

Stochastische Steinschlagprognose zur Festlegung von (tagbauspezifischen) Gefahrenbereichen laut Tagbauarbeitenverordnung (TAV)

Stochastic analysis of rock fall for the determination of danger areas in accordance with a new Austrian regulation titled „Tagbauarbeitenverordnung (TAV)“

Von A. Preh, B. Kolenprat, Wien, O. Hungr und A. Mitchell, Vancouver, Kanada

Mit 12 Abbildungen und 3 Tabellen



Assistant Prof. Dipl.-Ing.
Dr. Alexander Preh



Mag.
Bernd Kolenprat



Prof.
Oldrich Hungr



Andrew Mitchell,
M.A.Sc., E.I.T.

Kurzfassung

Herabfallendes Gestein stellt im Festgesteinstagebau eine Hauptunfallursache für Arbeitnehmer/innen dar. Als Folge der im Jahr 2011 in Kraft getretenen Tagbauarbeitenverordnung ist es nunmehr erforderlich, das Ausmaß und die Auswirkungen von potentiellen Steinschlagereignissen festzustellen und die betroffenen Bereiche als tagbauspezifische Gefahrenbereiche festzulegen. Es zeigte sich, dass kaum für Tagbaue heranziehbare Fallstudien bzw. empirische Daten vorlagen, um diese Gefahrenbereiche am Böschungsfuß akkurat festzulegen. In einem Forschungsprojekt des Instituts für Geotechnik der TU Wien und des Bundesministeriums für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz wurden 589 Fallversuche in österr. Tagbauen durchgeführt um Erkenntnisse über den Bewegungsablauf und die Reichweite von Steinschlag zu gewinnen. Zusätzlich wurde ein von der University of British Columbia (Vancouver, Kanada) durchgeführter Versuch zur Verdichtung der Daten herangezogen. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden mit Hilfe eines neu entwickelten stochastischen Steinschlagmodells rückgerechnet und ein Satz von Vorhersageparametern abgeleitet. Die Vergleichsrechnungen zeigen, dass mit dem vorgestellten Modell und dem ermittelten Parametersatz erste Vorhersagen möglich sind und die erforderlichen Gefahrenbereiche abgeschätzt werden können.

Abstract

Falling rocks are a common cause of accidents in pits and quarries. In Austria, a new regulation concerning health and safety at work plants for quarries, titled „Tagbauarbeitenverordnung – TAV“, came into force in 2011. This regulation includes the requirement of specific risk assessment of geologic hazards with the purpose to determine areas in which danger of rock fall exists. It is presently difficult to take adequate mitigation

measures to reduce risk, because few proven tools exist that can supply complete quantitative probabilistic estimates of required hazard parameters, such length of runout, bounce heights and velocities. In a research project conducted by the Vienna University of Technology and the Austrian Central Labour Inspectorate, 589 full-scale drop tests were carried out in different quarries, recording key parameters of the rock fall trajectories. Similar drop tests were conducted by a team from the University of British Columbia and the B.C. Ministry of Transportation and Highways at a quarry site in British Columbia, Canada. The results of the tests are compared to computer analyses conducted with a new stochastic rockfall model, using a single set of parameters for all the sites. The results of the comparisons indicate that approximate first-order predictions, using a single set of input parameters, are possible and can be used to aid practical hazard and risk assessment.

1. Einleitung

Die aus dem Versagen des Gebirges resultierenden Gefahren für Arbeitnehmer/innen durch herabfallendes Gestein (Einzelböcke oder Felsmassen) und Absturz von Böschungsoberkanten stellen im Festgesteinstagebau Hauptgefahrenquellen dar und führen meist zu Arbeitsunfällen mit schwerem oder mortalem Ausgang. Mit der im Jahr 2011 in Kraft getretenen Tagbauarbeitenverordnung (TAV, BGBl. II Nr. 416/2010) wird nunmehr eine Reihe von dezidierten Bestimmungen vorgegeben, um diese Gefahren zu vermeiden bzw. weitgehend zu minimieren. Die zentrale rechtliche Vorgabe ist hierbei die Verpflichtung zu einer speziellen Ermittlung und Beurteilung der geogenen Gefahren im Rahmen der Arbeitsplatzevaluierung. Hierbei sind das Ausmaß, die Auswirkungen und die Eintrittswahrscheinlichkeit von Versagensereignissen festzustellen (§ 8 Abs. 1 TAV) und die betroffenen Bereiche als tagbauspezifische Gefahrenbereiche festzulegen (§ 10 Abs. 1 TAV). Dies hat die Grundlage

für eine entsprechende Planung und Anpassung der Tagbauzweckparameter (der geometrischen Gestaltung der Tagbaue) darzustellen (§ 9f TAV). Insbesondere sind Mindestbreiten von Arbeitsetagen sowie Maximalhöhen von Tagbauböschungen in Abhängigkeit zu den jeweiligen Böschungsorientierungen so festzulegen, dass geplante Arbeiten auf Arbeitsetagen in einem sicheren Bereich ohne voraussehbare Gefahren für Arbeitnehmer/innen durchgeführt werden können (Gefahrenbereichskonzept, Kolenprat 2012).

Hinsichtlich des Gefahrenbereiches am Böschungsfuß kann dieser entsprechend den Schutzobjekten, welche sich auf den Arbeitsetagen befinden, unterteilt werden. In Hinblick auf die Gefahr durch herabfallende Einzelblöcke ist eine Differenzierung des Gefahrenbereiches am Böschungsfuß in einen für die Führer von selbstfahrenden Arbeitsmitteln (GB_{UK-AM}) und jenen für ungeschützte Arbeitnehmer/innen (GB_{UK-AN}) möglich (siehe Abb. 1). Ersterer wird durch die Auftreffdistanz (ATD) von Einzelblöcken bestimmt, da ausrollende Blöcke für die Führer von Erdbaumaschinen und Lastkraftwagen eine geringere Gefährdung darstellen. Der Gefahrenbereich für Arbeitnehmer/innen, welche Arbeitsetagen zu Fuß begehen, wird durch die Ausrolldistanz (ARD) der Einzelblöcke definiert.

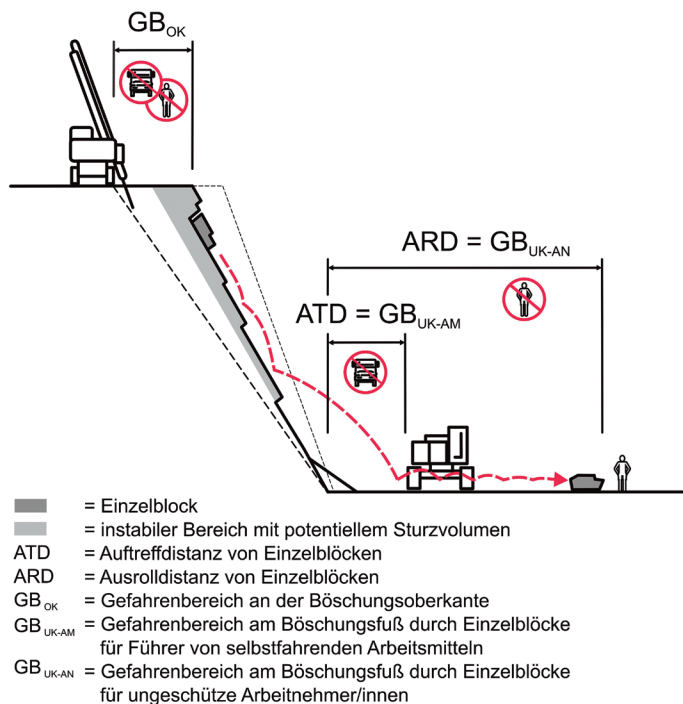


Abb. 1: Tagbauspezifische Gefahrenbereiche bei Felsböschungen (Kolenprat 2012)

Fig. 1: Danger areas associated with a quarry face. (Kolenprat 2012)

Bezüglich der Festlegung dieser Gefahrenbereiche am Böschungsfuß zeigte sich, dass kaum für Tagbaue heranziehbar Fallstudien bzw. empirische Daten vorlagen, um diese akkurat festzulegen. Weiters ist festzustellen, dass vorhandene Berechnungsansätze zur Analyse und Prognose von Steinschlag für die Hangskala entwickelt wurden und diese daher nicht ohne Anpassungen zur Festlegung der Auftreff- und Ausrolldistanzen in Tagbauen herangezogen werden können.

