

# Felsstürze – Sturzprozess

Alexander Preh

Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie, Karlsplatz 13, 1040 Wien.  
alexander.preh@tuwien.ac.at

## Einleitung

Bei der Beurteilung der Stabilität von Felsböschung und der von diesen gravitativen Naturgefahren ausgehenden Gefährdungen ist es einerseits erforderlich den vorherrschenden Versagens- bzw. Ablösemechanismus und das dem Mechanismus zugrundeliegende mechanische Modell zu bestimmen (siehe Beitrag Poisel „Felsstürze – Ablösemechanismen“) und andererseits die Sturzweite (RunOut) des aus dem Abbruchereignis resultierenden Sturzprozesses abzuschätzen.

Abbruch und Sturzprozess sind miteinander gekoppelte Prozesse. Ein ideales Modell (Universalmodell) müsste in der Lage sein, diese beiden teilweise sehr unterschiedlichen Prozesse abzubilden. Da wir aber noch über kein zufriedenstellendes Universalmodell verfügen, müssen derzeit diese Prozesse noch getrennt behandelt werden.

## Massenstürze (Fels- und Bergstürze)

In vielen gebirgigen Regionen weltweit sind von Felsböschungen ausgehende Sturzprozesse eine häufig auftretende Prozessgruppe, die Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährden. Diese Prozessgruppe lässt sich in Einzelabstürze (Steinschlag/Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz/ Bergsturz) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zwischen einem Einzelabsturz und einem Massensturz ist, dass sich beim Massensturz eine zusammenhängende Felsmasse ablöst, die im Laufe des Ablöse- und Sturzprozesses in zahlreiche Blöcke fraktioniert. Bei größeren Felsstürzen und Bergstürzen (Felslawinen) beeinflusst die Interaktion der Komponenten untereinander maßgeblich die Bewegung der Sturzmasse („Sturzstrom“, Heim 1932).

Generell wird beobachtet, dass mit dem Abbruchvolumen die Mobilität der Sturzmasse steigt. Dies wird oft damit erklärt, dass die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten (d.h. dass das Verhalten als Sturzstrom) mit dem Volumen zunehmen. Neben dem Abbruchvolumen haben aber auch die Beschaffenheit der Sturzbahn und die Morphologie des Geländes einen maßgeblichen Einfluss auf die Mobilität der Sturzmasse. Hsü (1975) gibt ca.  $1 \times 10^6 \text{ m}^3$  als Grenzvolumen für die Bewegung als „Sturzstrom“ (Felslawine) an.

Abbildung 1 zeigt den bekannten „Felssturz“ von Dürnstein. Abbildung 2 zeigt im Vergleich den Bergsturz „Frank Slide“ in Alberta (Kanada) mit einer extremen Sturzweite von 2 km aufgrund seines Abbruchsvolumens.



Abbildung 1: Felssturz Dürnstein (Biratalwand), Abbruchvolumen 11.000 – 15.000 m<sup>3</sup>.



Abbildung 2: Bergsturz „Frank Slide“ (Alberta, Kanada), Abbruchvolumen 36 Mio m<sup>3</sup> (Photo O. Hungr).

### Das Schlittenmodell nach Heim (1932)

Das Schlittenmodell nach Heim ist das einfachste und älteste Modell zur Abschätzung des Geschwindigkeitsverlaufs und der Reichweite von Massenstürzen (Felslawinen). Dabei wird die Sturzmasse als starrer (unverformbarer) zusammenhängender Gleitkörper (Schlitten) betrachtet. Die Abbildung 3 zeigt die grafische Anwendung des Schlittenmodells. Dabei wird der Schwerpunkt des Abbruchvolumens mit dem Schwerpunkt des abgelagerten Volumens verbunden. Diese Energielinie wird als Pauschalgefälle bezeichnet. Durch Anwendung des Energieerhaltungsgesetzes auf das Pauschalgefälle (Energielinie) kann der Geschwindigkeitsverlauf des Massensturzes abgeschätzt werden. Die erste Anwendung dieser Methode diente zur Rückrechnung des Bergsturzes von Elm (Schweiz, 1881).

