

Steinschlagmodelle

Alexander Preh (1), Michael M \ddot{o} lk (2)

(1) Technische Universität Wien, Institut f \ddot{u} r Geotechnik, Forschungsbereich f \ddot{u} r Ingenieurgeologie, Karlsplatz 13, 1040 Wien. alexander.preh@tuwien.ac.at

(2) Wildbach- und Lawinerverbauung, Geologische Stelle, Wilhelm Greil Straße 9, Innsbruck. michael.moelk@die-wildbach.at

Problemstellung / Stand der Wissenschaft

Unter dem Prozess Steinschlag versteht man die Bewegung individueller Fels-Fragmente (Sturzbl \ddot{o} cke), die mittels episodischer Einschläge mit dem Untergrund interagieren (Evans & Hungr 1993, Hungr et al. 2014, Bourrier et al. 2013). Der Prozess beginnt im Allgemeinen mit dem Abbruch einzelner Bl \ddot{o} cke oder kleinerer Felsmassen (siehe Beitrag Poisel: Felsst \ddot{u} rze – Abl \ddot{o} semechanismus).

Prozessmodelle zur Simulation von Steinschlag (Steinschlagmodelle) existieren seit Mitte der 70er Jahre (z.B. Azimi & Desvarreux 1977, Piteau & Clayton 1977). Gegenwärtig steht eine große Anzahl von Modellen sowohl f \ddot{u} r zwei als auch f \ddot{u} r drei Dimensionen zur Verf \ddot{u} gung (f \ddot{u} r einen aktuellen Vergleich siehe Tabelle 1 nach Volkwein et al. 2011). Alle gegenwärtigen Modelle beschränken sich auf die Modellierung des eigentlichen Sturzprozesses, der initiale Abbruch (Disposition) wird in den Modellen nicht simuliert, sondern lediglich durch die Anfangsbedingungen (Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeiten) abgebildet. Daher ben \ddot{o} tigen alle Modelle als Eingabe die potentiellen Abl \ddot{o} sebereiche welche mit Hilfe anderer Methoden zu ermitteln sind.

Arten von Steinschlagmodellen

Die Prozessmodelle zur Berechnung bzw. Abschätzung der Reichweite und der Ausbreitung von Steinschlag werden unter anderem in 2D- und 3D-Modelle unterschieden.

Mittels 2D-Modellen k \ddot{o} nnen entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Trajektorien von Sturzbl \ddot{o} cken berechnet werden. 2D-Berechnungen (Energien, Reichweite, Sprungweite und Sprungh \ddot{o} hen) werden zumeist f \ddot{u} r die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (Netze, Dämme) auf der Hangskala (Objektebene) verwendet. 2D-Modelle k \ddot{o} nnen jedoch auch f \ddot{u} r die Ausweisung von Gefahrenzonen f \ddot{u} r gr \ddot{o} ere Hangabschnitte (kommunale Ebene, \ddot{o} rtliche Raumplanung) eingesetzt werden. Hierbei werden mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt und die Simulationsergebnisse (z.B. der Verlauf der kinetischen Energien) von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert (Melzner & Preh 2012). Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. 2D-Analysen haben dar \ddot{u} ber hinaus auch eine Bedeutung bei der \ddot{U} berpr \ddot{u} fung/Verifikation von 3D-Analysen.

Mit Hilfe von 3D-Modellen k \ddot{o} nnen flächendeckende Aussagen \ddot{u} ber die potentiellen Wirkungsbereiche von Steinschlagprozessen getroffen werden. Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erheblich erh \ddot{o} hte Aufwand f \ddot{u} r die flächendeckende Datenerhebung und Aufbereitung und zum anderen die Berechnungsdauer, die je nach Modellaufl \ddot{o} sung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen hoch sein kann.

Berechnungsansätze

Ein weiteres signifikantes Unterscheidungskriterium zwischen den unterschiedlichen Steinschlagmodellen ist der Berechnungsansatz, d.h. die mathematische Formulierung und programmtechnische Implementierung des Sturzblocks, des R \ddot{u} ckpralls (Dämpfung bzw. Restitution), der Oberflächenrauheit, des Rollwiderstands, etc.

