

Empirische Methoden zur Bestimmung von Reichweiten von Sturzprozessen in Tagbauen

Bernd Kolenprat (1), Peter Jauernig (1), Alexander Preh (2)

(1) Bundesministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Konsumentenschutz, Sektion Arbeitsrecht und Zentral-Arbeitsinspektorat, Stubenring 1, 1010 Wien. bernd.kolenprat@sozialministerium.at, peter.jauernig@sozialministerium.at

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

1. Einleitung

Fallversuche stellen (sofern diese hinsichtlich der Anzahl der Würfe, der Verteilung der Blockmassen, der Böschungsformen oder -höhen usw. repräsentativ sind) die plausibelste Methode dar, um Reichweiten von abgehenden Einzelblöcken zu bestimmen und in Folge tagbauspezifische Gefahrenbereiche am Böschungsfuß festzulegen.

Mit Hilfe eines umfangreichen empirischen Datensatzes, welcher auf Untersuchungen eines breiten Spektrums von Fallhöhen, Neigungen und Formen von Felseinzelböschungen und einer größeren Bandbreite an Blockformen und -massen basiert, ist in gewisser Weise eine Vorhersage von Reichweiten von Sturzprozessen für Tagbauböschungen möglich. Eine solche verallgemeinerte Vorhersage sollte der Festlegung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen dienen, insbesondere im Fall von Genehmigungen, bei denen nur grobe Angaben zur Böschungsgeometrie gemacht werden können.

Im Fall von Berechnungen von Reichweiten mittels Steinfallprogrammen sind (zumindest in Tagbauen), Fallversuche vor Ort durchzuführen. Die Ergebnisse der Fallversuche dienen der Kalibrierung der Modellparameter von Steinfallprogrammen. Dadurch soll sichergestellt werden, dass diese Programme verlässliche Ergebnisse in Übereinstimmung mit den natürlichen Vorgängen liefern (insbesondere hinsichtlich der Verteilung der Reichweiten).

Im Folgenden wird, neben den rechtlichen Vorgaben zur Gefahrenbereichsermittlung, die Vorgangsweise bei Fallversuchen, sowie die erzielten Ergebnisse und deren Auswertung dargestellt.

2. Tagbauspezifische Gefahrenbereiche am Böschungsfuß

Die Tagbauarbeitenverordnung (TAV, BGBl. II Nr. 416/2010) gibt vor, dass tagbauspezifische Gefahrenbereiche im Rahmen der Gefahrenermittlung und -beurteilung (nach §§ 8 u. 10 TAV) festzulegen sind. Als tagbauspezifische Gefahrenbereiche werden hierbei (nach § 2 Z 7 TAV) jene Bereiche eines Tagbaus (insbesondere auf Arbeitsetagen) bezeichnet, in denen Gefahren wie Absturz, Herabfallen von Gestein, Verschüttet werden oder Ertrinken, bestehen. Eine weitere Konkretisierung und Differenzierung wird jedoch mit der Tagbauarbeitenverordnung nicht vorgegeben. Im Zusammenhang mit dem Terra Firma Konzept bzw. Gefahrenbereichskonzept (Kolenprat 2007 und 2012) wurde vorgeschlagen tagbauspezifische Gefahrenbereiche am Böschungsfuß bzw. an der Böschungsunterkante (GB_{UK}) aufgrund der Reichweiten von Sturzereignissen und den zu schützenden Objekten entsprechend weiter zu untergliedern. Hierbei sind aber grundsätzlich folgende zwei Szenarien zu unterscheiden:

- die Gefährdung durch das Abgehen von einzelnen, isolierten Blöcken (Steinfall), oder
- die Gefährdung durch das Abgehen einer mehr oder weniger kohärenten Felsmasse.

Betrachtet man den ersten Fall des Abgehens von Einzelblöcken (Steinfall), so kann der tagbauspezifische Gefahrenbereich am Böschungsfuß aufgrund der Reichweiten von Sturzereignissen, also der Auftreffdistanzen (ATD) und der Ausrolldistanzen (ARD) von Einzelblöcken, in Verbindung mit den Schutzobjekten, welche sich im Auftreff- und Ausrollraum von Sturzereignissen befinden, zumindest in folgende zwei Kategorien unterteilt werden (siehe Abbildung 1):

- Gefahrenbereiche für die Maschinenführer von selbstfahrenden Arbeitsmitteln mit und ohne Kabinenschutzaufbauten gegen herabfallendes Gestein (FOPS und FGPS), jedoch mit einer erhöhten Sitzposition des Maschinenführers in der Kabine, also von Erdbaumaschinen und Lastkraftwagen (GB_{UK-AM}), welche durch die Auftreffdistanzen (ATD) von Einzelblöcken bestimmt werden. Für diese Bereiche ist ein Betretungs- und Befahrungsverbot festzulegen.
- Gefahrenbereiche für Fußgänger (Sprengbefugte und -gehilfen oder Maschinenführer, welche ihre Arbeitsmittel verlassen) bzw. für die Führer von Personenkraftwagen (GB_{UK-AN}), welche durch die Ausrolldistanzen (ARD) von Einzelblöcken bestimmt werden. Für diese Bereiche ist ein Betretungsverbot durch Fußgänger bzw. ein Befahrungsverbot für Personenkraftwagen festzulegen.

Hinsichtlich des Gefahrenbereichs für die Maschinenführer von selbstfahrenden Arbeitsmitteln ist anzumerken, dass hierbei die erhöhte Sitzposition der Maschinenführer in den Kabinen das ausschlaggebende Kriterium ist, da davon ausgegangen wird, dass ausrollende Blöcke für die Führer von Erdbaumaschinen und Lastkraftwagen eine geringere Gefährdung darstellen. Bezüglich selbstfahrender Arbeitsmittel deren Kabinen mit Schutzaufbauten gegen herabfallende Gegenstände ausgestattet sind (Erdbaumaschinen), ist festzuhalten, dass selbst Kabinenschutzaufbauten der höchsten Leistungsstufe (FOPS der Stufe II nach EN ISO 3449:2009 bzw. FOPS und FGPS des Levels II nach ISO 10262:1998) nur einen äußerst begrenzten Widerstand gegen herabfallendes Gestein bieten können ($\leq 11,6$ bzw. $\leq 5,8$ kJ). Aufgrund der im Festgesteinstagbauen üblichen Böschungshöhen und den üblicherweise auftretenden Blockmassen bieten diese Schutzaufbauten somit keinen ausreichenden Schutz. Das Befahren des Auftreffbereiches (ATD) von Einzelblöcken ist somit im Regelfall nicht zulässig. Eine Differenzierung des Gefahrenbereiches am Böschungsfuß in einen für Erdbaumaschinen und einen für Lastkraftwagen braucht daher nicht zu erfolgen.

