

Internationales Symposion INTERPRAEVENT 1988 — GRAZ

Tagungspublikation, Band 1, Seite 185-198

ENTWALDUNG UND STEINSCHLAG

Deforestation and Rockfall

J. Jahn

Zusammenfassung

Die Wirkung des Waldes auf das Steinschlaggeschehen ist getrennt für Entstehungs- und Absturzphase zu betrachten. Währenddem die Entstehung von Steinschlag vor allem durch das Wurzelsystem der Bäume beeinflusst wird, behindern in der Absturzphase besonders die Baumstämme die Bewegung der Steine.

Zur wichtigsten Schutzwirkung des Waldes - dem Abbremsen und Auffangen abstürzender Steine - fehlten bisher quantitative Angaben. Aus Feldversuchen mit absichtlich in Bewegung gesetzten Steinen konnten nun Vergleichszahlen für unbestockte und bestockte Hangabschnitte berechnet werden. Bei den Versuchen kamen in bestockten Abschnitten rund 60 % der Steine als Folge von Baumkontakten zum Stillstand. Pro gleich lange Hangabschnitte wurder 3 - 10 Mal mehr Steine abgelagert als in unbestockten Bereichen.

Die Ergebnisse bestätigen, dass bei fortschreitender Entwaldung von Gebirgshängen mit verstärkter Steinschlaggefahr zu rechnen ist.

Summary

To analyse the influence of forest on rockfall we have to consider separately the initial conditions and the actual displacements. The rather ambiguous effects of an extensive root system have to be listed among the initial conditions.

The most important protective properties of woodland, viz. deceleration and retention of moving stones had never been studied properly and, therefore, no data were available. Our field tests, in which we set in motion a number of stones on covered and clear cut slopes, yielded numerical results:

- About 60 percent of the stones collided with trees in a manner, that made them stop.
- The factor of retention varies between 3 and 10, on otherwise comparable slopes.
- The kinetic energy of a stone's mass centre is reduced by about 80 percent if a tree is squarely hit.

The protective properties of woodland were clearly demonstrated.

Problematik

Allgemein wird befürchtet, dass als Folge der neuartigen Waldschäden die Bedrohung unseres Lebensraumes durch Naturgefahren grösser wird. So wird auch angenommen, dass nach dem Verlichten oder Zusammenbrechen von Gebirgswäldern vermehrt Steinschläge auftreten und diese auch in bisher geschützte Lagen vorzudringen vermögen. Die Steinschläge gefährden einerseits direkt Siedlungen und Verkehrswege, anderseits können sie das Geschiebepotential in den Einzugsgebieten der Wildbäche erhöhen.

In diesem Beitrag wird versucht, die Einflüsse des Waldes auf die Steinschlagtätigkeit zusammenzustellen und zu interpretieren. Neben Erkenntnissen beschreibender Art werden auch Resultate von Feldversuchen verwendet.

Beschreibung der Waldwirkungen

Mit dem Begriff "Steinschlag" wird im allgemeinen der rasche Absturz eines einzelnen oder einiger weniger Steine über einen steilen Abhang bezeichnet. Für die Beurteilung des Steinschlaggeschehens ist nicht nur diese eigentliche Absturzphase wichtig, sondern ebenso auch die Entstehungsphase, in der der Absturz der Steine vorbereitet wird. Die Waldbestockung beeinflusst beide Phasen, ihre Wirkung ist aber ganz unterschiedlicher Art.

2.1 Einfluss des Waldes in der Entstehungsphase

Damit ein Stein aus einer steilen Felsböschung abstürzt, muss er erstens aus dem kompakten Felsverband herausgelöst und zweitens durch eine Initialbewegung aus seiner mehr oder weniger labilen Ruhelage befördert werden. Dabei können eine ganze Reihe von Prozessen und Faktoren wirksam sein. Die wichtigste Steinschlagursache ist die mechanische Verwitterung, die vor allem von der Frostwechselhäufigkeit und von den petrographischen und tektonischen Gesteinseigenschaften abhängt.