Nach Ihrem Berechnungsansatz werden die Modelle grob in:

- Massenpunktmodelle („lumped mass approach“),
- Starrkörpermodelle („rigid body approach“) und in
- hybride Modelle („hybrid approach“) unterschieden.

Bei den Massenpunktmodellen wird der Block als form- und dimensionsloser Massenpunkt („lumped mass“) betrachtet. Im Gegensatz dazu wird bei den Starrkörpermodellen der Sturzblock als komplexer Starrkörper („rigid body“) modelliert. Eine Mischform zwischen diesen beiden Ansätzen stellt der sogenannte hybride Ansatz dar, bei dem der Sturzblock als dimensionsloser Block für die Simulation der Flugbahn, bei der Berechnung des Rückpralls jedoch als Starrkörper (Berücksichtigung von Blockgröße und Form) betrachtet wird.

Der aktuelle Trend in der Entwicklung geht in Richtung komplexer Starrkörpermodelle, bei denen versucht wird, die möglichen Blockformen so naturgetreu wie möglich abzubilden (Glover et al. 2012, Vijayakumar et al. 2012, Andrew et al. 2012). Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei den Modellen beispielsweise in der Art, wie wichtige Hangparameter (z.B. Rauigkeit, Dämpfungseigenschaften) in das Modell integriert sind und ob und wie der Effekt von Bäumen und sekundärer Schutzmaßnahmen auf den Sturzprozess berücksichtigt wird. Einige Modelle verwenden einen probabilistischen Ansatz, um die Unsicherheiten in der Qualität der Eingangsparameter besser zu berücksichtigen.

Tabelle 1: Auswahl vorhandener Modelle, Tabelle verändert nach Volkwein et al. 2011

Modell / Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabilistisch	Wald
CRSP (4.0)	Pfeiffer & Bowen 1989	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Nein
Rockfall 7.1 (2008)	Spang & Sönser 1995	2D (Profil)	Starrkörper	Ja	Ja
ROFMOD 4.1	Zinggeler et al. 1990	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
3D-GEOTEST-Zinggeler	Krummenacher et al. 2008	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RocFall 5.0 (2013)	Stevens 1998	2D (Profil)	Massenpunkt	Ja	Nein
Sturzeschwindigkeit	Meissl 1998	2D (x,y)	Massenpunkt	Nein	Nein
STONE	Guzzetti et al. 2002	3D (x,y,z)	Massenpunkt	Ja	Nein
Rockyfor 3D 5.2 (2014)	Dorren et al. 2006	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RAMMS::Rockfall	Christen et al. 2007	3D (x,y,z)	Starrkörper (reale Form)	Ja	Ja
THROW	Preh 2015	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
WURF	Fleris & Preh 2016	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja

Anwendung von Steinschlagmodellen

Es existieren grundsätzliche Unterschiede zwischen den Fragestellungen in Tagbauen (Tagbauskala) und bei natürlichen Hängen (Hangskala).

In Tagbauen dienen die Steinschlagmodelle primär zur Festlegung der laut Tagbauarbeitenverordnung (TAV, BGBl. II Nr. 416/2010) erforderlichen Gefahrenbereiche. Dabei ist es erforderlich die Verteilung der Auftreff- und Ausrolldistanzen auf der Tagbauetage (Böschungsfuß) aufgrund der auftretenden Blockgrößenverteilung (festzulegen anhand des vorherrschenden Trennflächengefüges) zu bestimmen. Die auftretenden kinetischen Energien spielen dabei eine untergeordnete Rolle, da selbst geringe Energien (Absturz eines nur wenige kg schweren Blocks aus geringer Höhe) für den Arbeitnehmer gefährlich sein können.

