

Jahrestagung der SGMG 2003 in Erstfeld

Turbulenzen in der Geomorphologie

Organisiert von der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich



Der Fidazer Felssturz von 1939: Analyse & Simulation

Vendelin Cabernard, Markus Stoffel, Michel Monbaron

ABSTRACT

On April 10th, 1939, a large rockslide occurred close to the village of Fidaz (Flims), killing 18 people. The study presented here aims at re-analyzing this event with contemporary documents. Eyewitness reports, photographs and maps were taken into consideration to reconstruct the Fidaz rockslide and to determine mean velocities of the sliding masses. Furthermore, digital elevation models (DEM) were used to model the topography before and after the event. The resulting difference model allowed detailed evaluation of eroded and deposited volumes. As the movement of rockslides apparently behaves like flowing avalanches, we decided to simulate the Fidaz rockslide with the flowing avalanche models AVAL-1D and AVAL-2D. Simulations furnish reasonable results, showing that the distance rock masses reached during the rockslide event in 1939 (ca. 1720 m) only differs by 30 m from the modelled event. As for the 2D simulation, realistic results were obtained for the flow direction and the lateral extension of rock masses. Nevertheless, further analyses on past and recent rockslides have to follow to more precisely calibrate parameters for future modelling.

ZUSAMMENFASSUNG

Am 10. April 1939 ging auf dem Gebiet des Dorfes Fidaz (Flims) ein mächtiger Felssturz nieder, 18 Personen fanden den Tod. Die vorliegende Studie hat zum Ziel, diesen Felssturz mit zeitgenössischen Dokumenten neu aufzurollen. Dazu wurden Augenzeugenberichte, Bilder und Karten zur Rekonstruktion des Felssturzes herangezogen und Berechnungen zur mittleren Geschwindigkeit der Sturzmasse angestellt. Mit digitalen Höhenmodellen (DHM) wurden die topographischen Verhältnisse vor und nach dem Ereignis modelliert sowie die Absturz- und Ablagerungsmassen bestimmt (Differenzmodell). Aufgrund der fließähnlichen Bewegung wurde der Felssturz von Fidaz alsdann mit den Fließlawinenmodellen AVAL-1D und AVAL-2D simuliert. Die Simulationen lieferten realitätsnahe Ergebnisse: Bei einer „Fließlänge“ von mehr als 1700 m wich die eindimensionale Simulation um lediglich 30 m von der tatsächlichen Fahrböschung ab. Bei der zweidimensionalen Simulation lieferten vor allem die Fließrichtung und die seitliche Ausbreitung der Sturzmasse realitätsnahe Ergebnisse. In Zukunft müssten vermehrt Analysen an Ablagerungen durchgeführt werden, damit noch verlässlichere und felssturzspezifischere Parameter für die Realisierung von Modellversuchen hergeleitet werden können.

Keywords: Felssturz, Simulation, Fließlawinenmodelle AVAL-1D / -2D, Fidaz (Graubünden)

1. Einleitung

Blockschutthalde, Fels- und Bergsturzkegel sind im Landschaftsbild der Alpen allgegenwärtig. Nebst dem Niedergang von Einzelblöcken (z. B. Kienholz et al. 1988, Stoffel et al. submitted) traten in den letzten Jahren namentlich in Randa VS (Schindler et al. 1993) und in Felsberg GR (Deflorin et al. 2001) mächtige Felsstürze auf und verursachten teils beachtliche Schäden an Verkehrswegen und Siedlungsgebieten. Monographien zu Fels- und Bergstürzen umfassen die Beschreibung und Analyse vergangener Ereignisse (z.B. Abele 1974, Eibacher & Clague 1984, Heim 1932) oder die Dynamik des Prozesses (Erisman & Abele 2001). Nebst der Analyse der Ursachen (Chen et al. in press) richten neuere Untersuchungen das Augenmerk vermehrt auf Simulationsmodelle, um Aussagen über den Zeitpunkt des Absturzes (Crosta & Agliardi 2002, Kilburn & Petley in press), mögliche Folgen (Bhasin & Kaynia in press) oder die Reichweite (Meissl 1998, Okura et al. 2003) grosser Felsmassen zu eruieren.