Verschiedene Baumarten haben die Fähigkeit, auch steile Felsböschungen und grobblockigen Schutt zu besiedeln. Sie entwickeln ein ausgedehntes Wurzelsystem, dessen Wurzeln einerseits über weite Strecken den Fels oberflächlich überziehen und anderseits tief in Klüfte und Schichtflächen eindringen (KOESTLER et al., 1968). Die verschiedenen Wirkungen dieses Wurzelsystems auf die Entstehung von Steinschlag sind gegensätzlicher Natur:

Steinschlaghemmend wirken:

- Zusammenhalt ("Umarmung") aufgelockerter Felsmassen

 Verfestigung der Bodenoberfläche durch eine zusammenhängende Wurzelschicht auf Schutthalden

Steinschlagfördernd wirken:

- Ausweitung von Gesteinsspalten durch das Wurzelwachstum
- chemische Zersetzung des Gesteins durch die Auscheidung von Kohlensäure und organischen Säuren
- Uebertragung der auf Stamm und Krone wirkenden Schnee- und Windkräfte in den Boden

Zusätzlich wirkt ein geschlossener Wald als Ganzes ausgleichend auf das Lokalklima, was die Verwitterungstätigkeit vermindert.

Die Wertung all dieser Einflüsse ist sowohl für einen stabilen Waldbestand wie auch unter der Annahme instabiler, allmählich zusammenbrechender Bestände schwierig. Genaue Untersuchungen zum gegenseitigen Verhältnis der Wirkungen fehlen. Beim Zusammenbruch eines Waldbestandes entfallen die oben aufgeführten Wirkungen nach und nach. Dazu kommen aber neue: Einerseits reissen entwurzelte Bäume die Bodenoberfläche auf und legen lose Steine frei, anderseits bremsen die am Boden liegenden Bäume ihren Absturz.

2.2 Einfluss des Waldes in der Absturzphase

Ist der Stein einmal durch eine Initialbewegung aus der Ruhelage gelöst worden, so bewegt er sich rollend oder springend talwärts. Die potentielle Energie des Ursprungsortes wird in kinetische Energie umgesetzt. Einerseits wird diese in den abwärts gerichteten Flugphasen laufend erhöht, anderseits wird sie durch die rauhen Stosskontakte an der Bodenoberfläche immer wieder abgemindert; bis sie schliesslich ganz abgebaut ist und der Stein liegenbleibt.

In der Absturzphase wirkt der Wald als Hindernis. Jede Kollision mit einem Baum vernichtet zusätzlich zu den Bodenkontakten einen Teil der kinetischen Energie des abstürzenden Steines. Häufig werden die Steine ganz aufgehalten und bleiben direkt hinter dem Baum liegen. Abbildung 1 zeigt als Beispiel einen Block mit ca. 20 kN Gewicht, der durch eine Buche von 0,5 m Stammdurchmesser gestoppt wurde, obwohl er weiter oben eine Steinschlagverbauung durchbrochen hatte.

Allerdings vermag der Wald Abstürze sehr grosser Steine nicht wirksam zu bremsen. Zum Beispiel wurden mehrere grosse Bäume einfach abgeschert, als zwei Blöcke von je 150 kN Gewicht 1986 auf die schweizerische Nationalstrasse N2 bei Hergiswil abstürzten. Anderseits kann schon dichtes Gebüsch kleinere Steine wirksam abbremsen oder ganz aufhalten.

Es ist klar, dass diese klassische Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag durch die neuartigen Waldschäden vermindert wird. Wie stark die Steinschlaggefahr zunimmt, wenn die Schutzwälder verlichten und zusammenbrechen, kann aber aufgrund der heutigen Kenntnisse nicht beziffert werden. Eine von der Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen (EAFV) 1986 durchgeführte Literatur-

recherche ergab keine konkreten, quantitativen Angaben zur Waldwirkung auf die Steinschlagbewegung. Einzig die Bedeutung des Waldes als Steinschlagschutz wurde deutlich unterstrichen. Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass ein grosser Teil der Bäume im Schweizer Wald Spuren von Steinschlag aufweist (Tab. 1).

