

THROW, ein dynamisch stochastisches Simulationsmodell zur Prognose von Steinschlag

Alexander Preh, Emmanouil Fleris, Mariella Illeditsch

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

Einleitung

THROW basiert auf dem Konzept des von Oldrich Hungr entwickelten Steinschlagmodells PIERRE (Hungr 2014, Mitchell & Hungr 2017). In Zusammenarbeit mit O. Hungr und A. Mitchell (Preh et al. 2015a & Preh et al. 2015b) wurden beide Modelle parallel entwickelt, dabei wurde THROW auf die speziellen Bedürfnisse von Steinschlagprognosen in Tagbauen optimiert. Seit 2015 stellt THROW eine eigenständige Entwicklung von A. Preh dar. WURF ist die dreidimensionale Variante von THROW und wird seit 2016 von E. Fleris und A. Preh entwickelt. THROW und WURF sind vollständig in PYTHON programmiert und verwenden zur Visualisierung der Berechnungsergebnisse eine eigene Schnittstelle auf Basis von Mayavi (Ramachandran & Varoquaux 2011).

Berechnungsansatz

THROW ist ein hybrides Modell: Bei der Berechnung der Flugbahn wird der Sturzblock als simpler Massenpunkt betrachtet, bei der Berechnung des Rückpralls (Restitution) werden sowohl die Blockgröße, die Blockform, die Rotationsgeschwindigkeit als auch die Rauheit des Blocks und der Oberfläche berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Blockform sowie der Oberflächenrauheit des Blocks und der Sturzbahn erfolgt mit Hilfe stochastischer Modelle. Daher kann THROW als dynamisch stochastisches Simulationsmodell bezeichnet werden.

Wie alle anderen Modelle berechnet THROW die Flugbahn der Sturzblöcke unter Zuhilfenahme der klassischen Formeln zur Berechnung des schiefen Wurfs bei Vernachlässigung des Luftwiderstands.

Die Berechnung des Rückpralls (Restitution) basiert auf der exakten Lösung für den Anprall einer idealen Kugel (Partikel) auf einer ebenen Fläche nach Goldsmith (1960). Dabei wird sowohl der Einfluss der Reibung (begrenzt Gleiten) als auch der Einfluss der Blockrotation bei der Berechnung der Rückprallgeschwindigkeiten (ausgehenden Geschwindigkeiten) berücksichtigt.

Während eines Anpralls kommt es zu Energieverlusten zufolge Deformation, Bruch und Massenverschiebung (bei der Kraterbildung). All diese Verluste steigen mit der Zunahme der eingehenden kinetischen Energie. Zur Berücksichtigung dieser Gesetzmäßigkeit werden beim THROW-Programm die Restitutionskoeffizienten k_n und k_t mit Hilfe einer hyperbolischen Funktion entsprechend dem Vorschlag von Bourrier & Hungr (2013) proportional zur eingehenden kinetischen Energie skaliert (Abb. 1):

$$k_n = \frac{E_{0.5,n}}{E_n^{in} + E_{0.5,n}} \quad k_t = \frac{E_{0.95,t}}{E_t^{in} + E_{0.95,t}} \quad (1)$$

$E_{0.5,n}$ und $E_{0.95,t}$ in Formel (1) repräsentieren Referenzenergien (Eingabeparameter), definiert als die erforderlichen eingehenden kinetischen Energien, die zu einer Restitution von 0.5 (ausgehende Energie 50% der eingehenden Energie) bzw. 0.95 führen.

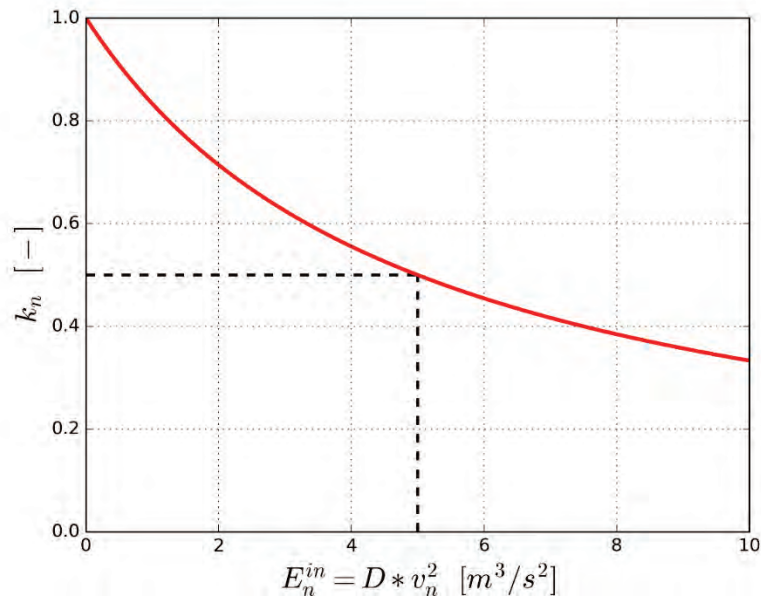


Abbildung 1: Hyperbolische Restitutions-Funktion für die eingehende Energie normal zur Geländeoberfläche (Preh 2017, nach Bourrier & Hungr 2013).

Das stochastische Modell zur Berücksichtigung der „Oberflächenrauheit“ bildet die Perturbation der Oberfläche als Variation des lokalen Böschungswinkels im Kontaktpunkt des Anpralls ab (Abb. 2). Die Variation des Böschungswinkels erfolgt mit Hilfe des Rauheitswinkels θ_R . Im Gegensatz zu vielen konservativen Berechnungsansätzen, welche die Rauheit primär als geometrische Funktion interpretieren [z.B. Sinusfunktion beim Computercode CRSP (Pfeifer & Bowen 1989)], wird beim vorliegenden Verfahren die Rauheit strikt als stochastischer Parameter verstanden.

