

Masterarbeit

**Impaktbezogene Jahrringanalyse als Komponente zur
Abschätzung von Steinschlag-Frequenzen**

Ein dendrogeomorphologischer Beitrag zu
risikoanalytischen Methoden

Dendrogeomorphologic assessment of rockfall frequencies
based on tree ring- and injury count data

Studiengang Mountain Risk Engineering

eingereicht von

Daniel Trappmann

Universität für Bodenkultur, Wien

Institut für Alpine Naturgefahren (IAN)

Betreuer BOKU Wien: Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johannes Hübl

Externer Betreuer Universität Bern: Dipl.-Geogr. Dr. Markus Stoffel

Mitbetreuer BOKU Wien: Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Michael Grabner

Wien, im Juni 2011

Kurzfassung

Über die letzten Jahrzehnte hinweg wurde durch zahlreiche Studien das Potential dendrogeomorphologischer Methoden für die Analyse von Naturgefahren demonstriert. Die vorliegende Arbeit charakterisiert anhand von Steinschlag-Verletzungen an Bäumen das räumliche und zeitliche Auftreten von Steinschlagprozessen. Bisherige Studien dieser Art bedienten sich klassischer Methoden der Jahrringanalyse zur Rekonstruktion von Steinschlag-Frequenzen. Während der klassische Ansatz eine sehr exakte Datierung einzelner Ereignisse ermöglicht, so stellt er auch eine arbeits- und zeitintensive Methode dar. Mit dem Ziel, den Aufwand zur Rekonstruktion von Steinschlag-Frequenzen zu reduzieren, wird ein praxisorientierter Ansatz angewendet und erprobt. Hierzu werden Steinschlag-Frequenzen und Sprunghöhen anhand von Nadelgehölzen (*Picea abies* (L.) Karst.) und Laubgehölzen (*Fagus sylvatica* L.) mit unterschiedlichen Methoden rekonstruiert und die Ergebnisse verglichen.

Als Untersuchungsgebiet dient eine etwa 3ha große, mit Mischwald bestockte Fläche im Inntal nahe der Stadt Innsbruck (Tirol, Österreich). Es werden Steinschlag-Frequenzen für 33 Fichten und 50 Buchen rekonstruiert. Anhand der Fichten erfolgt dies durch die Identifikation von Ereignissen in 144 Bohrproben durch steinschlagtypische Wuchsstörungen: Traumatische Harzkanalreihen, Kallusgewebe, Steinschlagwunden und Reaktionsholz. Da durch die Eigenschaften der Rinde an Buchen Verletzungen lange oberflächlich sichtbar bleiben, erfolgt hier eine Berechnung von Wiederkehrdauern durch eine Zählung von sichtbaren Verletzungen in Kombination mit einer Bohrprobe zur Altersbestimmung.

Die räumliche Interpolation dieser Wiederkehrdauern zeigt, dass beide Methoden glaubwürdige Resultate liefern. Deutliche Unterschiede zeigen sich bei einem Vergleich der errechneten Werte. So liegen mittlere Wiederkehrdauern für die gesamte Fläche für Fichten bei 17,8 Jahren und für Buchen bei 8,7 Jahren. Auch die mittleren beobachteten Sprunghöhen weichen mit 0,9m (Fichte) und 0,7m (Buche) voneinander ab. Die Resultate werden mit den Ergebnissen einer Steinschlag-Simulation mit dem Modell Rockyfor3D verglichen. Hierbei kann eine Übereinstimmung der räumlichen Muster der Trajektorien und Sprunghöhen festgestellt werden.

Die Differenzen der Wiederkehrdauern und Sprunghöhen liegen vermutlich in den Rindeneigenschaften der beiden Baumarten. Wegen der verhältnismäßig dünnen Rinde hinterlassen kleine Steine oder solche mit niedriger kinetischer Energie an Buchen Schäden, während Fichten bei vergleichbaren Treffern unversehrt bleiben. Weitere Unterschiede ergeben sich aus kleinstandörtlichen Besonderheiten sowie durch die verwendete Methodik: Mehrere Treffer innerhalb eines Jahres ergeben im Jahrringmuster eine Wuchsstörung, die bei den Fichten als nur ein Ereignis gewertet werden

kann, wohingegen ein Treffer an Buchen auf der Rinde ein Schadensbild hinterlassen kann, das als Ergebnis mehrerer Treffer interpretiert wird. Somit kann gezeigt werden, dass durch die „klassische Methode“ abgeleitete Steinschlag-Frequenzen reale Verhältnisse eher unterschätzen, während eine Erfassung über sichtbare Treffer an Buchen zu Überschätzungen führen kann.

Abstract

Introduction

Rockfall processes threaten numerous settlement areas and transport routes. For the hazard assessment, detailed knowledge of the behavior of rockfall-processes is crucial. Especially data on runout zones, trajectories, energies and jumpheights is important for the planning of protection measures.

Over the past decades, numerous studies revealed the great potential of dendro-geomorphic techniques for the analysis of rockfall processes (STOFFEL *et al.*, 2005a; PERRET *et al.*, 2006; SCHNEUWLY *et al.*, 2008). In this contribution, classical tree ring reconstructions were used to assess past rockfall activity focusing on conifers. This “classic method” allows a very accurate dating of historic events. However, it represents a very time-intensive approach. With the aim to reduce time and effort of tree ring studies dealing with rockfall, a new practitioner-oriented method requiring less effort is applied. The new approach is illustrated with samples taken from broadleaves (*Fagus sylvatica* L.).

Aims of the study

The aim of this study is the reconstruction of historical rockfall events on a forested slope. Central goals of this study are the analysis of:

- the spatial distribution of rockfall frequencies
- the spatial distribution of jumpheights, as well as
- the development of a low-effort approach to derive rockfall frequencies

With the application of two different dendrogeomorphologic techniques, central aspects of rockfall-processes are investigated. Therefore increment cores of spruce trees are extracted and the tree ring series are analyzed towards typical growth disturbances that indicate rockfall events. On beech trees, rockfall events were derived by counting the scars left on the stem surface after rock impacts. The results are compared and advantages, as well as drawbacks of the different methods are discussed.

The findings allow an accurate assessment of the rockfall-hazard on the test site. Furthermore, they can be used to verify simulation results. In this thesis, simulations are carried out with the rockfall-model Rockyfor3D.

Study site

The study site selected for analysis is located near the city of Innsbruck in the Inn valley (Tyrol, Austria). The source area for the falling rocks is a 200m high, south facing limestone cliff. Below the cliff follows a steep (49°), around 200m long, ramplike dolomite slope with several small channels which channelize the falling rock fragments. Further downslope, the transit area (900 – 770m.a.s.l.) with a mean gradient of 40° follows. Here the trees are located that are sampled in this study. The investigated transit area has a surface of 3ha and is covered with a mixed forest stand, composed mainly of *Picea abies* (L.) Karst, *Fagus sylvatica* (L.) and *Pinus sylvestris* (L.). Adjacent to the lower part of the study site lays the railway line between Innsbruck and Scharnitz. The Tyrolean federal road B171 is located at the foot of the slope.

The rocks are detached mainly by the two rockfall triggers thawing-processes and heavy precipitation events. Due to the narrow joint-system of the rock, comparably small rocks (mostly $\leq 0,5\text{m}^3$) can be found on the study site.

Methods

For the selection of a suitable site for dendrogeomorphologic studies, a pilot study shall be carried out to find suitable areas for further analysis. With the application of simulation models areas can be detected, where rockfall occurrence overlaps with forested stands. Further requirements for suitable sites are:

- Rockfall has to be the only process that damages the trees on the studied area.
- For the assessment of rockfall frequencies, the process should have been constant over the past.
- The trees must have a certain minimum age to reconstruct historical events.
- The stand shall be free of human influences that could have damaged the trees like felling or road construction.
- Trees that are suitable for the analysis have to be available in the project area.

To avoid systematic errors, the trees for the reconstruction of rockfall frequencies are selected without regarding their visual impacts. The spruce trees are selected in three transects, parallel to the contour line with one tree every tenth meter. Beech trees are selected in a raster of 20m x 20m to assure an even distribution of the trees.

The coordinates of every selected tree are determined with measuring tape, compass and inclinometer. Distinctive features in aerial photos serve as starting point for the

measurements. Following, these coordinates are transferred in a Geographical Information System (GIS).

For every sampled spruce- and beech tree, data concerning the stem diameter (DBH, diameter at breast height) as well as visual impacts on the stem surface are recorded. To facilitate the interpretation of the growth disturbances in the spruce increment cores, additional data on tree height, vitality, crown percentage, visible growth disturbances, influence of neighboring trees, special site conditions and eventual deposits in front of the trees is registered.

Increment cores are taken with a 5mm increment borer. For every single increment core, the exact position on the stem is recorded. The height of the extracted spruce cores on the stem is adapted to the jump heights observed on studied site, which can be estimated by the heights of the visual impacts.

In this thesis, spruce increment cores are used to date past rockfall events. They are taken at 0.5m, 1.0m and 1.5m above ground on the upslope side if no scar is visible on the surface of the tree. One additional core is taken from the downslope side as low as possible. Modifications of this sample system are made if scars are visible in order to extract the samples as close to the wound as possible. Furthermore, the sample position is varied in a way that all visible impacts are expected to be represented in the cores. If it is unlikely that the visible impacts are recorded in the four increment cores per tree, additional cores are taken.

As the cores of the beech trees are only used to determine the age of the trees, just one core per tree is extracted from the (undisturbed) down slope side as close to the ground as possible.

The increment cores are glued on a wooden support carrier with vertical orientation of the wood fibres. After drying, the samples are sanded with abrasive paper of increasingly fine grading.

In the following step, the prepared samples are analyzed under a microscope. This includes a counting and measuring of the tree rings. For the beech samples, the number of missing rings to the pith is estimated with a concentric transparent template to determine the age of the tree.

The resulting tree ring curves are corrected by statistical and optical cross dating to assure an exact dating of the age of the trees as well as the event years.

Events in the spruce trees are identified by typical growth disturbances in the tree ring series such as traumatic rows of resin ducts (TRD), injuries, callus tissue or reaction wood. The rockfall events are dated with yearly precision.

As mechanical impacts remain clearly visible on the bark of beech trees, the events are derived by simply counting visible rockfall impacts on the stem surface.

Recurrence intervals are calculated for each individual tree by dividing the age by the number of impacts. The visualization of the recurrence intervals is done by spatial interpolations with the ordinary Kriging model. For all interpolations, the five nearest neighbors were used.

Results

In total, 34 *Picea abies* and 50 *F. sylvatica* are selected for sampling. Due to the decay of the wood of one spruce tree, it is dismissed for further analysis. All beech trees are suitable for further analysis. The different applied sampling strategies lead to different numbers of increment cores: three to four cores (144 in total) are taken for *P. abies* and only one core per tree (50 samples) for *F. sylvatica*.

The oldest tree ring series of the spruce trees dates back to the year 1761. The oldest beech, with the age of 196 years, dates back to the year 1816. The datasets for the two sampled tree species cover a similar time span with the average age of 134 years for beeches and 135 years for spruce trees.

The spruce trees in the project area have a bigger diameter (mean DBH 48cm) than the beeches (mean DBH 38cm).

The analysis of the spruce increment cores leads to 431 growth disturbances, from which 277 rockfall events can be reconstructed. The difference stems from the effect, that one event is visible in multiple cores of the individual tree. Additionally, the growth disturbances are interpreted carefully and only clear disturbances are recorded as an event.

Traumatic rows of resin ducts (TRD) are the most dominant growth disturbance (89%) in this study. In 6% of the cases, rockfall events are identified by scares in the tree ring series. The remaining events were dated by the identification of callous tissue (5%) and compression wood (<1%).

On the bark of the beech trees, 1140 rockfall scars can be detected by the application of the scar count method.

By the analysis of the spruce samples, the oldest rockfall event can be dated back to the year 1819. The number of events fluctuates between 0 and 9 events per year. An

increase of events is remarkable with rising sample-depth. The decadal rockfall activity from 1971-2010 is at the average of 1.0 (+/-0.2) [events per tree/ ten years].

With the "classic" dendrogeomorphic approach used for the analysis of the spruce trees, a mean return period of rockfall events for the entire study area of 17.8 years can be computed. In contrast, an average recurrence interval of 8.7 years is derived from the beech trees.

The spatial patterns of the return periods show similarities for both applied methods. A decline of the rockfall frequencies from the upper part of the project area towards the lower part becomes apparent. A higher number of events is recorded in the eastern part of the studied area compared to the western part. The highest frequencies can be found in the middle of the project area.

Compared to the data from the spruce trees, the scar count method applied on the beech trees leads for the studied area to a more differentiated spatial pattern of return periods. Two areas with high rockfall activity at the lower part of the slope can be detected, where falling rocks jump out of the bordering channels on the project area. Furthermore, a clear trajectory in the middle of the area becomes apparent.

Differences in absolute values were less marked for observed jump heights. For the spruce trees, average jump heights of 0.9m are recorded, whereas the average jump heights observed on the beech trees is 0.7m. The distribution of all detected scars shows a shift to the lower jump heights on the beeches, compared to the spruce trees.

Maximum observed jump heights for the individual trees range from 0,4m to 5m. Spatial interpolations show for both tree species the biggest maximal jump heights with 3-4m in the upper, central part of the studied area. The jump heights decline towards the lower part of the project area. Higher maximal jump heights can be observed in the eastern part of the area, compared to the western part. Again, the spatial patterns derived from the scar count method on the beech trees are more differentiated.

The counting of visible scars on the stem surface leads for the beech trees to 22.8 impacts per tree. On the spruce trees, 7.7 scars per tree are documented. Big scars were frequently found on the surface of spruce trees (72% of all scars), whereas small, medium and big scars are more evenly distributed on the beech trees.

In the spruce increment cores, the majority (88%) of all growth disturbances can be found in the early wood with most disturbances in the growth period dormancy. Only 12% of all impacts can be identified in the latewood of the sampled trees. These findings are in agreement with the events in the event chronic of the Austrian Federal Railways (ÖBB). Rockfall events in the studied area occur mainly in the winter season

and in the early spring (maxima in December and March), as well as in July and August.

Discussion

Different strategies for the selection of trees to be sampled were chosen for the different species (spruces in transects, beeches in a raster). To adhere to these concepts is in some cases not suitable. This can be the case if the tree species is not existent at the sample point. Furthermore, the system should be modified if the selected tree shows signs of decay. Another reason for a variation of the system is given if the tree does obviously not represent the rockfall conditions at a given place. This is the case if, for example, another tree is located directly in front of the tree to be sampled and serves as a shield for the falling rocks or if the tree is influenced by other processes like avalanches or channel processes. However, it turned out that a concept for the selection of trees to be sampled is crucial to get an objective impression of the process behavior without over- or underestimating the rockfall activity.

A central aspect of this study was the assessment of rockfall frequencies with a practitioner oriented approach. Beech trees are suitable for this task because the scars are visible for a long time on the stem surface. STOFFEL and PERRET (2006) propose that the counting of visible impacts, in combination with one increment core to determine the age of the trees, would lead to a reliable estimation of rockfall frequencies. This study demonstrates that the scar count approach can be used effectively on beech trees to assess rockfall frequencies and jumpheights. A crucial aspect within the method is the percentage of scars that are masked by the tree and cannot be detected by a visual inspection.

The development of general rules concerning the percentage of hidden scars is barely possible and only little can be found in literature on this issue. Many factors have an influence on the portion of masked wounds that cannot be detected on the stem surface. The percentage varies due to the initial size of the scar, the vitality of the tree and the genetic capability to overgrow the injury, the bark structure, annual increment rates, age of the tree and others. In general, tree species with a thick and structured bark mask scars more effectively than those with a thin smooth bark structure. (STOFFEL and PERRET, 2006)

GSTEIGER (1989) could only detect 41% of all injuries by a visual inspection of the stem surface of beech trees. STOFFEL (2005b) could identify 75% of all scars by a visual interpretation of the bark structures. According to the impressions gained in this

study, theoretically all scars stay visible on the bark of the common beech. However, the hints for an impact in the past become vaguer the older they get.

In the studied area, presumably a very high rate of past rockfall events can be detected on the bark of the beeches. One reason for hidden scars can be the case that rock fragments hit the tree several times at the same position on the stem and therefore blur the signs of former events. Furthermore, the lower part of the stem is in some cases covered with moss which hides the scars.

To develop an effective method for the estimation of rockfall frequencies, it is investigated if the age of the trees can be determined without the extraction of increment cores. It turned out that there is only a vague correlation between the DBH and the age of the trees on the studied area. This situation can be different in reforested stands or in other forests.

Comparison of the results obtained with the different approaches clearly shows that the spatial pattern of return periods are reliable independently of the approach used. ZINGGELER (1990) stresses the importance of the relief for the trajectories of the falling rocks, what can be seen clearly in the present study. Several small chutes in the dolomite ramp above the project area channelize the falling rocks towards the center of the area. Here, the highest rockfall activity can be detected. The rock fragments follow a shallow channel down the slope, which is located at the center of the studied area. This trajectory becomes visible in the interpolated return periods as well. However, the beech trees show the channelizing effect of the relief more clearly and on a more detailed level.

Furthermore, the return periods derived from the beech trees show spatial patterns which cannot be detected in the interpolation of spruce tree data: Rocks jump out of the bordering channels onto the project area in the middle of the slope. The more detailed resolution derived from the beech trees results probably from the greater amount of data. The interpolations show that the level of detail rises with an increasing number of data points. Because the scar count method requires a comparably low effort, more trees could be sampled. In addition, a greater number of rockfall scars was detected with the scar count approach.

The effect of the protective forest can be seen in both interpolations. It becomes apparent through the decline of the rockfall activity from the upper towards the lower part of the slope.

Derived jumpheights are in agreement with typical jumpheights of 1 to 2m (DORREN *et al.*, 2005) on forested slopes. In this study, a relation of the jumpheights with the slope becomes apparent: higher jumpheights are observed in the steeper eastern part of the

area than in the western part. The reason for the decline of the jumpheights towards the lower part of the area is again the protection forest.

The spatial patterns of the trajectories and jumpheights are furthermore in agreement with those derived from rockfall simulations with the Model Rockyfor3D. Simulation results are in good accordance with the interpolated return periods especially for the beech trees.

Simulation results and dendrogeomorphic findings show the general trend of a decline of activity from the upper part towards the lower part of the area and higher rockfall frequencies in the eastern part. They match as well on a detailed level: Both maps show the areas of high activity where the rocks enter the project area from the bordering channels and the central trajectory along the shallow gully.

The spatial distribution of the maximum jumpheights is in good accordance with the dendrogeomorphic data as well. Differences become apparent when the calculated values from the simulation are compared with those from field observations. The model generates values for maximal jumpheights (with the chosen simulation settings), which overestimate the real situation. The potential of dendrogeomorphic analysis for the model-validation becomes apparent here. Dendrogeomorphology can be used here to improve and validate the simulation results.

Even if the oldest event can be dated to the year 1819, it seems that a reliable rockfall activity for the study site can only be calculated with the spruce dataset for a time period over the last 40 years. The rockfall activity in earlier periods seems to be underestimated by the classic method applied on the spruces. Reasons for this are that the increment cores were extracted as close as possible to visible impacts. Consequently, younger impacts are in general visible on the stem surface whereas older scars can be completely overgrown and are often masked by the bark of the spruce trees. Therefore, younger events are identified and dated reliable while older events might not appear in the increment cores. Other reasons for more data on younger impacts are the decline of the sample depth and generally worse quality of the increment cores (decay) for older periods, which hinders the identification of growth disturbances. Following a considerable number of impacts has to be expected that cannot be identified with the applied "classic" method on spruce trees.

Differences between the methods become apparent as soon as return periods of rockfall are calculated although the data sets cover nearly the same time span.

The distinction in absolute return intervals can result from differences in tree locations. Another reason can be the fact that multiple impacts in the same year would only be counted one event in spruce whereas each injury in the beech trees would constitute

an individual event. In case of multiple scars from one rockfall event, an overestimation of frequencies by the scar count approach is possible.

On the beech trees in this study, more visible scars from rockfall events can be found on the stem surface. However, the comparison of the size of the individual scars shows a greater portion of small scars on the beech trees. One reason for this phenomenon is presumably the different wood and bark properties of the tree species. While the beech wood is comparably hard and covered by a relatively thin bark, the spruce wood is softer and coated by a thicker bark. As a consequence, the same rockfall event behaves different concerning the impact with the trees. The energy conservation by the spruce wood will result in more intense deformation of the wood compared with the beech wood. The same impact would result in deeper injuries on the spruce trees than on the beeches. This effect can be of special importance if small rock volumes are dominant. The energy of smaller rock fragments can be buffered by the thick bark and the soft wood of the spruces without causing a growth disturbance. Due to the thin bark of beeches, smaller rocks or rocks with lower kinetic energy will leave scars, while the same event would not damage the spruce trees.

The scar count method could probably be implemented with other tree species that have a smooth bark structure like *Acer pseudoplatanus* (L.), *Acer platanoides* (L.), *Sorbus aucuparia* (L.), *Sorbus aria* (L. Crantz) or *Abies alba* (Mill.). Using trees with a smooth bark structure, the jump heights can be assessed with a higher accuracy compared to conifers because more impacts can be expected to be visible on the stem surface.

On central issue in this thesis is the verification of the applicability of the scar count method. It can be demonstrated that the scar count approach is an effective method to estimate rockfall frequencies and jump heights on forested slopes. Important variables of rockfall processes like trajectories, frequencies and jump heights can be estimated with comparably low effort. This data is valuable for practitioners for the hazard assessment, for the design and construction of protective measures as well as for the validation of simulation results. Even if this study shows that the method can result in reliable data on rockfall processes, several questions remain. One main question is the portion of scars that remains visible on the surface for the different tree species. Another question is if the energies of the falling rocks can be estimated with the geometry of the scars or wounds.

With the classic analysis of tree ring series, additional information can be gained which is not possible by the application of the scar count method. Events can be dated with yearly or subsaisonal precision. This exact data allows further interpretations like the

development of the activity in the past or the detection of years with high or low activity. Major events can be reconstructed and a seasonal resolution gives hints on the relevant triggering factors for rockfall processes.

However, an estimated great portion of all impacts can be identified by the counting of visible scars on beech trees. Jumpheights can be derived without the extraction of increment cores. In combination with only one core, rockfall frequencies can be assessed effectively. Therefore, the method is suitable for studies that cover large areas or to assess the spatial variations of rockfall process on a detailed level with low effort.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	4
Inhaltsverzeichnis	14
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	18
1 Einleitung.....	19
1.1 Ziele	19
1.2 Fragestellungen.....	20
2 Grundlagen	21
2.1 Begriffsklärungen	21
2.2 Prozessbeschreibung.....	22
2.2.1 Definition Steinschlag.....	22
2.2.2 Voraussetzungen für die Entstehung von Steinschlag.....	23
2.2.3 Ablöse- und Auslösemechanismen.....	24
2.2.4 Bewegungsabläufe der Sturzkomponenten	25
2.3 Interaktion Wald - Steinschlag.....	27
2.3.1 Wirkung des Waldes im Ablösebereich	28
2.3.2 Wirkung des Waldes im Transitbereich	29
2.3.3 Interaktion Stein - Einzelbaum.....	30
2.4 Methoden und Ansätze für die Datierung von Ereignissen	31
2.5 Jahrringforschung.....	31
2.5.1 Die Geschichte der Jahrringforschung.....	31
2.5.2 Anwendungsfelder.....	32
2.6 Stand der aktuellen Forschung.....	32
3 Untersuchungsgebiet.....	35
3.1 Lage des Projektgebietes	35
3.2 Ereignischronik.....	36
3.2.1 Dokumentierte Steinschlagereignisse.....	36
3.2.2 Auslöser für Steinschlagereignisse.....	36
3.3 Einschätzung der geomorphologischen Prozesse	37
3.4 Steinschlagrelevante Parameter des Projektgebietes.....	38
3.4.1 Geologie.....	39
3.4.2 Gesteinsbestand	39

3.4.3	Ablösebereiche für Steinschlag	40
3.4.4	Größe der Steine	40
3.5	Klima	41
3.6	Vegetation	42
4	Methoden	43
4.1	Steinschlag-Modellierung	43
4.1.1	Das Modell Rockyfor3D (Version 4.0).....	44
4.1.2	Eingangsdaten	46
4.1.3	Simulationseinstellungen.....	47
4.1.4	Ausgabedaten des Modells	48
4.2	Dendrogeomorphologische Untersuchung.....	49
4.2.1	Auswahl geeigneter Flächen	49
4.2.2	Auswahl der Probebäume	50
4.2.3	Vermessung der Baumstandorte	50
4.2.4	Erfassung relevanter Parameter am Einzelbaum.....	51
4.2.5	Ansprache der äußerlich sichtbaren Schäden	52
4.2.5.1	Steinschlagbedingte Schäden	53
4.2.5.2	Schäden durch sonstige Ursachen	58
4.2.6	Entnahme der Bohrproben	59
4.2.7	Aufbereitung der Bohrkerne.....	61
4.2.8	Zählen, Vermessen und Abschätzen fehlender Jahrringe.....	61
4.2.9	Korrektur der Jahrringbreitenkurven	63
4.2.10	Datierung der Ereignisse	63
4.2.10.1	Verletzungen	64
4.2.10.2	Traumatische Harzkanalreihen	65
4.2.10.3	Kallusgewebe und Überwallung.....	66
4.2.10.4	Druckholz	66
4.2.10.5	Bestimmung der Saisonalität	66
4.2.11	Verarbeitung raumbezogener Daten.....	68
5	Ergebnisse.....	69
Teil A) Dendrogeomorphologische Studie		
5.1	Auswahl und Räumliche Verteilung der Probebäume	69
5.2	Baumbestand	70
5.2.1	Altersstruktur	70
5.2.2	Durchmesserverteilung.....	72
5.3	Rekonstruierte Steinschlag-Schäden.....	73
5.4	Steinschlagaktivität.....	74

5.5	Wiederkehrdauer.....	76
5.5.1	Wiederkehrdauer Fichte	77
5.5.2	Wiederkehrdauer Buche.....	78
5.5.3	Wiederkehrdauer Fichte und Buche kombiniert	79
5.6	Sprunghöhen der Steine.....	80
5.6.1	Mittlere Sprunghöhen	80
5.6.2	Maximale Sprunghöhen.....	81
5.7	Größe der Schäden	83
5.8	Steinschlag-Trajektorien.....	85
5.8.1	Azimute der Schäden	85
5.8.2	Eintrittsbahnen der Steine	86
5.9	Variation der Steinschlagprozesse	87
5.9.1	Räumliche Variation	87
5.9.2	Saisonale Variation	87
 Teil B) Simulation mit Rockyfor3D		
5.10	Trajektorien	89
5.11	Maximale Sprunghöhen.....	89
 Teil C) Gegenüberstellung der Resultate aus Simulation und dendrogeomorphologischer Studie		
5.12	Trajektorien - Wiederkehrdauern	90
5.13	Maximale Sprunghöhen.....	91
5.14	Energien – Schadensgrößen an Buchen	92
6	Diskussion	94
6.1	Allgemeine Methodenkritik	94
6.2	Methodenkritik: Zähl-Verfahren an Buchen.....	99
6.3	Steinschlagprozesse im Projektgebiet	104
6.4	Vergleich der Resultate aus Simulation und Jahringdaten.....	110
6.5	Vor- und Nachteile des Zähl-Verfahrens und klassischer Methoden.....	112
6.6	Aufgeworfene Fragen	114
7	Schlussfolgerungen	115
8	Dank	116
Literaturverzeichnis		117
Anhang.....		121
Erklärung		122

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Prinzipielle Bruchmechanismen im Fels (JOHN & SPANG, 1997).....	25
Abb. 2: Bereiche eines Steinschlaganges (nach DORREN <i>et al.</i> , 2007, geändert)	26
Abb. 3: Verteilung verletzter und unverletzter Bäume bei den Prozessen Rutschung, Murgang und Steinschlag (nach MOYA <i>et al.</i> , 2010, geändert)	27
Abb. 4: Lage des Projektgebietes.....	35
Abb. 5: Hechenberg mit Lage des untersuchten Transitbereiches.....	35
Abb. 6: Auslösende Faktoren für Steinschlagereignisse nach Auswertung der Ereignischronik	37
Abb. 7: Hangneigungskarte, unterteilt in Wandbereich, Dolomitvorbau und Transitbereich	38
Abb. 8: Geologie des Hechenberg-Gebietes: (Österr. Geol. Karte, Blatt 117, Zirl, Alp-Infra, 2008)	39
Abb. 9: Niederschlagsdiagramm für die Stadt Innsbruck (erdpunkte.de, 2010).....	41
Abb. 10: Rasterzellen unterschiedlicher Höhe und zugeordnete Wahrscheinlichkeiten in Rockyfor3D (DORREN <i>et al.</i> , 2004)	44
Abb. 11: Berechnung der Geschwindigkeit in Rockyfor3D (DORREN, 2010)	45
Abb. 12: Mögliche Treffer in Abhängigkeit von der Trefferposition zur Stammachse DORREN, 2010)	45
Abb. 13: Schematische Darstellung derTrajektorien, transformiert in Raster-Daten (DORREN, 2010).....	48
Abb. 14: Typische Steinschlagschäden an der Rotbuche	55
Abb. 15: Gegenüberstellung von an Rotbuchen typischen Winkelnarben und charakteristischen Steinschlagnarben.....	56
Abb. 16: Ausdehnung der ursprünglichen Schadensbreite auf die aktuelle Breite der sichtbaren Narbe.....	57
Abb. 17: Schäden durch Holzernte, streifende Nachbarn und herabfallende Äste.....	58
Abb. 18: Position der Bohrkern mit unterschiedlicher Anzahl an resultierenden Jahringen. (SCHNEUWLY, 2009, geändert)	60
Abb. 19: Mögliche Auswirkungen von Steinschlag auf Bäume und der Einfluss auf das Jahrringbild und die Jahrringbreitenkurve (STOFFEL <i>et al.</i> , 2005a)	64
Abb. 20: Anteile des unverletzt bleibenden Stammquerschnittes, in dem Kallusgewebe und TRD gefunden werden (SCHNEUWLY <i>et al.</i> , 2009b).....	65
Abb. 21: Dünnschnitte mit traumatischen Harzkanalreihen und gewöhnlichen Harzkanälen (STOFFEL, 2005a, geändert).....	65
Abb. 22: Steinschlagwunde im Stammquerschnitt und Kallusgewebe im zugehörigen Dünnschnitt (STOFFEL, 2005a)	66
Abb. 23: Plötzlich einsetzende und kontinuierliche Bildung von Druckholz	66
Abb. 24: Jahreszeitliche Differenzierung der gebildeten Zellen nach Wuchsperioden (STOFFEL <i>et al.</i> , 2005b).....	67
Abb. 25: Verzögerte Bildung von TRD in Entfernung zur Verletzung	67

Abb. 26: Standorte der untersuchten Bäume im Projektgebiet	70
Abb. 27: Häufigkeiten der Altersklassen, differenziert nach der Baumart.....	71
Abb. 28: Häufigkeiten der BHD-Klassen, differenziert nach der Baumart	72
Abb. 29: Korrelation zwischen BHD und Alter der Buchen im Projektgebiet	73
Abb. 30: Relative Häufigkeit der Schadens-Symptome in den Bohrkernen (Fichte).....	73
Abb. 31: Datierte Ereignisse aus Bohrkernanalyse (Fichte) und Chronik sowie die Baumbelegung über die letzten 200 Jahre	74
Abb. 32: Korrelation zwischen der rekonstruierten Steinschlagaktivität und der Anzahl oberflächlich sichtbarer Schäden (Fichte).....	76
Abb. 33: Interpolierte Wiederkehrperioden (Ordinary Kriging, Fichte)	77
Abb. 34: Interpolierte Wiederkehrperioden (Ordinary Kriging, Buche)	78
Abb. 35: Interpolierte Mindest-Wiederkehrdauern (Ordinary Kriging, Buche und Fichte kombiniert)	79
Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der Trefferhöhen am Stamm.....	80
Abb. 37: Häufigkeitsverteilung der maximalen Sprunghöhen.....	81
Abb. 38: Interpolierte maximale Sprunghöhen (Ordinary Kriging).....	82
Abb. 39: Relative Häufigkeiten der Schäden in Größenklassen.....	83
Abb. 40: Räumliche Verteilung sichtbarer Schäden.....	84
Abb. 41: Relative Häufigkeit der Azimute sichtbarer Schäden	85
Abb. 42: Eintrittspfade der Steine in das Projektgebiet.	86
Abb. 43: Saisonalität der Steinschlagereignisse	88
Abb. 44: Simulierte Trajektorien ohne Bäume sowie mit Bäumen.....	89
Abb. 45: Simulierte maximale Sprunghöhen ohne Bäume sowie mit Bäumen	89
Abb. 46: Simulierte Trajektorien und Wiederkehrdauern aus Jahrringdaten	91
Abb. 47: Maximale Sprunghöhen aus der Analyse der Steinschlagwunden und aus der Simulation.....	92
Abb. 48: Energie der Steine und Schadensgröße (Buche)	92
Abb. 49: Steinschlagaktivität und Anzahl feuchter Tage für Zentral-Europa (nach SEMENOV and BENGTTSSON, 2002).....	113

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Klassifikation nach Größe bzw. Volumen und Geschwindigkeit der Sturzmassen (BUWAL <i>et al.</i> , 1997)	23
Tab. 2: Flächengröße, Seehöhe und Hangneigung des Projektgebietes	38
Tab. 3: Klassifizierung von Steinschlagschäden (Perret <i>et al.</i> 2004)	53
Tab. 4: Verteilung der Probebäume und Bohrkern auf die Transekte (Fichte)	69
Tab. 5: Steinschlagaktivität, Klassen unterschiedlicher Aktivität sowie die Anzahl sichtbarer Schäden (Fichte)	75
Tab. 6: Schadens-Symptome innerhalb des Jahrringes (Fichte).....	87

1 Einleitung

Steinschlag stellt in den Alpen vielerorts eine Gefährdung für Siedlungsflächen und Verkehrswege dar. Im Vergleich zu Naturgefahren wie Hochwasser, Murgang, Lawine oder Rutschung sind Steinschlagereignisse oftmals nicht dokumentiert, weil sie vergleichsweise häufiger, aber mit geringerer Intensität als andere Naturgefahren auftreten. Für die Gefahrenbewertung sind jedoch genaue Kenntnisse über das Prozessgeschehen, insbesondere Auslauflängen, Trajektorien, zu erwartende Energien sowie auftretende Sprunghöhen, unabdingbar. Dass der Wald einen wirkungsvollen Schutz gegen Steinschlag bietet, ist allgemein anerkannt und wurde schon früh durch Studien von JAHN (1988) bewiesen. Dass aus der Analyse von Bäumen als „Stumme Zeugen“ räumlich hoch aufgelöste Informationen gewonnen werden können, die Steinschlagprozesse über Jahrhunderte hinweg nachvollziehbar machen, wurde allerdings erst in der jüngeren Vergangenheit demonstriert (STOFFEL *et al.*, 2005a; PERRET *et al.*, 2006; SCHNEUWLY *et al.*, 2008). Trotz dieses großen Potentials sind Jahrringanalysen zum Thema Steinschlag bislang selten. In der Literatur zu findende Studien wurden vorwiegend in der Schweiz durchgeführt und basieren zumeist auf Jahrringdaten von Koniferen, was eine arbeits- und zeitintensive Datenauswertung mit sich bringt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuer, effizienter Ansatz präsentiert, der eine Abschätzung von Steinschlag-Frequenzen anhand oberflächlich sichtbarer Verletzungen an der weit verbreiteten Laubbaumart Rotbuche (*Fagus sylvatica*, L.) ermöglicht.

1.1 Ziele

Unter Anwendung dendrogeomorphologischer Methoden (Bohrkernanalyse) und einer visuellen Ansprache der Steinschlagverletzungen an den Bäumen sollen historische Steinschlagereignisse für eine ausgewiesene Projektfläche rekonstruiert werden. Dabei liegt der Fokus der Arbeit auf einer Analyse der

- räumlichen Verteilung der Steinschlag-Frequenzen,
- räumlichen Verteilung der Sprunghöhen der Steine, sowie der
- Erprobung einer effizienten Methode, um Steinschlag-Frequenzen mit geringem Aufwand bestimmen zu können.

Die gewonnenen Erkenntnisse helfen dabei, die Schutzfunktion des Waldes im Projektgebiet zuverlässiger einzuschätzen. Die Kenntnis über Wiederkehrdauern soll eine noch präzisere Einschätzung der Gefahr durch Steinschlag ermöglichen. Auch können die Ergebnisse verwendet werden, um die Resultate aus Steinschlagsimulationen zu überprüfen und die Modelle zu kalibrieren. In dieser Arbeit soll ein Vergleich der Ergebnisse aus der dendrogeomorphologischen Untersuchung mit Simulationsergebnissen aus der Steinschlag-Modellierung mit Rockyfor3D erfolgen.

Mit der entwickelten Methode, Steinschlag-Frequenzen über eine Zählung sichtbarer Steinschlag-Narben auf der Stammoberfläche von Buchen (in Kombination mit einer Bohrung zur Altersbestimmung) zu ermitteln, soll eine praxistaugliche Methode erarbeitet werden, die erheblich weniger Arbeitsaufwand als bisherige Methoden erfordert.

1.2 Fragestellungen

Aus den Zielen der Arbeit ergeben sich die zentralen Fragen der Arbeit:

- Mit welchen Steinschlag-Frequenzen ist im Untersuchungsgebiet zu rechnen und wie sind diese räumlich verteilt?
- Wie ist das Steinschlaggeschehen hinsichtlich räumlicher-, zeitlicher- und saisonaler Variation zu beurteilen?
- Sind die in der Literatur zu findenden Methoden zur Steinschlagrekonstruktion auf das Projektgebiet übertragbar?
- Ist durch alleinige Zählung sichtbarer Steinschlagnarben eine realistische Abschätzung von Steinschlag-Frequenzen möglich?
- Worin liegen die Vor- und Nachteile dieser Methode?
- Stimmen die erzielten Resultate mit den simulierten Trajektorien und Sprunghöhen aus der Steinschlagmodellierung mit Rockyfor3D überein?

Diese zentralen Fragen der Arbeit sollen im Folgenden beantwortet werden.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsklärungen

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Steinschlaggeschehen auf einer definierten Fläche mit Hilfe von Zuwachsbohrungen an Bäumen rekonstruiert. Die Arbeit fällt somit in den Bereich der

Dendrogeomorphologie

In diesen Wissenschaftszweig fließen Techniken und Methoden aus zwei Disziplinen ein:

Die Dendrochronologie, deren Namen sich aus den griechischen Wörtern *déndron* für Baum und *lógos* für Zeit zusammensetzt, kann als Lehre oder Wissenschaft von der Baumzeit übersetzt werden (BEUTING, 2004). Sie beschäftigt sich demnach damit, das Baumwachstum vergangener Zeiten anhand der Jahrringe nachzuvollziehen und in Kontext zu bestimmten Faktoren zu setzen, die das Baumwachstum beeinflussen.

Die Geomorphologie ist die Lehre von der Form oder Gestalt der Erde (nach ZEPP, 2008) und beschreibt somit die Prozesse, welche die Erscheinung der Erdoberfläche prägen.

Diese beiden Wissenschaftszweige werden in der Dendrogeomorphologie zusammengeführt. Die Dendrogeomorphologie kann wiederum dem übergeordneten Fachgebiet der Dendroökologie zugeordnet werden, das alle Forschungszweige vereint, in denen Fragestellungen aus dem Bereich der Umwelt durch die Analyse von Jahrringsequenzen beantwortet werden (SCHWEINGRUBER, 1996). Somit werden in dem Fachgebiet der Dendrogeomorphologie mit den Mitteln der Jahrringanalyse und anhand der Wuchsformen von Bäumen Rückschlüsse auf Prozesse gezogen, die die Erdoberfläche gestalten.

Wiederkehrdauer, Frequenz

Im Umgang mit Naturgefahren stellen Daten zu der Häufigkeit eines Ereignisses eine wichtige Grundlage dar. Tritt ein definierter Prozess mit einer gewissen Regelmäßigkeit auf, so kann er durch seine Wiederkehrdauer charakterisiert werden. Die Frequenz ist der Kehrwert dieser Wiederkehrdauer. Beispielsweise kann ein Ereignis, das im langjährigen Durchschnitt alle 100 Jahre beobachtet werden kann, durch eine Wiederkehrdauer von 100 Jahren und eine Frequenz von $1/100$ bzw. $0,01 \text{ Jahren}^{-1}$ beschrieben werden.

2.2 Prozessbeschreibung

2.2.1 Definition Steinschlag

In der Literatur können verschiedene Definitionen des Prozesses Steinschlag gefunden werden. Frühe Definitionen sind oftmals vage gehalten. So beschreibt JAHN (1988, S.186) Steinschlag als

„... rasche[n] Absturz eines einzelnen oder einiger weniger Steine über einen steilen Abhang...“

Während BERGER *et al.* (2002, S.815) definieren:

“Rockfall consists of free falling blocks of different sizes that are detached from a cliff or a steep rock wall.”

