetz berechnet und graphisch dargestellt (Abbildung 3). Dazu wurde das Schadenpotential der SBB (im Wesentlichen Zugfrequenz- und Personenbelegungsdaten) mit dem Gefahrenpotential für die Prozesse Sturz, Rutschung, Lawine und Hochwasser/Murgang verschnitten. Das Gefahrenpotential umfasst über weite Teile validierte Gefahrenhinweiskarten und wurde wo vorhanden mit detaillierten Naturgefahrenstudien und Risikoanalysen ergänzt. Diese Darstellung der Risiken erlaubt es, eine auf jeden Streckentyp optimierte Naturgefahrenstrategie anzuwenden. Dabei hat sich als Ergänzung zu klassischen baulichen Massnahmen der Ansatz der automatischen Naturgefahren-Alarmierung etabliert. Naturgefahrenalarm-Anlagen (NGA-Anlagen) haben sich im Schutz vor Massenbewegungen als kostenwirksames Mittel erwiesen, da sie sehr wirksam Anprallunfälle zu verhindern vermögen und damit das Todesfallrisiko signifikant reduzieren.

Naturgefahrenalarm-Anlagen

NGA-Anlagen detektieren Massenbewegungen, welche auf Schutznetze und Schutzzäune einwirken und lösen je nach Schwere des Ereignisses (= Impakt im Netz) einen Alarm aus. Nebst NGA-Anlagen setzt die SBB eine Vielzahl weiterer Überwachungs- und Alarmierungstechnologien ein (Radar, Telejointmeter, Regenmessung, Reissleinen, etc.). Im Unterschied zu den NGA-Anlagen lösen die meisten dieser Systeme jedoch keine direkte Intervention auf den Zugverkehr aus. NGA-Anlagen werden im Rahmen der Zugkontrollenrichtungen (ZKE) betrieben und sind sicherheitsrelevante Systeme. Dabei wird eine Zuverlässigkeit (= Erkennen der spezifizierten Ereignisse) von über 99% gefordert und die tolerierte Fehlerquote (= Meldung von Ereignissen die nicht stattgefunden haben) muss unter 1% liegen. Diese Vorgaben setzen entsprechend hohe Anforderungen an die Entwicklung, den Betrieb und den Unterhalt der Anlagen voraus.

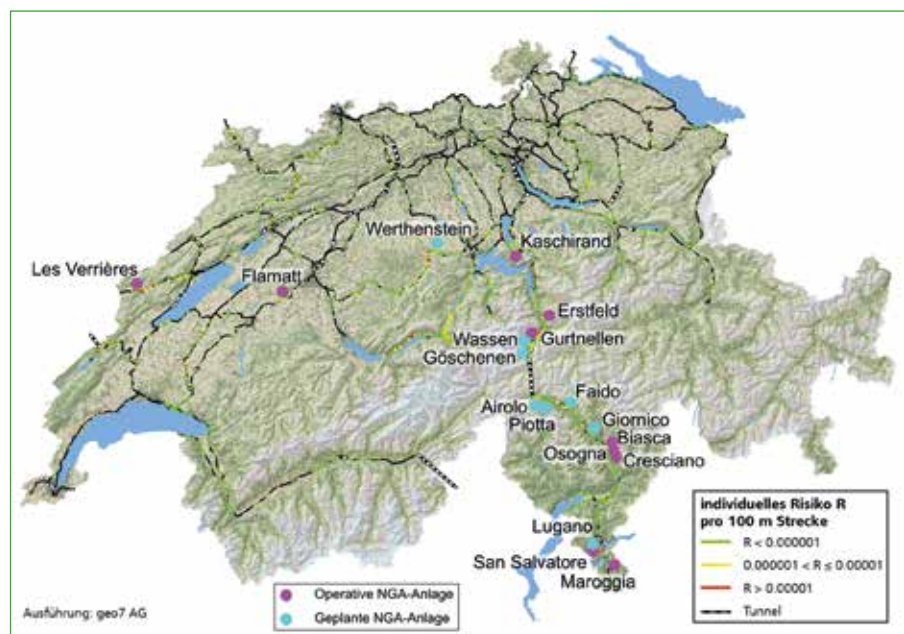


Abbildung 3: Risikoubersicht über das SBB Schienennetz inkl. Berücksichtigung von Schutzmassnahmen, Stand 2015. Hier sind die individuellen jährlichen Personenrisiken normiert auf 100 m dargestellt (die gleiche Darstellung existiert für die kollektiven Personenrisiken). Das individuelle Todesfallrisiko wird als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt auf einem Streckenabschnitt pro Jahr tödlich zu verunfallen (Bründl, 2009). Zusätzlich sind die Standorte mit den operativen und den zu realisierenden NGA-Anlagen eingezeichnet.

Funktionsweise einer NGA-Anlage

Eine NGA-Anlage besteht im Wesentlichen aus den Sensoren und einer Basisstation. Die Sensoren werden auf ein Trägersystem montiert – welches in der Regel ein Schutznetz (vorwiegend gegen Sturz, aber auch gegen Murgang, Hangmuren, Lawinen) oder ein Schutzzaun ist. Werden die Netze durch ein Naturgefahrenereignis beansprucht, wird das von den Sensoren erkannt und aufgezeichnet. Die Sensoren können dabei Erschütterungen und Lageänderungen sowie das Laufen von Seilbremsen oder das Ausbauchen von Schutznetzen detektieren. Die Erschütterung und Lageänderung wird mittels Beschleunigungssensoren gemessen; das Laufen von Seilbremsen oder das Ausbauchen von Netzen wird mittels eines Auszugmechanismus erkannt. Bei Letzterem wird ein Stahlkabel vom Sensor hinter die Seilbremse oder quer durch ein Netzfeld gespannt. Durch das Laufen der Seilbremsen oder durch die Netzausbauchung entsteht Zug auf das Kabel und beim Sensor wird ab einer Kraft von 500 N ein Stift ausgezogen und daraus ein Auszugsalarm generiert. Die Beschleunigungs-, Lageänderungs- und Auszugsdaten werden per Funk an die Basisstation geschickt und von dort per LAN und SMS an den SBB-Betrieb weitergeleitet. Dort werden die Daten zu einem Alarm verarbeitet und die nötige Intervention auf den Zugverkehr wird ausgeführt (Abbildung 4).

Je nachdem wie viele Sensoren in einem Netz Beschleunigungen, Lageänderungen und Seilauszüge melden, wird ein Trendalarm, Alarm leicht oder Alarm schwer ausgelöst (in Zukunft werden bezüglich Lage und Beschleunigung quantifizierte Daten übermittelt; heute sind es nur „Beschleunigung-ja-nein-Meldungen“). Bei einem Trendalarm wird das Netz nur gering beansprucht und es erfolgt keine Beeinflussung auf den Zugverkehr. Der Betrieb bietet aber einen Naturgefahren-

verantwortlichen auf, um die Situation vor Ort zu begutachten. Sich ankündigende grössere Ereignisse sollen so erkannt werden. Beim Alarm schwer geht man von einem Überlastfall mit einer Gleisverschüttung aus, und die betroffenen Gleisabschnitte werden von der Betriebszentrale sofort gesperrt und zufahrende Züge gestoppt. Bei einem Alarm leicht wird das Netz erheblich beansprucht und dem ersten in den Gefahrenbereich einfahrenden Zug schreibt der Betrieb Fahrt-auf-Sicht-Geschwindigkeit vor. Eine Verschüttung der Gleise ist zwar unwahrscheinlich, kann aber nicht ganz ausgeschlossen werden. Meldet der Lokführer bei Fahrt auf Sicht die Strecke frei, kann der Bahnbetrieb wieder normal aufgenommen werden, ansonsten wird gemäss Alarm schwer verfahren.

Einsatzbereich für NGA-Anlagen

Heute sind auf dem SBB-Schienennetz zehn NGA-Anlagen in operativem Betrieb und in

den nächsten zwei Jahren werden weitere acht Anlagen dazukommen (siehe Abbildung 3). Die meisten Anlagen befinden sich auf der Gotthardbergstrecke und deren Zubringerstrecken, da dieser Linie bezüglich Massenbewegung die grösste Bedeutung im SBB-Netz zukommt.

