



Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

STEINSCHLAGSCHÄDEN IN BERGWÄLDERN – EINE METHODE ZUR ERHEBUNG UND ANALYSE

ROCKFALL INJURIES IN MOUNTAIN FORESTS – A METHOD FOR DATA COLLECTION AND ANALYSIS

Simone Perret¹, Marc Baumgartner¹, Hans Kienholz¹

ZUSAMMENFASSUNG

In grossen Teilen der Alpen schützen Bergwälder Siedlungen und Verkehrswege vor Steinschlag und anderen Naturgefahren. Obwohl die generelle Schutzwirkung von Wäldern gegen Steinschlag heute kaum in Frage gestellt wird, ist doch erst wenig darüber bekannt, welche Eigenschaften einzelne Waldbestände aufweisen sollten, damit sie optimalen Schutz bieten. Um dieses Problem anzugehen, muss zuerst die Datengrundlage verbessert werden, weshalb wir eine neue Monitoring-Methode für steinschlaggeschädigte Waldbestände entwickelten. Dabei werden für jeden Baum allgemeine Parameter wie Art, Durchmesser, Höhe und Standortkoordinate bestimmt. Zudem werden Art und Geometrie jedes sichtbaren Baumschadens genau aufgenommen. Die Anwendung der Erhebungsmethode in einem steinschlagversehrten subalpinen Fichtenwald ergab folgende Resultate: An 157 Bäumen wurden 1704 Steinschlagverletzungen mit einem mittleren Maximaldurchmesser von 11 cm gezählt. Die meisten Schäden (63 %) liegen ungefähr in der Falllinie und 80 % der Verletzungen sind schon wieder vollständig verheilt. Zudem ist die räumliche Verteilung der Bäume und Schäden sehr ungleichmässig. Die neu entwickelte Monitoring-Methode ermöglicht die Bestimmung verschiedener Parameter, die benötigt werden, um einen steinschlaggeschädigten Waldbestand hinsichtlich seiner Schutzwirkung zu charakterisieren.

Key words: Steinschlag, Schutzwald, Monitoring Methode, Baumschäden

ABSTRACT

In large parts of the Alps settlements and traffic routes are protected against rockfall and other natural hazards by mountain forests. Although the general protective effect of forests against rockfall is not questioned nowadays, little is known about the ideal properties of a forest stand that provides maximum protection. In order to assess this problem, first the basic dataset has to be expanded. Therefore we developed a new monitoring method for rockfall-damaged forest stands. Within this monitoring for every tree general parameters such as species, diameter, height and geographical position are determined. Furthermore type and geometry of every visible tree injury is registered in detail. Application of the monitoring method in a subalpine Spruce forest provided the following results: For 157 trees 1704 rockfall injuries

¹ Geographisches Institut, Universität Bern, Hallerstrasse 12, CH-3012 Bern, Schweiz (perret@giub.unibe.ch; baum@giub.unibe.ch; kienholz@giub.unibe.ch)

with a mean maximal diameter of 11 cm were counted. The majority (63 %) of all injuries are located around the fall line and 80 % of all injuries are totally healed over. Moreover, the spatial distribution of trees and injuries shows a very uneven pattern. The newly developed monitoring method allows the determination of several parameters required to characterise the protective effect of a rockfall-damaged forest stand.

Key words: Rockfall, Protection forest, Monitoring method, Tree injuries

EINLEITUNG

Während in letzter Zeit die ökonomischen Ansprüche an die Bergwälder gesunken sind, gewann im Gegenzug deren Schutzfunktion besondere Bedeutung. Denn Lawinen, Überschwemmungen, Rutschungen und Steinschläge bedrohen in grossen Teilen der Alpen Siedlungen und Verkehrswege. Deshalb müssen Massnahmen zum Schutz der Bevölkerung getroffen werden. Bergwälder sind dazu besonders geeignet, da sie grossflächigen und langanhaltenden Schutz gegen Naturgefahren bieten können (Cemagref, 2001; Dorren, 2002). Aber Bergwälder sind auch sehr sensitiv gegenüber natürlichen und anthropogenen Störungen. Somit braucht es Monitoring-Aktivitäten kombiniert mit experimentellen Studien (Kräuchi et al., 2000), um die Beziehungen zwischen verschiedenen Prozessen in Gebirgsökosystemen besser zu verstehen. Solche Untersuchungen bilden gleichzeitig auch die Basis für Gefahrenanalysen und Risikobeurteilungen (Kienholz et al., 2002).

Obwohl die generelle Schutzwirkung von Bergwäldern gegen Steinschlag – die Naturgefahr um welche es hier geht – heute nicht in Frage gestellt wird (BUWAL, 1996), ist trotzdem erst wenig bekannt über die idealen Eigenschaften eines schützenden Waldbestandes. Um die Frage anzugehen, wie ein Waldbestand aussehen muss, damit er optimalen Schutz bieten kann, wurde das europäische Forschungsprojekt ROCKFOR – Rockfall and Forest Interrelation initiiert (Cemagref, 2001), in dessen Rahmen die vorliegende Arbeit entstand. In einem regionalen Massstab wurden bisher bereits verschiedene Aspekte der Interaktion zwischen Steinschlag und Wald untersucht (Dorren et al., 2003; Gsteiger, 1989; Jahn, 1988; Zinggeler, 1989), wohingegen Studien in einem sehr detaillierten Massstab rar sind.