Die Autoren verweisen darauf, dass Steinschlag einen Oberbegriff darstellt. Für eine exakte Definition der Sturzprozesse sind Angaben zu Volumen und Bewegungsabläufen nötig.

Nach BUNZA (1975) ist Steinschlag als Prozess den Massenbewegungen bzw. den Massenselbstbewegungen zuzuordnen. Diese Zuordnung findet sich auch in den Empfehlungen des schweizerischen Bundesamtes für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL *et al.*, 1997) und kann als allgemein anerkannt gesehen werden. Hier werden Massenbewegungen als hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fest- oder Lockergestein durch Wirkung der Schwerkraft beschrieben. Im Gegensatz zum Massentransport erfolgt die Bewegung ohne die Beteiligung eines Transportmediums. Massenbewegungen können in die Grundtypen Rutschprozesse, Fließprozesse und Sturzprozesse gegliedert werden. Steinschlag als Sturzprozess grenzt sich von den anderen Massenbewegungen dadurch ab, dass eine Scherbewegung nur gering beteiligt ist oder fehlt, obschon auch Übergangsformen zwischen den Prozessen bestehen. Wasser spielt zwar bei der Bereitstellung des Materials eine Rolle, ist aber für den anschließenden Verlagerungsprozess ohne Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit gibt die in der Schweiz gebräuchliche Klassifikation an, da diese alle im deutschen Sprachraum gebräuchlichen Begriffe mit einschließt. Sie unterscheidet zwischen Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz. Kennzeichnend für Block und Steinschlag sind mehr oder weniger isolierte Stürze von Steinen (Durchmesser <50cm) und Blöcken (Durchmesser >50cm). Die Sturzeschwindigkeiten liegen meist unter 30m/s und die Bewegung erfolgt fallend, springend oder rollend. Unter einem Grenzwert von etwa 30° Hangneigung kommen die stürzenden Trümmer im Allgemeinen zum Stillstand.

Felsstürze hingegen bezeichnen den Sturz eines mehr oder weniger zusammenhängenden Gesteinspaketes. Das Ereignisvolumen liegt zwischen 100 und 100.000m³. Geschwindigkeiten können bis zu 40m/s erreichen.

Bergstürze sind durch das plötzliche Ausbrechen großer Gesteinsmassen (>1.000.000m³) charakterisiert. Es erfolgt eine starke Wechselwirkung der Komponenten untereinander. Somit werden hohe Geschwindigkeiten erreicht (40m/s und mehr). Der Transport erfolgt oft über weite Strecken von mehreren Kilometern. Nicht selten kommt es in der Folge zu einem Aufstau von Bächen und Flüssen in der Talsohle, was einen sich anschließenden Ausbruch der Wassermassen mit katastrophalen Folgen ermöglicht. (nach BUWAL *et al.*, 1997)

Tab. 1: Klassifikation nach Größe bzw. Volumen und Geschwindigkeit der Sturzmassen (BUWAL *et al.*, 1997)

Steinschlag	∅ <50cm
Blockschlag	∅ >50cm
Felssturz	Volumen 100 – 100.000m ³ Geschwindigkeit 10 – 40m/s
Bergsturz	Volumen > 1 Mio. m ³ Geschwindigkeit >40m/s

Die in dieser Arbeit untersuchten Bäume weisen Spuren von Sturzprozessen auf, die nach obiger Definition größtenteils dem Steinschlag, teilweise auch dem Blockschlag zugeordnet werden können. Aufgrund des besseren Leseflusses wird im Folgenden der Begriff „Steinschlag“ für die auf der Fläche auftretenden Prozesse verwendet.

2.2.2 Voraussetzungen für die Entstehung von Steinschlag

Geometrische Voraussetzungen für die Steinschlagentstehung sind die Hangneigung, die Stein- und die Oberflächengeometrie. Ein unterer Grenzwinkel für die Entstehung kann nicht angegeben werden. Dieser ist je nach örtlichen Gegebenheiten variabel und hängt stark von der Topographie des Ablösegebietes, der Rauigkeit der Hangoberfläche sowie von der Form des Materials selbst ab. Die Geometrie der Steinschlagkörper selbst ist zumeist das Produkt des Trennflächengefüges. Dieses beschreibt die im Fels vorhandenen Diskontinuitäten, an denen die Festigkeit herabgesetzt ist. Ursache dieser Trennflächen können mechanische Beanspruchung (Kluft), sedimentäre Schich-

tung (Schichtfläche) oder Mineraleinregelung (Schieferungsfläche) sein. Die räumliche Anordnung dieser Trennflächen bestimmt Form und Größe des entstehenden Materials.

Des Weiteren bestehen mechanische Voraussetzungen. So spielt die Beschaffenheit der Oberfläche, mit den Parametern Rollwiderstand, Rauigkeit und Dämpfung, zusammen mit der Hangneigung für die Art und Weise der Fortbewegung eine zentrale Rolle. (nach KAITNA, 2008)

2.2.3 Ablöse- und Auslösemechanismen

Bei der Entstehung von Steinschlag muss zwischen Mechanismen, die die Steine aus dem Felsverband lösen, sowie denen, die die gelockerten Steine zum Stürzen bewegen, unterschieden werden.

Die Bereitstellung der Steinschlagtrümmer (Ablösemechanismen, promoting factors) ist zumeist Verwitterungsprozessen zuzuschreiben. Hier sind zu nennen:

- physikalische Verwitterung (Temperaturschwankungen, Frostverwitterung, besonders Frost – Tauwechsel, Porenwasserdruck)
- chemische Verwitterung (Lösungsprozesse, Salzsprengungen, Kristallisationsvorgänge)
- biologische Verwitterung (u. a. durch Säureausscheidungen von Wurzeln sowie Sprengung durch deren Wachstum)
- tektonische Beanspruchung oder Entspannung
- Erosionen, Denudation
- anthropogene Eingriffe wie Sprengungen u.a.

Wichtige Auslösemechanismen, die eine Lösung der Körper aus dem Verband verursachen (triggering factors) sind unter anderem:

- Regen, Gewitter und Wasserdruck, Porenwasserdruck in den Klüften
- Temperaturveränderungen – insbesondere Entstehung von Schmelzwasser durch Tauprozesse
- Erschütterungen (Erdbeben), Hangbewegungen
- anthropogenen Störungen (Abtrag, Sprengungen) und Einfluss von Wildtieren (Lostreten)
- Wind
- Quellen von Kluffüllungen

(POISEL, 1998; KRAUTBLATTER und DIKAU, 2007)

GSTEIGER (1989) verweist darauf, dass bereits abgelagerte Steine und Blöcke reaktiviert werden können und dadurch Steinschlag ausgelöst werden kann. Der Einfluss der Bäume auf die Entstehung von Steinschlag wird im Kapitel 2.3.1 behandelt. KRAUTBLATTER und DIKAU (2007) verweisen auf die Komplexität der Sturzprozesse, die nur durch die Berücksichtigung der Zwischenspeicher in den Felswänden selbst zu verstehen sei. Deshalb plädieren die Autoren für eine getrennte Betrachtungsweise der Teilprozesse: (I) Verwitterung, Bereitstellung von Material; (II) Füllung und Räumung der Zwischenspeicher in der Felswand und (III) Ablagerung am Schuttkegel.

Neben den aufgezählten Ablösemechanismen kann ebenso ein Bruch in der Felsböschung Steinschläge verursachen. Entscheidend für den Bruchmechanismus ist wiederum die Orientierung des Trennflächengefüges.

Als prinzipielle Bruchmechanismen kommen in Frage: a) Gleiten, b) Beulen, c) Kippen und d) Materialbruch (hier teilweise beeinflusst durch bestehende Trennflächen). (JOHN & SPANG, 1979; zitiert in KAITNA, 2008)

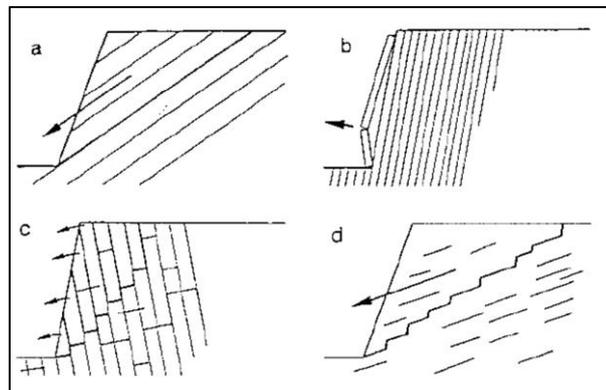


Abb. 1: Prinzipielle Bruchmechanismen im Fels
(JOHN & SPANG, 1997; in KAITNA, 2008)

2.2.4 Bewegungsabläufe der Sturzkomponenten

ZINGGELER (1990) beschreibt in seiner Arbeit detailliert die Bewegungsabläufe stürzender Steine. Den Beginn der Bewegung stellt üblicherweise ein Gleiten, Fallen, oder Rollen der Steinkörper dar. Durch Unwucht der Sturzkörper oder Unebenheiten des Terrains beginnen die Steine im weiteren Verlauf sich vom Boden abzuheben und beschreiben im Folgenden parabelförmige Sprungbahnen. Die Bewegungsmuster Sprung und Rollen können sich über das Steinschlagereignis mehrmals abwechseln. Befinden sich Hindernisse in der Sturzbahn, führen diese zu einer Ablenkung mit Energieverlust oder zu einem kompletten Stopp. Stürzen die Steine ungehindert, so läuft die Bewe-

gung langsam aus, sobald die Hangneigung dauerhaft einen Wert von unter $\sim 30^\circ$ (BUWAL *et al.*, 1997) annimmt, ab dem eine Abbremsung erfolgt.

Ein aktiver Steinschlaghang kann nach DORREN *et al.* (2007) grundsätzlich in drei Teilbereiche gegliedert werden:

1. Ablösebereich: Hier entsteht das stürzende Material und der Sturzprozess beginnt
2. Transitbereich: Diesen Bereich traversieren die Steine stürzend, es werden maximale Geschwindigkeiten und Sprunghöhen erreicht. Werden Steine abgelagert, können sie sich erneut in Bewegung setzen. Er liegt zwischen dem Ablöse und dem Ablagerungsbereich.
3. Ablagerungsbereich: Das herabstürzende Material wird hier endgültig abgelagert.

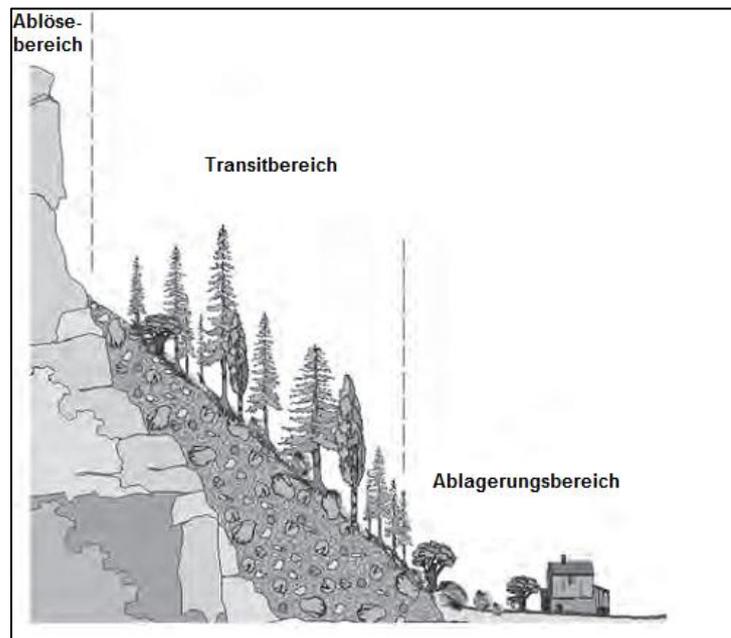


Abb. 2: Bereiche eines Steinschlaghanges (nach DORREN *et al.*, 2007, geändert)

2.3 Interaktion Wald - Steinschlag

Im Gegensatz zu anderen Massenbewegungen wie Rutschungen oder Murgängen kann mit der räumlichen Anordnung steinschlaggeschädigter Bäume oftmals nicht auf das genaue Ausmaß der vom Prozess betroffenen Fläche geschlossen werden. Während beispielsweise bei Rutschungen oft klare Grenzen zwischen gestörten und ungestörten Bereichen zu beobachten sind, können sich bei den lokal sehr kleinräumig auftretenden Steinschlagprozessen verwundete und unversehrte Bäume in unmittelbarer Nähe zueinander befinden. (STOFFEL und PERRET, 2006; MOYA *et al.*, 2010)

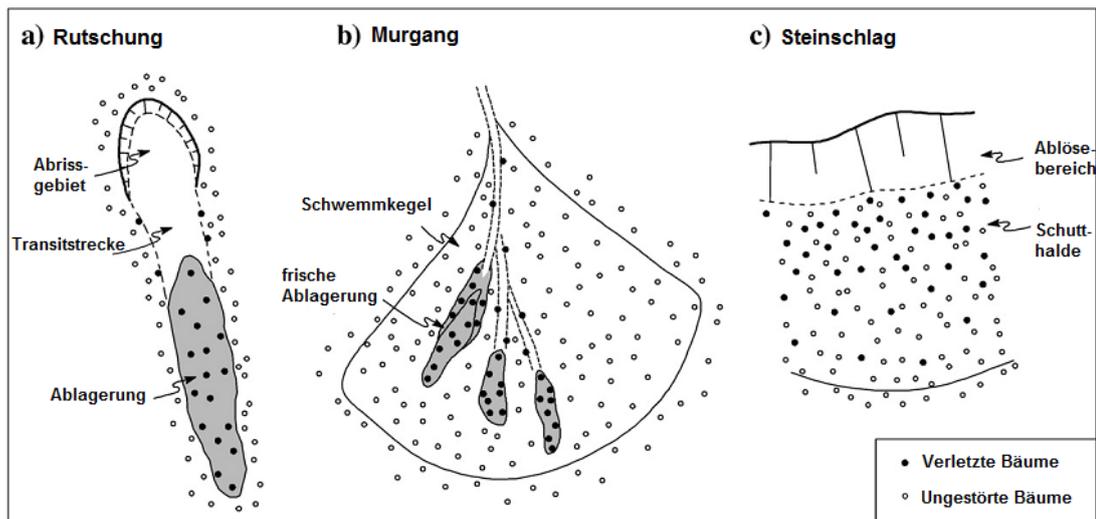


Abb. 3: Verteilung verletzter und ungestörter Bäume bei den Prozessen Rutschung, Murgang und Steinschlag (nach MOYA *et al.*, 2010, geändert)

Sind keine frischen Spuren oder unmittelbar vor den Bäumen abgelagerte Blöcke zu finden, so ist die Zuordnung der Sturztrümmer zu einer bestimmten Wunde am Baum kaum möglich.

Die Interaktion zwischen Wald und Steinschlag ist in den beschriebenen Teilbereichen Ablöse-, Transit- und Ablagerungsbereich unterschiedlich und muss getrennt betrachtet werden.

2.3.1 Wirkung des Waldes im Ablösebereich

Bäume im Ablösebereich können Steinschlag fördern, indem sie mit ihren Wurzeln Gesteinsspalten ausweiten und damit Material bereitstellen. Darüber hinaus können sie durch Ausscheidung organischer Säuren im Wurzelbereich die chemische Verwitterung der Gesteine vorantreiben. Zudem übertragen die Wurzeln auf den Baum wirkende Kräfte aus Schnee und Wind in den Boden. Durch die Hebelwirkung kann der Boden mechanisch gelockert werden. Umfallende Bäume können auch mit ihrem Wurzelwerk die Bodenoberfläche aufreißen und so Steine in Bewegung setzen (JAHN, 1988).

In der Entstehungsphase können Bäume jedoch auch steinschlaghemmend wirken. Hier können nach JAHN (1988) der Zusammenhalt („Umarmung“) aufgelockerter Felsmassen und die Verfestigung des Bodens durch ein zusammenhängendes Wurzelsystem genannt werden. Während er eine Wertung der positiven und negativen Auswirkungen als „schwierig“ bezeichnet, messen andere Autoren den negativen Faktoren die größere Bedeutung zu. So empfehlen DORREN *et al.* (2005) das Entfernen von unstabilen und in das Gestein wurzelnden Bäumen.

2.3.2 Wirkung des Waldes im Transitbereich

JAHN (1988) konnte mit ersten Feldversuchen auf bewaldeten und unbewaldeten Flächen zeigen, dass Bäume einen entscheidenden Einfluss auf die Reichweiten der künstlich ausgelösten Sturzprozesse nehmen. Bäume stellen im Transitbereich grundsätzlich ein Hindernis in der Sturzbewegung dar. Im Waldbestand konnten sowohl höhere Ablagerungsraten sowie geringere Geschwindigkeiten nachgewiesen werden. Ähnliche Untersuchungen wurden zum besseren Prozessverständnis und zur Entwicklung neuer Modelle seit 2001 mit größeren Blöcken im Rahmen des Projektes „Rockfor“ durchgeführt. Auch sie bestätigten geringere Geschwindigkeiten, kleinere Sprunghöhen und kürzere Auslaufdistancen im bewaldeten Gebiet (DORREN *et al.*, 2005). Nach GSTEIGER (1989) sind „Stammzahl, Durchmesser- und Steingröße die Faktoren, die bestimmen, wie stark eine stürzende Komponente im Wald abgebremst wird“.

Neben den Bäumen als Hindernis, wirken sich auch die dämpfende Wirkung des Waldbodens sowie die erhöhte Rauigkeit im Wald bremsend auf die Geschwindigkeit der Steine aus (KALBERER, 2007). Zusätzlich verweisen DORREN *et al.* (2005) auf die steinschlaghemmende Wirkung des Totholzes. Alle diese Ergebnisse von Steinschlagexperimenten lassen den Schluss zu, dass die Wirkung des Waldes auf den Steinschlagprozess von zahlreichen Faktoren abhängig und sehr komplex ist. So beeinflussen unter anderem Gewicht, Form, Geschwindigkeit und Bewegungsart der Steine und die jeweils vorherrschenden Eigenschaften des Waldes, wie Baumzahl und Durchmesser- und Steingröße, die Wechselwirkung stark. Generell schützen Bestände mit großen Baumzahlen und vergleichsweise kleinen Durchmessern bei kleinen Steinen gut vor Steinschlag. Sind große Sturzkomponenten zu erwarten, bieten hingegen Bestände mit Bäumen größeren Durchmessers (und dadurch zwangsläufig geringeren Baumzahlen) den besseren Schutz (KALBERER, 2007). Dies bestätigen auch JANCKE *et al.* (2009) mit ihren Untersuchungen. Dichte niederwaldartige Bestände bieten gegen kleine Steine ($d = 20\text{cm}$) sehr guten Schutz. Der Schutz vor herabstürzenden Blöcken ($d = 100\text{cm}$) sei hingegen durch Wälder aus Stockausschlag nicht gewährleistet.

Den langfristig besten Schutz bieten dem Standort angepasste, stabile Wälder. Hierzu haben FREHNER *et al.* (2005) eine umfassende Handlungsempfehlung zur Schutzwaldbewirtschaftung erarbeitet.

2.3.3 Interaktion Stein - Einzelbaum

Trifft ein Stein mit ausreichend hoher Energie auf einen Baum, hinterlässt er eine Steinschlagwunde. Der Baum speichert diese Information im Holzkörper durch charakteristische Wuchsreaktionen (s. Kapitel 4.2.10). Durch die Entnahme und Analyse von Bohrkernen können diese Informationen sichtbar gemacht werden.

Je nach Energie des Steines und Trefferfläche wird die Rinde gequetscht oder der Holzkörper an der Aufprallstelle zerstört. Es entsteht eine Steinschlagwunde. Eine wichtige Rolle spielt dabei, ob der Baum zentral getroffen wird und der Stein seine ganze Energie abgibt oder ob der Baum lediglich einen seitlichen Treffer erhält. In diesem Fall gibt er nur einen Teil seiner Energie ab und der Sturz wird mit verminderter Geschwindigkeit fortgesetzt. Die Energie auftreffender Steine wird zum einen durch Biegung und Bruch des Baumschafts, zum anderen durch Rotation und Verschiebung des Wurzelwerks absorbiert. Durch die Beschädigung des Holzkörpers wird nur ein kleiner Teil der Energie abgebaut. Ein großer Teil der Energie wird durch die Biegung des Stammes und dessen Auslenkung absorbiert. Die Auslenkung pflanzt sich im Stamm wellenförmig fort, wodurch es im Wipfelbereich zu Stammbrüchen kommen kann. Der größte Teil der Energie wird jedoch im Wurzelbereich durch Rotation und Verschiebung abgebaut. Bäume mit größerem Durchmesser sind grundsätzlich in der Lage, größere Energien zu absorbieren. Werte für die maximale Energieabsorption eines Einzelbaumes sind zwar in der Literatur zu finden (BRAUNER *et al.*, 2005; DORREN *et al.*, 2007; JONSSON, 2007; KALBERER, 2007, alle zitiert in KALBERER, 2007), sie sind jedoch durch verschiedene Definitionen und Versuchsdesigns nicht unmittelbar miteinander vergleichbar (KALBERER, 2007).

2.4 Methoden und Ansätze für die Datierung von Ereignissen

KRAUTBLATTER und DIKAU (2007) stellen die direkten Methoden zusammen, mit denen Verwitterungsprozesse von Felswänden und die Bereitstellung von Sturzmaterial untersucht wurden. „Direkte Methoden“ bezeichnet hier solche, die Unmittelbar ein vom Steinschlagprozess ausgehendes Signal aufzeichnen.

Direkte Methoden sind:

- Akustisches Monitoring und Abschätzung der Größe stürzender Komponenten
- Datierung von Ablagerungen mittels Flechtenbewuchs (u.U. mit Abschätzung der Komponentengröße)
- Dendrogeomorphologische Methoden
- Höhenunterschied von Quarzadern im Fels (für lange Zeiträume)
- Messen der Ablagerungen auf Schneefeldern
- Farbliche Markierung der Felswand (für kleinräumige Studien)
- Steinschlag-Kollektoren
- Laser scanning (zur Volumenbestimmung größerer Ablagerungen)
- Kluftkörper-Analyse (Monitoring zunehmender Öffnung)
- Inventuren entlang steinschlaggefährdeter Straßen

„Indirekte Methoden“ bedienen sich beispielsweise der Ablagerungsmuster von Schutthalden oder den Akkumulationsformen auf Blockgletschern, um Variationen des Steinschlaggeschehens über Tausende von Jahren zu untersuchen. (KRAUTBLATTER und DIKAU, 2007)

2.5 Jahrringforschung

2.5.1 Die Geschichte der Jahrringforschung

Die Geschichte der Jahrringforschung lässt sich weit zurückverfolgen. So beschreibt schon Leonardo da Vinci im 15. Jahrhundert die Beziehung zwischen Jahrringbreite und Niederschlägen. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts bestanden bereits klare Vorstellungen über die Entwicklung der Jahrringe. Einen entscheidenden Sprung machte der Forschungszweig durch den Amerikaner A. E. Douglass, der den Weitblick besaß, die Beziehung zur Geschichtsforschung, Klimatologie und Astronomie herzustellen. In den Anfängen der Jahrringforschung standen also Klimaforschung, Forstbotanik und Astronomie im Vordergrund. Anschließend kamen geschichtliche und archäologische Fragestellungen hinzu (SCHWEINGRUBER, 1983). Erst seit den 1970er Jah-

ren entwickelte sich die Dendroökologie – ein sich schnell entwickelndes Feld der Jahrringforschung, das viele Wissenschaftszweige verbindet, um Antworten zu Umweltfragen aus Jahrringdaten zu erhalten (SCHWEINGRUBER, 1996).

2.5.2 Anwendungsfelder

Verwendung findet die Jahrringforschung in den verschiedensten Feldern. Die Siedlungsgeschichte unserer Vorfahren kann über die Datierung des verbauten Holzes verfolgt werden. Auch in der Kunstgeschichte können dendrochronologische Methoden, wie etwa für die Datierung einzelner Werke, angewandt werden. In der Kriminalistik werden Methoden der Jahrringforschung bei der Datierung von Holz oder Nachweisen von Kunstfälschungen verwendet.

Ein weiteres breites Anwendungsfeld ist die Klimatologie. Hier können Klimaveränderungen über die Jahrringanalyse rekonstruiert werden. Auch für die Vorstellungen über die Flussgeschichte, Gletschergeschichte, Waldbrandgeschichte und den Vulkanismus bietet die Jahrringforschung Hinweise.

In der Insektenforschung (z.B. Befallszyklen), für forstwirtschaftliche und auch umweltwissenschaftliche Fragestellungen finden Methoden der Jahrringforschung ebenfalls Anwendung.

Innerhalb der Dendroökologie können unter anderem die folgenden geomorphologischen Prozesse rekonstruiert werden: vulkanische Ereignisse, Schneebewegungen, Erdbewegungen, Eisbewegungen, hydrologische Veränderungen, äolische Prozesse, aber auch anthropogene Veränderungen. (nach SCHWEINGRUBER, 1983)

2.6 Stand der aktuellen Forschung

Ein Überblick über bisherige Studien, die Steinschlagprozesse anhand von Jahrringdaten untersuchen, findet sich in STOFFEL (2006): Trotz des großen Potentials dendrogeomorphologischer Methoden seien bisher nur wenige Untersuchungen durchgeführt worden und erste Veröffentlichungen erst aus den späten 1970er Jahren aus Kanada bekannt. Während sich die frühen Studien zwar mit der Verlagerung von Sturzmaterial beschäftigten, so sei Steinschlag als Prozess nicht die eigentliche Ursache der untersuchten Verletzungen. Erste Untersuchungen mit dem Fokus auf Steinschlag sind in GSTEIGER (1989) zu finden. Dieser untersuchte Stammscheiben von Fichten und Buchen und führte ein Aktivitätsmaß ein, mit dem anhand sichtbarer Wunden Gebiete mit höherer Steinschlag-Aktivität von solchen mit niedrigerer unterschieden werden können (GSTEIGER, 1989). Erstmals wurden Steinschlag-Frequenzen von SCHWEINGRUBER (1996) abgeschätzt, der mit 30 Stammscheiben für Perioden des letzten Jahrhunderts Steinschlaghäufigkeiten rekonstruiert und verletzte sowie unver-

sehrte Bäume kartographisch darstellt. Die veränderlichen Aktivitäten werden in Zusammenhang mit Niederschlagsvariationen sowie Straßenbaumaßnahmen gebracht.

PERRET *et al.* (2004) beschreiben das äußerliche Erscheinungsbild von Steinschlagsschäden an Nadelgehölzen. Eine detaillierte Beschreibung der Steinschlagsschäden an Laubgehölzen konnte in der Literatur nicht gefunden werden.

Vieles zum Verständnis von Steinschlag – Baum Interaktionen tragen die Veröffentlichungen von STOFFEL (2005b), STOFFEL *et al.* (2005a) und SCHNEUWLY *et al.* (2009a, 2009b) bei. Hierbei wurden mit zahlreichen Stammscheiben von Fichten, Lärchen, Buchen und Tannen detaillierte Grundlagen zur Identifikation von Steinschlagereignissen über Wuchsreaktionen im Jahrringmuster erarbeitet. Besonders die Möglichkeit der Ereignisdatierung durch traumatische Harzkanalreihen (TRD), welche von einigen Koniferenarten nach Steinschlagtreffern (s. Kapitel 4.2.10.2) gebildet werden, wird durch diese Studien unter Beweis gestellt.

Umfangreiche Jahrringanalysen an Fichten und Lärchen von STOFFEL *et al.* (2005a), PERRET *et al.* (2006) und SCHNEUWLY *et al.* (2008), stellen das große Potential dendrochronologischer Methoden zur Steinschlagrekonstruktion unter Beweis. Es wurde gezeigt, dass eine Datierung in einer saisonalen Auflösung, mitunter sogar mit monatlicher Präzision möglich ist (STOFFEL *et al.*, 2005b). Bei TRD-bildenden Baumarten kann über Bohrkernanalysen ein Großteil der Ereignisse datiert werden, ohne die Bäume fällen zu müssen. Die Dunkelziffer an nicht durch die Methoden der Bohrkernanalyse identifizierbaren Wunden wurde untersucht (STOFFEL und PERRET, 2006). Diese Untersuchungen ergeben, dass der Anteil sichtbarer Wunden baumartenabhängig ist, da die Bäume die Wunden unterschiedlich gut durch die Rinde maskieren. Eine Gegenüberstellung der Wiederkehrdauern auf einer Fläche, erhoben mit unterschiedlichen dendrogeomorphologischen Methoden, konnte in der Literatur nicht gefunden werden.

Studien, die Wiederkehrdauern von Steinschlagereignissen angeben, sind bis heute selten. Bei bisherigen Untersuchungen wurden zumeist Koniferen zur Rekonstruktion herangezogen. Auf Daten von Laubgehölzen basierende Studien sind bislang nur von MOYA *et al.* (2010) bekannt. Hier wurden mit der Datierung sichtbarer Schäden an Eichen Steinschlagfrequenzen entlang des Höhengradienten errechnet. Durch eine Datierung aller sichtbaren Wunden konnten so Steinschlagfrequenzen über die letzten 25 Jahre für mehrere Probestreifen errechnet werden. Die jahrgenaue Datierung der Ereignisse erfolgte über die Analyse von keilförmigen Proben, die am Rand der Wunde entnommen wurden. Die sichtbaren Wunden wurden in der Studie von MOYA *et al.* (2010) genutzt, um den Ort für eine Probenentnahme zu bestimmen. Studien, die den

effizienten Ansatz verfolgen, über die bloße Zählung sichtbarer Schäden Wiederkehrdauern zu rekonstruieren, sind bislang nicht bekannt.

3 Untersuchungsgebiet

3.1 Lage des Projektgebietes

Das Projektgebiet befindet sich am Südabhang des Hechenbergs, der zum Inntal hin abfällt und unmittelbar an das Stadtgebiet von Innsbruck anschließt. Direkt unterhalb des untersuchten Gebietes verläuft die Bahnstrecke Innsbruck – Scharnitz (Bahnkilometer 7,42 - 7,55). Am darunter liegenden Hangfuß befindet sich die Tiroler Bundesstraße B171.

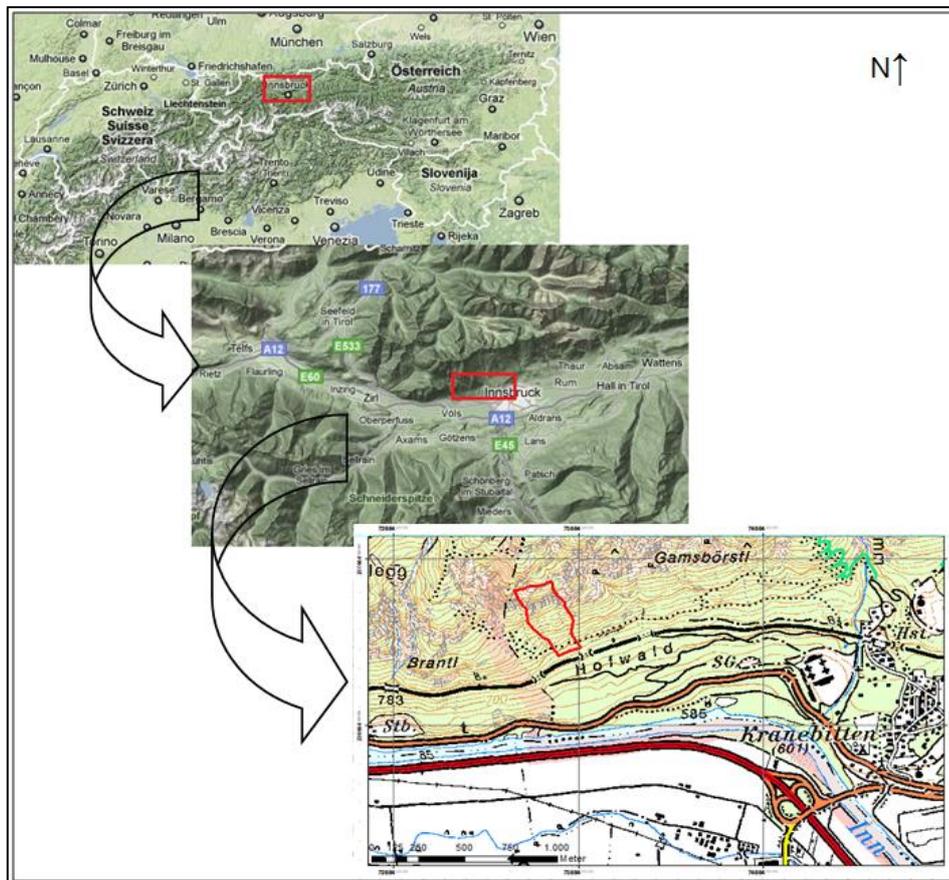


Abb. 4: Lage des Projektgebietes

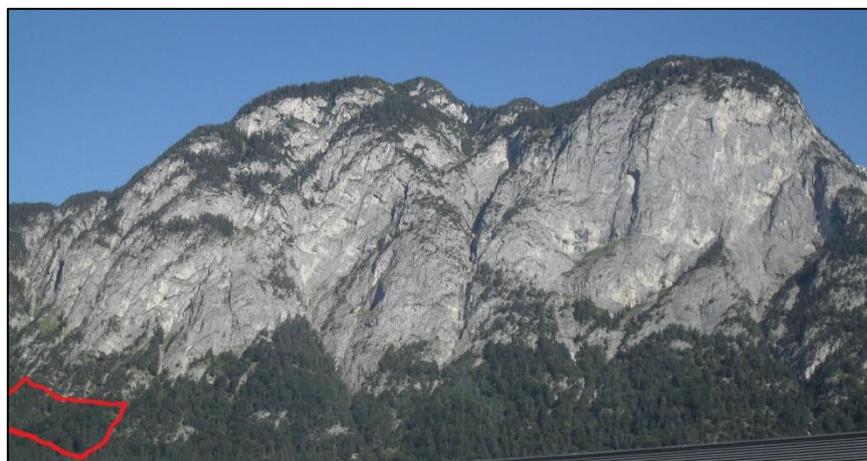


Abb. 5: Hechenberg mit Lage des untersuchten Transitbereiches (roter Perimeter)

3.2 Ereignischronik

3.2.1 Dokumentierte Steinschlagereignisse

Der Ereigniskataster für die Bahnstrecke Innsbruck – Scharnitz dokumentiert zahlreiche Steinschläge für den gesamten Hang, auf dem sich das Untersuchungsgebiet befindet. Für den Bahnabschnitt direkt unterhalb des Untersuchungsgebiets (Bahnkilometer 7,42 – 7,55) sind zwei Steinschlagereignisse festgehalten.

„6.12.1956: Absturz eines ca. 20kg schweren Steines, ausgelöst durch starkes Tauwetter...“

19./20.05.1969: Absturz von 3m³ Felsbrocken aus 350 - 400m Höhe...“

Für beide Jahre können auch aus der Bohrkernanalyse Steinschläge rekonstruiert werden.

Für die Gräben, die das Projektgebiet seitlich begrenzen, sind zahlreiche Geschiebeeinträge und Vermurungen dokumentiert. So finden sich insbesondere für den Graben am östlichen Rand des Projektgebietes (Bahnkilometer 7,42) für den Zeitraum von 1937 bis 2011 allein elf Vermerke über Murmaterial direkt am oder auf dem Gleiskörper.

Auch für den die Fläche westlich begrenzenden Graben (Bahnkilometer 7,55) finden sich Hinweise auf murartige Verlagerungsprozesse. Von 1937 bis 2011 sind drei Abgänge von Murmaterial dokumentiert. (ÖBB Infrastruktur AG, 2011)

3.2.2 Auslöser für Steinschlagereignisse

Aus der Ereignischronik der ÖBB Infrastruktur AG von 2011 lassen sich die auslösenden Faktoren für Steinschlagereignisse nachvollziehen. Im Bereich des gesamten Hechenbergs (Bahnkilometer 5,9 – 9,5) ist Tauwetter für rund die Hälfte aller Steinschlagereignisse der auslösende Faktor. Regen und Gewitter sind mit 41% das zweithäufigste auslösende Ereignis. Auch durch Wind (7%) und Frost (3%) werden Steinschläge ausgelöst (s. Abb.6).

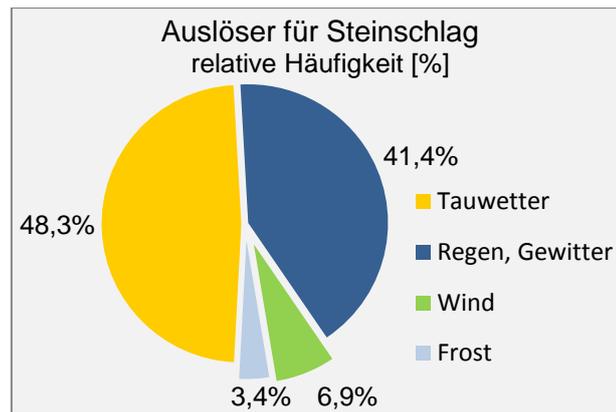


Abb. 6: Auslösende Faktoren für Steinschlagereignisse nach Auswertung der Ereignischronik (Datenquelle: ÖBB Infrastruktur AG, 2011)

3.3 Einschätzung der geomorphologischen Prozesse

Nach einer visuellen Ansprache der geomorphologischen Prozesse während der Feldarbeit konnten für die seitlichen Gräben keine Hinweise auf Muraktivitäten (Levées u.a.) gefunden werden, die die Bäume im Projektgebiet beeinflussen. Auch sind gerinnenaher Ablagerungen vor Bäumen im Projektgebiet nicht kantengerundet und daher eher Steinschlagprozessen zuzuordnen. Die Gräben führen nur periodisch nach Niederschlagsereignissen Wasser. Zwischenzeitlich können sich größere Mengen an Sturzmaterial ansammeln. Dieses Material wird unmittelbar oberhalb des Gleiskörpers in kleinen Schutt- bzw. Schwemmkegeln abgelagert. Neben Steinschlag treten in den Gräben vermutlich fluviatile Verlagerungsprozesse mit intensivem Geschiebetransport und Übergangsformen zu Murschüben auf. Lawinen sind in den seitlich begrenzenden Gräben, aufgrund fehlender Anrissgebiete und fehlender Hinweise in der Ereignischronik, üblicherweise nicht zu erwarten.

Die mittlere Runse im Projektgebiet ist etwa 0,5 – 1m eingetieft und wird durch Sturzmaterial aus dem Ablösebereich gespeist. Die Böschungen und die Tiefenlinie werden von unsortiertem Schotter mit etwa gleichem Durchmesser gebildet. Am kleinen Schwemmkegel am unteren Rand des Projektgebietes sind Spuren fluviatiler Aktivitäten erkennbar. Aufgrund der Morphologie dieser Runse wird angenommen, dass hier hauptsächlich Sturzprozesse stattfinden. Das dadurch akkumulierte Material wird periodisch fluviatil oder durch kleinere murartige Prozesse weiter hangabwärts transportiert. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass Gerinneprozesse in den seitlich angrenzenden Gräben und in der mittleren Runse stattfinden. Eine Beeinflussung der Bäume des Projektgebietes durch andere Prozesse als Steinschlag ist jedoch unwahrscheinlich.

3.4 Steinschlagrelevante Parameter des Projektgebietes

Das gesamte Projektgebiet gliedert sich in drei Teilbereiche. Den Oberhang bildet die eine etwa 200m hohe Südwand des Hechenbergs (Wandbereich). Der Mittelhang ist bewaldet und wird von Runsen und unterschiedlich tief eingeschnittenen Gräben durchzogen. Er kann aufgrund unterschiedlicher Neigung und Vegetation in Dolomitvorbau und Transitbereich untergliedert werden. Die untersuchten Bäume befinden sich im Transitbereich. Diese Fläche wird durch zwei Gräben begrenzt, in der Mitte befindet sich eine etwa 1m eingetiefte Runse.