Energieerhaltungsgesetz:  $E = T + V$

- E... Gesamtenergie
- T... kinetische Energie
- V... potentielle Energie

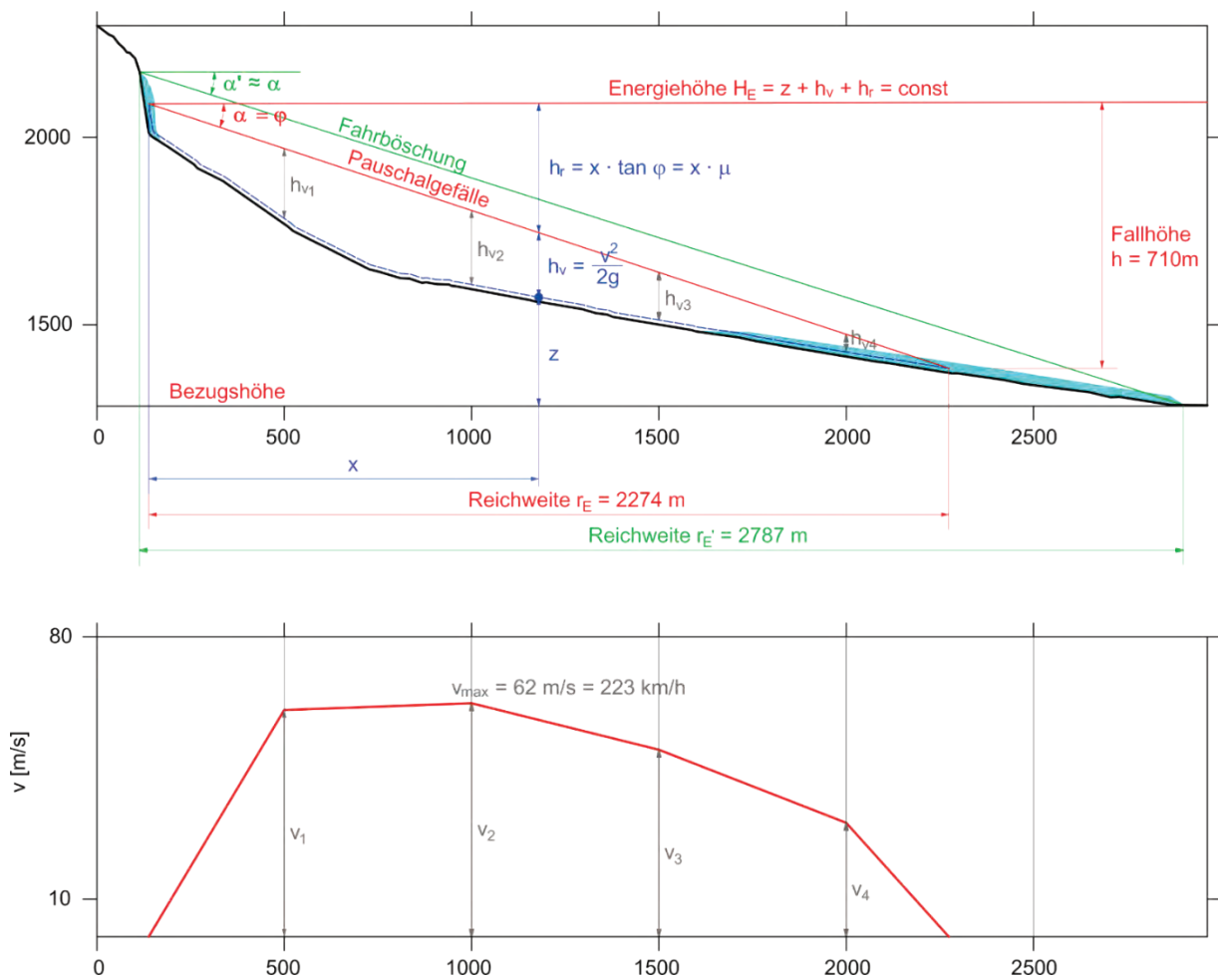


Abbildung 3: Berechnung des Geschwindigkeitsverlaufs mit Hilfe des Pauschalgefälles (Preh 2017).