Um diese Lücke zu füllen, wurde mit der hier präsentierten Arbeit folgendes Ziel angestrebt: Entwicklung einer Methode für ein einfaches aber detailliertes Monitoring von Waldbestandes-Eigenschaften, welche benötigt werden, um die Schutzwirkung eines Waldes gegen Steinschlag zu beurteilen (Baumgartner, 2002). Folglich stellte sich die Frage, welche Bestandes- und Schadendaten in welcher Form erhoben werden müssen, damit schlussendlich Aussagen über die allgemeine Schutzwirkung abgeleitet werden können. Die Antwort wurde in zwei Schritten gesucht:

1. Wie kann der Waldbestand charakterisiert werden?
Durch Erhebung von Einzelbaumparametern inklusive Standortkoordinaten und mittels Analyse der Bestandesstruktur inklusive „Mittlere Baumfreie Strecke“
2. Wie können die Steinschlagschäden charakterisiert werden?
Durch Erhebung von Art und Geometrie jedes sichtbaren Steinschlagschadens und mittels Analyse der statistischen und räumlichen Verteilung der Schäden

UNTERSUCHUNGSGEBIET UND METHODEN

Untersuchungsgebiet

Die hier vorgestellte Monitoring-Methode für steinschlaggeschädigte Waldbestände wurde in einem ausgewählten Testgebiet im Diemtigtal (Berner Oberland, Schweiz, 7°33'E, 46°36'N, 1240 m ü. M.) entwickelt. Abbildung 1 zeigt die rund 400 m hohe triassische Kalkwand des Schwarzenberges, an dessen Fusse sich eine mächtige, südost-exponierte und rund 40° steile Schutthalde befindet. Auf dieser Schutthalde mit relativ homogener Topographie wächst ein Zwergbuchs-Fichtenwald (Polygalo chamaebuxi-Piceetum, siehe Ott et al., 1997). Dieser Waldbestand liegt vollumfänglich in der Transitzone von meist kleineren Steinen (< 0.5 m im Durchmesser), die sich relativ häufig aus der Kalkwand lösen. In Abbildung 2 ist der 3000 m² grosse, untersuchte Waldbestand zu sehen.



Abb. 1: Schwarzenberg im Diemtigtal (Schweiz)
Fig. 1: Schwarzenberg in Diemtigtal (Switzerland)

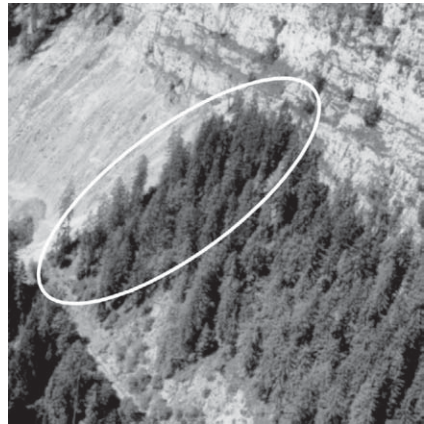


Abb. 2: Testgebiet am Fusse des Schwarzenberges
Fig. 2: Test site at the foot of Schwarzenberg

Erhebung der Struktur des Waldbestandes

Da die Bestandesstruktur ein wichtiger Faktor ist, wenn die Wirksamkeit eines Schutzwaldes untersucht werden soll (Bebi et al., 2001), bestand der erste Schritt des Monitorings darin, die räumliche Verteilung der einzelnen Bäume aufzunehmen, sowie jeden Einzelbaum mittels allgemeinen Parametern zu beschreiben.

Wie schon von Uuttera et al. (1998) sowie von Miller et al. (2000) gezeigt, eignet sich digitale Luftbild-Fotogrammetrie für die Aufnahme von Einzelbaumkoordinaten besonders gut. Bei der Anwendung in steilem Gelände und in mehrschichtigen Waldbeständen ist jedoch eine Kombination mit anderen Methoden nötig, um mit minimalem Aufwand ein optimales Resultat zu erhalten. Deshalb wurden zuerst Luftbilder des Waldbestandes im Massstab 1:3000 produziert. Darauf wurden die x- und y-Koordinaten der gut sichtbaren Oberschichtbäume mittels digitaler Fotogrammetrie bestimmt. Anschliessend wurden die verbleibenden Bäume, die auf dem Luftbild nicht zu sehen waren, im Feld von Hand eingemessen. Dabei wurden, von einem oder mehreren schon bestimmten Bäumen aus, die

Horizontaldistanz sowie das zugehörige Azimut aufgenommen und daraus die Standortkoordinaten berechnet.

Nach der Koordinatenbestimmung folgte die Aufnahme von zehn allgemeinen Parametern pro Baum (in Anlehnung an Stierlin et al., 1994), die gebraucht wurden, um den Waldbestand zu charakterisieren. Bestimmt wurden unter anderem der Brusthöhendurchmesser (auf 1.3 m Höhe, hangoberseitig), die Baumhöhe, die Höhe der Kronenbasis, die Stockwerkzugehörigkeit, die Wachstumsform und die Vitalität.

