



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
BERGAKADEMIE FREIBERG

Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

Fakultät für Geowissenschaften, Geotechnik und Bergbau
Institut für Geotechnik

Ingenieurgeologische Erfassung der Gansbrüche bei Pötzscha (Elbsandsteingebirge)

Juliane Schaffer

Bachelor Geologie/Mineralogie

Matrikel: 61026

20.01.2020

Betreuer/1. Korrektor:
Dr.-Ing. Jörn Wichert

2. Korrektor:
Dr. rer. nat. Martin Herbst

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit den ingenieurgeologischen Gegebenheiten einer Felsformation und den möglichen Felsversagen bzw. Stein- und Blockschlägen, bei denen mehr oder weniger zusammenhängende Sturzbewegungen von einzelnen Elementen von bis zu mehreren Kubikmetern Größe auftreten können. Die Untersuchung der Thematik erfolgt am Beispiel des ehemaligen Steinbruchgebietes der Gansbrüche bei Pötzscha im Elbsandsteingebirge. Die geologischen und ingenieurgeologischen Besonderheiten des Projektgebietes werden in der Arbeit vorgestellt und liefern wichtige Merkmale und Kenngrößen für anschließende Gebirgsklassifizierungen. Mit Hilfe des Programms RocFall wurden 2D-Simulationsmodelle erstellt und Steinschlaganalysen durchgeführt. Es konnte nachgewiesen werden, dass die angrenzende Trockenmauer des Elberadweges und die Bahnmauern eine gewisse Schutzwirkung gegenüber Stein- und Blockschlägen aufweisen, es jedoch auch den Einsturz von Teilen der Mauer bei größeren Felsstürzen hervorrufen kann. Hinsichtlich der 2D-Darstellung einer 3D-Realität sind die simulierten Steinschlagkurven lediglich als eine erste Näherung an die tatsächlichen Gegebenheiten anzusehen. Der an der Böschung befindliche Wald hat durch seine Stammzahl, Stammdurchmesser und die verschiedenen Baumarten ebenfalls einen Anteil am Schutzpotential. Dennoch konnte durch das Tool Rockfor^{NET} belegt werden, dass bereits Gesteinsgrößen ab einem Kubikmeter Größe die Schutzwirkung des Waldes herabsetzen bzw. nur noch eine geringe oder keine Schutzwirkung besteht.

Abstract

This bachelor thesis deals with the engineering-geological conditions of a rock formation and the possible rock failure or falling stones and boulder fall. At that point, more or less coherent fall movements of particular elements can occur up to several cubic meters in size. The study is based on the example of the former quarry area of the Gansbrüche near Pötzscha in the Elbe Sandstone Mountains. The geological and engineering-geological characteristics of the study area are presented in the work and provide important features and parameters for subsequent rock mass classification systems. By using the software RocFall, 2D simulation models were created and rockfall analyses were realised. It could be shown that the adjacent dry stone wall of the Elbe Cycle Route and the railway walls have a certain protective effect against stone and block falls, however, parts of the wall can collapse if there occur larger rockslides. Based on the 2D representation of a 3D reality, the simulated rockfall curves can only be seen as a first approximation of the actual circumstances. The forest located on the embankment also has a share in the protection potential due to its number of tree trunks, trunk diameter and the different tree species. Nevertheless, the tool Rockfor^{NET} was able to demonstrate that rock sizes over one cubic meter reduce the protective effect of the forest or that there is low or no protective effect.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne Verwendung anderer als der angegebenen Quellen und Hilfsmittel verfasst habe. Alle Stellen, die den benutzten Quellen wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit ist bislang keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht worden.

Ich bin mir dessen bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben wird.

Ort, Datum, Unterschrift

Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die durch ihren Anreiz und ihre Unterstützung zur Anfertigung dieser Bachelorarbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Wichert vom Institut für Geotechnik an der TU Bergakademie Freiberg, der mir die Umsetzung und Anfertigung durch seine Betreuung sowie durch die hilfreichen Anregungen, Erklärungen und Tipps ermöglicht hat. Für seine investierte Zeit, Geduld und die Korrektur der Arbeit bin ich ihm ebenfalls sehr dankbar.