Nach der Eröffnung des Gotthardbasistunnels werden auf der Bergstrecke die Passagierzahlen sinken und somit auch die kollektiven Risiken abnehmen. NGA-Anlagen stellen in diesem Kontext eine geeignete und kosteneffiziente Schutzmassnahme dar. Das individuelle Todesfallrisiko $< 10^{-5}$ kann eingehalten werden, und durch den Einsatz von Niedrigenergienetzen werden die Kosten tief gehalten (einzig die Wirkungshöhe muss auf das zu erwartende Ereignis dimensioniert werden, da bei einem Überspringen der Schutznetze auch die Alarmanlage nicht anspricht).

Auch auf Top- und Hauptstrecken wie den Zu-

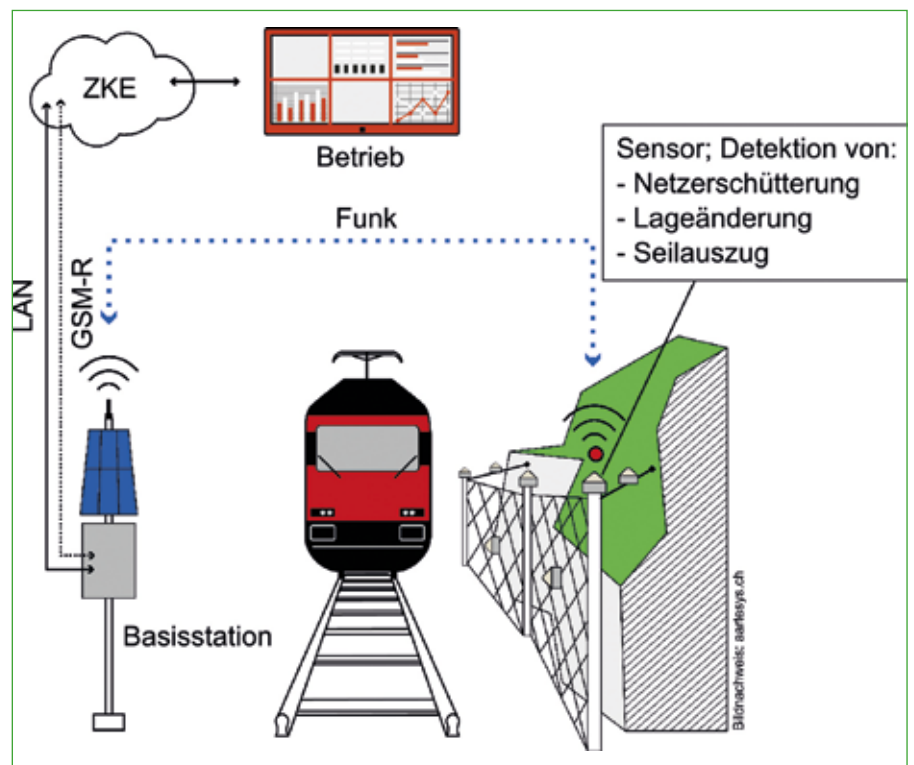


Abbildung 4: Funktionsweise einer NGA-Anlage. Sensoren detektieren im Ereignisfall in Schutznetzen Beschleunigungen, Lageänderungen und das Laufen von Seilbremsen. Diese Daten werden via Basisstation an den Betrieb geschickt und zu einem Alarm verarbeitet. Je nach Schwere des Ereignisses findet die entsprechende Intervention auf den Zugverkehr statt (ZKE=Zugkontrolleinrichtung).

bringerstrecken zum Gotthardbasistunnel ist der Einsatz von NGA-Anlagen sinnvoll. Seltene und grosse Überlastereignisse von bestehenden Schutzbauten können damit abgedeckt werden, womit verbleibende Restrisiken reduziert werden.

NGA-Anlagen werden zudem an Standorten eingesetzt, wo mit baulichen Massnahmen nicht oder nicht kostenwirksam ein Schutz vor Naturgefahren möglich ist, weil die auftretenden Energien zu hoch sind. Zudem stellen NGA-Anlagen ein Sensorium dar, welches die Planung der Überwachungs- und Unterhaltsarbeiten vereinfacht, und dem Naturgefahrenverantwortlichen Hinweise über die geologische Aktivität in einem Gebiet liefern kann.

Weiterentwicklung und Tests

Seit 2008 setzt die SBB NGA-Anlagen ein, welche laufend weiterentwickelt wurden. Im Jahr 2014 wurde ein Pilotprojekt gestartet,

um mit dem bisherigen Lieferanten Inglas (D) und einem neuen Lieferanten Artesys (CH) die Weiterentwicklung im Bereich der Ereignisdetektion und Alarmübermittlung voranzutreiben. Die beiden daraus entstandenen Anlagentypen wurden intensiven Labor- und Aussentests unterzogen und in Langzeittests über ein Jahr im Feld eingesetzt. Daraus resultierten einerseits wichtige Anpassungen an den Anlagenkomponenten; andererseits haben insbesondere Versuche in einer Testanlage für Steinschlagschutznetze interessante Erkenntnisse über das Verhalten der Sensoren während eines Einschlages ergeben. Die dabei aufgezeichneten Beschleunigungen haben unter anderem gezeigt, dass die im Netz auftretenden Beschleunigungen nicht direkt mit der Einschlagsenergie korrelieren. Es ist sogar möglich, dass kleine Blöcke höhere Beschleunigungen im Netz auslösen als grosse Einschlagskörper, welche ein trägeres Deformationsverhalten verursachen. Jedoch wurde

beobachtet, dass die Dauer der Erschütterung mit zunehmenden Einschlagsenergien steigt (Abbildung 5).

Solche Erkenntnisse müssen in Zukunft in die Alarmkonfiguration miteinfließen, um anhand der gemessenen Daten Ereignisse richtig einordnen zu können.

Ereignisse - NGA-Anlagen im Einsatz

Anhand von drei charakteristischen Ereignissen können sowohl das Potential, wie auch die Grenzen der automatischen Alarmierung aufgezeigt werden.

Gurtellen 2012: Nach einem Felssturzerereignis im Juni 2012 wurden im Rahmen der Ereignisbewältigung neue Steinschlagschutznetze mit integrierten NGA-Anlagen erstellt. Ein Nachfolgeereignis im November 2012 hat diese Netze zerstört und grosse Felsmassen wurden auf dem Gleis abgelagert. Nur dank