Erhebung der Art und Geometrie der Schäden

Um die Steinschlagschäden zu charakterisieren, wurden im zweiten Schritt des Monitorings, alle sichtbaren Schäden an jedem Baum genau aufgenommen. Dazu musste eine neue Methode entwickelt werden. Daten über einzelne Schäden sollen geomorphologische Interpretationen ermöglichen – unter anderem über die räumliche Steinschlagverteilung im Untersuchungsgebiet und die Erhebung der Schäden soll derart erfolgen, dass bei einer späteren Zweitaufnahme die frischen Schäden genau identifiziert werden können. Zudem sollte die Erhebung auf möglichst einfache und zeitsparende Weise von einer Person durchgeführt werden können. Erste Anhaltspunkte zur Aufnahme von Schäden an Bäumen lieferten Gsteiger (1989) und Mattheck & Breloer (1994).

Jeder Schaden wurde zuerst mit einer Identifikationsnummer versehen. Dann wurde zunächst bestimmt, ob der Schaden durch Steinschlag verursacht wurde oder nicht. Steinschlagschäden werden hauptsächlich an der oberen Stammhälfte erwartet, doch können einzelne Schäden auch an der unteren Stammhälfte auftreten. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Schaden durch Steinschlag verursacht wurde eher klein, wenn sich die Verletzung in sehr grosser Höhe befindet. In der Nähe von Strassen oder in Waldbeständen, die früher durchforstet wurden, sind zudem vermehrt anthropogen verursachte Schäden zu finden.

Die Analyse jedes Steinschlagschadens erfolgte danach in zwei Schritten: Erstens wurde die Art des Schadens bestimmt und zweitens dessen Geometrie beschrieben.

Zur Charakterisierung der Schadenart wurden zehn Typen definiert und für jeden Schaden ermittelt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verschiedenen Typen und Abbildung 3 zeigt



einen Schaden von Typ 2 „Verletzung von Rinde und Holz“. Einem Schaden können zum Teil auch zwei Typen zugeordnet werden: z.B. Typ 2 und 6 für einen Schaden mit Holzverletzung und Harzfluss. Schäden, die nicht durch Steinschlag sondern durch andere biotische (Mensch, Wild, Insekten, Pilze) oder abiotische Einflüsse (Wind, Schnee, Rutschung, Blitzschlag, Frost) entstanden sind, wurden ebenfalls registriert aber nicht im Detail beschrieben.

Abb. 3: Schadentyp 2 „Verletzung von Rinde und Holz“
Fig. 3: Injury type 2 „injury to bark and wood”

Tab. 1: Zehn verschiedene Schadentypen
Tab. 1: Ten different injury types

1.	Verletzung der Rinde	Rinde gequetscht oder abgeschlagen aber Holz darunter unverletzt; auch Verletzungen mit Harz oder Überwallungen, die das Holz verbergen
2.	Verletzung von Rinde und Holz	Rinde und auch Holzfasern darunter gestaucht oder abgesplittert
3.	Faulhöhle von Steinschlagverletzung ausgehend	Sekundärer Schaden durch Fäule, die eine Steinschlagwunde infizierte
4.	Beule über Steinschlagverletzung	Verheilte Steinschlagverletzung, nur noch als Beule sichtbar
5.	Beule über Faulhöhle von Steinschlagverletzung ausgehend	Verheilte aber faule Steinschlagverletzung, von aussen nur noch als Beule sichtbar
6.	Harzfluss	Frische Steinschlagverletzung mit noch flüssigem Harz (transparent bis hellgelb)
7.	Harzknollen	Ältere Steinschlagverletzung mit eingetrocknetem, verfestigtem Harz (gelb bis dunkelbraun)
8.	Radialriss von Steinschlagverletzung ausgehend	Riss entlang den Holzfasern gegen die Stammmitte; entstanden durch die Absorption von kinetischer Energie beim Steineinschlag
9.	Rippe von Steinschlagverletzung ausgehend	Verheilte Radialriss, nur noch als Rippe zu sehen
10.	Einschluss eines Steines	Ganzer Stein oder Splitter eines Steins, der im Stamm stecken blieb oder am Stammfuss liegt und dort eingewachsen ist

Zur Beschreibung der Schadengeometrie wurden acht Parameter definiert und für jeden Schaden erhoben. Tabelle 2 fasst die verschiedenen Parameter zusammen und Abbildung 4 zeigt das zugehörige Schadenmodell.