Die Ablösebereiche, die als Startpositionen der Steinschlagsimulation dienen, werden vorab über eine Neigungskarte (Abb. 2), die aus dem hochauflösenden Geländemodell generiert wird, planlich dargestellt und im Rahmen einer Kartierung in Hinblick auf ihre Brisanz als Ablösebereich beurteilt. Dabei werden auch die kinematisch möglichen Versagensmechanismen analysiert. Jene Steilbereiche die daraus als potentielle Steinschlagablösebereiche klassifiziert wurden, werden dann als Startpunkte bei der Steinschlagsimulation definiert.

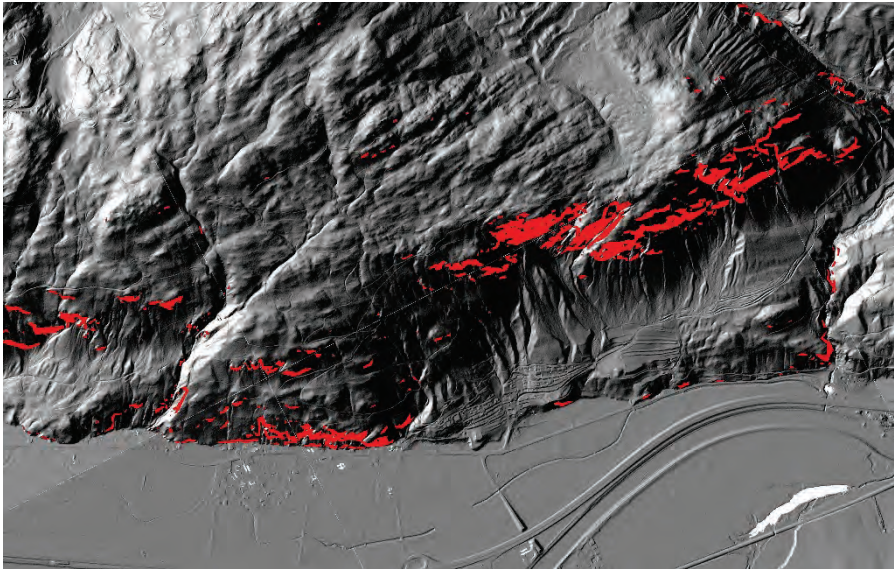


Abbildung 2: Digitales Höhenmodell mit Hangabschnitten mit Neigungen > 45° als potentielle Ablösebereiche.

Für die Steinschlagmodellierung entsprechend der ONR ist die Festlegung eines Bemessungsblockes erforderlich. Dabei muss einerseits festgelegt werden, welche Kubatur der maßgebliche Block besitzt und andererseits ist die Blockform zu bestimmen (Abb. 4). Gemäß ONR 24810:2017 ist eine statistische Erfassung der Abmessungen der am Hang vorliegenden Blöcke erforderlich. Von diesem Blockkollektiv ist sodann in Abhängigkeit von der Ereignishäufigkeit (Tab. 2, ONR 14810:2017) das entsprechende stückbezogene Volumens-Perzentil zu wählen (Abb. 3).

Tabelle 2: Klassifikation von Ereignisfrequenzen.

Ereignisfrequenzklasse		Ereignishäufigkeit n [1/a]	Fraktil [m ³]
EF 4	sehr hoch	$n \geq 10$ (> 10 Ereignisse/Jahr)	V98
EF 3	hoch	$1 \leq n < 10$ (1 bis 10 Ereignisse/Jahr)	V97
EF 2	gering	$0,03 \leq n < 1$ (<1 Ereignis/Jahr bis ≤ 1 Ereignis/30 Jahre)	V96
EF 1	seltene	$n < 0,03$ (< 1 Ereignis/30 Jahre)	V95

Dabei wird zumeist die statistische Blockgrößenverteilung der frischen (unverwittert, frische Schlagmarken) und der angewitterten Blöcke herangezogen, alte Blöcke mit einem Blockalter größer als ca. 100 Jahre fließen hierbei nicht ein. Dadurch werden extrem seltene, oft spät- bis postglaziale Ereignisse als nicht bemessungsrelevant ausgeschieden.