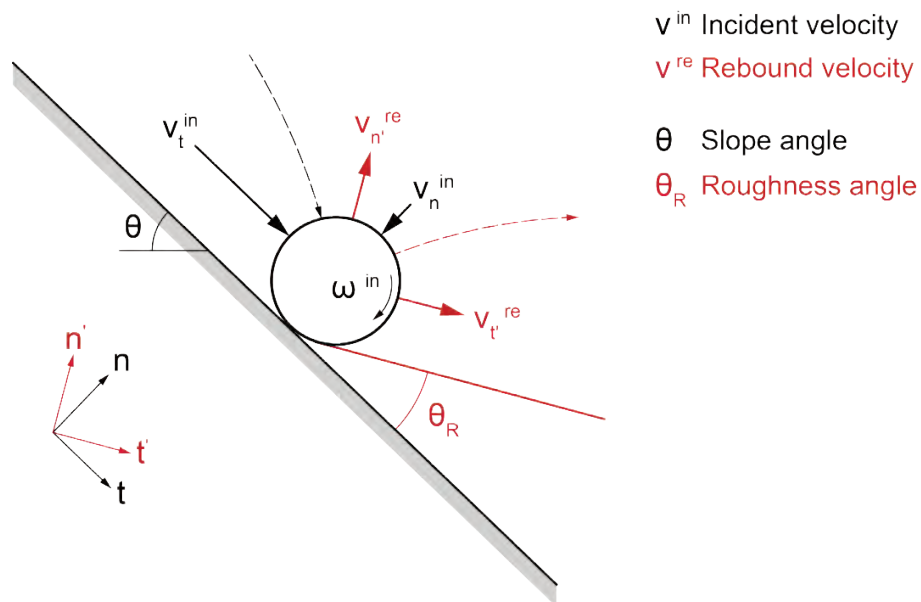


Abbildung 2: Modifikation des lokalen Böschungswinkels θ durch den Rauheitswinkel θ_R (Preh 2016).

Die Gleichung zur Berechnung der stochastischen Rauheit (2) ist eine Zufallsvariable X im Intervall $[0,1]$ multipliziert mit dem Eingabeparameter (Materialparameter) θ_{Scale} . Die Zufallsvariable X kann durch jede beliebige Dichtefunktion (z.B. Lognormalverteilung) beschrieben werden (3).

$$\tan \theta_R = \theta_{Scale} \cdot X \quad (2)$$

$$X \sim D(0,1) \quad (3)$$

Die Abbildung 3 zeigt die mit Hilfe von (2) und (3) berechnete Dichtefunktion des Rauheitswinkels θ_R für einen Skalierungsfaktor von $\theta_{Scale}=0.65$ (linkes Bild) und $\theta_{Scale}=0.35$ (rechtes Bild).

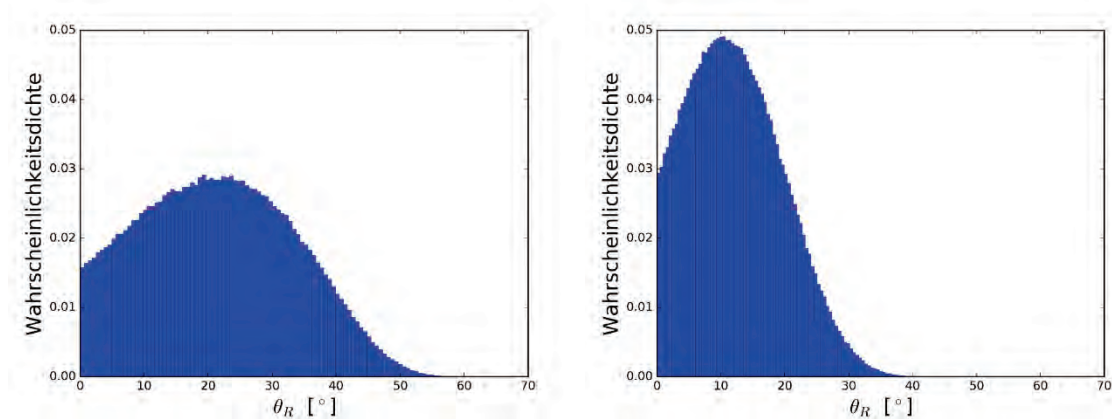


Abbildung 3: Dichtefunktion der Oberflächenrauheit θ_R . links: $\theta_{Scale}=0.65$, rechts: $\theta_{Scale}=0.35$ (Preh 2017).

In Bezug auf den stochastischen Anteil der Theorie wird die Hypothese aufgestellt, dass durch die zufällige Perturbation des Kontaktwinkels beim simulierten Anprall, die chaotischen (zufälligen) Effekte abgebildet werden können, die durch den nicht-kollinearen Anprall eines irregulär geformten Blocks auf einer rauen Oberfläche entstehen.

Modellparameter

Ziel der Entwicklung von THROW war und ist es, die Anzahl der für die Simulation erforderlichen Modellparameter so gering wie möglich zu halten. Neben der Eingabe der Geometriedaten (Koordinaten des Berechnungsschnitts bei 2D- und Rasterdaten des digitalen Höhenmodells bei 3D-Berechnungen) sind die folgenden Eingaben erforderlich:

- Blockmassen,
- Gesteinsdichte (aus welcher in Verbindung mit den Blockmassen die Partikeldurchmesser R errechnet werden),
- für die einzelnen Untergründe (beispielsweise Felsböschung, Etagenuntergrund, geschüttetes Hauwerk von Wällen oder Anschüttungen usw.) sind jeweils folgende Parameter festzulegen:
 - Reibungswinkel der Oberfläche ϕ
 - Referenzenergien für die normale und die tangentielle Restitution: $E_{0.5,n}$ und $E_{0.95,t}$
 - Skalierungsfaktor der Rauheit θ_R

Vorhersageparameter für Untersuchungen in Tagbauen (Tagbauskala)

In einem Forschungsprojekt des Instituts für Geotechnik der TU Wien und des Bundesministeriums für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz wurden rund 589 Fallversuche in österr. Tagbauen durchgeführt. Ziel der Versuche war es, Erkenntnisse über den Bewegungsablauf und die Reichweite von Steinerschlag in der Skala von Tagbauen zu gewinnen (Preh et al. 2015a, Preh et al. 2015b).