Dies führte zu Fehleinschätzungen und machte es notwendig, diese Problematik mit neuen Methoden und Ansätzen zu unter-

suchen. In zwei Kooperationsprojekten zwischen dem Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie der TU Wien und dem Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz, Sektion Zentral-Arbeitsinspektorat, wurde mit Unterstützung einer Reihe von Unternehmen der Bergbaubranche ab dem Jahr 2007 begonnen, systematische Fallversuche in Tagbauen durchzuführen. Ziel dieser Forschungsprojekte war es, Erkenntnisse über den Prozessablauf und die Reichweite von Steinschlag zu gewinnen und den Einfluss von verschiedenen Parametern, wie der Böschungshöhe, Böschungsneigung, Böschungsform, Oberflächenrauigkeit, Blockmasse und -form und der Materialeigenschaften von Blöcken und Untergrund auf die Auftreff- und die Ausrolldistanz zu untersuchen. Weiters sollte ein empirischer Datensatz geschaffen werden, um eine Prädiktion von Sturzprozessen für Tagbauböschungen zu ermöglichen, welche zukünftig insbesondere für die Genehmigung von geplanten Tagbauen dienen soll.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden in Folge dazu verwendet, um in Kooperation mit der University of British Columbia, Vancouver (Canada) den von O. Hunger (2014) entwickelten Berechnungsansatz PIERRE für die spezifischen Gegebenheiten von Tagbauböschungen und Böschungssystemen in Tagbauen zu adaptieren. Die Umsetzung des Projekts erfolgte durch die Implementierung des Berechnungsansatzes in das von A. Preh (2015) entwickelte Steinschlagprogramm THROW. Neben den in Österreich gewonnenen Erkenntnissen wurden zur Kalibrierung und Verifizierung des Berechnungsansatzes weitere durch die University of British Columbia durchgeführte Versuche herangezogen.

Die vorliegende Publikation präsentiert die Ergebnisse der in den Tagbauen durchgeführten Großversuche und die Prognose von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen (Auftreff- und Ausrolldistanzen von Einzelblöcken) auf Basis der erhobenen empirischen Daten und mit Hilfe des neu entwickelten Berechnungsansatzes PIERRE.

2. Sturzversuche

2.1. Versuchsdurchführung

Im Zuge der Projekte wurden in zehn Tagbauen (9 in Österreich und ein Tagbau in British Columbia, Kanada) Sturzversuche durchgeführt. Bei den österreichischen Tagbauen handelt es sich um die Standorte Klösch (Abb. 3), Wanko, Erzberg, Pauliberg, Preg, Loja, Bad Deutsch Altenburg, Mannersdorf und Dürnbach. Der untersuchte kanadische Steinbruch Nicolum liegt ungefähr 200 km östlich von Vancouver im Bezirk British Columbia. In Summe wurden 589 Blöcke an 14 unterschiedlichen Böschungen abgeworfen. Der gesamte Datensatz diente der Herleitung der in diesem Kapitel präsentierten empirischen Beziehungen. 7 Tagbauböschungen (311 Abwürfe) wurden für detaillierte Rückrechnungen herangezogen.

Vorrangiges Ziel der Versuche war es, Worst-Case-Szenarien zu untersuchen und somit maximale Auftreff- und Ausrolldistanzen zu erhalten. Bei den Versuchen wurden daher vor allem equidimensionale Blöcke von der Böschungsoberkante abgeschoben (Abb. 2). Die Blockmassen wurden entsprechend den lokalen Kluftkörpergrößen ausgewählt, wobei eine möglichst lineare Verteilung der Massen angestrebt wurde (die Blockmasse reichte hierbei von 2 kg bis 44 t). Die Auswahl der Tagbauböschungen berücksichtigte unterschiedliche Böschungsformen (konvexe bis konkave Formen) und unterschiedliche Böschungsneigungen (Neigungen zwischen 53 bis 71°). Bei den Felsböschungen wurden Höhen von 9 bis 30 m getestet. Hauwerk, welches am Böschungsfuß lag, wurde aufgrund der erhöhten dämpfenden Wirkung beseitigt. Um Block-Block-Interaktionen zu vermeiden,

erfolgte nach jedem fünften Abwurf ein Beseitigen der abgestürzten Blöcke sowie eine Wiederherstellung der Etagenoberfläche. Die Ausrolldistanz (Endlage) wurde mittels Maßband ermittelt. Hierbei wurde eine orthogonal auf das Streichen der Böschung stehende Strecke zwischen dem Böschungsfuß und der Endlage gemessen. Die Auftreffdistanz wurde aus Videoanalysen ermittelt. Zur einfacheren Bestimmung dieser wurde der Böschungsfuß mit einem aufgesprühten Raster versehen (Abb. 2 und Abb. 3). Jeder Versuch wurde mit zumindest zwei Digitalkameras dokumentiert, wobei eine Kamera orthogonal zum Sturzprozess an der Böschungsoberkante und die zweite in Blickrichtung zu den herannahenden Blöcken am Böschungsfuß aufgestellt wurde. Dies ermöglichte auch eine Dokumentation der Trajektorien und der Bewegungsmechanismen. Die Dokumentation der Böschungsgeometrie, welche für die Erstellung von genauen Schnitten für die Analyse erforderlich war, wurde mittels Photogrammetrie erstellt. Hierbei wurde das Shape-MetriX3 System der 3G Software & Measurement GmbH verwendet.



Abb. 2: Versuchsanordnung im Tagbau Erzberg (Photo: Kolenprat)
 Fig. 2: Test setting at the Quarry Erzberg (Photo: Kolenprat)

2.2. Wesentliche Ergebnisse der Fallversuche

Ein Ziel der Forschungsprojekte war es unter anderem, Auftreff- und Ausrolldistanzen als Funktion der Böschungshöhe bzw. Fallhöhe zu untersuchen. Das Histogramm der Abbildung 4b zeigt die auf die Böschungshöhe normierten Ausrolldistanzen (ARD) aller durchgeführten Fallversuche. Von besonderem Interesse ist, dass sich die hierbei vorliegende Verteilung durch eine logarithmische Normalverteilung approximieren lässt. Die sehr gute Qualität der Approximation wird durch den Kolmogorov-Smirnov-Test mit einem D-Wert von 0,037 und einem p-Koeffizienten von 0,372 dokumentiert. Gleiches lässt sich für die Verteilung der Auftreffdistanzen (ATD) zeigen. Abbildung 4a gibt die Verteilung der auf die Böschungshöhe normierten Auftreffdistanzen sowie die Approximation durch die entsprechende logarithmische Normalverteilung wieder. Mit Hilfe dieser Histogramme und Verteilungsfunktionen ist es möglich, eine empirische Abschätzung der Reichweiten von Einzelblöcken für Standardböschungen (entsprechend den gewünschten Perzentilen) vorzunehmen. Diese Werte könnten insbesondere bei der Planung von neuen Tagbauen oder Tagbauzuschnittsparametern als Anhaltspunkte dienen. Anzumerken ist, dass repräsentative In-situ-Versuche bzw. anhand von Fallversuchen verifizierbare Berechnungen zu bevorzugen sind.