Untersuchungen zur Reichweite und Geschwindigkeit von Fließlawinen und Felsstürzen deuten zudem darauf hin, dass zwischen der Fließbewegung der Lawine und dem Verhalten von Felsstürzen Gemeinsamkeiten bestehen (Erisman & Abele 2001, Körner 1975, Meissl 1998). In ähnlicher Weise stellte bereits Heim (1932) fest, dass beim Bewegungsablauf von Felsstürzen „ein gemeinsames Fließen der ganzen Masse“ auftritt (Heim 1932: 82). Abele (1974: 67) wiederum sah in der „geschlossenen Form und der scharfen Umgrenzung der Ablagerungen“ Parallelen zwischen den beiden Prozessen.

Aufgrund der vorgenannten Ähnlichkeiten im Prozessverhalten von Felsstürzen und Fließlawinen soll in der vorliegenden Arbeit versucht werden, den historischen Felssturz von Fidaz (1939) mit einem Fließlawinenmodell zu simulieren. Dafür werden in einem ersten Schritt die Absturz- und Ablagerungsmassen bestimmt und die mittlere Geschwindigkeit der Sturzmasse rekonstruiert. Diese Werte werden anschliessend als Eingangsparameter für die Simulation mit den Fließlawinenmodellen AVAL-1D und -2D herangezogen.

2. Der Fidazer Felssturz

Der für die Simulation verwendete Felssturz hat sich in unmittelbarer Nähe des Dorfes Fidaz GR zugetragen, welches zum Gemeindegebiet von Flims gehört. Das Landschaftsbild des Testgebiets ist geprägt von den Ablagerungen des Flimser Bergsturzes (Heim 1932). Daneben lassen sich im Gebiet verschiedene Felssturzkegel erkennen, von denen sich – nebst dem untersuchten Felssturz von Fidaz – mindestens fünf grössere Ereignisse nach 1500 zugetragen haben (Cabernard 2003).

Beim Fidazer Felssturz brachen am 10. April 1939 gegen 11.45 Uhr nordöstlich von Fidaz riesige Gesteinsmassen aus den Malmkalken des Flimsersteins ab. Die zu Tale donnernden Felsmassen zerstörten ein Kinderheim und forderten

18 Todesopfer. Unmittelbar vor dem Hauptabsturz brachen kleinere Felspartien los und kündigten den bevorstehenden Felssturz an (Niederer 1939/40).

Die Felsmassen, die sich während des Felssturzes aus der vertikalen Wand oberhalb Fidaz (1600 und 1800 m ü. M.) gelöst hatten, wurden von Eisbacher & Clague (1984) auf rund 100'000 m³ geschätzt, die abgelagerte Masse aufgrund der Auflockerung des Untergrunds und des mitgeschleppten Fremdmaterials auf rund 400'000 m³. Der Endpunkt der Ablagerungen des Felssturzes befindet sich auf 1064 m ü. M. Auf beiden Seiten der Hauptablagerungen wurden deutlich sichtbare Randwälle aufgeworfen. Einzelne mitgeschleppte Blöcke wiesen ein Volumen von mehr als 500 m³ auf. Von den ersten Anzeichen des Abbruchs bis zum völligen Stillstand der Massen sollen je nach Angaben weniger als 2 (Eisbacher & Clague 1984: 204) beziehungsweise 1½ Minuten (Niederer 1939/40: 10) verstrichen sein.



Abbildung 1: Der Fidazer Felssturz vom 10. April 1939. Das Bild entstand, als die abstürzenden Massen zum Stillstand kamen (Photo: R. Bezzola).

3. Methoden

Die vorliegende Arbeit zum Fidazer Felssturz umfasste zwei Phasen. In einem ersten Teil wurden der Felssturzablagerungen im Gelände kartiert und einzelne Parameter der Massenbewegung von 1939 rekonstruiert. Dazu gehörten unter anderem eine erneute Bezifferung der mobilisierten Massen im Anrissgebiet und die Berechnung des abgelagerten Materials auf dem Felssturzkegel. Mit der Analyse von Photographien des Absturzes wurden annäherungsweise die Dauer und die mittlere Geschwindigkeit des Felssturzes eruiert. Die in dieser Phase gewonnenen Erkenntnisse flossen alsdann in die Fliesslawinenmodelle AVAL-1D und AVAL-2D ein, mit Hilfe derer der Felssturz von Fidaz simuliert wurde.