Anhand von 311 Abwürfen an sieben typischen Tagbauböschung der Versuchsreihen wurden Vorhersageparameter (Tab. 1) zur Festlegung der laut Tagbauarbeitenverordnung (TAV, BGBl. II Nr. 416/2010) erforderlichen Gefahrenbereiche gewonnen. Die in Tabelle 1 aufgelisteten Parameter sind das Resultat zahlreicher Kalibrierungsdurchläufe und stellen die für erste Vorhersagen der Auftreffdistanz (ATD) und Ausrolldistanz (ARD) bei Tagbauböschungen bestmöglichen Modellparameter dar.

Abbildung 4 zeigt die in THROW implementierte Darstellung zum optimierten Vergleich der Beobachtungen (ARD & ATD) aus den Sturzversuchen mit den Simulationsergebnissen.

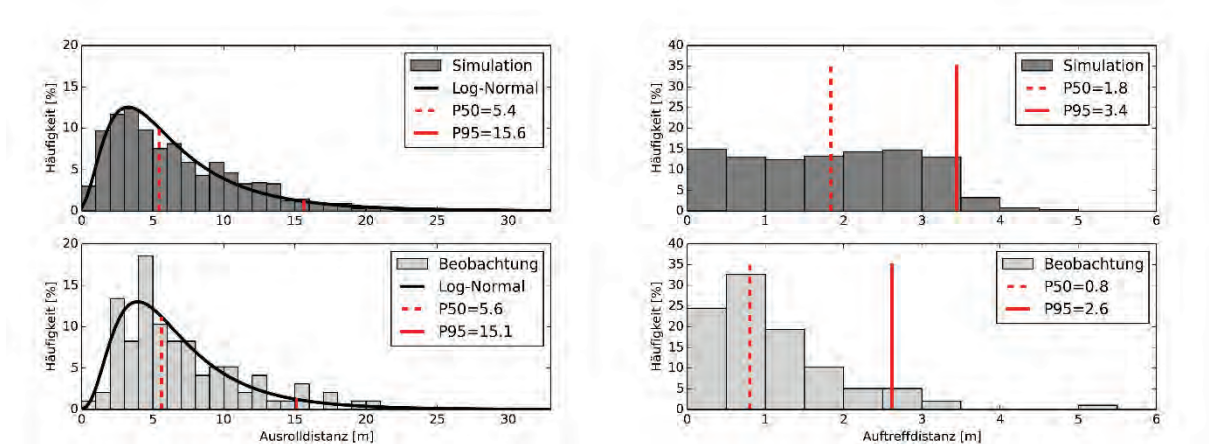


Abbildung 4: Vergleich der berechneten und beobachteten Gefahrenbereiche ARD & ATD, Tagbau Klöch (97 Abwürfe beobachtet, 970 Abwürfe berechnet) (Preh et al. 2015b).

Tabelle 1: Erforderliche Modellparameter ermittelt mittels Kalibrierung (Preh et al. 2015b).

Parameter	Böschung	Etage
Referenzenergie – normale Restitution, $E_{0.5,n}$	5	5
Referenzenergie – tangentielle Restitution, $E_{0.95,t}$	50	50
Skalierungsfaktor der Rauheit, θ_{scale}	0.65	0.35

Vorhersageparameter für Untersuchungen bei natürlichen Hängen (Hangskala)

Die in der Hangskala zu untersuchenden Böschungen unterscheiden sich von den in Tagbauen üblichen Böschungen in erster Linie in der Böschungshöhe bzw. in der Länge der Sturzbahn und den daraus resultierenden kinetischen Energien. Auch die Größe des Bemessungsblocks/der Bemessungsblöcke und der Einfluss der Blockfragmentierung können in der Hangskala ein Vielfaches betragen. Darüber hinaus hat auf der Hangskala der Bewuchs (Bäume und Büsche) fallweise einen starken Einfluss auf die Ergebnisse von Sturzversuchen und deren Rückrechnung. Aus diesem Grund lassen sich Vorhersageparameter unterschiedlicher Skalen nicht unmittelbar miteinander vergleichen.

Zurzeit werden im Zuge zweier vom Land Niederösterreich geförderter Forschungsprojekte „Dynamisch-stochastische 3D-Steinschlaganalyse“ und „NoeTALUS - Gefahrenmodellierung von Sturzprozessen in NÖ“ Versuche durchgeführt und Vorhersageparameter entsprechend der Tabelle 1 ausgearbeitet.

Modellierung von Steinschlagzäunen und Wällen

THROW und WURF erlauben die Modellierung von Barrieren wie Steinschlagzäunen, Steinschlagschutzdämmen und Wällen (Abb. 7). Dabei können beliebig viele dieser Elemente in die einzelnen Berechnungen integriert werden. Abbildung 5 zeigt eine Modellierung zweier aufeinanderfolgender Barrieren mittels THROW. An der Barriere und entlang der gesamten Sturzbahn ist die Ausgabe von charakteristischen Größen, wie der maximal auftretenden kinetischen Energie (Abb. 6) und der max. Sprunghöhe möglich. Auf Basis dieser mittels der Modelle ermittelten charakteristischen Größen können Schutzmaßnahmen entsprechend der ONR 24810:2017 dimensioniert werden.