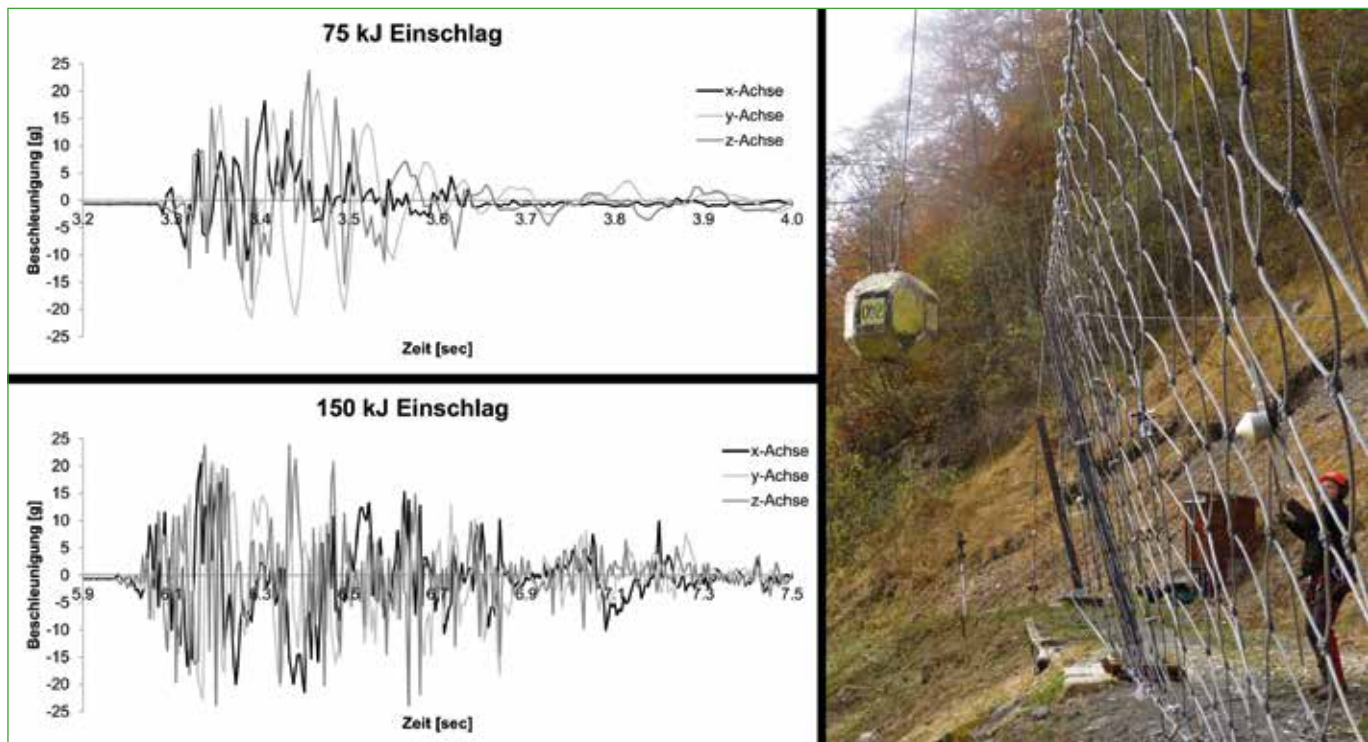


Abbildung 5: In einer Testanlage für Steinschlagschutznetze in Lungern wurden die NGA-Pilotanlagen getestet. Es wurden Netzeinschläge von 75 kJ und 150 kJ durchgeführt. Dabei konnten wichtige Daten über die im Netz auftretenden Beschleunigungen erhoben werden. Obwohl die Einschlagsenergie im zweiten Versuch (unten) verdoppelt wurde, resultieren keine höheren Beschleunigungswerte, jedoch wird eine längere Zeitdauer der Erschütterung beobachtet. Die Sensoren messen die Beschleunigung in x-, y-, und z-Richtung.



Abbildung 6: Links: Blockschlagereignis im November 2012 in Gurtellen. Dank dem Einsatz der NGA-Anlage konnte eine Zugkollision verhindert werden. Mitte: Ein ca. 3 m³ – Block wurde von den Schutznetzen oberhalb des Gotthardbasistunnels in Erstfeld aufgehalten. Dieses Ereignis hat Mängel an der Funktionsweise der NGA-Anlage aufgezeigt. Rechts: Felssturzereignis in Gurtellen 2015, welches einen Direkttreffer des vorbeifahrenden Zuges verursachte. Dieses Restrisiko kann auch mit der NGA-Anlage nicht abgedeckt werden.

der automatischen Alarmierung mit der NGA-Anlage konnte ein Anprallunfall mit einem heranfahrenden Personenzug verhindert werden (Abbildung 6, links).

Erstfeld 2015: Im April 2015 ereignete sich in Erstfeld oberhalb des Gotthardbasistunnels ein kleines Felssturzereignis, welches von den Steinschlagschutznetzen mit integrierter NGA-Anlage aufgehalten wurde. Bei dieser Anlage handelte es sich um einen neuen Serientyp, welcher sich noch im Testbetrieb befand und noch nicht operativ auf den Betrieb einwirkte. Die Ereignisdetektion war fehlerhaft und wichtige Mängel im Sensordesign und im Funksetup wurden erkannt und mussten behoben werden (Abbildung 6, Mitte).

Gurtellen 2015: Südlich des Felssturzereignisses von 2012 ereignete sich im November 2015 in Gurtellen erneut ein kleiner Felssturz. Dieser überfuhr die Schutznetze mit integrierter NGA-Anlage und verschüttete das Gleis. Die NGA-Anlage hat zwar korrekt alarmiert, da die Felsmassen jedoch einen anfahrenden Zug am hintersten Wagen direkt trafen, war die Alarmierung wirkungslos (Abbildung 6, rechts).

Schlussfolgerungen - Ausblick

Bezüglich Naturgefahren tragen im Bahnverkehr Anprallunfälle mit Entgleisungen zum grössten Teil der Personenrisiken bei. Mit NGA-Anlagen kann die Wahrscheinlichkeit eines Anpralls deutlich reduziert werden, und somit wird das individuelle Todesfallrisiko effektiv minimiert. Das Risiko eines Direkttreffers macht zwar einen geringeren Anteil an den Gesamtrisiken aus, ist aber insbesondere auf vielbefahrenen Strecken eine nicht zu vernachlässigende Komponente. Im Falle eines Direkttreffers oder auch bei zu kurzer Vorwarnzeit, wenn sich ein Zug bereits im Gefahrenbereich befindet, können NGA-Anlagen ihre Wirkung nicht entfalten. Damit diese Restrisiken weiter gesenkt werden können, gibt es Bestrebungen, die Zeit von der Alarmauslösung bis zum Sperren des Gleises zu reduzieren. Heute quittiert ein Disponent in der Betriebszentrale den eingehenden Alarm und sperrt dann via Monitor die betroffenen Gleisabschnitte. Insgesamt dauert dies zwischen 15 und 60 Sekunden. Ziel ist es, den Alarm direkt von der NGA-Anlage zum Lokführer zu schicken und den betrieblichen Alarmierungsprozess zu optimieren. Die grosse Stärke von NGA-Anlagen liegt in der hohen Zuverlässigkeit, mit der Züge au-

tomatisch vor verschütteten Gleisen gewarnt und gestoppt werden. Der Einsatz von solch komplexer Sensorik und Funktechnologie mit direkter Anbindung an das betriebliche Alarmierungssystem ist einzigartig, und die SBB nimmt damit im nationalen und internationalen Vergleich eine Vorreiterrolle ein.

Literatur

Bründl M. (2009): Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern.

Müller A., Worni R. (2016): Die Natur kennt keine Katastrophen. Interpraevent 2016.

SBB AG (2014): Auswertung Ereigniskataster Bahnlinien. Geo7 AG.

SBB AG (2015): Weiterentwicklung Risikoberechnung, Naturgefahren SBB 2015. Geo7 AG.

Spiegel Online (2016): <http://www.spiegel.de/panorama/bacharach-zug-auf-linker-rheinstrecke-entgleist-zehn-verletzte-a-1099742.html> [zugegriffen am 16.08.2016].

Renaissance strukturierter Netze in der hydraulischen Modellierung dank leistungsstarker Grafikkarten

Christian Volz (Ingenieure Bart AG, St. Gallen, volz@bart.ch)
Ben Loretz (Ingenieure Bart AG, St. Gallen, loretz@bart.ch)

Résumé

L'augmentation de la puissance de calcul des stations de travail par des cartes graphiques performantes permet des modélisations hydrauliques 2D avec une très haute résolution spatiale. Ceci s'applique particulièrement aux modèles utilisant des maillages structurés, qui travaillent de manière efficace sur des cartes graphiques parallèles. Il est en grande partie remédié aux anciennes faiblesses de ces modèles par la haute résolution, vu que des structures de terrain à petite échelle sont représentées avec précision. Les modèles utilisant des maillages structurés sont spécialement intéressants pour ces hautes résolutions et grandes quantités de données, grâce à la simplicité et à l'efficacité de leurs pré- et post-traitements basés sur des formats raster. Ils permettent des résolutions plus élevées et des études plus approfondies ainsi que la modélisation de plus de scénarii, ce qui est important pour la gestion des dangers naturels. L'efficacité des modélisations basées sur les maillages structurés avec des cartes graphiques est démontrée à l'exemple du programme *flox-GPU*.

Zusammenfassung

Der Fortschritt in der Rechenleistung auf Workstations durch leistungsstarke Grafikkarten ermöglicht hydraulische 2D-Modellierungen mit sehr hohen räumlichen Auflösungen. Dies gilt besonders für Modelle mit strukturierten Netzen, die sich effizient auf Grafikkarten parallelisieren lassen. Die bisherigen Defizite dieser Modelle werden durch die hohe Auflösung

weitgehend behoben, da auch kleinräumige Geländestrukturen präzise abgebildet werden. Gerade bei diesen hohen Auflösungen und Datenmengen sind Modelle mit strukturierten Netzen dank ihrem einfachen und effizienten Pre- und Postprocessing basierend auf Raster-Formaten sehr attraktiv. Sie ermöglichen höhere Auflösungen und Abklärungstiefen sowie mehr Szenarien-Modellierungen, die fürs Naturgefahrenmanagement wichtig sind. Am Beispiel des Programmes *flox-GPU* wird die Effizienz der Modellierung auf strukturierten Netzen mit Grafikkarten aufgezeigt.