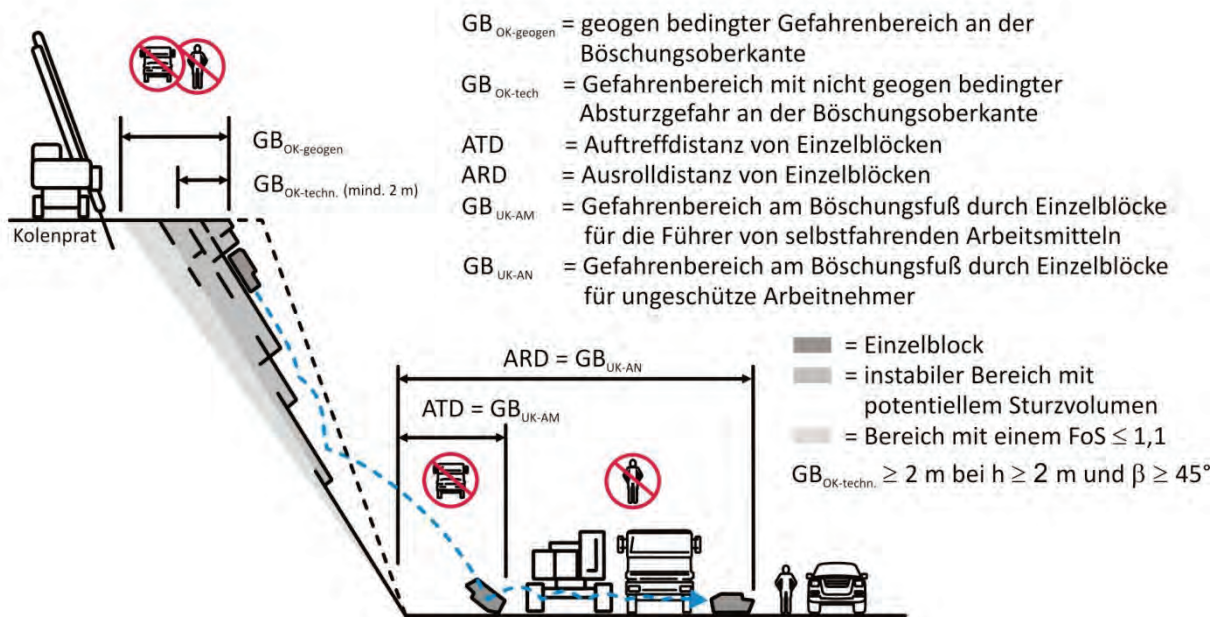


Abbildung 1: Unterteilung der tagbauspezifischen Gefahrenbereiche am Böschungsfuß (GB_{UK}) mit der Gefahr durch herabfallende Einzelblöcke aufgrund der Reichweiten von Sturzereignissen (Auftreffdistanzen und Ausrolldistanzen von Einzelblöcken) und der im Auftreff- bzw. Ausrollraum befindlichen Schutzobjekte (Führer diverser selbstfahrender Arbeitsmittel und Fußgänger).

Bezüglich der Festlegung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen am Böschungsfuß, welche sich aufgrund der Gefahr durch das Abgehen von größeren Felsmassen (GB_{UK-FM}) ergeben, ist keine Diffe-

renzierung hinsichtlich der Schutzobjekte (Führer von Erdbaumaschinen oder Lastkraftwagen bzw. Fußgänger), welche sich auf der Arbeitsetage befinden, möglich, da abgehende Felsmassen für alle eine nicht akzeptierbare Gefährdung darstellen. Für die Festlegung dieses Gefahrenbereiches (GB_{UK-FM}) ist somit die Ausrolldistanz einer Felsmasse maßgeblich (siehe Abbildung 2). Für die betroffenen Bereiche ist somit ein Betretungs- und Befahrungsverbot festzulegen.

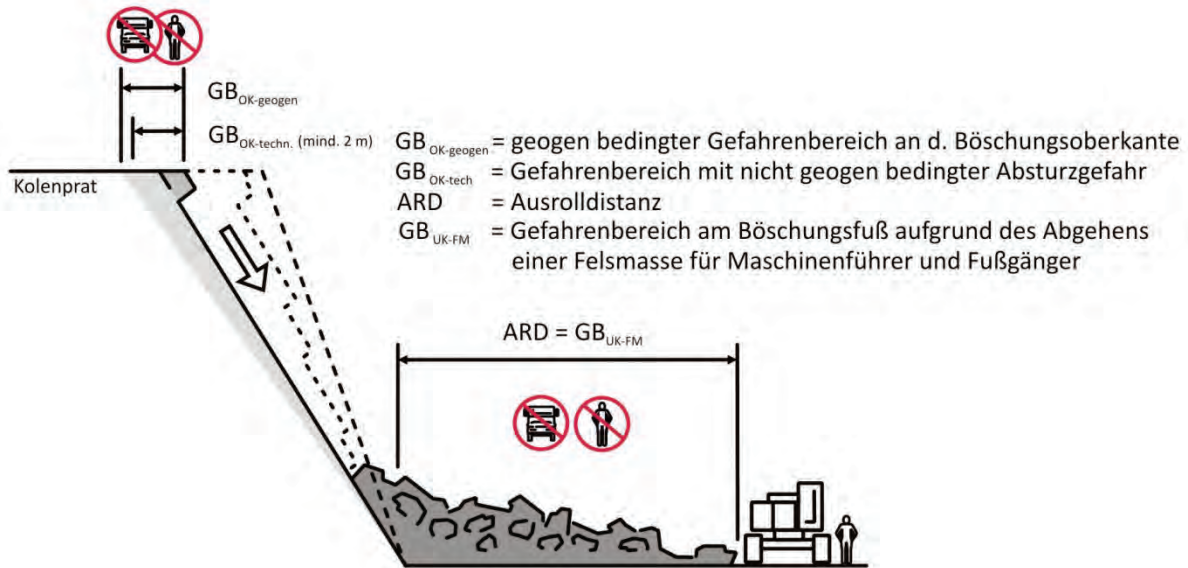


Abbildung 2: Darstellung des tagbauspezifischen Gefahrenbereiches am Böschungsfuß mit der Gefahr durch Abgehen von größeren Felsmassen (GB_{UK-FM}), für dessen Festlegung die Ausrolldistanz der Felsmasse maßgeblich ist.

Zu betonen ist, dass die angeführten Konzepte ausschließlich für Felsböschungen gelten und nicht etwa für die Festlegung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen am Böschungsfuß von Hauwerkfächern angewandt werden können. In diesem Zusammenhang zeigten Fallversuche, dass Blöcke aufgrund der erreichten Geschwindigkeiten beim Aufprall auf das Planum hohe Rückprallhöhen hatten und somit die Kabine treffen können, auch wenn sich diese nicht im Auftreffbereich der Einzelblöcke befindet und der Maschinenführer in der Kabine in einer erhöhten Position sitzt.