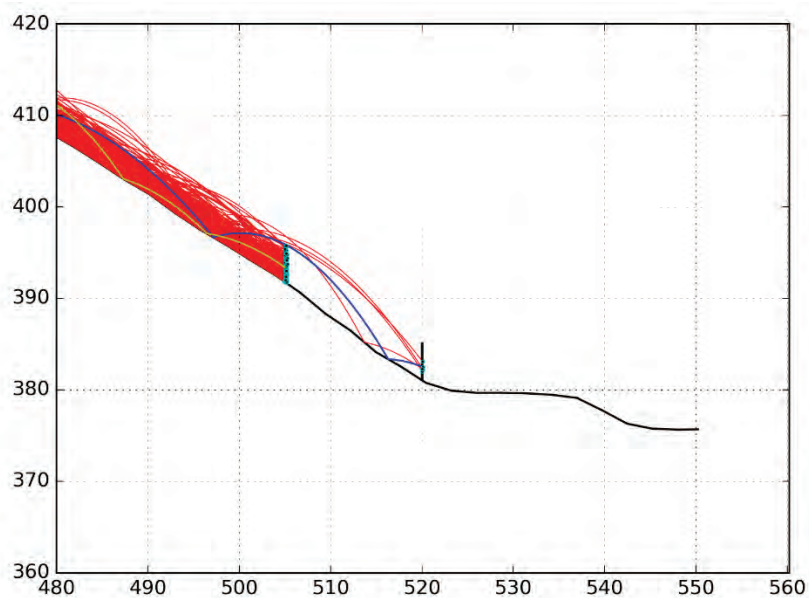


Abbildung 5: Modellierung zweier aufeinanderfolgender Barrieren mittels THROW (Zaunabstand: 15m, Zaunhöhe: 4m).

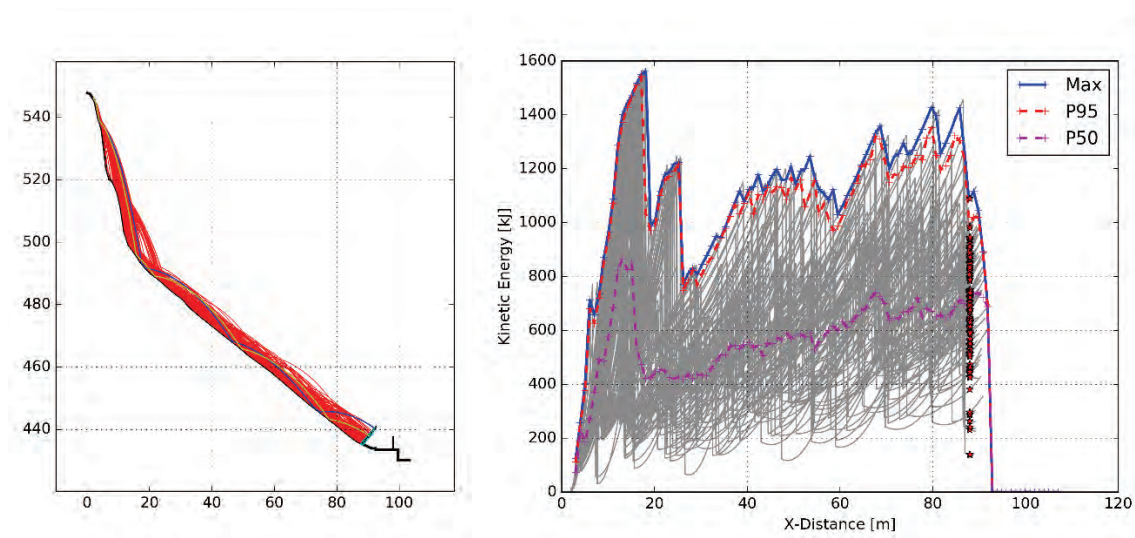


Abbildung 6: Links: Berechnete Trajektorien (100 simulierte Abwürfe). Rechts: Verlauf der totalen kinetischen Energien (Blau – Einhüllende, Rot – P95 Perzentile, Magenta – P50 Perzentile, rote Sterne – Energien an der Barriere).

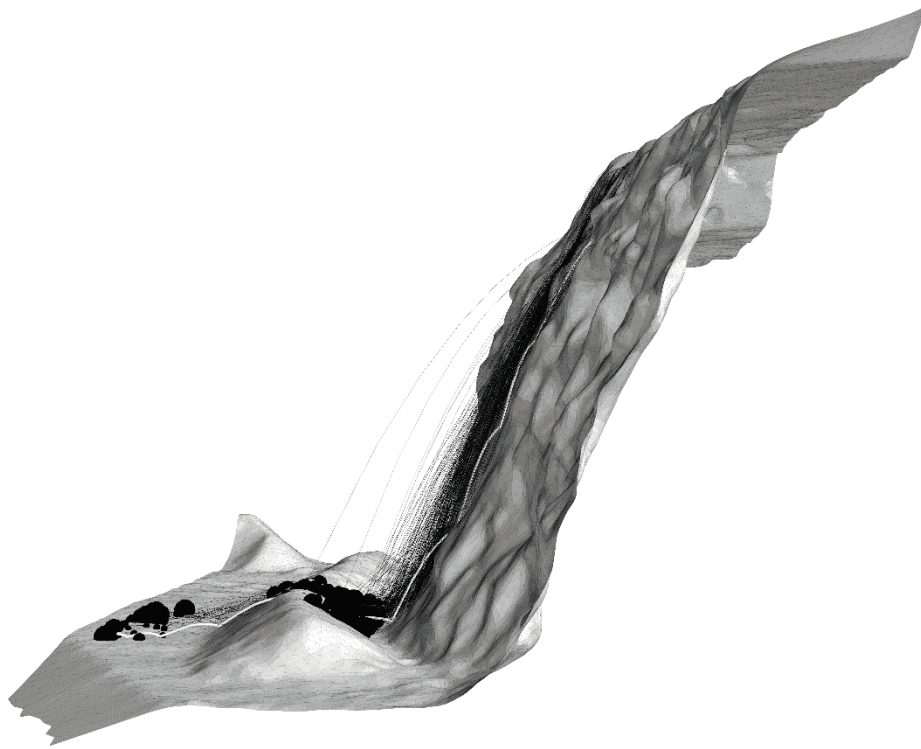


Abbildung 7: Modellierung der Barrierewirkung eines Walls am Böschungsfuß im Tagbau Limberg mittels WURF.