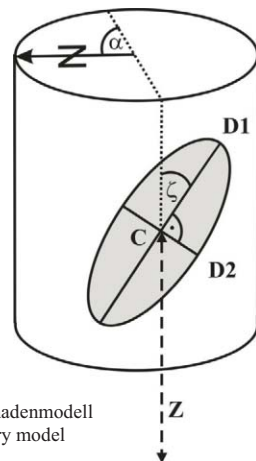


Abb. 4: Schadenmodell
Fig. 4: Injury model

Tab. 2: Acht Parameter zur Beschreibung der Schadengeometrie
Tab. 2: Eight parameters for the description of the injury geometry

1.	Höhe Z	Höhe über Boden (Hangoberseite) des Schadenzentrums C	Zur Rekonstruktion der Sprunghöhen von Steinen
2.	Durchmesser D1 und D2	D1 ist der maximale Schadendurchmesser (inkl. Überwallungsränder), D2 der grösste Durchmesser rechtwinklig zu D1	Zur Rekonstruktion der ursprünglichen Schadengrösse
3.	Tiefe	Maximale Schadentiefe; nicht repräsentativ bei Schäden mit Fäule, Harzknoten, Beulen oder Überwallung	z.T. Rekonstruktion der Eindringtiefe eines Steins; Deskriptiver Parameter
4.	Zenit ζ	Zenitwinkel des Durchmessers D1; gemessen mit Geodreieck	Deskriptiver Parameter
5.	Azimet α	Azimetwinkel des Schadenzentrums C; gemessen mit Kompass	Zur Rekonstruktion der horizontalen Lage des Schadens am Stamm
6.	Form	Zuordnung einer idealen geometrischen Form: Kreis, Ellipse, Quadrat, Rechteck oder Dreieck	Zur Rekonstruktion der Schadenfläche
7.	Trefferart	Volltreffer (symmetrisch gequetschte Rinde und gerissene Holzfasern) oder Streifschuss (einseitig ausgefrante Rinde und Holzfasern)	Deskriptiver Parameter
8.	Überwallung	Grösse der Überwallung in Prozent der gesamten ursprünglichen Schadenfläche; vier Klassen: 0%, <10%, >50%, 100%	Zur Rekonstruktion des Verheilungsstadiums

Analyse der erhobenen Daten

Die zahlreichen Baum- und Schadenparameter wurden in einer Access Datenbank gespeichert. Anschliessend wurden die Daten mit Excel und ArcView GIS visualisiert sowie statistisch und räumlich analysiert und geomorphologisch interpretiert. Da alle Baumkoordinaten genau bekannt waren, wurden die Bäume als Geobjekte im GIS platziert und die zugehörigen Baum- und Schadenparameter als Attribute beigefügt und dargestellt. Durch räumliche Interpolation wurde schliesslich die Verteilung einzelner Schadenparameter im Untersuchungsgebiet visualisiert.

RESULTATE

Charakterisierung des Waldbestandes

Der untersuchte Waldbestand (3000 m²) besteht aus 221 Bäumen, wovon jedoch nur 157 Bäume einen Brusthöhendurchmesser (BHD) grösser als 5 cm haben. Der mittlere BHD dieser 157 Bäume beträgt 21 cm, was laut Stierlin et al. (1994) einem Stangenholz Wald entspricht. Die dominierende Baumart ist die Fichte (*Picea abies*) mit 121 Individuen. Diese Bäume sind bis zu 35 m hoch und der mittlere BHD (der Bäume dicker als 5 cm) beträgt 26 cm, wobei es eine hohe BHD-Variabilität mit einem Maximum von 58 cm gibt. Neben den

Fichten wurden im Untersuchungsgebiet 65 Mehlbeer- (*Sorbus aria*) und Vogelbeerbäume (*Sorbus aucuparia*) sowie 25 Bergahorne (*Acer pseudoplatanus*) registriert.

Abbildung 5 zeigt eine Karte des untersuchten Waldbestandes – die Felswand schliesst in der linken oberen Ecke an. In der Karte sind einerseits alle 221 Bäume mit ihrer exakten Position und ihrer BHD-Klasse eingetragen und andererseits auch die interpolierte Anzahl Steinschlagschäden abgebildet. Sowohl die Stämme als auch die Durchmesser zeigen eine ungleichmässige räumliche Verteilung. Die grösste Stammdichte ist in der Mitte des Bestandes anzutreffen, wo hauptsächlich Bäume mit kleinen Durchmessern wachsen. Im Gegensatz dazu dominieren im oberen und unteren Teil des Bestandes grössere Durchmesser bei gleichzeitig kleinerer Stammdichte. Zwei Teilgebiete mit in etwa derselben BHD Verteilung aber mit leicht unterschiedlicher Anordnung der Bäume wurden ausgewählt und verglichen: Im Teilgebiet S1 stehen vorwiegend dicke Bäume in Rotten im oberen Teil und dünne Bäume, die ein Dickicht bilden unterhalb. Im Teilgebiet S2 hingegen, ist die Waldstruktur mehr zerstreut. Die Bestandesstruktur über das gesamte Gebiet ist weder besonders dicht noch besonders offen und für die 157 Bäume (BHD > 5 cm) wurde eine mittlere Dichte von 0.052 Stämmen pro m² berechnet.