Detaillierte Angaben zu Flächengrößen, Seehöhen sowie zur Hangneigung für die drei Teilbereiche sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tab. 2: Flächengröße, Seehöhe und Hangneigung des Projektgebietes

Teilbereiche	Fläche [ha]	Seehöhe [m ü. NN]	Hangneigung [°]		
			mittlere	minimale	maximale
Wandbereich	1,1	1260 - 1080	67,6	37,8	87,3
Dolomitvorbau	3,4	1080 - 900	49,4	8,6	85,1
Transitbereich	3,0	900 - 770	39,9	3,1	76,3

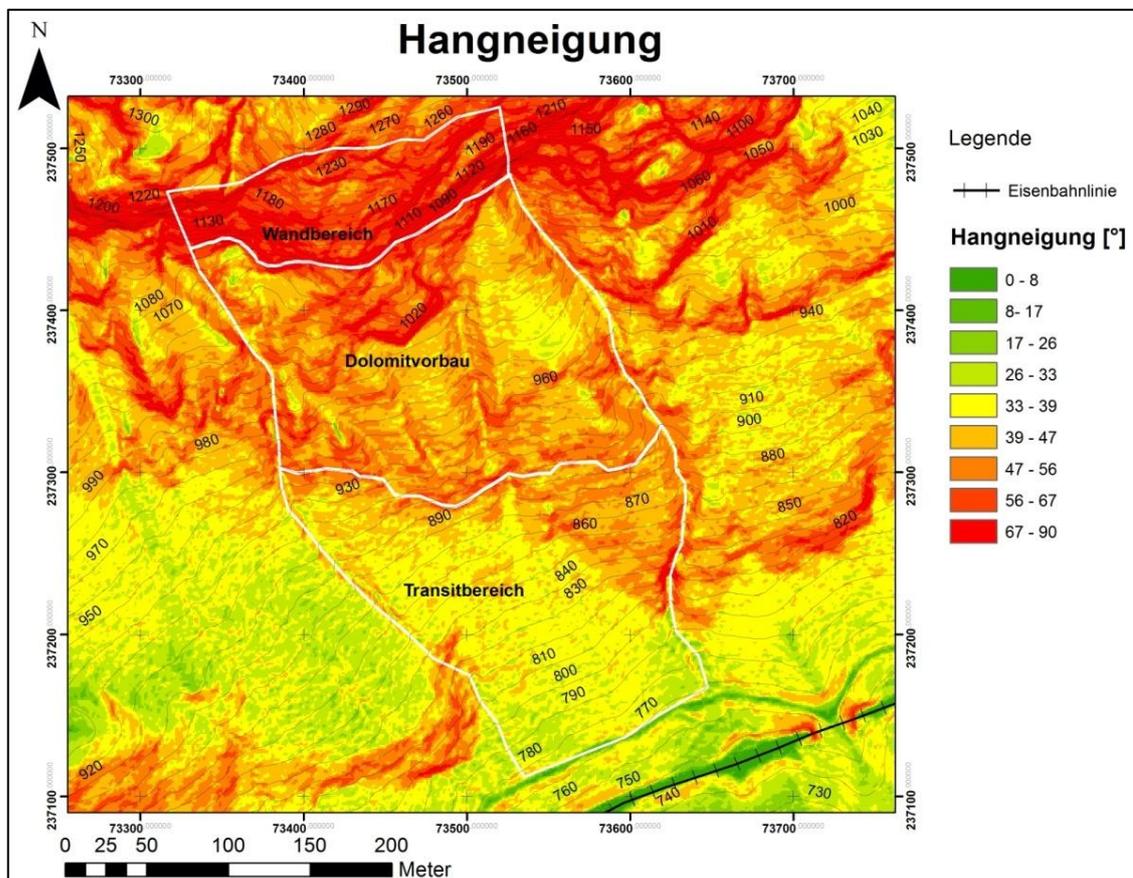


Abb. 7: Hangneigungskarte, unterteilt in Wandbereich, Dolomitvorbau und Transitbereich

3.4.1 Geologie

Die untersuchte Fläche liegt innerhalb der Nördlichen Kalkalpen. Das Inntal bildet die Grenze zur Phyllitzone und zum Ötztalkristallin. Die Nordkette, mit Martinswand und Hechenberg bildet den Südrand der tirolischen Inntaldecke. Diese lagert dem Südtteil der bajuwarischen Lechtaldecke als riesige Deckscholle auf. (Alp-Infra, 2008)

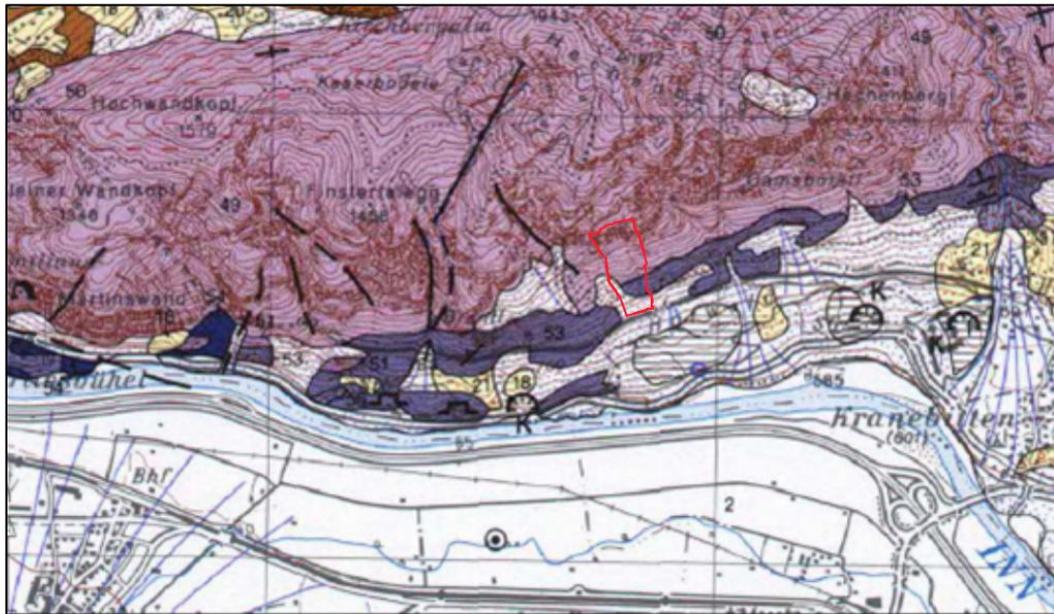


Abb. 8: Geologie des Hechenberg-Gebietes: 2) - 6) Holozäne Ablagerungen; 18) Moräne; 21) Fernmoräne; 49) - 50) Wetterstein-Fm.; 51) Partnachsichten; 53) Alpiner Muschelkalk; 57) Reichenhaller Rauhwacke; (Österr. Geol. Karte, Blatt 117, Zirl, unbestimmter Maßstab, aus Alp-Infra, 2008)

3.4.2 Gesteinsbestand

Am Hechenberg finden sich Gesteinsablagerungen aus Auenablagerungen (Unterhang), Hang-, und Wildbachschutt. Jüngste Ablagerungen am Unter- und Mittelhang werden aus postglazialen, fluviatilen Sedimenten des Inn und Schuttablagerungen gebildet. Am Unterhang sind zusätzlich Ablagerungen verschiedener Moränen zu finden.

Wetterstein-Formation

Der Wandbereich sowie der Dolomitvorbau des Projektgebietes sind der Wetterstein-Formation zuzuordnen. Der weiße, gelbe bis schmutziggraue Ladinische Wettersteindolomit ist am Hechenberg großflächig aufgeschlossen. Durch sekundäre Dolomitisierung wurde das primäre Gefüge zerstört. Es bildete sich ein ungeschichtetes, zucker- bis grobkörniges, grusig verwitterndes Sedimentgestein aus. Durch tektonische Beanspruchung entsteht in dem spröden Dolomitgestein parallel und normal zur Schichtung

ausgerichtetes Kluftsystem. Diese extrem hohe Kluftdichte ist Ursache für die hohe Verwitterungsanfälligkeit und eine ausgeprägte Schuttproduktion.

Alpiner Muschelkalk

Im Übergangsbereich zwischen Ablöse- und Transitbereich sowie im Transitbereich selbst tritt Alpiner Muschelkalk auf. Dieser bildet im Projektgebiet im Dezimeter-Bereich gebankte, graue Kalke. (Alp-Infra, 2008)

3.4.3 Ablösebereiche für Steinschlag

Der primäre Ablösebereich des Projektgebietes wird von der etwa 200m hohen, durch Rampen und Bänder gegliederten, fast senkrechten Wand gebildet. Wo der Wandbereich zum Wandfuß übergeht, ändert sich das Relief. Hier befindet sich der in etwa 50° steile, von Felsstufen gegliederte und kleinflächig terrassierte Dolomitvorbau. Aus diesem Bereich ist ebenfalls mit der Ablösung von Gesteinstrümmern zu rechnen. Darüber hinaus kann hier eine sekundäre Auslösung von zwischenzeitlich in kleinen Schutthalden deponierten Steinen nicht ausgeschlossen werden.

Auch im darunter folgenden Transitbereich kann es zu einer sekundären Auslösung von Sturzmaterial kommen, das zuvor in Schutthalden oder hinter Bäumen abgelagert wurde.

3.4.4 Größe der Steine

Die Größe der zu erwartenden Steine wurde vom Ingenieurbüro ALP- Infra mittels einer Kluftkörper-Größenanalyse untersucht. Im Projektbericht werden mehrere Aufschlüsse betrachtet, von denen jedoch keiner direkt im Untersuchungsgebiet liegt. Die nächsten Aufschlüsse befinden sich etwa 100m westlich und östlich des Untersuchungsgebietes. Die statistische Analyse bringt für diese Aufschlüsse maximale Blockgrößen von 2,3m³ beziehungsweise von 17,0m³ hervor. Diese Blockgrößen sind jedoch nur in Ausnahmefällen zu erwarten, denn 95% der Blöcke des einen Aufschlusses liegen unter 0,19m³ sowie am zweiten Aufschluss unter 0,64m³. (Alp-Infra, 2008)

Die während der Felduntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit aufgenommene maximale Blockgröße liegt bei 0,5m³. Der Median des Volumens baunaher Ablagerungen liegt bei 0,002 m³, was einem Stein der Kantenlängen 20cm x 10cm x 10cm entspricht.

3.5 Klima

Tirol liegt im Einflussbereich von atlantischem, kontinentalem und mediterranem Klima. Es herrschen ganzjährig humide Bedingungen vor. Das Relief der Alpen beeinflusst die Klimaverhältnisse in Tirol ebenfalls maßgeblich. So wird das Klima im Projektgebiet durch das Inntal und die hauptsächlich in West-Ost-Richtung verlaufenden Bergketten der Alpen geprägt. Diese stellen Wetterscheiden dar, die zu Staulagen und Niederschlag im Luv und milden, trockenen Verhältnissen im Lee führen. Dies bedeutet für die klimatischen Verhältnisse im Projektgebiet eine Abschirmung eines Großteils der Stauniederschläge durch das Karwendel-Gebirge. Die jährliche Niederschlagssumme am Nordrand des Karwendels liegt bei etwa 2000mm, in Innsbruck hingegen nur bei etwa 900mm (zamg.at, 2010). Das Niederschlagsmaximum liegt in den Sommermonaten Juni, Juli und August. Des Weiteren ist Innsbruck für das häufige Auftreten des Föhn-Windes bekannt. Über den Brenner-Pass von Süden her strömende Luftmassen erwärmen sich beim Fallen und bewirken einen mitunter starken Temperaturanstieg.

Das Maximum der Temperatur (Tagesmittel) liegt in Innsbruck bei etwa 18°C im August, das Minimum mit rund -3°C im Januar.

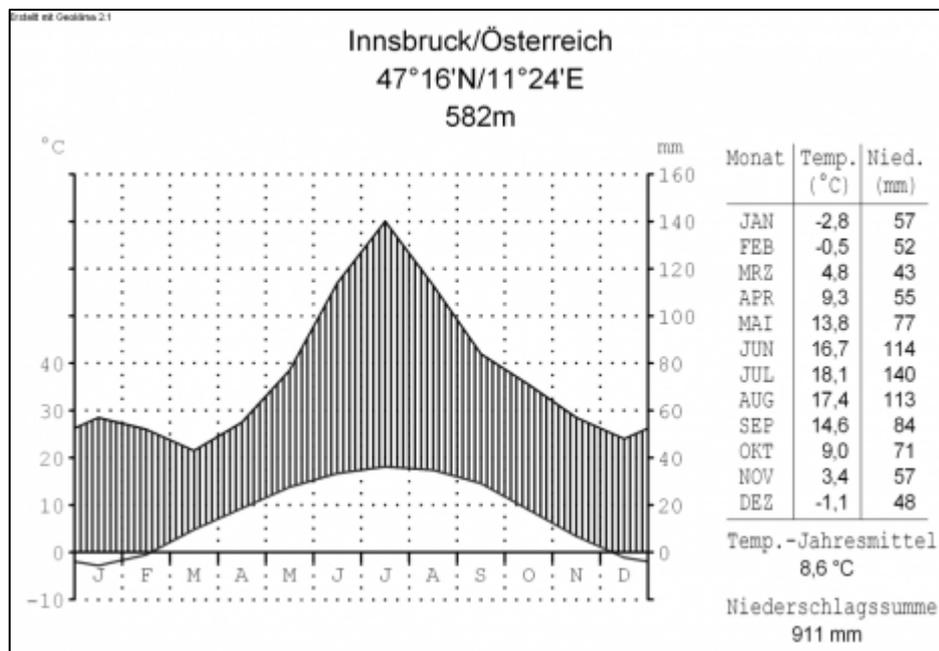


Abb. 9: Niederschlagsdiagramm für die Stadt Innsbruck (erdpunkte.de, 2010)

3.6 Vegetation

Die untersuchte Fläche befindet sich in der montanen Stufe. Das standörtliche Mikrorelief ist vor allem im oberen Bereich des Projektgebietes sehr wechselhaft ausgeprägt. Die Felswand im Ablösebereich ist nahezu vegetationsfrei. Es finden sich lediglich Felsfluren aus Moosen, Flechten sowie Felsspaltenfluren. Auf dem steilen Vorbau am Wandfuß wachsen hauptsächlich Waldkiefern (*Pinus sylvestris* L.) und Grasarten. Die Waldgesellschaft kann hier als Dolomitsteilhang-Kiefernwald klassifiziert werden. Großteils steht der Fels in diesem Bereich direkt an. Am unteren Ende dieses rampenartigen Vorbaus, im beginnenden Transitbereich, findet ein klarer Wechsel der Waldstruktur statt.

Nach einer scharfen Grenze kann die Waldgesellschaft im Transitbereich als ein von Rotbuchen (*Fagus sylvatica*) und Fichten (*Picea abies*) dominierter Carbonat-Bergmischwald auf mäßig trockenem bis mäßig frischem Boden charakterisiert werden. Als Begleitbaumarten wachsen auf der Fläche Waldkiefern (*P. sylvestris*) sowie vereinzelt Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.), Bergulme (*Ulmus glabra* Huds.) und Mehlbeere (*Sorbus aria* (L.) Crantz). Die Zusammensetzung dieser Waldgesellschaft wechselt, dem Relief und somit der Wasserverfügbarkeit folgend, kleinräumig auf der Fläche. So sind im oberen, östlichen Teil des Transitgebietes trockenere, von Traubeneichen (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) und Sommerlinden (*Tilia platyphyllos* Scop.) bewachsene kleine Teilflächen zu finden. Zudem finden sich kleinräumig im östlichen unteren Eck des Projektgebietes zahlreiche Haselsträucher (*Corylus avellana* L.).

4 Methoden

Um Flächen zu finden, auf denen die Risikoanalyse durch Einbezug von Jahrringdaten ergänzt werden kann, eignet sich die Durchführung einer Vorstudie mit Simulationsmodellen. So können Bereiche identifiziert werden, in denen sich Steinschlag-Prozessräume und Waldbestände überschneiden. In diesen Bereichen können in einem weiteren Schritt dendrogeomorphologische Studien erfolgen, um die Modelle zu kalibrieren und um zusätzliche Informationen, wie beispielsweise Steinschlag-Frequenzen, zu erheben.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit werden die Modellierung der Steinschlagprozesse mit Rockyfor3D und die dendrogeomorphologischen Methoden im Folgenden getrennt dargestellt.

4.1 Steinschlag-Modellierung

In der praktischen Gefahren- und Risikoanalyse finden verschiedene Steinschlagmodelle Anwendung. Diese können nach DORREN (2003) in drei Gruppen gegliedert werden: empirische Modelle, prozess-basierte Modelle und GIS-basierte Modelle. Die empirischen Modelle leiten sich im Allgemeinen aus den Beziehungen zwischen der Topographie eines Gebietes und den beobachteten Auslauflängen von Sturzprozessen ab. Sie können einen ersten Eindruck über die zu erwartenden Auslauflängen liefern. Prozessbasierte Modelle beschreiben oder simulieren die Bewegung der Steine einschließlich der Interaktion mit der Hangoberfläche. Zumeist sind sie jedoch nicht in der Lage, zahlreiche Sturzprozesse hintereinander zu simulieren. GIS-basierte Modelle können entweder in eine GIS-Umgebung eingebettet sein oder verarbeiten rasterbasiert die Daten aus einer GIS-Analyse. In diesen Modellen können Ablösebereiche definiert und Trajektorien sowie Auslaufzonen simuliert werden. (DORREN, 2003)

Alle beschriebenen Modelle geben verschiedene Informationen in einem variablen Detaillierungsgrad aus. Sie unterscheiden sich hinsichtlich der Anforderungen an die Eingangs-Parameter und sind somit für die jeweilige Fragestellung unterschiedlich gut geeignet. Das Modell Rockyfor3D wird in dieser Arbeit angewendet, weil Trajektorien vom Modell dreidimensional berechnet werden und der Waldbestand in die Berechnungen mit einbezogen werden kann.

4.1.1 Das Modell Rockyfor3D (Version 4.0)

Das Modell Rockyfor3D ist ein GIS-gestütztes 3D-Modell für die Berechnung zentraler Größen bei Steinschlagprozessen wie Steinschlag-Trajektorien (Richtung und Sprunghöhen), und für die Kalkulation der zu erwartenden Energien und Ablagerungsmuster. Das Modell berechnet die Bewegungsmuster der stürzenden Steine für jede Rasterzelle entlang der Sturzbahn in Abhängigkeit von den Parametern Hangneigung, Dämpfungseigenschaften des Bodens, Rauigkeit der Geländeoberfläche sowie Kontaktreaktionen mit Bäumen. Dabei werden physikalische und stochastische Ansätze kombiniert. (KÜHNE, 2005)

Rockyfor3D setzt sich aus drei Modulen zusammen:

1. „Multiple Fall Direction“ – Methode: Aus einem digitalen Höhenmodell (DHM, DEM) wird die Sturzbahn der Steine errechnet. Für jede Rasterzelle wird vom Modell die Neigung errechnet, die die anfängliche Sturzbewegung bestimmt. Dabei wird den Rasterzellen des DHM eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, die von der Höhendifferenz zu den Nachbarzellen abhängt. Unter der Annahme, dass sich der Stein in die tiefer gelegene Rasterzelle bewegt, wird dieser eine größere Wahrscheinlichkeit zugeordnet. Bei mehreren Simulationsdurchläufen ergeben sich potentielle Sturzbahnen, die unterschiedlich stark frequentiert sind. (KÜHNE, 2005)

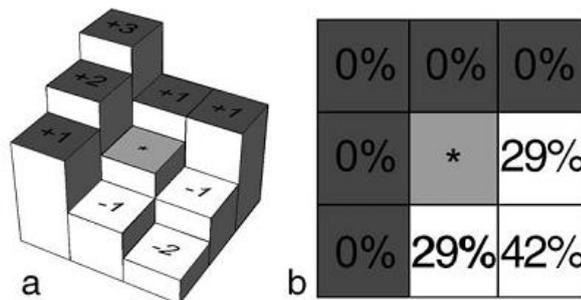


Abb. 10: Rasterzellen unterschiedlicher Höhe (a) und zugeordnete Wahrscheinlichkeiten (b) zur Simulation der Sturzbahnen in Rockyfor3D (DORREN *et al.*, 2004)

2. Berechnung der Geschwindigkeit: Die Geschwindigkeit der stürzenden Komponenten wird für jede Rasterzelle errechnet. Sie hängt zu Beginn des Sturzprozesses neben der voreingestellten Startgeschwindigkeit des Modells von einer definierbaren Fallhöhe ab, aus der die Steine auf das DHM „fallen gelassen werden“. Im weiteren Sturz bewegen sich die Steine springend in parabelförmigen Bahnen mit der errechneten Geschwindigkeit von einer Rasterzelle zur anderen. Dabei können einzelne oder auch mehrere Zellen übersprungen werden. Die Geschwindigkeit der Steine wird in Abhängigkeit von der Topographie, den

4.1.2 Eingangsdaten

Rockyfor3D berechnet die Steinschlagprozesse rasterbasiert. Alle Daten und Eingangsparameter müssen daher in Rasterform vorliegen. Allen Zellen des Projektgebietes werden hinsichtlich der Eingangsparameter Werte zugeordnet, die in Form von ASCII-Dateien vom Modell verarbeitet werden können. Die Raster werden in dieser Arbeit mit der GIS-Software ArcMap9.3 (ESRI) aus zuvor erstellten Shapefiles generiert und anschließend ins ASCII-Format konvertiert. Alle Raster müssen in gleicher Zellgröße und räumlicher Ausdehnung vorliegen. Als Minimalanforderung benötigt das Modell 10 Raster-Datensätze, die im Folgenden unter Angabe der verwendeten Simulationsparameter beschrieben werden (nach DORREN, 2010):

1. Ein digitales Höhenmodell (*dem.asc*), das idealerweise aus Laserscan-Daten generiert wurde. Es besteht aus Rasterzellen, denen ein Höhenwert zugeordnet ist. Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt auch von der Maschenweite dieses Rasters ab, wobei eine Auflösung zwischen 2m x 2m und 10m x 10m bei der Simulation ausreichend ist. Für die Simulation in dieser Arbeit kann ein hoch aufgelöstes Höhenmodell (1m x 1m) verwendet werden.
2. Ein Raster, das die Startzellen für die Prozesssimulation und gleichzeitig die Dichte des Gesteins definiert (*rockdensity.asc*). Dieses Raster wird durch Interpretation des Luftbildes und der Hangneigungskarte erstellt. Als Ablösebereiche werden hierbei besonders steile, vegetationsfreie Felsflächen angenommen. Die Möglichkeit einer dreidimensionalen Darstellung und Analyse (z.B. in ArcScene, ESRI) erleichtert die Definition dieser Ablösebereiche.
3. Drei Rasterkarten, die die Blockgröße in den Startzellen über die drei Achsen Höhe, Breite und Länge definieren (*d1.asc*, *d2.asc*, *d3.asc*). Da keine Kluffkörperanalyse direkt aus dem Ablösebereich vorliegt, wird ein Modellblock angenommen, der in etwa dem Mittel der häufig zu findenden steinschlagrelevanten Trümmer entspricht, von denen vermutet werden kann, dass sie Schäden an Bäumen hinterlassen. Dies ist ein abstrahierter Modellblock mit den Maßen 0,5m x 0,5m x 0,5m, der einem Volumen von 0,125m³ entspricht. Den Unsicherheiten durch diese Annahme kann durch eine Simulation mit verschiedenen Blockgrößen begegnet werden. Für diese Arbeit sind insbesondere die Trajektorien und Sprunghöhen entscheidend. Diese ändern sich nicht wesentlich durch die Variation der Blockgröße (im realistischen Rahmen), sodass die Annahme vertretbar erscheint.

4. Ein Raster, das die Blockform für jede Startzelle definiert (*blshape.asc*). In dieser Arbeit wird keine bestimmte Blockform definiert, was bei den definierten Achsen dazu führt, dass vom Modell eine Kugelform angenommen wird.
5. Drei Raster, die die Oberflächenrauigkeit bestimmen (*rg70.asc*, *rg20.asc*, *rg10.asc*). Diese Raster enthalten Werte des jeweiligen repräsentativen Hindernisses, das in 70%, 20% bzw. 10% in einem Homogenbereich gefunden werden kann. In dieser Arbeit wird über diese Raster nicht das gesamte Untersuchungsgebiet flächig beschrieben. Es werden Werte der Oberflächenrauigkeiten für einzelne Teilflächen definiert. Für den Dolomitvorbau ($rg70 = 0,1m$), Transitbereich ($rg20 = 0,01m$) sowie die seitlich begrenzenden Gräben ($rg10 = 0,3m$) werden entsprechende Rasterdaten generiert.
6. Eine Rasterkarte, die die Elastizität des Bodens beschreibt (*soiltype.asc*). Eine Karte mit den definierten Bodentypen für die Simulation befindet sich im Anhang.

Soll der Waldbestand mit in die Simulation einbezogen werden, so kann dies auf zwei unterschiedliche in DORREN (2010) beschriebene Arten erfolgen. In dieser Studie werden anhand der Luftbildaufnahmen alle Bäume im untersuchten Prozessraum kartiert. Den Bäumen im Bereich des Dolomitvorbau wird ein mittlerer BHD von 20cm unterstellt, den Bäumen im Transitbereich wird ein BHD von jeweils 43cm zugeordnet, was dem im Rahmen der Untersuchungen mittleren gemessenen BHD auf dieser Fläche entspricht. Die X- und Y-Koordinaten der Bäume mit zugehörigem BHD werden als Datei im Textformat (*treefile.txt*) vom Modell verarbeitet. Zudem muss ein ASCII-Raster generiert werden, das den Anteil an Koniferen im Bereich der Bäume definiert (*conif_percent.asc*). Hierzu wird ein Raster erstellt, das im Dolomitvorbau den Anteil der Koniferen als 100% und im Transitbereich als 50% definiert. (DORREN, 2010)

(Weitere detaillierte Angaben zu Eingangsparametern finden sich in DORREN (2010) und gebietsspezifische Parameter im Anhang dieser Arbeit.)

4.1.3 Simulationseinstellungen

Das Modell Rockyfor3D stellt eine graphische Benutzeroberfläche (GUI) bereit, in der Einstellungen bezüglich der Simulation vorgenommen werden können. Hier kann aus jeder einzelnen Startzelle die Anzahl stürzender Steine (in dieser Arbeit 5 pro Rasterzelle) eingestellt werden. Eine zusätzliche Fallhöhe (in dieser Arbeit 0,5m) kann ebenso definiert werden. Des Weiteren kann definiert werden, ob Wald mit in die Simulation einbezogen werden soll oder nicht. Innerhalb dieser Arbeit werden zwei getrennte

Szenarien simuliert. Im ersten Schritt werden die Steinschlagprozesse ohne Waldbestand simuliert, in einem zweiten Schritt wird der Einfluss des Baumbestandes mit in die Berechnungen einbezogen.

4.1.4 Ausgabedaten des Modells

Die Resultate der Steinschlagsimulation werden allesamt als Rasterdaten im ASCII-Format ausgegeben, die die gleiche Zellgröße und räumliche Ausdehnung wie die Eingangsdaten besitzen. Diese Daten werden nach Abschluss der Simulation zurück in ein GIS (ArcMap) gespielt und dort visualisiert. Die Informationen, die für jede Rasterzelle ausgegeben werden, sind:

- *E_mean.asc*: mittlere kinetische Energie (translation + rotation, [kJ])
- *E_95.asc*: das 95% Vertrauensniveau aller in der Zelle simulierten Energien [kJ]
- *Ph_mean.asc*: die mittlere Sprunghöhe in [m]
- *Ph_95.asc*: das 95% Vertrauensniveau aller simulierten Sprunghöhen [m]
- *Nr_passage.asc*: die Anzahl an Blöcken, die die Zelle passieren
- *Nr_deposited.asc*: die Anzahl abgelagerter Blöcke
- *Rvol_deposit.asc*: das maximale in der Zelle gestoppte Blockvolumen
- *EL_angles.asc*: ein Raster mit dem mittleren Pauschal-Gefälle-Winkel [°]

Ergänzend wird vom Modell ein Protokoll im Textformat erstellt, das eine spätere Zuordnung der Ergebnisse zu den Szenarien ermöglicht. (DORREN, 2010)

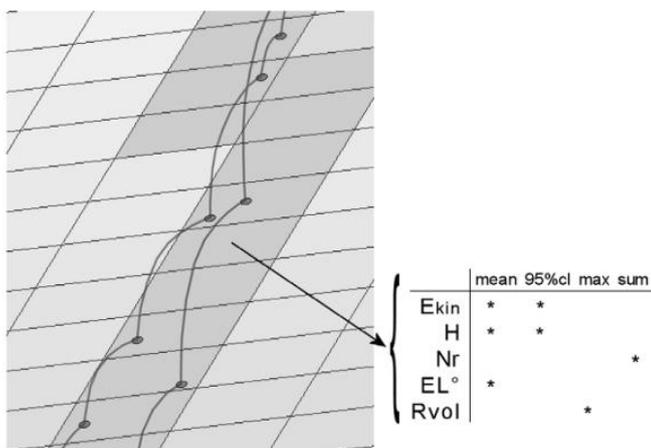


Abb. 13: Schematische Darstellung der Informationen aus den simulierten 3D-Trajektorien, transformiert in Raster-Daten (DORREN, 2010)

4.2 Dendrogeomorphologische Untersuchung

Um das Steinschlaggeschehen auf der Untersuchungsfläche zu rekonstruieren, werden zwei grundsätzlich verschiedene Methoden verwendet. Anhand der Analyse von Fichten-Bohrkernen, erfolgt eine jahrgenaue Datierung der Ereignisse. Bei den Buchen hingegen, basieren die Ergebnisse auf einer Zählung der sichtbaren Steinschlag-Verletzungen auf der Stammoberfläche, kombiniert mit einer Altersbestimmung der Bäume über die Bohrkernanalyse. Daher müssen für jede Baumart individuelle Beprobungs-Konzepte entwickelt werden. Diese orientieren sich sowohl an den angestrebten Zielen der Arbeit als auch an den Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes. Anschließend werden von allen Probebäumen die Standortkoordinaten bestimmt, sichtbare Schäden dokumentiert und Bohrkerne entnommen. Diese werden anschließend im Labor analysiert. Auf die Auswertung der Daten folgt eine räumliche Interpolation und Visualisierung mittels geostatistischer Methoden. Im Folgenden werden diese einzelnen Schritte der Arbeit nach Baumarten getrennt dargestellt.

4.2.1 Auswahl geeigneter Flächen

Damit eine Jahrringanalyse hinsichtlich Steinschlag-Frequenzen sinnvoll erfolgen kann, müssen das Untersuchungsgebiet und der Baumbestand gewisse Voraussetzungen erfüllen:

- Die Ergebnisse aus der Bohrkernanalyse lassen eine Zuordnung der Verletzungen zu bestimmten Prozessen üblicherweise nicht zu. Steinschlag muss deshalb eindeutig der einzige vorherrschende Prozess sein.
- Es muss gewährleistet sein, dass die Prozessaktivität über längere Zeiträume relativ konstant war. Demnach sollten Gebiete ausgewählt werden, in denen mit einer gewissen Kontinuität im Prozessgeschehen gerechnet werden kann.
- der Baumbestand muss ein gewisses Mindestalter haben, damit historische Ereignisse rekonstruiert werden können.
- Der Bestand sollte frei von forstwirtschaftlichen und anderen anthropogenen Eingriffen sein, die ebenfalls zu mechanischen Verletzungen führen und so die Untersuchung verfälschen könnten (Durchforstung, Wegebau, etc.).
- Baumarten, die sich für eine Datierung historischer Verwundungen eignen, müssen auf der Fläche vorhanden sein.

4.2.2 Auswahl der Probebäume

Um einen systematischen Fehler bei der Rekonstruktion der Steinschlagereignisse zu vermeiden, werden die Probebäume nach der Empfehlung von STOFFEL und PERRET (2006) unabhängig von äußerlich sichtbaren Schäden ausgewählt. Die Bäume werden mit Celluloseband markiert, um ein erneutes Auffinden innerhalb des Zeitraumes der Arbeit zu ermöglichen. Es werden für beide Baumarten eigenständige Konzepte erarbeitet, nach denen die Probebäume ausgewählt werden.

Fichte

Für die Auswahl der Fichten werden drei Transekte parallel zu den Höhenlinien (890, 840, 780m ü. NN) angelegt. Entlang dieser Transekte wird alle zehn Meter ein Probepunkt ausgewählt. Für den Fall, dass kein geeigneter Baum in der Nähe dieses Punktes (~Baumlänge) verfügbar ist, wird der Probepunkt ausgelassen.

Buche

Bei der Auswahl der Buchen wird eine gleichmäßige Verteilung angestrebt. Hierzu wird in einem Raster von 20x20 Metern der jeweils nächste Baum zum Rasterpunkt beprobt.

4.2.3 Vermessung der Baumstandorte

Die Standorte der einzelnen Bäume werden mit Maßband, Kompass und Neigungsmesser bestimmt. Dabei dienen markante Punkte auf dem Luftbild oder im Geländemodell als Fixpunkte. Von diesen ausgehend wird mit Hilfe eines Neigungsmessers ein Trassierband (rot-weißes Plastikband) entlang der Höhenlinie gespannt. Auf diesem Band wird alle zehn Meter eine Markierung (Sprühdose) angebracht. Ausgehend von den so definierten Probepunkten wird die Richtung, Distanz und Neigung zum Probebaum hin gemessen. Nach der Umformung der Schrägdistanzen in Horizontaldistanzen werden die Baumstandorte in ein GIS (Geoinformationssystem) übertragen. In dieser Arbeit wird für die Kartierung der Standorte die Software ArcMap 9.3 (ESRI) verwendet.

Die Koordinaten der so eingemessenen Fichten dienen als Primärpunkte, von denen ausgehend die Standorte der Buchen mit dem gleichen Verfahren ermittelt werden.

4.2.4 Erfassung relevanter Parameter am Einzelbaum

Für jeden Probebaum werden Parameter erfasst, die bei einer späteren Auswertung der Bohrkern- und Interpretation der Jahrringmuster im Labor helfen sollen.

Fichte

- Messung
 - Brusthöhendurchmesser (BHD) mit Umfangmaßband
 - Äußerlich sichtbare Schäden: Höhe am Stamm (Meterstab), Richtung (Kompass), Wundgröße (max. Höhe, max. Breite mit Meterstab)
- Schätzung / optische Ansprache
 - Alter der sichtbaren Wunden
 - Baumhöhe
 - Soziologische Stellung (in den Klassen „Herrschend“, „Mitherrschend“, „Beherrscht“, „Unterdrückt“)
 - Vitalität der Krone (in den Klassen von eins bis vier)
 - Beastung der Krone (in den Klassen „stark“ (>2/3), „mittel“ (2/3) und „schwach“ (1/3))
 - Auffällige Ausprägungen des Baumhabitus (Schiefstellung, Krümmung, Säbelwuchs, Exzentrizität, Kronenbruch, Frostrisse, Insektenschäden, etc.)
 - Hinweise auf eine Beeinflussung durch Nachbarbäume (Freistellung, Schrägstellung, Totholz, etc.)
 - Besonderheiten der kleinstandörtlichen Ausprägung (Senke, Kuppe, Couloir, etc.)
 - Baumnahe Ablagerungen (Altersschätzung, Größe, Richtung, Volumen)

Des Weiteren wird ein Foto von jedem Baum und der Position der Bohrkernentnahme gemacht und in speziellen Fällen werden Skizzen angefertigt.

Buche

➤ Messung

- BHD (Umfangmaßband)
- Äußerlich sichtbare Schäden: Höhe am Stamm (Meterstab), Schadenshöhe als Indikator für die Schadensgröße (s. Kap.4.2.5.1) in den Klassen „Groß“ ($h \geq 10\text{cm}$), „Mittel“ ($h = 5-9\text{cm}$) und „Klein“ ($3-4\text{cm}$)

Ergänzend erfolgt eine Fotodokumentation und es werden Skizzen angefertigt.

4.2.5 Ansprache der äußerlich sichtbaren Schäden

Bei der Rekonstruktion historischer Ereignisse ist die Identifikation von Steinschlagschäden an den Bäumen ein zentraler Aspekt. Zum einen wird hierdurch bei der klassischen Methode der Ort der Bohrkernentnahme bestimmt. Zum anderen lassen die Schäden indirekt über die Schadensgröße Rückschlüsse auf die Intensität zu. Darüber hinaus bilden sie die Basis für die Ermittlung der Frequenz der Steinschlagereignisse über die Zählmethode.

Generelle Hinweise für die Abgrenzung von Steinschlagschäden gegenüber Strukturen fraglicher Herkunft beschreibt GSTEIGER (1989). Steinschlagverletzungen sind vorwiegend auf der steinschlag-exponierten Stammhälfte zu erwarten. Ein Vergleich der beiden Stammhälften kann bei der Interpretation von Strukturen unsicherer Herkunft demnach hilfreich sein. Aufgrund der parabelförmigen Flugbahn springender Steine treten Steinschlagverletzungen vermehrt im unteren Stammteil auf. Weicht die Verteilung sichtbarer Strukturen von dieser Verteilung ab, ist Steinschlag als Ursache unwahrscheinlich. (nach GSTEIGER, 1989)

4.2.5.1 Steinschlagbedingte Schäden

Fichte

Detaillierte Angaben zu Steinschlagschäden finden sich in Perret *et al.* (2004):

Tab. 3: Klassifizierung von Steinschlagschäden (Perret *et al.*, 2004)

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

Können anthropogene Einflüsse und andere geomorphologische Prozesse ausgeschlossen werden, so ist die Identifizierung steinschlagbedingter Defekte meist eindeutig. Fehlinterpretationen sind bei alten Astanschlusstellen, an denen Harz austritt, möglich. Hier kann das Harz beispielsweise mit einem umherliegenden Stein vorsichtig abgeschlagen werden, um den darunter liegenden Totast zu erkennen. Des Weiteren kann das Behacken durch Vögel wie Spechte oder Kleiber, sowie durch das Schälen und Fegen durch Wildtiere oder Nagerverbiss, zu sichtbaren Schäden führen (SCHWEINGRUBER, 2001). Zu Verwechslungen mit Steinschlagschäden kann es wohl am ehesten bei Spechtschäden kommen, da diese die gleiche Stelle im Laufe der Jahre mehrmals behacken und so auch größere Überwallungen entstehen können. Auch Wunden und Beulen durch pilzbedingte Rindenkrebstiere oder kambiumschädigende Insekten können zu Fehlinterpretationen führen.

Buche

Zur Ansprache der Schäden an Buchen konnten in der Literatur keine detaillierten Hinweise gefunden werden. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode zur Schadensansprache bei Laubbäumen mit glatter Rindenstruktur erarbeitet. Die folgenden Hinweise stützen sich auf Erfahrungen, die im Rahmen der Feldarbeit an der Baumart Buche (*Fagus sylvatica*) gesammelt wurden.

Frische Verletzungen sind analog zu den Schäden an Fichten durch abgeschlagene oder gequetschte Rinde zu erkennen. Abbildung 14 stellt an Buchen typische Steinschlagschäden dar. Bei höheren Energien der Steine sind auch Schäden des Holzkörpers (freigelegte, gestauchte oder abgesplitterte Holzfasern) wie im Bildausschnitt A) zu beobachten. Diese Schäden werden von den Wundrändern her beginnend überwältigt, sodass wulstartige Holzstrukturen entstehen (Bild C). Bei größeren, tiefen Verletzungen kann die Überwallung zu konkaven Formen führen, die jedoch nach erfolgreicher Überwallung mit der Zeit wieder flacher werden. Nach abgeschlossener Überwallung entsteht ein charakteristisches, oftmals beulenförmiges Narbenbild, das mit zunehmender Verwachsung wieder flacher wird. In Abbildung 14 B) sind typische Beispiele dieser Strukturen dargestellt, wobei im Bildausschnitt drei Steinschlagnarben zu sehen sind: zwei gut erkennbare, jüngere im Vordergrund sowie eine undeutlicher erkennbare, ältere im Hintergrund.



Abb. 14: Typische Steinschlagschäden an der Rotbuche (*Fagus sylvatica*): A) frischer Schaden mit abgesplitterten Holzfasern, B) drei bereits verheilte Schäden ohne erkennbare frische Überwallung, C) Schäden im Stadium der Überwallung

Eine Verwechslungsmöglichkeit besteht mit den für Buchen typischen Rindenstrukturen im Bereich der Astansätze, die auch noch lange nach dem Astabwurf zu finden sind. Diese sind jedoch im Gegensatz zu typischen Steinschlagschäden oftmals an ihrer kragenartigen Form um den abgeworfenen Ast herum (junger Zustand), oder an der typischen Erscheinung der Winkelnarben („Chinesenbart“) im älteren Zustand zu erkennen. Diese Narben weisen charakteristische Rindenquetschungen auf, die an beiden Seiten der vernarbten Astansätze bartförmig herunterlaufen. Im Bereich oberhalb dieser vernarbten Astansätze finden sich zumeist Quetschfalten der Rinde, die in ihrer Form an ein Augenlid erinnern. Steinschlagnarben hingegen weisen ausgefransste, unregelmäßige Ränder auf. Der Winkel des „Chinesenbartes“ wird mit zunehmendem Alter immer flacher und nähert sich der Horizontalen an. Da hier eine große Verwechslungsmöglichkeit besteht, werden diese Strukturen in Abbildung 15 einander gegenübergestellt: Links sind typische „Chinesenbärte“ im jungen Stadium (A1) und im

älteren Stadium (A2) zu sehen. Auf der rechten Seite hingegen sind typische Steinschlagschäden dargestellt. Jüngere Schäden sind an den ausgefransten Rändern in Ausschnitt B1) gut erkennbar, etwas ältere Schäden erscheinen verwaschener (Bildausschnitt B2).