Waldmodul für THROW – Berücksichtigung des Einflusses von Vegetation

(Dissertation Illeditsch)

Aktuelle Steinschlagsimulationsmodelle, die Vegetation berücksichtigen können

Die Verfügbarkeit von Steinschlag-Simulations-Modellen am Markt ist sehr überschaubar. Noch beschränkter ist die Auswahl an Programmen, die Vegetation in ihren Simulationen berücksichtigen können (Preh & Mölk 2018). Diese sind RockyFor3D von ecorisQ (Dorren 2012), RAMMS::Rockfall von der ETH Zürich (Bartelt et al. 2016), RocFall 5.0 von RocScience (Rocscience Inc. 2013), Rockfall 7.1 von Dr. Spang (Spang & Romunde 2008) sowie GEOTEST's ROFMOD 4.1 in 2D und 3D (Tobler et al. 2009).

Die Schutzwirkung von Vegetation wird bei RockyFor3D mit einem auf Feldversuchen basierten probabilistischen Ansatz von Energieverlust je Baumtreffer berücksichtigt. Es ist somit möglich, Walddaten detailliert einzugeben und den Wald naturgetreu als Hindernis nachzubilden (Dorren 2012).

Bei RAMMS::Rockfall wird die Wirkung von Vegetation mit einem generalisierten Ansatz einer gleichförmigen Bremsschicht (drag layer) mit der Höhe des Waldes simuliert (Abb. 8), indem innerhalb dieser Schicht eine lineare Dämpfungskraft angesetzt wird (Bartelt et al. 2016). Innerhalb des definierten Waldbereichs wirkt der Wald-Widerstand im Schwerpunkt der Blockmasse.

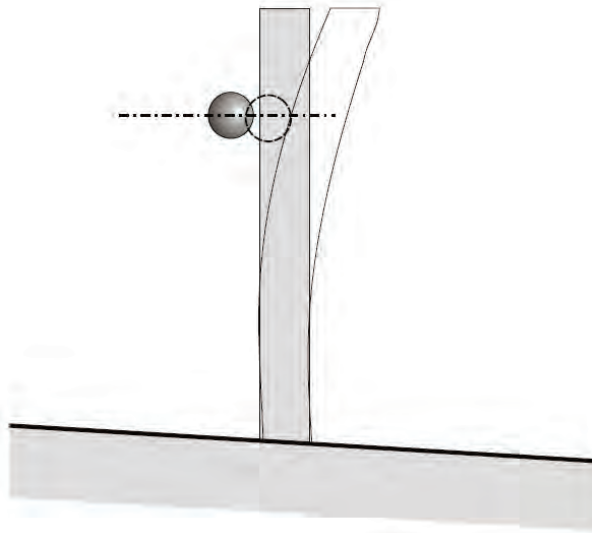


Abbildung 10: Rockfall – Idealisierung des Baums als zylindrischer, elastischer, in den Boden eingespannter Stab (Spang & Romunde 2008).

GEOTEST'S ROFMOD berücksichtigt den Effekt von Wald mit Hilfe der Eingabeparameter Blockgeometrie, Baumanzahl pro Hektar (Baumdichte) und Stammdurchmesser, wobei der Blockgeometrie („real block shapes“) große Bedeutung gegeben wird (Tobler et al. 2009).

Die derzeit am häufigsten verwendeten Programme zur Steinschlag-Simulation unter Berücksichtigung von Wald sind RockyFor3D und RAMMS::Rockfall. Beide Programme modellieren den Wald ausschließlich in 3D.

Effekt von Wald in 2D

Bisherige Forschung und Studien haben gezeigt, dass das Vorhandensein von Vegetation die Auslauf-längen und Sprunghöhen von herabfallenden Steinen beeinflussen. Im Allgemeinen reduziert ein Baumanprall die Energie eines herabfallenden Blocks. Ein Baumanprall kann sogar zum kompletten Stillstand eines Blocks führen. In Anbetracht eines 2D-Hangprofils einer Böschung gibt es offensichtliche Einschränkungen in Bezug auf die vielen möglichen Pfade und Hindernisse, die ein herabfallender Block auf seinem Weg hinab nehmen bzw. antreffen kann. Kein Block nimmt in der Natur zwei Mal den gleichen Pfad.

2D-Programme haben dennoch große Vorteile, insbesondere wenn eine rasche, aber aussagekräftige Modellierung gewünscht ist. Koordinaten eines 2D-Bemessungsschnitts können rel. einfach von Hand vermessen oder aus grob-auflösenden Geländedaten bezogen werden, wodurch flächige Rasterdaten eines Digitalen Höhenmodells in hoher Auflösung nicht zwingend erforderlich wären (wie für 3D-Modelle). 2D-Modelle sind generell weniger aufwendig und benötigen weniger Daten, weniger Ressourcen und kürzere Rechenzeit.

Waldmodul in THROW

Ziel war und ist es, jene signifikanten Effekte, die bisher nur in 3D abgebildet werden können, auch in 2D realistisch abbilden zu können. Mit Hilfe der Stochastik können die vielen Möglichkeiten der unterschiedlichen Pfade und Hindernisse, die ein Block auf seinem Weg hinab nehmen bzw. antreffen kann, erstmals in 2D abgebildet werden. So werden die Vorteile von 2D- und 3D-Modellen im THROW-Programm kombiniert.