Abb. 3: Sturzversuche im Tagbau Klöch (Photo: Preh)
 Fig. 3: Rock fall drop tests in progress at the Klöch Quarry (Photo: Preh)

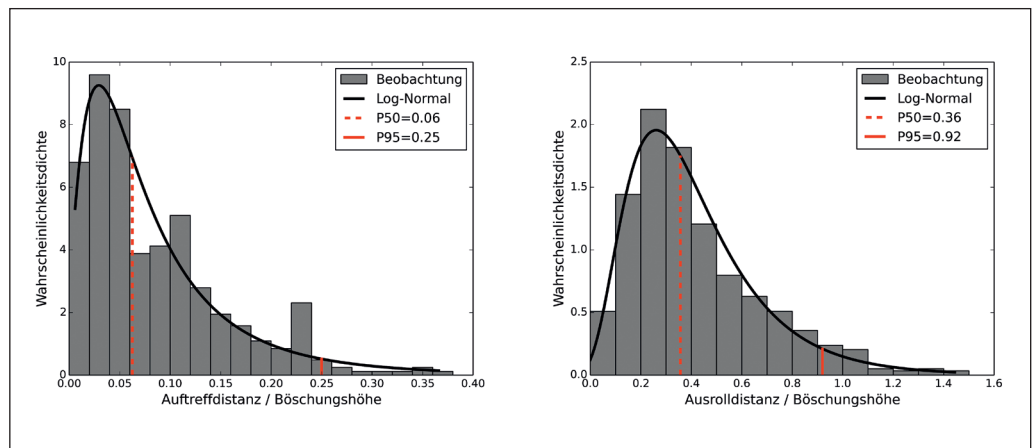
Folgende allgemeine Beobachtungen ließen sich feststellen:

- je größer die Böschungshöhe bzw. Fallhöhe, desto größer sind die durchschnittlichen Auftreff- und Ausrolldistanzen,
- größere Böschungshöhen bzw. Fallhöhen führen zu einer größeren Streuung der Auftreff- und Ausrolldistanzen,

- steile oder überhängende Böschungen sowie Böschungen mit konvexer Form zeigen im Vergleich zu flacher geneigten Böschungen oder Böschungen mit konkaver Form größere Auftreffdistanzen aber geringere Ausrolldistanzen,
- flacher geneigte Böschungen oder Böschungen mit konkaver Form erzeugen geringe Auftreffdistanzen nahe dem Böschungsfuß und große variable Ausrolldistanzen,

Abb. 4: Summe aller in den neun österr. Steinbrüchen durchgeführten Versuche. Histogramme und Dichtefunktionen der auf die Böschungshöhe normierten Auftreffdistanzen (a) und Ausrolldistanzen (b), aufgrund von 412 bzw. 589 Messwerten. (Preh et al. 2015)

Fig. 4: Summary of all drop tests in nine Austrian quarries. Histograms and probability density functions of (a) the first impact distance (412 measurements) and (b) runout distance (589 measurements), measured from the slope toe and normalized by slope height. (Preh et al. 2015)



- Springen stellt den dominanten Bewegungsmechanismus dar, Rollen tritt meist nur am Anfang und am Ende des Sturzprozesses auf, Gleiten kann initial auftreten,
- die Rauigkeit der Böschungen hat einen starken Einfluss auf den Bewegungsmechanismus des Springens und somit auf die Auftreffdistanz,
- große Sprunghöhen konnten generell nicht beobachtet werden,
- Blöcke mit einer höheren Masse zeigen im Vergleich zu leichten Blöcken eine niedrige Rückprallhöhe,
- Blöcke mit einer geringeren Masse zeigen im Vergleich zu schwereren Blöcken größere Auftreffdistanzen,
- Gesteinsart und -festigkeit beeinflussen nur untergeordnet den Sturzprozess, ausgenommen davon sind Fälle, bei denen eine starke Fragmentierung der Blöcke während des Sturzprozesses eintritt,
- ein starker Einfluss der Blockform auf den Ausrollprozess konnte nicht beobachtet werden (anzumerken ist aber, dass bei den Versuchen vor allem equidimensionale Blöcke und nur wenige stark tafelige und stengelige Blöcke getestet wurden),
- Blöcke mit tafeliger oder schwach stengeliger Form zeigten im Vergleich zu equidimensionalen Blöcken eine Tendenz zum verstärkten Springen und eine größere Streuung bei der Ausrolldistanz sowie eine stärkere seitliche Streuung der Endlagen.

3. PIERRE 2D, ein stochastisches Massenpunktmodell zur Berechnung der Steinschlag-Ballistik

Prozessmodelle zur Simulation von Steinschlag existieren seit Mitte der 70er Jahre (z.B. Azimi und Desvarreux 1977, Piteau und Clayton 1977). Gegenwärtig steht eine große Anzahl von Modellen sowohl für zwei als auch für drei Dimensionen zur Verfügung (für einen aktuellen Vergleich siehe Volkweil et al. 2011).

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 und Andrew et al. 2012). Der an der University of British Columbia (Kanada) entwickelte Berechnungsansatz PIERRE (Hung 2014) benutzt im Gegensatz dazu ein simpleres Massenpunktmodell, ähnlich dem in Nordamerika weit verbreiteten CRSP-Modell (Pfeiffer und Bowen 1989) oder dem in Europa häufig eingesetzten Rockfall (Spang 2008), jedoch mit einigen wesentlichen Modifikationen.

Wie alle anderen Modelle berechnet PIERRE 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 werden mit Hilfe des Grenzreibungswinkels γ (1), welcher die Neigung des eingehenden Impulsvektors repräsentiert, zwei Arten des Anpralls unterschieden.

$$\tan \gamma = \frac{2(k_t v_t^{in} + R k_t \omega^{in})}{7 v_n^{in} (1 + k_n)} \tag{1}$$

Hier repräsentiert R den Partikelradius, v_t , v_n und ω die eingehende (Indizesⁱⁿ) tangential, normale und Winkel-Geschwindigkeit. Die Parameter k_t und k_n stehen für den normalen und tangentialen Restitutionskoeffizienten.

Die Art des Anpralls wird durch den Vergleich des Reibungswinkels zwischen der Partikeloberfläche und des Untergrunds, ϕ , mit dem Grenzreibungswinkel γ ermittelt. Ist $\phi > \gamma$ spricht man von „begrenztem Gleiten“, dies bedeutet, dass der Gleitprozess innerhalb der Zeitspanne des Kontakts endet. Die ausgehenden Geschwindigkeiten (Rückprallgeschwindigkeiten, Indizes^{re}) für ein „begrenztes Gleiten“ errechnen sich wie folgt:

$$\begin{pmatrix} v_t^{re} \\ v_n^{re} \\ R\omega^{re} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{5}{7}k_t & 0 & -\frac{2}{7}k_t \\ 0 & -k_n & 0 \\ -\frac{5}{7}k_t & 0 & \frac{2}{7}k_t \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_t^{in} \\ v_n^{in} \\ R\omega^{in} \end{pmatrix} \tag{2}$$

Im Fall von $\phi < \gamma$ hängt der Rückprall vom Reibungswinkel ϕ ab und die Rückprallgeschwindigkeiten errechnen sich nach Gleichung (3).

$$\begin{pmatrix} v_t^{re} \\ v_n^{re} \\ R\omega^{re} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_t & -\tan \phi(1 + k_n) & 0 \\ 0 & -k_n & 0 \\ 0 & -\frac{5}{2} \tan \phi(1 + k_n) & k_t \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} v_t^{in} \\ v_n^{in} \\ R\omega^{in} \end{pmatrix} \tag{3}$$