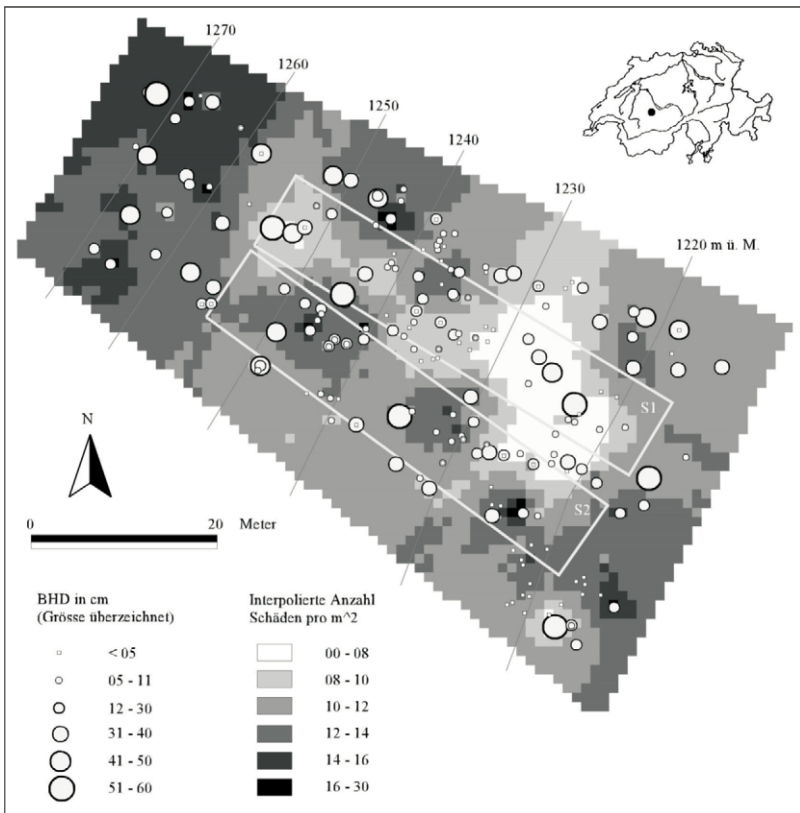


Abb. 5: Baumverteilung, Brusthöhendurchmesser und Anzahl Schäden
Fig. 5: Tree distribution, Diameter at Breast Height and number of injuries

Um die allgemeine Schutzwirkung eines Waldbestandes abzuschätzen, definierte Gsteiger (1989) den Parameter „Mittlere Baumfreie Strecke“ (MBS), welcher die mittlere Distanz angibt, die ein in der Falllinie stürzender Stein zwischen zwei Baumtreffern zurücklegen kann. Abbildung 6 zeigt das Modell der folgendermassen definierten „Mittleren Baumfreien Strecke“: $MBS = \text{Fläche} / (\text{Stammzahl} * (\text{mittlerer DBH} + \text{mittlerer Steindurchmesser}))$.

Der mittlere Steindurchmesser wurde aufgrund der herumliegenden Komponenten und der mittleren Schadengrößen auf 8 cm geschätzt. Nimmt man zudem im 3000 m² grossen Untersuchungsgebiet die 157 Bäume (BHD > 5 cm) mit einem mittleren BHD von 21 cm, so beträgt die „Mittlere Baumfreie Strecke“ 67 m. Somit kann im Modell ein kleiner Stein problemlos den halben Waldbestand durchqueren, ohne einen einzigen Baum zu treffen. Weil jedoch 89 % aller 64 Bäume mit einem BHD unter 5 cm ebenfalls Steinschlag-schäden aufweisen, müssen dünne Stämme ebenfalls einen nicht zu unterschätzenden Einfluss auf den Steinschlagprozess haben. Und tatsächlich, wenn man diese Stämme mit einem geschätzten mittleren Durchmesser von 3 cm ebenfalls einbezieht, reduziert sich die „Mittlere Baumfreie Strecke“ um 10 m und beträgt somit nur noch 57 m. Für die Teilgebiete S1 und S2 ergeben sich nochmals kürzere Strecken von 43 und 46 m Länge.

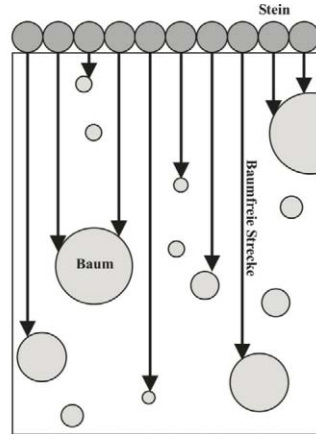


Abb. 6: Modell der „Mittleren Baumfreien Strecke“
 Fig. 6: Model of the „Mean Tree-free Distance“

Charakterisierung der Steinschlagsschäden

Für die 157 Bäume mit einem BHD über 5 cm wurden insgesamt 1704 Steinschlag-schäden registriert, was eine mittlere Anzahl von 11 Schäden pro Baum bedeutet. Jedoch sind nur wenige dieser Schäden frisch und noch nicht verheilt. Zudem wurde – wie in Abbildung 7 zu sehen – keine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Anzahl Schäden pro Baum und den Brusthöhen-durchmessern gefunden (auch nicht für einzelne Baumarten).