3. Fallversuche

In zwei Kooperationsprojekten zwischen dem Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Ingenieurgeologie, der TU Wien und dem Bundesministerium für Arbeit, Soziales, Gesundheit und Konsumentenschutz, Sektion Arbeitsrecht und Zentral-Arbeitsinspektorat, wurde mit Unterstützung einer Reihe von Unternehmen der Bergbaubranche ab dem Jahr 2007 begonnen, systematische Fallversuche in Tagbauen durchzuführen. Die hierbei unterstützenden Unternehmen der mineralrohstoffgewinnenden Industrie bzw. deren Tagbaue waren folgende:

- Tagbau Stiftbruch (Limberg, NÖ) der Hengl Mineral GmbH
- Tagbau Wanko (Meidling im Tal, NÖ) der Asamer Kies- und Betonwerke GmbH
- Tagbau Klöch (Klöch, Stmk) der Klöcher Basaltwerke GmbH & Co KG (Abb. 3)
- Erzberg (Eisenerz, Stmk) der VA Erzberg GmbH
- Tagbau Pauliberg (Markt St. Martin, Bgld) der Basaltwerk Pauliberg GmbH & Co KG
- Tagbau Preg (St. Lorenzen, Stmk) der Pornat Steinbruch Preg GmbH
- Tagbau Loja (Persenbeug, NÖ) der Schotter- und Betonwerk Karl Schwarzl Betriebs-GmbH
- Tagbau Eberstein (Eberstein, Ktn) der Dolomit Eberstein Neuper GmbH

- Tagbau Gaaden (Gaaden, NÖ) der Baukontor Gaaden GmbH (Mineral Abbau GmbH)
- Tagbau Hollitzer (Bad Deutsch Altenburg, NÖ) der Cemex Austria AG
- Tagbau Mannerdorf (Mannersdorf, NÖ) der Lafarge Perlmooser GmbH
- Tagbau Dürnbach (Waldegg, NÖ) der Wopfinger Baustoffindustrie GmbH
- Felssanierung der Biratalwand (Dürnstein, NÖ) der ÖBB/NÖVOG

Die Ziele dieser Untersuchungen waren einerseits, 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 (wie in der Einleitung erwähnt) ein empirischer Datensatz geschaffen werden, welcher eine Prädiktion von Reichweiten von Sturzprozessen für Tagbauböschungen ermöglichen soll.

Repräsentative Versuchsserien wurden dazu verwendet, um eine Verifizierung und Kalibrierung von Steinschlagprogrammen (in Form von Rückrechnungen) durchzuführen. In diesem Zusammenhang wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen dazu verwendet, um in einer Kooperation mit der University of British Columbia den von Hungr (2014) entwickelten Berechnungsansatz PIERRE für Tagbauböschungen zu adaptieren und in das von Preh (2015) bzw. Preh et al. (2015) entwickelte Steinschlagprogramm THROW zu implementieren.



Abbildung 3: Beispiel einer Versuchsanordnung (Tagbau Klöch).

Bei den Fallversuchen wurden vor allem Worst-Case-Szenarien untersucht, also die Ermittlung der Verteilung der Reichweiten von Sturzprozessen (Auftreff- und Ausrolldistanzen) unter Zugrundelegung der ungünstigsten Verhältnisse.

Untersuchungsschwerpunkt waren Felseinzelböschungen mit einer Höhe von 8 bis 30 m und einer Neigung von 53° bis 71°. Weiters wurden Böschungssysteme (bestehend aus bis zu 3 Einzelböschungen) und Hauwerksfächer mit einer Höhe von bis zu 75 m untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen war, die Wirkungsweise und geeignete Dimensionierung von Sicherungsmaßnahmen zur

Reduktion von Ausrolldistanzen zu untersuchen (Anschüttungen mit dämpfender Wirkung und unterschiedliche Typen von Schutzwällen).

Aufgrund der Vorgabe Worst-Case-Szenarien zu untersuchen und unter der Annahme, dass rundliche Blöcke (welche von der Böschungsoberkante abgestürzt werden) die größeren Ausrolldistanzen bewirken, wurde versucht vor allem rundliche bzw. isometrische Blockformen zu verwenden. Bei der Wahl der Blockmassen bzw. der Verteilung der Blockmassen wurden bei den einzelnen Versuchen teilweise unterschiedliche Ziele verfolgt. Unter der Annahme, dass große Blockmassen höhere Ausrolldistanzen bewirken bzw. kleine Blockmassen zu größeren Auftreffdistanzen führen können, wurden im Regelfall versucht Blockmassen entsprechend der maximalen Kluftkörpergrößen auszuwählen und diese mit einer Auswahl von kleineren Massen zu ergänzen. In einigen Versuchsanordnungen, bei denen der Einfluss der Blockmassen auf die Reichweiten genauer untersucht wurde, wurde eine Gleichverteilung der Massen angestrebt (z.B. Blöcke in 100 kg-Klassen von 0 bis 5.000 kg).

Bei den Versuchen selbst erfolgte ein langsames Abschieben der Versuchsblöcke von der Böschungsoberkante, um ein initiales Rollen zu vermeiden. Das Abschieben erfolgte je nach Versuchsziel, entweder als punktuell Abschieben der Blöcke (von einer oder mehrerer Stellen an der Böschungsoberkante aus) oder durch Abschieben einer auf kurzen Strecke gleichmäßig verteilten Serie von Blöcken. Zur Vermeidung von Block-Block-Interaktionen (Ziel war es, ein unbehindertes Ausrollen zu ermöglichen), erfolgten im Regelfall nach 5 Abwürfen ein Beseitigen der Versuchsblöcke sowie ein Säubern des Böschungsfußes von ausgelöstem Steinfallmaterial.

Die Dokumentation der Sturzprozesse (Dokumentation der Bewegungsmechanismen, der Trajektorien und insbesondere der Auftreffpositionen) erfolgte mit mehreren HD-Videokameras. Im Laufe der Versuche wurden die Anzahl der Kameras erhöht, Kameras durch Modelle mit immer höherer Auflösung und Bildrate ersetzt bzw. auch eine drohnengestützte Kamera eingesetzt. Die Dokumentation der Böschungsgeometrie, welche für die Erstellung von genauen Schnitten für die Analyse erforderlich war, wurde mit einem photogrammetrischen System erstellt.