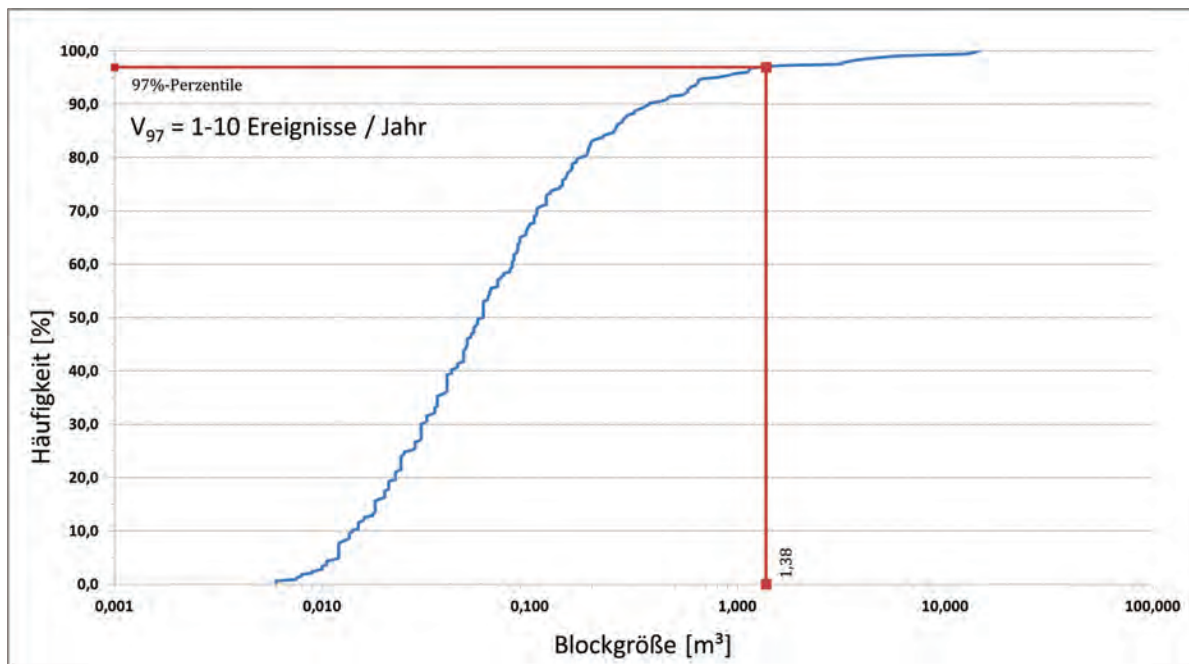


Abbildung 3: Bestimmung des Bemessungsblock-Volumens aus statistischen Aufnahmen einer Blockhalde (Linienzählverfahren).