Tabelle 1: Steinschlagschäden in Schweizer Wäldern Damage by rockfall in Swiss forests

Gebiet	Anteil der Bäume mit Steinschlagschäden [%]
ganze Schweiz Region Alpen Hänge mit Neigung > 60 % Aletschgebiet Steinschlagbannwald Altdorf	3,8 6,1 1,6 1,6 1,6 1,6 1,6 1,6 1,6 1,6 1,6

Quellen:)1 1. Schweizerisches Landesforstinventar 1986 (EAFV)
)2 BELLWALD u. GRAF, 1985
)3 Sanasilva-Teilprogramm 8 (EAFV)



Abbildung 1:

Bremswirkung des Waldes in der Absturzphase Retentive effect on displacement of boulders

3. Feldversuche zur Absturzbewegung

3.1 Voraussetzungen

Die Literaturrecherche zeigte weiter, dass einige Modellansätze zur Berechnung der Steinschlagbewegung im freien Gelände existieren. Die meisten verwenden sehr grobe physikalische Näherungen (Behandlung der Steine als Massenpunkte, reibungsfreie Stösse) und liefern deshalb Resultate, die mit Feldbeobachtungen nur schlecht übereinstimmen. Insbesondere wird die Geschwindigkeit der Steine bei langen Absturzwegen krass überschätzt, was auch zu Fehlern in der Dimensionierung von Schutzbauten führen kann.

Zur Steinschlagbewegung in bewaldetem Gelände wurden überhaupt keine Berechnungsansätze gefunden. Ein im Auftrag der EAFV durch eine Ingenieurfirma entwickeltes Simulationsmodell ergab bisher nur unbefriedigende Resultate, teils weil es ebenfalls auf einfachen physikalischen Näherungen beruhte, teils weil für die Parameter nur sehr wenige verlässliche Zahlenwerte zur Verfügung standen.

Die EAFV führte deshalb im Frühjahr 1987 Feldversuche durch mit dem Ziel, erste grobe Anhaltspunkte zur Steinschlagbewegung im offenen Gelände und im Wald zu erlangen.

3.2 Versuchsanlage

Die Versuche erfolgten an einem Gehängeschutt-Steilhang, der auch natürlicherweise stark dem Steinschlag aus den höhergelegenen Kalkfelswänden ausgesetzt ist (Abb. 2). Infolge eines Waldbrandes musste ein grosser Teil der ehemals vollständig bewaldeten Fläche geräumt und frisch aufgeforstet werden.

Die Versuchssteine wurden an 2 benachbarten Stellen auf der obersten Waldstrasse gestartet, indem sie über die Böschungskante hinausgeworfen wurden (Abb. 2 und 3). Anschliessend wurde ihre Bewegung bis zur nächst unteren Strasse durch Zeitstoppungen und visuelle Beobachtung erfasst. Dazu wurde der rund 150 m lange Hangbereich in 8 Beobachtungsabschnitte unterteilt. Jeweils an den Abschnittsgrenzen erfolgte die Auslösung der Zeitmessanlage durch die im Hang positionierten Beobachter, die zudem auch die Bewegung der Steine in Protokollen erfassten (Bewegungsart, Baumkontakte, Absturzweg, Ort und Ursache der Ablagerung). Die Hangneigung variiert im beobachteten Bereich nur geringfügig, sie beträgt im Durchschnitt 71,2 % resp. 35,5 Grad.

Die Absturzbahn F ("Freie" Fläche) verläuft vollständig ausserhalb des Waldes. Bei der Räumung wurden die Bäume zum Teil mit hohem Stock abgesägt, was in der Folge die Bewegung der Steine bei den Versuchen leicht behinderte. Die Absturzbahn W ("Wald") dagegen liegt ausser in den Abschnitten 3 und 4 in einem teils sehr dichten Stangenholz. Bei einem ersten Teilversuch blieben viele Steine bereits an den Bäumen der Abschnitte 1 und 2 hängen. Deshalb wurde ein Teil dieser Bäume entfernt, bevor die Versuche

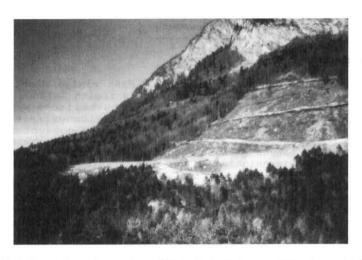


Abbildung 2: Versuchsgelände bei Balzers (Liechtenstein) Testing site near Balzers (Liechtenstein)