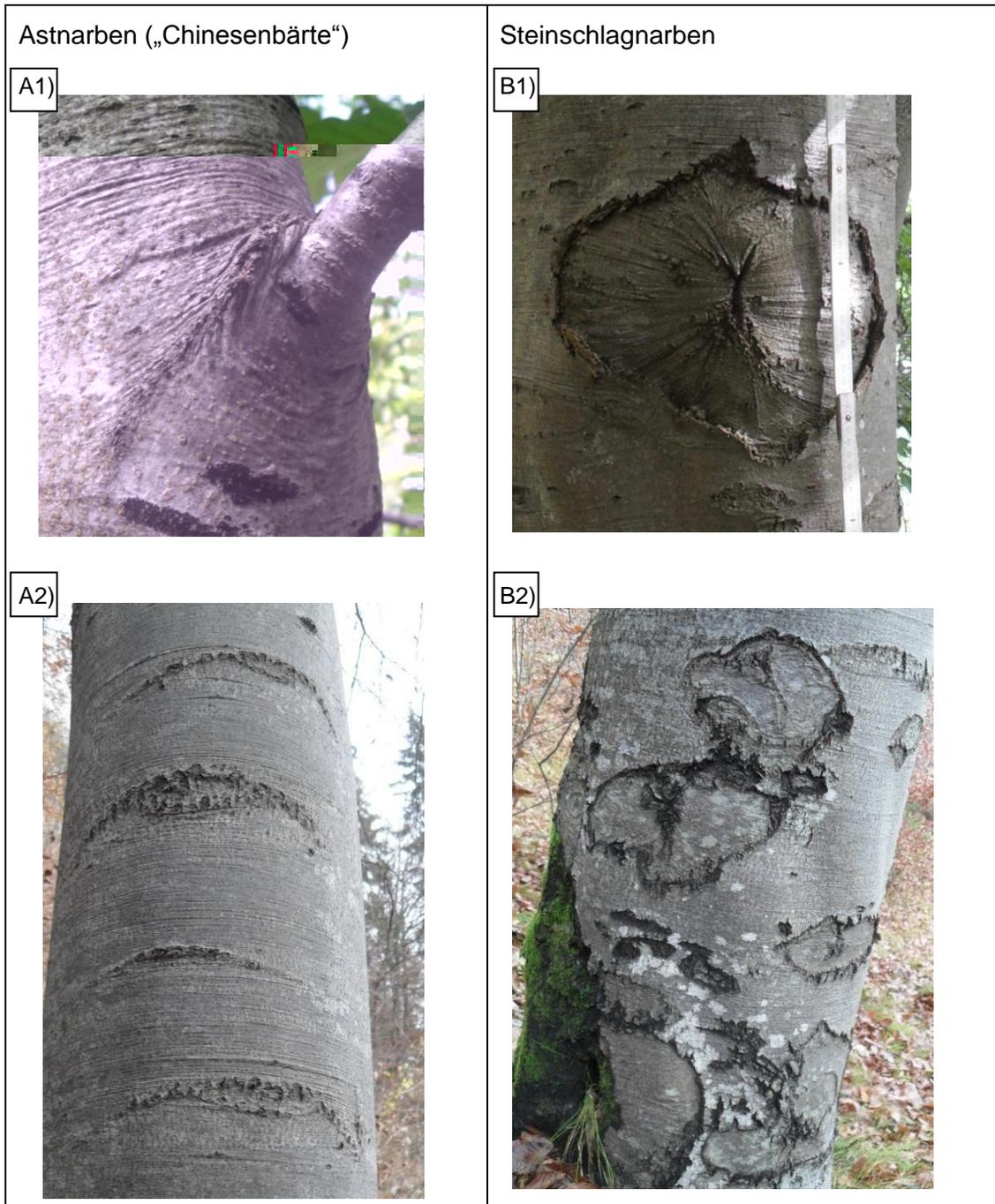


Abb. 15: Gegenüberstellung von an Rotbuchen typischen Winkelnarben („Chinesenbärte“) und charakteristischen Steinschlagnarben. Links Winkelnarben im jungen Stadium (A1) sowie im älteren Stadium (A2) – rechts erfolgreich überwallter (jüngerer) Steinschlagschaden (B1) und schon älterer, verwaschen erscheinender Steinschlagschaden (B2).

Da Buchen eine glatte Rindenstruktur aufweisen, bleiben mechanische Verletzungen auf der Stammoberfläche sichtbar. Aufgrund des Wuchsverhaltens von Bäumen (Höhenwachstum geht ausschließlich von der Spitze der Sprossachse aus) behalten Verletzungen ihre Position am Stamm bei. Auch die vertikale Ausdehnung der Wunde (Schadenshöhe) bleibt konstant. Wegen des sekundären Dickenwachstumes muss sich jedoch die Rinde der Bäume dehnen, um nicht aufzuplatzen. Während dieses Problem viele Baumarten durch die Anlage einer schuppigen oder streifigen Rindenstruktur lösen, die sich regelmäßig erneuert, dehnt sich die glatte Rinde der Buche durch Zellteilung mit. Daher vergrößert sich die horizontale Ausdehnung (Schadensbreite) der an der Stammoberfläche verbleibenden Steinschlag-Narbe. Diese Ausdehnung ist in Abbildung 16 schematisch im Stammquerschnitt dargestellt.

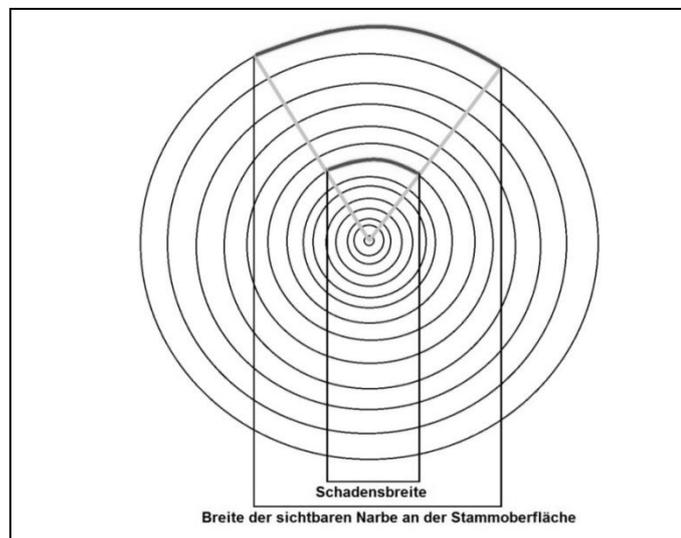


Abb. 16: Ausdehnung der ursprünglichen Schadensbreite auf die aktuelle Breite der sichtbaren Narbe

Kann von einem ursprünglichen Verhältnis der Schadenshöhe (H) zur Schadensbreite (B) von 1:1 ausgegangen werden, so kann das H/B - Verhältnis als ein grober Anhaltspunkt für eine Schätzung des Alters der Wunde angesehen werden. Narben mit einer deutlich größeren horizontalen Ausdehnung sind demnach älter als solche mit einem H/B - Verhältnis von 1.

4.2.5.2 Schäden durch sonstige Ursachen

Das H/B - Verhältnis hilft auch bei der Identifikation von nicht steinschlagbedingten Schäden. Herabfallende Äste oder umstürzende Nachbarbäume hinterlassen vertikal langgestreckte, oberflächliche Streifschäden, die untypisch für Steinschlag sind (Abb. 17). Bei Schäden durch große Blöcke können zwar auch lang gestreckte Schäden entstehen, jedoch ist hier mit tieferen Verletzungen zu rechnen, die über ein Abstreifen der Rinde hinausgehen. Dadurch kann bei langgestreckten Steinschlagschäden ein unregelmäßigeres Erscheinungsbild mit intensiverer Überwallung erwartet werden als bei den Streifschäden.

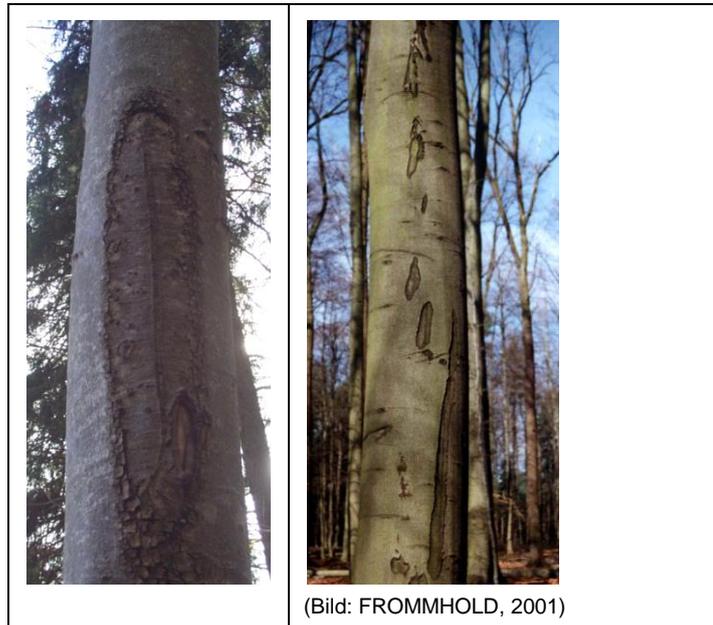


Abb. 17: Vertikal langgestrecktes Schadbild durch Holzernte-Schäden, umstürzende Nachbarn sowie herabfallende Äste

Weitere Ursachen für Rindenschäden an Buchen beschreibt FROMMHOLD (2001):

- Schleimfluss-Schäden (Rindennekrose): ein kleinflächiger, durch Absterben des Kambiums verursachter Schaden, der einzeln oder gehäuft auftreten kann. (Verwechslungsmöglichkeit durch Aufnahme von Schäden ab 3cm Höhe ausgeschlossen)
- Hagelschäden (Abweichung von steinschlagtypischer Verteilung am Stamm)
- Faserstauchungen in Längsrichtung
- Rindenbrand (auch Sonnenbrand): Dieser Schaden entsteht durch das Absterben des Kambiums infolge von Überhitzung durch Sonneneinstrahlung. Die Rinde reißt an der sonnenexponierten Stammhälfte auf, trocknet aus und fällt schließlich ab.

4.2.6 Entnahme der Bohrproben

Die Bohrproben werden mit einem Suunto Zuwachsbohrer (Länge 400mm, ø5mm) gezogen. Für jeden Bohrkern wird die Entnahmehöhe am Stamm dokumentiert (Meterstab). Bei den Fichtenbohrproben wird zudem die Richtung erfasst (Kompass) und vermerkt, wie viele der sichtbaren Wunden voraussichtlich im Bohrkern abgebildet werden. Es ist darauf zu achten stets senkrecht zur Stammachse und in Richtung auf das Mark zu bohren. Alle gezogenen Bohrkern werden mit einem maximal achtstelligen Code (aufgrund der Format-Vorgaben der Software zur Vermessung der Jahrringe) versehen. Dieser Code muss die eindeutige Zuordnung der Bohrkern zu den beprobten Bäumen zulassen. In dieser Arbeit besteht dieser Code für die Fichten-Proben aus den Initialen der Person, die die Probe entnimmt, Transekt-Bezeichnung, Baumnummer, aufsteigender Nummer für die Probenhöhe bzw. einem X für den auf der Hangunterseite entnommenen Kern und der Richtung der Entnahme. Der Code TA04X200 steht beispielsweise für Trappmann (T), Transekt (A), Baum (04), Bohrkern auf der Hangunterseite (X), Entnahmerichtung (200°). Dieser Code wird auf den Kern selbst mit Kugelschreiber oder Bleistift vermerkt. Wenn der Kern bei der Entnahme in mehrere Stücke zerbricht, werden diese mit den Kleinbuchstaben (a, b, c,...) systematisch von der Borke zum Zentrum beschriftet, um ein späteres Zusammenfügen zu erleichtern. Zerbrochene Kerne werden direkt nach der Entnahme mit Maler-Klebeband fixiert.

Fichte

Um die jeweils optimale Position für die Bohrkernentnahme zu finden, werden die Empfehlungen von STOFFEL und PERRET (2006) umgesetzt und die Entnahmehöhe der Bohrkern auf die zu erwartenden Sprunghöhen im Untersuchungsgebiet angepasst. Dazu werden vor Beginn der Entnahme die Sprunghöhen über die Höhe der sichtbaren Verletzungen an den Bäumen abgeschätzt.

Für die untersuchte Fläche erscheint nach dieser Vorstudie folgendes Grundkonzept sinnvoll: drei Bohrproben hangaufwärts in den Entnahmehöhen 50, 100 und 150cm sowie ein ungestörter Referenzkern von der Hangunterseite (möglichst tief).

Um möglichst viele Treffer in den Bohrkernen abzubilden, wird das oben beschriebene System allerdings dahingehend geändert, dass

- möglichst nahe an sichtbaren Wunden gebohrt wird, ohne jedoch überwallendes Holz anzubohren
- die Proben so gezogen werden, dass erwartungsgemäß alle sichtbaren Wunden in den Bohrkernen abgebildet werden

Wenn zu erwarten ist, dass weitere sichtbare Verletzungen nicht im Bohrkern abgebildet sind, wird ein zusätzlicher Bohrkern entnommen. Die Schwierigkeit, den optimalen Punkt für die Entnahme der Proben zu finden, verdeutlicht Abbildung 18. Unterschiedliche Positionen der Bohrungen ergeben unterschiedlich viele Jahrringe. Bei einer Bohrung direkt in die Wunde (Fall a) fehlen in diesem Beispiel vier Jahrringe, bei einer Entnahme im Bereich der Überwallung fehlen zwei Jahrringe (Fall b). Fall (c) stellt den Idealfall dar: eine Bohrprobe aus dem Bereich der Überwallung, nahe an der Verletzung, aber weit genug entfernt, damit alle Jahrringe im Bohrkern abgebildet sind.

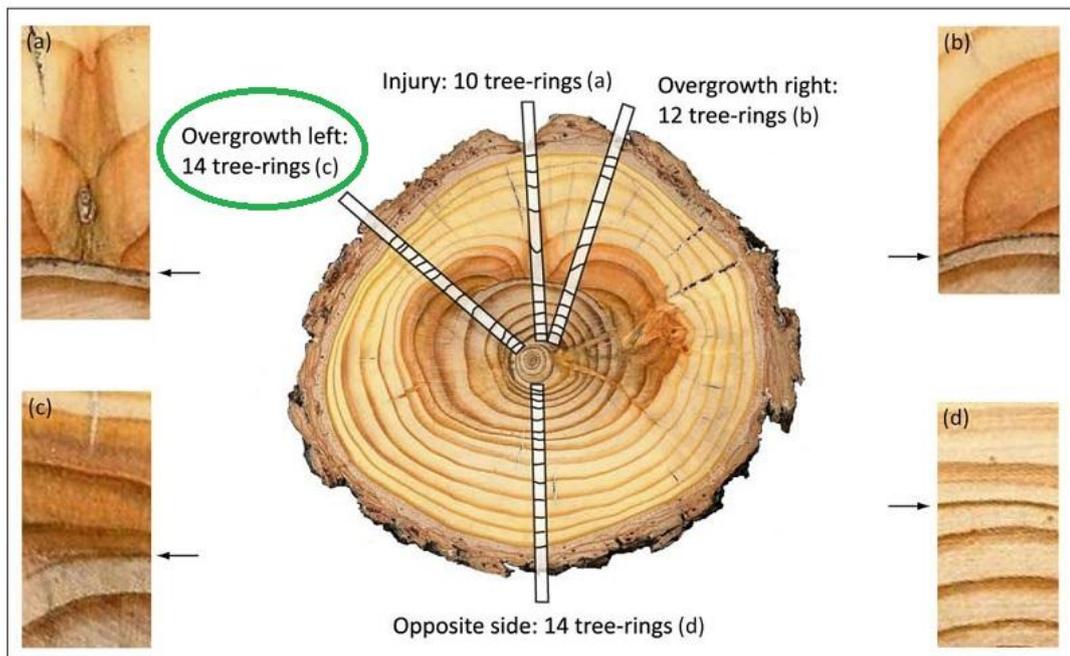


Abb. 18: Position der Bohrkern mit unterschiedlicher Anzahl an resultierenden Jahrringen. Die Detailabbildungen stellen den jeweiligen Bohrkernabschnitt im Bereich der Wunde dar. (SCHNEUWLY, 2009, geändert)

Buche

Mit den entnommenen Bohrkernen soll lediglich das Alter der Bäume bestimmt werden. Daher wird jeweils nur ein ungestörter Kern von der Hangunterseite, möglichst tief am Stamm und in Richtung auf das Mark hin, entnommen.

4.2.7 Aufbereitung der Bohrkerne

In einem weiteren Schritt werden die Proben auf einen dafür vorgesehenen Holzträger aufgeleimt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Faserrichtung senkrecht nach oben zeigt. Andernfalls können die Jahrringgrenzen und die Hinweise auf Verletzungen nicht deutlich in der Probe erkannt werden. Bei Unklarheit über den Faserverlauf werden die Proben abschnittsweise vorsichtig gebrochen. An den Bruchflächen ist der Faserverlauf dann meist deutlich zu sehen. Für die vorliegende Arbeit werden jeweils alle Bohrproben eines Baumes auf einem Trägerbrett aufgeleimt. Dieses Vorgehen erleichtert den direkten Vergleich der Proben untereinander und rationalisiert das Schleifen. Eventuelle Korrekturen der Verleimung werden jedoch erschwert. Nach der Trocknung werden die Proben mit Schleifpapier zunehmend feinerer Körnung (120, 240 und 600) geschliffen. Das Entfernen des letzten, sehr feinen Schleifstaubes durch Ausblasen mit Druckluft führt insbesondere bei den Buchen zu einem deutlicher erkennbaren Jahrringmuster.

4.2.8 Zählen, Vermessen und Abschätzen fehlender Jahrringe

Die eigentliche Analyse der Bohrkerne erfolgt im Labor. Um die in den Bohrkernen abgebildeten Ereignisse jahrgenau datieren zu können, sind mehrere Schritte notwendig. Den Anfang bildet das Zählen und Vermessen der Jahrringbreiten. Dazu wird die gesamte Bohrprobe unter einem fest stehenden Auflicht-Stereomikroskop durch einen Kurbelmechanismus vorbeibewegt. Mit Hilfe eines Messtisches (LINTAB, Messgenauigkeit 1/100mm) werden die Daten direkt auf den PC übertragen. Eine Messsoftware (TSAP-Win, Time Series Analysis and Presentation) registriert dabei die Bewegungen des Messtisches. Die gemessenen Jahrringbreiten werden per Mausclick aufgezeichnet und in Jahrringbreitenkurven dargestellt.

Beim Zählen der Jahrringe wird, wie in SCHNEUWLY (2003) empfohlen, jedes Jahrzehnt mit einem Punkt markiert, die Mitte jedes Jahrhunderts mit zwei - und jedes Jahrhundert mit drei Punkten. Dies dient zu einem späteren Zeitpunkt der schnelleren Orientierung auf dem Bohrkern. In der vorliegenden Arbeit werden das Zählen, Markieren und Vermessen in einem Schritt ausgeführt. Dies bringt den Vorteil, eventuelle Messfehler wie doppelt gemessene oder ausgelassene Jahrringe sofort, durch einen Vergleich der eigenen Zählung (im Kopf) mit der Anzeige gemessener Jahrringe am PC, zu erkennen.

Beim Zählen und Vermessen der Jahrringe von Nadelhölzern muss insbesondere auf das von SCHWEINGRUBER (1980) untersuchte Phänomen der Dichteschwankungen oder „Falschen Jahrringe“ geachtet werden. Diese äußern sich als schmale, tangentiale Bänder unterschiedlicher Dichte innerhalb eines Jahrrings und haben sehr variable Erscheinungsformen. Die echte Jahrringgrenze wird durch Spätholz mit abgeplatteten, verdickten Zellwänden gebildet. Das anschließende Frühholz besteht aus deutlich größeren Zellen mit unverdickter Zellwand. Bei intraanuellen Dichteschwankungen werden hingegen fließendere Grenzen gefunden. Messfehler sind zudem möglich, wenn Bäume durch lokal inaktives Kambium an der Stelle der Bohrkernentnahme keinen Jahrring gebildet haben. Dieses Phänomen ist häufiger bei älteren Bäumen als bei jungen zu erwarten. (SCHWEINGRUBER, 2001)

Bei den Laubhölzern sind die Jahrringgrenzen durch eine rhythmische Abfolge zwischen dem kleinlumigen Grundgewebe und den darin eingebetteten größeren Gefäßen zu erkennen. Zudem ist das Grundgewebe an der Jahrringgrenze oftmals abgeplattet. (SCHWEINGRUBER, 2001)

Die Wiederkehrdauern pro Baum errechnen sich für Fichten aus der Division der Anzahl gemessener Jahrringe durch die Anzahl rekonstruierter Ereignisse. Bei Buchen erfolgt selbiges durch eine Division des Baumalters durch die gemessene Anzahl sichtbarer Steinschlag-Narben. Daher ist bei den Buchen das absolute Alter für die Berechnung nötig. Die Bohrkernkerne werden von der Borke bis zum Mark hin vermessen. Ist das Mark nicht im Bohrkern abgebildet, wird bei den Buchenproben mit einer durchsichtigen Schablone mit konzentrischen Ringen die Anzahl fehlender Jahrringe abgeschätzt. Zudem wird für die Altersbestimmung der Buchen die Höhe der Bohrkernentnahme berücksichtigt. Obwohl stets darauf geachtet wird die Bohrkernkerne möglichst tief zu entnehmen, ist eine Entnahmehöhe auf Bodenniveau meist nicht möglich. Daher fehlen die Jahrringe, die gebildet wurden, bis der Baum die Probehöhe erreicht. Um dies zu berücksichtigen wird unterstellt, dass der Höhenzuwachs 10cm pro Jahr beträgt und zur Rekonstruktion des absoluten Alters wird die entsprechende Anzahl an Jahren addiert (Entnahmehöhe 50cm => +5Jahre).

4.2.9 Korrektur der Jahrringbreitenkurven

In einem weiteren Schritt werden die gemessenen Jahrringbreitenkurven mit dem Verfahren der Kreuz-Datierung untereinander verglichen, um Fehler durch fehlende oder zu viel gemessene Jahrringe („Falsche Jahrringe“) auszugleichen. SCHNEUWLY (2003) fand in seinen Untersuchungen eine Übereinstimmung der Referenzkurve ungestörter Bäume mit derjenigen aus steinschlag-beeinflussten Bäumen. Im Hinblick auf das Ziel der Arbeit ist es demnach hinreichend genau, die Ereignisse ohne eine Referenzkurve aus externen Bäumen zu datieren. Zur Datierung werden in einem ersten Schritt die einzelnen Proben eines Baumes untereinander kreuzdatiert und Fehler in der Jahrringserie durch Einfügen oder Entfernen von Jahrringen ausgeglichen. Anschließend wird für jeden Baum eine Mittelkurve aus den Einzelkurven gebildet. Diese Mittelkurven werden in einem weiteren Schritt untereinander verglichen, wobei die Bäume mit wenigen Schäden als Referenz dienen. Die beschriebene Kreuzdatierung erfolgt sowohl optisch als auch mit statistischen Methoden (Gleichläufigkeits-Test). Sogenannte „Weiserjahre“ stellen bei der Korrektur der Daten eine große Hilfe dar. Dies sind charakteristische Jahrringe mit außergewöhnlich breit oder schmal ausgeprägten Jahrringen auf Grund regional-klimatischer Bedingungen. (SCHWEINGRUBER, 1983)

Für detaillierte Informationen zu Korrekturen und Interpretation von Jahrringbreitenkurven wird auf STOFFEL (2005a) und SCHNEUWLY (2009) verwiesen.

4.2.10 Datierung der Ereignisse

Eine jahrgenaue Datierung von Ereignissen wird anhand der beprobten Fichten durchgeführt. Diese zeigen im Vergleich zur Buche deutlicher ausgeprägte Reaktionen auf mechanische Verletzungen, die auch im Jahrringbild erscheinen, wenn die Wunde nicht unmittelbar angebohrt wird. Da eine Voraussetzung für diese Arbeit ist, dass auf der Fläche Steinschlag der ausschließlich auftretende Prozess ist, der zu Schäden an den Bäumen führt, werden alle gefundenen Indizien für mechanische Verletzungen als Steinschlagereignisse interpretiert. Die Abbildung 19 zeigt schematisch, welche Auswirkungen Steinschlag auf die Bäume haben kann, wie sich dieser auf das Wuchsbild auswirkt (Querschnitte) und das jeweils zugehörige Erscheinungsbild der Jahrringbreitenkurven. Fall (A) zeigt einen plötzlichen Zuwachsverlust durch die Enthauptung oder einen Bruch großer Teile der Krone. Fall (B) stellt eine Verletzung am Stamm dar, in deren Folge Kallusgewebe und Traumatische Harzkanalreihen gebildet werden. Im Fall (C) erfährt der Baum eine Schrägstellung, welche er durch die Bildung von Reaktions-

holz (bei Nadelhölzern Druckholz, bei Laubhölzern Zugholz) auszugleichen versucht. Fall (D) bildet die Wuchsreaktion auf eine schlagartige Freistellung ab: Durch vermehrte Licht- und Nährstoff-Verfügbarkeit steigert der Baum plötzlich sein Wachstum. Welche Wuchsreaktionen zu beobachten sind, hängt stark von den jeweiligen Bäumen, den Standortverhältnissen sowie der Intensität der auftretenden Sturzprozesse ab.

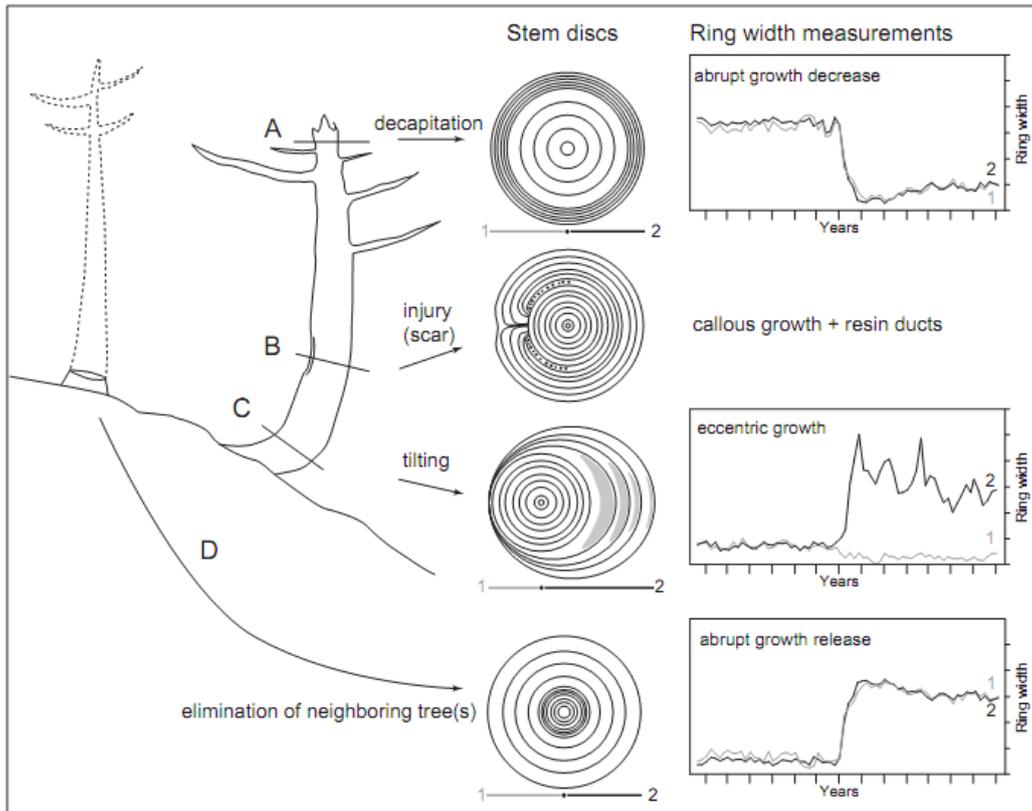


Abb. 19: Mögliche Auswirkungen von Steinschlag auf Bäume und der Einfluss auf das Jahrringbild und die Jahrringbreitenkurve; A) Enthauptung/Kronenbruch, B) Steinschlag-Wunde, C) Schrägstellung, D) plötzlicher Zuwachsschub durch Ausfall eines Nachbarbaumes (STOFFEL *et al.*, 2005a)

Im Folgenden werden lediglich die im Rahmen dieser Arbeit auftretenden charakteristischen Wuchsreaktionen beschrieben. Für eine detaillierte Beschreibung weiterer wichtiger Reaktionen der Bäume auf Steinschlag wird auf die Quellen STOFFEL (2005) und SCHNEUWLY (2009) verwiesen.

4.2.10.1 Verletzungen

Eine mögliche Datierung von Ereignissen erfolgt über die Verletzungen selbst. Die Schwierigkeiten ergeben sich hier insbesondere durch fehlende Jahrringe für den in Abbildung 18 beschriebenen Fall, dass nicht exakt der Rand der Verletzung angebohrt wird. Ist jedoch ein Bohrkern vorhanden, der den Rand der Wunde gut abbildet, so ist eine sehr exakte Datierung möglich.

4.2.10.2 Traumatische Harzkanalreihen

Traumatische Harzkanalreihen (traumatic rows of resin ducts, TRD) stellen bei einigen Koniferenarten eine typische Wuchsreaktion auf mechanische Störungen dar (BOLL-SCHWEILER *et al.*, 2008).

So können in den Untersuchungen von SCHNEUWLY *et al.* (2009a) TRD an steinschlaggeschädigten Bäumen in ausnahmslos allen Fichtenproben gefunden werden. Darüber hinaus werden TRD in Fichten in über 90% der Fälle noch im Jahr des Ereignisses gebildet. Die TRD werden bei Fichten durchschnittlich in 27% des Stammquerschnittes, der nach der Verwundung vital bleibt, gefunden. Im Mittel werden TRD vom Wundrand bis in etwa 30-40cm Entfernung über der Wunde gebildet (SCHNEUWLY *et al.*, 2009a). Demnach ist es über TRD möglich, eingewachsene Wunden zu identifizieren, auch wenn der Bohrkern in einiger Entfernung von der Wunde gezogen wird. Die Abnahme der Intensität der anzutreffenden TRD wird in Abb. 20 dargestellt.

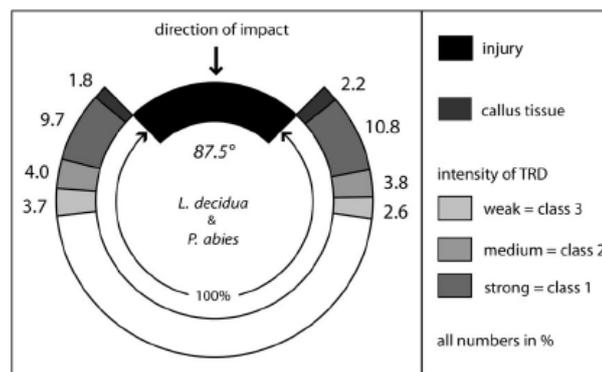


Abb. 20: Anteile des unverletzt bleibenden Stammquerschnittes, in dem Kallusgewebe und TRD unterschiedlicher Intensitäten gefunden werden können (SCHNEUWLY *et al.*, 2009b)

Wie durch STOFFEL *et al.* (2005a) beschrieben, werden die TRD nur als Ereignis gewertet, wenn sie a) traumatisch, b) extrem kompakt und c) in kontinuierlichen Reihen auftreten. Dies ist beispielhaft in Abbildung 21 dargestellt. Während die Harzkanäle in Ausschnitt (A) als Ereignis gewertet werden, treten sie in Ausschnitt (B) zu verstreut auf, um als Ereignis bewertet zu werden. Im zweiten Fall sind Hinweise auf ein Ereignis in weiteren Bohrkernen nötig, damit das entsprechende Jahr als Ereignisjahr gezählt wird.

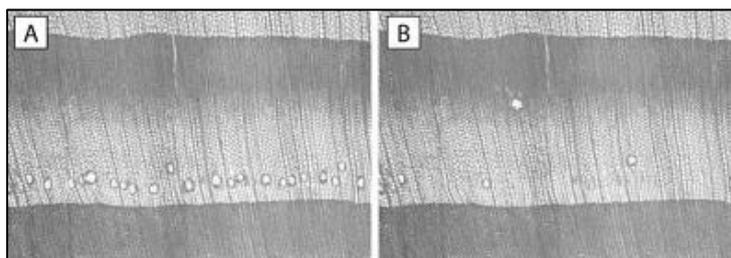


Abb. 21: Dünnschnitte mit traumatischen Harzkanalreihen (A) und gewöhnlichen, nicht für Steinschlag charakteristischen Harzkanälen (B) (STOFFEL, 2005a, geändert)

4.2.10.3 Kallusgewebe und Überwallungen

Kallusgewebe besteht aus chaotisch wachsenden Zellen, die nach einer Verletzung des Kambiums gebildet werden. In der Vegetationsperiode wird gleich nach dem Impact ein als Kallusgewebe bezeichneter Zellverband gebildet. Dieser besteht aus chaotisch wachsenden großlumigen Zellen, mit denen der Baum versucht, die Wunde zu verschließen. Tritt Steinschlag in der vegetationsfreien Zeit auf, erfolgt die Bildung mit Beginn der kommenden Vegetationsperiode.

Der Baum versucht durch eine Überwallung, Wunden zu schließen. Überwallendes Holz ist im Bohrkern an besonders großen Jahrringen zu sehen, die oft von einem konzentrischen Jahrringmuster abweichen.

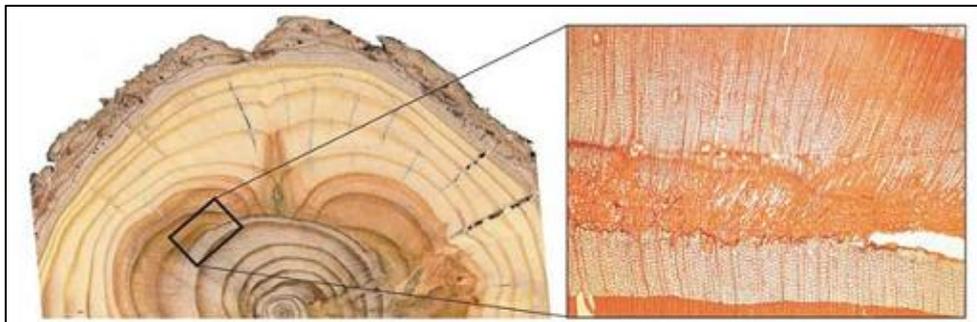


Abb. 22: Steinschlagwunde im Stammquerschnitt und Kallusgewebe im zugehörigen Dünnschnitt (STOFFEL, 2005a)

4.2.10.4 Druckholz

Druckholz tritt nach einer Schrägstellung bei Koniferen auf. Der Baum versucht, sich durch gezielte Bildung von druckstabilem Holz wieder in ein statisches Gleichgewicht zu bringen. Dazu werden an der Druckseite verstärkt breitere Jahrringe gebildet und in die Zellwände vermehrt druckstabiles Lignin (dunkle Färbung) eingelagert.



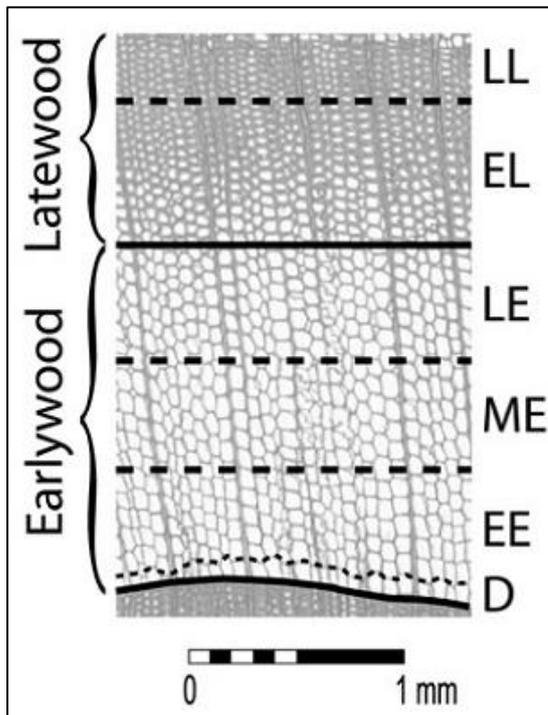
Abb. 23: Plötzlich einsetzende (roter Pfeil) und kontinuierliche Bildung von Druckholz

4.2.10.5 Bestimmung der Saisonalität

In Gebieten mit gemäßigttem Klima ist über die Vegetationsperiode eine systematische Bildung von Holzzellen zu beobachten, während in der Phase der Dormanz kein Wachstum stattfindet. Zu Beginn der Vegetationsperiode werden von Nadelgehölzen

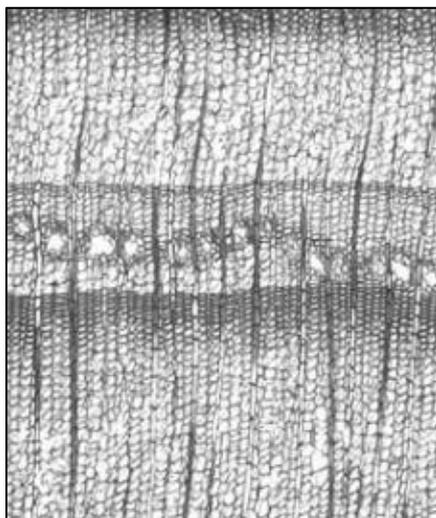
großlumige, dünnwandige Zellen gebildet. Ab dem Sommer werden zunehmend kleinere und dickwandigere Zellen gebildet, bis im Herbst das Wachstum eingestellt wird.

Zur Bestimmung der Saisonalität wird das in Abbildung 24 dargestellte Schema verwendet,



das den Jahring in verschiedene Bereiche unterteilt. So wird unterschieden, ob die auftretende Wuchsreaktion in der Dormanz (D; „Dormancy“), im frühen-, mittleren- oder späten Frühholz (EE, ME, LE; „**E**arly-, **M**edium-, **L**ate **E**arlywood“), oder im frühen oder späten Spätholz (EL, LL; „**E**arly-, **L**ate **L**atewood“) beobachtet werden kann. Da Kallusgewebe und Traumatische Harzkanalreihen direkt nach einer Verletzung gebildet werden (BAUMANN & KAISER, 1999), zitiert in STOFFEL *et al.* (2005b), lassen sich die Ereignisse innerhalb des Jahres zeitlich einordnen.

Abb. 24: Jahreszeitliche Differenzierung der gebildeten Zellen nach Wachstumsperioden: Dormanz (D), frühes-, mittleres- oder spätes Frühholz (EE, ME, LE), frühes- oder spätes Spätholz (EL, LL) (STOFFEL *et al.*, 2005b)



Soll diese Saisonalität über Bohrkernanalysen bestimmt werden, so muss bedacht werden, dass die Bildung Traumatischer Harzkanalreihen innerhalb eines Jahres mit zunehmender Entfernung von der Wunde verzögert auftritt (BOLLSCHWEILER, 2007; SCHNEUWLY *et al.*, 2009b). Wegen dieses in Abbildung 25 sichtbaren Effekts können nur diejenigen Bohrkern, die Ränder der Wunde selbst oder Kallusgewebe abbilden, zur Bestimmung der Saisonalität verwendet werden.

Abb. 25: Verzügerte Bildung von TRD mit zunehmender Entfernung von der Wunde (BOLLSCHWEILER, 2007, geändert)

4.2.11 Verarbeitung raumbezogener Daten

Die Verarbeitung und Darstellung raumbezogener Daten erfolgt mit einem GIS (Arc-Map 9.3 von ESRI). Sämtliche Kalkulationen werden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel 2007 (Microsoft) durchgeführt.

Mit den erhobenen Daten können zunächst lediglich Aussagen für einen Punkt im Untersuchungsgebiet, den Ort des Baumstandortes, getroffen werden. Um Aussagen für die gesamte Fläche treffen zu können, werden diese Informationen in flächenhaft verfügbare Daten umgewandelt. Hierzu kann ein geostatistischer Ansatz verwendet werden. Durch räumliche Interpolation werden für das gesamte Gebiet Schätzwerte errechnet, die auf einer Basis aus real gemessenen, punktförmig vorhandenen, Informationen beruhen.

Im Falle dieser Arbeit werden für die gemessenen Sprunghöhen und Frequenzen Schätzwerte errechnet. Diese sollen von näher stehenden Bäumen stärker abhängen als von weiter entfernten. Eine gewichtete Mittelwertschätzung ist daher für diese Fragestellung geeignet. Es wird das Ordinary Kriging-Verfahren verwendet. Mit diesem Verfahren werden die Messwerte in Abhängigkeit von der Entfernung zum gesuchten Schätzwert gewichtet. (KNOSPE, 2002)

Um transparente, vergleichbare Resultate zu erzielen, wird für sämtliche Interpolationen ein einheitliches Verfahren angewendet. Die Datensätze erhalten dabei keine Transformation und es wird kein Trend ausgeglichen. Um kleinräumige Variationen im Prozessgeschehen abzubilden, werden alle Interpolationen mit den jeweils 5 nächsten Nachbarn gerechnet.

5 Ergebnisse

Der folgende Ergebnisteil ist aus Gründen der Übersichtlichkeit in drei Teile gegliedert. Im Teil A) werden die Resultate aus der dendrogeomorphologischen Untersuchung dargestellt. Im Teil B) werden die Ergebnisse aus der Simulation mit Rockyfor3D zusammengefasst. Teil C) stellt die Resultate aus der Jahrring-Studie und der Stein-schlag-Simulation einander gegenüber.