Die Entwicklung und Implementierung eines stochastischen „Waldmoduls“ in das Steinschlag-Simulations-Modell THROW ermöglicht es, den Effekt von Wald möglichst naturgetreu zu berücksichtigen. Mit Hilfe der stochastischen Variation von Baumpositionen und Baumanprallstellen am Stamm werden für jeden einzelnen Block unterschiedliche Pfade und Hindernisse in 2D abgebildet. Als Eingabeparameter sind die Baumdichte, der mittlere Brusthöhendurchmesser (BHD) der Bäume, die Baumarten sowie Anfang und Ende des Waldes erforderlich. Die Berechnung der Baumtreffer (sowohl die Anzahl, als auch die Anprallstellen) ist eine Funktion der Baumdichte, des mittleren BHD, des jeweiligen Blockdurchmessers und der Länge der bewaldeten Böschung.

Je nach Anprallstelle am Stamm (frontal, seitlich, schrammen) (Dorren et al. 2005) wird die translatorische Energie durch einen zufällig ermittelten Energie-Reduktionsfaktor, abhängig von empirischen Daten aus Feldversuchen nach Dorren et al. (2005) abgemindert. Auch die Baumart, die Anprallhöhe sowie der Anprallwinkel beeinflussen die Energiedissipation und werden im THROW-Waldmodul implementiert.

Fallstudie Schwarzenbach

Im Zuge der Forschungsprojekte mit dem Land Niederösterreich wurden Sturzversuche in Schwarzenbach im Piestingtal/NÖ durchgeführt, bei denen insgesamt 25 Blöcke abgeworfen wurden. 13 Blöcke wurden am bewaldeten Hang „Nord“ und zwölf Blöcke am bewaldeten Hang „Süd“ abgeworfen.

Am Hang „Nord“ haben sechs der 13 Blöcke (46%) die Straße erreicht, d.h. 54% sind entlang der bewaldeten Böschung zum Stillstand gekommen. Am Hang „Süd“ haben sieben der zwölf Blöcke (58%) die Straße erreicht, d.h. 42% sind entlang der bewaldeten Böschung zum Stillstand gekommen (Abb. 11).

Die beiden Hänge wurden mit THROW unter Anwendung des Waldmoduls modelliert. Die Baumdichte wurde mit Hilfe von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen, Fotos und Videos an beiden Hängen mit 250-350 Bäumen pro Hektar geschätzt. Der mittlere BHD wurde an beiden Hängen mit 15cm geschätzt. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 12 und 13a–c veranschaulicht sowie in Tabelle 2 zusammengefasst.



Abbildung 11: Sturzversuche in Schwarzenbach an der Pielach – Endlagen der Sturzblöcke, die unterhalb des bewaldeten Hangabschnitts zum Stillstand gekommen sind (Photo: A. Preh).

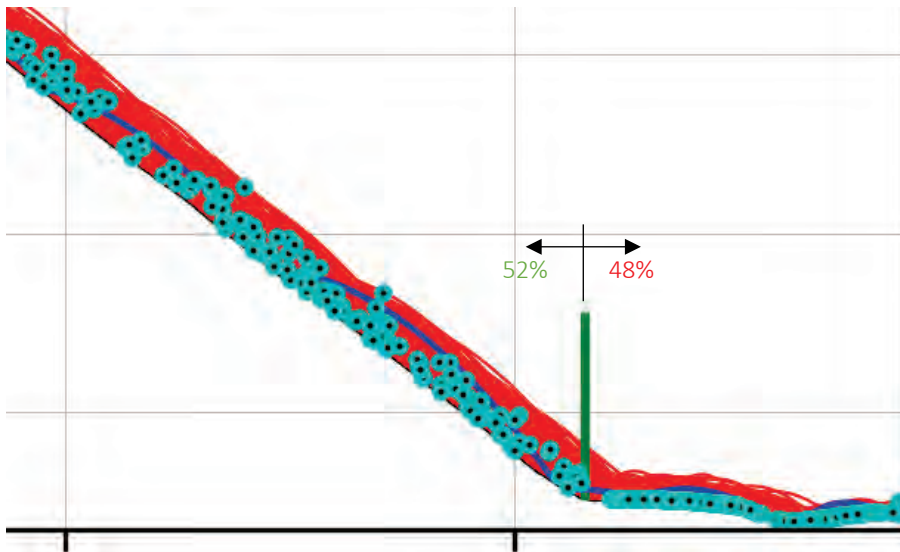


Abbildung 12: Schwarzenbach NORD (Baumdichte 350/BHD 15) – Ergebnis Modellierung THROW: 52% jener 72% Blöcke, die den Wald passiert haben, sind am bewaldeten Hang zum Stillstand gekommen.

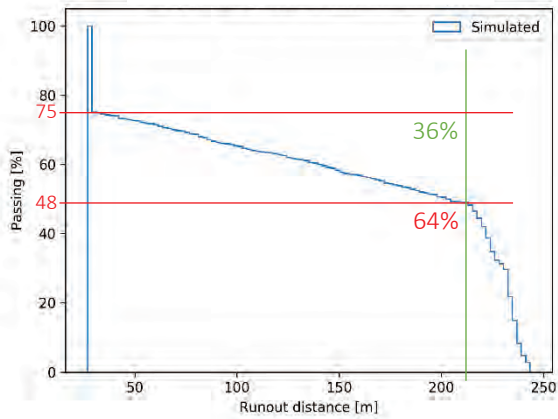


Abbildung 13a: Schwarzenbach NORD (Baumdichte 250/BHD 15) – Ergebnis Modellierung THROW: 36% jener 75% Blöcke, die den Wald passiert haben, sind am bewaldeten Hang zum Stillstand gekommen.

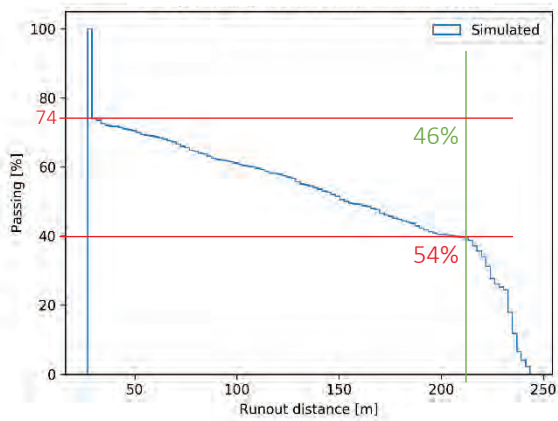


Abbildung 13b: Schwarzenbach NORD (Baumdichte 300/BHD 15) – Ergebnis Modellierung THROW: 46% jener 74% Blöcke, die den Wald passiert haben, sind am bewaldeten Hang zum Stillstand gekommen.