Scheidegger hat 1973 einen Zusammenhang zwischen dem Bergsturzvolumen und dem Tangens des Fahrböschungswinkels  $\alpha$  ( $= \tan \varphi$ ) hergestellt. Mit Hilfe dieser empirischen Beziehung (Scheidegger Diagramm) und dem Schlittenmodell sind einfache Prognosen zur Abschätzung der Reichweite möglich.

## Numerische Rechenmodelle zur Abschätzung der Ausbreitung von Massenstürzen

Numerische Rechenmodelle unterscheiden sich vom Schlittenmodell nach Heim in erster Linie dadurch, dass sie die Deformation der Masse während des Sturzprozesses abbilden können.

Die numerischen Rechenmodelle zur Simulation von Felsmassenstürzen können grob in kontinuumsmechanische und diskontinuumsmechanische Modelle unterteilt werden.

### *Kontinuumsmechanische Modelle*

Bei den kontinuumsmechanischen Modellen wird das komplexe Material der Sturzmasse als äquivalente Flüssigkeit betrachtet (Hungar 1995, Abb. 4). Diese Berechnungsansätze basieren zumeist auf den St. Venantschen Bewegungsgleichungen, welche für die Analyse von instationären Strömungen in offenen Kanälen entwickelt wurden. Um eine dreidimensionale Berechnung zu ermöglichen wird bei diesen Modellen nach Savage & Hutter (1989) eine gemittelte konstante Geschwindigkeitsverteilung über die Höhe vorausgesetzt. Dieser Umstand stellt eine grobe Vereinfachung der natürlichen Verhältnisse dar, ist aber zulässig, solange die Höhe der Felslawine (Sturzstrom) klein gegenüber seiner lateralen Ausbreitung ist. Das Materialverhalten der Sturzmasse wird mit Hilfe von rheologischen Modellen zur Beschreibung der internen Deformation und des basalen Scherwiderstands abgebildet. Zur Modellierung des basalen Scherwiderstands wird in der Praxis zumeist das Materialmodell nach Voellmy eingesetzt, welches sowohl den Widerstand infolge Reibung in der Gleitfuge als auch geschwindigkeitsproportionale Widerstände (Turbulenz) berücksichtigt.

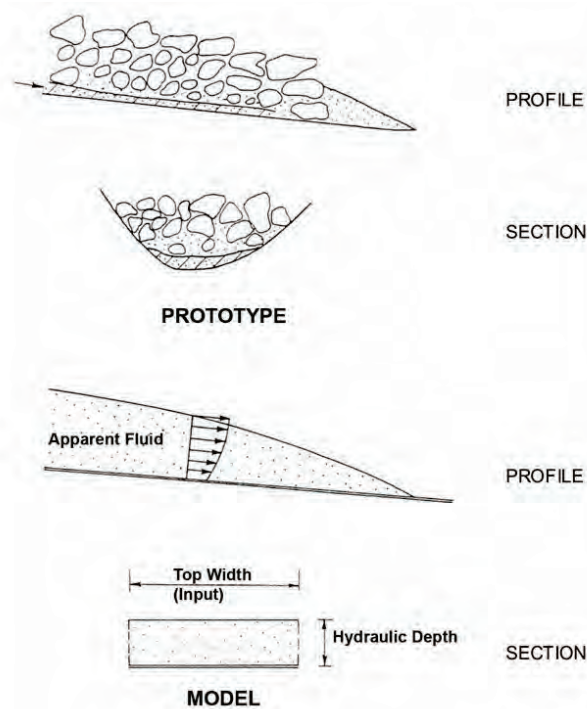


Abbildung 4: Schematische Darstellung des Konzepts der äquivalenten (scheinbaren) Flüssigkeit nach Hungar (1995).