Weiterhin möchte ich mich bei Herrn Dr. Herbst bedanken, welcher sich als Zweitgutachter zur Verfügung gestellt hat und mir kurzfristig einen Büroplatz anbieten konnte. Außerdem danke ich Herrn Dipl.-Geol. Detlev Tondera und Herrn Prof. Dr. Butscher für die Bereitstellung der Mittel und Gerätschaften, sowie Herrn Weichmann für die Einrichtung des Programms RocFall auf meinem PC.

Zu guter Letzt bedanke ich mich herzlichst bei meiner Familie und meinen Freunden, die mich jederzeit unterstützt haben und an meiner Seite standen. Ohne sie wäre die Fertigstellung dieser Bachelorarbeit nicht möglich gewesen.

Abkürzungsverzeichnis

A	Asphalt
AS	Abschnitt
BHD	mittlerer Stammdurchmesser in Brusthöhe
E-Modul	Elastizitätsmodul
GOK	Geländeoberkante
GSI	Geological Strength Index
K	Kluftbeschaffenheit
MP	Messpunkt
MPa	Megapascal
NO-SW	Nordost-Südwest
NW-SO	Nordwest-Südost
RMR-Sytem	Rock Mass Rating-System
RQD-Index	Rock Quality Designation-Index
RW	Rückprallwert
S	Gesteinsmassenstruktur
SF	Sandstein Fels
SmBmW	Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung
SmBoW	Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung
SoBmW	Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung
WNW-OSO	Westnordwest-Ostsüdost

Symbolverzeichnis

e	Eulersche Zahl
E_{a-max}	maximale Energieaufnahme
E_t	Elastizitätsmodul bei 50 % der Druckfestigkeit
$G_{(max)}$	maximale Grundfläche
$G_{(theo)}$	theoretische Grundfläche
J_v	Anzahl der Einzelklüfte pro Kubikmeter [m^{-3}]
L	Kernstücklängen mit $L > 10$ cm
n	Anzahl
ρ	Dichte (g/cm^3)
r	Bestimmtheitsmaß
R_L/R_N	Rückprallwerte für L- und N-Hämmer
S	Gesamtlänge der Kernstrecke in cm
s	Standardabweichung
s^2	Streuung
σ_{UCS}	Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (MPa)
W_a	Wertung für den Kluftabstand
W_b	Wertung für die Kluftbeschaffenheit
W_c	Wertung für die Orientierung der Klüfte
W_d	Wertung für den Zutritt von Grundwasser
W_{qu}	Wertung für die Festigkeit des Gesteinsmaterials
W_{RQD}	Wertung für den RQD-Index nach Deere
x	Messwert
\bar{x}	arithmetischer Mittelwert

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Eidesstattliche Erklärung	II
Danksagung	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Symbolverzeichnis	V
1 Einleitung und Aufgabenstellung	1
2 Regionalgeologischer Überblick	2
3 Grundlagen und Methodik	6
3.1 Erfassung des Trennflächengefüges mittels Bildanalyse	6
3.2 Gebirgsklassifizierungen	9
3.2.1 Rock Quality Designation-Index	10
3.2.2 Rock Mass Rating-System	11
3.2.3 Geological Strength Index	14
3.3 Ermittlung der Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag mittels Rockfor ^{NET}	17
4 Geographische Lage des Untersuchungsgebietes	20
4.1 Geologie und Stratigraphie	21
4.2 Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet	27
5 Ingenieurgeologische Untersuchungen, Auswertung und Ergebnisse	29
5.1 Trennflächenmessungen	29
5.2 Druckfestigkeitsprüfung mittels Schmidt-Hammer	30
5.3 Gebirgsklassifizierung nach RMR	39
5.4 Gebirgsklassifizierung nach GSI	41
5.5 Berechnung der Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag	43
5.6 Steinschlaganalysen mittels <i>RocFall</i>	55
6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	67
Abbildungsverzeichnis	69
Tabellenverzeichnis	73

Literaturverzeichnis 75

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Im Elbsandsteingebirge befindet sich mit den „Gansbrüchen“ bzw. „Ganssteinbrüchen“ eine zusammenhängende Felsformation mit großen, überhängenden Gesteinsblöcken, welche sich im Grenzbereich der Ortschaften 'Stadt Wehlen' und 'Kurort Rathen' am Elberadweg erstreckt.