Während eines Anpralls kommt es zu Energieverlusten zufolge Deformation, Bruch, Reibung und Massenverschiebung (bei der Kraterbildung). All diese Verluste steigen mit der Zunahme der eingehenden kinetischen Energie. Zur Berücksichtigung dieser Gesetzmäßigkeit werden beim PIERRE-Modell die Restitutionskoeffizienten mit Hilfe einer hyperbolischen Funktion entsprechend dem Vorschlag von Bourrier und Hung (2013) proportional zur eingehenden kinetischen Energie skaliert. Im präsentierten Fall wurden die Restitutionskoeffizienten an dem Anteil der eingehenden kinetischen Energie normal zum Untergrund, berechnet als $E_n^{in} = R v_n^{in 2}$, skaliert.

$$k_n = \frac{E_{0.5,n}}{E_n^{in} + E_{0.5,n}} \quad k_t = \frac{E_{0.5,t}}{E_n^{in} + E_{0.5,t}} \tag{4}$$

$E_{0.5,n}$ und $E_{0.5,t}$ repräsentieren in der Formel (4) Referenzenergien (Eingabeparameter), definiert als die erforderliche eingehende kinematische Energie die zu einer Restitution von 0.5 führt (ausgehende Energie 50% der eingehenden Energie).

Der stochastische Anteil der Theorie basiert auf der Definition der „Oberflächenrauheit“ als Perturbation des lokalen Böschungswinkels im Kontaktpunkt des Anpralls, definiert als Skalierungsfaktor der Rauheit, θ_{scale} . Im Gegensatz zu vielen konservativen Berechnungsansätzen, welche die Rauheit primär als geometrische Funktion interpretieren (z.B. Sinusfunktion beim Computercode CRSP (Pfeiffer und Bowen, 1989)), wird beim vorliegenden Verfahren die Rauheit strikt als stochastischer Parameter verstanden. Im 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. Da es theoretisch schwierig ist diese Hypothese zu beweisen, versuchen die Autoren die Hypothese mittels kalibrierter Ergebnisse und durch Vorwärtsprognosen zu validieren.

Nach anfänglich mäßig erfolgreichen Kalibrationsversuchen unter Verwendung einer linearen Verteilung für die Rauheit, wurden unterschiedliche Verteilungsfunktionen getestet und

schlussendlich die in Gleichung (5) angeschriebene Box-Muller-Approximation (Scott 2011) der Normalverteilung zur Berechnung des Rauheitswerts gewählt.

Der Tangens des Rauheitswerts wird mittels Gleichung (5) für jeden Anprall aus einer Normalverteilung, definiert durch den Mittelwert μ und die Standardabweichung σ , sowie durch die beliebigen (mittels Zufallsgenerator wählbar) Konstanten S_i und S_j (Konstante zwischen 0 und 1) berechnet.

$$\tan \theta = \theta_{scale} [\mu + \sigma (\cos 2\pi S_j) \sqrt{-2(\ln(S_i))}] \quad (5)$$

Die resultierende Verteilung nach (5) kann mittels des vom Nutzer wählbaren Skalierungsfaktors θ_{scale} , welcher zwischen 0 und 1 gesetzt werden muss, kontrolliert werden. Zur Sicherung der numerischen Stabilität werden negative Werte für θ_{scale} gleich Null gesetzt. Unterschiedliche Rückrechnungen haben gezeigt, dass ein Mittelwert von $\mu = 0.5$ und eine Standardabweichung von $\sigma = 0.5$ zu guten Ergebnissen führen.

4. Modellkalibrierung

4.1. Generelle Vorgangsweise

Tagbauböschungen und Etagen sind in Bezug auf Geometrie und Materialcharakteristika von Ort zu Ort ähnlich. Ziel der Modellkalibrierung in diesem Projekt war es, ein Werkzeug zu entwickeln, welches für erste Vorhersagen von Steinschlag in Tagbauen geeignet ist. Für ein solches Prognosemodell ist es notwendig die erforderlichen Eingabeparameter auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Geländeoberfläche in Tagbauen kann grob in zwei Homogenbereiche unterteilt werden: Böschung (raue Felsoberfläche hergestellt durch Sprengung) und Etage (relativ glatter Untergrund aus kompaktiertem gebrochenem Fels). Die Eingabeparameter sind entsprechend der oben aufgestellten Hypothese unabhängig von der Blockform, da vorausgesetzt wird, dass Variatio-

nen der Blockform mittels der stochastischen Rauheitsfunktion abgebildet werden. Zusätzlich zur Partikelmasse benötigt der oben beschriebene Berechnungsansatz lediglich die in Tabelle 1 aufgelisteten Modellparameter. Ziel der Kalibration war es nicht die bestmöglichen Eingabeparameter für die jeweiligen individuellen Böschungen zu finden, sondern einen einzelnen Parametersatz zu finden, welcher ein bestmögliches Berechnungsergebnis für alle durchgeführten Sturzversuche ermöglicht. Die in Tabelle 1 aufgelisteten Parameter sind das Resultat zahlreicher Kalibrationsdurchläufe und stellen die für erste Vorhersagen der ATD und ARD bei Tagbauböschungen (gemäß den Vorgaben der TAV) bestmöglichen Modellparameter dar.

Die Kalibration erfolgte mit Hilfe des „trail-and-error“ Verfahrens. In einem ersten Schritt wurde jedoch ein systematisches Kalibrationsverfahren zur Eingrenzung des Parameterbereichs angewendet. Dabei wurde die Wurzel aus dem gemittelten Fehlerquadrat (RMSE, Root-mean-squared error) der ATD und ARD als Funktion der Eingabeparameter dargestellt und bewertet.

4.2. Kalibrationsergebnisse der österreichischen Tagbaue

Für die Kalibration wurden die drei Tagbaue Preg (Serpentinit des Gleinalmkristallins), Pauliberg und Klösch (beides Basalte der transdanubischen Vulkanregion) herangezogen. Die sechs untersuchten Böschungen in den drei ausgewählten Steinbrüchen repräsentieren typische Prototypen österreichischer Tagbauböschungen in Bezug auf die Böschungshöhe, den Böschungswinkel und die Oberflächenrauigkeit.

Die für die Rückrechnung herangezogenen Querschnitte sind in Abb. 5 dargestellt. Die Computeranalyse wurde mit Partikeln entsprechend den in den Sturzversuchen ermittelten Blockmassen durchgeführt. Zur Erhöhung der statistischen Signifikanz der stochastischen Analyse wurde in der Simulation jedes Partikel 10x abgeworfen (von derselben initialen Position, definiert durch die Position des Baggers im Feldversuch). Die