Die Modellierung mit Rockyfor3D zeigt, dass auf der ausgewählten Fläche mit dem Auftreten von Steinschlagereignissen gerechnet werden muss und dass sich die Fläche somit für detailliertere Untersuchungen an Bäumen grundsätzlich eignet.

Teil A) Dendrogeomorphologische Studie

5.1 Auswahl und Räumliche Verteilung der Probebäume

Im Rahmen der Untersuchungen wurden von 34 Fichten und 50 Buchen Bohrkerne entnommen. Aufgrund der Holzqualität der Bohrkerne musste eine Fichte wegen starker Kernfäule von der weiteren Untersuchung ausgeschlossen werden. Die aus den Buchen gewonnenen Bohrkerne konnten ausnahmslos zur weiteren Auswertung verwendet werden. Somit basieren die folgenden Ergebnisse auf der Analyse von 33 Fichten (144 Bohrkerne) und 50 Buchen (50 Bohrkerne).

In Tabelle 4 ist die Verteilung der beprobten Fichten zusammengefasst.

Tab. 4: Verteilung der Probebäume und Bohrkerne auf die Transekte (Fichte)

Transekt	Seehöhe [m. ü. NN]	Transekt - länge [m]	Anzahl Bäume	Anzahl Bohrkerne
A	890	220	16	70
B	840	170	9	39
C	790	130	8	35
gesamt		520	33	144

Erst durch die Kenntnis der genauen Baumstandorte wird eine räumliche Analyse der Steinschlagschäden möglich. In Abbildung 26 sind die Standorte aller untersuchten Bäume dargestellt.

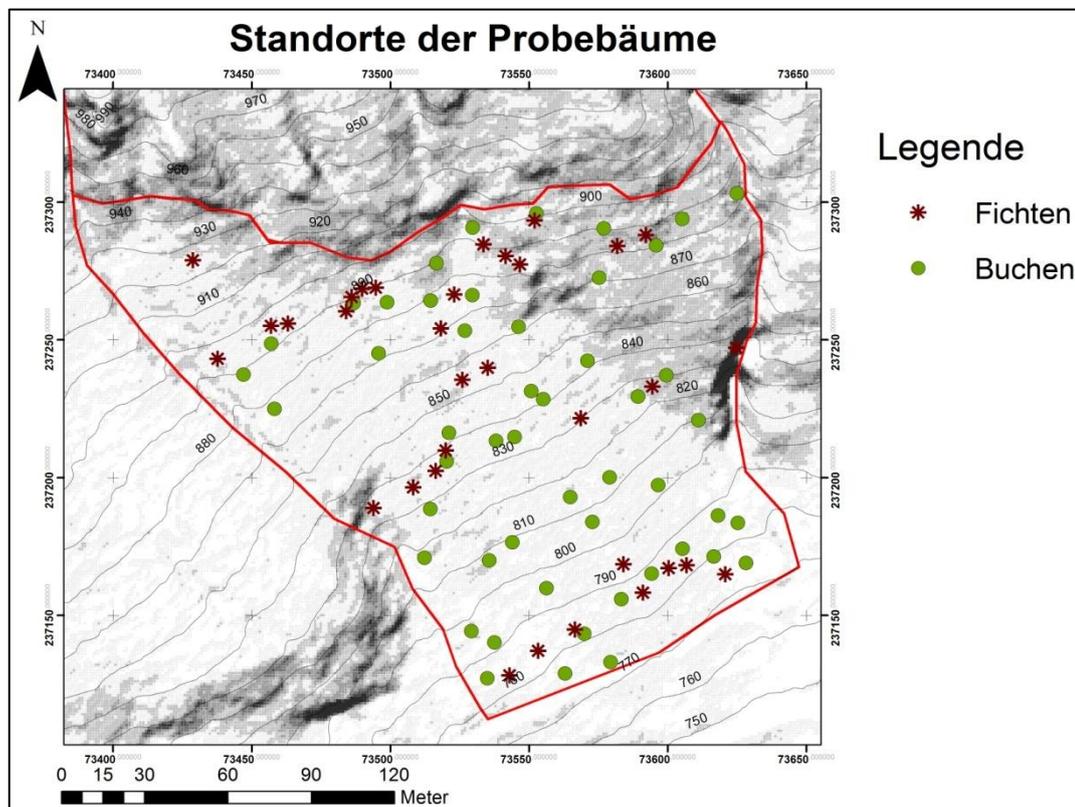


Abb. 26: Standorte der untersuchten Bäume im Projektgebiet

5.2 Baumbestand

Für die folgende Charakterisierung des Baumbestandes im Untersuchungsgebiet sei darauf hingewiesen, dass mit den vorhandenen Daten nicht der gesamte Bestand abgebildet werden kann, sondern lediglich die Eigenschaften der beprobten Bäume dargestellt sind.

5.2.1 Altersstruktur

Die älteste gemessene Jahrringserie der Fichtenproben reicht bis in das Jahr 1761 zurück. Die Altersangaben für die Fichten in dieser Arbeit stellen jedoch nicht das absolute Alter dar. Vielmehr wird lediglich angegeben, wie weit die Jahrringserien zurückreichen, weil üblicherweise nicht alle vom Baum gebildeten Jahrringe im Bohrkern abgebildet sind. Zum einen wurden die Proben nicht auf Bodenniveau gezogen, was bedeutet, dass die Jahrringe fehlen, bis der Baum die Probenhöhe erreicht hat. Zum anderen wurde in vielen Fällen das Mark nicht getroffen.

Für die Buchen hingegen wurde, wie in Kapitel 4.2.8 beschrieben, das absolute Alter rekonstruiert. Die älteste Buche stammt mit 196 Jahren aus dem Jahr 1816.

Die Datensätze für die beiden Baumarten reichen ähnlich weit zurück. Das durchschnittliche Alter (Buchen: 134 Jahre, Fichten: 135 Jahre) der beiden Baumarten ist beinahe identisch. Keine Buche ist älter als 200 Jahre und nur wenige Fichten (9%) überschreiten dieses Alter. Auch die Verteilung der Altersklassen weist eine starke Ähnlichkeit auf (Abbildung 27). Charakteristisch ist zudem, dass der Großteil aller beprobten Bäume (42%) zwischen 140 und 180 Jahre alt ist.

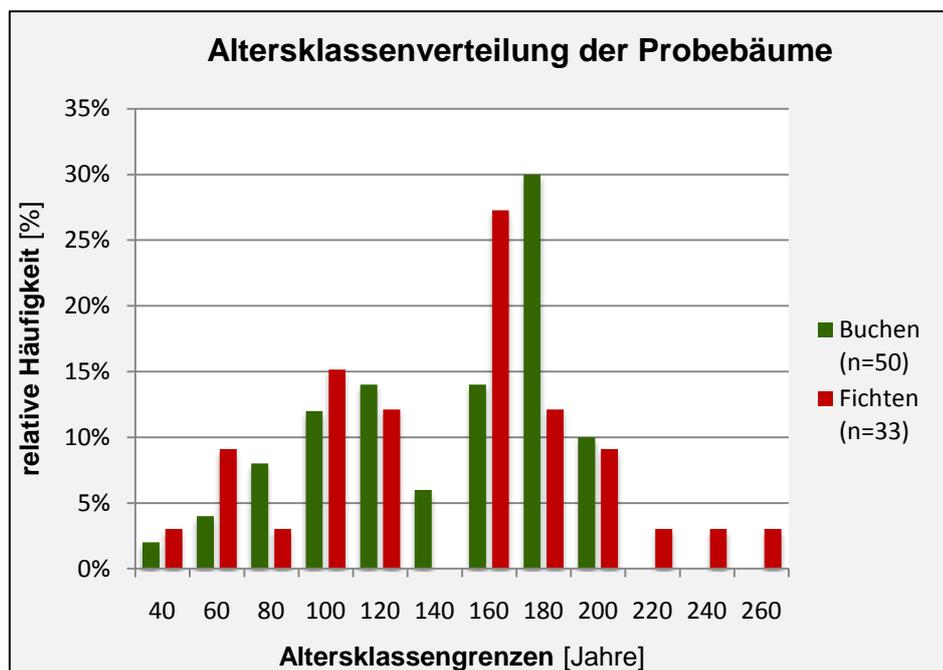


Abb. 27: Häufigkeiten der Altersklassen, differenziert nach der Baumart

5.2.2 Durchmesserverteilung

Betrachtet man die Durchmesser der untersuchten Bäume, so stellen die Fichten die stärkeren Bäume dar. Der mittlere Brusthöhendurchmesser liegt für die Fichten bei 48cm, für die Buchen hingegen bei 38cm. Aus der Durchmesserverteilung in Abbildung 28 ist ersichtlich, dass bei den Buchen die vergleichsweise schlankeren Stämme dominieren, wohingegen bei den Fichten ein Überhang der starken Stämme zu beobachten ist.

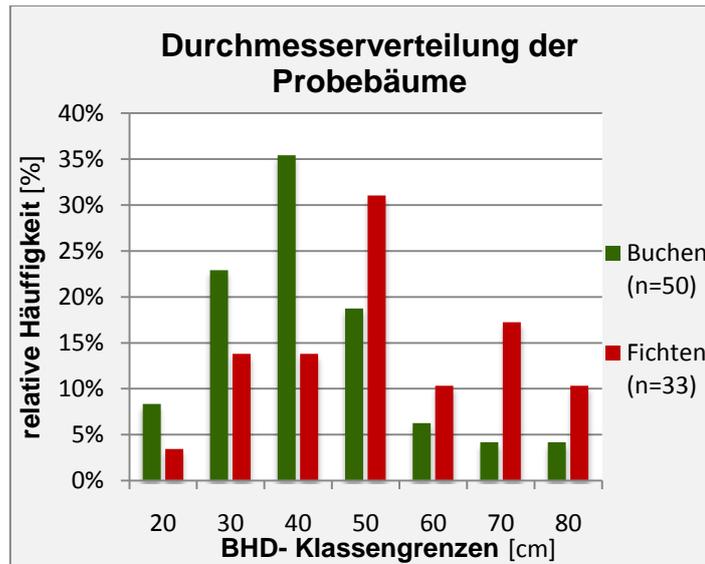


Abb. 28: Häufigkeiten der BHD-Klassen, differenziert nach der Baumart

Um eine effiziente Methode zu entwickeln, wird untersucht, ob das Alter der Buchen auch mit nicht-invasiven Methoden ohne Bohrkernentnahme bestimmt werden kann. Es wird untersucht, ob eine Altersbestimmung der Bäume über den BHD in Kombination mit einer forstlichen Ertragstafel möglich ist. Hierzu wird eine Korrelationsanalyse des BHD und des rekonstruierten Baumalters durchgeführt. Wie in Abbildung 29 zu sehen, besteht auf der Projektfläche lediglich eine schwache Korrelation (Korrelationskoeffizient $r=0,47$) dieser beiden Größen.

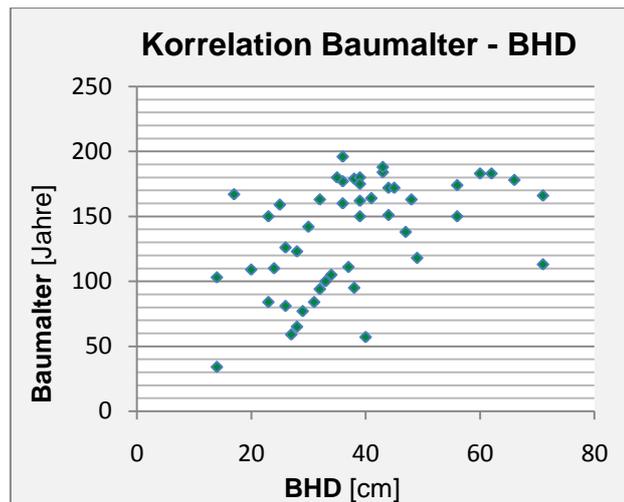


Abb. 29: Korrelation zwischen BHD und Alter der Buchen im Projektgebiet

5.3 Rekonstruierte Steinschlag-Schäden

Die Analyse der Fichten-Bohrkerne ergibt 431 abgebildete Wuchsstörungen, aus denen 277 Steinschlag-Ereignisse rekonstruiert werden können. Die Differenz liegt zum einen darin begründet, dass die Symptome eines Ereignisses oft in mehreren Bohrkerne des Baumes abgebildet sind. Zum anderen werden die Wuchsstörungen zurückhaltend interpretiert und nur deutlich ausgeprägte Störungen auf Steinschlag zurückgeführt.

In Abbildung 30 ist die relative Häufigkeit der in den Fichten-Bohrkernen auftretenden, steinschlagbedingten Wuchsstörungen dargestellt. Traumatische Harzkanalreihen stellen mit Abstand das häufigste Schadens-Symptom (89%) dar. In 6% der Fälle ist die Verletzung selbst im Bohrkerne abgebildet. Die restlichen Ereignisse werden durch das Auftreten von Kallusgewebe (5%) und Druckholz (<1%) identifiziert.

Durch Zählung der sichtbaren Steinschlag-Narben an der Stammoberfläche der Buchen können 1140 Schäden erfasst werden.

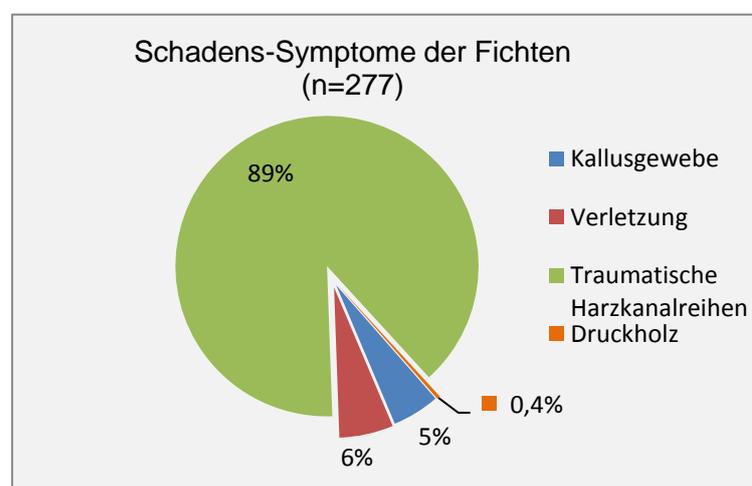


Abb. 30: Relative Häufigkeiten der Schadens-Symptome in den Bohrkerne (Fichte)

5.4 Steinschlagaktivität

In Abbildung 31 sind die aus der Bohrkernanalyse rekonstruierten Ereignisse sowie die für den Streckenabschnitt im Ereigniskataster der ÖBB Infrastruktur AG (2011) dokumentierten Steinschlag-Ereignisse verzeichnet. Zudem ist die Baumbelegung (Anzahl vorhandener Bäume, deren Bohrkern den betrachteten Zeitraum abdecken) dargestellt. Das am weitesten zurückliegende Ereignis kann dem Jahr 1819 zugeordnet werden. Die Anzahl der Ereignisse pro Jahr schwankt zwischen 0 und 9. Es ist ein Anstieg der Ereignisse mit steigender Baumbelegung ersichtlich.

Um die jährlichen Schwankungen zu glätten, ist das 10-jährige gleitende Mittel der Ereignisse angegeben. Dieses zeigt einen Anstieg mit zunehmender Baumbelegung.

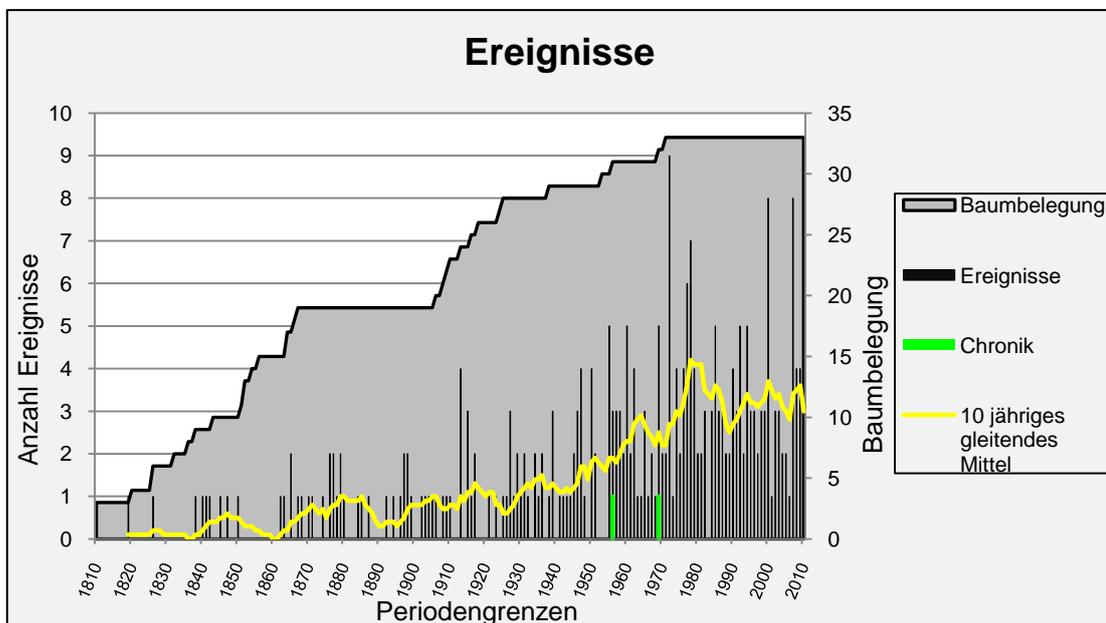


Abb. 31: Datierete Ereignisse aus Bohrkernanalyse (Fichte) und Chronik sowie die Baumbelegung über die letzten 200 Jahre

Um den Einfluss der zunehmenden Baumbelegung in der jüngeren Zeit herauszufiltern, wurde ein Aktivitätsmaß für jedes Jahrzehnt gebildet. Dieses stellt die Anzahl der Steinschlagereignisse pro Jahrzehnt, dividiert durch die Anzahl vorhandener Bäume in diesem Jahrzehnt dar. In Tabelle 5 ist die jeweilige Steinschlagaktivität pro Jahrzehnt dargestellt. Es lassen sich drei Klassen unterschiedlicher Aktivität bilden. Während in der ersten Klasse (1841-1940) eine niedrige gemittelte Aktivität von 0,4 [Ereignisse/ Baum] beobachtet werden kann, steigt sie in der zweiten Klasse (1941-1970) auf 0,7 [Ereignisse/ Baum] an, um schließlich in der dritten Klasse (1971-2010) um den Mittelwert von 1,0 (+/-0,2) [Ereignisse/ Baum] zu pendeln.

Tab. 5: Steinschlagaktivität (Anzahl Ereignisse / Anzahl Bäume*10Jahre⁻¹), Mittelwerte gebildeter Klassen mit unterschiedlicher Aktivität (graue Schattierung) sowie die Anzahl sichtbarer Schäden pro Jahrzehnt (Fichte)

Jahrzehnt	Aktivität [Ereignisse/ Baum]	Klassen ähnlicher Aktivität	Mittelwerte Aktivität in Klassen [Ereignisse/ Baum]	Anzahl sichtbarer Schäden [Ereignisse/ Baum]	rel. Häufigkeit sichtbarer Schäden pro Klasse[%]
1850	0,5		0,4	0	
1860	0		0,4	0	
1870	0,4		0,4	1	
1880	0,5		0,4	0	
1890	0,2	A	0,4	0	8
1900	0,4		0,4	1	
1910	0,3		0,4	0	
1920	0,4		0,4	1	
1930	0,4		0,4	3	
1940	0,4		0,4	1	
1950	0,6		0,7	7	
1960	0,7	B	0,7	7	24
1970	0,7		0,7	6	
1980	1,2		1,0	17	
1990	0,8	C	1,0	8	68
2000	1,2		1,0	21	
2010	0,9		1,0	11	

Des Weiteren ist die Anzahl der sichtbaren Schäden, die eindeutig über die Bohrkernanalyse datiert werden können (N=84), pro Jahrzehnt dargestellt. Ebenfalls werden die relativen Häufigkeiten dieser Schäden in den definierten Klassen angegeben. Der größte Anteil dieser Schäden (68%) ist jüngeren Datums (<40 Jahre). Etwa ein Viertel der Schäden ist 50–70 Jahre alt. Nur wenige Schäden (8%) sind älter als 70 Jahre.

In Abbildung 32 wird das Aktivitätsmaß aus Tabelle 5 mit der Anzahl sichtbarer Schäden aus Tabelle 5 verglichen, die eindeutig diesem Jahrzehnt zugeordnet werden können (N=84). Es soll festgestellt werden, ob ein Zusammenhang zwischen der errechneten Aktivität und der Anzahl sichtbarer Schäden besteht. Die statistische Analyse zeigt deutlich, dass die berechnete Steinschlagaktivität eines Jahrzehnts stark (Korrelationskoeffizient $r=0,96$) mit der Anzahl sichtbarer Schäden innerhalb dieses Jahrzehnts kor-

reliert. Dies bedeutet, dass für diejenigen Jahrzehnte, aus denen Schäden noch an der Stammoberfläche sichtbar sind, eine höhere Aktivität bestimmt wird.

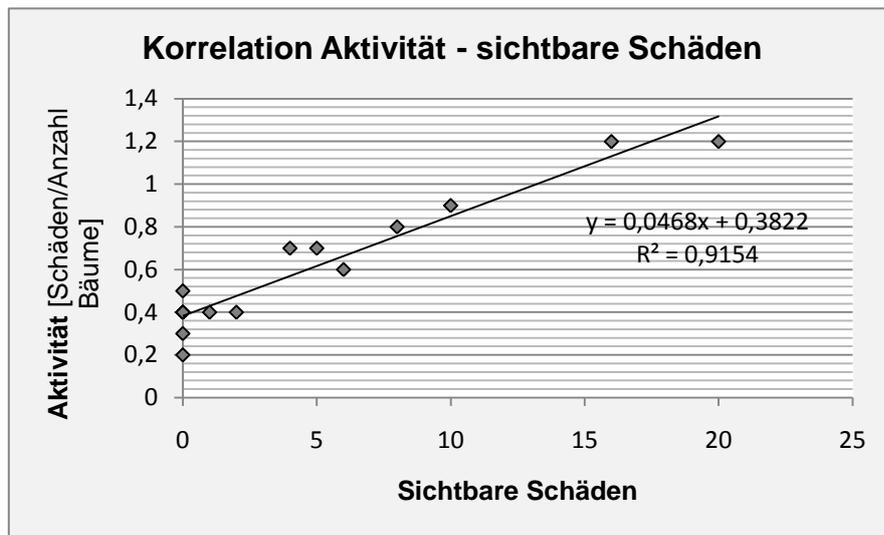


Abb. 32: Korrelation zwischen der rekonstruierten Steinschlagaktivität eines Jahrzehnts und der Anzahl oberflächlich sichtbarer Schäden desselben Jahrzehnts (Fichte)

Da konstante Prozessaktivität eine Voraussetzung für die Angabe von Frequenzen bzw. Wiederkehrdauern darstellt, soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass der scheinbare Aufwärtstrend der Aktivität durch eine kritische Betrachtung der angewendeten Methoden erklärt werden kann (Kapitel 6.1).

5.5 Wiederkehrdauer

Auf Grund der unterschiedlichen Erhebungsmethodik ergeben sich unterschiedliche Wiederkehrdauern von Steinschlagereignissen für die untersuchten Baumarten. Daher werden im Folgenden die Wiederkehrdauern für beide Baumarten zunächst getrennt berechnet und kartographisch dargestellt. Anschließend erfolgt eine Synthese der beiden Datensätze. Die angegebenen Wiederkehrdauern errechnen sich aus der Division des Alters (bzw. der Anzahl gemessener Jahrringe bei Fichten) durch die Anzahl der Treffer am jeweiligen Baum bzw. in den Jahrringdaten (Fichte). Eine Wiederkehrdauer von (X) Jahren beschreibt demnach, dass der Baum alle (X) Jahre einen Treffer durch Steinschlag erhält. Ein Erklärungsversuch für die unterschiedlichen Resultate in Abhängigkeit von der untersuchten Baumart befindet sich in Kapitel 6.2 dieser Arbeit.

5.5.1 Wiederkehrdauer Fichte

Aus der Bohrkernanalyse der Fichtenproben sowie neun weiteren Treffern, die in einer Höhe über drei Metern (nicht im Bohrkern abgebildet) erfasst wurden, ergibt sich für die gesamte Fläche eine mittlere Wiederkehrdauer von 17,8 Jahren. Die kürzesten Wiederkehrdauern pro Baum liegen bei 7,8 Jahren, die längsten bei 46,3 Jahren.

Die räumliche Verteilung der Wiederkehrperioden (s. Abb. 33) zeigt bei näherer Betrachtung auffällige Muster:

Zum einen kann im westlichen (linken) Teil des Hanges ein deutlich selteneres Auftreten von Steinschlagereignissen beobachtet werden als im östlichen (rechten) Teil. Des Weiteren wird die kanalisierende Wirkung der Geländeausprägung deutlich abgebildet. So sind kürzere Wiederkehrdauern in der Mitte der Untersuchungsfläche zu sehen. Der Bereich kürzerer Wiederkehrdauern setzt sich entlang der mittleren Runse nach unten hin fort. Wird der Bereich mit geringer Aktivität im westlichen oberen Eck der Fläche außer Acht gelassen, so zeichnet sich eine leichte Abnahme der Steinschlaghäufigkeit von den oberen Hangbereichen hin zu den unteren ab.

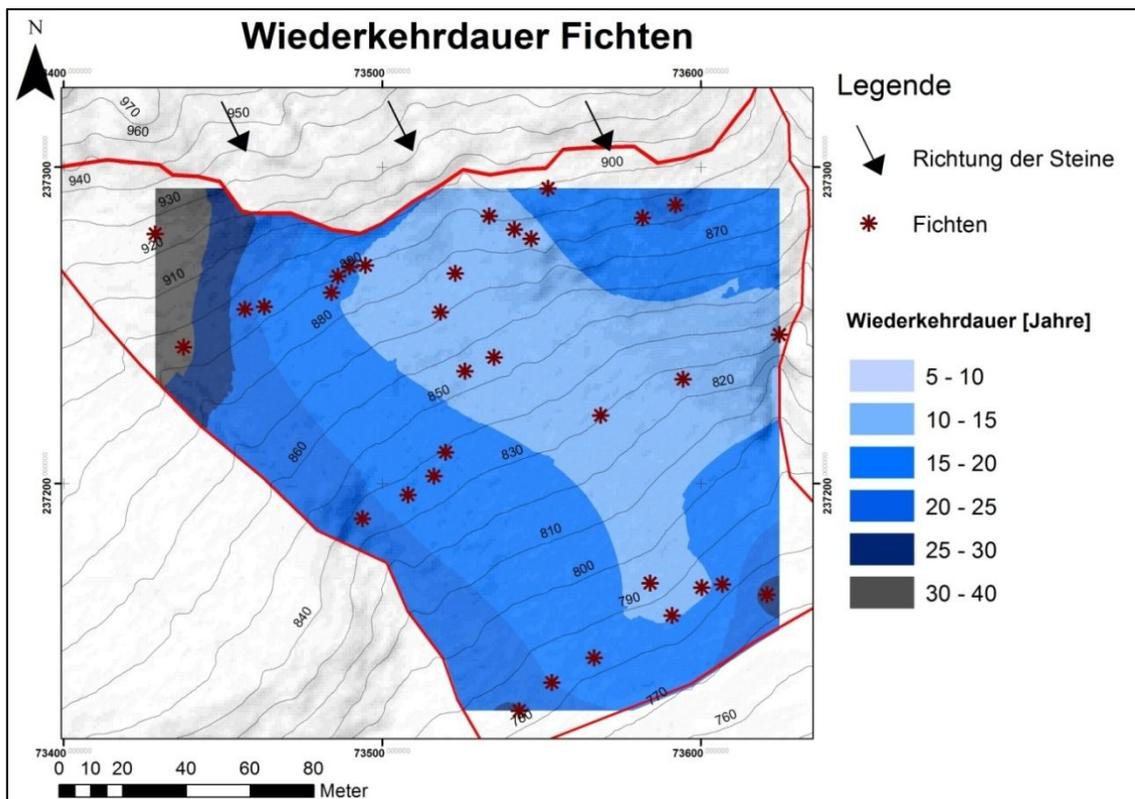


Abb. 33: Interpolierte Wiederkehrperioden (Ordinary Kriging) der Steinschlagereignisse (Fichte)

5.5.2 Wiederkehrdauer Buche

Aus den Untersuchungen an den Buchen ergeben sich deutlich kürzere Wiederkehrperioden für Steinschlagereignisse als aus den Fichten-Daten. Die mittlere Wiederkehrdauer liegt hier bei 8,7 Jahren. Die kürzeste rekonstruierte Wiederkehrperiode liegt bei 1,4 Jahren, die längste hingegen bei 30,0 Jahren.

Analog zu den räumlichen Mustern der Fichten-Wiederkehrdauern ist ein vermehrtes Auftreten von Steinschlag im östlichen Teilbereich zu erkennen (s. Abb.34). Der Rückgang der Trefferhäufigkeit von oben nach unten ist ebenfalls und sogar deutlicher zu sehen. Auch der kanalisierende Effekt des Geländes kann beobachtet werden.

In der Mitte des Gebietes liegt ein Bereich mit hohen Wiederkehrdauern. Ein Erklärungsansatz für diesen konträr zu den Ergebnissen der Fichten erscheinenden Sachverhalt befindet sich in Kapitel 6. Die Interpolation lässt zudem noch weitere Trajektorien erkennen. Zwei Bereiche mit auffallend großer Trefferhäufigkeit befinden sich im unteren Drittel des Kartenausschnittes jeweils an den Rändern des Projektgebietes. Diese können genau dort lokalisiert werden, wo eine Richtungsänderung der seitlich begrenzenden Runsen erfolgt.

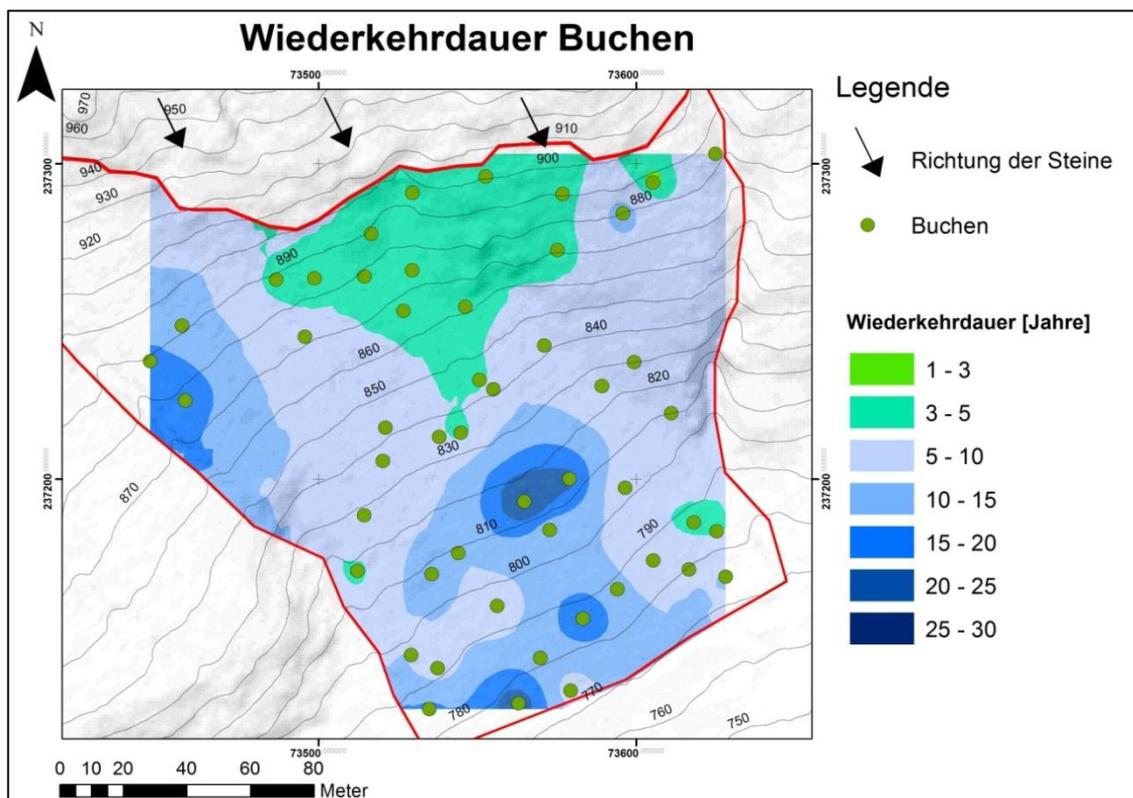


Abb. 34: Interpolierte Wiederkehrperioden (Ordinary Kriging) der Steinschlagereignisse (Buche)

5.5.3 Wiederkehrdauer Fichte und Buche kombiniert

Wegen der deutlichen, durch unterschiedliche Erhebungsmethoden bedingten Differenz der absoluten Wiederkehrdauern müssen die Werte auf ein gleiches Niveau gebracht werden, damit sich bei der Synthese eine sinnvolle räumliche Verteilung ergibt. Der Mittelwert der Wiederkehrdauern an Fichten ist mit 17,8 Jahren in etwa doppelt so groß wie an den Buchen mit 8,7 Jahren. Um die Datensätze anzugleichen werden die an jeder einzelnen Buche beobachteten Wiederkehrdauern mit dem Faktor 2 multipliziert. Dieses Verfahren führt dazu, dass die angegebenen Jahre eine Mindest-Wiederkehrdauer darstellen, die durch die Analyse der Jahrringserien der Fichten bestätigt ist. Die real zu erwartende Trefferhäufigkeit wird jedoch vermutlich unterschätzt. Eine Multiplikation der Wiederkehrdauern an den Fichten mit dem Faktor 0,5 würde ebenfalls zu der sinnvollen räumlichen Verteilung führen. In diesem Fall würde die Trefferhäufigkeit jedoch vermutlich überschätzt.

In Abbildung 35 ist die räumliche Verteilung der Wiederkehrdauern für beide Baumarten kombiniert visualisiert. Deutlich zu sehen ist nach wie vor der Bereich mit hoher Trefferwahrscheinlichkeit im oberen Bereich der Fläche sowie die vergleichsweise kürzeren Wiederkehrdauern im östlichen Teil des Projektgebietes. Auch die oben beschriebene kanalisierende Wirkung des Geländes ist erkennbar.

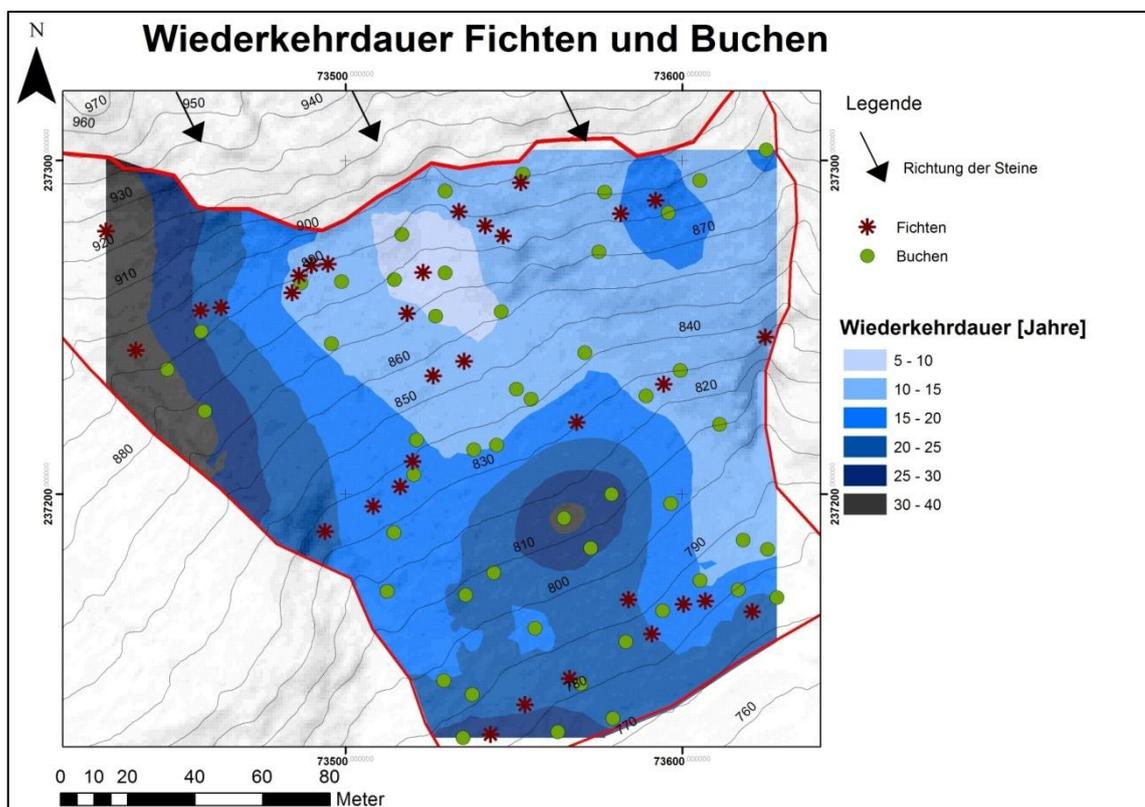


Abb. 35: Interpolierte Mindest-Wiederkehrdauern (Ordinary Kriging) der Steinschlagereignisse (Buche und Fichte kombiniert)

5.6 Sprunghöhen der Steine

5.6.1 Mittlere Sprunghöhen

Die Angabe der Höhe der Schäden am Stamm ist dahingehend bedeutsam, als dass sie die Sprunghöhen der Steine widerspiegelt. Für die Angabe der mittleren Höhen wird der Median verwendet, da dieser gegenüber Ausreißern unempfindlicher ist als das arithmetische Mittel. Der Median aller dokumentierten Schadenshöhen am Stamm liegt für die untersuchten Buchen bei 0,7m und für die Fichten bei 0,9m. Abbildung 36 stellt dar, wie häufig bei den beiden Baumarten Schäden in einer gewissen Höhe zu finden sind. Dabei fällt auf, dass die Verteilung der Sprunghöhen der Buchen im Vergleich zu den Fichten leicht zu den niedrigeren Sprunghöhen hin verschoben ist. Dies bedeutet, dass an den Buchen vermehrt niedrigere Sprunghöhen beobachtet werden können. So liegen an den Buchen 41% aller Treffer unter 50cm Höhe am Stamm. Bei den Fichten hingegen sind nur 36% aller Treffer im Bereich unter 50cm zu finden.

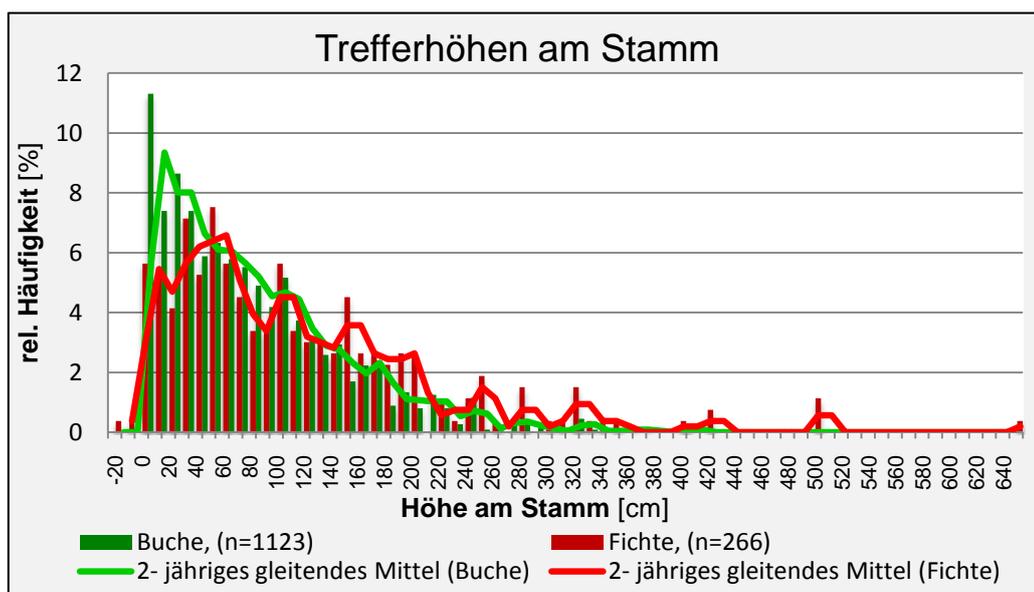


Abb. 36: Häufigkeitsverteilung der Trefferhöhen am Stamm, nach Baumarten differenziert; Negative Höhenangaben entstehen durch den hangseitigen Baum-Gelände-Schnittpunkt als Bezugspunkt und tiefer liegende Wunden auf der Hangunterseite des Stammes.

5.6.2 Maximale Sprunghöhen

Die Verteilung der maximalen Sprunghöhen ist für den Umgang mit Steinschlaggefährdung von besonderem Interesse und sei daher nochmals in Abbildung 37 und 38 hervorgehoben. An den Bäumen beobachtete maximale Trefferhöhen schwanken zwischen 0,4m und 5m (6,5m wird als Ausreißer behandelt, es handelt sich vermutlich um einen falsch interpretierten, harzenden Astansatz). Der Median der maximalen Trefferhöhen liegt für die Buchen bei 1,85m und für die Fichten bei 2,00m. Bei 50% der Bäume liegen die maximalen Sprunghöhen zwischen 1,2m und 2,5m (Buche) bzw. 1,2m und 2,8m (Fichte).