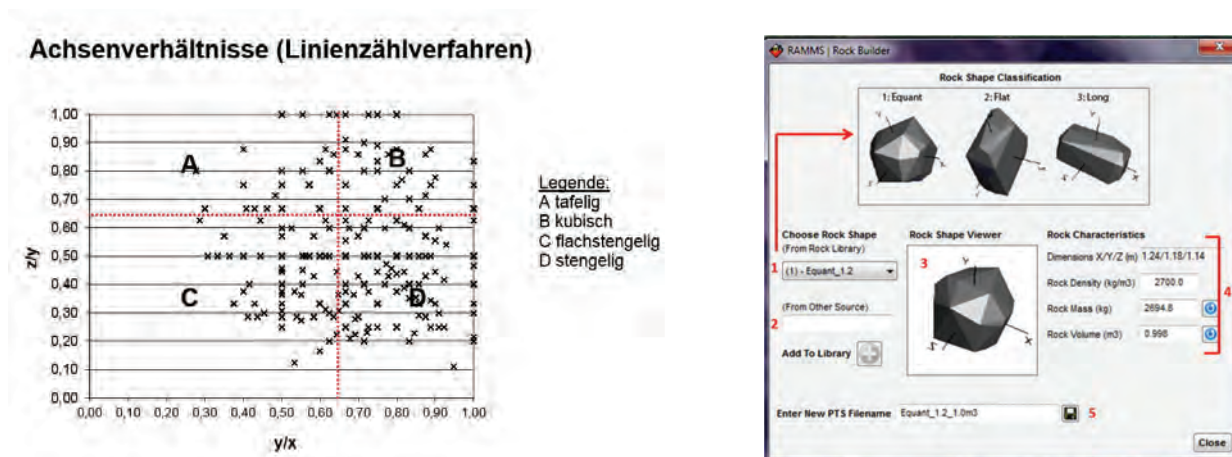


Abbildung 4: links: Bestimmung der Blockform aus den Achsverhältnissen der vermessenen Sturzblöcke, rechts: „Rock Builder“ des 3D Programms RAMMS::Rockfall zur Festlegung der Blockform des Bemessungsblockes.

Die Anwendung von 2D und 3D-Modellen ist grundsätzlich identisch. D. h. es werden die unterschiedlichen Untergründe im Wirkungsbereich der Steinschlagprozesse flächendeckend erfasst und als Homogenbereiche gleicher Oberflächeneigenschaften in der Steinschlagmodellierung berücksichtigt. Diesen Homogenbereichen werden sodann die für das jeweilige Modell erforderlichen Modellparameter wie Rauigkeit und Dämpfung zugewiesen. Die Berechnung erfolgt flächhaft. D. h., dass die Sturzblöcke und die Untergrundkontakte (Einschläge) über das tatsächliche Geländemodell flächig geführt werden und die daraus resultierenden Sturzbahnen (Trajektorien) dargestellt werden (Abb. 5). Die Trajektorien können sodann in Abhängigkeit von der Energie bzw. Sprunghöhe farbkodiert werden.