Abbildung 4 zeigt neben der Baumverteilung auch die räumliche Verteilung der Anzahl Schäden, welche aus einer linearen Interpolation (10 Nachbarbäume, 1 m Raster) resultierte. Offensichtlich sind nicht nur die Bäume ungleichmässig verteilt, sondern auch die Schäden. Zu sehen sind eine generelle Abnahme der Anzahl Schäden von oben nach

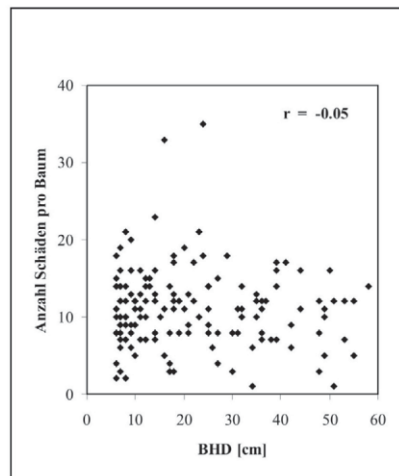


Abb. 7: Korrelation Anzahl Schäden – BHD
 Fig. 7: Correlation number of injuries – DBH

unten sowie eine ausgeprägte, kleinräumige Variabilität. In Teilgebiet S1 zum Beispiel, beträgt die Anzahl Schäden 314 (mittlere Anzahl pro Baum ist 9), wohingegen in Teilgebiet S2 452 Schäden gezählt wurden (mittlere Anzahl pro Baum ist 12).

Tab. 3: Prozentuale Vertretung der 10 Schadentypen

Tab. 3: Percentage representation of the 10 injury types

1.	Verletzung der Rinde	86.0 %
2.	Verletzung von Rinde und Holz	13.0 %
3.	Faulhöhle	1.5 %
4.	Beule über Steinschlagverletzung	9.0 %
5.	Beule über Faulhöhle	0.5 %
6.	Harzfluss	12.0 %
7.	Harzknollen	21.0 %
8.	Radialriss	0.8 %
9.	Rippe	0.01 %
10.	Einschluss eines Steines	0.04 %

Im Mittel wurden jedem Steinschlagschaden ein oder zwei Schadentypen (vergl. Tabelle 1) zugeordnet. Wie in Tabelle 3 zu sehen, war der häufigste Schadentyp mit 86 % Typ 1 „Verletzung der Rinde“, wohingegen Typ 2 „Verletzung von Rinde und Holz“ nur mit 13 % vertreten war. Wegen der hohen Anzahl Fichten, wurden auch viele Schäden von Typ 6 „Harzfluss“ (12 %) und Typ 7 „Harzknollen“ (21 %) gefunden.

Die statistische und räumliche Analyse der geometrischen Parameter führten zu folgenden Resultaten: Die Sprunghöhe der fallenden Steine wurde via die Höhe Z des Schadenzenstrums bestimmt. Die mittlere Schadenhöhe liegt auf 85 cm, die maximale Höhe beträgt 365 cm. Eine signifikante Korrelation zwischen dem Median der Schadenhöhe und der Anzahl Schäden wurde gefunden, d.h. je mehr Verletzungen vorhanden sind, desto höher sind die Einschläge. Die lineare räumliche Interpolation der Medianwerte zeigt höhere Sprunghöhen für Teilgebiet S1 als für Teilgebiet S2. Die maximalen Schadenhöhen wurden in den obersten 10 bis 20 m unmittelbar unterhalb der Felswand gefunden, wo die fallenden Steine direkt aus der Wand an die Bäume springen können. Weiter unten traten hohe Sprünge nur auf, falls Geländestufen vorhanden waren.

Die Schadengrösse wurde anhand der zwei Schadendurchmesser D1 und D2 beschrieben. Der mittlere Maximaldurchmesser D1 beträgt 11 cm, der mittlere Durchmesser D2 7 cm. Die beiden Durchmesser zeigten eine statistisch signifikante Korrelation und D1 korrelierte auch mit der Schadenoberfläche, die mit Hilfe der Schadenform berechnet wurde. Aber es wurde auch eine signifikante Korrelation zwischen D1 und dem BHD gefunden, was ein Problem für die räumliche Interpolation darstellt. Die Korrelation nimmt ab, wenn für die Interpolation nur die grösste Verletzung pro Baum verwendet wird. Wie in Abbildung 8 gezeigt, ist zwischen der grössten Verletzung pro Baum und dem BHD noch eine Korrelation von $r=0.39$ vorhanden. Das räumliche Muster für Schadengrössen zeigt schlussendlich eine generelle Abnahme der Schadengrössen mit zunehmender Entfernung von der Felswand.

Das Azimut bezeichnet die radiale Lage des Schadens am Stamm, gibt jedoch nur beschränkt Auskunft über den Einschlagwinkel eines Steins oder über dessen Ablenkung durch den Stamm. Die Schadenverteilung zeigt ein klares Maximum direkt in der Falllinie und 63 % aller Schäden liegen innerhalb eines 90° Sektors rund um die Falllinie. Vier Prozent der Schäden sind sogar an der Hangunterseite der Stämme zu finden. Für die räumliche Interpolation wurde ein mittleres Azimut pro Baum verwendet und das daraus resultierende Muster zeigt deutlich, dass es Bereiche gibt mit einer Tendenz für mehr Schäden an der rechten oder linken Stammhälfte.