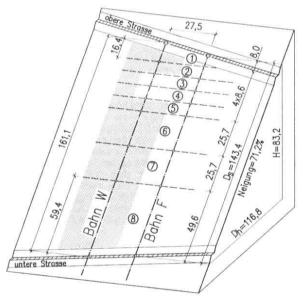


Abbildung 3:

Versuchsanlage Set-up for tests

(Masse in m)

- Startstellen
- ___ Fallinien der Absturzbahnen
- O Beobachtungsabschnitte
- --- Abschnittsgrenzen (Zeitmesslinien)

bestockte Fläche: Stangenholz mit Buchen, Fichten, Föhren und Eschen mittlerer Brusthöhendurchmesser 0,13 m 17 - 51 Bäume/Are fortgesetzt wurden. Im übrigen weisen die beiden Absturzbahnen sehr ähnliche Neigungs- und Bodenverhältnisse auf.

Vor dem Start wurden jeweils Grösse und Gewicht der Steine bestimmt. Das Gewicht variierte zwischen 28 N (äquivalenter Kugeldurchmesser 0,13 m) und 1226 N (0,45 m), es betrug im Mittel für die Bahn F 235 N (0,26 m) und für die Bahn W 294 N (0,28 m). Leider war die Strasse zur Zeit der Versuche nicht fahrbar, sodass keine Steine zur Wiederverwendung an die Startstelle zurückgebracht werden konnten.

3.3 Allgemeine Beobachtungen

Die seitliche Abweichung der Steine von der theoretischen Absturzbahn (Fallinie des Hanges) war meistens gering. In den folgenden Auswertungen ist sie deshalb nicht berücksichtigt, alle Angaben zu Reichweiten und Geschwindigkeiten beziehen sich auf die Fallinie.

Fast alle Steine kamen im beobachteten Hangbereich wieder zum Stillstand. Auf der Absturzbahn F erreichten 31 % der Steine die untere Strasse, 19 % bewegten sich über diese hinaus. Die am weitesten rollenden Steine gelangten bis zur Abflachung des Geländes bei der untersten in Abbildung 2 sichtbaren Strasse (Reichweite $\rm D_{\rm S}=289~m).~50~\%$ der Steine erreichten mindestens den Beobachtungsabschnitt 7.

Auf der bestockten Bahn erreichte kein einziger Stein die untere Strasse, die grösste Reichweite betrug 147 m. Nur knapp 50 % der im Abschnitt 1 durchlaufenden Steine gelangten bis in den Abschnitt 6.

Mit einer Ausnahme ergaben sich keine eindeutigen Beziehungen zwischen Gewicht oder Form der Steine und ihrer Reichweite oder ihrer Absturzgeschwindigkeit. Einzig auf der Bahn F bestätigte sich die Erwartung, dass grössere Steine auch grössere Reichweiten erzielen.

3.4 Ablagerungsursachen und -häufigkeit

Ein erster Eindruck über den Einfluss des Waldes ergibt sich aus der Zusammenstellung der Ablagerungsursachen (Tab. 2). Häufig führte nicht eine einzige Ursache zum vollständigen Stillstand des Steines, sondern die Kombination einer Hauptursache (Auslöser starker Bremsung) mit weiteren, oft schlecht erkennbaren Nebenursachen. Tabelle 2 enthält nur die Hauptursachen.

Die Häufigkeit der Ablagerungen kann durch die Ablagerungsrate a ausgedrückt werden. Ihre Berechnung beruht auf der Annahme, dass die Zahl dn der abgelagerten Steine der Zahl n der vorhandenen Steine und der Streckenlänge ds proportional ist:

 $dn = -a \cdot n \cdot ds$

Tabelle 2: Ablagerungsursachen Causes for retention

Ursache	Bah	n F	Bahn W	
	Anz.	8	Anz.	8
Blöcke, grosse Steine	11 .	32,3	16	16,3
Bäume	2)*	5,9	60	61,2
Baumstrünke	5	14,7	1	1,0
Fussweg	7	20,6	8	8,2
Strasse	5	14,7	0	0,0
Ursache nicht eindeutig	4	11,8	13	13,3
Total	34	100,0	98	100,0