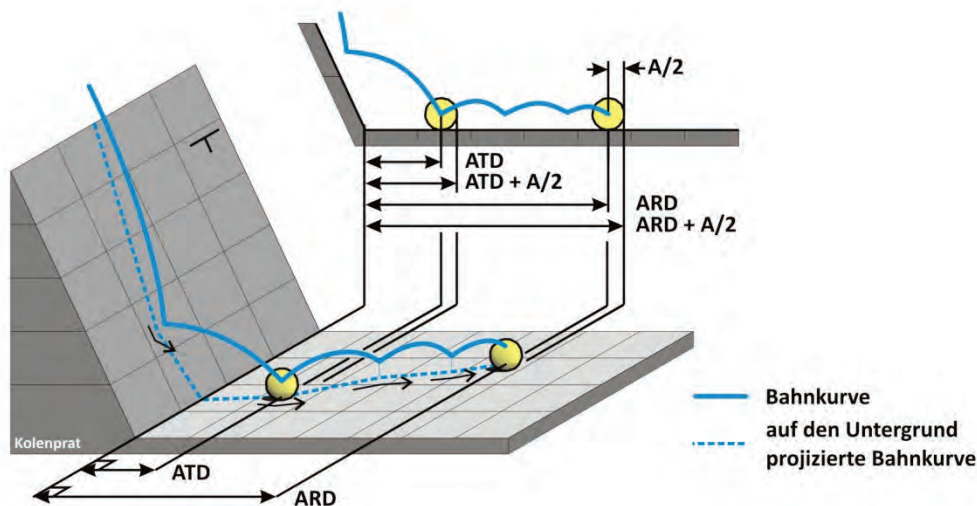


Abbildung 4: Reichweiten von Einzelblöcken (ATD - Auftreffdistanz, ARD - Ausrolldistanz, $A/2$ - Länge der größten Halbachse des Blockes).

Die Ermittlung der Reichweiten von Einzelblöcken erfolgte in folgender Weise:

Die Ausrolldistanzen (ARD) sind die orthogonal auf das Streichen der Böschung stehenden Strecken zwischen dem Böschungsfuß und dem Blockmittelpunkt der Endlage der abgestürzten Blöcke. Diese Distanzen wurden vorrangig mittels Maßband ermittelt, wobei eine Messgenauigkeit von 10 bis 20 cm angestrebt wurde. In diesem Zusammenhang ist auf den Unterschied zwischen der Ausrolldistanz und der tatsächlich von einem ausrollenden Block zurückgelegte Wegstrecke hinzuweisen (Abb. 4). Addiert man zu dieser Distanz die Länge der größten Halbachse des abgestürzten Blockes ($A/2$), so erhält man jenen Wert, welcher in die Bestimmung des Ausmaßes der tagbauspezifischen Gefahrenbereiche ($GB_{UK-AN} = ARD + A/2$) eingeht. Bezüglich der Analysen der Reichweiten ist festzuhalten, dass nur jene Werte für die Ausrolldistanzen gewertet wurden, bei welchen die Blöcke ungehindert (ohne Block-Block-Interaktionen) die Endlagen erreichen konnten.

Die Auftreffdistanzen (ATD) sind die orthogonal auf das Streichen der Böschung stehenden Strecken zwischen dem Böschungsfuß und dem Blockmittelpunkt der auftreffenden Blöcke. Diese Distanzen wurden aus den Videoaufzeichnungen ermittelt. Zur Bestimmung dieser wurde bei allen Versuchsanordnungen am Böschungsfuß eine Schar von parallel zum Böschungsfuß verlaufenden Linien mit Sprühfarbe hergestellt. Bei der Ermittlung der Auftreffdistanzen wurde eine Messgenauigkeit von 25 cm angestrebt. Addiert man zu diesem Wert wiederum die größte Halbachsenlänge des abgestürzten Blockes ($ATD + A/2$), so wird wiederum jener Wert erhalten, welcher in die Bestimmung des Ausmaßes der tagbauspezifischen Gefahrenbereiche (GB_{UK-AM}) eingeht.

4. Ergebnisse der Fallversuche

Die Versuche zeigten, dass aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren (Blockmasse, Blockform, Gesteinsart und -festigkeit, Böschungshöhe bzw. Fallhöhe, Böschungsneigung, Böschungsform, Rauigkeit und Restitution des Untergrundes) der genaue Einfluss der einzelnen Parameter auf den Bewegungsablauf, auf die Bewegungszustände (freier Fall, Springen, Gleiten und Rollen) und schlussendlich auf die Reichweiten (Auftreff- und Ausrolldistanzen von Blöcken) nur schwer empirisch ermittelt werden kann.

Folgende allgemeine Beobachtungen konnten jedoch gemacht werden:

- je größer die Böschungshöhe bzw. die 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 sowie Böschungen mit konkaver Form erzeugen geringe Auftreffdistanzen nahe dem Böschungsfuß,
- 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,

- Blöcke mit einem großen Volumen fraktionieren leichter als kleine, da größere Blöcke im Regelfall eine größere Anzahl von Schwachstellen aufweisen,
- ein starker Einfluss der Blockform auf den Ausrollprozess konnte nicht beobachtet werden (anzumerken ist aber, dass bei den Versuchen vor allem rundliche Blöcke und nur wenige stark tafelige und stengelige Blöcke getestet wurden),
- Blöcke mit tafeliger oder schwach stengeliger Form zeigten im Vergleich zu isometrischen Blöcken eine Tendenz zum verstärkten Springen und eine größere Streuung bei der Ausrolldistanz

Wesentlich für die Bestimmung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen ist die Verteilung der Reichweiten (und nicht etwa die maximal erreichten Reichweitenwerte). Ein Großteil der Versuche zeigte, dass die ermittelten Reichweitenwerte (Auftreff- und Ausrolldistanzen) bzw. die auf die jeweilige Böschungshöhe normierten Reichweitenwerte rechtsschief verteilt waren. Die Erkenntnis, dass Auftreff- und Ausrolldistanzen von Sturzprozessen im Regelfall rechtsschiefen Verteilungen folgen, stellt ein wesentliches Ergebnis der Untersuchungen dar (ein Aspekt der bis dato auch nicht in der Literatur zu empirischen Versuchen beschrieben wurde). Diese Verteilungen der Reichweitenwerte ließen sich mit Dichtefunktion approximieren (etwa mit logarithmischen Normalverteilungen) aus denen wiederum Perzentile (also Grenzen, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden) bestimmt werden konnten.