Die Analyse der Überwallungsänder ergab, dass fast 80 % aller Verletzungen ganz verheilt sind. Bei 13 % der Wunden ist die Heilung fortgeschritten und nur 7 % der Schäden haben noch keinen oder fast keinen Überwallungsrand gebildet. Das Muster der räumlichen Interpolation zeigt, dass mit zunehmendem Abstand von der Wand der Anteil verheilte Schadenfläche ansteigt.

Die drei Parameter „Tiefe“, „Zenit“ und „Trefferart“ (siehe Tabelle 2) sind zwar ungeeignet für statistische und räumliche Analysen, aber trotzdem nützlich als deskriptive Parameter, mit denen die Beschreibung der Schäden vervollständigt werden kann.

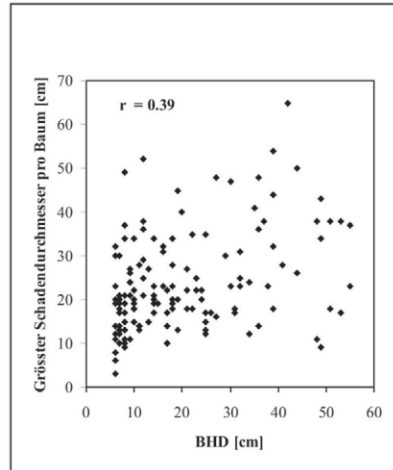


Abb. 8: Korrelation zwischen dem grössten Schadendurchmesser pro Baum und dem BHD
Fig. 8: Correlation between the largest injury diameter per tree and the DBH

DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Das Ziel der vorliegenden Untersuchung war es, eine detaillierte Monitoring-Methode für steinschlaggeschädigte Waldbestände zu entwickeln. Deshalb wurden in einem ausgewählten Waldbestand Baumparameter, inklusive exakte Standortkoordinaten, sowie einzelne Schadenparameter aufgenommen und sowohl statistisch als auch räumlich analysiert.

Im untersuchten Fichten-Waldbestand zeigen sowohl die Stämme als auch die Stammdurchmesser eine ungleichmässige räumliche Verteilung: In der Nähe der Felswand dominieren deutlich dickere Stämme und die Frage ist, warum in diesem Teilgebiet fast keine Verjüngung zu finden ist. Wahrscheinlich sind die Hauptfaktoren, welche die Verjüngung behindern der Mangel an Licht, Bodenmaterial und Wasser. Zudem verletzen die instabilen, scharfkantigen Schuttbestandteile an der Bodenoberfläche vermutlich jeden wachsenden Schössling.

Die Anzahl registrierter Schäden ist zwar sehr hoch, doch die Mehrheit davon ist schon wieder vollständig verheilt, was die Steinschlagaktivität etwas relativiert. Bei der am häufigsten registrierten Schadenart wurde soweit sichtbar kein Holz sondern nur Rinde und Kambium verletzt, was darauf hindeutet, dass häufig eher kleine Steine aus der Kalkwand losbrechen. Ebenfalls die mittlere Grösse und Höhe der Schäden deuten auf kleinere Steine von nur 10 bis 20 cm Durchmesser hin. Zudem ist auffallend, dass sowohl Art als auch Grösse und Höhe der Schäden nicht gleichmässig über das ganze Untersuchungsgebiet verteilt anzutreffen sind. Die Steine scheinen bereits in der Felswand kanalisiert zu werden und treten somit an einigen Stellen mit einer grösseren Häufigkeit in den Waldbestand ein als an anderen Stellen.

Eine weitere interessante Tatsache ist, dass keine statistisch signifikante Korrelation zwischen der Anzahl der Schäden und den Brusthöhendurchmessern gefunden wurde. Dies ist erstaunlich, da dickere Stämme fallenden Steinen eine grössere Oberfläche entgegen stellen und deshalb mit einer grösseren Wahrscheinlichkeit getroffen werden sollten als dünnere Stämme. Mögliche Erklärungen für die fehlende Korrelation könnten sein: Die Grösse einer Verletzung ist nicht nur eine Funktion der Grösse und Geschwindigkeit des Steins, sondern ebenso eine Funktion der Reaktion des Baumstammes auf den Aufprall. Diese Reaktion ist vermutlich je nach Alter des Baumes sehr unterschiedlich, denn Parameter wie Dicke der Rinde oder Härte des Holzes verändern sich mit zunehmendem Alter. Ausserdem ist die Geschwindigkeit des Verheilungsprozesses sowie die Sichtbarkeit vollständig verheilte Wunden für jede Baumart verschieden. Eine weitere mögliche Erklärung ist, dass grosse Verletzungen als ein einziger Schaden klassiert wurden, obwohl sie eigentlich durch mehrere Steineinschläge verursacht wurden. Schliesslich eine letzte Möglichkeit ist, dass die Modellvorstellung, dass jeder Baum mit derselben Wahrscheinlichkeit getroffen wird, zu einfach ist. Denn in der Realität treten die Steine weder homogen verteilt in den Waldbestand ein, noch durchqueren sie den Bestand gerade entlang der Falllinie.