Tab. 1: Erforderliche Modellparameter ermittelt mittels Kalibration

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

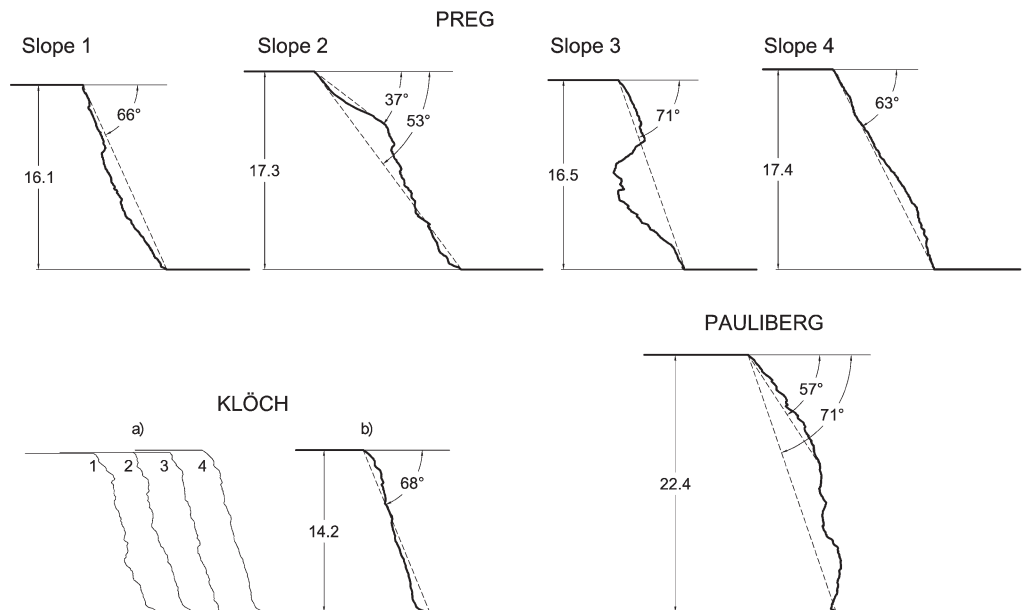


Abb. 5: Berechnungsschnitte für die Rückrechnung der österreich. Sturzversuche. (Preh et al. 2015)

Fig. 5: Cross-sections used for the back analyses of Austrian quarry tests. (Preh et al. 2015)

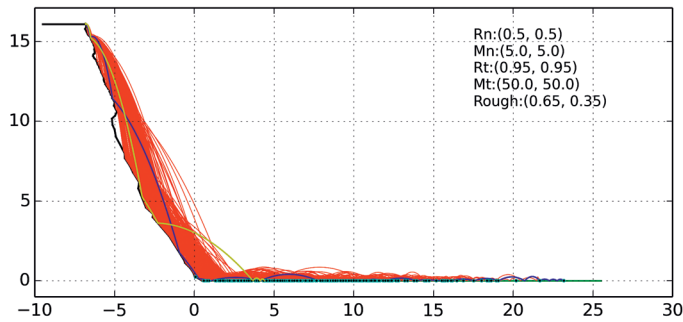


Abb. 6: Beispiele berechneter Trajektorien für den Tagbau Preg (25 Blöcke, jeder 10x abgeworfen)

Fig. 6: Example locus of calculated trajectories from the Preg site (25 boulders, each thrown 10 times).

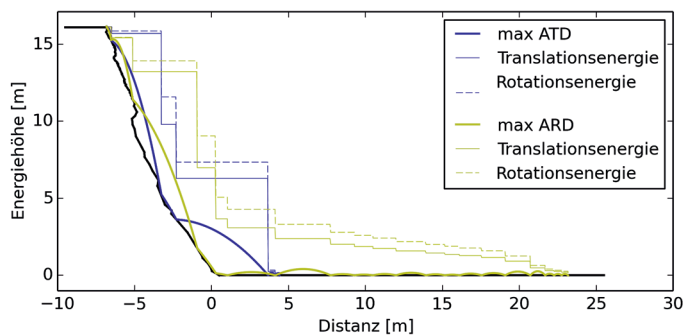


Abb. 7: Beispiel berechneter Energiehöhenlinien, Tagbau Preg.

Fig. 7: Example linear and rotational kinetic energy lines, Preg site.

Abb. 6 zeigt exemplarisch die berechneten Trajektorien für die Böschung 1 des Tagbaus Preg (siehe Abb. 5). In Abb. 7 ist für dieselbe Böschung der Energieverlauf (Energiehöhen der Translation und Rotation) für die zur max. Auftreffdistanz, ATD und zur max. Ausrolldistanz, ARD zugehörigen Trajektorien dargestellt. Zur Reduktion der Anzahl der erforderlichen Modellparameter erfolgte eine Gleichsetzung der Referenzenergien der Restitution ($E_{0,5,n}$ und $E_{0,5,t}$) für die Böschung und die Etage. Aufgrund dieses Schrittes wird nur mehr in Bezug auf die Oberflächenrauheit, mittels des Skalierungsfaktors θ_{scale} zwischen Böschung und Etage unterschieden. Die folgenden Ergebnisse zeigen, dass eine Gleichsetzung der Referenzenergien für die Böschung und die Etage zu guten Ergebnissen führt. Daher wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Werte nicht weiter untersucht. Die eigentliche Kalibrierung konzentrierte sich auf die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Bezug auf die ARD und ATD. Dazu wurden für jeden Sturzversuch der Median und die 95% Perzentile (95% Unterschreitungswahrscheinlichkeit) für die beobachteten Ausroll- und Auftreffdistanzen berechnet. Diese beiden Werte wurden zum Vergleich zwischen der Beobachtung und der Simulation herangezogen. Die erforderlichen Modellparameter gemäß Tabelle 1 wurden solange manipuliert bis eine bestmögliche Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simulation bezogen auf alle Ergebnisse aller durchgeführten Sturzversuche (inkl. des kanadischen Versuchs) erzielt wurde. Der Vergleich der Beobachtung mit den Modellergebnissen unter Anwendung der in Tabelle 1 präsentierten kalibrierten Modellparameter ist in den Tabellen 2 und 3 dargestellt. Die Beurteilung der Qualität der Anpassung erfolgte subjektiv, primär durch den Vergleich der durchschnittlichen ATD und ARD (normiert mittels der Böschungshöhe), präsentiert in der jeweiligen letzten Zeile der Tabellen 2 und 3. Detaillierte Ergebnisse der Rückrechnung für die Tagbaue Klöch und Pauliberg sind in den Abbildungen 6 und 7 dargestellt. Die Histogramme der

Tab. 2: Vergleich der berechneten mit den beobachteten Ausrolldistanzen (ARD), unter Anwendung der optimalen Eingabeparameter gemäß Tabelle 1. (Anmerkung: Die letzte Zeile zeigt die ARD dividiert durch die Böschungshöhe, siehe Abb. 5)

Tagbauböschung (Anzahl der Abwürfe)	ARD 50% [m]		ARD 95% [m]		Max. ARD [m]	
	Rechn.	Beob.	Rechn.	Beob.	Rechn.	Beob.
Klöch (97)	5.4	5.6	15.6	15.1	31.4	20.5
Pauliberg. (80)	5.1	5.0	12.5	10.5	24.3	20.8
Preg 1 (25)	7.9	10.5	16.7	15.8	20.1	17.0
Preg 2 (25)	8.0	6.0	16.7	21.9	23.7	24.0
Preg 3 (25)	5.5	6.5	15.4	14.0	21.6	18.0
Preg 4 (25)	7.4	5.0	16.3	13.6	25.0	16.5
Mittelwert (normiert durch H)	0.39	0.38	0.92	0.90	1.45	1.15

Tab. 3: Vergleich der berechneten mit den beobachteten Auftreffdistanzen (ATD), unter Anwendung der optimalen Eingabeparameter gemäß Tabelle 1. (Anmerkung: Die letzte Zeile zeigt die ATD dividiert durch die Böschungshöhe, siehe Abb. 5)

Tagbauböschung (Anzahl der Abwürfe)	ATD 50% [m]		ATD 95% [m]		Max. ATD [m]	
	Rechn.	Beob.	Rechn.	Beob.	Rechn.	Beob.
Klöch (97)	1.8	0.8	3.4	2.6	5.0	5.2
Pauliberg (80)	3.8	3.0	6.4	6.0	8.1	7.5
Preg 1 (25)	1.1	1.0	2.2	3.8	3.3	4.3
Preg 2 (25)	1.6	1.0	3.0	2.4	3.9	3.0
Preg 3 (25)	1.0	0.8	2.4	1.5	3.3	4.0
Preg 4 (25)	2.2	1.0	4.2	2.4	5.4	5.0
Mittelwert (normiert durch H)	0.11	0.07	0.21	0.18	0.28	0.28