Vorgeschlagen wird, dass für die Festlegung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen am Böschungsfuß durch Einzelblöcke (GB_{UK-AM} und GB_{UK-AN}) das 0,95-Perzentil der Auftreff- und der Ausrolldistanzen ($(ATD+A/2)/h$ und $(ARD+A/2)/h$) verwendet wird. Ein 0,95-Perzentil bedeutet, dass max. 5 % der Ereignisse über dem Perzentilwert liegen. Das 0,95-Perzentil ist ein in der Statistik gebräuchlicher Referenzwert und stellt einen Kompromiss aus der geforderten Sicherheit (bzw. vice versa der akzeptierbaren Gefährdung) und einer technischen Machbarkeit dar. Aufgrund der bei den Fallversuchen ermittelten Daten erscheint dieser Kompromiss bei den Reichweitenwerten der 0,95-Perzentile gegeben zu sein.

In Hinblick auf eine ausreichende Sicherheit ist zu betonen, dass die Sicherheit insgesamt aber nicht alleine von diesem Perzentilwert für Reichweiten abhängig ist, sondern von einer Reihe weiterer Faktoren bestimmt wird. Die Wahrscheinlichkeit von einem Block getroffen zu werden, ergibt sich aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit, dass ein Steinfallereignis eintritt, und den Wahrscheinlichkeiten, dass sich genau zu diesem Zeitpunkt eine Person (ein Schutzobjekt) im Auftreff- und Ausrollbereich dieses Steinfallereignisses befindet. Diese definiert auch den tagbauspezifischen Gefahrenbereich durch Einzelblöcke weiter: Für die Festlegung eines tagbauspezifischen Gefahrenbereiches durch Einzelblöcke muss die Möglichkeit gegeben sein, dass sich Blöcke aus einer Böschung lösen können und es muss eine zeitliche und örtliche Koinzident gegeben sein. Geht eine der Wahrscheinlichkeiten gegen Null, z.B. ist die Böschung perfekt von möglichem Steinfall gesäubert und somit kein Steinfall möglich, so ist kein Gefahrenbereich gegeben, auch wenn sich eine Person zu einem beliebigen Zeitpunkt im theoretisch möglichen Auftreff- oder Ausrollbereich befindet. Bezüglich der technischen Machbarkeit ist anzuführen, dass die auf Grund der 0,95-Perzentile ermittelten tagbauspezifischen Gefahrenbereiche umsetzbar sind.

Analysiert man den Datensatz, welcher sich aus der Gesamtheit aller Fallversuche ergab (ATD/h mit $n = 484$ und ARD/h mit $n = 646$), so zeigt sich, dass die Häufigkeitsverteilungen der Auftreff- und Ausrolldistanzen (wie bei den meisten Versuchsanordnungen an einzelnen Böschungen) rechtsschief sind (siehe Histogramme der Abbildungen 5 und 6). Da dieser Datensatz auf der Untersuchung eines umfangreicheren Spektrums von Fallhöhen, Neigungen und Böschungsformen sowie einer größeren Bandbreite an Blockformen und -massen basierte, ermöglicht die Analyse allgemein gültigere Aussagen bzw. in gewisser Weise eine Vorhersage von Reichweiten von Sturzprozessen für Tagbauböschungen.

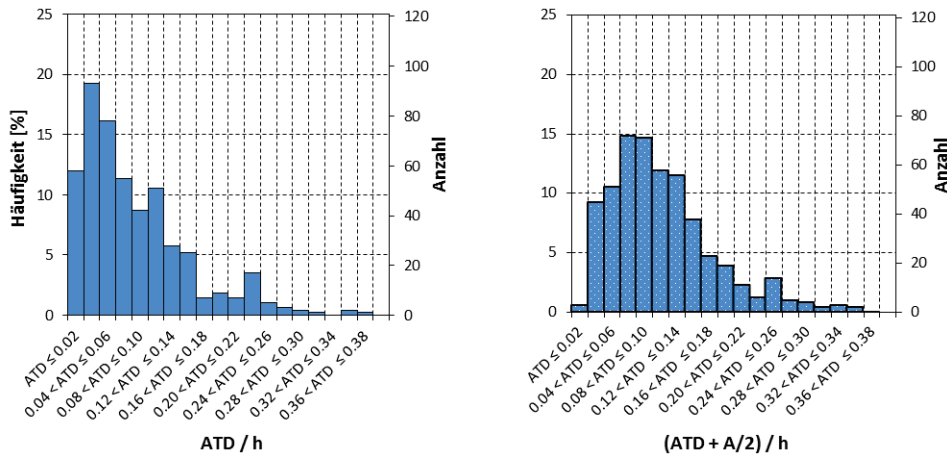


Abbildung 5: Verteilung der auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Auftreffdistanzen (ATD/h) bzw. um die längste Halbachse der Blöcke ergänzten und auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Auftreffdistanzen ((ATD+A/2)/h) aller Versuchsanordnungen (n = 484).

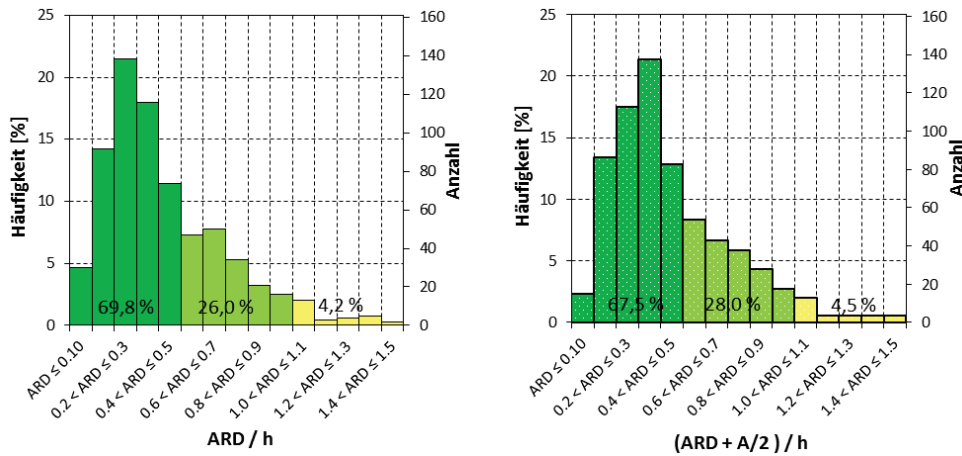


Abbildung 6: Auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Ausrolldistanzen (ARD/h) bzw. um die längste Halbachse der Blöcke ergänzte und auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Ausrolldistanzen ((ATD+A/2)/h), welche sich aus dem gesamten Datensatz aller Versuchsanordnungen ergaben (n = 646).

Tabelle 1: Perzentile aufgrund der approximierten logarithmischen Normalverteilung für den Datensatz, welcher sich aus der Gesamtheit der Versuche ergab, sowie die Schätzparameter (μ^* , σ^*), welche diesen Funktionen zu Grunde gelegt wurden. Die Angabe der Perzentilen für ATD/h war aufgrund des KS-Tests nicht zulässig.