^{)*} Ablagerung seitlich am Waldrand

Tabelle 3: Beispiele von Ablagerungsraten Rates of retention, examples

Abschnitt	a [m ⁻¹]	
unbestockt		
Bahn F, Gesamtwert	0,0096	
Bahn F, Abschnittswerte	0,0000 - 0,0158	
Bahn W, Gesamtwert Abschnitte 3 und 4	0,0064	
bestockt		
Bahn W, Abschnitt 2 (2 Teilversuche)	0,0519 / 0,0282	
Bahn W, Gesamtwert Abschnitte 5 - 7	0,0449	
gemischt	€	
Bahn W, Gesamtwert Abschnitte 2 - 7	0,0367	

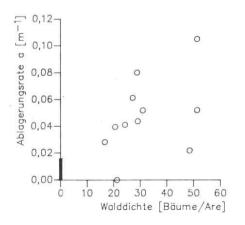


Abbildung 4:

Beziehung zwischen Walddichte und Ablagerungsrate Rates of retention against tree densities

- O Einzelwerte bestockter Abschnitte
- Wertebereich unbestockter Abschnitte

Ist die Ablagerungsrate a für einen homogenen Hangabschnitt der Länge s bekannt, kann durch Integration die Zahl na der Steine bestimmt werden, die in diesem Abschnitt zum Stillstand kommen:

$$n_a = n(1 - e^{-a \cdot s})$$

Die Auswertung der Versuche erfordert die Umkehrung dieser Beziehung:

$$a = -\ln\left(\frac{n - n_a}{n}\right) \cdot \frac{1}{s} \qquad \qquad n \neq n_a$$

(s horizontal gemessen)

Die Versuche ergaben für die gesamte Länge der Absturzbahn F eine Ablagerungsrate von 0,0096. Das bedeutet, dass durchschnittlich rund 1 % der Steine, die an einer bestimmten Stelle des Hanges ankommen, auf dem nächsten Laufmeter abgelagert wird. Die Werte für die Waldabschnitte der Bahn W sind dagegen bedeutend grösser (Tab. 3). Sie erreichten für einzelne Teilversuche rund 0,1. In Abbildung 4 sind abschnittsweise berechnete Ablagerungsraten in Abhängigkeit der entsprechenden Walddichten aufgetragen. Es ist klar ersichtlich, dass die Grösse der Ablagerungsraten mit der Walddichte zunimmt. Die vorhandenen Daten reichen aber noch nicht aus, um eine mathematische Beziehung abzuleiten.

3.5 Absturzgeschwindigkeiten

Aus den Zeitstoppungen an den Abschnittsgrenzen lassen sich für jeden Stein die Translationsgeschwindigkeiten berechnen, die er durchschnittlich in den einzelnen Beobachtungsabschnitten erreicht hat. Die Berechnungen wurden auf die schräge Länge der Abschnitte bezogen, sodass sie ungefähr dem Absolutbetrag der Geschwindigkeit entsprechen. Die höchsten beobachteten Werte liegen bei 15 m/s. Natürlich konnten mit der verwendeten Messanlage die grösseren, aber nur kurzfristig erreichten Spitzengeschwindigkeiten der Steine nicht bestimmt werden.

Bei schneller Bewegung der Steine ergaben sich sehr kurze Abschnittszeiten. Kleine Zeitmessfehler führen dann zu relativ grossen Fehlern an den Abschnittsgeschwindigkeiten. Zur Vermeidung solcher Fehler wurden sämtliche Zeitwerte mittels einer Energiebetrachtung überprüft.

Einen ersten Ueberblick zum Gebaren der Steine gibt Abbildung 5. Sie zeigt, dass die Abschnittsgeschwindigkeiten der Steine auf der unbestockten Bahn F nach unten leicht zunehmen, währenddem sie auf der Bahn W nach dem Waldeintritt im Abschnitt 5 deutlich und kontinuierlich abnehmen. Dabei ist allerdings klarzustellen, dass zur Mittelbildung der Abschnittsgeschwindigkeiten jeweils nur diejenigen Steine verwendet wurden, die den Abschnitt vollständig durchlaufen haben. Die Zunahme der Geschwindigkeit auf