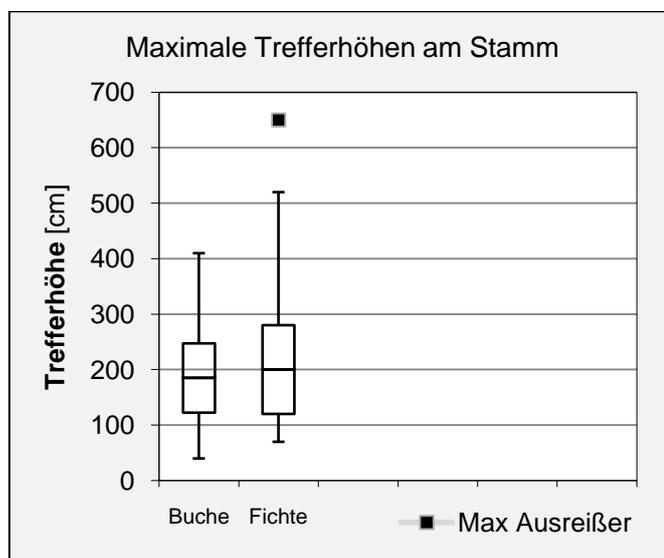


Abb. 37: Häufigkeitsverteilung der maximalen Sprunghöhen als Box-Whisker-Plot, nach Baumarten differenziert; Angegeben als Box: Median, unteres (25%) und oberes Quartil (75%); Länge der Whisker: 1,5-facher Interquartilsabstand; Ausreißer liegen außerhalb der Whisker

Abbildung 38 zeigt die räumliche Verteilung der maximalen Sprunghöhen, die an den Buchen (links oben), Fichten (rechts oben) sowie bei beiden Baumarten kombiniert (unten) beobachtet werden können. Es kann an den Interpolationen bei beiden Baumarten deutlich gesehen werden, dass im oberen, zentralen Teil der Untersuchungsfläche mit 3-4m die größten Sprunghöhen auftreten. Die Sprunghöhen der Steine nehmen entlang des Höhengradienten ab, sodass im untersten Bereich nur noch Sprunghöhen von 1-2m (Buche) bzw. 1,5-2,5m (Fichte) zu beobachten sind. Im östlichen Teil treten größere maximale Sprunghöhen auf als im westlichen Teil der Fläche, was ebenfalls an beiden Baumarten zu sehen ist. Vergleicht man die räumlichen Muster der Interpolationen beider Baumarten, so ergibt sich bei den Buchen ein differenzierteres Bild.

Da die räumliche Interpolation die absoluten minimalen und maximalen Werte nicht

abbildet, sind in der kombinierten Darstellung die Bäume mit maximalen Trefferhöhen $\geq 5\text{m}$ (blaue Sternchen) und $< 1\text{m}$ (weiße Sternchen) zusätzlich hervorgehoben.

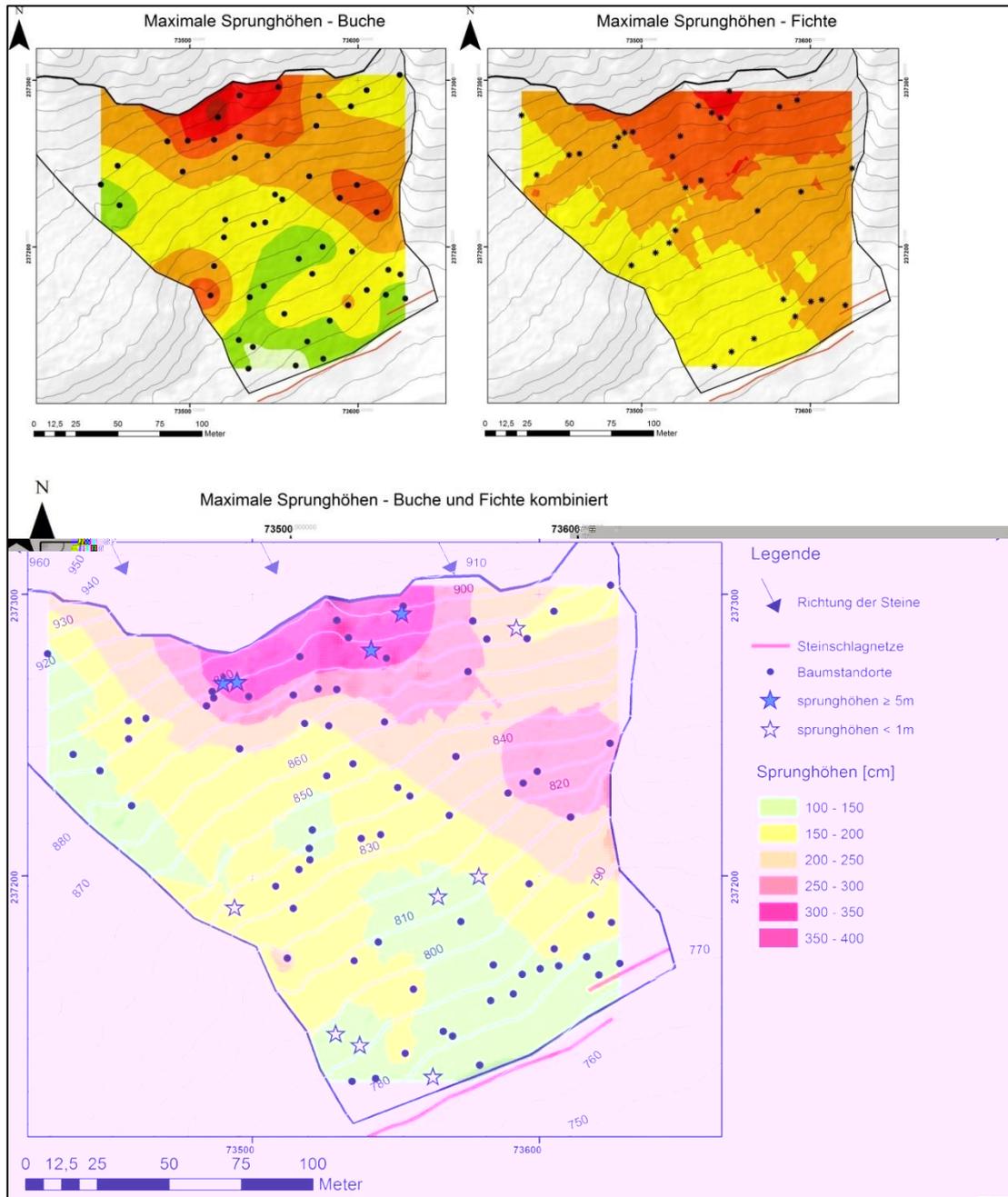


Abb. 38: Interpolierte maximale Sprunghöhen der Steine (Ordinary Kriging), oben links: Buche; oben rechts: Fichte; unten: Fichte und Buche kombiniert; Bäume mit max. Trefferhöhen $\geq 5\text{m}$ als blaues Sternchen, Bäume mit max. Trefferhöhen $\leq 1\text{m}$ als weißes Sternchen gekennzeichnet

5.7 Größe der Schäden

An der Stammoberfläche der untersuchten Buchen können durchschnittlich 22,8 steinschlagbedingte Verletzungen pro Baum registriert werden. Die Fichten weisen mit 7,7 typischen Steinschlagschäden pro Baum deutlich weniger sichtbare Schäden auf.

Um die Größe der oberflächlich sichtbaren Schäden vergleichen zu können, werden die Klassen „Groß“ (Fichte: Schadensfläche $f \geq 100\text{cm}^2$, Buche Schadenshöhe $h \geq 10\text{cm}$), „Mittel“ (f : 25-99 cm^2 , h : 5-9cm) und „Klein“ (f : < 25 cm^2 , h : 3-4cm) gebildet.

Die Anteile der Wunden unterschiedlicher Größe sind in Abbildung 39 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei den Fichten vermehrt große Wunden beobachtet werden können (72%), während sich die Schäden bei den Buchen gleichmäßig auf die gebildeten Größenklassen verteilen. Schäden der Klasse „Klein“ sind bei den Fichten kaum zu finden (1%).

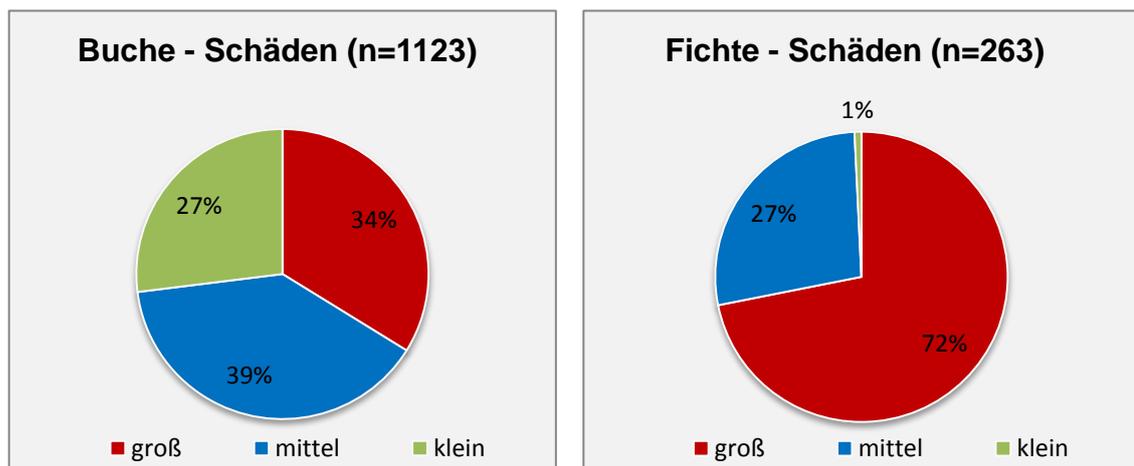


Abb. 39: Relative Häufigkeiten der äußerlich sichtbaren Schäden in Größenklassen (groß, mittel, klein), differenziert nach der Baumart

Wie sich die Bäume mit unterschiedlich großen Schäden auf der Fläche verteilen, ist in Abbildung 40 dargestellt. Die Größe der dargestellten Punkte verkörpert die Größe der Schäden am jeweiligen Baum. Bei den Fichten (rote Punkte) ist die durchschnittliche Schadensgröße am jeweiligen Baum in neun Klassen angegeben. Die Größe der Schäden an den Buchen (blaue Punkte) ist in drei Klassen dargestellt. Hier wird die jeweils häufigste Schadensgrößenklasse pro Baum angegeben, vorausgesetzt eine Klasse überwiegt ($\geq 50\%$ aller Schäden in einer Klasse). An beiden Baumarten ist zu erkennen, dass die beobachtete Schadensgröße mit dem Höhengradienten von oben nach unten hin abnimmt. Bei den Fichten sind große Schäden vorwiegend nahe dem Wandbereich zu finden. Außerdem sind im westlichen Teil durchschnittlich größere Schäden zu sehen als im östlichen Teilbereich. An den Buchen ist dieses West-Ost-Gefälle nicht zu erkennen, jedoch treten große Schäden ebenfalls häufiger im wand-nahen Bereich auf. Im unteren Drittel der Fläche werden große Schäden an den Buchen ebenfalls an den Rändern des Projektgebietes gefunden.

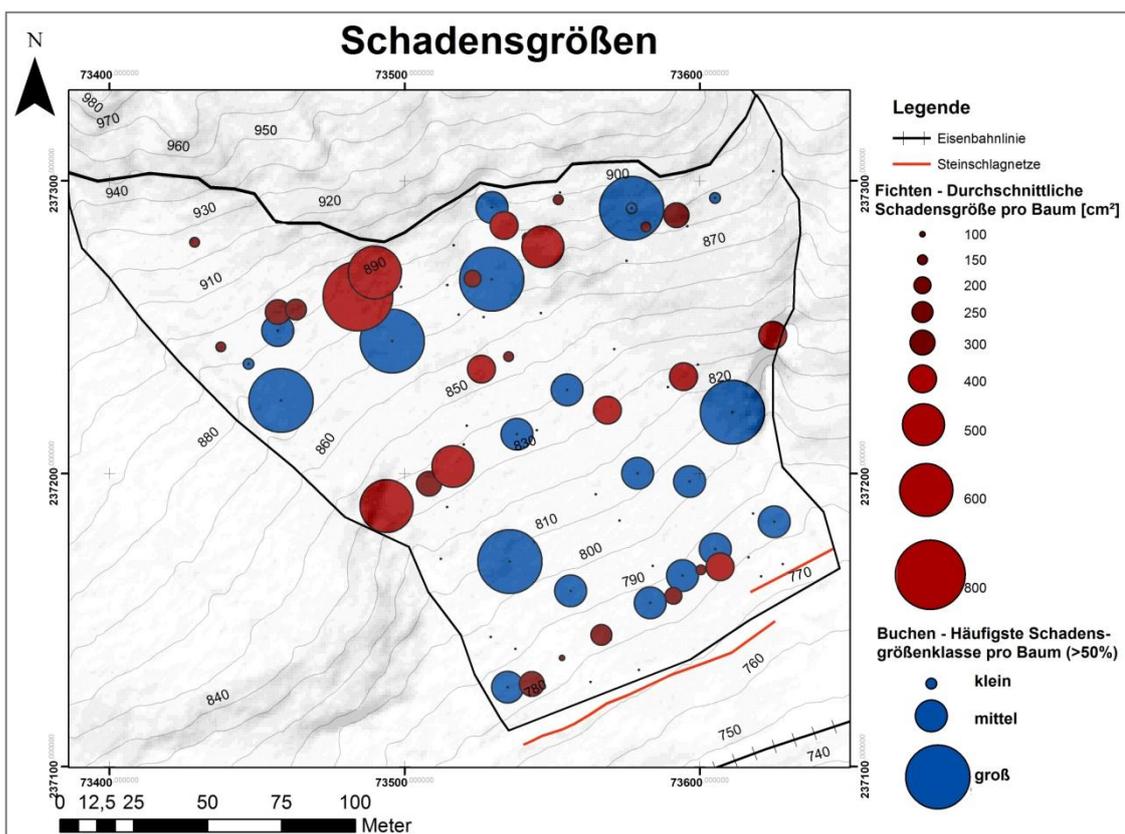


Abb. 40: Räumliche Verteilung sichtbarer Schäden, differenziert nach Baumart; Die Größe der Kreise symbolisiert die Größe der Schäden.

5.8 Steinschlag-Trajektorien

5.8.1 Azimute der Schäden

Abbildung 41 zeigt die Azimute der an den Fichten oberflächlich sichtbaren Schäden. Erwartungsgemäß ist mit 93% aller Schäden der Großteil auf der dem Hang zugewandten Seite (230-70°) zu finden, während auf der Hangunterseite (80-220°) nur 7% der Treffer zu finden sind. Mit etwa einem Viertel aller Schäden bilden die Treffer aus nördlicher Richtung (350-10°) ein deutliches Maximum. Mit rund einem Fünftel aller Schäden weist auch der Sektor Nord bis Nordost (20-40°) auffallend viele Schäden auf. Aus dem Richtungssektor Nord bis Nordwest (320-340°) können etwa ein Sechstel aller Treffer beobachtet werden.

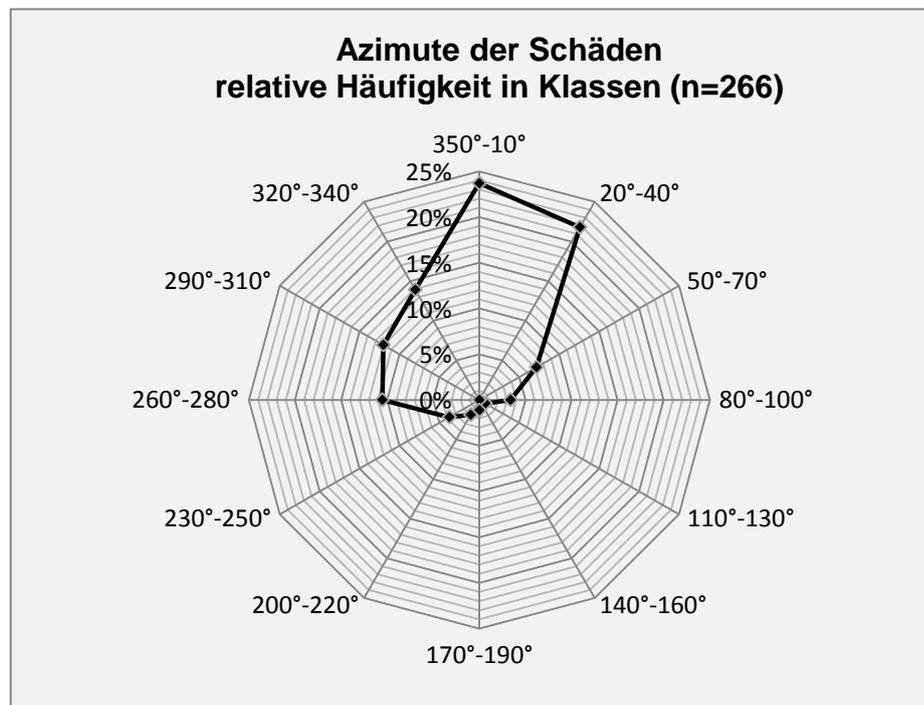


Abb. 41: Relative Häufigkeit der Azimute sichtbarer Schäden

5.8.2 Eintrittsbahnen der Steine

Die Pfade, entlang derer stürzende Steine in das Untersuchungsgebiet eintreten, sind in Abbildung 42 dargestellt. Sie ergeben sich aus der im Gelände gewonnenen Einschätzung der Reliefausprägung oberhalb der Fläche, der Verteilung der Trefferhäufigkeiten und der Verteilung der Schadensgrößen aller untersuchten Bäume. Die Größe der Pfeile symbolisiert die vermutete Häufigkeit der Ereignisse entlang des Stein-schlagpfades in Anlehnung an die beobachteten Wiederkehrdauern.

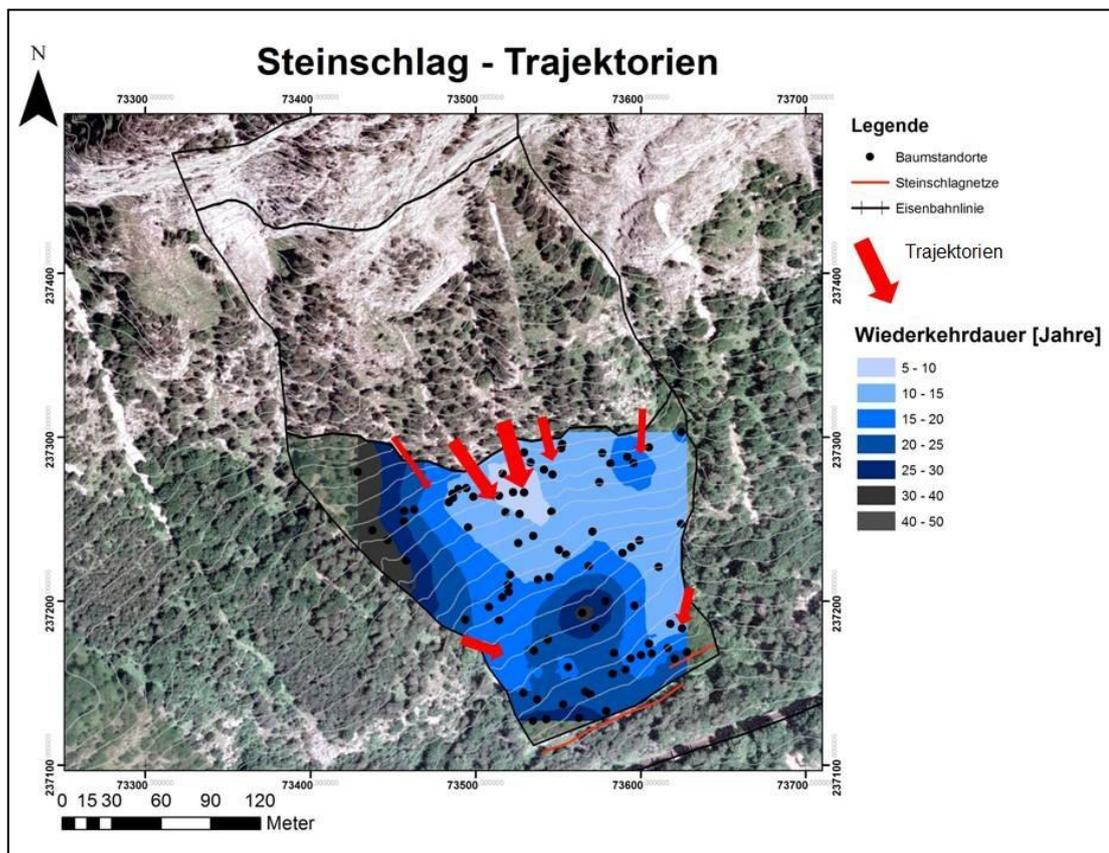


Abb. 42: Eintrittspfade der Steine in das Projektgebiet; Die Größe der Pfeile symbolisiert die Häufigkeit der Ereignisse entlang dieser Trajektorien.

5.9 Variation der Steinschlagprozesse

5.9.1 Räumliche Variation

Das räumliche Auftreten der Ereignisse eines jeden Jahres wurde durch Datenbankabfragen untersucht. Dabei kann keine Verlagerung der Prozessräume gefunden werden. Auch die Verteilung der Treffer in Jahren mit hohen Steinschlagaufkommen lassen nicht auf Großereignisse schließen. Die Sturzprozesse auf der Fläche erfolgen somit vorwiegend durch ein regelmäßiges Ablösen einzelner Komponenten. Dennoch ergibt die Abfrage ein gehäuftes Auftreten auf der westlichen Seite oder der östlichen Seite des Projektgebietes in einzelnen Jahren.

5.9.2 Saisonale Variation

Die registrierten Wuchsreaktionen sind in Tabelle 6 zu sehen. Aufgrund der Migration der Traumatischen Harzkanalreihen mit zunehmender Entfernung von der Wunde werden die ausschließlich durch TRD identifizierten Ereignisse nicht zur Bestimmung der Saisonalität herangezogen. Es werden nur Proben verwendet, die exakt den Rand der Verletzung oder einsetzende Kallusbildung abbilden.

Insgesamt wird der Großteil aller Schäden (88%) im Frühholz gefunden. Deutlich weniger Schäden werden im Spätholz identifiziert (12%). Innerhalb des Frühholzes ist mit 47% etwa die Hälfte der Schäden in der Dormanz zu finden, 12% der Schäden werden dem frühen Frühholz und 29% dem mittleren Frühholz zugeordnet.

Tab. 6: Schadens-Symptome innerhalb des Jahrringes (Fichte)

Wuchsperiode	Anzahl Schäden	relative Häufigkeit [%]
Dormanz (D)	8	47
Frühes Frühholz (EE)	2	12
Mittleres Frühholz (ME)	5	29
Spätes Frühholz (LE)	0	0
Frühes Spätholz (EL)	2	12
Spätes Spätholz (LL)	0	0
Gesamt	17	100

Die Ereignisse, die in der Winterruhe der Bäume auftreten, werden erst mit der ersten Zellreihe des Frühholzes im Jahrringmuster sichtbar. Daher werden Schäden, welche im Bohrkern in der Periode der Dormanz (D) liegen, den Monaten November – April zugeordnet. Es wird angenommen, dass die Bäume auf der Untersuchungsfläche im Mai das frühe Frühholz (EE) bilden, da in diesem Monat erstmalig die Tagesmitteltemperatur über 10°C liegt. Von Juni bis Juli wird die Bildung des mittleren Frühholzes (ME) und in den Monaten August bis September die des späten Frühholzes (LE) angenommen. Im Oktober wird die Bildung von Spätholzzellen (EL/LL) vermutet, bis das Zellwachstum im November gänzlich eingestellt wird und die Dormanz beginnt (siehe farbliche Codierung der oberen horizontalen Achse in Abb. 43).

Zusammen mit den Daten aus der Ereignischronik der ÖBB Infrastruktur AG (2011, Bahnkilometer 5,9 – 9,5) ergibt sich ein schlüssiges Bild der saisonalen Verteilung der Ereignisse am Hechenberg. Dies ist in Abbildung 43 dargestellt. Für die Darstellung werden horizontale Achsen mit unterschiedlicher Auflösung verwendet: Auf der oberen horizontalen Achse sind die Jahrring-Daten aus dem Untersuchungsgebiet in Wachstumsperioden mit subsaisonalen Auflösung aufgetragen. Auf der unteren horizontalen Achse sind die Daten aus der Ereignischronik für den gesamten Hechenberg mit monatlicher Auflösung dargestellt. Steinschlagereignisse treten besonders gehäuft in den Wintermonaten auf. Zwei Maxima befinden sich im Dezember und März. Im Frühjahr und Frühsommer (April, Mai, Juni) sind vergleichsweise selten Ereignisse zu beobachten. Im Hochsommer (Juli, August) steigt die Häufigkeit abermals an, während im Herbst (September - November) wieder weniger Steinschlagaktivität beobachtet wird.

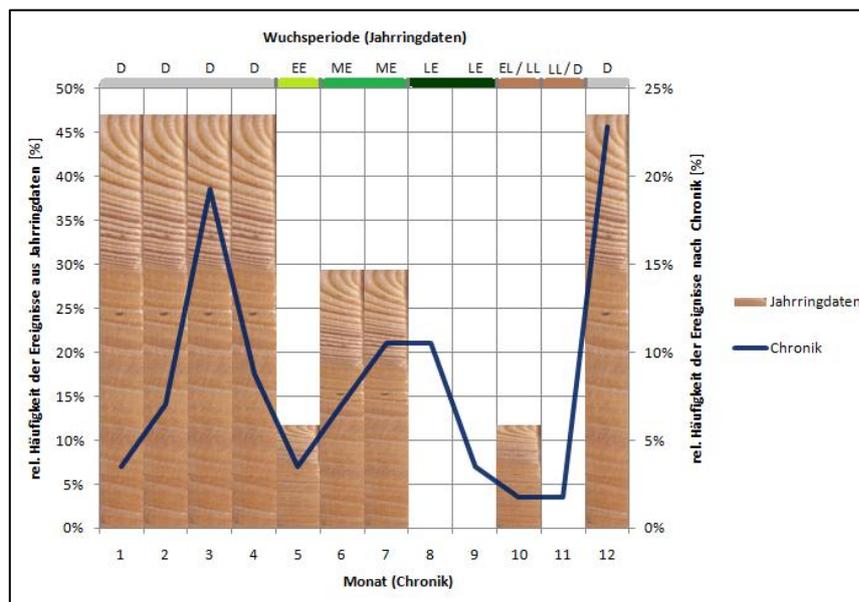


Abb. 43: Saisonalität der Steinschlagereignisse, rekonstruiert aus Jahrringdaten (Fichte, n=17), sowie Daten aus der Ereignischronik (n=57)

Teil B) Simulation mit Rockyfor3D

5.10 Trajektorien

Die Verteilungsmuster der simulierten Trajektorien in Abbildung 44 zeigen eine starke Abhängigkeit von der Topographie. Schon kurz nach dem Ablösebereich werden die Steine in den Rinnen kanalisiert und treten hauptsächlich mittig in das Projektgebiet ein oder bewegen sich entlang der seitlich begrenzenden Gräben hangabwärts. Dieses Muster ist in den Simulationsergebnissen mit und ohne Wald deutlich zu erkennen. Die simulierten Trajektorien dieser beiden Szenarien ähneln sich stark, wobei die Simulation mit Bäumen eine etwas deutlichere Kanalisierung der Steine in den Tiefenlinien aufzuweisen scheint.

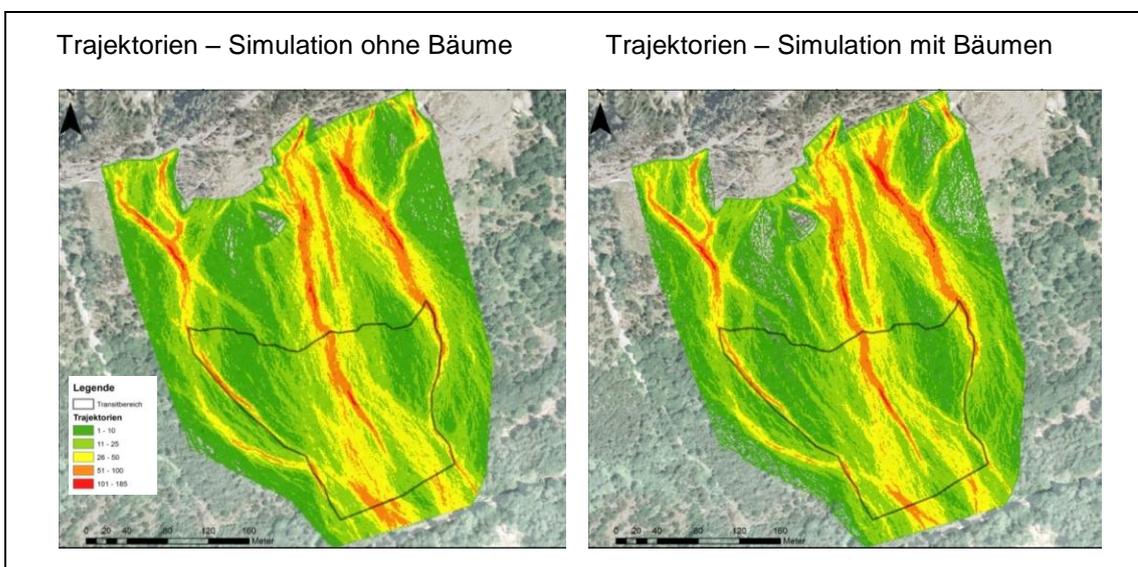


Abb. 44: Simulierte Trajektorien ohne Bäume (links) sowie mit Bäumen (rechts)

5.11 Maximale Sprunghöhen

Die Verteilung der simulierten maximalen Sprunghöhen ist in Abbildung 45 zu sehen.

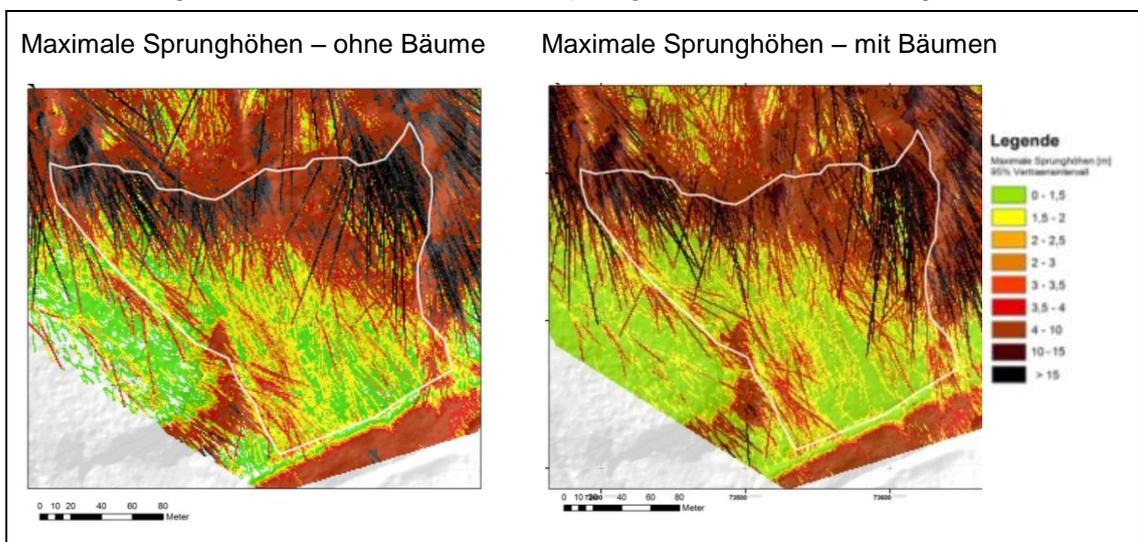


Abb. 45: Simulierte maximale Sprunghöhen ohne Bäume (links) sowie mit Bäumen (rechts)

Auch hier ergibt sich mit und ohne Einbezug des Waldes ein ähnliches Bild. Besonders große Sprunghöhen werden für den oberen Bereich des Projektgebietes errechnet, in dem die Steine vom höher gelegenen Dolomitvorbau aus auf die Fläche springen. Hier liegen die maximalen Werte der Sprunghöhen größtenteils im Bereich zwischen 4m und 10m. Weiter hangabwärts nehmen die maximalen Sprunghöhen ab, wobei sich im östlichen Teil der Bereich mit großen Sprunghöhen weiter den Hang hinunter zieht. Die Reduktion der Sprunghöhen erfolgt bei der Simulation mit Bäumen schneller als bei der ohne Wald. Unter Einbezug des Waldes werden allgemein kleinere Sprunghöhen errechnet. Im unteren Teil werden maximale Sprunghöhen zwischen 1m und 2m errechnet, wobei an den Rändern des Projektgebietes durchaus höhere Werte simuliert werden. Auffällig sind zudem einige sehr große errechnete Sprunghöhen im Übergangsbereich zum eingezeichneten Transitbereich, die mitunter Werte von über 15m Höhe erreichen.

Teil C) Gegenüberstellung der Resultate aus Simulation und dendrogeomorphologischer Studie

5.12 Trajektorien - Wiederkehrdauern

Die simulierten Trajektorien und die Wiederkehrdauern aus den dendrogeomorphologischen Untersuchungen sind einander in Abb. 46 gegenübergestellt. Hierbei zeigt sich, dass insbesondere die aus den Buchen rekonstruierten Wiederkehrdauern hinsichtlich der räumlichen Muster mit den simulierten Trajektorien übereinstimmen: In beiden Darstellungen ist eine große Steinschlaghäufigkeit im mittleren oberen Bereich der Fläche zu finden. An den Rändern der Fläche sind vergleichsweise geringe Aktivitäten zu sehen. Das seitliche Eintreten aus dem westlichen Graben zeigt sich ebenso in beiden Darstellungen. Der in den Wiederkehrdauern mittig zu findende Bereich mit geringer Aktivität wird durch die simulierten Trajektorien plausibel: Die Trajektorie verläuft hier entlang einer Runse zwischen den Bäumen, die nur wenige Meter von dieser entfernt stehen, hindurch.

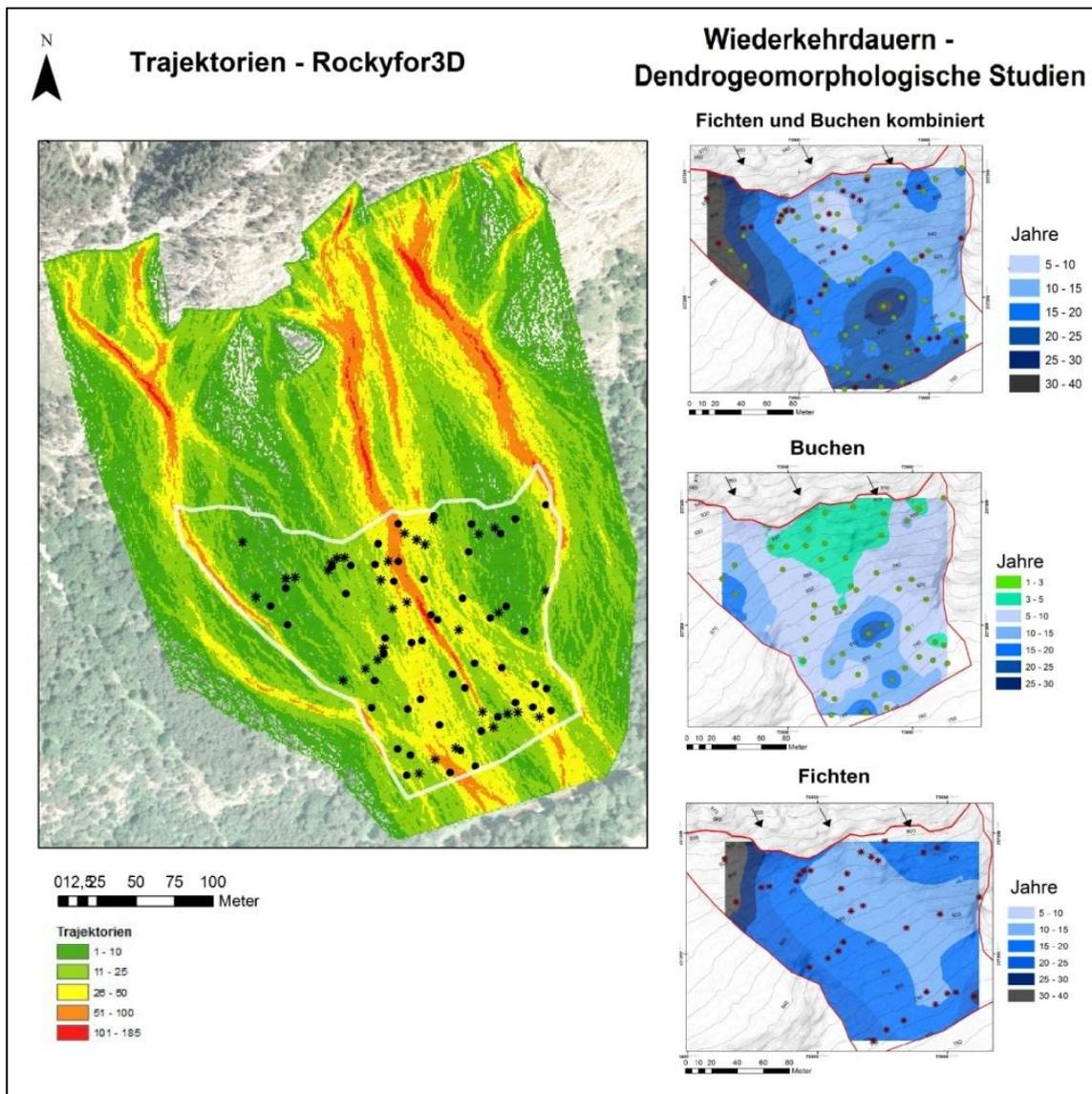


Abb. 46: Simulierte Trajektorien (links) und Wiederkehrdauern aus Jahrringdaten (rechts) im Vergleich

5.13 Maximale Sprunghöhen

Die räumliche Verteilung der maximalen Sprunghöhen aus der Simulation und aus der Identifikation sichtbarer Schäden am Stamm ergibt ein übereinstimmendes Bild (Abb.47). Lediglich an der westlichen und östlichen oberen Ecke des Perimeters ergeben sich Unterschiede. Während im westlichen Eck an den Bäumen hier besonders große Sprunghöhen nur am obersten Rand des Perimeters abgelesen werden können, zeigen die Simulationsergebnisse eine etwas langsamere Abnahme der Werte zum Inneren der Fläche hin. Im östlichen oberen Eck ergeben sich aus der Analyse der Steinschlagschäden relativ niedrige Sprunghöhen, wohingegen die Simulation hier besonders große Werte zeigt. Die deutlichsten Unterschiede sind bei den absoluten Werten zu erkennen. Während an den Bäumen maximale interpolierte Werte bei 3,5m

bis 4m liegen, ergeben sich aus der Simulation im oberen Bereich flächig Werte zwischen 4m und 10m. Für einige Trajektorien werden Werte über 10m errechnet.

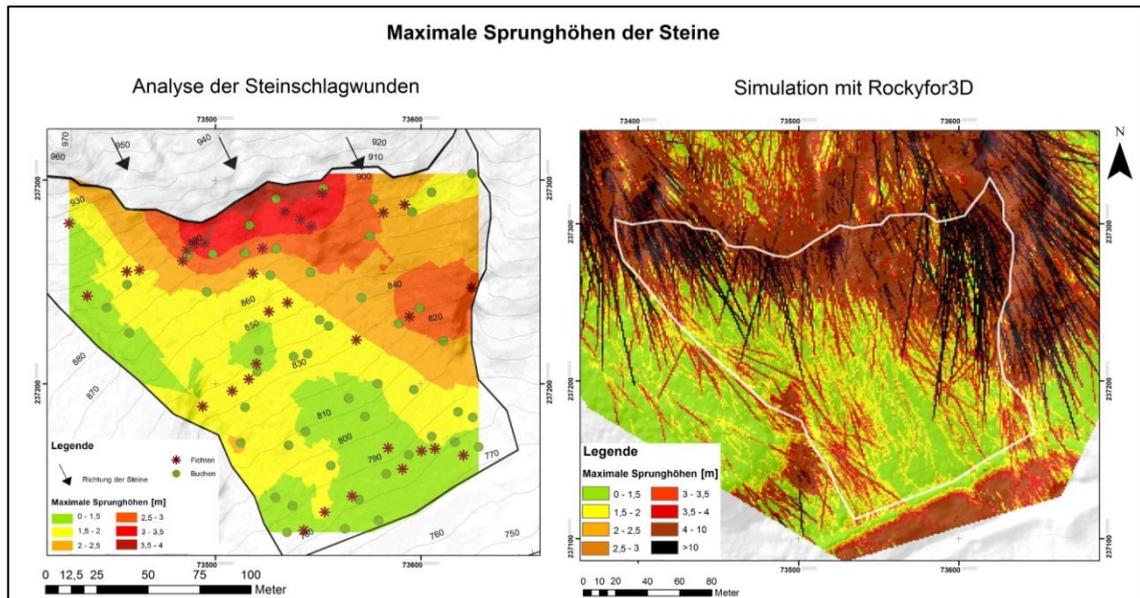


Abb. 47: Maximale Sprunghöhen der Steine aus der Analyse der Steinschlagwunden (links) und aus der Simulation (rechts)

5.14 Energien – Schadensgrößen an Buchen

Die räumliche Verteilung der auftretenden Energien und der beobachteten Schadensgrößen an Buchen ist in Abbildung 48 dargestellt.