3.1 Abbruch- und Ablagerungsmassen – eine Felssturzbilanz

Die Abbruch- und Ablagerungsmassen des Fidazer Felssturzes wurden mittels eines Differenzmodells und Geländearbeit bestimmt. Zu diesem Zweck wurden die Höhenlinien der topographischen Karten (Massstab 1: 10'000) von 1888 und 2001 mit dem Programm ArcView 3.1 (ESRI 2003) digitalisiert und je ein Modell (DHM) für die Situation vor und nach dem Felssturz erarbeitet (Äquidistanz: 10 m). Danach wurden die zwei DHM überlagert und ein Differenzmodell gerechnet. Die auftretenden Höhenunterschiede wurden alsdann mit den implizierten Oberflächen multipliziert und daraus Abbruch- und Ablagerungsvolumina abgeleitet. Zudem wurde der Anteil des Felssturzschurfs abgeschätzt, der während des Fidazer Felssturzes mobilisiert wurde. Im Hinblick auf die Felssturzsimulation wurden die Resultate des Differenzmodells auch für die Bestimmung der Sturzbahn herangezogen.

3.2 Bestimmung der Geschwindigkeit des Felssturzes

Auf Photographien, die während des Felssturzes entstanden sind, wurden gut sichtbare Einzelblöcke identifiziert und deren Verschiebung zwischen den Aufnahmen berechnet. Da die Aufnahmen gemäss Augenzeugenberichten in einem Abstand von 5 Sekunden entstanden, konnten aus der Analyse zum Verhalten einzelner Blöcke eine mittlere Geschwindigkeit abgeschätzt werden.

3.3 Felssturzsimulation mit AVAL-1D und AVAL-2D

Aufgrund der in Kapitel 1 beschriebenen Parallelen zwischen Fliesslawinen und Felsstürzen wurden sowohl für die ein- wie die zweidimensionale Simulation des historischen Felssturzes von Fidaz die Fliesslawinenmodelle AVAL-1D und AVAL-2D eingesetzt. Die Modelle für flächige Fliesslawinen beruhen auf den Berechnungen von Voellmy (1955), in dessen Gleichung die Geschwindigkeit in Abhängigkeit zur zurückgelegten Fliesstrecke x gesetzt wird:

$$v^2 = d \xi (\sin \psi - \mu \cos \psi) (1 - e^{-2g x / (d \xi)})$$

wobei gilt:

μ = Widerstandskoeffizient der trockenen (inneren) Reibung

ξ = Widerstandskoeffizient der turbulenten (äusseren) Reibung

d = Fliesshöhe g = Erdbeschleunigung ψ = Gefälle

v^2 = konstante Geschwindigkeit der Lawine, x = zurückgelegte Fliesstrecke

$(1 - e^{-2g x / (d \xi)})$ = Beschleunigung der Bewegung

Die vorgängig bestimmten Werte zur Anrissmächtigkeit, -fläche, Abrissmasse, Sturzbahnlänge sowie der Wert der Materialdichte wurden als Eingangswerte ins Fliesslawinenmodell AVAL-1D eingelesen. Da das verwendete Lawinenmodell während der Simulation kein Fremdmaterial aufnehmen kann, musste der beim Felssturz auftretende Schurf in die Abrissmasse integriert werden. Für die Widerstandskoeffizienten der inneren Reibung μ wie der äusseren Reibung ξ , wel-

che die Auslaufdistanz wie auch die Geschwindigkeit stark beeinflussen, musste für den Prozess Felssturz auf eine stark begrenzte Anzahl existierender Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Für die eindimensionale Simulation des Felssturzes (AVAL-1D) kam ein Widerstandskoeffizienten ξ von $5'000 \text{ m/s}^2$ zur Anwendung (Erfahrungswert SLF, pers. Mitt. P. Bartelt). Da beim Felssturz von einer minimalen äusseren Reibung ausgegangen wird, liegt der gewählte Faktor deutlich über den für flächige Fliessschneelawinen benutzten Werten, die sich normalerweise zwischen 1000 und 2500 m/s^2 bewegen.

Bei der inneren Reibung μ wurde aufgrund der grossen Dichte des stürzenden Materials ein Wert von 0.3 gewählt (Erfahrungswert SLF, pers. Mitt. P. Bartelt). Nachdem die 1D-Simulation mehrmals mit einem wahrscheinlichen Wert für die innere Reibung μ durchgeführt wurde, konnte der wahre Wert von μ aus den Ergebnissen abgeleitet werden. Beim zweidimensionalen Modell griffen wir für die Koeffizienten μ und ξ auf jene Werte zurück, die sich bei der Simulation mit dem eindimensionalen Modell bewährt hatten. Weitere Informationen zu den Davoser Lawinenmodellen können unter Bartelt et al. (1999a, b) nachgelesen werden.