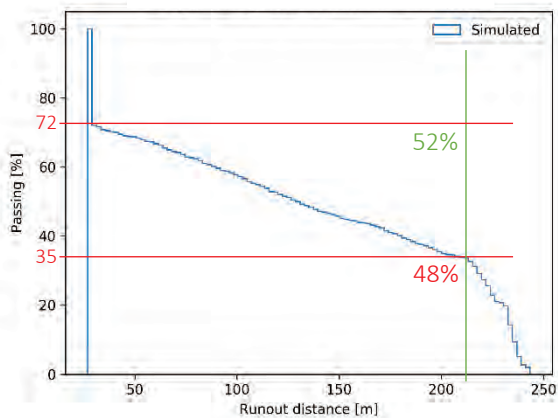


Abbildung 13c: Schwarzenbach NORD (Baumdichte 350/BHD 15) – Ergebnis Modellierung THROW: 52% jener 72% Blöcke, die den Wald passiert haben, sind am bewaldeten Hang zum Stillstand gekommen.

Tabelle 2: Schwarzenbach (mittlerer BHD 15cm) – Ergebnis Modellierung THROW: % Blöcke, die entlang der bewaldeten Böschung zum Stillstand kommen.

	Baumdicke 250	Baumdicke 300	Baumdicke 350
Hang „Nord“	36%	46%	52%
Hang „Süd“	41%	47%	55%

Fragmentierung: Pilotstudie Liechtensteinklamm

In Zusammenarbeit mit Roland Rauscher wird zurzeit für die Liechtensteinklamm in St. Johann im Pongau (Salzburg) eine Pilotstudie zum Einfluss der Blockfragmentierung auf den Sturzprozess und im Speziellen auf die bei der Maßnahmenbemessung heranzuziehenden charakteristische Werte der kinetischen Energien und Sprunghöhen durchgeführt. Die Studie wird mittels RockyFor3D und mittels WURF durchgeführt. Abbildung 14 zeigt die in der Studie analysierte Sturzbahn. Die bei den Sturzversuchen auftretenden Geschwindigkeiten und Sprungweiten wurden im Zuge der Masterarbeiten von R. Rauscher und P. Pamminer per Videoanalyse ermittelt.



Abbildung 14: Zu analysierende Sturzbahn in der Liechtensteinklamm. Die roten Linien dienen in der Videoanalyse zur Ermittlung der Sprungweiten (Photo: Roland Rauscher).

Die Blockfragmentierung wurde anhand der eingehenden kinetischen Energie unter Anwendung einer neu entwickelten Fragmentierungsfunktion berechnet. Die Kalibrierung des Modells WURF erfolgte anhand des Vergleichs der beobachteten und simulierten Blockgrößen, Sprungweiten (Abb. 16) und Geschwindigkeiten. Abbildung 15 zeigt die mittels WURF berechneten Trajektorien unter Berücksichtigung der Blockfragmentierung. Dabei sind die Trajektorien entsprechend der an der jeweiligen Position berechneten Blockgröße (Blockradius in Metern) farblich skaliert.

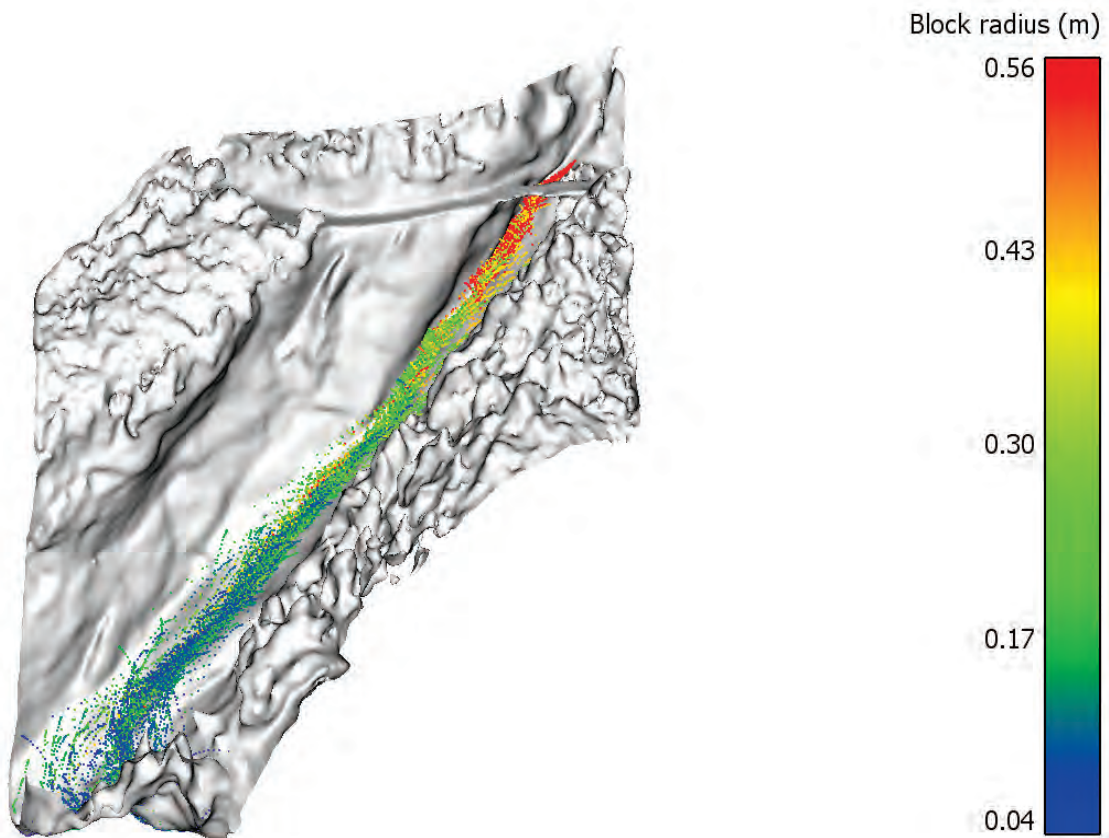


Abbildung 15: Pilotstudie zur Analyse der Blockfragmentierung während des Sturzprozesses mittels WURF, Simulierte Trajektorien eingefärbt nach der im jeweiligen Bereich auftretenden Blockgröße.