Zum Schluss wurde versucht, aus den analysierten Daten Aussagen über die generelle Schutzwirkung des untersuchten Waldbestandes abzuleiten. Aufgrund der Stamm- und Durchmesserverteilung werden die Steine normalerweise zwar abgebremst aber nur selten ganz gestoppt. Es scheint von Vorteil zu sein, im obersten Teil unmittelbar unterhalb der Felswand, wo die Fallgeschwindigkeit der Steine hoch ist, homogen verteilte, dickere Bäume (> 30 cm) zu haben. Unterhalb dieser Zone, wo die Steine meist mit geringerer Geschwindigkeit fallen, da sie schon einige Baum- und Bodenkontakte hatten, ist ein Dickicht aus vielen dünnen Stämmen (< 30 cm) gut, um die Steine weiter abzubremesen.

Im Allgemeinen funktioniert die Monitoring-Methode gut und ist einfach anzuwenden. Dennoch hat sie einige Einschränkungen: Da die Datenerhebung sehr detailliert erfolgt, ist sie sehr zeitintensiv, insbesondere wenn die Bäume sehr viele Schäden aufweisen. Deshalb ist die Methode hauptsächlich für kleine Testgebiete geeignet. Zudem wurde die Erhebungsmethode auch speziell für kleine Schäden und Steine von weniger als 0.5 m Durchmesser entwickelt. Somit wären für Anwendungen in Gebieten mit grösseren Blöcken wahrscheinlich einige Anpassungen nötig. Um die allgemeine Tauglichkeit der Methode zu beurteilen, müssen auch weitere Studien in Testgebieten mit anderen Waldtypen und Blöcken durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Monitoring-Methode die Bestimmung von verschiedenen Parametern erlaubt, die wichtig sind, um einen steinschlaggeschädigten Waldbestand zu charakterisieren. Neben der Bestandesstruktur und der Anzahl und Art der Schäden können auch die räumliche Verteilung der Schadenhöhen, -grössen und -positionen am Stamm sowie die Verheilungsstadien der Schäden ermittelt werden. Interpretationen können für einzelne Bäume, für Teilgebiete oder für einen ganzen Waldbestand durchgeführt werden.

LITERATUR

- Baumgartner M. (2002): „Detaillierte Ersterhebungen in einem steinschlaggeschädigten Wald im Diemtigtal.“ *Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut Universität Bern.*
- Bebi P., Kienast F., Schönenberger W. (2001): „Assessing structures in mountain forests as a basis for investigating the forests dynamics and protective function.“ *Forest Ecology and Management 145, 3-14.*
- BUWAL (1996): „Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion.“ *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.*
- Cemagref (2001): „ROCKFOR – Rockfall and Forest Interrelation. Efficiency of the Protective Function of Mountain Forest against Rockfall. A European scientific project.“ <http://rockfor.grenoble.cemagref.fr/>
- Dorren L.K.A. (2002): „Mountain geoecosystems – GIS modelling of rockfall and protection forest structure.“ *PhD thesis, University of Amsterdam.*
- Dorren L.K.A., Maier B., Putters U.S., Seijmonsbergen A.C. (2003): „Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps.“ *In press in: Geomorphology 1367, 1-17.*
- Gsteiger P. (1989): „Steinschlag, Wald, Relief: Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung.“ *Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut Universität Bern.*
- Gsteiger P. (1993): „Steinschlagschutzwald: Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung.“ *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 144/2, 115-132.*
- Jahn J. (1988): „Entwaldung und Steinschlag.“ *Internationaler Kongress Interpraevent 1988 in Graz. Kongresspublikation, Vol. 1, 185-198.*
- Kienholz H., Herzog B., Bischoff A., Willi H.-P., Kunz I., Perret S. (2002): „Quality management in natural risk assessment.“ *International Congress Interpraevent 2002 in the Pacific Rim – Matsumoto, Japan. Congress publication, volume 1, 315-323.*
- Kräuchi N., Brang P., Schönenberger W. (2000): „Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs.“ *Forest Ecology and Management 132, 73-82.*
- Matthcek C., Breloer H. (1994): „Handbuch der Schadenskunde von Bäumen.“ *Rombach GmbH Verlag, Freiburg.*
- Miller D.R., Quine C.P., Hadley W. (2000): „An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage.“ *Forest Ecology and Management 135, 279-288.*
- Ott E., Frehner M., Frey H.U., Lüscher P. (1997): „Gebirgsnadelwälder: Ein praxisorientierter Leitfaden für eine standortgerechte Waldbehandlung.“ *Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.*
- Stierlin H.R., Brändli U.-B., Herold A., Zinggeler J. (1994): „Schweizerisches Landesforstinventar. Anleitung für die Feldaufnahmen 1993-1995.“ *Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.*
- Uuttera J., Haara A., Tokola T., Maltamo M. (1998): „Determination of the spatial distribution of trees from digital aerial photographs.“ *Forest Ecology and Management 110, 275-282.*
- Zinggeler A., (1989): „Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern: Modellierung der relevanten Teilprozesse.“ *Unveröffentlichte Diplomarbeit am Geographischen Institut Universität Bern.*
- Zinggeler A., Krummenacher B., Kienholz H. (1991): „Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern.“ *Berichte und Forschungen Vol. 3. Geographisches Institut, Universität Freiburg (CH).*