Ältere Quellen belegen wiederholte Felsstürze im kleineren, als auch im großem Umfang, so wie der registrierte Felssturz von 1921, bei dem viele Teile der Bahnschutzmauern zerstört wurden [1]. Durch die Erbauung einer Trockenmauer am Hang gelang es mittlerweile rezentes Abstürzen von Gesteinsblöcken auf den angrenzenden Elberadweg zu verhindern, jedoch ist eine weitere Beschädigung der Mauer selbst nicht auszuschließen [2].

In den folgenden Kapiteln wird eine detaillierte geologische bzw. ingenieurgeologische Kartierung dargelegt, wodurch der Aufbau der Felsformation untersucht werden kann. Zur Anwendung kommen Tools und 2D-Programme, mit denen Schutzwirkungen berechnet und bestimmt, sowie Steinschlagsimulationen durchgeführt werden können. Mit Hilfe von subjektiven Beobachtungen und objektiven Feststellungen lassen sich weiterhin Gebirgsklassifizierungen nutzen, um die Standfestigkeit der Felsen bzw. des Gebirges zu erhalten.

2 Regionalgeologischer Überblick

Im späten Untercenomanium vor etwa 97 Millionen Jahren ereignete sich ein erster Meeresvorstoß in die Elbezone bzw. in das Sächsische Kreidebecken [3]. Die von Norden gerichtete Meerestransgression erreichte dabei das heutige Meißen und führte zur Bildung der Meißen-Formation [3]. Das Gebiet um Dresden bis zur tschechischen Grenze blieb vorerst festländisch [4]. Konglomeratische Bioklastkalke geben hierbei einen Hinweis auf küsten- und klippennahe Ablagerungen [3]. Der fortschreitende Meeresspiegelanstieg im Mittelcenomanium lässt sich mit den fluviatilen Sedimenten der Niederschöna-Formation assoziieren, marine Sedimente aus diesem Zeitraum sind jedoch nicht bekannt [3]. Abbildung 2.1 zeigt hierbei einen stratigraphischen Überblick der Elbtalgruppe.