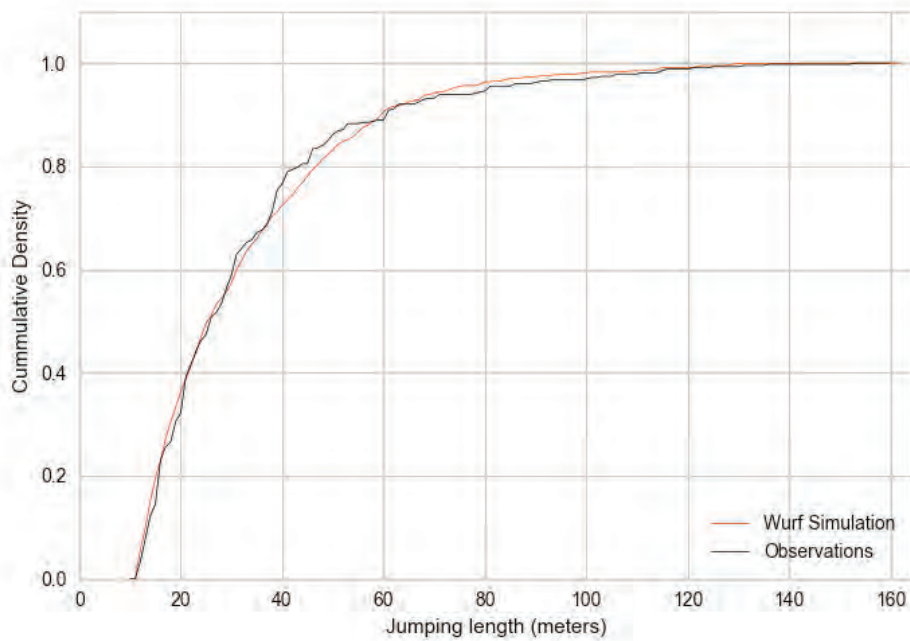


Abbildung 16: Vergleich der beobachteten (schwarze Linie) mit den simulierten Sprungweiten (rote Linie) mittels einer kumulativen Häufigkeitsfunktion, X-Achse: Sprungweite, Y-Achse: kumulative Häufigkeit.

Literatur

- Bartelt P., Bieler C., Bühler Y., Christen Marc, Christen Miriam, Dreier L., Gerber W., Glover J. & Schneider M. (2016): RAMMS::Rockfall User Manual v1.6.
- Bourrier F. & Hungr O. (2013) Rockfall Dynamics: A Critical Review of Collision and Rebound Models. in: Lambert S. & Nicot F. (eds). Rockfall Engineering. 638 Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, 175–203.
- Dorren L. (2012): Rockyfor3D (V5.1) enthüllt - Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells.
- Dorren L., Berger F., Hir C., Mermin E. & Tardif P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests. *Forest Ecology and Management*, 215, 183–195.
- Goldsmith W. (1960): *Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids*. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- Hungr O. (2014): PIERRE, Rockfall Ballistics Analysis. Unpublished Users Manual. Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- Mitchell A. & Hungr O. (2017): Theory and calibration of the Pierre 2 stochastic rock fall dynamics simulation program, *Canadian Geotechnical Journal*, 54/1, 18–30, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0039>.
- Pfeiffer T. & Bowen T. (1989): Computer Simulation of Rockfalls. *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, 26/1, 135–146.
- Preh A. (2016): *Rock Slopes: Detachment and Runout (Felsböschungen: Abbruch und Sturzprozess)*. Habilitationsschrift, Technischen Universität Wien, Lehrbefugnis für das Fach „Angewandte Felsmechanik, Fakultät für Bauingenieurwesen, April 2016.
- 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. & Mölk M. (2018): *Steinschlagsimulationsmodelle* [Book Section].
- Preh A., Mitchell A., Hungr O. & Kolenprat B. (2015a): Stochastic analysis of rock fall dynamics on quarry slopes.- *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 80, 57–66, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2015.09.010>.
- Preh A., Kolenprat B., Hungr O. & Mitchell A. (2015b): Stochastische Steinschlagprognose zur Festlegung von (tagbauspezifischen) Gefahrenbereichen laut Tagbauarbeitenverordnung (TAV). *ÖIAZ - Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift*, 160, 177–185.
- Pamminger P.: *Untersuchungen zum Einfluss der Blockfragmentierung am Beispiel der Liechtensteinklamm mit Hilfe des Berechnungsansatzes WURF*, Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, TU Wien (in Ausarbeitung).
- RocScience Inc. (2013): *RocFall Manual*, <https://www.rocscience.com/help/rocfall/webhelp6/RocFall.htm>.
- Ramachandran P. & Varoquaux G. (2011): Mayavi: 3D Visualization of Scientific Data. *Computing in Science & Engineering*, 13/2, 40–51. <https://doi.org/10.1109/mcse.2011.35>.
- Spang & Romunde (2008): *ROCKFALL - RockTree Waldmodul – Zusatz zu ROCKFALL 7 zur Simulation des Waldeinflusses*.
- Tobler D., Graf K. & Krummenacher B. (2009): *Rockfall assessment of natural hazards by 3D-simulation*.