4. Resultate

4.1. Felssturzbilanz

Beim Felsabsturz aus der vertikalen Wand zwischen 1600 und 1800 m ü. M. löste sich das Material auf einer mittleren Breite von 75 m (unten: 100 m , oben: 50 m), was einer Abrissfläche von $15'000 \text{ m}^2$ entspricht. Aufgrund der im Ablagerungsgebiet vorkommenden Blockgrössen (Kantenlängen bis zu 9 m) und unter der Annahme, dass die Mächtigkeit im oberen Bereich des Felsabsturzes 4.5 m nicht übertroffen hat (Niederer 1939/40), wird eine mittlere Mächtigkeit von 7 m angenommen. Daraus ergibt sich für den Felssturz ein berechneter Absturz in der Grösse von etwa $100'000 \text{ m}^3$. Somit decken sich die hier durchgeführten Berechnungen zur Absturzmasse mit den Ergebnissen von Eisbacher & Clague (1984: 204).

Die abstürzenden Felsmassen ($100'000 \text{ m}^3$) mobilisierten insbesondere beim Aufprall auf den Fuss des Flimsersteins (ca. 1380 bis 1600 m ü. M.) weiteres Material. Wie aus dem Differenzmodell in Abbildung 2 ersichtlich wird, dürften aus diesem Bereich in etwa $297'000 \text{ m}^3$ Felssturzscherf mobilisiert worden sein. Im Ablagerungsgebiet weist das in Abbildung 2 dargestellte Differenzmodell hingegen eine abgelagerte Masse von rund $723'000 \text{ m}^3$ aus. Damit werden die von Eisbacher & Clague (1984) abgeschätzten Volumina ($400'000 \text{ m}^3$) deutlich übertroffen.

Die Ablagerungen der Felsmassen weisen teils beachtliche Unterschiede in der seitlichen Ausdehnung auf. Während die Sturzbahn am Fusse des Flimsersteins lediglich 100 m aufweist, erreicht sie auf 1360 m ü. M. eine maximale Breite von rund 350 m . Diese Kote entspricht in etwa dem Beginn des Ablagerungsgebietes (siehe Abb. 2). Die auf dem Rücken des Fidazer Felssturzes gemessene Sturbahnlänge (A – A') beträgt 1722 m .

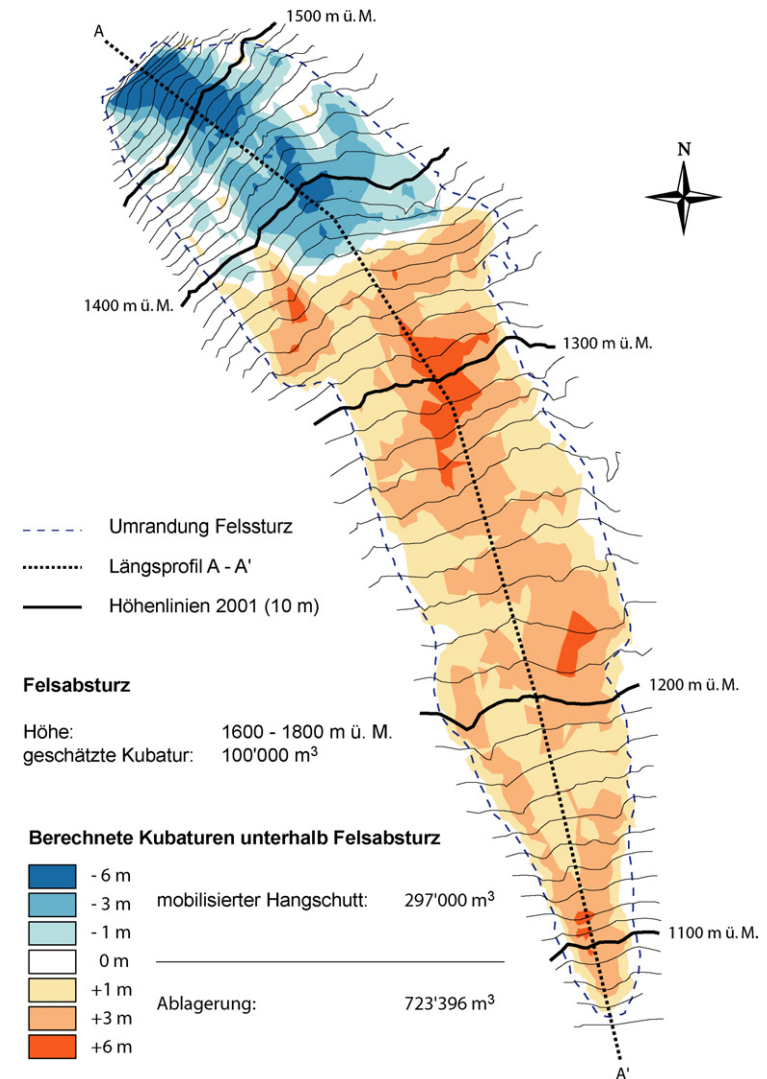


Abb. 2: Differenzmodell der Oberflächen vor und nach dem Fidazer Felssturz. Die Berechnungen basieren auf digitalisierten Höhenkurven der LK 1:10'000 aus den Jahren 1888 und 2001.