LogNorm Perzentile	ATD/h	$\frac{(ATD + \frac{A}{2})}{h}$	ARD/h	$\frac{(ARD + \frac{A}{2})}{h}$
0.99	-	0.39	1.66	1.58
0.95	-	0.26	1.05	1.04
0.90	-	0.21	0.82	0.83
0.80	-	0.16	0.61	0.63
0.50	-	0.10	0.34	0.37
μ^*	-	-2.349	-1.068	-0.984
σ^*	-	0.607	0.677	0.620

Es zeigte sich, dass die rechtsschiefen Verteilungen der Reichweiten gut durch logarithmische Normalverteilungen approximiert werden können. Die logarithmischen Normalverteilungen wurden einerseits über deren Parameter (Stichprobenmittel und Standardabweichung) geschätzt oder numerisch berechnet. Wesentlich bei jeglicher Approximation mit einer Verteilungsfunktion ist, dass die Zulässigkeit

der Verteilungsannahme überprüft wird. Dies erfolgte im gegenständlichen Fall durch einen Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstest (siehe Abbildung 7). Tabelle 1 sind die Perzentile, welche aufgrund der Approximation mittels logarithmischer Normalverteilung für den gesamten Datensatz ermittelten wurden, zu entnehmen.

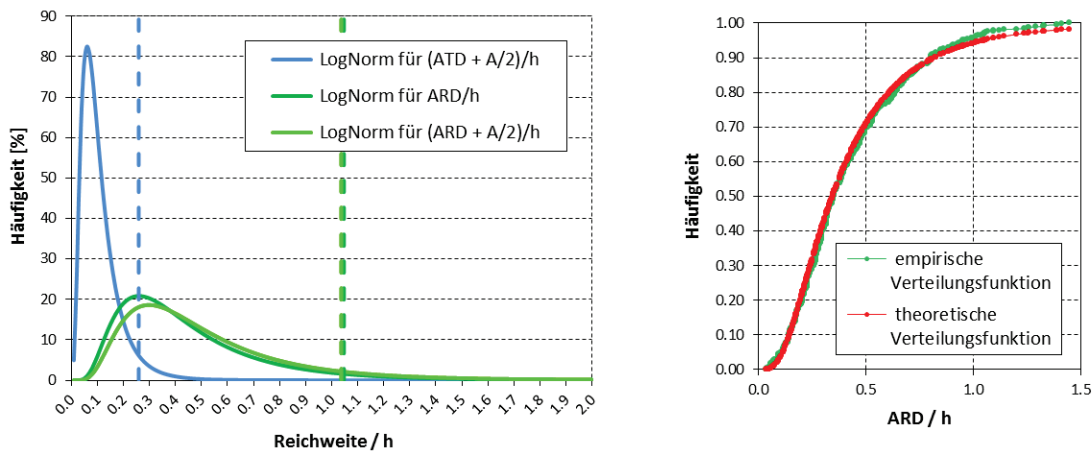


Abbildung 7: linke Grafik: Darstellung der Dichtefunktionen für die Verteilung der auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Reichweiten für den Datensatz, welcher sich aus der Gesamtheit der Versuche ergab. Zusätzlich darin als Vertikale eingetragen die jeweiligen 0,95-Perzentile (0,26, 1,04 und 1,05). Rechte Grafik: Graphische Darstellung des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstestes mit dem Vergleich zwischen der sich aus den Versuchen ergebenden empirischen Verteilungsfunktion (grüne Kurve für die ARD/h) und der für die Approximation verwendeten logarithmischen Normalverteilung (rote Kurven). Der KS-Test ergab, dass eine Approximation der Reichweitenwerte durch eine logarithmische Normalverteilung als Arbeitshypothese zulässig war.

Ist eine Approximation der empirischen Reichweiten mit einer Verteilungsfunktion nicht möglich (etwa in Fällen in denen die Reichweiten Verteilungen mit zwei Maxima ergaben) und kann somit die Zulässigkeit der Approximation nicht bestätigt werden (etwa durch einen KS-Test), so können in diesen Fällen keine Perzentile für Reichweiten bestimmt werden.

Um dennoch Perzentile ermitteln zu können, erfolgte die Anwendung eines verteilungsunabhängigen Verfahrens zur Bestimmung einseitiger nach oben begrenzter Konfidenzintervalle für Perzentilen (P) für eine Irrtumswahrscheinlichkeit (α). Der wesentliche Vorteil dieses Verfahren ist es, dass es unabhängig von Verteilungen ist. Die einzige Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist das Vorliegen der Stetigkeit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung. Bei diesem Verfahren (siehe etwa Rinne 2008), werden die Ergebnisse einer Stichprobe (z.B. die Ergebnisse eines Fallversuches) der Größe nach aufsteigend sortiert und mit einer fortlaufenden Rangzahl (i) versehen. Die obere Grenze des Konfidenzintervalls eines Perzentils ist jener Wert, dessen Rangzahl (m) aus folgender Ungleichungskette bestimmt wird:

$$\sum_{i=m}^n \binom{n}{i} \cdot P^i \cdot (1 - P)^{n-i} \leq \alpha < \sum_{i=m-1}^n \binom{n}{i} \cdot P^i \cdot (1 - P)^{n-i}$$

n = Stichprobenumfang bzw. Anzahl der Abwürfe

P = Perzentil

i = Summenindex bzw. Rangzahl

m = Rangzahl bei der die Ungleichungskette erfüllt wird

α = Irrtumswahrscheinlichkeit

Die mit diesem Verfahren ermittelten Obergrenzen von Konfidenzintervallen für Perzentile von Reichweitenwerten (mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$), welche sich aus der Gesamtheit der Versuche ergab, sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Einseitigen nach oben begrenzte Konfidenzintervalle für Perzentile (mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 5\%$) für auf die jeweiligen Böschungshöhen normierten Reichweiten für den Datensatz, welcher sich aus der Gesamtheit der Fallversuche ergab.

OG KI f. Perzentile	ATD/h	$\frac{(ATD + \frac{A}{2})}{h}$	ARD/h	$\frac{(ARD + \frac{A}{2})}{h}$
0.99	0.341	0.357	1.387	1.416
0.95	0.227	0.260	1.035	1.046
0.90	0.205	0.220	0.848	0.874
0.80	0.136	0.166	0.669	0.701
0.50	0.070	0.106	0.349	0.391

Neben dem Vorteil, dass mit diesem Verfahren unabhängig von einer Verteilung die Konfidenzintervalle für Perzentile bestimmt werden können, ist es ein weiterer Vorteil, dass mit diesem Verfahren auch eine Abschätzung des erforderlichen Stichprobenumfangs erfolgen kann. Dies stellt eine zentrale Frage bei empirischen Fallversuchen dar.