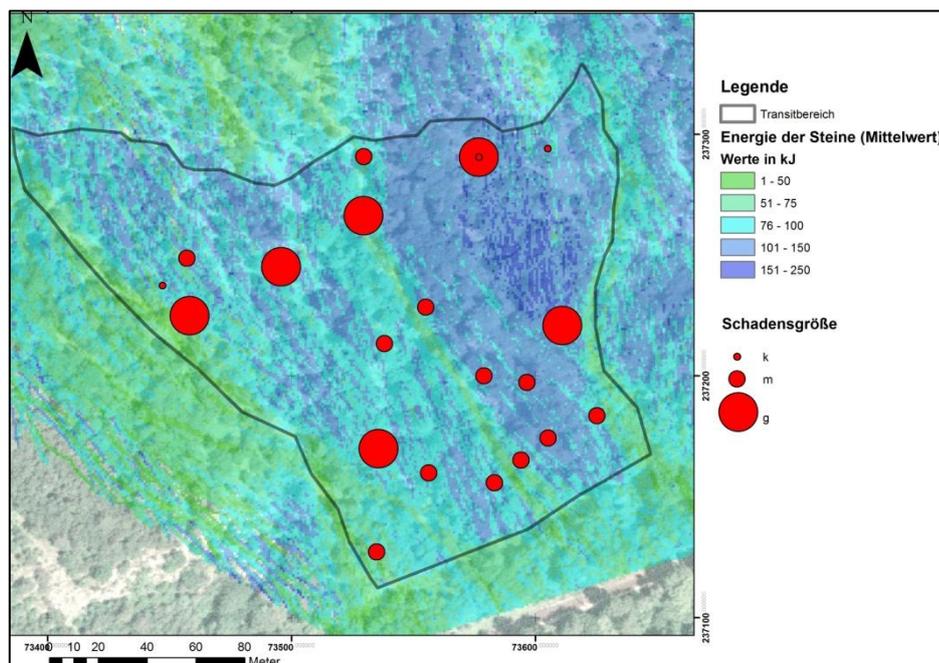


Abb. 48: Energie der Steine und an Buchen beobachtete Schadensgröße (rote Kreise)

Die größten Energien werden im oberen östlichen Teil errechnet. Es erfolgt eine Reduktion der Energien mit der durchlaufenen Waldstrecke. Diese Reduktion ist im westlichen Teil stärker als im östlichen Teil. Die Buchen, an denen vermehrt große Schäden zu finden sind (Erklärung zu den Größenklassen in Kap. 5.7), befinden sich ebenfalls im oberen Teil des Untersuchungsgebietes. Im oberen Teil können jedoch auch Bäume gefunden werden, die vor allem mittelgroße und kleine Schäden aufweisen. In der untersten Baumreihe des Untersuchungsgebietes sind keine Bäume mit vermehrt großen Schäden zu finden.

6 Diskussion

6.1 Allgemeine Methodenkritik

Das Ziel der Arbeit, eine effektive Methode zur Abschätzung von Steinschlag-Frequenzen zu entwickeln, stellt hohe Anforderungen an die Fläche und den Baumbestand. So bestand eine anfängliche Schwierigkeit darin, eine Fläche mit konstanter Steinschlagaktivität sowie gleichmäßig verteilten Fichten und Buchen ohne bedeutende forstliche Eingriffe zu finden. Um systematische Fehler bei der Auswahl der Probestämme zu vermeiden, empfehlen STOFFEL und PERRET (2006) die Probestämme systematisch auszuwählen. Dazu wurden für die beiden untersuchten Baumarten Konzepte entwickelt (Fichte: Transekte, Buchen: Raster), die auf die Ziele der Arbeit abgestimmt sind. An diesen Konzepten strikt festzuhalten, ist allerdings nur bedingt möglich und in manchen Fällen auch nicht zielführend. Abweichungen ergeben sich, wenn:

- die entsprechende Baumart am Probepunkt nicht vorhanden ist (wie die Abwesenheit von Fichten in dem von Laubgehölzen dominierten östlichen Teil des Projektgebietes),
- die Bohrkernqualität sehr schlecht ist (starke Holzzersetzung, Kernfäule),
- der Baum die Prozesse am Standort offensichtlich nicht repräsentativ wieder spiegelt (z.B. durch die Abschirmung eines direkt in der Falllinie darüber stehenden Nachbarbaumes; durch Beeinflussung von anderen geomorphologischen Prozessen wie Lawinen und Wildbachprozessen).

In den oben genannten Fällen wurde der nächste geeignete Baum beprobt, was bei den Fichten in Einzelfällen zu einer Abweichung von bis zu 45m vom ursprünglichen Transekt führte. Auch war es mangels geeigneter Probestämme nicht möglich, alle zehn Meter einen Baum auszuwählen, sodass mehrere Probepunkte ausgelassen werden mussten. Ein ähnliches System wie in dieser Arbeit verwenden MOYA *et al.* (2010). Die Autoren beproben die steinschlaggeschädigten Bäume innerhalb eines hangparallelen Streifens. Sollen Frequenzen nicht über den gesamten Hang rekonstruiert werden, sondern nur in einem definierten Bereich, so bietet sich dieses System an. Auch bei dem für die Auswahl der Buchen angestrebten Raster von 20x20 Metern mussten Abweichungen hingenommen werden. Es wurde jedoch stets auf eine möglichst homogene Verteilung der Bäume auf der Fläche geachtet. Ein Vorteil der Verwendung von Transekten liegt darin, dass ein genaues und zugleich effektives Vermessen der Baumstandorte mit einfachsten Mitteln möglich ist. Letztendlich muss für jeden Einzelfall ein individuelles System zur Probebaumauswahl gefunden werden, das an den

vorhandenen Baumbestand angepasst ist und sich an den Zielen der Untersuchung orientiert. Dabei systematisch vorzugehen und die Bäume nicht in Abhängigkeit von sichtbaren Schäden auszuwählen, hat sich für eine objektive Einschätzung der Trajektorien-Frequenzen bewährt.

Im Untersuchungsgebiet ist die Holzqualität der Buchen im Gegensatz zu den oftmals von Kernfäule betroffenen Fichten ausgesprochen gut. Ähnlich wie in SCHNEUWLY (2003) beschrieben, stellt daher die Stammfäule ein Problem bei der Entnahme von Bohrkernen dar, sodass von der Probenentnahme bei etwa jeder zehnten Fichte wegen zu starker Kernfäule abgesehen wurde. Häufig ist die Kernfäule nur wenig fortgeschritten, sodass eine Probe entnommen wurde, welche jedoch in vielen Teilstücken geborgen werden musste. Ein sofortiges Fixieren der Teilstücke mit Maler-Klebeband in korrekter Reihenfolge stellt sicher, dass diese später in korrekter Reihenfolge auf den Bohrprobenträger aufgeklebt werden können. Ist die Holzqualität im Bohrkern über Jahre hinweg besonders schlecht und kein geeigneter weiterer Probebaum in der Nähe, so empfiehlt es sich die Anzahl dieser nicht verwendbaren Jahrringe im Feld abzuschätzen und festzuhalten. Dies erleichtert die spätere Datierung im Labor.

Die schlechte Bohrkernqualität wirkt sich auch auf die Darstellung der Steinschlag-Aktivität aus. Der Ansatz aus STOFFEL *et al.* (2005a), eine Steinschlag-„rate“ anzugeben, die den Durchmesser der Bäume und damit die Trefferwahrscheinlichkeit mit einbezieht, kann in dieser Arbeit keine Anwendung finden. Die Rekonstruktion der ältesten Ereignisse am jeweiligen Baum, die in den Jahrringen nahe dem Mark zu finden wären, ist oft wegen Kernfäule unmöglich. Somit ist die Methode in dieser Arbeit nicht anwendbar.

Es wird davon ausgegangen, dass mit den erhobenen Daten lediglich die Aktivität über die letzten 40 Jahre (Klasse C in Tab. 5) zuverlässig abgeschätzt werden kann. Für die weiter zurückliegenden Jahrzehnte wird von einer Unterschätzung ausgegangen.

Die Gründe hierfür sind:

- Durch die gezielte Bohrkernentnahme in der Nähe sichtbarer Wunden sind jüngere Schäden vermehrt im Bohrkern abgebildet.
- Wegen zunehmend schlechterer Bohrprobenqualität zum Kern hin (Fäule) sind Hinweise auf ältere Ereignisse schwer zu erkennen.
- Die Stichprobenanzahl nimmt ab, je weiter die Ereignisse zurückliegen.

Die Vermutung, dass mit dem verwendeten Beprobungskonzept die Anzahl älterer Schäden unterschätzt wird, kann durch die Korrelationsanalyse (Abb.32) untermauert werden. Da die Entnahme der Bohrproben gezielt in der Nähe der oberflächlich sichtbaren Steinschlagwunden durchgeführt wird, kann der folgende Schluss gezogen werden: Jüngere, an der Stammoberfläche sichtbare Treffer werden durch das angewendete System der Bohrkernentnahme zuverlässiger und vermehrt identifiziert. Ältere, äußerlich nicht mehr sichtbare Treffer hingegen werden unterschätzt. Dieser Umstand macht den scheinbaren Aufwärtstrend der Aktivität plausibel. Im Untersuchungsgebiet kann daher trotz des scheinbaren Aufwärtstrends von einer konstanten Steinschlagaktivität ausgegangen werden.

Die Erfahrungen dieser Studie bestätigen, dass eine Infektion durch holz-zerstörende Pilze infolge von Steinschlagwunden bei den Baumarten unterschiedlich stark erfolgt. Fichten können sich gegen eindringende Pilze weniger effektiv abschotten als Buchen (DUJESIEFKEN, 2009). Daher sind Buchen von steinschlagbedingter Kernfäule deutlich seltener betroffen als Fichten.

Um die Steinschlagsituation möglichst exakt darzustellen, müssen an den Jahringdaten Korrekturen vorgenommen werden. Da nahe an sichtbaren Wunden gebohrt wurde, bilden die Jahringbreitenkurven oft Einflüsse des Steinschlaggeschehens ab, die klimatische Schwankungen überlagern. Eine Kreuzdatierung anhand der Jahringbreitenkurven wird dadurch erschwert, weil klimatisch bedingte Zuwachsschwankungen in den Hintergrund treten. Die im Rahmen dieser Arbeit entnommenen Bohrproben zeigen größtenteils ein sensitives Jahringbild. Dies bedeutet, dass die Abfolge der Jahrringe sowie die Ausprägung der einzelnen Jahresringe selbst eine deutliche Variation zeigen. Können einzelne Jahrringe mit auffälligem Erscheinungsbild, wie z.B. großem Spätholzanteil, Färbung (Dichte) des Spätholzes etc., gefunden werden, so sind diese meist in allen Proben des Baumes zu sehen. Die Kreuzdatierung der Fichtenproben eines Baumes untereinander erfolgte daher am zuverlässigsten über den direkten optischen Vergleich der Bohrkerne. In den entnommenen Bohrkernen sind sehr wenige falsche Jahrringe (Dichteschwankungen) zu finden. Auch wurden nur in Ausnahmefällen fehlende Jahrringe beobachtet. Korrekturen der Jahringbreitenkurven waren in der Regel nur in zwei Fällen nötig: A) Wurde zu nahe an der Wunde gebohrt oder eine schon verwachsene Wunde getroffen, fehlen unter Umständen Jahrringe. B) Durch Messfehler bei mehrmaligem Messen eines Jahrringes oder wenn der Mausclick nicht in einen Messwert vom System umgesetzt wird, werden zu viele oder zu wenige Jahr-

ringe gemessen. Im Fall A) können fehlerträchtige Stellen durch bloßes Betrachten der Proben schnell auffindig gemacht werden. Fehler durch den Fall B) würden entfallen, wenn auf den Schritt des Vermessens verzichtet würde. Bei zukünftigen Studien könnte deshalb überlegt werden, ob nicht auf das zeitintensive Vermessen der Jahrringbreiten zugunsten von zusätzlichen Probepunkten verzichtet werden kann. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass Zuwachs-Änderungen für die Identifikation von Ereignissen keine große Rolle spielen. Dies ist bei der Rekonstruktion von Steinschlagereignissen mit Fichten und Lärchen zumeist der Fall. So arbeiten PERRET *et al.* (2006) bei der Rekonstruktion ausschließlich mit TRD und Steinschlagmarken. Auch SCHNEUWLY *et al.* (2009b) finden Traumatische Harzkanalreihen in allen untersuchten Proben und folgern, dass TRD die am häufigsten zu findende Reaktion von Lärchen und Fichten auf Steinschlag ist. Die vorliegende Arbeit bestätigt TRD als wichtigste Wuchsreaktion der Fichte auf Steinschlagschäden. Diese Überlegungen müssen sich letztlich an der geforderten Genauigkeit der Datierung (jahrgenaue Datierung von Ereignissen erforderlich?) und an den Zielen der Arbeit orientieren. An der räumlichen Verteilung der Wiederkehrdauern kann gezeigt werden, dass die Interpolationen bei mehreren Messpunkten (Buche) ein räumlich differenzierteres Bild ergeben. Ergäbe sich durch das Weglassen der Vermessung der Proben die Möglichkeit, mehr Bäume pro Flächeneinheit zu untersuchen, würde dies vermutlich zu einer detaillierteren räumlichen Darstellung der Wiederkehrdauern führen.

Einige wenige Bohrproben mussten von der weiteren Analyse ausgeschlossen werden. Dies ist der Fall beim gesamten Baum 22, der mit einem BHD von 72cm einer der durchmesserstärksten Bäume auf der Fläche ist. Er ist allerdings dermaßen von einer Kernfäule betroffen, dass der längste Bohrkern nur 31 Jahrringe aufweist. In diesen 31 Jahrringen sind wegen der großen Trefferfläche (großer BHD) unverhältnismäßig viele Ereignisse abgebildet, was zu deutlich unterschätzten Wiederkehrdauern führt. Zwei weitere Bohrkern wurden ausgeschlossen, die deutlich mehr Jahrringe abbilden als die anderen Bohrkern des zugehörigen Baumes. Würden diese Kerne zur Auswertung verwendet, ergäben sich zu lange Wiederkehrdauern, weil mit einem Alter gerechnet würde, das die anderen Kerne desselben Baumes nicht abbilden und daher auch keine Steinschlagtreffer für diesen Zeitraum gefunden werden können.

Die Kreuzdatierung der Buchenproben war vergleichsweise einfach. Hier ermöglichten deutlich ausgeprägte Muster innerhalb der Jahrringbreitenkurven (Weiserjahre) eine exakte Datierung der Jahrringe. Ein weiterer Grund für die einfachere Datierung liegt

darin, dass die Proben allesamt von der dem Steinschlag abgewandten Stammseite stammen.

Die Tatsache, dass Steinschlagwunden bei den meisten Baumarten mit zunehmendem Alter unsichtbar werden, ist als Einschränkung dendrogeomorphologischer Methoden bekannt (GSTEIGER, 1989; STOFFEL und PERRET, 2006; MOYA *et al.*, 2010). Ein Großteil der Wunden wird durch die regelmäßige Bildung und Abstoßung von Borkenschuppen verschleiert und ist oberflächlich nicht mehr sichtbar (STOFFEL und PERRET, 2006). Daher ist mit dem gewählten Konzept der Bohrkernanalyse an der Fichte trotz großer Sorgfalt eine beachtliche Dunkelziffer an Wunden zu erwarten, die nicht identifiziert werden können. Allgemeine Aussagen zum Anteil nicht mehr sichtbarer Wunden sind kaum möglich, denn dies ist von zahlreichen Faktoren abhängig. Hier spielen neben der ursprünglichen Wundgröße (GSTEIGER, 1989) zahlreiche Faktoren eine Rolle. Dies sind die artspezifischen Fähigkeiten der Bäume Wunden zu überwinden, sowie die Vitalität des Einzelbaumes, Struktur der Rinde, jährliche Zuwächse, Baumalter etc. Bisherige Angaben in der Literatur können daher kaum verallgemeinert werden. Es scheint jedoch, dass Baumarten mit dicker, grobschuppiger Rinde Steinschlagwunden effektiver verschleiern als solche mit dünner, glatter Borke. (STOFFEL und PERRET, 2006) Beispielsweise dürften somit bei Lärchen und Kiefernarten nur wenige Wunden sichtbar bleiben, mehr bei Fichten und noch mehr bei Weißtannen (*Abies alba* Mill) und Buchen. Auch BAUMGARTNER (2002) stellt dies in seinen Studien fest. So vermutet er, dass an Ebereschen (*Sorbus aucuparia* L.), mit ebenfalls glatter Borke, bei gleicher Steinschlaghäufigkeit mehr Schäden identifiziert werden können als bei Fichten.

SCHNEUWLY *et al.* (2009a) verweisen auf eine beachtlich verzögerte Bildung von TRD mit zunehmender Distanz von der Wunde. Demnach können Bohrkernanalysen die saisonale Schwankung der Steinschlagaktivität nur abbilden, wenn die Entnahme sehr nah an der Wunde erfolgt. Nur dann sind Kallusgewebe oder der Zeitpunkt der ersten Bildung von TRD zu sehen. Dies ist in dieser Arbeit lediglich bei 17 der insgesamt 144 Fichten-Bohrkerne der Fall. Exakt den Wundrand bei einer Zuwachsbohrung zu treffen, ist schwierig. Es muss davon ausgegangen werden, dass viele Proben nicht zur Bestimmung der Saison des Steinschlagtreffers herangezogen werden können. Ist eine Erfassung mit monatlicher Präzision das vorrangige Ziel, so sollte mit Stammscheiben gearbeitet werden, die die gesamte Wunde abbilden.

6.2 Methodenkritik: Zähl-Verfahren an Buchen

Ein zentrales Thema dieser Arbeit ist die Entwicklung einer effektiven Methode zur Abschätzung von Steinschlag-Frequenzen. Hierzu bietet sich die Baumart Buche insbesondere an, da ein Großteil der Wunden an der Stammoberfläche sichtbar bleibt und die Buche ein weites Verbreitungsgebiet in Europa besitzt.

Für eine Abschätzung, wie viele der ursprünglichen Schäden auf der Stammoberfläche von Buchen sichtbar bleiben, existieren kaum Daten. GSTEIGER (1989) gibt nach seinen Untersuchungen von Stammscheiben an, dass durch die Zählung sichtbarer Wunden bei Buchen lediglich 41% aller Schäden erfasst würden. Es finden sich hier keine Angaben zu den Methoden, wie Steinschlagschäden als solche in dieser Untersuchung identifiziert wurden. Es wird somit nicht deutlich, ob die niedrigen Werte in dieser Arbeit durch vergleichbare Methoden erzielt wurden und ob die in dieser Arbeit beschriebenen Rindenstrukturen auf Steinschlag zurückgeführt wurden. STOFFEL (2005b), der in seinen Untersuchungen die oberflächlich sichtbaren Wunden ähnlich wie in dieser Arbeit beschrieben identifiziert (lt. mdl. Mitteilung), findet bei der Analyse von 114 Stammscheiben einer Buche heraus, dass 75% der Schäden auf der Stammoberfläche sichtbar bleiben. STOFFEL und PERRET (2006) folgern, dass wegen der dünnen Rinde und der fehlenden Bildung von Borkenschuppen bei *Fagus sylvatica* die meisten Verletzungen auch von außen sichtbar bleiben. Durch das einfache Zählen dieser Verletzungen, kombiniert mit der Bestimmung des Alters, sei eine realistische Einschätzung der Steinschlag-Frequenz möglich. Dieser Ansatz wird in dieser Arbeit aufgegriffen und es kann gezeigt werden, dass eine Abschätzung der Steinschlag-Frequenzen allein über sichtbare Schäden und Informationen zum Alter der Bäume bei Buchen möglich ist. Nach der in dieser Arbeit gewonnenen Einschätzung bleiben theoretisch alle Steinschlagwunden durch Narben auf der Rinde sichtbar, auch wenn die Spuren mit zunehmendem Alter undeutlicher werden. Obwohl dieser Aspekt nicht durch eine Stammscheibenanalyse untersucht wurde, wird bei Bäumen mit wenigen Treffern vermutet, dass nahezu alle Treffer sichtbar bleiben. Bei den stark beeinflussten Bäumen des Projektgebietes dieser Untersuchung bleiben schätzungsweise ~90% der Treffer sichtbar. Ein möglicher Grund, dass die Spuren bei Buchen nicht mehr sichtbar sind, kann darin liegen, dass Treffer mitunter wiederholt genau an der gleichen Stelle erfolgen (s. Abb. 14b). Sind beispielsweise mehrere kleine Treffer auf der Oberfläche sichtbar, und trifft erneut ein großer Stein auf diese Stelle, so werden die Spuren der kleinen Treffer „verwischt“ und sind nicht mehr zu erkennen. Im Rahmen der Feldaufnahmen verschleierte auch Moos am Stammfuß einige Wunden, die durch Freilegung und Tasten dennoch identifiziert werden konnten. Für Strukturen, die ohnehin schon

schwierig zu erkennen sind, wird es nahezu unmöglich, diese bei starkem Moosbewuchs zu identifizieren. Auch Faulstellen, die eine Höhle im Stamm bilden und nicht mehr überwallt werden, verschleiern Steinschlagnarben.

Unter dem Gesichtspunkt, die Studien möglichst effektiv zu gestalten, wurde untersucht, ob eine Abschätzung der Steinschlag-Frequenzen ohne Zuwachsbohrung möglich ist. Für die Berechnung von Wiederkehrdauern anhand von Steinschlagnarben muss das Alter der Bäume bekannt sein. Auf der Projektfläche wurde versucht, ob eine Altersabschätzung mit forstlichen Ertragstafeln über die Eingangsgröße BHD möglich ist. Wie in Abbildung 29 dargestellt, besteht nur ein schwacher Zusammenhang des Durchmessers mit dem Alter der Bäume auf der Fläche. Für die untersuchte Fläche kann daraus gefolgert werden, dass eine Altersbestimmung über Ertragstafeln keine zuverlässige Altersbestimmung erlaubt. Anders könnte die Situation jedoch bei aufgeföresteten Beständen sein. Besonders wenn die Aufförestung dokumentiert wurde, ist eine sehr effiziente Bestimmung der Frequenzen möglich. Auch besteht die Möglichkeit, dass in anderen Waldbeständen eine deutlichere Korrelation zwischen BHD und Baumalter gefunden werden kann.

Bei einem Vergleich der auf der Fläche festgestellten Wunden an Buchen und Fichten fällt auf, dass an Buchen deutlich mehr Steinschlagnarben zu finden sind. Die Wundgröße fällt aber meist kleiner aus. Ein Grund hierfür liegt wohl zum Teil darin, dass das Holz der beiden Baumarten deutliche Unterschiede in der Härte aufweist. Ein Stein wird tiefer in das weiche Fichtenholz und weniger tief in das harte Buchenholz eindringen. Der Stoßprozess erfolgt somit auf unterschiedliche Weise. Bei den Fichten kann durch das weiche Holz mehr Energie in einer Deformation des Holzkörpers abgebaut werden. Der Stoß bei den Buchen erfolgt vergleichsweise elastisch und es sind größere Energien nötig, um den Holzkörper zu verformen. Die Energie, die aufgebracht werden muss, um Schäden bis in den Holzkörper zu verursachen, variiert daher je nach Baumart. Bei einem vergleichbaren Stoß sind tiefere Schäden an der Fichte durch eine Verformung der Holzfasern und kleinere, oberflächliche Schäden an der Buche zu erwarten.

Weitere heimische Baumarten, an denen die Methode vermutlich sinnvoll angewendet werden könnte, sind jene Baumarten, die (zumindest im Jungstadium) eine glatte, nicht schuppige Rindenstruktur aufweisen. Hier kommen Berg- und Spitzahorn (*Acer pseudoplatanus* L., *Acer platanoides* L.), Eberesche (*Sorbus aucuparia*), Mehlsbeere (*Sorbus aria*), Weißtanne (*Abies alba* Mill.), Birken (*Betula spec.*) und Esche (*Fraxinus*

excelsior L.) in Frage. Üblicherweise sind diese Baumarten jedoch keine Hauptbaumarten unserer heimischen Wälder an Steinschlaghängen, sondern treten nur vereinzelt beigemischt auf.

Es stellt sich die Frage, wie es zu dem deutlichen Unterschied zwischen den aus den Buchendaten und den Fichtendaten errechneten absoluten Wiederkehrdauern kommt. Bei den Buchen wurde eine etwa halb so lange mittlere Wiederkehrdauer wie bei den Fichten ermittelt, was zu folgenden Hypothesen führt:

➤ **„Die Datensätze der Baumarten reichen unterschiedlich weit zurück und bilden die Steinschlag-Aktivität aus unterschiedlichen Zeiträumen ab.“**

Es wurde anfänglich vermutet, dass die Buchen deutlich jünger sind und eine steigende Steinschlagaktivität der jüngeren Zeit widerspiegeln. Diese Hypothese muss komplett verworfen werden, da die Datensätze ähnlich weit zurückreichen und die Bäume ein nahezu identisches Durchschnittsalter besitzen. Ebenso bestehen an einer tatsächlich steigenden Aktivität, wie in Punkt 4 ausgeführt, erhebliche Zweifel.

➤ **„Mit dem Beprobungs-Konzept von drei bis vier Bohrkernen auf etwa 0,5m, 1m und 1,5m, jeweils hangaufwärts, sowie ein Bohrkern hangabwärts, ist nur etwa die Hälfte aller Ereignisse bei Fichten rekonstruierbar.“**

Dass mit dem Konzept nicht alle Ereignisse erfasst werden können, steht außer Frage. Dass lediglich die Hälfte aller Ereignisse in den Bohrkernen abgebildet ist, scheint jedoch unwahrscheinlich. Dagegen spricht, dass 93% (Buche) bzw. 88% (Fichte) der Verletzungen unter 2m Höhe am Stamm liegen. Der Großteil aller Wunden in dieser Studie befindet sich demnach in einem Bereich, den die Bohrkernanalyse abdeckt. Auch sind die einzelnen Ereignisse häufig in zwei oder allen Bohrkernen zu sehen, was folgern lässt, dass ein Großteil der Steinschlagnarben über die Bohrkernanalyse identifiziert werden kann.

➤ **„Das Vorgehen, wie ein Ereignisjahr rekonstruiert wurde, führt zu Unterschätzungen der Anzahl an Steinschlagereignissen.“**

In dieser Arbeit wird aus einem Hinweis im Bohrkern bei Fichten auf ein Ereignisjahr mit einem einzigen Steinschlagereignis geschlossen. Treten mehrere Steinschläge innerhalb eines Jahres an einem Baum auf, so werden diese mit der verwendeten Methode nicht identifiziert. Auch dieser Umstand mag zu geringeren Wiederkehrdauern beitragen, ist aber wohl kaum allein für den deutlichen Unterschied der Wiederkehrdauern für beide Baumarten verantwortlich.

- **„Die schlechte Holzqualität einiger Fichten verhindert die Identifikation von weit in der Vergangenheit liegenden Ereignissen. Dies führt zu einer Unterschätzung der Anzahl der Ereignisse.“**

Die Hypothese wird durch diese Arbeit bestätigt. Anders als zunächst vermutet, können durch die Bohrkernanalyse 2% weniger Schäden rekonstruiert werden, als durch die Zählung sichtbarer Verletzungen an den Fichten. Werden die Bäume mit schlechter Bohrkernqualität (Kernfäule) gesondert betrachtet, so zeigt sich, dass etwa 1/3 weniger Treffer im Bohrkern abgebildet sind als Schäden an der Stammoberfläche gezählt werden können. Bei den Bäumen mit guter Bohrkernqualität, die das Mark oder den marknahen Bereich abbilden, können hingegen mehr Schäden im Jahrringbild rekonstruiert als am Stamm gezählt werden. Dieser Sachverhalt trägt einen Teil zur Unterschätzung absoluter Steinschlagfrequenzen durch die Bohrkernanalyse an Fichten bei.

- **„Durch die Bildung von TRD über mehrere Jahre hinweg wird die Anzahl der Ereignisse unterschätzt.“**

Des Öfteren werden die TRD über mehrere Jahrringe hinweg nach dem Ereignis gebildet (BOLLSCHWEILER, 2007). SCHNEUWLY *et al.* (2009b) finden in etwa 55% der Fälle noch 5 Jahre nach der Verwundung TRD. Es ist jedoch möglich, dass innerhalb einer Gruppe von Jahrringen mit kontinuierlichen TRD trotzdem Jahrringe gefunden werden, die keine Harzkanäle aufweisen. Bislang ist nicht erforscht, wie viele Jahrringe ohne TRD vorhanden sein müssen, damit bei erneutem Einsetzen der Traumatischen Harzkanalreihen auf ein Ereignis geschlossen werden kann. Innerhalb dieser Arbeit wird nur bei erneutem Einsetzen von extrem dichten TRD von einem neuen Ereignis ausgegangen, wenn mindestens zwei Jahre ohne Harzkanalreihen davor liegen. Dies könnte in Einzelfällen zur Unterschätzung der Wiederkehrperioden bei Fichten beitragen.

- **„Da Buchen eine dünnere, gegenüber Steinschlag empfindlichere Rinde als Fichten besitzen, kommt es schon bei Steinen mit geringen Energien zu einer Schädigung des Kambiums bei Buchen, während die gleichen Steine die Fichten unversehrt lassen.“**

Die Berechnungen anhand der Fichtenproben würden demnach Steinschläge mit geringen Energien unterschätzen. Diese Steine hätten niedrige Geschwindigkeiten oder geringe Masse. Für diese These spricht, dass diese kleinen Steine mit Durchmessern im Bereich von einigen Zentimetern häufig im Unter-

suchungsgebiet zu finden sind. Auch wird diese These durch den niedrigeren Median der Trefferhöhen bei Buchen im Vergleich zu den Fichten unterstützt. Steine mit niedriger Energie bewegen sich rollend oder nur mit kleinen Sprüngen fort und hinterlassen daher vermehrt Spuren in geringer Höhe. Es wird vermutet, dass dieser Effekt den größten Anteil zur Differenz der mittleren Wiederkehrdauern beiträgt.

- **„Bei der beschriebenen Zählung der Treffer-Anzahl an Buchen kommt es zu einer Überschätzung, weil ein Stein beim Aufprall zwei oder mehr voneinander getrennte Verletzungen hervorruft.“**

Multiple Wunden durch einen Treffer werden durch die bloße Zählung als mehrere Ereignisse gewertet. Ebenfalls führen herabfallende oder peitschende Äste benachbarter Bäume leicht zu mechanischen Verletzungen, die mit echten Steinschlagschäden verwechselt werden können. Daher ist eine mögliche Überschätzung absoluter Treffer-Zahlen nicht auszuschließen. Zieht man jedoch in Betracht, dass, wie oben im Text ausgeführt nicht alle Treffer auf der Stammoberfläche sichtbar bleiben, relativiert sich diese Überschätzung.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Methode, das Alter einer Verletzung über das Verhältnis von Wundhöhe zu Wundbreite abzuschätzen sowie steinschlagbedingte Schäden von Schäden anderer Herkunft zu unterscheiden, ist mit Vorbehalten verbunden. Zum einen muss ein ursprüngliches Verhältnis frischer Wunden von 1:1 angenommen werden können. Bei Stämmen mit großem BHD, wie auf der untersuchten Fläche, ist dies vertretbar. Für Studien aus anderen Gebieten, wie etwa aus den Pyrenäen (MOYA *et al.*, 2010), wäre dieser Ansatz nicht möglich. Hier wurden vorwiegend dünne Bäume (mittlerer BHD~10cm) untersucht und es wurde von longitudinalen Strukturen berichtet. Zudem ist die Blockgröße in Relation zum BHD entscheidend für die Form der Steinschlagwunden. Treffen große Blöcke (Blockdurchmesser > BHD) auf verhältnismäßig dünne Stämme, so entstehen zwangsläufig longitudinal ausgedehnte Wunden.

6.3 Steinschlagprozesse im Projektgebiet

Im Folgenden werden die durch dendrogeomorphologische Methoden rekonstruierten Steinschlagprozesse diskutiert. Die gefundenen Resultate besitzen vorerst nur für das Untersuchungsgebiet mit kalkhaltigem Gestein und vergleichsweise kleinen Komponentengrößen Gültigkeit.

Obwohl der älteste datierte Jahrring aus dem Jahr 1761 stammt, kann mit den erhobenen Daten nur eine zuverlässige Abschätzung der Aktivität über die letzten 40 Jahre (Klasse C, siehe Kapitel 5.4) erfolgen. Die Daten werden dahingehend interpretiert, dass die Steinschlagaktivität in Klasse (B) nur um den Faktor 1,4 unterschätzt wird, da noch einige Wunden dieser Jahrzehnte sichtbar sind. In Klasse (A) wird die Aktivität deutlicher unterschätzt (Faktor 2,5), weil die Steinschlagnarben nur noch in Ausnahmefällen sichtbar sind. Die meisten im Bohrkern abgebildeten Wunden stellen in dieser Klasse somit einen Zufallstreffer dar. Mit anderen Methoden, wie der Entnahme von Stammscheiben, könnten auch alte Wunden zuverlässig datiert werden, jedoch ist diese Methode um ein vielfaches arbeits- und zeitintensiver. Flächenhafte Studien sind mit der Entnahme von Stammscheiben kaum möglich und üblicherweise können in Steinschlagschutzwäldern Bäume nicht flächig entnommen werden. In anderen Studien mit Bohrkernen (SCHNEUWLY, 2003) kann ebenfalls ein Aufwärtstrend der Aktivität festgestellt werden, wobei erwähnt werden muss, dass die Ablösebereiche dieser Studie in der Permafrostzone liegen. Eine steigende Aktivität in diesen Bereichen erscheint plausibel. LAFORTUNE *et al.* (1997) (zitiert in STOFFEL und PERRET, 2006) vermuten ebenfalls, dass die jüngere Steinschlagaktivität überschätzt würde, wenn sichtbar verletzte Bäume für Untersuchungen herangezogen, und gleichzeitig ungewollt Proben mit verheilten (unsichtbaren) Wunden von der Studie ausgeschlossen würden. In der vorliegenden Arbeit wird ein systematischer Fehler bei der Auswahl der Probebäume vermieden, indem Bäume entlang des Transektes, und nicht nach äußerlich sichtbaren Schäden, ausgewählt werden. Am Probebaum selbst wird jedoch bevorzugt in der Nähe sichtbarer Wunden gebohrt, mit dem Ziel, diese genau datieren zu können. Durch dieses Vorgehen kann mit relativ wenigen Bohrkernen eine maximale Anzahl an Steinschlagwunden identifiziert werden. Dies ist für das Ziel der Arbeit, eine möglichst realistische Steinschlag-Frequenz zu errechnen, zielführend. Ältere, schon vollständig verheilte Wunden sind oberflächlich nicht mehr zu erkennen und werden deshalb im Bohrkern eher zufällig abgebildet. Würde man strikt systematisch ohne Orientierung an sichtbaren Wunden bohren, so würde der Aufwärtstrend in der Aktivität vermutlich nicht aufscheinen. Kürzlich entstandene Wunden hingegen würden wahrscheinlich unterschätzt. Auch würden Informationen verloren gehen, wie etwa die Saisonalität der Er-

eignisse, weil nur durch Bohrkerne aus unmittelbarer Nähe der Wunde eine Bestimmung des Zeitpunktes der Ereignisse möglich ist.

Die räumliche Verteilung der Wiederkehrdauern kann durch die Interpolationen klar herausgestellt werden. Wie exakt die errechneten Schätzwerte sind, hängt stark davon ab, wie viele Bäume untersucht werden und wie diese auf der Fläche verteilt sind. Aus den gleichmäßig verteilten Buchen lässt sich so eine räumlich differenziertere Interpolation errechnen als aus den in Transekten angeordneten Fichten.

Bei Betrachtung der Wiederkehrdauern wird die von ZINGGELER (1990) betonte Relevanz der Geländeformen bei beiden Baumarten deutlich. Noch oberhalb der untersuchten Fläche werden die Steine durch den rinnenartig ausgeprägten Dolomitvorbau kanalisiert. Die Steine treten größtenteils mittig auf die Fläche und folgen einer flach ausgeprägten Runse hangabwärts. Dieses Muster mit häufigeren Ereignissen im mittleren Teil des Gebietes ist ebenso in den interpolierten Wiederkehrdauern an Fichten und an Buchen zu sehen, wobei die Buchen diesen Effekt viel detaillierter widerspiegeln. Auch zeigen beide Interpolationen eine deutlich höhere Steinschlagaktivität im östlichen Teilbereich als im westlichen. Die Azimute der Schäden an den Bäumen unterstreichen diese Abweichung von der Falllinie. Eine Kanalisierung der stürzenden Komponenten ist durch die rinnenartige Topographie im mittleren und westlichen Teil des Dolomitvorbaues zu erwarten. Hier bewegt sich ein Großteil der Steine lokal begrenzt in der (baumfreien) Runse nach unten. Im östlichen Bereich, wo eine hohe Aktivität beobachtet wird, treffen die Steine im Gegensatz dazu nicht kanalisiert auf die Fläche. Dies trägt vermutlich zu der beobachteten hohen Aktivität bei, denn die Wahrscheinlichkeit für Baumkontakte ist in diesem Bereich groß, weil hier keine baumfreien Runsen zu finden sind. Auch besteht vermutlich ein Ablösegebiet im Bereich des Dolomitvorbaues direkt oberhalb der Untersuchungsfläche (baumfreier Bereich in Abb. 42).

Die Wiederkehrdauern anhand der Buchen zeigen räumliche Muster, die aus den Fichtendaten nicht rekonstruiert werden können: Ein auf den ersten Blick widersprüchlich erscheinender Bereich mit besonders niedrigen Wiederkehrdauern ist im mittleren Teil des Untersuchungsgebietes zu erkennen. Die Datenbasis hierfür besteht aus zwei Bäumen mit Wiederkehrperioden von 23 und 30 Jahren, die orographisch rechts und links nur wenige Meter von der mittleren Runse entfernt stehen. In der Runse selbst finden sich nur sehr vereinzelt junge Bäume, sodass nur wenig seitliche Ablenkung von einer geradlinigen Sturzbahn zu erwarten ist. Daher können die niedrigen Trefferhäufigkeiten im mittleren Teil als kleinstandörtliche Besonderheit dahingehend interpretiert werden, dass die Steine, welche sich entlang der mittleren Runse bewegen, diese nur selten verlassen. Obwohl die Runse nur etwa 1 m tief eingeschnitten ist, wirkt sie wie

ein Sammeltrichter für Sturzmaterial. Bedeutend ist dieser Sachverhalt deshalb, weil er eine wichtige Voraussetzung für dendrogeomorphologische Untersuchungen herstellt: Die Bäume müssen direkt in dem Bereich stehen, in dem der Prozess stattfindet. Andernfalls sind bedeutende Unterschätzungen der Trefferhäufigkeiten zu erwarten.

Anders ist der Fall bei den seitlich begrenzenden Runsen. Hier sind Bereiche hoher Aktivität genau dort zu erkennen, wo die Gräben einen Richtungswechsel erfahren. Beim westlichen Graben fällt der Richtungswechsel mit einer Steilstufe im Gelände zusammen, beim östlichen Graben tritt er genau dort auf, wo der Graben nicht mehr so tief eingeschnitten ist. An beiden Orten treten Steine seitlich in das Projektgebiet ein.

Wie in Punkt 3.3 dargestellt, ist nach Untersuchung stummer Zeugen und Einordnung der aufgefundenen Ablagerungen (nicht kantengerundet) vor allem mit aus den Gräben austretenden Steinschlagprozessen zu rechnen. Dass die beobachteten kurzen Wiederkehrdauern in diesen Bereichen auch durch Gerinneprozesse bedingt sind, erscheint unwahrscheinlich, kann aber nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Für die Synthese der beiden Datensätze der Wiederkehrperioden müssen die an jeder einzelnen Buche beobachteten Wiederkehrdauern mit dem Faktor 2 multipliziert werden. Andernfalls ergibt sich kein sinnvolles Bild, da an den Buchen, wie weiter oben im Text beschrieben, grundsätzlich kürzere Wiederkehrdauern rekonstruiert werden. Die so generierten Mindest-Wiederkehrdauern aus beiden Datensätzen ergänzen sich. Es werden alle oben beschriebenen Muster abgebildet, wenn auch das seitliche Eintreten von Steinen auf die Fläche nicht mehr so deutlich zu sehen ist.