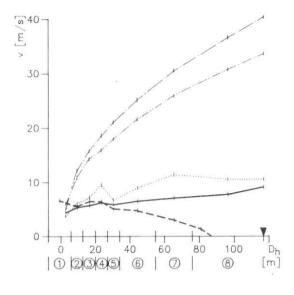


Abbildung 5:

Verlauf der Abschnittsgeschwindigkeiten Section velocities

Bahn F

- Durchschnittswerte aller durchlaufenden Steine
- --- Freier Fall (ohne Luftwiderstand)
- -+ Handberechnung nach HEIERLI et al., 1985
 - ▼ untere Strasse

Bahn W

---Durchschnittswerte aller durchlaufenden Steine

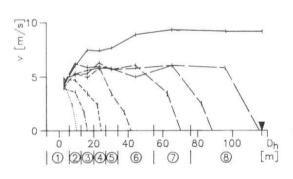


Abbildung 6:

Abschnittsgeschwindigkeiten der Ablagerungsgruppen (Bahn F) Velocities with respect to depositional sections (Trajectory F)

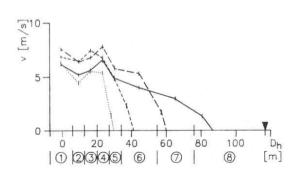


Abbildung 7:

Abschnittsgeschwindigkeiten der Ablagerungsgruppen (Bahn W) Velocities with respect to depositional sections (Trajectory W)

nur für Ablagerung in den Abschnitten 5 - 8 der Bahn F darf also nicht voreilig als Steigerung der gesamten Bewegungsenergie gedeutet werden.

Zur Beurteilung der Energiesituation müssen alle Steine berücksichtigt werden. Für die Bahn F ergibt sich, dass die spezifische Translationsenergie (Translationsenergie pro Masseneinheit) bis zum Beobachtungsabschnitt 7 zunimmt und anschliessend wegen der häufigen Ablagerungen wieder abnimmt. Die Zunahme zwischen den Abschnitten 3 und 7 beträgt 3,9 Nm/kg, sie ist gemessen am Potential von 481,3 Nm/kg sehr gering. In diesem Hangabschnitt halten sich Beschleunigungen und Verzögerungen die Waage, was angesichts seiner Lage auf einer natürlich gewachsenen Schutthalde nicht verwundert.

Bei diesen Betrachtungen ist anzumerken, dass nur die Translationsenergie der Steine berücksichtigt ist. Ueber einen Hang abstürzende Steine führen zusätzlich immer Rotationsbewegungen aus. Der Anteil der potentiellen Energie, der in Rotationsenergie überführt wird, beträgt zum Beispiel für einen kugelförmigen Körper und unter Annahme reinen Rollens (der Berührungspunkt von Körper und Unterlage ist Momentanzentrum der Bewegung) 30 %. In den Versuchen wurden diese beiden Voraussetzungen nicht streng erfüllt (unregelmässige Steinformen, meist springende Bewegung). Zahlen zur Rotationsenergie der Steine können aus den Versuchsdaten nicht gewonnen werden. Dazu sind Filmaufnahmen notwendig, wie sie zur Zeit an der EAFV ausgeführt werden.

Unter diesem Gesichtspunkt sind auch die Vergleiche zum freien Fall und zur Berechnung nach HEIERLI et al. (1985) zu betrachten, weil bei beiden die Rotation der Steine unberücksichtigt bleibt (Abb. 5). Es ist aber doch anzumerken, dass die Diskrepanz zwischen Berechnung und gemessenen Werten sehr gross ist.

Werden die Steine nach ihrer Reichweite zu Ablagerungsgruppen zusammengefasst und dann ihre Abschnittsgeschwindigkeiten gemittelt, so ergeben sich die Abbildungen 6 und 7. Abbildung 6 zeigt, dass die Steingruppe der Bahn F, die die untere Strasse zu überqueren vermochte, bereits in den Abschnitten 3 und 4 deutlich höhere Gruppendurchschnittswerte als alle übrigen aufgewiesen hat. Im Hangabschnitt 8 direkt vor der unteren Strasse bewegte sie sich mit durchschnittlich 9,2 m/s abwärts, währenddem die Steingruppe, die auf der Strasse liegengeblieben ist, nur 5,8 m/s erreicht hat.