4.2. Geschwindigkeit des Felssturzes

Bei der Analyse der photographischen Aufnahmen des Felssturzes in Abbildung 3 wird ersichtlich, dass sich der als Referenzpunkt verwendete Block zwischen den um rund 5 Sekunden verschobenen Aufnahmen um 125 m bewegt hat. Falls die vom Urheber der Photographien gemachten Zeitangaben stimmen, dann kann im betrachteten Sektor von einer mittleren Geschwindigkeit von 25 m/s ausgegangen werden. Unter der Annahme, dass dieser Wert einer mittleren Geschwindigkeit entspricht, ergäbe sich im vorliegenden Fall vom Abbruch der Felssturzmassen bis zum Stillstand eine Sturzdauer von knapp 70 Sekunden.

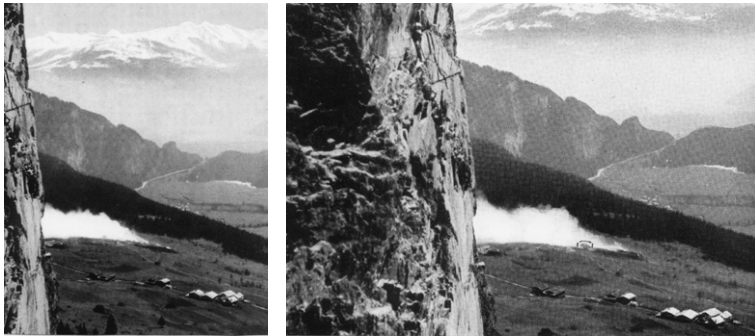


Abbildung 3: Bilder des Fidazer Felssturzes, entstanden in einem Abstand von etwa 5 Sekunden. Zur Abschätzung der Geschwindigkeit wurde die Bewegung eines grossen Einzelblockes (Kreis) untersucht (Photos: R. Bezzola).

4.3 Felssturzs simulation

Die in den vorausgegangenen Kapiteln berechneten Werte dienen als Grundlage für die Simulation der Massenbewegung vom 10. April 1939, die mit den zwei Fliesslawinenmodellen AVAL-1D und AVAL-2D durchgeführt wird.

4.3.1 Eindimensionale Simulation mit AVAL-1D

Das eindimensionale Fliesslawinenmodell AVAL-1D liefert Resultate zur Dauer, maximalen Geschwindigkeit, Länge und Breite der Sturzbahn sowie zur Fliesshöhe des Felssturzes.

Bei der Simulation verstreichen vom Moment des Auslösens des Felssturzes (inkl. mitgeschlepptes Fremdmaterial) bis zum Stillstand der Felssturzmassen rund 60 Sekunden. Wie aus Abbildung 4A hervorgeht, wird die maximale Geschwindigkeit in 1600 m ü. M. erreicht, wo sie rund 55 m/s (200 km/h) beträgt. Dann nimmt die Geschwindigkeit im Modell stark ab und erreicht auf 1350 m ü. M. rund 27 m/s (100 km/h). Während die Geschwindigkeit auf den nachfolgen-

den 100 Höhenmetern zuerst wieder leicht zunimmt, geht sie im weiteren Verlauf mehr oder weniger linear zurück.