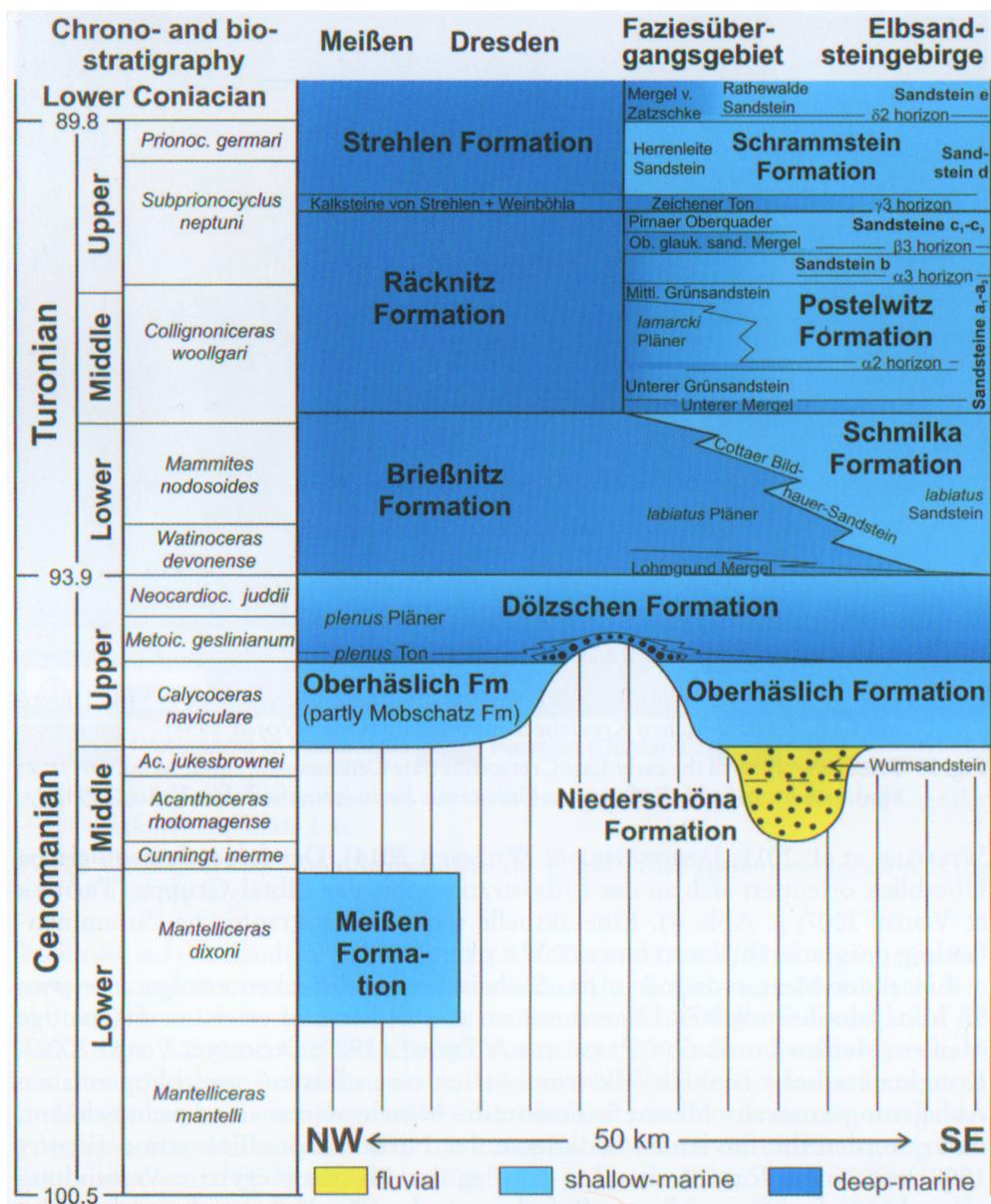


Abb. 2.1: Stratigraphie der Elbtal-Gruppe [3].

Die vorherrschende marine Transgression geschah im Obercenomanium vor etwa 95 Millionen Jahren und breitete sich über einem charakteristischen Relief von Senken, Schwellen und Klippen aus, sodass sich anschließend eine Einheit aus isolierten Inseln am südwestlichen Ende des sächsischen Kreidebeckens bildete [3]. Der Sedimenteintrag erfolgte primär von Nordosten (Westsudetische Insel) und von Südwesten (Erzgebirge als Teil der Mitteleuropäischen Insel).

Die Obercenomanium-Transgression kann dabei in zwei Vorstöße unterteilt werden. Der erste ereignete sich im frühen Obercenomanium, wobei hier die flachmarinen Silte, Sande und glaukonitischen Mergeltone der Mobschatz- bzw. der Oberhäslich-Formation sedimentiert wurden (siehe Abbildung 2.1) [3]. Verschiedene Muscheln, Brachiopoden und seltene Ammoniten stammen aus dieser Zeit [4]. Nach einer kurzzeitigen Senkung des Meeresspiegels trat der zweite, spätcenomane Meeressvorstoß vor etwa 94,5 Millionen Jahren ein. Aus geologischer Sicht handelte es sich dabei um einen sehr raschen Meeresspiegelanstieg, sodass viele Inseln überflutet und ein direktes Auflagern der Dölzchen-Formation begünstigt wurde [3]. In Abbildung 2.2 sind unterdessen die paläogeographischen Verhältnisse vor etwa 94 Millionen Jahren vor heute dargestellt.