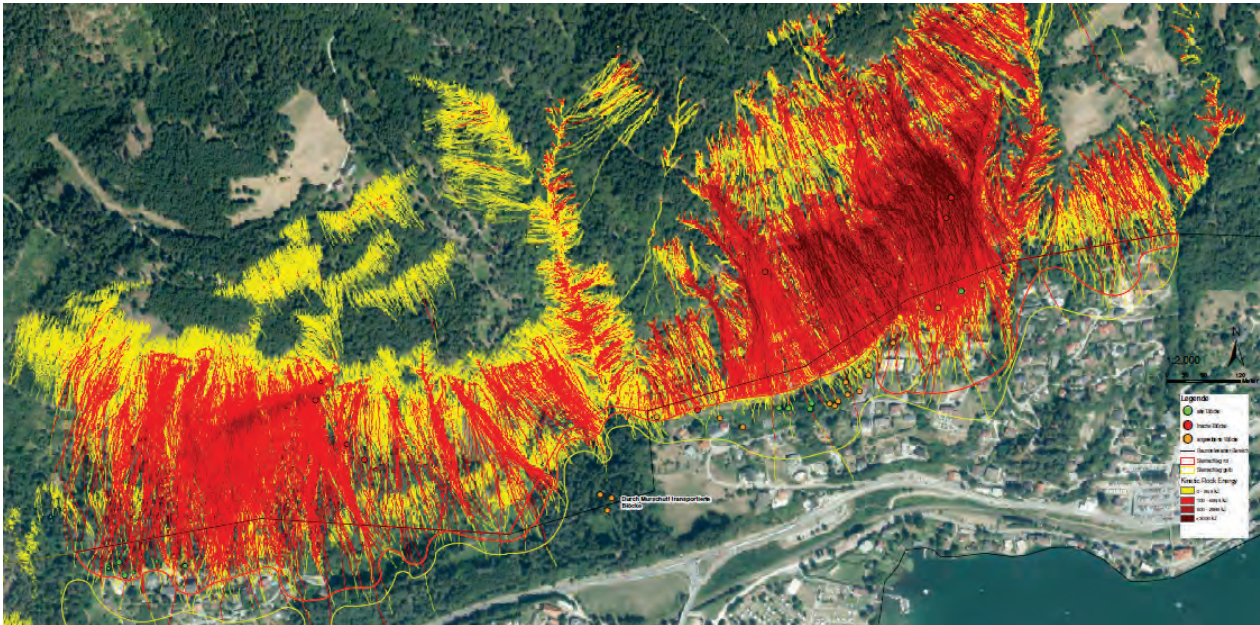


Abbildung 5: Energie-kodierte Sturzbahnen für eine Gefahrenhinweiskarte/Gefahrenzonenplan (gelb: ≤ 100 kJ, rot > 100 kJ).

Beiden Modellwelten (2D und 3D) gemeinsam ist, dass an ausgewählten Positionen alle maßgeblichen Einwirkungen der dort ankommenden bzw. passierenden Blöcke statistisch abgefragt und dargestellt werden können. Aus diesen statistischen Verteilungen können in weiterer Folge die gem. ONR 24810 maßgeblichen charakteristischen Einwirkungen abgeleitet werden.

Grenzen der Anwendung von Steinschlagmodellen / Modellfaktor

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass es sich bei allen physikalischen Steinschlag-Modellen um „waffen-scheinpflichtige“ Werkzeuge handelt, deren Einsatz eine regelmäßige Befassung mit der Thematik und eine sehr gute Kenntnis der Sensitivität des Ergebnisses in Hinblick auf die verschiedenen Modellparameter erfordert. Eine Kalibrierung der Ergebnisse anhand von realen Ereignissen zumindest in Hinblick auf maximale Reichweiten und idealerweise der Sprunghöhen ist zwingend erforderlich. Idealerweise werden Modellierungen eines Prozessbereiches mit mehr als einem Simulationsmodell durchgeführt und die statistische Stabilität der Ergebnisse überprüft. Daraus ergibt sich die Erkenntnis, dass Modellierungen nur von Fachexperten mit großer Erfahrung und einer intensiven und regelmäßigen Befassung mit der Materie durchgeführt werden sollen.

Vom IRSTEA (ehemals CEMAGREF) wurde ein Benchmarking-Projekt durchgeführt (Berger 2003). Dabei wurden mehrere 100 Steinschläge künstlich ausgelöst und dokumentiert (Reichweite, Geschwindigkeit und Sprunghöhe über den Sturzverlauf). Dann wurden diese Steinschlagprozesse mit dem verwendeten „Normstein“ von 17 verschiedenen Institutionen mit diversen 2D Steinschlagmodellen modelliert. Dabei zeigte sich, dass es zu massiven Ergebnisstreungen kam, was einerseits den verschiedenen Modellen, aber noch signifikanter den verschiedenen Bearbeitern geschuldet war, da auch mit denselben Modellen Ergebnisstreungen von über 100 % erzielt wurden.

Grundsätzlich sollten alle Modellergebnisse neben einer Kalibrierung mit dokumentierten Ereignissen – sofern vorhanden – auch einer Plausibilitätskontrolle unterzogen werden. So gibt es zahlreiche Versuche an Naturhängen, an denen die jeweiligen Sturzgeschwindigkeiten und Sprunghöhen gemessen wurden. Dabei zeigt sich z. B. dass Geschwindigkeiten von > 35 m/s auch an steilen felsdominierten Hängen mit glatter Oberfläche und schlechter Dämpfung nur sehr selten erreicht werden (Smith & Duffy 1990).