1. Einleitung

Die Bedeutung von numerischen Modellierungen in der Hydraulik hat in den letzten Jahren stark zugenommen. Die Anwendungsgebiete sind dabei vielfältig – von immer genaueren

Modellen und besseren Daten profitieren ökologische Fragestellungen zu Fischhabitaten gleichermassen wie Geschiebetransportstudien von Kraftwerksbesitzern oder Dimensionierungsprojekte von Hochwasserschutzmassnahmen. Speziell im Bereich des Naturgefahrenmanagements zeugen von diesem Trend die immer höheren Abklärungstiefen von Gefahrgutachten und auch die wachsende Zahl an Simulations-Programmen mit dem Fokus auf Naturgefahren. Die Wassergefahren sind sowohl flächenmässig als auch im monetären Schadensausmass in der Schweiz die gravierendste Hauptprozessart (Hausmann et al. 2012), weshalb der Einsatz von effizienter und genauer hydraulischer Simulations-Software von grosser Bedeutung ist.

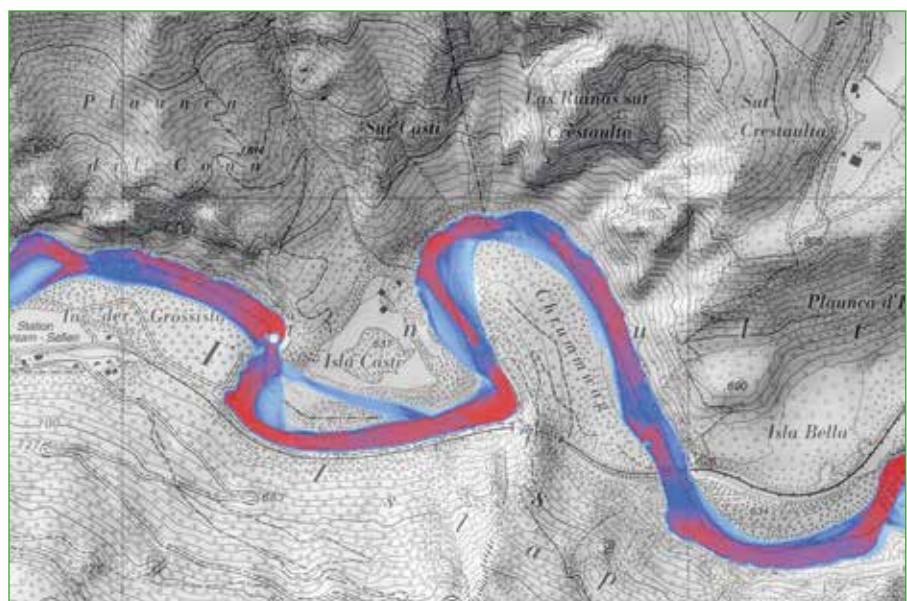


Abbildung 1: 2D-Modellierung des Vorderrheins mit der Software *flox-GPU*. Dargestellt sind die Fliesstiefen in einem Abschnitt des Gesamtmodells von Sedrun bis Sargans (ca. 100 km Länge, 1.75 Mio. benetzte Zellen)

Aufwändige Variantenstudien oder Analysen mit verschachtelten Szenarien verlangen auch für einzelne Gerinne eine Vielzahl an Rechenläufen. Dabei handelt es sich je nach Fragestellung um verschiedene Jährlichkeiten des Abflusses, Verklausungen von einzelnen Durchlässen oder Brücken, Auflandungen von Fließabschnitten, Dammbüche oder anderweitig relevante Subprozesse. Neben der Genauigkeit ist daher auch die Effizienz bzw. Rechengeschwindigkeit in der Praxis entscheidend. Obwohl Echtzeitrechnungen nur einen geringen Teil der Anwendungen ausmachen und Genauigkeit und Transparenz höher gewichtet werden als reine Rechengeschwindigkeit, ermöglichen erst schnelle Programme einen vernünftigen Umgang mit vielen Varianten oder Sensitivitätsanalysen. In manchen Fällen können Limitierungen bei Soft- oder Hardware, wie z.B. eine Beschränkung der maximalen Anzahl an Zellen, den Einsatz eines Programmes für eine bestimmte Untersuchung sogar ganz verhindern.

Im Folgenden wird auf den Fortschritt bei den hydraulischen 2D-Modellierungen eingegangen, die dank der Rechenleistung von modernen, leistungsstarken Grafikkarten (GPUs) zu erzielen sind. Zudem werden Charakteristiken von Modellen mit strukturierten und unstrukturierten Rechenetzen näher beleuchtet. Dank der Rechenleistung und der speziellen Architektur der GPUs stellen Modelle mit strukturierten Netzen wieder eine Alternative zu den derzeit verbreiteten Modellen mit unstrukturierten Netzen dar.

2. Herausforderungen bei der Überflutungsmodellierung

Grundgleichungen

Im Naturgefahrenbereich und der Überflutungsmodellierung werden typischerweise hydraulische 2D-Modelle verwendet, welche die Flachwassergleichungen (FWG) lösen. Nu-

merische 3D-Modelle sind für grösserskalige Anwendungen aufgrund hoher Rechenzeiten sowie fehlender Datengrundlagen, beispielsweise ganzer Gerinneverläufe, (noch) nicht praktikabel. Numerische 1D-Modelle sind andererseits nicht in der Lage, flächige Überflutungen und komplexere Fließwege hinreichend abzubilden. Daher sind 2D-Modelle für diese Anwendungsgebiete in den meisten Fällen vorzuziehen. Bei den 2D-Modellen wird der Modellperimeter mit einer Vielzahl an Zellen diskretisiert und für jede benetzte Rechenzelle werden die FWG pro Zeitschritt gelöst und die resultierenden Flüsse über die Zellkanten berechnet und bilanziert.

Die 2D-FWG ergeben sich aus der Tiefenmittlung der 3D-Navier-Stokes-Gleichungen und ermöglichen die akkurate Abbildung von Fließvorgängen in Gerinnen, wo die Wassertiefen im Vergleich zu den Wellenlängen der Strömung klein sind. Neben dieser Klasse der physikalisch-basierten Modelle gibt es auch vereinfachte Modelle, die auf anderen Prinzipien basieren oder einzelne Terme aus den FWG vernachlässigen, wie z.B. quasi-stationäre Modelle oder einfaches «Flood-Routing». Für viele Anwendungsgebiete, insbesondere bei Überflutungsmodellierungen, die üblicherweise instationäre Wellenausbreitungen beinhalten, sind solche Vereinfachungen jedoch unzureichend und es ist wünschenswert die vollen 2D-FWG anzuwenden.

Abbildung des Geländes

Eine weitere Herausforderung für die Überflutungsmodellierung ist die präzise Abbildung des Geländes im numerischen Modell. Dies gilt vor allem für wichtige topografische Leitstrukturen, wie z.B. Böschungskanten, Mauern oder Dämme. Die Abbildung solcher Strukturen im Rechenetz ist für eine genaue Beurteilung der Fließprozesse notwendig, erfordert aber zumeist sehr kleine Rechenzellen, häufig im Bereich von Dezimetern bis wenigen

Metern. Dies steht jedoch im Konflikt mit der Anforderung, kilometerlange Gewässerrläufe und ausgedehnte Ausuferungen zu modellieren. Dieser Unterschied in der Längenskala von vielen Grössenordnungen verhinderte in der Vergangenheit den effizienten Einsatz von 2D-Modellen auf strukturierten Netzen, da die Rechenzeiten nicht praktikabel waren bzw. die Anzahl an Rechenzellen zu gross wurde.

Numerische Aspekte

Aus numerischer Sicht sind flächige 2D-Überflutungsmodellierungen grundsätzlich eine anspruchsvolle Aufgabe. Bei der Überflutung verändern sich die Modellgrenzen dynamisch, d.h. es finden Übergänge von trockenen und benetzten Gebieten statt. Weiterhin benötigen viele Modelle, insbesondere in Gebieten mit hohem Gefälle, den robusten Umgang mit wechselnden Fließzuständen (Fließwechsel), mit Wellenausbreitungen und mit hohen Geschwindigkeiten sowie abrupten Gefällsänderungen. Auch die Abbildung von Retentionswirkungen sowie die vollständige Massenerhaltung des Wassers sind für die Bestimmung der Ausmasse von Ausuferungen und deren Intensitäten wichtig. In den letzten Jahrzehnten haben sich vor allem Finite-Volumen-Methoden mit sog. Upwind-Verfahren als geeignete numerische Verfahren etabliert. Diese besitzen u.a. die Eigenschaft Schockwellen, wie z.B. Dammbuchwellen, abbilden zu können («shock-capturing»). Daneben haben die Finite-Volumen-Methoden die Vorteile der Massenerhaltung der Abflüsse sowie der Robustheit in Hinblick auf numerisch schwierige Probleme. Im Gegenzug sind diese modernen und stabilen numerischen Verfahren jedoch rechnerisch anspruchsvoll und zeitintensiv.