Einen Überblick über die derzeit verfügbaren numerischen Modelle bietet z.B. die von Hungar et al. (2007) publizierte Liste.



Abbildung 5 zeigt die Gegenüberstellung der beobachteten und der mittels DAN3D rückgerechneten Ablagerungen bei der Felschneelawine Alptal (Preh& Sausgruber 2014).

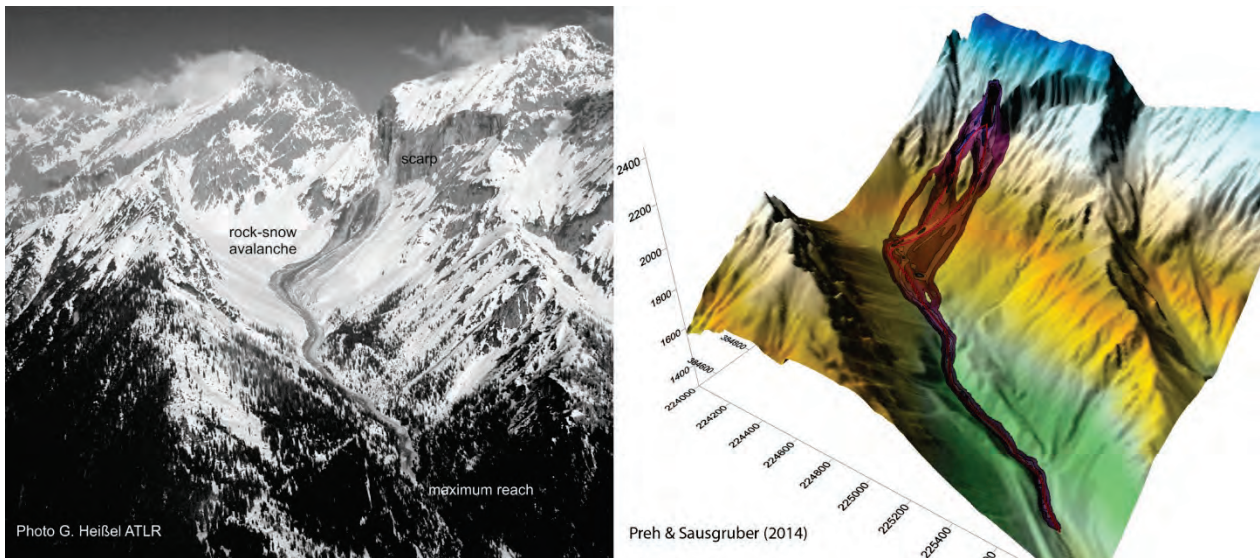


Abbildung 5: Modellierung der Felslawine Alptal mittels DAN3D (Preh & Sausgruber 2014).

### *Diskontinuumsmechanische Modelle*

Alle derzeit zur Verfügung stehenden diskontinuumsmechanischen Modelle zur Berechnung von Massenstürzen basieren auf der von Cundall (1971) entwickelten Diskrete-Elemente-Methode (DEM). Typische Vertreter der DEM sind der Particle Flow Code (PFC) und 3DEC der Itasca Consulting Group. Bei diesem Berechnungsansatz wird die Sturzmasse als Ansammlung von diskreten Elementen (Partikeln) modelliert und der feste Untergrund der Sturzbahn zumeist mit Hilfe von Wandelementen abgebildet. Der Sturzprozess wird dabei über das Kontaktverhalten der diskreten Elemente untereinander und mit der Sturzbahn kontrolliert (Preh & Poisel 2007).