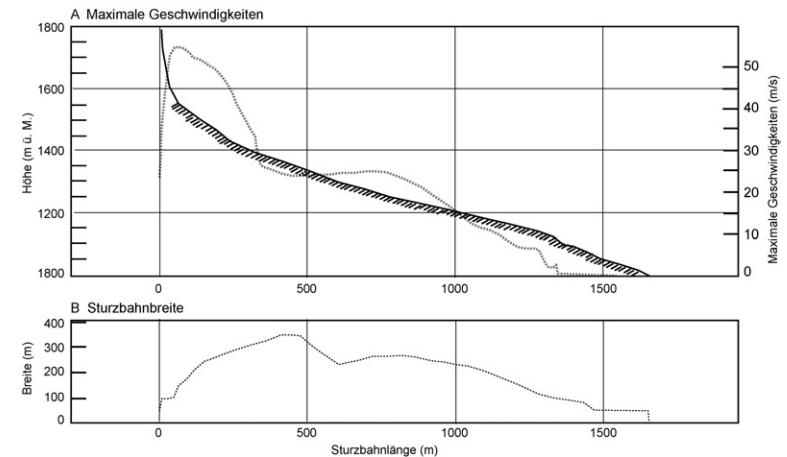


Abbildung 4: (A) Maximale Geschwindigkeiten der Felssturzmassen und (B) Breite der Sturzbahn des Fidazer Felssturzes im Modell AVAL-1D.

In der Zone, in welcher der Fidazer Felssturz bei seinem Abgang im Jahre 1939 zum Stillstand kam, erfolgt auch im Modell AVAL-1D eine abrupte Abnahme der Geschwindigkeit. Mit dem gewählten Widerstandskoeffizienten μ von 0.3 (innere Reibung) kommt der Felssturz im Modell rund 30 m oberhalb der tatsächlichen Felssturzf front zum Stillstand (Länge der Sturzbahn im Modell: 1690 m). Die mittlere Geschwindigkeit, als Quotient von Sturzbahnlänge und Zeit berechnet, beträgt für den gesamten Sturzprozess 28.7 m/s (103.3 km/h).

Die maximale Breite der Sturzbahn wird – wie aus Abbildung 4B ersichtlich – zwischen 1400 und 1300 m ü. M. erreicht (ca. 320 m). In demselben Bereich treten auch die maximalen Fliesshöhen auf, die im Modell 14 m betragen. Die mittlere Fliesshöhe fällt wesentlich tiefer aus und bewegt sich um 7 m.

4.3.2 Zweidimensionales Simulation mit AVAL-2D

Die Simulation mit dem zweidimensionalen Fliesslawinenmodell AVAL-2D liefert Ergebnisse zur seitlichen Ausdehnung, der maximalen Ablagerungshöhen und der maximalen Geschwindigkeiten des Felssturzes.

Die Simulation mit dem zweidimensionalen Lawinenmodell liefert insbesondere bei der seitlichen Ausbreitung und der Fliessrichtung der Sturzmasse realitätsnahe Resultate. Die maximalen Ablagerungshöhen zeichnen sich im Modell durch eine starke Abnahme der Werte in der Falllinie aus. Wie aus Abbildung 5 ersichtlich wird, treten bei der Simulation des Fidazer Felssturzes im Bereich des Primär- und des Sekundäranrisses Ablagerungshöhen von bis zu 25 m auf,

am Rand der Ablagerungen und an der Front hingegen nur Werte zwischen 0.3 und 1 m.

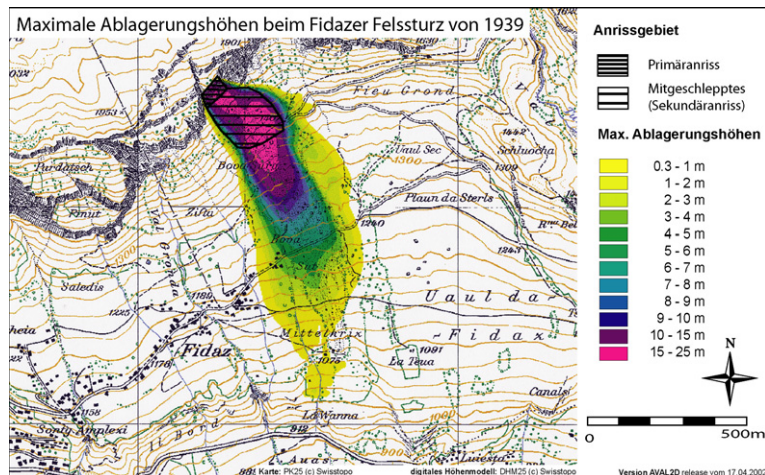


Abbildung 5: Räumliche Verteilung der maximalen Ablagerungshöhen beim Fidazer Felssturz. Simulation mit dem Fliesslawinenmodell AVAL-2D.

Bei der Simulation der maximalen Geschwindigkeiten fallen erneut die hohen Werte im Bereich des Primäranrisses auf. Die Simulation weist für diese Zonen Geschwindigkeiten von bis zu 60 m/s aus und deutet auf einen (nahezu) freien Fall des Materials hin. Ebenso vermag die Simulation die stärkere Bremsung der Sturzmassen in den Randbereichen darzustellen, wo Geschwindigkeiten zwischen 5 und 15 m/s auftreten.