Die Rechengeschwindigkeit der Modelle ist im Wesentlichen durch zwei Aspekte limitiert: Den Zeitschritt Δt sowie die Anzahl Zellen N , welche in jedem Zeitschritt berechnet werden

müssen. Die benötigte Zeit T ist dabei direkt proportional zur Anzahl benetzter Zellen und indirekt zum Zeitschritt:

$$T \sim N \cdot 1/\Delta t \quad (1)$$

Für instationäre Überflutungsmodellierungen mit den FWG werden zumeist explizite numerische Methoden angewandt. Diese besitzen den Nachteil, dass sie aus Stabilitätsgründen nur kleine Zeitschritte erlauben. Implizite Methoden ermöglichen dagegen theoretisch längere Zeitschritte, und somit weniger Berechnungsschritte, sind jedoch rechnerisch aufwändiger und i.A. weniger geeignet für stark instationäre Strömungsvorgänge und Überflutungen mit dynamischem Nass-/bzw. Trockenfallen von Rechenzellen (Beffa 1994). Weiter können explizite Rechenschemata einfacher und effizienter parallelisiert werden.

Der Zeitschritt hängt bei solchen expliziten Verfahren vom modellweiten Minimum des Quotienten aus dem Zellabstand d und der Geschwindigkeit v (= Fließgeschwindigkeit + Wellengeschwindigkeit) in jeder Zelle ab:

$$\Delta t = CFL \cdot d/v \quad (2)$$

Gleichung (2) wird auch das CFL-Kriterium (nach Courant, Friedrichs, Lewy, 1928) genannt und stellt die numerische Stabilität sicher. Es sorgt dafür, dass bei geeigneter Wahl der CFL-Konstante Information während eines Zeitschritts nicht weiter als bis zur nächsten Zelle wandern kann. Dieses Kriterium führt jedoch häufig dazu, dass die kleinsten Zellen im Modellgebiet für den Zeitschritt limitierend sind und somit zu unerwünscht kleinen Zeitschritten und entsprechend grossen Rechenzeiten gemäss Gleichung (1) führen.

3. Strukturierte und unstrukturierte Netze: Vor- und Nachteile

Viele derzeit in der Praxis eingesetzte hydraulische Modelle basieren auf unstrukturierten Rechenetzen, die zumeist aus Dreiecken aufgebaut sind. Dem gegenüber stehen die strukturierten Netze, bei denen das Modellgebiet mit regelmässigen Zellen, zumeist Quadrate oder Rechtecke, diskretisiert wird. Abbildung 2 stellt Ausschnitte aus einem strukturierten und unstrukturierten Rechenetz in perspektivischer Sicht gegenüber.

In Hinblick auf die in Abschnitt 2 beschriebenen Herausforderungen an die Überflutungsmodellierung bieten strukturierte und unstrukturierte Netze jeweils verschiedene Vor- und Nachteile. Die wichtigsten Merkmale sind in Tabelle 1 aufgeführt und nachfolgend näher erläutert.

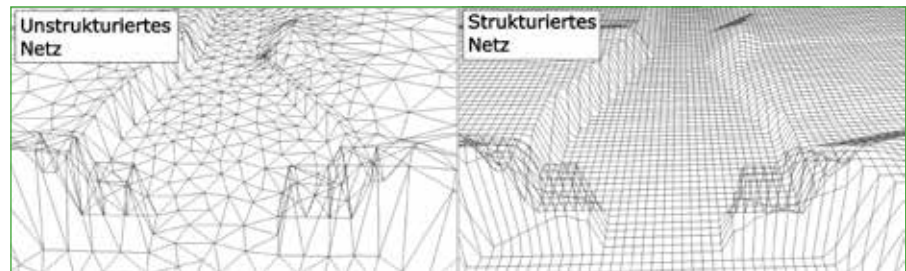


Abbildung 2: Unstrukturiertes (links) und strukturiertes (rechts) 2D-Rechenetz in perspektivischer Ansicht

Tabelle 1: Vergleich der Vor- und Nachteile bei strukturierten und unstrukturierten Netzen

	Unstrukturiert	Strukturiert
Lokale Verdichtungen	detaillierte und grobe Bereiche im gleichen Netz	ganzes Netz in gleicher Auflösung
Zeitschrittgrösse	limitiert durch kleinste räumliche Strukturen	limitiert durch kleinste räumliche Strukturen
Abbildung kleinster geometrischer Elemente	möglich dank flexiblem Netz	möglich mit hoher Auflösung
Aufwand Preprocessing	hoher Aufwand (glatte Netze nötig, Bereinigung Kleinstelemente)	geringer Aufwand (Rechenetz als Raster)
Aufwand Postprocessing	mittlerer Aufwand wegen komplexer Datenstruktur	geringer Aufwand dank Resultaten in Rasterformaten
Effizienz (Rechenaufwand pro Zelle)	eher gering wegen komplexer Datenstruktur	hoch wegen Einfachheit des Schemas
Parallelisierbarkeit	gut	sehr gut wegen Einfachheit des Schemas

- Lokale Verdichtungen: Unstrukturierte Netze ermöglichen es, Bereiche von grossem Interesse mit kleinen Zellen detaillierter abzubilden. Andere Bereiche, beispielsweise uninteressantes Umland und Überflutungsflächen mit geringerer Bedeutung, werden dagegen vereinfacht, mit grösseren Zellen abgebildet. Insgesamt kann sich dadurch die Gesamtzahl der berechneten Zellen und somit die Rechenzeit nach Gleichung (1) reduzieren. Bei strukturierten Netzen weist die Modellierungsdomäne überall die gleiche Auflösung auf. Es hängt vom Modell ab, ob die Differenzen der Zellzahlen zwischen strukturiertem/unstrukturiertem Netz gross sind. Nachteilig ist, dass für die Verdichtungen bereits vorgängig bekannt sein muss, welche Gebiete feiner/gröber aufgelöst werden sollen.
- Zeitschritt: Dieser korreliert weitgehend mit den kleinsten benetzten Zellen des Modells (Gleichung 2). Die Verwendung von unstrukturierten Netzen bringt in Bezug auf diese Problematik der kleinen Zeitschritte gegenüber den strukturierten Netzen nur geringe Vorteile. Die Grössenordnung der kleinsten Rechenzellen wird vielmehr in beiden Fällen von der Ausdehnung der kleinsten abzubildenden Geländestruktur bestimmt. In der Praxis resultieren dennoch leicht höhere Auflösungen und kleinere Zeitschritte bei strukturierten Netzen (siehe nächster Punkt).
- Abbildung kleinster geometrischer Elemente: Mit unstrukturierten Netzen können leitende Strukturen, wie Böschungskanten oder Dämme, flexibel abgebildet werden, indem man die Zellkanten entlang dieser Bruchkanten ausrichtet. Die strukturierten Netze sind dagegen starr und benötigen ausreichend hohe räumliche Auflösungen für die genaue Abbildung der Leitstrukturen.
- Preprocessing: Die Erstellung hochwertiger, glatter Netze beim Preprocessing erfordert einen massgeblichen Anteil der gesamten Bearbeitungszeit bei der Überflutungsmodellierung mit unstrukturierten Netzen. Grundsätzlich hängt die Güte der Resultate stark von der Qualität des Netzes ab – die Dreieckszellen müssen dabei Qualitätskriterien einhalten, wie die Vermeidung von sehr spitzen Winkeln oder abrupten Grössenänderungen von Zellen in direkter Nachbarschaft. Insbesondere bilden sich bei spitzwinklig zusammenlaufenden Bruchkanten, unsauberen Knoten oder hoher Dichte der Messpunkte sehr kleine Dreiecke (Abbildung 3 rechts). Diese Datenmängel müssen zumeist händisch bereinigt werden. Bei der Erstellung strukturierter Netze fällt dieser Aufwand fast gänzlich weg.
- Postprocessing: Die Auswertung der Resultate beim Postprocessing ist bei Modellen mit unstrukturierten Netzen aufgrund der komplexen Datenstruktur aufwändiger (Abbildung 4). Resultate werden daher häufig in einem zusätzlichen Arbeitsschritt auf Raster interpoliert, was jedoch Zusatzaufwand erfordert und zu Genauigkeitsverlusten führt. Dieser zusätzliche Arbeitsschritt ist bei Modellen mit strukturierten Netzen nicht erforderlich. Hier liegen die Resultate bereits in strukturierter Form als einfach handhabbare Raster vor, deren Weiterverarbeitung komfortabel und verlustfrei möglich ist.
- Effizienz: Der Rechenaufwand und Speicherbedarf sind bei Modellen mit strukturierten Netzen pro Zelle grund-