Abb. 8: Vergleich der berechneten und beobachteten Gefahrenbereiche ARD & ATD, Tagbau Klöch (vier kombinierte Schnitte, 97 Abwürfe beobachtet, 970 Abwürfe berechnet) (Preh et al. 2015)

Fig. 8: Comparison of calculated and observed hazard distances ARD & ATD, Klöch site (four combined sections, 97 throws observed, 970 throws calculated) (Preh et al. 2015)

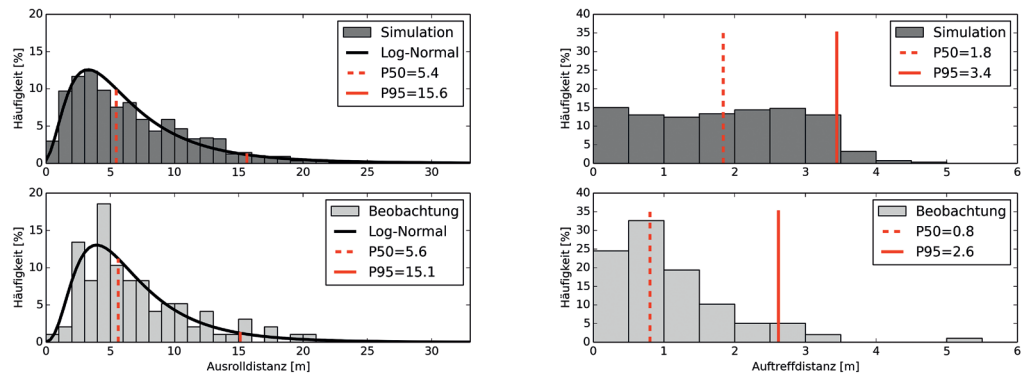
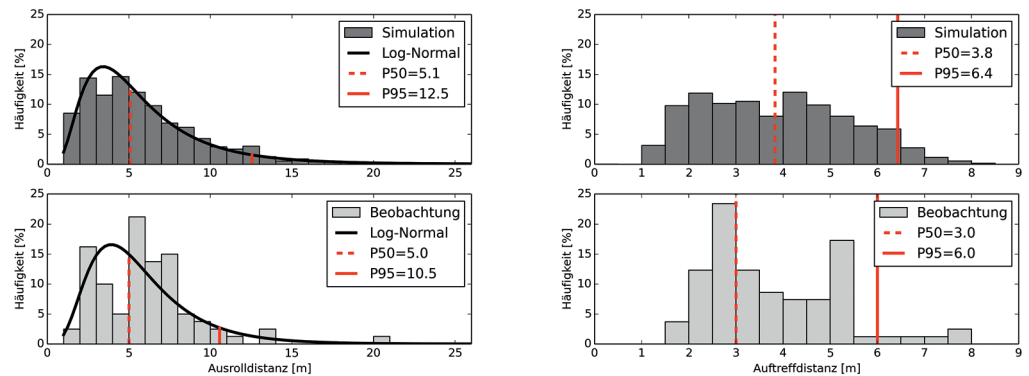


Abb. 9: Vergleich der berechneten und beobachteten Gefahrenbereiche ARD & ATD, Tagbau Pauliberg (80 Abwürfe beobachtet, 800 Abwürfe berechnet) (Preh et al. 2015)

Fig. 9: Comparison of calculated and observed hazard distances ARD & ATD, Pauliberg site (80 throws observed, 800 throws calculated) (Preh et al. 2015)



Ausrolldistanz (Abb. 8 und Abb. 9) zeigen Verteilungen, welche in Übereinstimmung mit dem KS-Test gut mittels einer Log-Normalverteilung angenähert werden können.

4.2. Kalibrationsergebnisse des kanadischen Tagbaus Nicolum

Die kanadischen Versuche wurden im Steinbruch Nicolum ungefähr 200 km östlich von Vancouver (49° 22' 49" N, 121° 22' 31" W) im Bezirk British Columbia durchgeführt. Beim Abbaugestein handelt es sich um einen Quarzdiorit von hoher Festigkeit (UCS > 250 MPa).

Im Gegensatz zu den österreichischen Versuchen standen keine aufgezeichneten Auftreff- und Ausrolldistanzen zur Verfügung. Stattdessen wurden beim kanadischen Versuch die Sprunghöhen und die Sprungweiten entlang der Sturzbahn mit Hilfe von Videoanalysen und mittels Kartierung der Auftreffpunkte ermittelt.

Bei der Kalibration wurden, wie bereits ausgeführt, jeweils die gleichen Modellparameter auf die österreichischen Steinbrüche und den Steinbruch Nicolum angewendet. Die folgenden Abbildungen zeigen die mit den in Tabelle 1 gelisteten optimalen Modellparametern (Vorhersageparametern) ermittelten Ergebnisse.

Die Abb. 10 zeigt den Vergleich der beobachteten und simulierten maximalen Sprunghöhen entlang der vertikalen Erstreckung der Versuchsböschung. Der Vergleich zeigt, dass sowohl der Trend bezüglich der Zunahme der Sprunghöhen mit zunehmender Sturzweite als auch die Maxima gut abgebildet werden. Die Abb. 11 zeigt ein Beispiel berechneter Trajektorien für den Tagbau Nicolum.

Bezüglich detaillierter Ergebnisse wird auf Preh et al. (2015) verwiesen.

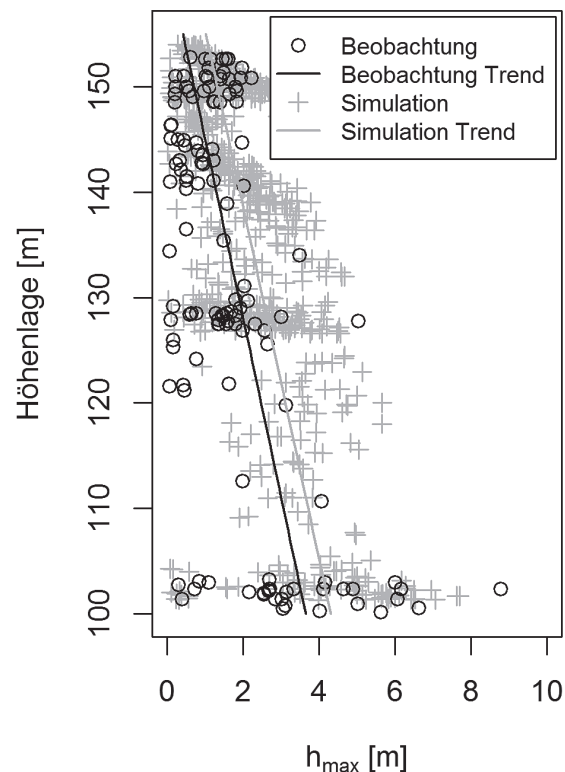


Abb. 10: Vergleich der beobachteten und simulierten maximalen Sprunghöhen entlang des vertikalen Profils der Versuchsböschung Nicolum (Preh et al. 2015)

Fig. 10: Comparison of observed and simulated maximum bounce heights at different elevations along the Nicolum quarry profile (Preh et al. 2015)

5. Vergleich mit der Studie von Pierson et al. (2001)

Eine vergleichbare Studie mit 11.250 Fallversuchen an 45 eigens hergestellten Versuchsböschungen wurde 2001 in Oregon (US) von Pierson et al. (2001) durchgeführt. Ziel der Untersuchungen von Pierson et al. war es, Richtlinien und Entwurfsdiagramme zur Dimensionierung von Auffangräumen für Steinschlag bei Straßenböschungen auszuarbeiten. Da die von Pierson entwickelten Entwurfsdiagramme vermehrt zur Festlegung der laut TAV erforderlichen Gefahrenbereiche eingesetzt werden, wurden zur Verifikation Vergleichsrechnungen mit dem vorgestellten Modell durchgeführt.