Literatur

- Andrew R., Hume H., Bartingale R., Rock A. & Zhang R. (2012): CRSP-3D User's Manual Colorado Rockfall Simulation Program. Federal Highway Administration Report CO 80228FHWA-CFL/TD-12-007, Lakewood, Colorado, 163 p.
- Azimi C. & Desvarreux P. (1977): Calcul de chutes de blocs et vérification sur modèle réduit, Internal Technical Report ADRGT.
- Berger F. (2003): Réalisation d'un test d'étalonnage des modèles de trajectographie en utilisant des données provenant d'expérimentations grandeur nature. Rapport de synthèse Département Gestion des Territoires. CEMAGREF, Unité de recherche Ecosystèmes Paysages Montagnards (Grenoble).
- Bourrier F., Dorren L. & Hungr O. (2013): The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 435–440.
- Christen M., Bartelt P. & Gruber U. (2007): RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL., PFG Photogrammetrie – Fernerkundung – Geoinformation, 4, 289–292.
- Dorren L.K.A. (2006): Rockyfor3D revealed – description of the complete 3D rockfall model, Tech. rep., EcorisQ, <http://www.ecorisq.org>, 2010.
- Evans S.G. & Hungr O. (1993): The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotech J.*, 30, 620–636.
- Fleris M. & Preh A. (2016): WURF_LIVE: Demonstration of a stochastic numerical rockfall code in 3D. in: Ortner, H. (ed.): Abstract Volume of GeoTirol2016 - Annual Meeting of DGGV and PANGEO Austria, 25-28. September 2016, p. 69, Innsbruck.
- Glover, J., Schweizer A., Christen M., Gerber W., Leine R. & Bartelt P. (2012): Numerical investigation of the influence of rock shape on rockfall trajectory. [Abstract] *Geophys. Res. Abstr.*, 14, EGU2012-11022-1.
- Guzzetti F., Crosta G., Detti R. & Agliardi F. (2002): STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rockfalls, *Comput. Geosci.*, 28, 1079–1093.
- Hungr O., Leroueil S. & Picarelli L. (2014): The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, 167–194.
- Krummenacher B., Schwab S. & Dolf F. (2008): Assessment of natural hazards by three calculations of rockfall behaviour, in: Volkwein A., Labiouse V. & Schellenberg K. (eds.): *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*, 49–51, Swiss Fed. Research Inst. WSL, Morschach.
- Meissl G. (2001): Modelling the runout distances of rockfall using a geographic information system, *Z. Geomorphol.*, 125, 129–137.
- Melzner S. & Preh A. (2012): Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis. *Wildbach- und Lawinenverbau. – Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz.*, 169, 78–97.
- ONR 24810:2013 (2013): *Technischer Steinschlagschutz: Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung.*
- ÖROK (2014): *ÖREK Partnerschaft: Risikomanagement für gravitative Naturgefahren. Materialienband.* Wien 2014.
- Pfeiffer T. & Bowen T. (1989): Computer Simulation of Rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26/1, 135–146.
- Piteau D.R. & Clayton R. (1977): Discussion of paper "Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data" by Cundall P.A., Voegele, M.D. & Fairhurst C. *Proceedings, 16th Symposium on Rock Mechanics*, 62-63, Minneapolis.
- Preh A. (2015): *THROW, ein dynamisch stochastisches Simulationsmodell zur Prognose von Steinschlag.* unveröffentlichtes Benutzerhandbuch.
- Smith D.D. & Duffy J.D. (1990): Field tests and evaluation of rockfall restraining nets. - California Department of Transportation, Report No. CA/TL - 90/05, Final Report, Sacramento 1990.
- Spang R. & Sönser T. (1995): Optimized rockfall protection by "Rockfall", in: 8th Int. Congr. Rock Mech., 3, 1233–1242, Tokyo.
- Stevens W.D. (1998): *Rockfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls*, Master's thesis, University of Toronto, <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7756.pdf>.
- Vijayakumar S., Yacoub T., Ranjram M. & Curran J.H. (2012): Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. In: *Proceedings of the 46th. U.S. Rock Mechanics / Geomechanics Symposium.* Chicago, Illinois, USA, 8 p.
- Volkwein A., Schellenberg K., Labiouse V., Agliardi F., Berger F., Bourrier F., Dorren L., Gerber W. & Jaboyedoff M. (2011): Rockfall characterization and structural protection - a review. – *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2617–2651.
- Zinggeler A., Krummenacher B. & Kienholz H. (1990): *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern, Berichte und Forschungen der Geographisches Institut der Universität Freiburg*, 3, 61–70.