Die Wirkung des Schutzwaldes zeigt sich in den interpolierten Wiederkehrperioden beider Baumarten. Sie ist an der Abnahme der Steinschlag-Frequenzen zum unteren Teil des Projektgebietes hin zu erkennen. Der Effekt ist umso stärker, je länger die von den Steinen durchlaufene Waldstrecke ist. Dass dennoch zahlreiche stürzende Steinschläge im unteren Teil beobachtet werden, liegt wohl daran, dass die Bäume im Transitbereich üblicherweise nicht dazu in der Lage sind, die stürzenden Trümmer zu stoppen und dauerhaft abzulagern. Die auf der Fläche zu erwartenden Steine besitzen Energien, die bei einem Baumkontakt im Normalfall nicht zum Stammbruch führen. Eine Reduktion der Durchmesser zugunsten höherer Stammzahlen würde die Schutzwirkung in diesem Fall vermutlich erhöhen. Dass einzelne Steine dennoch bis zu den Steinschlagnetzen oberhalb der Bahntrasse stürzen, kann durch den Schutzwald im Transitbereich nie gänzlich verhindert werden.

Dass ein Großteil der Bewegungsenergien durch die Baumkontakte abgebaut wird

zeigt sich eindrucksvoll in der nach unten hin abnehmenden räumlichen Verteilung der Wundgrößen. Große Schäden sind im wandnahen Bereich und dort zu finden, wo Steine aus den Gräben auf die Fläche übertreten. Nach dem ersten Baumkontakt setzen die Steine mit verminderter Geschwindigkeit ihren Weg fort. Daher ist plausibel, dass die Geschwindigkeit der stürzenden Trümmer, und nicht die Größe der Sturzkomponenten, für dieses räumliche Muster verantwortlich ist. Trotz zahlreicher zufälliger Einflüsse beim Stoßprozess, wie dem Winkel des auftreffenden Steines, Form und Größe der Kontaktfläche (Kante, Spitze oder Breitseite) und Trefferart (Streifschuss oder Volltreffer), scheint die Größe der Wunden somit ein brauchbarer Indikator für die auftretenden Energien der Steine zu sein.

Die abgeleiteten Sprunghöhen dieser Studie stimmen mit den in bewaldetem Gebiet zu erwartenden Sprunghöhen zwischen 1 und 2m (DORREN *et al.*, 2005) überein.

DORREN *et al.* (2005) kommen zu dem Ergebnis, dass zu erwartende Sprunghöhen in bewaldeten Gebieten deutlich geringer ausfallen als in nicht bewaldeten. Mit zunehmender zurückgelegter Strecke steigt die Wahrscheinlichkeit für einen Baumkontakt. Hierbei wird Energie abgebaut, was im weiteren Bewegungsablauf zu geringeren Sprunghöhen führt. Demnach kann die deutlich erkennbare Abnahme der Sprunghöhen von oben nach unten auf den Effekt des Schutzwaldes zurückgeführt werden. Die besonders hohen Sprunghöhen finden sich in den wandnahen Bereichen, aus denen die Steine vom höher gelegenen Terrain des Dolomitvorbaues gewissermaßen auf die Fläche herab springen. Ebenfalls wird ein Zusammenhang mit der Hangneigung und den beobachteten Sprunghöhen ersichtlich. So sind im steileren östlichen Teil des Gebietes auch besonders große Sprunghöhen zu beobachten. Dieses Ergebnis bestätigt die These von ZINGGELER (1990), dass in Gebieten mit größerer Neigung auch größere Sprunghöhen auftreten. Er verweist darauf, dass die gemessene Sprunghöhe eine Vertikaldistanz darstellt, die automatisch größer wird, wenn das Gelände an Steilheit zunimmt.

Die anhand der Baumverletzungen abgeleiteten Sprunghöhen dürfen nicht als absolutes Maximum aufgefasst werden. Wegen der parabelförmigen Flugbahn der Steine wird die maximale Flughöhe nur an einem Punkt der Flugbahn erreicht, während alle anderen Höhen sowohl im Steigen als auch im Sinken auf der Bahnkurve zustande kommen (ZINGGELER, 1990). Dieser Umstand macht es unwahrscheinlich, dass der Treffer am Stamm genau den höchsten Punkt der Flugbahn dokumentiert. BAUMGARTNER (2002) verweist hierbei auf einen stochastischen Zusammenhang: Je größer die Schadenszahl an einem Baum ist, desto größer ist auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stein am höchsten Punkt seiner Flugbahn einen Schaden am Baum hin-

terlässt. In Gebieten höherer Aktivität ist somit die Wahrscheinlichkeit, maximale Sprunghöhen zu finden, größer.

Beim Vergleich der Höhen der sichtbaren Treffer am Stamm der unterschiedlichen Baumarten ergeben sich auffällige Unterschiede. Dass die Verteilung der an den Buchen beobachteten Sprunghöhen zu den kleineren Trefferhöhen hin verschoben ist, kann vermutlich auf die Anfälligkeit der Buchenrinde für Verletzungen zurückgeführt werden. Kleinere Steine und solche mit geringer Energie bewegen sich bodennah rollend oder in kleinen Sprüngen. Diese Steine hinterlassen sichtbare Spuren auf der Stammoberfläche der Buchen, wohingegen die Stammoberfläche der Fichten bei vergleichbaren Treffern unversehrt bleiben würde.

Dass an den Fichten größere maximale Sprunghöhen festzustellen sind, liegt vermutlich an kleinstandörtlichen Besonderheiten, da die Bäume mit diesen großen Trefferhöhen allesamt im wandnahen Bereich wachsen.

Es ergibt sich eine Übereinstimmung zwischen der saisonalen Verteilung von Steinschlagereignissen im Jahrringmuster mit den Daten der Ereignischronik. Die Arbeit zeigt somit, dass die Bestimmung saisonaler Schwankungen der Steinschlagaktivität über Bohrkernanalysen möglich ist, wenn auch über die Zeit der Vegetationsruhe nicht mit einer monatlichen Präzision. Die in der Ereignischronik dokumentierten Steinschläge bilden auch die Verteilung über die Wintermonate ab. Aus festgestellten Maxima im Dezember sowie im März kann gefolgert werden, dass die in der Südwand früh einsetzende Schneeschmelze bzw. das Tauwetter ein wichtiger Auslöser für Steinschlag ist. Der zweite wichtige Auslöser, sommerliche Regen und Gewitter, kann ebenfalls auch über die Jahrringdaten (Ereignisse im mittleren Frühholz) nachvollzogen werden. Regen als Auslöser ist insbesondere bei zwischendeponiertem Material häufig (KRAUTBLATTER und DIKAU, 2007), welches im Bereich des Dolomitvorbaues oberhalb der Untersuchungsfläche abgelagert ist. Eine untergeordnete Rolle bei der Steinschlagauslösung spielt der Föhn. Dieser erreicht im Raum Innsbruck ein erstes jährliches Maximum in den Monaten April bis Mai. Ein zweites Maximum ist im Oktober und November zu beobachten. (ORTNER, 2010) Obwohl in Einzelfällen eine Steinschlagauslösung durch Wind in der Ereignischronik dokumentiert ist, fallen die Monate der Föhn-Maxima genau mit denen der saisonalen Steinschlag-Minima zusammen. Auf der Projektfläche konnten darüber hinaus Auslösungen durch Gamswild beobachtet werden.

Während die Auslöser der Steinschlagprozesse rekonstruiert werden können, bleiben Aussagen über Bereitstellungsmechanismen von Sturzmaterial spekulativ. Temperaturschwankungen durch Sonneneinstrahlung werden in der besonnten Südwand als

wichtiger Mechanismus vermutet. Frost-Tau-Wechsel sind nach KRAUTBLATTER und DIKAU (2007) vorwiegend in Nordwänden wichtige Ablösevorgänge. Biologische Verwitterung könnte im Untersuchungsgebiet ebenfalls eine größere Rolle spielen, da Teile des Quellgebietes (Dolomitvorbau) mit Kiefern und Gräsern bewachsen sind.

SASS (2005) findet im nahegelegenen Karwendel- und Ammergebirge durch Untersuchungen mit Steinschlag-Kollektoren eine große zeitliche Variabilität der Ereignisse. Ein komplexes Zusammenspiel verschiedener klimatischer Faktoren wie Frost, Temperaturschwankungen und eine Auswaschung durch Niederschlagsereignisse werden als Auslöser festgestellt. SASS (2005) kann in seinen Studien deutlich mehr Steinschlagereignisse über die feuchteren Sommermonate hinweg feststellen als über die trockeneren Wintermonate. Temperaturschwankungen spielen in seinem Untersuchungsgebiet für die Auslösung von Steinschlag nur dann eine wesentliche Rolle, wenn genug Feuchtigkeit vorhanden ist. Die Wichtigkeit feuchter Bedingungen für eine Ablösung von sturzfähigem Material wird durch die saisonale Verteilung der Ereignisse in dieser Studie untermauert, da ein Teil des bereitgestellten Materials zeitnah zur Ablösung in Bewegung gerät. Die meisten Ereignisse fallen auf die Monate, in denen Wasser in der Felswand verfügbar ist. Dies ist der Monat März, in dem durch zunehmend wärmere Temperaturen die Schneeschmelze in der südexponierten Felswand einsetzt. Ebenfalls sind im Juli und August durch Sommergewitter kurzzeitig große Niederschlagsmengen zu verzeichnen. Auch im Dezember, wenn Niederschlag in Form von Schneeregen oder Schnee fällt und dieser wieder abschmilzt, ist Wasser in der Felswand verfügbar. Die Monate im späten Frühling und im späten Sommer führen in der Felswand zu trockenen Bedingungen, bei denen wenig Steinschlag zu erwarten ist. In Gebieten mit Ablösebereichen in der Permafrostzone scheint ebenfalls Wasser zur Zeit der Schneeschmelze ein wichtiger Auslöser zu sein. Die später einsetzende Schneeschmelze verschiebt die Maxima jedoch in die Monate Mai und Juli, in denen SCHNEUWLY (2009) rund ein Fünftel der Ereignisse feststellt.

STOFFEL (2005a) verweist auf einen möglichen Zusammenhang der Steinschlagaktivität mit der Temperatur der nördlichen Hemisphäre. Der Zusammenhang erscheint für Gebiete mit Permafrost plausibel. In Gebieten ohne Permafrostvorkommen wird Wasser üblicherweise durch Niederschlagsereignisse bereitgestellt. Für das Gebiet der vorliegenden Arbeit wird daher eher ein Zusammenhang zwischen feuchten Bedingungen in der Felswand und dem Auftreten von Steinschlagereignissen vermutet. Es ist möglich, dass in Perioden mit vielen feuchten Tagen auch eine hohe Steinschlagaktivität auf der Fläche beobachtet werden kann. Ob statistisch signifikante Korrelationen bestehen, kann mit der bestehenden Datenlage nicht geprüft werden. Hierzu wären zum einen mehr rekonstruierte Ereignisse sowie für den Standort repräsentative Kli-

madaten nötig. Dass Wetterphänomene auslösende Faktoren für Steinschlag darstellen, wird in Kapitel 3.2.2 gezeigt. Dass monokausale Zusammenhänge zwischen Klimafaktoren und der Variation von Steinschlagereignissen bestehen, scheint jedoch fraglich. Möglicherweise sind die von KRAUTBLATTER und DIKAU (2007) beschriebenen Zwischenspeicher in der Felswand für die periodischen Schwankungen verantwortlich. So erscheint es für das Untersuchungsgebiet zutreffend, dass primärer Steinschlag mit jährlichen Schwankungen auf relativ niedrigem, gleichbleibendem Niveau erfolgt. Treten Jahre mit besonders vielen Ereignissen auf, so könnte dies darauf zurückzuführen sein, dass sich die Zwischenspeicher in der Felswand oder im Dolomitvorbau entleeren. Dieses Systemverhalten kann mit dem Konzept der Disposition von KIENHOLZ (1995; zitiert in GERTSCH, 2009) verdeutlicht werden. Dabei ist die Disposition als Bereitschaft zu Massenverlagerungen zu verstehen. Nach diesem Konzept besteht eine längerfristig konstante Grunddisposition. Im vorliegenden Fall wird diese durch Verwitterungsprozesse und das Vorhandensein des dadurch entstehenden Sturzmaterials beeinflusst. Hinzu kommt eine variable Disposition. Diese wird auf der Untersuchungsfläche durch die Füllung der Zwischenspeicher bestimmt, die in Form kleiner Schutthalden im Wandbereich und im Dolomitvorbau zu finden sind. Dieser Theorie nach werden die Zwischenspeicher über die Jahre hinweg aufgefüllt und schließlich durch ein auslösendes Ereignis entleert. Dies könnte zu multiplen Ereignissen innerhalb eines Jahres führen und die etwa alle 15 Jahre beobachteten Maxima der Aktivität erklären.

6.4 Vergleich der Resultate aus Simulation und Jahrringdaten

Die simulierten Trajektorien stimmen mit den räumlichen Mustern der dendrogeomorphologisch rekonstruierten Wiederkehrdauern überein. Eine bemerkenswerte Übereinstimmung ergibt sich mit den an Buchen beobachteten Wiederkehrdauern. Hier zeigen sich ähnliche Muster im mittleren oberen Teil der Fläche, in dem ein Großteil der Steine eintritt. Auch das seitliche Eintreten von Steinen aus dem westlichen Graben zeigt sich in beiden Darstellungen. Es kann zudem gesehen werden, dass auch in sehr detaillierter Auflösung eine Übereinstimmung besteht. Dies wird besonders im unteren Bereich der mittleren Trajektorie deutlich. Die Buchen, die nur wenige Meter entfernt der Runse stehen, weisen geringe Wiederkehrdauern auf. Das gleiche Bild ergibt sich aus der Modellierung. Daraus kann gefolgert werden, dass sowohl das Modell als auch das an den Buchen angewendete Zähl-Verfahren die kleinräumige Variabilität der Steinschlagprozesse im Untersuchungsgebiet zuverlässig darstellen können. Die anhand der Fichten bestimmten Wiederkehrdauern zeigen ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Trajektorien, jedoch wird die kleinräumige Häu-

fung von Ereignissen nicht so detailliert abgebildet wie bei den Buchen. Ein Grund hierfür liegt vermutlich darin, dass hier die Daten nicht flächig sondern entlang von Transjekten erhoben wurden. So sind beispielsweise keine Fichten-Daten aus den Bereichen vorhanden, die das seitliche Eintreten der Steine aus den Gräben abbilden könnten. Ein weiterer Grund wird darin vermutet, dass viele Wunden durch die Rindeneigenschaften der Fichten nicht sichtbar bleiben und dadurch weniger Ereignisse rekonstruiert werden können.

Obwohl die räumlichen Muster der auftretenden Sprunghöhen aus Modellierung und der Analyse der Trefferhöhen gut übereinstimmen, werden allgemein größere Sprunghöhen vom Modell errechnet, als an den Bäumen beobachtet wurden.

Diese unterschiedlichen Werte können verschiedene Ursachen haben. Zum einen besteht die Möglichkeit, dass das Modell mit der gewählten Parametrisierung zu Überschätzungen neigt. Kurz oberhalb des Transitbereiches findet sich eine Geländestufe. Von dem höher gelegenen Niveau springen die Steine auf die Fläche. Diese Flugphase der Steine wird vom Modell mit den gewählten Parametern weiter errechnet als sie an den Bäumen beobachtet werden kann. Vermutlich könnte die Geschwindigkeit der Steine mit der Verwendung anderer Eingangsparameter (höhere Oberflächenrauigkeit durch größere rg -Werte) vermindert werden. Dies würde zu einer Verkürzung der Flugparabeln führen. Andererseits besitzen manche Bäume in direkter Nähe zu dieser Stufe eine hangabwärts geneigte, krumme Wuchsform. So kann nicht ausgeschlossen werden, dass sie teilweise von den Steinen übersprungen werden oder die flexible Krone der Buchen durchstreifen, ohne sichtbare Schäden zu hinterlassen. Die simulierten maximalen Sprunghöhen werden als das 95%ige Konfidenzniveau angegeben. Daher besteht ebenso die Möglichkeit, dass diese hohen Werte bei seltenen Ereignissen vorkommen, die extremen Sprunghöhen aber aufgrund ihrer geringen Auftretenswahrscheinlichkeit nicht oder nur selten von den Bäumen abgebildet werden.

Auf die Frage, ob aus den Größen der Wunden Rückschlüsse auf auftretende Energien gezogen werden können, kann keine klare Antwort gefunden werden. Bei einem Vergleich der errechneten auftretenden Energien der Steine mit den beobachteten Wundgrößen zeigt sich, dass dort generell vermehrt große Wunden an Buchen gefunden werden können, wo auch hohe kinetische Energien zu erwarten sind. Da jedoch auch Bäume mit vorwiegend mittelgroßen und kleinen Steinschlagwunden in diesem Bereich gefunden werden können, erscheint ein direkter Rückschluss auf Energien über die mittlere Wundgröße, zumindest in dieser Studie, nur bedingt möglich zu sein. Ein Rückschluss aus kleinen Wundgrößen auf geringe Energien, würde in dieser Studie zu Fehleinschätzungen führen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Ergebnisse der Modellierung und den Feldbeobachtungen in bemerkenswerter Weise übereinstimmen. Insbesondere die simulierten Trajektorien ergeben eine sehr ähnliche Verteilung wie die räumlichen Muster der interpolierten Wiederkehrdauern. Bei den Werten der maximalen Sprunghöhen treten Differenzen auf. Zu ähnlichen Resultaten kommt auch KÜHNE (2005) bezüglich der mittleren Sprunghöhen bei der Validierung einer früheren Version des Modells anhand ausgewählter Waldbestände. Die räumliche Verteilung der maximalen Sprunghöhen scheint mit dem Modell Rockyfor3D hingegen realistisch abgebildet zu werden. Ob das Modell die tatsächlich zu erwartenden maximalen Sprunghöhen überschätzt oder die hohen Werte in dieser Studie durch die verwendeten Parameter zustande kommen, kann in dieser Arbeit nicht beurteilt werden.

6.5 Vor- und Nachteile des Zähl-Verfahrens und klassischer Methoden

Ein großer Vorteil des an den Buchen angewendeten Zähl-Verfahrens ist die Effizienz dieser Methode. In dieser Arbeit wurden an den Fichten vier bis fünf Bohrproben pro Baum gezogen, für die Analyse vorbereitet, vermessen und anschließend Ereignisse aus den Wuchsreaktionen rekonstruiert. Dennoch wurden im Durchschnitt nur etwa halb so viele Treffer pro Jahr wie bei den Buchen gefunden. Mit der Untersuchung äußerlich sichtbarer Wunden an Buchen kann die maximale Sprunghöhe der Steine wegen der größeren Datenmenge zuverlässiger abgeschätzt werden als an heimischen Koniferenarten.

Ein Großteil der Treffer kann durch die Zählung der Narben identifiziert werden. In Kombination mit nur einem Bohrkern können so Steinschlag-Frequenzen zuverlässig abgeschätzt werden.

Wegen des geringen Aufwandes der Zähl-Methode ist es möglich, viele Bäume zu untersuchen. Die Qualität und Verlässlichkeit der Interpolationen steigt allgemein mit zunehmender Anzahl an Datenpunkten. Dies äußert sich in einem deutlich differenzierteren Bild der interpolierten Wiederkehrdauern und Sprunghöhen aus den Daten der Buchen im Vergleich zu jenen aus den Daten der Fichten.

Ein weiterer Vorteil ist die vergleichsweise einfache Kreuzdatierung der Jahrringbreitenkurven von Buchen. Weil die Bohrkern von der steinschlagabgewandten Seite entnommen werden, sind sie zumeist ungestört. Auch sind bei den Buchen dieser Fläche Trockenjahre als Weiserjahre in vielen Fällen deutlich zu erkennen. Im Gegensatz zu den Jahrringen bei Nadelbäumen, sind die Jahrringgrenzen der Buchenproben allerdings schwer zu erkennen.

Da die Treffer an den Buchen nicht in der Bohrprobe abgebildet sind, werden viele In-

formationen durch das Zähl-Verfahren nicht erfasst. Bei Verwendung der klassischen Bohrkernanalyse hingegen können Ereignisse mit jährlicher - und mitunter sogar monatlicher - Präzision datiert werden. Daraus ergibt sich die Möglichkeit für weitere Auswertungen. Dies sind unter anderem: eine Untersuchung der Veränderlichkeit der Aktivität über die Jahre hinweg, Identifikation von Großereignissen, saisonale Schwerpunkte der Aktivität und damit Rückschlüsse auf auslösende Bedingungen.

Einschränkungen des Zähl-Verfahrens werden zudem in Gebieten vermutet, in denen deutlich größere Blockgrößen zu erwarten sind. Die Treffer durch große Blöcke verwischen vermutlich mehr ältere, schon verheilte Narben, als dies in der vorliegenden Studie der Fall ist.

Einen Zusammenhang zwischen klimatischen Bedingungen herauszuarbeiten, steht nicht im Mittelpunkt dieser Arbeit. Dennoch wurde im Hinblick auf auslösende Faktoren nach in der Literatur zu findenden Niederschlagskurven gesucht, die in einem Zusammenhang mit der rekonstruierten Steinschlagaktivität stehen könnten. Abbildung 49 zeigt das gleitende Mittel der Anzahl feuchter Tage pro Jahr für Zentral-Europa sowie das Mittel der Steinschlagaktivität pro Jahr (Anzahl Ereignisse / Baumbelegung) über das letzte Jahrhundert. Es zeichnen sich periodische Schwankungen in der Steinschlagaktivität ab, die in etwa alle 15 Jahre ein Maximum bilden.

Ein möglicher Zusammenhang zwischen Klimadaten und der Steinschlagaktivität wird in dieser Arbeit nicht statistisch geprüft. Ob eine Korrelation besteht, bleibt fraglich.

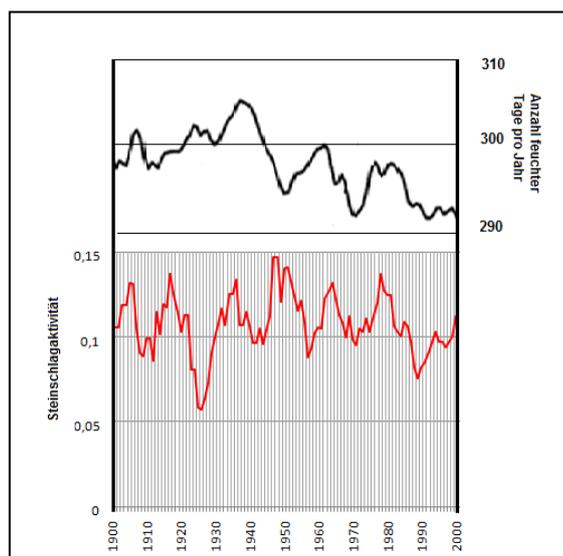


Abb. 49: 10-jähriges gleitendes Mittel der Steinschlagaktivität (untere rote Linie) und 10-jähriges gleitendes Mittel der Anzahl feuchter Tage für Zentral-Europa (nach SEMENOV and BENGTTSSON, 2002, obere schwarze Linie) für das vergangene Jahrhundert

6.6 Aufgeworfene Fragen

Obwohl die Arbeit zeigt, dass die Abschätzung von Steinschlagfrequenzen anhand sichtbarer Verletzungen bei Buchen glaubwürdige Resultate liefert, werden doch einige weitere Fragen aufgeworfen:

- Ist das Zähl-Verfahren auch bei anderen Baumarten und in anderen Gebieten anwendbar?
- Wie groß ist der Anteil der Schäden bei Buchen, der auf der Stammoberfläche sichtbar bleibt? Können hierzu allgemeine Aussagen getroffen werden?
- Kann durch die Schadensart und die Schadensgröße an den Bäumen auf auftretende Energien geschlossen werden? Wie verhält sich dieser Zusammenhang bei den unterschiedlichen Baumarten?
- Können auf anderen Flächen mit dem Zähl-Verfahren die Steinschlag-Frequenzen gänzlich ohne Bohrkernentnahme verlässliche Resultate liefern?

7 Schlussfolgerungen

Die Arbeit zeigt, dass sich die Rotbuche wegen baumartenspezifischer Rindeneigenschaften besonders zur Rekonstruktion von Steinschlagprozessen eignet. Mit der vorgestellten Methode können Sprunghöhen von Steinen anhand der sichtbaren Steinschlagnarben zuverlässig und ohne eine Bohrkernentnahme erfasst werden. Mit nur einer einzigen Bohrung pro Baum zur Altersbestimmung können Steinschlagfrequenzen abgeleitet werden.

Zentrale Größen zur Charakterisierung von Steinschlagprozessen wie Trajektorienfrequenzen und Sprunghöhen können somit effizient abgeschätzt werden. Hinweise hierzu sind für Praktiker bei der Gefahrenanalyse und der Dimensionierung von Schutzmaßnahmen, sowie für die Verifizierung und Kalibrierung von Steinschlagmodellen, von besonderem Interesse. Vielversprechend ist das Zähl-Verfahren auch unter dem Gesichtspunkt, dass die Rotbuche ein ausgedehntes Verbreitungsgebiet besitzt. Die Anwendung der Methodik ist daher vermutlich vielerorts möglich und könnte auch für praktische Fragestellungen im Bereich des Naturgefahrenmanagements verwendet werden.

Die Darstellung der Variation von Steinschlagprozessen ist mit dem Zähl-Verfahren allerdings nicht möglich. Anhand des äußerlichen Erscheinungsbildes können Steinschlagereignisse zwar in ältere und jüngere Ereignisse unterteilt werden, eine exakte Datierung kann mit dieser Methode jedoch nicht erfolgen. Sind diese Informationen das Ziel der Untersuchungen, muss auf die klassische Bohrkernanalyse zurückgegriffen werden.

Wegen der Effizienz der Zähl-Methode können zukünftig dendrogeomorphologische Studien an Buchen, großflächig mit Aufnahmen an Probepunkten oder räumlich hoch aufgelöst durch Vollaufnahmen, mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden.

Neben der Überprüfung der Anwendbarkeit des Zähl-Verfahrens zur Abschätzung von Steinschlagfrequenzen bildet die vorliegende Arbeit eine Datengrundlage über wichtige Kennzahlen zur Einschätzung der Steinschlagprozesse auf der Versuchsfläche. Dies sind die räumliche Verteilung von Steinschlagfrequenzen sowie eine räumliche Verteilung der Sprunghöhen der Steine. In weiterführenden Studien könnte mit anderen Modellen das Prozessgeschehen simuliert, und die Resultate mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen werden.

8 Dank

Allen voran möchte ich Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Johannes Hübl, Universität Bodenkultur Wien, danken für die Möglichkeit, diese Arbeit schreiben zu können sowie für die Betreuung und Hilfestellungen bei der Organisation der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt auch Dipl.-Geogr. Dr. Markus Stoffel, Labor für Dendrogeomorphologie der Universität Bern, der die externe fachliche Betreuung der Arbeit übernommen hat. Die fachlichen Diskussionen und Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt auch Dipl.-Ing. Dr. nat. techn. Michael Grabner, Universität für Bodenkultur Wien, für die Mitbetreuung der Arbeit sowie die Möglichkeit, im Jahrringlabor des Instituts für Holzforschung die Bohrkerne zu vermessen. Auch den Mitarbeitern des Jahrringlabors danke ich für die Hilfestellungen bei der Auswertung und Korrektur der Jahrringdaten.

Weiters möchte ich mich herzlich bedanken bei Dipl.-Geogr. Dr. Michelle Bollschweiler, Labor für Dendrogeomorphologie der Universität Bern, für die Einführung in Vermessung, Korrektur und Interpretation von Jahrringdaten.

Bedanken möchte ich mich an dieser Stelle auch bei den Mitarbeitern des Ingenieurbüros Alp-Infra consulting + engineering GmbH, Ing. Mag. Manfred Scheikl und Mag. Günther Prasicsek für den Anstoß zu dieser Arbeit und die Bereitstellung der GIS-Daten und des Projektberichtes.

Für die Möglichkeit, Bohrkerne zu entnehmen und für das entgegengebrachte Vertrauen, sage ich darüber hinaus dem zuständigen Forst-Revierleiter Helmut Lang herzlichen Dank.

Dipl.-Ing. Matthias Olbort, Mitarbeiter der ÖBB Infrastruktur AG, gilt ebenfalls mein Dank für die freundliche Bereitstellung des Ereigniskatasters des betreffenden Streckenabschnitts.

Zudem danke ich meinen Freunden Hanna, Andi, Hannes und Illja für die Hilfe bei der Feldarbeit und auch meiner Familie, die mich bei meiner Arbeit jederzeit unterstützt hat.

Literaturverzeichnis

Alp-Infra, Consulting + Engineering GmbH (2008): Gefahrenkartierung und Schutzwaldwirtschaft Hechenberg. Teil 1, technischer Bericht, unveröffentlicht.

BAUMGARTNER, M. (2002): Detaillierte Ersterhebungen in einem steinschlaggeschädigten Wald im Diemtigtal. Diplomarbeit, Universität Bern.

BERGER, F.; QUETEL, C.; DORREN, L.K.A. (2002): Forest: A natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency? International Congress INTERPRAEVENT 2002, Congress publication, vol2, pp. 815-826.

BEUTING, M. (2004): Holzkundliche und dendrochronologische Untersuchungen an Resonanzholz als Beitrag zur Organologie. Verlag Kessel.

BOLLSCHWEILER, M. (2007): Spatial and temporal occurrence of past debris flows in the Valais Alps - results from tree-ring analysis. PhD thesis No. 1572, University of Fribourg. GeoFocus 20, 182 pp.

BOLLSCHWEILER, M.; STOFFEL, M.; SCHNEUWLY, D. M.; BOURQUI, K. (2008): Traumatic resin ducts in *Larix decidua* stems impacted by debris flows. *Tree Physiology* 28, 255–263.

BRÄKER, O. U. (2002): Measuring and data processing in tree-ring research – a methodological introduction. *Dendrochronologia* 20(1-2), 203–216.

BUNZA, G. (1975): Klassifizierung alpiner Massenbewegung als Beitrag zur Wildbachkunde, Tagungsbeiträge Interpraevent, Band 1, S. 9-24.

BUWAL, BRP, BWW, (1997): Naturgefahren. Empfehlungen 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bundesamt für Raumplanung und Bundesamt für Wasserwirtschaft, Bern.

DORREN, L.K.A. (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography* 27,1 (2003) pp. 69–87.

DORREN, L.K.A. (2010): Rockyfor3D revealed - Description of the complete 3D rockfall model. ecorisQ paper, www.ecorisq.org: 21 p.

DORREN, L.K.A.; MAIER, B.; PUTTERS, U.S.; SEIJMONSBERGEN, A.C. (2004): Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology* 57(3-4), 151-167.

DORREN, L.; BERGER, F.; LE HIR, C.; MERMIN, E.; TARDIF, P. (2005): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests, *Forest Ecology and Management* 215 (2005) 183–195.

DORREN, L.; BERGER, F.; JONSSON, M.; KRAUTBLATTER, M.; MÖLK, M.; STOFFEL, M.; WEHRLI, A. (2007): State of the art in rockfall – forest interactions, *Schweiz Z Forstwes* 158 (2007) 6: 128–141.

- DUJESIEFKEN, D. (2009): Das CODIT-Prinzip - Von den Bäumen lernen für eine fachgerechte Baumpflege. Beitrag zum Österreichischen Baumforum 2009.
- erdpunkte.de (2010): <http://www.erdpunkte.de/l%C3%A4nder/330.html> (Abruf am 13.10.2010)
- FREHNER, M.; WASSER, B.; SCHWITTER, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion, Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 564 S.
- FROMMHOLD, H. (2001): Vorlesungsunterlagen Forstnutzung/Holzkunde. FH Eberswalde, online, Abruf 17.10.2010 (<http://www6.fheberswalde.de/hote/lehrgebiete/Forstnutzung/Vorlesung3.2.6.4.ho.htm>)
- GERTSCH, E. (2009): Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen - Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Inauguraldissertation der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern.
- GSTEIGER, P. (1989): Steinschlag, Wald, Relief - Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. Diplomarbeit, Universität Bern, unveröffentlicht.
- JAHN, J. (1988): Entwaldung und Steinschlag. In: Proceedings International Symposium Interpraevent 1988, Graz 1, pp. 185–198.
- JANCKE, O.; DORREN, L.; BERGER, F.; FUHR, M.; KÖHL, M. (2009): Implications of coppice stand characteristics on the rockfall protection function. *Forest Ecology and Management* 259 (2009) 124–131.
- KAITNA, R. (2008): Massenverlagerungen außerhalb des Gerinnes, Kapitel 6: Skriptum zur Vorlesung Naturgefahren. Universität für Bodenkultur, Wien, unveröffentlicht.
- KALBERER, M. (2007): Waldwirkung gegenüber Steinschlag. VDM Verlag Dr. Müller, Saarbrücken.
- KNOSPE, S. (2002): Anwendungen geostatistischer Verfahren in den Geowissenschaften. Mensch & Buch Verlag, Berlin.
- KRAUTBLATTER, M. and DIKAU, R. (2007): Towards an uniform concept for the comparison and extrapolation of rockwall retreat and rockfall supply. *Geogr. Ann.*, 89 A (1): 21–40.
- KÜHNE, R. (2005): Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern - Validierung und Anwendung eines 3D Modells zur Quantifizierung der Schutzwirkung von Wald. Diplomarbeit, Universität Bern.
- MATTHECK, C. (1992): Die Baumgestalt als Autobiographie. Bernhard Thalacker Verlag, Braunschweig, 144 S.
- MATTHECK, C.; BRELOER, H. (1994): Handbuch der Schadenskunde von Bäumen. Rombach GmbH Druck- und Verlagshaus, Freiburg im Breisgau, 249 S.
- MOYA, J.; COROMINAS, J.; PÉREZ ARCAS, J.; BAEZA, C. (2010): Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Amdorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology* 118 (2010) 393–408.

ÖBB Infrastruktur AG, Fachbereich Naturgefahrenmanagement (2011): Ereigniskataster der Strecke Innsbruck – Scharnitz. (unveröffentlicht, Stand Ende Januar 2011)

ORTNER, A. (2010): Detaillierte Statistik des Südföhns in Innsbruck: Einfluss des Südföhns auf die Temperatur. Masterarbeit, Universität Innsbruck.

PERRET, S.; BAUMGARTNER, M.; KIENHOLZ, H. (2004): Steinschlag- Schäden in Bergwäldern – Eine Methode zur Erhebung und Analyse. Internationales Symposium INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT.

PERRET, S., STOFFEL, M., KIENHOLZ, H., (2006): Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps—A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology* 74 (2006) 219–231.

POISEL, R. (1998): Geologische – geomechanische Grundlagen der Auslösemechanismen von Steinschlag. In: Tagungsband zum Symposium Steinschlag als Naturgefahr und Prozess, Universität für Bodenkultur, Wien.

SASS, O. (2005): Temporal Variability of Rockfall in the Bavarian Alps, Germany. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, Volume 37, Number 4.

SCHNEUWLY, D. M.; STOFFEL, M. (2008): Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years – A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 2008, Vol. 102, 522–531.

SCHNEUWLY, D. M.; STOFFEL, M.; DORREN, L. K. A.; BERGER, F. (2009a): Three-dimensional analysis of the anatomical growth response of European conifers to mechanical disturbance. in *Tree Physiology* 29, 1247–1257.

SCHNEUWLY, D. M.; STOFFEL, M.; BOLLSCHWEILER, M. (2009b): Formation and spread of callus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts in *Tree Physiology* 29, 281–289.

SCHNEUWLY, D.M. (2009): Tree rings and rockfall - Anatomic tree reactions and spatio-temporal rockfall analysis. PhD thesis No. 1643, University of Fribourg.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1980): Dichteschwankungen in Jahrringen von Nadelhölzern in Beziehung zu klimatisch- ökologischen Faktoren oder das Problem der falschen Jahrringe. Eidg. Anst. Forstl. Versuchswes., Bern.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1983): Der Jahrring. Paul Haupt, Bern Stuttgart, 234 S.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1993): *Trees and Wood in Dendrochronology*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): *Tree rings and environment, Dendroecology*, Paul Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.

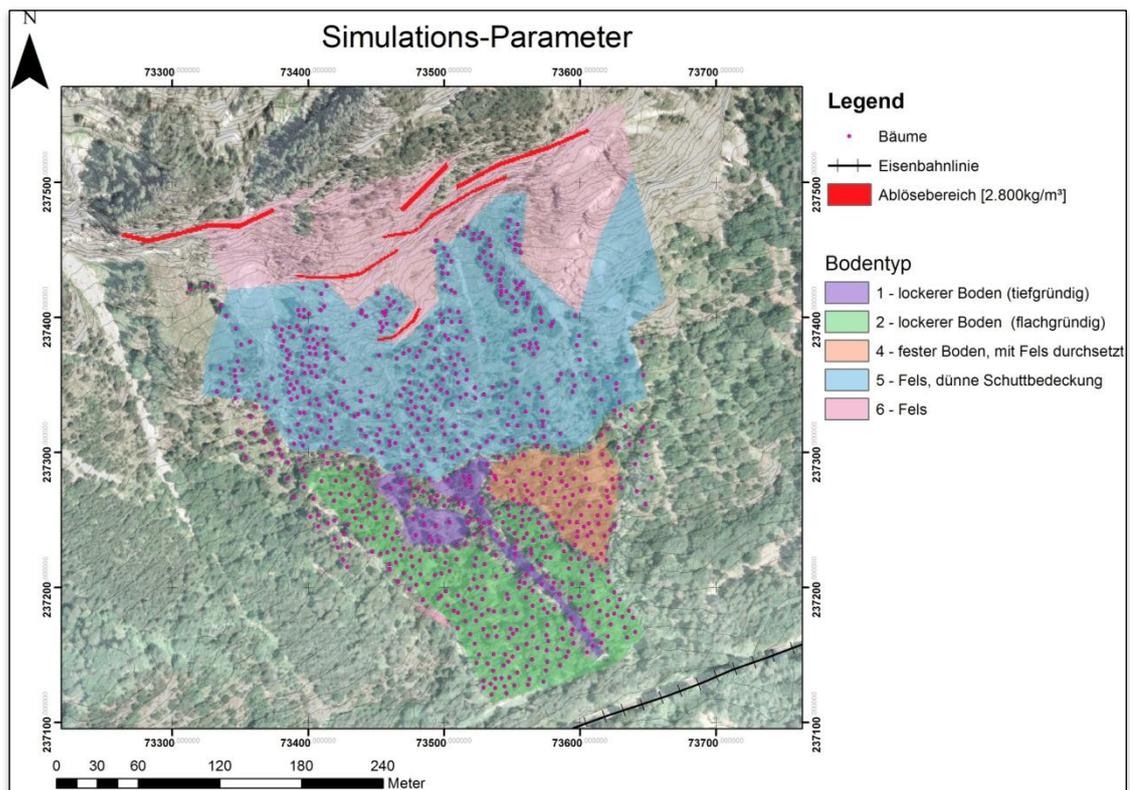
SCHWEINGRUBER, F. H. (2001): *Dendroökologische Holzanatomie*. Paul Haupt, Bern Stuttgart, Wien, 472 S.

SEMENOV, V.A. AND BENGTTSSON, L. (2002): Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics* (2002) 19: 123–140.

- STOFFEL, M. (2005a): Spatio-temporal variations of rockfall activity into forests – results from tree-ring and tree analysis. PhD thesis No. 1480, University of Fribourg. *GeoFocus* 12, 188 pp.
- STOFFEL, M. (2005b): Assessing the vertical distribution and visibility of rockfall scars in trees. *Schweiz. Z. Forstwes.* 156 (2005) 6: 195–199.
- STOFFEL, M.; SCHNEUWLY, D. M.; BOLLSCHWEILER, M.; LIEVRE, I.; DELALOYE, R.; MYINT, M.; MONBARON, M. (2005a): Analyzing rockfall activity (1600–2002) in a protection forest - a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology* 68 (2005) 224– 241.
- STOFFEL, M.; LIEVRE, I.; MONBARON, M.; PERRET, S. (2005b): Seasonal timing of rockfall activity on a forested slope at Täschgufer (Valais, Swiss Alps) – a dendrochronological approach, *Z. für Geomorphologie.* 49(1), 89–106.
- STOFFEL, M. (2006): A Review of Studies Dealing with Tree Rings and Rockfall Activity: The Role of Dendrogeomorphology in Natural Hazard Research. *Natural Hazards* (2006) 39: 51–70.
- STOFFEL, M. and PERRET, S. (2006): Reconstructing past rockfall activity with tree rings: Some methodological considerations. *Dendrochronologia* 24 (2006) 1–15.
- zamg.at (2010): http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm (Abruf am 13.10.2010)
- ZEPP, H. (2008): *Geomorphologie.* Ferdinand Schöningh, Paderborn.
- ZINGGELER, A. (1990): *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern: Modellierung der relevanten Teilprozesse.* Univ Bern, MSc Thesis. 116 S.

Anhang

- 1) Eingangsdaten für die Modellierung mit Rockyfor3D: Bodeneigenschaften, Lage der Abbruchgebiete und Baumstandorte



Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.



Ort, Datum

Unterschrift