5. Diskussion

Die vorliegende Arbeit basiert auf der Annahme, dass flächige Fliesslawinen wie auch Felsstürze aufgrund ihres Fliessverhaltens mit sogenannten Voellmy-Differentialgleichungen berechnet und mit darauf basierenden Lawinenmodellen simuliert werden können. Die Simulation des Fidazer Felssturzes mit den Fliesslawinenmodellen AVAL-1D und AVAL-2D hat gezeigt, dass die im Gelände und mit Hilfe des Differenzmodells rekonstruierten Felssturzparameter vor allem mit den Resultaten des 1D-Fliesslawinenmodells übereinstimmen. Im Gegensatz dazu wichen die Ergebnisse des 2D-Modells stärker von den realen Gegebenheiten ab.

Zur Dauer des Fidazer Felssturzes existieren teils beachtliche Unterschiede in den Daten. Einerseits variieren die Augenzeugenberichte (Niederer 1939/40: 8), welche den Prozess auf ein bis zwei Minuten schätzten. Bei der Abschätzung der Geschwindigkeit anhand von Photos wurde die Dauer auf 70 Sekunden

festgelegt, bei der Modellierung des Felssturzes kamen die Trümmersmassen nach 60 Sekunden zum Stillstand. Ein Erklärungsansatz ist sicherlich darin zu suchen, dass die angewandten Modelle das Mitreissen von Fremdmaterial nicht berücksichtigen können, d.h. das mitgeschleppte Material als Teil der Abbruchmasse angesehen werden musste.

Andererseits weisen auch die beiden DHM Mängel auf, das Kartenmaterial aus dem Jahre 1888 nicht sehr präzise war. Bei den digitalisierten Höhenlinien muss daher von Abweichungen im Meterbereich ausgegangen werden. Diese Tatsache dürfte einer der Gründe für die beachtlichen Unterschiede zwischen den im Differenzmodell berechneten Werte für die abgestürzten und geschürften Massen einerseits und den abgelagerten Volumina andererseits sein. Daneben kann aber auch davon ausgegangen werden, dass beim Felssturz sowohl die primäre Absturzmasse wie auch das mitgeschleppte Material aufgelockert wurden. Im Rahmen dieser Arbeit bleibt jedoch unbeantwortet, inwiefern die Auflockerung beziehungsweise Mängel in der Güte des Kartenmaterials die beachtlichen Unterschiede ausmachen.

Schliesslich wird bei der Modellierung des Fidazer Felssturzes von konstanten Dichtewerten und Widerstandskoeffizienten ausgegangen. Es stellt sich die Frage, ob die Wahl von konstanten Dichten bei Felssturzsimulationen sinnvoll ist, da die sich lösende Felscholle zerfällt und eine starke Durchmischung der Trümmer mit den mitgeschürften Schuttmassen und der Vegetation stattfindet. Andererseits zeigt sich, dass im Fliesslawinenmodell bei minimal abweichenden Widerstandskoeffizienten stark abweichende Ergebnisse auftreten können. So bewirkt etwa der Geländeknick bei der Felssturzfront auf 1100 m ü. M., dass bei minimal veränderten Werten (0.005) bei der inneren Reibung μ der Felssturz in diesem Abschnitt kritischer Hangneigung erneut eine Beschleunigung erfährt.

6. Schlussfolgerungen

Der Fidazer Felssturz konnte mit Hilfe der Fliesslawinenmodelle AVAL-1D und AVAL-2D realitätsnah simuliert werden. Eine mehrfache Wiederholung der Simulation erlaubte eine optimale Eichung des Modells, so dass die Werte der stromrelevanten Parameter festgelegt werden konnten. Um in Zukunft noch bessere Resultate zu erhalten, müssen allerdings Verbesserungen am Modell vorgenommen werden. So müsste der kritischen Hangneigung im Auslaufgebiet im Modell mehr Beachtung geschenkt und die Aufnahme von Fremdmaterial während des Fliessvorgangs ermöglicht werden. Zudem zeigte sich, dass für eine genaue Vorhersage von Fliessgeschwindigkeit und Reichweite der „Gesteinslawinen“ die Widerstandskoeffizienten μ und ξ eine entscheidende Rolle spielen. Gerade bei Felsstürzen sind Erfahrungswerte erst in bescheidenem Masse vorhanden und kaum in der Praxis überprüft. In nächster Zukunft müssen daher weitere Felsstürze untersucht werden, um noch verlässlichere und felssturzspezifische Parameter herleiten zu können.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei Hans Rudolf Keusen und Robert Pfeifer von der Geotest AG (Zollikofen) für die wertvolle Hilfe bei der Erstellung der digitalen