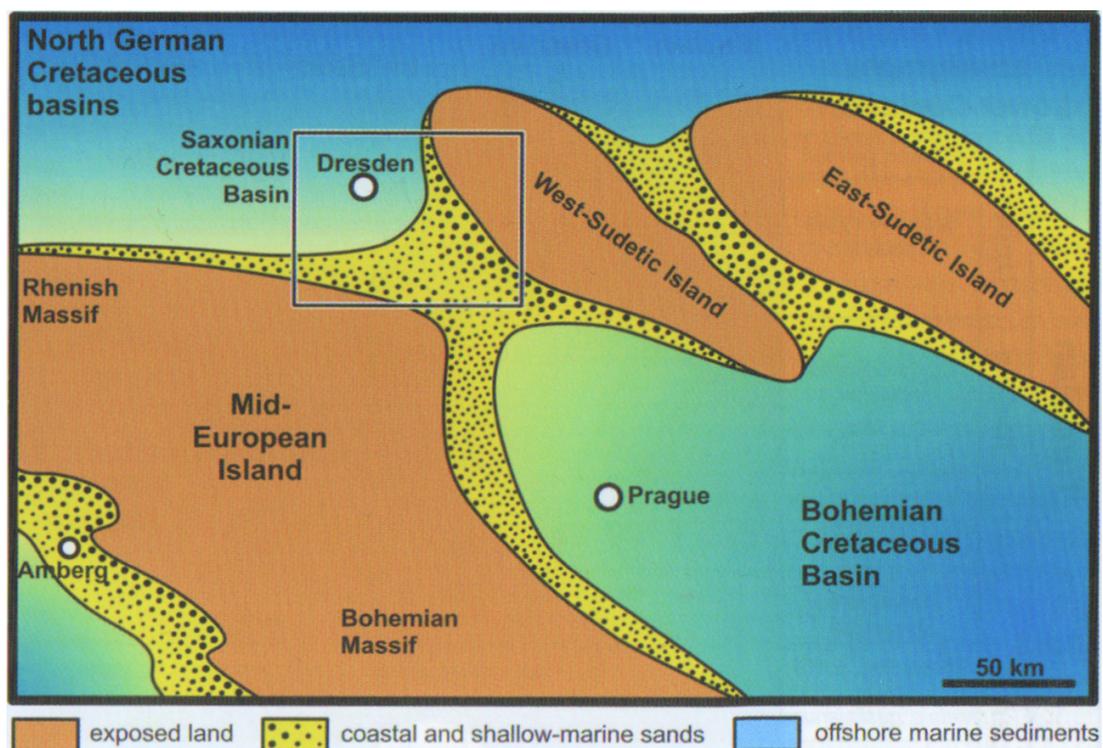


Abb. 2.2: Paläogeographie der frühen Oberkreide (vor etwa 94 Millionen Jahren (spätes Cenomanium)) mit Lage des sächsischen Kreidebeckens [3].

Trotz der größtenteils eingeebneten Ablagerung der Elbtalkreide im obersten Cenomanium kam es im darauffolgenden Turonium zu gleichmäßigeren Sedimentationsbedingungen, die durch den progressiven Meeresspiegelanstieg hervorgerufen wurden [4].

Diese Umstände bewirkten schließlich die Bildung eines hydrodynamisch zonierten bzw. gradierten Schelfs [4]. Abbildung 2.3 zeigt diesbezüglich ein vereinfachtes Modell. Ein gradiertter Schelf beschreibt hierbei eine von der Küste ausgehende Abnahme der Wasserenergie und der Korngröße [4]. Im gleichen Verhältnis dieser beiden Werte ist eine Zunahme der Wassertiefe zu beobachten. Die Mergel- bzw. Plänerfazies wurde auf dem tieferen Schelf unterhalb der Sturmwellenbasis in einigen 10er Metern Wassertiefe abgelagert. Die sandige Fazies hingegen lässt sich in küstennähe auf dem flachen Schelf oberhalb der Schönwetter-Wellenbasis lokalisieren [4]. Dazwischen existiert eine veränderliche Übergangsfazies. Für die Sedimentverteilung in diesem Bereich spielen speziell Stürme eine wichtige Rolle. Ebenso lassen sich kurzfristige Meeresspiegeländerungen ziemlich leicht nachweisen [4].