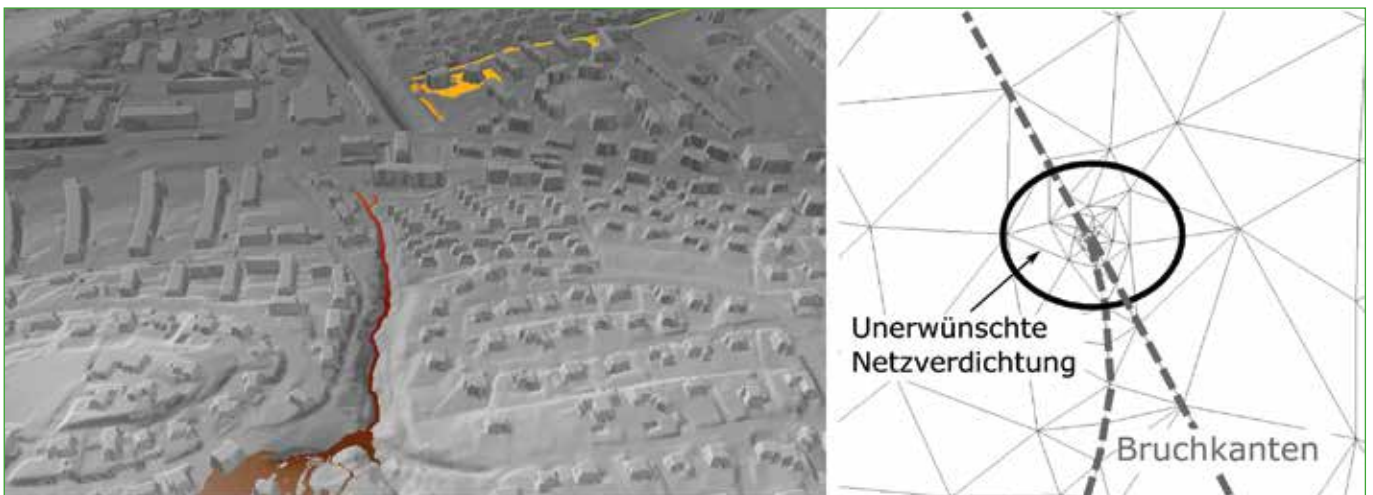


Abbildung 3: Links: Überflutungsbereich mit Infrastruktur und dichtem Netz aus Leitstrukturen. Rechts: unerwünschte Netzverdichtung mit winzigen Rechenzellen im Bereich zusammenlaufender Bruchkanten (grau gestrichelt)

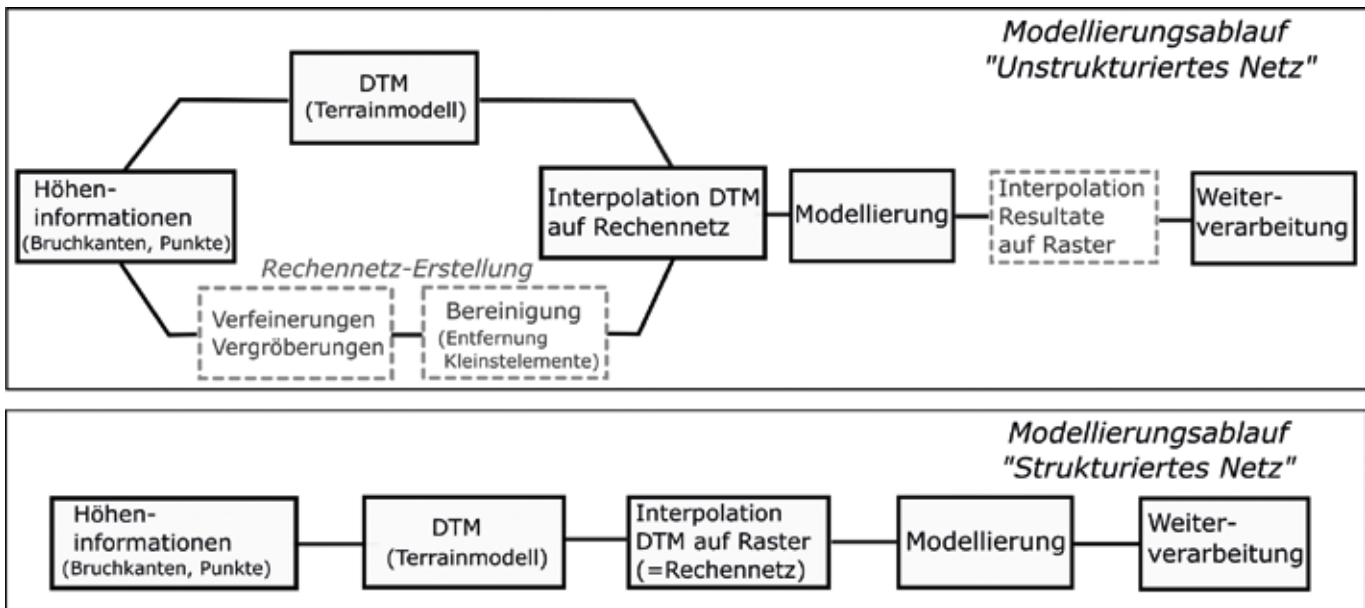


Abbildung 4: Modellierungsablauf mit unstrukturiertem Rechenetz (oben) und strukturiertem Rechenetz (unten). Die gestrichelten, zeitintensiven Arbeitsschritte entfallen beim Modellierungsablauf mit strukturiertem Netz.

sätzlich kleiner als bei Verfahren mit unstrukturierten Netzen.

- Parallelisierbarkeit: Explizite Modelle lassen sich grundsätzlich gut parallelisieren. Modelle basierend auf strukturierten Netzen allerdings noch deutlich einfacher als jene aus unstrukturierten (siehe Abschnitt 4).

4. Leistungssteigerung durch GPUs mit strukturierten Netzen

Leistungssteigerung durch GPUs

Erst die rasante Entwicklung der Rechenleistung von Prozessoren der letzten Jahrzehnte liess die numerische Berechnung von hydraulischen 2D-Modellen überhaupt zu. In der jüngeren Vergangenheit haben sich hierbei die Modelle mit strukturierten Netzen für die Überflutungsmodellierungen nicht durchsetzen können. Die verwendeten strukturierten Gitterzellen waren häufig zu gross, um schmale Gerinne oder andere kleinräumige topografische Strukturen hinreichend präzise abzubilden. Bei der Interpolation dieser Strukturen aus dem Geländemodell auf zu grosse Zellen gingen relevante Informationen verloren. Eine genauere

Abbildung mit höherer räumlicher Auflösung führte jedoch zu grösseren Zellzahlen und somit erhöhtem Bedarf an Arbeitsspeicher und Rechenleistung. Diese hohen Hardware-Anforderungen waren schwer zu bewältigen, weshalb vor allem auf unstrukturierten Netzen modelliert wurde.