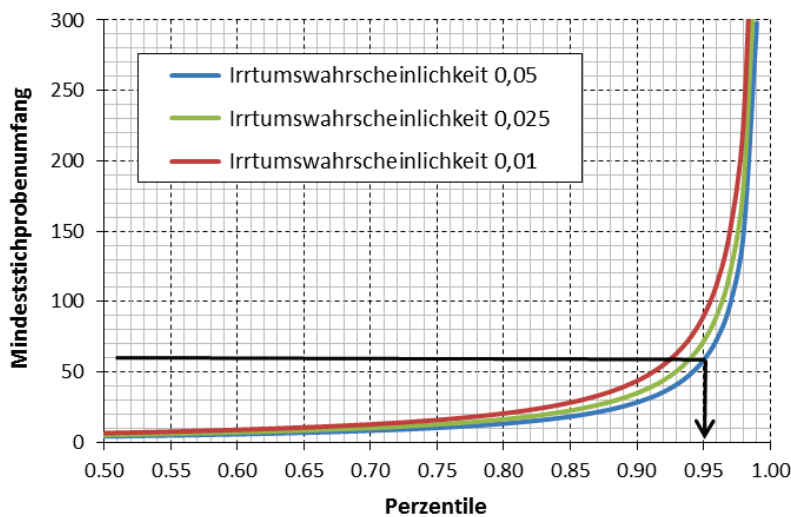


Abbildung 8: Mindeststichprobenumfang für Perzentile für Irrtumswahrscheinlichkeiten von $\alpha = 1\%$, $2,5\%$ und 5% .

Abbildung 8 gibt den Zusammenhang zwischen Perzentile und dem erforderlichen Mindeststichprobenumfang wieder. Für das 0,95-Perzentil benötigt man bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha \leq 5\%$ einen Mindeststichprobenumfang von 59 Würfeln. Würde man für das 0,95-Perzentil eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha \leq 1\%$ verlangen, so müsste der Mindeststichprobenumfang 90 Würfe betragen. Aufgrund dieser Überlegungen wurde bei den Fallversuchen eine Mindestanzahl von 60 bis 100 verwertbaren Würfeln pro Versuchsserie angestrebt, um ausreichend sichere Aussagen über die Lage der Konfidenzintervalle machen zu können.

Neben Versuchen zur Bestimmung der Reichweitenverteilung (bei welchen ein möglichst unbehindertes Ausrollen angestrebt wurde), wurden Fallversuche durchgeführt, um die Wirkungsweise und geeignete Dimensionierung von Sicherungsmaßnahmen zur Reduktion der Ausrolldistanzen zu testen.

Untersucht wurden hierbei vor allem jene Maßnahmen, welche jederzeit in Tagbauen hergestellt werden können, wie Anschüttungen am Böschungsfuß im Bereich der Auftreffdistanzen von Einzelblöcken. Im Fall der in Abbildung 9 dargestellten Versuchsserie, wurden aufbauend auf einer Referenzserie (bei welcher durch Beseitigen der losen Etageauflagerung möglichst weite Ausrolldistanzen erzielt werden sollten) sukzessive Dämpfungsschichten aus Hauwerk aufgebracht. Wie das Durchgangsdiagramm (Abbildung 9, rechte Grafik) zeigt, ergab bereits die erste Anschüttung im Bereich des Auftreffraums eine drastische Reduktion der Ausrolldistanzen, wohingegen die zweite Anschüttung nur mehr zu einer geringen, weiteren Reduktion führte. In Summe bewirkte das Aufbringen einer Anschüttung (mit einer Mächtigkeit von mehreren Dezimetern) in diesem Fall eine Reduktion der Ausrolldistanz um etwa die Hälfte (ca. 49 %).

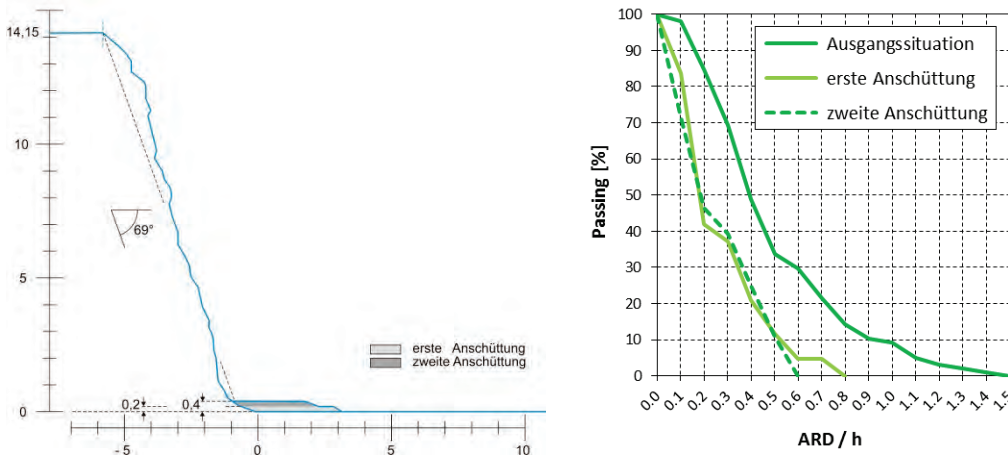


Abbildung 9: Versuchsanordnung mit einer Anschüttung am Böschungsfuß im Bereich der Auftreffdistanzen von Einzelblöcken (linke Grafik), Durchgangsdiagramm, welches die Reduktion der Ausrolldistanzen verdeutlicht (rechte Grafik).

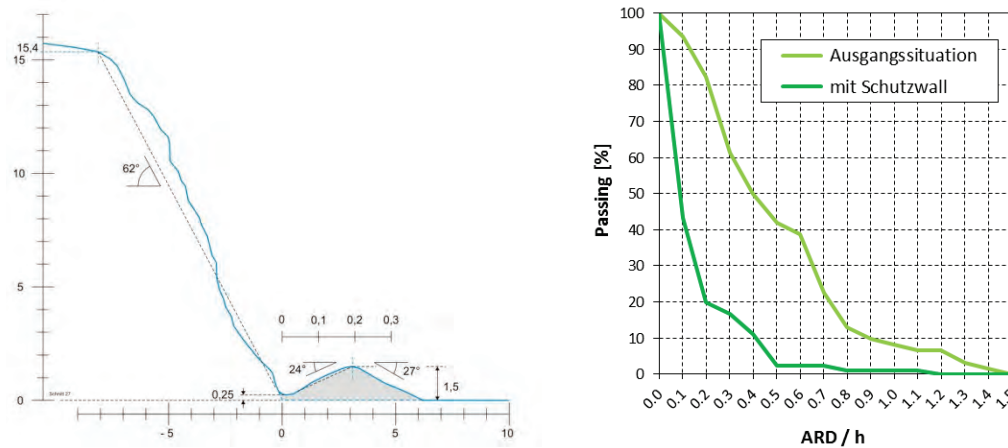


Abbildung 10: Versuchsanordnung mit Schutzwall (linke Grafik), Durchgangsdiagramm, welches die Reduktion der Ausrolldistanzen verdeutlicht (rechte Grafik).