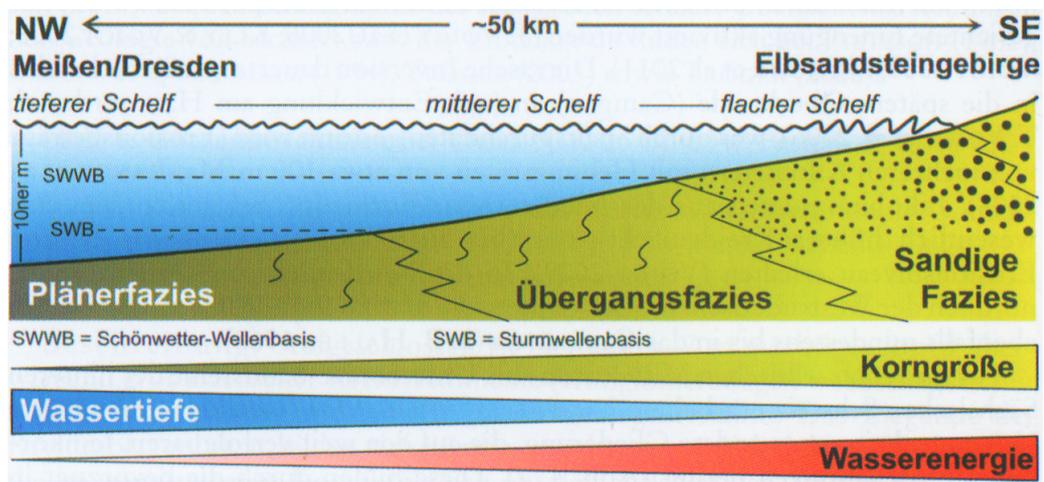


Abb. 2.3: Vereinfachtes Ablagerungsmodell der Elbtalkreide als lateral zonierter (gradiertter) Schelf [3].

Im frühen Mittelturonium ereignete sich erneut eine Meerestransgression [4]. Diese wurde nach einer sedimentären Unterbrechung durch einen weiteren Meeresspiegelabfall an der Wende zwischen Unter- und Mittelturonium verursacht. Es lässt sich vermuten, dass die Küstenlinie dabei weit nach Westen verschoben und das südwestliche Liefergebiet der Böhmisches Masse (Erzgebirge) zunehmend unbedeutender wurde [4]. Die siliziklastischen, mittelturonisch bis unterconiacischen Sandsteine der Sächsischen Schweiz (Postelwitz- und Schrammstein-Formation) stammen somit von der Westsudetischen Insel im Osten ab. Eine Ablagerung der Sedimente in die Elbezone fand noch bis ins Santonium vor ca. 85 Millionen Jahren statt [5]. Danach kam es zur Hebung des Meeresbodens und einer marinen Regression, was eine Unterbrechung der Sedimentation zur Folge hatte. Zurück blieb eine verfestigte und geschichtete Sandsteinformation, die Mächtigkeiten von 550-650 Metern aufwies [5].

Am Ende der Oberkreide begann mit der Heraushebung des Lausitz-Blocks eine tektonische Phase für die Elbezone. Dabei wurden die Gesteine des Lausitzer Granodioritmassivs

nicht nur angehoben, sondern auch teilweise aus nördlicher Richtung auf die kretazischen Sandsteine aufgeschoben [6]. Aufgrund dieser Überschiebung und der damit verbundenen Druckverhältnisse wurde die Sandsteinplatte tektonisch überprägt und zergliedert. Die Lausitzer Überschiebung als geologische Grenze spiegelt hierbei die Bruch- bzw. Störungszone wider [6]. Als tektonischer Vorgang im Eozän spielt ebenso die Heraushebung des Erzgebirges entlang des Erzgebirgsabbruchs eine entscheidende Rolle. Infolge der Schrägstellung dieses Systems erfahren auch die Sedimentschichten eine leichte Neigung [6]. Durch die zuvor erwähnten tektonischen Beanspruchungen hat das heutige Elbsandsteingebirge seine Klüftigkeit erhalten.