Dagegen können die Steingruppen, die in den Abschnitten 6 - 8 zum Stillstand kamen, nicht bereits in den Abschnitten 3 und 4 auseinandergehalten werden. Nur diejenigen, die in den obersten 4 Abschnitten abgelagert wurden, weisen von Anfang an niedrigere Geschwindigkeiten auf. Bei allen kurzen Abschnitten zeigt sich, dass immer bereits im letzten Abschnitt vor der Ablagerung eine Reduktion der Geschwindigkeit erfolgte.

Abbildung 7 bestätigt die kontinuierliche Abnahme der Absturzgeschwindigkeiten nach dem Waldeintritt auf der Bahn W für alle Steingruppen. Eine Beziehung zwischen der durchschnittlichen Gruppengeschwindigkeit vor dem Waldeintritt und der Reichweite

Tabelle 4: Einfluss der Baumkontakte auf den Ablagerungsort Influence of trees on deposition

Stein- gruppe	Ablagerung im Abschnitt 5 6 7/8					Total		
)*	Anz.	8	Anz.	8	Anz.	8	Anz.	8
A	2	11,8	10	58,8	5	29,4	17	27,4
В	2 !	20,0	4	40,0	4 1	40,0	10 32	16,1
C	13	40,6	12	37,5	7 !	21,9	32	51,6
D	2	66,7	1	33,3	0	0,0	3	4,8
Total	19	30,6	27	43,5	16	25,8	62	100,0

)* A: keine Baumkontakte im Abschnitt 5

B: nur Streifungen

C: 1 Vollkontakt + ev. zusätzlich Streifungen

D: 2 Vollkontakte + ev. zusätzliche Streifungen

Tabelle 5: Einfluss der Baumkontakte auf die Geschwindigkeit Influence of trees on velocity

Stein- gruppe)*	Anteil mit v ₅ > v ₄ [%]			
A	29,4			
В	20,0			
C	6,3			
D	0,0			
Total	14,5			

Vergleichswerte zum Anteil zunehmender Abschnittsgeschwindigkeiten:

Bahn F, Abs. 1-8: \$\phi\$ 50,0 % Bahn W, Abs. 3/4: 48,4 %

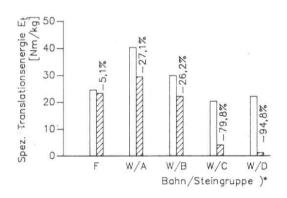


Abbildung 8:

Aenderung der Bewegungsenergie der Steine Change of energy of stones

Abschnitt 4

Abschnitt 5

Berechnung der Translationsenergie:

 $E_{t} = 0.5 \cdot m \cdot v^{2}$

der Steine im Wald ist nicht erkennbar.

3.6 Wirkung der Baumkontakte

Die Wirkung einzelner Baumkontakte auf die Bewegung der Steine lässt sich am besten anhand der Daten im Bereich der Abschnittsgrenze 4/5 (Waldeintritt) auf der Bahn W darstellen. Bei den Versuchen wurden die beobachteten Baumkontakte genau protokolliert, wobei zwischen Vollkontakten (Stamm zentral getroffen, starke Bremsung) und blossen Streifungen ohne grosse Bremswirkung unterschieden wurde. In den folgenden Auswertungen sind die Steine nach der Anzahl ihrer Baumkontakte im Abschnitt 5 zu 4 Gruppen zusammengefasst (Steingruppen A - D in den Tab. 4 und 5 und in Abb. 8).

Durchschnittlich erlitt jeder Stein 0,61 Vollkontakte und 0,39 Streifungen. 27 % der Steine berührten überhaupt keinen Baum. Nur 3 Steine erlitten mindestens 2 Vollkontakte, die Resultate dieser Gruppe sind deshalb wenig aussagekräftig.

Je härtere Baumkontakte die Steine im Abschnitt 5 erlitten haben, umso geringer ist ihre Reichweite (Tab. 4) und umso weniger treten in diesem Abschnitt Geschwindigkeitszunahmen auf (Tab. 5.) Allerdings ist anzumerken, dass der Anteil zunehmender Geschwindigkeiten auch für die Steingruppe ohne Baumkontakte gegenüber den Werten unbestockter Abschnitte klein ist.