Im Rahmen der Untersuchungen wurde eine Reihe unterschiedlicher Typen von Schutzwällen zur Reduktion der Ausrollweite getestet. Abbildung 10 zeigt einen effizienten Typ, welcher im Zuge der Versuche entwickelt wurde. Vergleichbar mit den vorher dargestellten Anschüttungen am Böschungsfuß, soll auch hier eine Anschüttung mit hoher dämpfender Wirkung (beginnend am Böschungsfuß) in Kombination mit einer ca. senkrecht auf die Bahnkurven der auftreffenden Blöcke stehenden Anprallfläche ein Überrollen des Walls verhindern. Als Orientierungswert für die Wahl des Kronenabstands bieten

sich Auftreffdistanzen an (0,95-Perzentile), da diese auch durch im Vorfeld durchgeführte Versuche ermittelt werden können. Wie das Durchgangsdiagramm der Abbildung 10 (rechte Grafik) verdeutlicht, betrug in diesem Fall die gesamte Reduktion etwa 69 % (die Obergrenze des Konfidenzintervalls für das 0,95-Perzentil wurde etwa um die Hälfte reduziert).

Vergleicht man die Ergebnisse dieser Untersuchungen mit anderen Studien, so ist festzuhalten, dass sich diese in erster Linie auf natürliche (im Regelfall bewachsene) Böschungen beziehen. Die im Zusammenhang mit dem Arbeitnehmerschutz wesentlichste Frage, nämlich nach den möglichen Auftreffdistanzen (ATD), wird in den meisten Untersuchungen nicht behandelt.

Die umfangreichste zur Verfügung stehende Studie stellt jene von Pierson et al. (2001) dar. Diese behandelt jedoch Reichweiten von Sturzereignissen im Zusammenhang mit speziell konzipierten (ebenen) Straßenböschungen und ist, wie sich aufgrund des Vergleichs mit den eigenen Untersuchungen zeigte (Preh et al. 2015) nur bedingt auf Tagbauböschungen anwendbar. Insbesondere stehen die darin angeführten Entwurfsdiagramme im Widerspruch zu den Ergebnissen dieser Untersuchungen bzw. korrespondieren die darin angeführten Retentionswerte nicht mit den Perzentilwerten der eigenen Untersuchungen.

Zusammenfassung

Die Fallversuche ergaben, dass die Reichweiten von Sturzprozessen im Regelfall rechtsschiefen Verteilungen folgen. Diese lassen sich beispielsweise durch logarithmische Normalverteilungen approximieren. Sofern die Zulässigkeit der Approximation durch Tests bestätigt werden kann, ist es möglich Perzentile zu bestimmen. Für die Festlegung von tagbauspezifischen Gefahrenbereichen am Böschungsfuß durch Einzelblöcke (GB_{UK-AM} und GB_{UK-AN}) wird vorgeschlagen die 0,95-Perzentile der Auftreff- und der Ausrolldistanzen ($(ATD+A/2)/h$ und $(ARD+A/2)/h$) zu verwenden.

Aus dem Datensatz, welcher sich aus der Gesamtheit aller Versuche für Einzelblöcke ergab, wurden mit einem verteilungsunabhängigen Verfahren einseitig nach oben begrenzte Konfidenzintervalle für 0,95-Perzentile ($\alpha \leq 5\%$) bestimmt. Als Wert für die auf die Böschungshöhen normierten Auftreffdistanzen $(ATD+A/2)/h$ ergab sich 0,26 (26 % der Böschungshöhe), für die $(ARD+A/2)/h$ ergab sich ein Wert von 1,05 (also 105 % der Böschungshöhe).

Diese Werte für Einzelblöcke können als grobe Richtwerte (Faustformeln) für Tagbauböschungen mit Höhen bis zu 15 m und Neigungen zwischen 50° und 70° bei leicht konvexen bis leicht konkaven Böschungsformen angesehen werden. Sie ersetzen aber keinesfalls vor Ort durchgeführte Fallversuche oder Simulationen mit Steifallprogrammen, welche anhand von Fallversuchen kalibriert wurden.

Dank

Abschließend wird den Unternehmen (siehe Kapitel 3), welche die Durchführung der Fallversuche ermöglichten und ohne die die vorliegenden Ergebnisse nicht möglich gewesen wären, herzlich für ihre Unterstützung gedankt.

Literatur

- Hungr O. (2014): PIERRE, Rockfall Ballistics Analysis. Unpublished Users Manual. Department of Earth and Ocean Sciences, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.
- ISO 10262:1998-06-15: Earth-moving machinery – Hydraulik excavators – Laboratory tests and performance requirements for operator protective quards.
- Kolenprat B. (2007): Georischen im Obertragebergbau, Kapitel 33 in Praxishandbuch Evaluierung, Hsg. Hutterer W., Weka Verlag Wien, 25 S.
- Kolenprat B. (2012): Tagbauarbeitenverordnung, Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 147/4, 160–164.
- ÖNORM EN ISO 3449:2009-05-01: Erdbaumaschinen - Schutzaufbauten gegen herabfallende Gegenstände - Prüfungen und Anforderungen (ISO 3449:2005).
- Pierson L.A., Gullixson C.F. & Chassie R.G. (2001): Rockfall Catment Area Design Guide Final Report SPR-3(032) Oregon Department of Transportation – Research Group, 284 S.
- Preh A. (2015): THROW, ein dynamisch stochastisches Simulationsmodell zur Prognose von Steinschlag. unveröffentlichtes Benutzerhandbuch.
- Preh A., Kolenprat B., Hungr O. & Mitchell A. (2015): Stochastische Steinschlagprognose zur Festlegung von (tagbauspezifischen) Gefahrenbereichen laut Tagbauarbeitenverordnung (TAV). ÖIAZ - Österreichische Ingenieur- und Architektenzeit-schrift, 160, 177–185.
- Rinne H. (2008): Taschenbuch der Statistik, 4. Auflage, Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main, 1060 S.
- Verordnung des Bundesministers für Arbeit, Soziales und Konsumentenschutz, mit der die Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen bei der Durchführung von Arbeiten im Tagbau (Tagbauarbeitenverordnung - TAV) erlassen wird und die Bauarbeiterschutzverordnung geändert wird, StF.: BGBl. II Nr. 416/2010.