Die Fallversuche wurden an 12,2, 18,3 und 24,4 m hohen Böschungen mit Neigungen von 90, 76, 63, 53 und 45° durchgeführt. Die Auffangräume waren hierbei flach bzw. 9,5° und 14° gegen die Böschung einfallend geneigt. Bei jeder Versuchsböschung wurde ein Standardblocksatz im Umfang von 250 Blöcken (bestehend aus 100 Blöcken, deren längste Achse

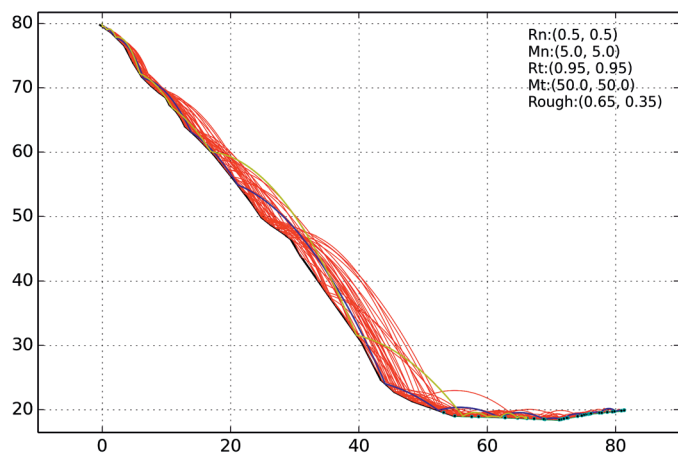


Abb. 11: Beispiele berechneter Trajektorien für den Tagbau Nicolum (34 Blöcke, jeder 1x abgeworfen)

Fig. 11: Example locus of calculated trajectories from the Nicolum site (34 boulders, each boulder thrown once).

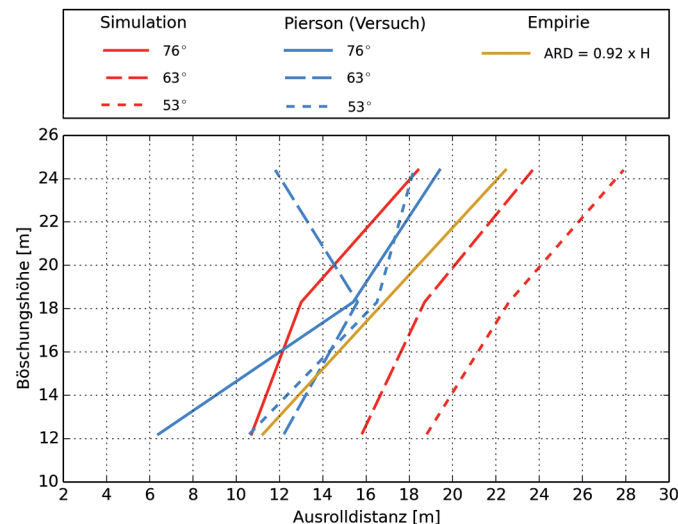


Abb. 12: Gegenüberstellung der berechneten, beobachteten und empirisch ermittelten 95%-Perzentilen der Ausrolldistanzen ARD; Darstellung entsprechend dem Entwurfsdiagramm nach Pierson.

Fig. 12: Comparison of calculated, observed and empirically determined 95% percentile values of the hazard distances ARD; visualization according to the design chart by Pierson.

0.3 ± 0,15 m, 75 Blöcken deren längste Achse 0.6 ± 0,15 m und 75 Blöcke deren längste Achse 0.9 ± 0,15 m ausweist) abgestürzt. In Summe wurden somit die Auftreffdistanzen und Ausrolldistanzen von 11.250 Sturzversuchen ermittelt.

Für einen ersten Vergleich mit PIERRE wurden die Ergebnisse für den flachen Auffangraum (vergleichbar mit der Situation auf den Arbeitsetagen), mit Böschungshöhen von 12,2, 18,3 und 24,4 m und Böschungsneigungen von 76, 63 und 53° herangezogen. Der gesamte für die Rückrechnung herangezogene Datensatz umfasst somit 2.250 Sturzversuche (9 Böschungen á 250 Abwürfe). Zur Erhöhung der statistischen Signifikanz der Berechnungsergebnisse wurde in der Simulation jedes Partikel 5x abgeworfen.

In den von Pierson entwickelten Entwurfsdiagrammen wird die erforderliche Breite des Auffangraums (diese entspricht der ARD), gruppiert nach den untersuchten Böschungswinkeln und dem berechneten Unterschreitungsanteil (dieser entspricht der jeweiligen Perzentile der ARD), der Böschungshöhe gegenübergestellt. Die Abb. 12 zeigt die Gegenüberstellung der mit PIERRE und den in Tabelle 1 präsentierten Vorhersageparametern berechneten 95% Perzentilen (P95) der Ausrolldistanzen mit den von Pierson veröffentlichten Versuchsergebnissen. Die in Abb. 8 dargestellten Graphen der Versuchsergebnisse wurden mit Hilfe der von Pierson et al. veröffentlichten Rohdaten erstellt. Dieses auf den Rohdaten der Versuche basierende Diagramm unterscheidet sich geringfügig von dem in der Pierson-Studie veröffentlichten Entwurfsdiagramm, da bei diesem zusätzliche Ergebnisse aus Steinschlagsimulationen mit Hilfe des Computercodes CRSP (Pfeiffer und Bowen 1989) als auch Interpretation mit eingeflossen sind.

Die Simulationsergebnisse zeigen eine eindeutige Zunahme der ARD mit zunehmender Böschungshöhe und abnehmendem Böschungswinkel (Abb. 12). Aus den Versuchsergebnissen von Pierson et al. sind diese Abhängigkeiten nicht bzw. nicht eindeutig ableitbar. Die Darstellung der Versuchsergebnisse zeigt bei Böschungen mit einem Böschungswinkel von 53° und 63° (blau strichlierte Linien) eine atypische Abnahme der ARD mit zunehmender Böschungshöhe (ab einer Böschungshöhe von 18,3 Metern). Darüber hinaus ist bei den von Pierson publizierten Versuchsergebnissen kein oder kein signifikanter Einfluss der Böschungsneigung auf die Ausrolldistanz (ARD) erkennbar. Dieses Verhalten widerspricht den bei den österreichischen Versuchen getätigten Beobachtungen.

Die in Abb. 12 golden dargestellte Linie repräsentiert die im Kapitel 2.2 vorgestellte empirische Gesetzmäßigkeit (P95 ARD = 0.92 * Böschungshöhe) zur Abschätzung der 95%-Perzentile (95% Unterschreitungswahrscheinlichkeit) der ARD. Diese Linie stellt einen Mittelwert für die 14 untersuchten österr. Tagbauböschungen dar und sollte daher ebenfalls einen Mittelwert in Bezug auf die von Pierson ermittelten Versuchsergebnisse liefern. Sie repräsentiert aber eher eine obere Grenze in Bezug auf die publizierten Versuchsergebnisse.