Abbildung 8 gibt eine Zusammenstellung der Energieverluste zwischen den Abschnitten 4 und 5. Sie zeigt, dass die Steine bei einem Vollkontakt durchschnittlich 80 % ihrer Translationsenergie verloren haben. In rund 40 % der Fälle führte dies zur unmittelbaren Ablagerung des Steines.

4. Schlussfolgerungen

Aus den Versuchen ergibt sich, dass im gesamten die Steine durch die Bäume wirkungsvoll gebremst worden sind. Im ausgewerteten Waldabschnitt 5 mit nur 7 m horizontaler Ausdehnung in der Bewegungsrichtung erlitten bereits mehr als die Hälfte der Steine einen Vollkontakt. Der grösste Teil der Steine, die in einen Wald eindringen, trifft also schon nach kurzer Zeit auf einen Baum und wird dabei stark abgebremst. Steine, die trotz eines Baumkontaktes weiterrollen, werden immer wieder gebremst und erreichen deshalb keine hohen Geschwindigkeiten mehr.

Selbstverständlich gelten die berechneten Zahlenwerte nur für die Versuchsfläche. Sie basieren auf recht wenig Daten, sodass sie auch hier nur die Grössenordnung angeben. Damit genauere und allgemein gültige Aussagen gemacht werden können, werden an der EAFV weitere Versuche durchgeführt.

Die Versuche bestätigten, dass es nicht möglich ist, die Bewegung

eines einzelnen Steines vorauszubestimmen. Die einzelnen Werte für Abschnittsgeschwindigkeiten, Reichweiten, Energieverluste durch Baumkontakte usw. streuen sehr stark. Quantitativ ist dem Phänomen Steinschlag nur mit statistischen und wahrscheinlichkeitsrechnerischen Aussagen beizukommen, zum Beispiel durch die Verwendung von Mittelwerten, Varianzen, Korrelationskoeffizienten und Sicherheitsschwellen. Dies bedingt umfangreiche Feld- und Laborversuche zur statistischen Bestimmung der Parameter.

Bezüglich der nachlassenden Schutzwirkung des Waldes gegen abstürzende Steine können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Brechen geschädigte Waldbestände ganz zusammen, so sind die umgelegten Bäume vorerst weiterhin imstande, abstürzende Steine aufzuhalten. Erst wenn sie durch forstliche Eingriffe oder Lawinen aus dem Hang entfernt werden, kann sich der Steinschlag ungehindert entwickeln. Aufgrund der Versuche ist bei vergleichbaren Geländeverhältnissen - wie sie im Alpenraum häufig vorkommen - damit zu rechnen, dass nach einer vollständigen Zwangsnutzung 3 - 10 Mal weniger Steine abgelagert werden und dass bedeutend höhere Absturzgeschwindigkeiten von bis zu 20 m/s auftreten.
- Die gleiche Aussage lässt sich für Zwangsnutzungen geschädigter Bestände vor ihrem Zusammenbruch machen. Hier ist zu beachten, dass viele Steine auf der Bahn F durch Baumstrünke und Fusswege aufgehalten wurden. Es ist also wichtig, bei Zwangsnutzungen solche Kleinhindernisse bereitzustellen.
- Die Annahme, dass aufgelockerte Waldbestände gegenüber dicht bestockten die Steine weniger abzubremsen vermögen, wurde durch die Versuche bestätigt. Eine mathematische Beziehung kann aber noch nicht angegeben werden.

Literaturangaben

BELLWALD, S. und GRAF, H., 1985: Der Wald im Aletschgebiet: Zustand und Entwicklungstendenzen. Schlussberichte zum Schweizerischen MaB-Programm 17: 159 S.

HEIERLI, W. et al., 1985: Schutz gegen Steinschlag. 2. Aufl., VSS Forschungsberichte 44: 100 S.

KOESTLER, J.N. et al., 1968: Die Wurzeln der Waldbäume. 284 S., Hamburg u.a., Verlag Paul Parey.

Adresse des Verfassers:

Johann Jahn Dipl. Ing. ETH

EAFV

CH-8903 Birmensdorf