Für das Pleistozän sind außerdem die Vorstöße des Elster- und Saaleeises zu erwähnen, welche die Landschaft prägten. Eine ausgedehnte Eisbedeckung im Raum Dresden bis Bad Schandau existierte bereits während der Elsterkaltzeit [7]. Saalezeitliche Gletscher rückten nur noch bis Meißen vor [7]. Die heutigen Formen der anstehenden Gesteine und das vorhandene Relief wurde wesentlich durch das Einschneiden bzw. die Tätigkeit der Elbe und anderer, zahlreicher Nebenflüsse erreicht [8]. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt bestehen vor allem Verwitterungs- und Erosionsprozesse, welche die Sandsteinoberflächen maßgebend beeinflussen und auch zu Gesteinsinstabilitäten und anschließenden Felsstürzen und Rutschungen führen können [8]. Abbildung 2.4 zeigt die heutige Verbreitung kreidezeitlicher Gesteine. Begrenzt wird die Elbezone dabei nördlich und nordöstlich von der Überschiebungsfrent des Lausitz-Blocks, weiter westlich vom Meißener und Priestewitzer Massiv, südwestlich vom Döhlener Perm-Becken und weiter südlich vom Elbtalschiefergebirge.

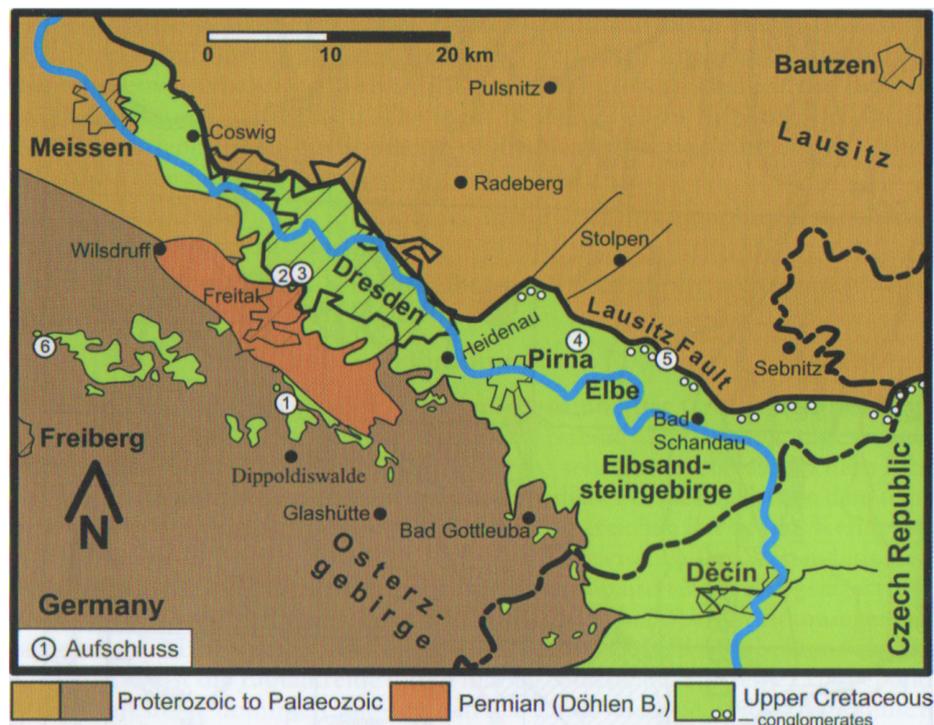


Abb. 2.4: Geologische Übersichtskarte mit Verbreitung der Elbtalkreide (grün) [3].

3 Grundlagen und Methodik

Für die Geländearbeit bedarf es einer geologischen Grundausrüstung, welche aus Geologenhammer, Zollstock, Feldbuch, Lupe, sowie einem Gefügekompas besteht.

3.1 Erfassung des Trennflächengefüges mittels Bildanalyse

Für die rechnergestützte Bestimmung von Trennflächen (Kluftflächen), deren Abstand und Öffnungsweite, sowie für die Ermittlung von Bank-/Schichtmächtigkeiten wurde das Programm *ImageJ* verwendet. Dabei handelt es sich um ein frei verfügbares Bildbearbeitungs- und Bildverarbeitungsprogramm. Dieses wurde ebenso aufgrund der Erreichbarkeit der (höher gelegenen) Felsabschnitte gewählt, welche im Feld nicht zugänglich waren. Im Folgenden (vgl. Abbildung 3.1) wird hierbei ein Beispiel beschrieben, wie sich beispielsweise die Mächtigkeit mittels ImageJ ermitteln lässt.