Ein Vorteil der Betrachtung der Sturzmasse als Ansammlung diskreter Partikel ist darin begründet, dass die Dynamik von Massenstürzen (Interaktion der Partikel untereinander und mit dem Untergrund) besser abgebildet werden kann. Dies ist bei der Modellierung von kleineren Sturzmassen (Felsstürze, Abb. 6) als auch bei der Simulation des Auflaufens der Masse auf Barrieren (z.B. Schutzdämme) als Vorteil zu bewerten. Kontinuumsmechanische Berechnungen empfehlen sich aufgrund der größeren Anzahl an durchgeführten Rückrechnungen und ableitbaren Prognoseparametern.

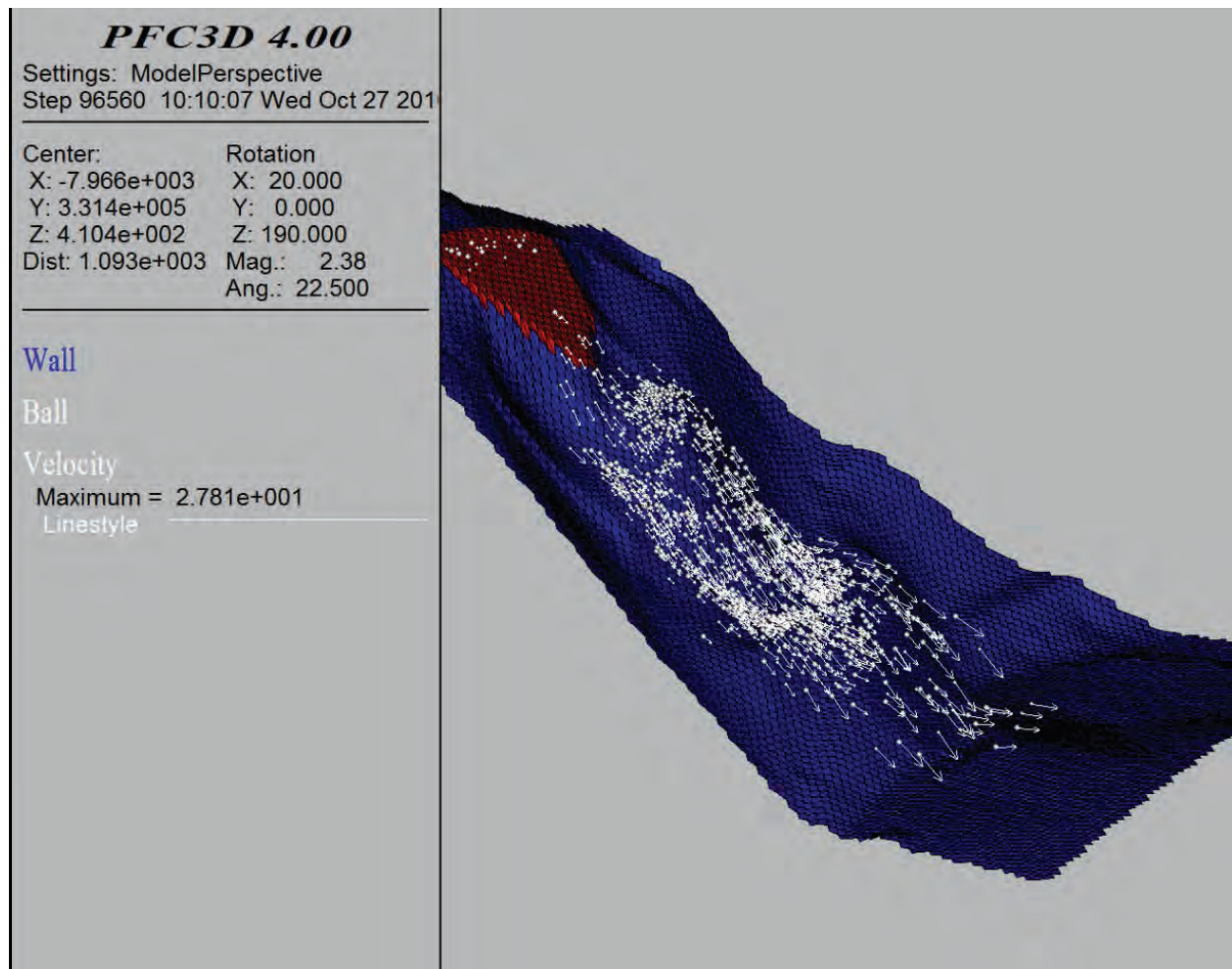


Abbildung 6: Modellierung eines Felssturzes mit einem Abbruchvolumen von 2500 m<sup>3</sup> mittels PFC3D, Rot: Abbruchsfläche, Weiß: Sturzmasse, Blau: Geländeoberfläche.

## Schlussfolgerungen

Derzeit existiert noch kein ideales Modell (Universalmodell) zur Berechnung von Abbruch und Sturzprozess. Daher muss bei der Beurteilung der von Felsböschungen ausgehenden Gefahr noch klar zwischen Abbruch und dem folgenden Sturzprozess unterschieden werden.

Die derzeit zur Verfügung stehenden numerischen Modelle zur Abschätzung der Ausbreitung von Fels- und auch Bergstürzen benötigen ein hohes mechanisches Wissen und Prozessverständnis. Sie werden folglich auch Großteils im universitären Bereich und bzw. in der Forschung eingesetzt.

Für die Praxis ist es jedoch wichtig, zwischen den einzelnen Prozessen richtig zu unterscheiden, um die richtigen Methoden/Experten für die jeweilige Situation einzusetzen. Mit Hilfe von Steinschlagberechnungen kann z.B. nicht die Reichweite von größeren Massenstürzen abgeschätzt werden, da sich die Massenstürze infolge der Block-Block-Interaktionen maßgeblich von Prozess Steinschlag unterscheiden.

## Literatur

- Cundall P.A. (1971): A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems", Proceedings Symposium Int. Soc. Rock Mech., Nancy Metz, Vol. 1, Paper II-8.