Eine erhebliche Zunahme der Rechenleistung von Computern der letzten Jahre wurde durch

den Paradigmenwechsel zur Parallelisierung erreicht. Sowohl bei herkömmlichen Workstation-Prozessoren (CPUs) als auch bei GPUs wird ein Grossteil der gesamten Leistungssteigerungen pro Generation durch die Erhöhung der Anzahl Berechnungen erreicht, welche gleichzeitig (parallel) ablaufen können. GPUs stellen hier einen Extremfall dar, da sie eine Architektur verwenden, die für massiv parallele Prozesse optimiert ist. Abbildung 5 stellt

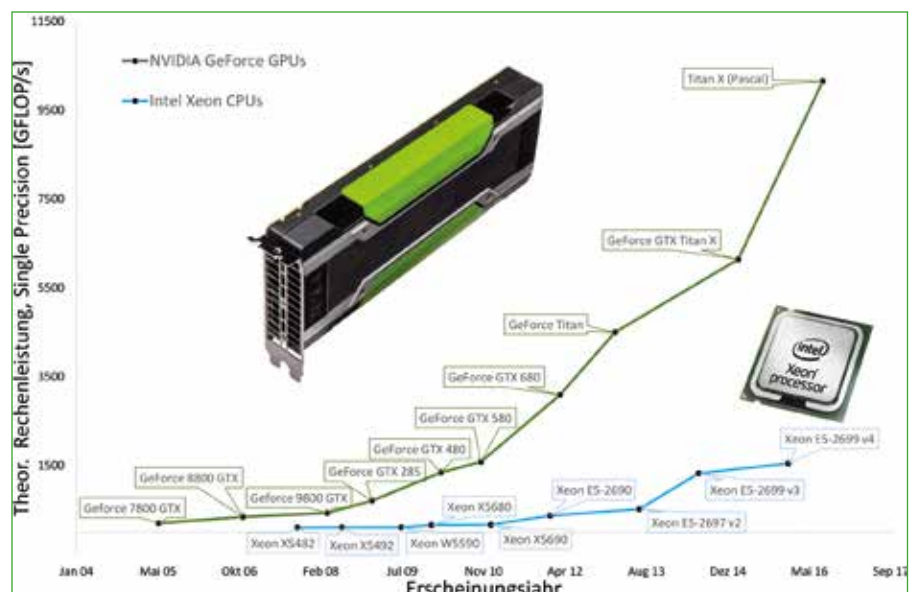


Abbildung 5: Entwicklung der Rechenleistung von Workstation CPUs (Intel Xeon, blau) und GPUs (NVIDIA, grün) in den letzten 11 Jahren

die Entwicklung der Rechenleistung von GPUs derjenigen von CPUs über die Zeit gegenüber. Die heute theoretisch erreichbare Rechenleistung einer einzelnen Grafikkarte liegt im Bereich von mehreren Tera-FLOPS (FLOPS = Floating-Point Operations per Second). Dies sind Werte, wie sie vor wenigen Jahren nur in grossen Rechenzentren erreichbar waren. Die Parallelschaltung mehrerer GPUs in einer Workstation bietet zudem die Möglichkeit, den Grad der Parallelität weiter zu steigern.

Diese hohe verfügbare Rechenleistung von GPUs, bei vergleichbar niedrigen Anschaffungskosten, macht sie für viele Anwendungen interessant. Die Lösung der FWG lässt sich grundsätzlich hochgradig parallelisieren, insbesondere für Verfahren mit strukturierten Netzen. Allerdings erfordert die spezielle Architektur der GPUs auch spezielle Software, welche deren Stärken nutzt. Viele Simulationsprogramme für die Überflutungsmodellierungen haben den Paradigmenwechsel von der sequentiellen zur parallelen Ausführung nicht vollzogen oder beschränken sich auf mehrkernige CPUs. Dies hat vor allem damit zu tun, dass bestehende Software oft nur schwer nachträglich parallelisiert werden kann und besonders die Umstellung auf die spezielle Architektur der GPU mit grossem Aufwand verbunden ist.

Parallelisierung von Modellen mit strukturierten Netzen

Ein entscheidender Vorteil der strukturierten Netze sind die Einfachheit der Berechnungsschemas und der Datenhaltung, welche zu geringerem Speicherbedarf, zu einer grösseren Anzahl an möglichen Zellen und einer effizienten Berechnung führen. Die Verknüpfung von Zellen mit ihren Nachbarzellen ist im strukturierten Netz fest vorgegeben und einfach. Die Ausrichtung der modellinternen Koordinaten erfolgt einfach entlang der Gitterrichtungen.

Diese Einfachheit ermöglicht u.a. eine effiziente Aufteilung des Berechnungsgebiets in kleine, überlappende Teilgebiete, wie sie für die massiv parallele Bearbeitung auf der GPU nötig ist. Explizite numerische Verfahren für die FWG auf strukturierten Netzen können daher besonders effizient auf GPUs umgesetzt werden (Brodtkorb et al. 2012). Dies gilt insbesondere für solche Verfahren, die für die Parallelisierung optimiert sind, indem sie die Abhängigkeiten zwischen benachbarten Zellen möglichst geringhalten.

Dank der hohen räumlichen Auflösung und grossen Anzahl an Rechenzellen können Zellgrössen kleiner gewählt werden als die charakteristischen Längenmasse der abzubilden den topografischen Elemente. Somit bleiben Bruchkanten und Höheninformationen bei der Diskretisierung praktisch erhalten. Sehr feine Strukturen, deren Ausdehnung weiterhin unter der Zellgrösse liegen (z.B. schmale Mauerkronen), können mit speziellen Methoden im Gitter erzwungen werden. Dadurch wird das ehemals grösste Defizit der strukturierten Gitter weitgehend behoben und sequentielle Programme auf unstrukturierten Netzen lassen sich sowohl in Geschwindigkeit als auch Auflösung übertreffen.

5. Beispiel: flox-GPU

Die 2D-Modellierungs-Software *flox-GPU* (www.flox-GPU.ch) ist eine Eigenentwicklung der Ingenieure Bart AG, welche für den Einsatz auf GPUs entworfen wurde. Das numerische Verfahren basiert auf den Arbeiten von Kurganov und Petrova (2007), Brodtkorb et al. (2010, 2012) und Horvath et al. (2014). Die Software löst die vollen 2D-FWG mit einem zellzentrierten Finiten-Volumen Verfahren auf strukturierten Netzen, bestehend aus quadratischen Zellen. Weitere Charakteristiken des numerischen Lösungsverfahrens sind in Tabelle 2 aufgelistet. Die Software läuft auf handelsüblichen NVIDIA GPUs und zielt vor allem auf die Anwendungen im Bereich der Überflutungsmodellierungen. Sie beinhaltet auch Module für hydraulische Strukturen wie Durchlässe, die im Naturgefahrenmanagement von besonderer Bedeutung sind.

Für die Beurteilung und Veranschaulichung der Rechenleistung dieser GPU-optimierten Software wurde eine Vergleichssimulation eines numerischen Standard-Testfalls betrachtet. Simuliert wird die Ausbreitung einer zirkulären Dammbrechwelle, wobei sich eine Wassersäule in alle Raumrichtungen vom

Tabelle 2: Kenndaten 2D-Modellierungs-Software *flox-GPU*

Modell	2D-Flachwassergleichungen (Erhaltungsgrössen h, hu, hv)
Schema	Zentrales Upwind-Verfahren («shock-capturing») mit minmod Slope-Limiter
Genauigkeit	2. Ordnung in Raum und Zeit
Zeitintegration	Explizites Runge-Kutta Verfahren
Reibung	Semi-Implizite Reibung, Strickler-Koeffizient
Rechenetz	Strukturiertes Netz, quadratische Zellen
GPU	Single-Precision NVIDIA GPU

Zeitpunkt $t = 0.0$ s ausgehend bis $t = 10.0$ s ausbreitet (Abbildung 6). Verglichen wird die *flox-GPU* Modellierung mit dem 2D-Modul der Software BASEMENT der ETH Zürich (BASEMENT 2016), als Beispiel einer gängigen Modellierungs-Software auf unstrukturierten Netzen. Vergleichbare Resultate ergeben sich mit anderen Programmen.

Beide Modelle geben die Ausbreitung der zirkulären Dammbuchwelle richtig wieder. Kleinere Differenzen ergeben sich aus der etwas höheren numerischen Diffusion des unstrukturierten Netzes und den verschiedenen numerischen Verfahren mit unterschiedlicher Genauigkeit in Raum und Zeit. Das strukturierte Netz des *flox-GPU* Modells verwendet ungefähr die gleiche Anzahl an Zellen und in etwa einen halb so grossen durchschnittlichen Zeitschritt. Die gesamte Rechenzeit im Vergleich mit BASEMENT unterscheidet sich um Grössenordnungen (Tabelle 3). Nur das GPU-optimierte Modell erreicht eine Laufzeit kürzer als die Echtzeit.