Höhenmodelle und des Differenzmodells. Daneben gebührt Marc Christen und Marc Schär vom Eidgenössischen Institut für Schnee- und Lawinenforschung in Davos unser Dank für die Unterstützung bei der Simulation mit den Fließlawinenmodellen AVAL-1D und AVAL-2D. Ein herzliches Vergelt's Gott gebührt auch Gieri Seeli und den noch lebenden Augenzeugen. Zu guter Letzt bedanken sich die Autoren auch bei Christoph Hegg für das kritische Review.

Literatur

- Abele, G. 1974. Bergstürze in den Alpen – ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte* 25: 1 -165.
- Bartelt, P., Christen, M., Gruber, U. & Issler, D. 1999a. *AVAL-1D – numerische Berechnung von Fließ- und Staublawinen*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- Bartelt, P., Gruber U. & Margreth, S. 1999b. *Anleitung zur Berechnung von Fließlawinen*. Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- Bhasin, R. & Kaynia, A.M. in press. Static and dynamic simulation of a 700-m high rock slope in western Norway. *Engineering Geology*.
- Cabernard, V. 2003. Der Fidaser Felssturz (1939): *Analyse und Simulation der Massenbewegung*. Diplomarbeit. Geographisches Institut der Universität Fribourg, Fribourg (unveröffentlicht).
- Chen, T.C., Lin, M.L. & Hung, J.J. in press. Pseudostatic analysis of Tsao-Ling rockslide caused by Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology*.
- Crosta, G.B. & Agliardi, F. 2002. How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides. *Physics and Chemistry of the Earth* 27: 1557-1565.
- Deflorin, R., Tschirky, A. & Rageth, M. 2001. Jahrhundertsturz Felsberg. *Amt für Wald Graubünden, Faktenblatt* 8, Chur.
- Eisbacher, G.H. & Clague, J.J. 1984. Destructive Mass Movements in High Mountains: Hazard and Management. *Geological Survey of Canada*, Paper 84 – 16.
- Erismann H. T. & Abele, G. 2001. *Dynamics of Rockslides and Rockfalls*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- ESRI, 2003. ArcView. <http://www.esri.com/software/arcgis/arcview/>
- Heim, A. 1932. Bergsturz und Menschenleben. *Vierteljahresschrift der Naturf. Ges. Zürich* 77: 1-218.
- Kienholz, H., Mani, P. & Kläy, M. 1988. Rigi Nordlehne. Beurteilung der Naturgefahren und waldbauliche Prioritätenfestlegung. *Interpraevent* 1988, Band 1: 161-174.
- Kilburn, C.R.J. & Petley, D.N. in press. Forecasting giant, catastrophic slope collapse: lessons from Vajont, Northern Italy. *Geomorphology* 1342: 1-12.
- Körner, J.H. 1975. The reach and velocity of catastrophic landslides and flowing snow avalanches. *Rock Mechanics* 8: 225-256.
- Meissl, G. 1998. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. *Innsbrucker Geographische Studien* 28. Innsbruck.
- Niederer, J. 1939/40: Der Felssturz am Flimserstein. *Naturf. Ges. Graubündens* 77: 1-27.

- Okura, Y., Kitahara, H., Kawanami, A. & Kurokawa, U. 2003. Topography and volume effects on travel distance of surface failure. *Engineering Geology* 67: 243-254.
- Schindler, C., Cuénod, Y., Eisenlohr, T. & Joris, Ch.-L. 1993. Die Ereignisse vom 18. April und 9. Mai 1991 bei Randa (VS) – ein atypischer Bergsturz in Raten. *Eclog. Geol. Helv.* 86/3: 643-665.
- Stoffel, M., Lièvre, I., Monbaron, M. & Perret, S. submitted. Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach. *Zeitschrift für Geomorphologie*.
- Voellmy, A. 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweiz. Bauzeitung* 73: 159-285.

Adresse der Autoren

Vendelin Cabernard, Splécs, 7166 Trun

Markus Stoffel, Michel Monbaron, Departement für Geowissenschaften, Einheit Geographie, Universität Fribourg, chemin du Musée 4, 1700 Fribourg