- Heim A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Fretz & Wasmuth, Zürich.
- Hungr O. (1995): A model for the runout analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. Canadian Geotechnical Journal, 32, 610–623.
- Hungr O., Morgenstern N.R. & Wong H.N. (2007): Review of Benchmarking Exercise on Landslide Debris Runout and Mobility Modelling. in: "Proceedings of the 2007 International Forum on Landslide Disaster Management", K. Ho et al. (Hrg.); 2 (2008), ISBN: 978-962-7619-30-7: 755–812.
- Hsü K.J. (1975): Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls, Geol. Soc. Am. Bull., 86, 129–140, 1975.
- Preh A. (2017): Rock Slopes: Detachment and Runout (Felsböschungen: Abbruch und Sturzprozess). Habilitationsvortrag, Technischen Universität Wien, Lehrbefugnis für das Fach „Angewandte Felsmechanik, Fakultät für Bauingenieurwesen, März 2017.
- Preh A. & Poisel R. (2007): 3D modelling of rock mass falls using the Particle Flow Code PFC3D. in: "Proceedings of the 11<sup>th</sup> Congress of the International Society for Rock Mechanics", issued by: ISRM; ISRM - International Society of Rock Mechanics, Lissabon 2007; paper 01-05.
- Preh A. & Sausgruber J.T. (2014): The Extraordinary Rock-Snow Avalanche of Alpl, Tyrol, Austria. Is it Possible to Predict the Runout by Means of Single-phase Voellmy- or Coulomb-Type Models? in: Lollino G., Giordan D., Crosta G.B., Corominas J., Azzam R., Wasowski J. & Sciarra, N. (eds.): Engineering Geology for Society and Territory - Volume 2, Landslides", Volume 2, 1907–1911, Springer International Publishing.
- Savage S.B. & Hutter K. (1991): Dynamics of avalanches of granular materials from initiation to run-out. Part 1: Analysis, Acta Mech., 86, 201–223.
- Scheidegger A.E. (1973): On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. Rock Mechanics, 5, 231–236.