Faire Vergleiche zwischen strukturierten und unstrukturierten Modellen sind grundsätzlich schwierig und ihr Ausgang hängt immer von der genauen Versuchsanordnung ab. Aus der Erfahrung im Praxiseinsatz mit *flox-GPU* lässt sich für die hier betrachteten Fragestellungen der Überflutungsmodellierungen festhalten, dass die GPU-Modellierung auf strukturier-

Tabelle 3: Kenndaten des zirkulären Dammbuchwelle modelliert mit *flox-GPU* und BASEMENT

	flox-GPU	BASEMENT	BASEMENT 4 cores
Anzahl Zellen [-]	498'436	498'912	
Zeitschrittgrösse [s]	0.002 - 0.004	0.003 - 0.008	
Anzahl Zeitschritte [-]	2885	1604	
Rechenzeit [s]	4.2	637	324
Echtzeit-Faktor (simulierte Zeitspanne / Simulationsdauer)	2.4	0.016	0.03
Hardware (Hardware nicht identisch - Resultate sind daher nur Anhaltspunkt)	NVIDIA GeForce GTX 1080	Intel i7-4770 (sequentiell)	Intel i7-4770 (parallel 4-cores)

tem Netz in typischen Fällen eine Geschwindigkeitssteigerung von mindestens einer Grössenordnung gegenüber CPU-Lösungen ermöglicht. Neben der Verkürzung der Laufzeit von Stunden auf Minuten oder hochauflösten Echtzeit-Modellen mit Zellgrössen im unteren Dezimeterbereich, zeigen sich die Vorteile der GPU-optimierten Modellierung auch in der Möglichkeit sehr grosse Netze (mehr als 10 Millionen benetzte Zellen) zu verwenden.

Fazit

Durch den Fortschritt in der Rechenleistung, vor allem aufgrund der Verfügbarkeit von leistungsstarken Grafikkarten, sind die bisherigen Defizite von hydraulischen 2D-Modellen mit strukturierten Netzen weitgehend obsolet geworden. Dank der neuerdings möglichen, hohen räumlichen Auflösung werden Bruchanten und Geländestrukturen auch bei der Diskretisierung im strukturierten Netz präzise erfasst. Damit, und durch die besonders effiziente Umsetzung auf Grafikkarten, stellt die

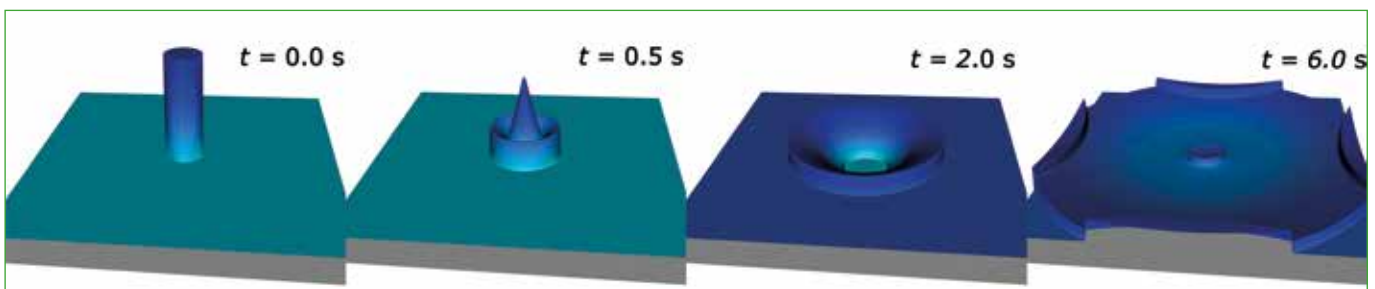


Abbildung 6: Momentaufnahmen der Ausbreitung einer zirkulären Dammbuchwelle modelliert mit *flox-GPU*

Verwendung von Modellen mit strukturierten Netzen bei Überflutungsmodellierungen eine attraktive Alternative dar. Die Vorteile dieser Modellklasse liegen vor allem in der Einfachheit – sowohl was die Berechnung und den Speicherbedarf betrifft, als auch in Hinblick auf das einfache und effiziente Pre- und Post-processing der Eingangsdaten und Resultate mit gängigen Rasterformaten. Wir sehen daher eine Renaissance der Verfahren mit strukturierten Netzen, die in der Vergangenheit für die Überflutungsmodellierung durch solche mit unstrukturierten Netzen abgelöst wurden. GPU beschleunigte Systeme, welche sich moderne numerischen Verfahren zur Lösung der vollständigen Flachwassergleichungen zu Nutzen machen, haben das Potenzial, die Qualität und Bearbeitungstiefe im Naturgefahrenmanagement zu verbessern. Sie erfüllen sämtliche Voraussetzungen, um den Herausforderungen der Überflutungsmodellierung zu bestehen:

- genaue und stabile numerische Verfahren
- präzise Abbildung der topografischen Strukturen im Rechnernetz ist möglich
- Vergrößerung der Untersuchungsgebiete gegenüber herkömmlichen Verfahren
- kurze Rechenzeiten, welche für die Bearbeitung vieler Szenarien und Sensitivitätsanalysen nötig sind

Dies führt zu robusteren Beurteilungen und bereitet den Weg für weiterführende Wahrscheinlichkeits- und Risikobetrachtungen.

Neben den neuen Möglichkeiten, welche die Nutzung von leistungsstarken Grafikkarten mit sich bringt, kommen jedoch auch neue Probleme und Herausforderungen auf den Modellierer zu. Ein effektiver Gewinn in Form von detaillierteren hydraulischen Ergebnissen durch die hohen Netzauflösungen erfordert entsprechend hochaufgelöste Geländemodelle als Eingangsdaten. Die Berücksichtigung einer Vielzahl an Szenarien und der Umgang mit den grossen Datenmengen benötigt zudem vermehrt automatisierte Verarbeitungen.

Literatur

BASEMENT – Basic Simulation Environment for Computation of Environmental Flow and Natural Hazard Simulation. Version 2.6. © ETH Zurich, VAW, Vetsch D., Siviglia A., Ehrbar D., Facchini M., Gerber M., Kammerer S., Peter S., Vanzo D., Vonwiler L., Volz C., Farshi D., Mueller R., Rousselot P., Veprek R., Faeh R., 2006-2016.

Beffa, C. 1994. Praktische Lösung der tiefen gemittelten Flachwassergleichungen, Mitteilung 133, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH, Zürich.

Brodtkorb A.R., Hage, T.R., Lie, K., 2010. Simulation and visualization of the Saint-Venant system using GPUs, *Computing and Visualization in Science* (2010), 13, pp. 341-353.

Brodtkorb A.R., Sætra M.L., Altinakar M., 2012. Efficient shallow water simulations on GPUs: Implementation, visualization, verification and validation, *Computers & Fluids*, 55, pp. 1-12.

Courant R., Friedrichs K., Lewy H., 1928. Über die partiellen Differenzgleichungen der mathematischen Physik, *Mathematische Annalen*, 100(1), pp. 32-74.

Hausmann P., Kurz C., Rebuffon G., 2012. Überschwemmungen in der Schweiz – ein unterschätztes Risiko, *Swiss Re*.

Horvath Z., Waser J., Perdigo R.A.P., Konev A., Blöschl G., 2014. A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations. *International Journal for numerical Methods in Fluids*, 00, pp. 1-26.

Kurganov A., Petrova G., 2007. A second-order well-balanced positivity preserving central-upwind scheme for the Saint-Venant system, *Communications in Mathematical Sciences*, 5(1), pp. 133-160.



Buchhinweis

Die Natur kennt keine Katastrophen

ISBN: 978-3-906016-62-7

Herausgeber: Gianni Paravicini und Claudio Wiesmann,
Projektleiter Naturgefahren, Kanton Luzern

Das Buch «Die Natur kennt keine Katastrophen» beinhaltet Beiträge von 22 Autorinnen und Autoren, welche sich dem Thema Naturgefahren aus unterschiedlichen Perspektiven widmen – sei dies aus philosophischer, politischer, künstlerischer oder naturwissenschaftlicher Sicht.





Nordostflanke des Dzhimarai-Khokh sowie der Kolka-Gletscher nach dem Ereignis 2002 in Nordostseiten (Foto: Igor Galushkin, 2002)