5. Diskussion und Schlussfolgerungen

Die hier präsentierten Forschungsergebnisse zeigen die Kalibrierung eines einfachen stochastischen zweidimensionalen Massenpunktmodells und die Ableitung eines einzelnen Sets von Vorhersageparametern anhand von Versuchsergebnissen aus zwei Ländern. Wie anhand des in den Tabellen 2 und 3 und den Abb. 6 und 7 präsentierten Vergleichs ersichtlich, ist die Übereinstimmung zwischen den Beobachtungen und den Berechnungsergebnissen zwar nicht perfekt, aber von konsistent guter Qualität. Steinschlag an Felsböschungen ist ein chaotischer, stark zufälliger Prozess, daher kann niemals eine perfekte Übereinstimmung zwischen Beobachtung und Simula-

tion erreicht werden. Der hier präsentierte Berechnungsansatz PIERRE liefert jedoch zusammen mit den in Tabelle 1 aufgelisteten rückgerechneten Modellparametern eine brauchbare Annäherung an den Beobachtungen und zwar sowohl in Bezug auf die durchschnittlichen Werte und die Verteilungen der Ausroll- und Auftreffdistanzen als auch bei den Extremwerten.

Die Zufälligkeit des Prozesses Steinschlag hat viele Ursachen. Die Zufälligkeit des präsentierten Berechnungsansatzes basiert jedoch lediglich auf der Definition der „Oberflächenrauheit“ als Perturbation des lokalen Böschungswinkels. Trotz dieser und weiterer Vereinfachungen, wie die Repräsentation einer dreidimensionalen irregulären Felsoberfläche durch einen einzelnen idealisierten zweidimensionalen Schnitt, ist es möglich sowohl das durchschnittliche Verhalten als auch die Variabilität des Prozesses abzubilden. Zweidimensionale Berechnungen sind zum Zwecke einer ersten Vorhersage in Tagbauen bestens geeignet. Der Vorteil der höheren Genauigkeit von 3D-Modellen (durch die Modellierung der seitlichen Streuung) ist in Tagbauen im Allgemeinen nicht nutzbar, da die dazu erforderlichen hochauflösenden digitalen Geländemodelle zumeist nicht zur Verfügung stehen und sich das Gelände durch den Abbau (Sprengarbeiten) auch laufend ändert.

Der Vergleich mit der Studie von Pierson et. al. zeigt, dass die durch die Versuche in den Tagbauen gewonnen empirischen Beziehungen und Prognoseparameter nicht ohne Adaption auf die in der Pierson-Studie vorherrschenden Verhältnisse übertragbar sind. Für die Interpretation und das Verständnis der Ergebnisse von Pierson et al. im Vergleich zur präsentierten österreichisch-kanadischen Studie sind weitere Untersuchungen erforderlich. Dazu ist anzumerken, dass die Versuchsböschungen der Pierson-Studie sich bezüglich ihrer Herstellung signifikant von den in der österreichisch-kanadischen Studie untersuchten Tagbauböschungen unterscheiden. Die von Pierson untersuchten Böschungen wurden mittels Presplitting hergestellt und weisen dadurch im Vergleich zu den Tagbauböschungen eine signifikant geringere Rauheit auf. Weiters unterscheiden sich die Böschungen der zwei Studien durch den Grad der Verdichtung des Ausrollbereichs am Böschungsfuß. Die Arbeitsetagen (Ausrollbereich) in den Tagebauen sind durch den täglichen Arbeitsverkehr im Vergleich zu den ausschließlich für die Pierson-Studie hergestellten Ausrollbereichen stärker verdichtet.

Danksagung

Die vorliegenden österreichischen Untersuchungen basieren auf zwei Forschungs- und Entwicklungsprojekten, welche vom Bundesministerium für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz, Zentral-Arbeitsinspektorat, initiiert und mitfinanziert wurden und in Kooperation mit dem Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie der TU Wien durchgeführt wurden. Die kanadischen Untersuchungen erfolgten im Rahmen eines an Prof. O. Hungr vergebenen Projektes des Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC). Folgenden Partnern wird für ihre Unterstützung bei der Durchführung der Sturzversuche gedankt: Klöcher Basaltwerke GmbH & Co KG, Asamer Kies- und Betonwerke GmbH, VA Erzberg GmbH, Basaltwerk Pauliberg GmbH & Co KG, Pronat Steinbruch Preg GmbH, Schotter- und Betonwerk Karl Schwarzl Betriebsgesellschaft mbH, Cemex Austria AG, Lafarge Perlmöoser GmbH, Wopfinger Baustoffindustrie GmbH und dem British Columbia Ministry of Transportation and Highways.

References

- [1] Andrew R, Hume H, Bartingale R, Rock A, Zhang R. (2012) CRSP-3D User's Manual Colorado Rockfall Simulation Program. Federal High-

- way Administration Report CO 80228FHWA-CFL/TD-12-007, Lakewood, Colorado, 163 p.
- [2] Azimi, C. & Desvarreux, P. (1977) Calcul de chutes de blocs et vérification sur modèle réduit, Internal Technical Report ADRGT.
- [3] Bourrier F. & Hungr, O. (2013) Rockfall Dynamics: A Critical Review of Collision and Rebound Models, In: Lambert S, Nicot F, editors. Rockfall Engineering. 638 Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc, p. 175-203.
- [4] 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, 2012: EGU2012-11022-1.
- [5] Goldsmith W. (1960) Impact: The theory and physical behaviour of colliding solids. London: Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- [6] Hungr, O. (2014) PIERRE, Rockfall Ballistics Analysis. Unpublished Users Manual. Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- [7] Kolenprat, B. (2012) Tagbauarbeitenverordnung. Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 157(4), 160-164.
- [8] Pfeiffer T. & Bowen T. (1989) Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 26(1), 135-146.
- [9] Pierson, L. A., Gullixson, C. F. & Chassie, R. G. (2001) Rockfall Catchment Area Design Guide, Final Report SPR-3(032), Metric Edition incl. Appendix, 284 p.
- [10] Piteau D. R., & Clayton R. (1977) Discussion of paper „Computerized design of rock slopes using interactive graphics“ by Cundall P.A., Voegelle M.D. and Fairhurst C., In: Proceedings of the 16th US Symposium on Rock Mechanics, 62-63.
- [11] Preh, A. (2015) THROW - A computer code for stochastic analysis of rockfall. Unpublished Users Manual.
- [12] Preh, A., Mitchel, A., Oldrich, H. & Kolenprat B. (2015) Stochastic analysis of rock fall dynamics on quarry slopes. In J Rock Mech Mining Sci, 80 (2015), 57-66, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmmms.2015.09.010>
- [13] Scott DW. (2011) Box-Muller transformation, Computational Statistics, 3, 177-179.
- [14] 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.
- [15] Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, Agliardi F, Berger F, Bourrier F, Dorren L KA, Gerber W, Jaboyedoff M. (2011) Rockfall characterisation and structural protection – A review, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11 (2011), 2617-2651.

Assistant Prof. Dipl.-Ing. Dr. Alexander Preh
Institut für Geotechnik
Forschungsbereich für Ingenieurgeologie
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13, 1040 Wien
Tel: +43-1-58801-20312
alexander.preh@tuwien.ac.at

Mag. Bernd Kolenprat
Zentral-Arbeitsinspektorat
Bundesministerium für Arbeit,
Soziales und Konsumentenschutz
Stubenring 1, 1010 Wien
Tel: +43 (1) 711 00-2188
bernd.kolenprat@sozialministerium.at

Prof. Oldrich Hungr
Earth, Ocean and Atmospheric Sciences
University of British Columbia
2207 Main Mall, Vancouver, V6T 1Z4, Canada.
ohungr@eos.ubc.ca

Andrew Mitchell, M.A.Sc, E.I.T.
BGC ENGINEERING INC.
Suite 500 – 980 Howe Street
Vancouver, BC, Canada, V6Z 0C8
AMitchell@bgcengineering.ca