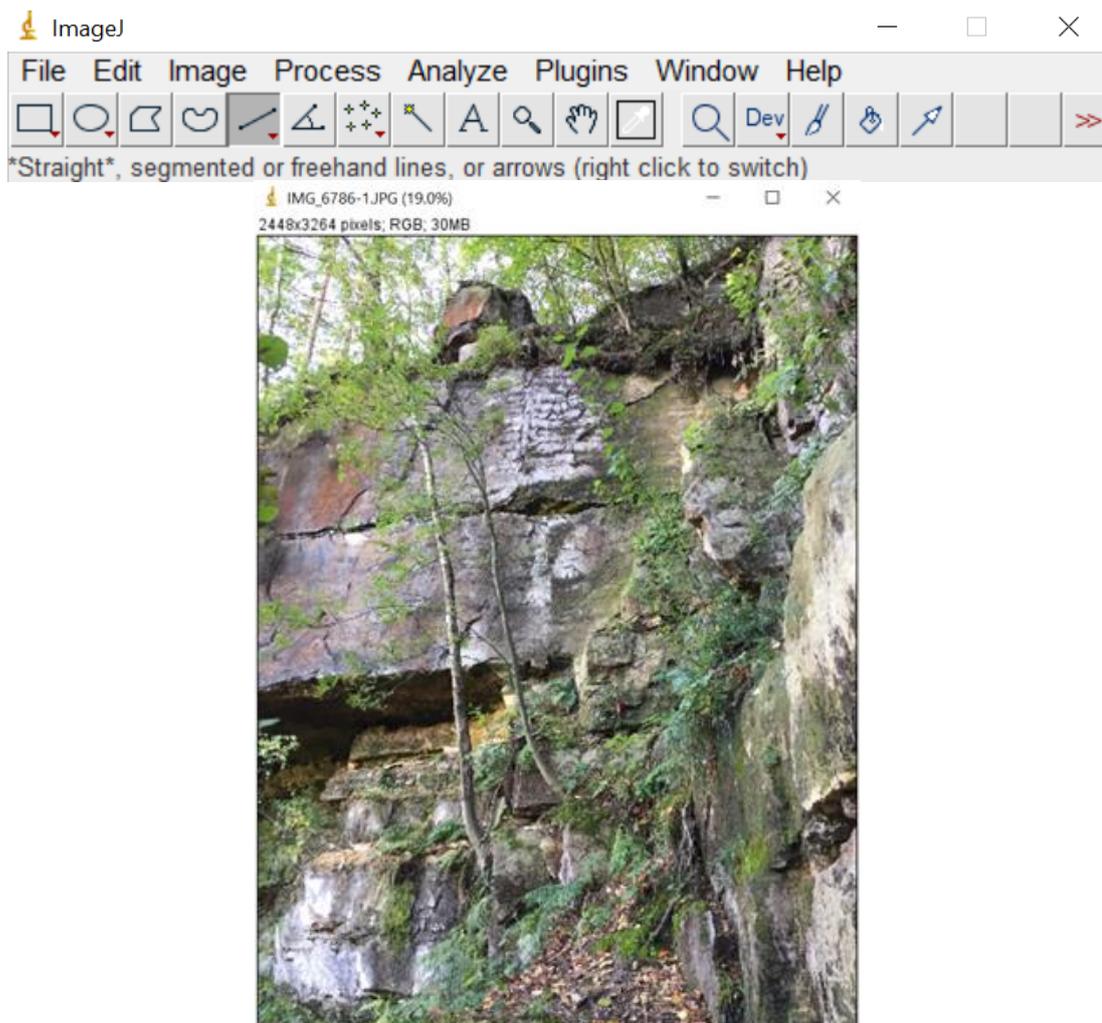


Abb. 3.1: In den Gansbrüchen aufgenommenes Beispielbild für das Programm ImageJ. Oben: Werkzeugleiste des Programms.

Zunächst wird mit dem Linienwerkzeug (fünftes Icon von links) eine Strecke entlang eines Objektes markiert, dessen Länge bzw. Größe bekannt ist (siehe Abbildung 3.2). In diesem Fall ist dies der Geologenhammer mit einer Länge von 31,3 cm.

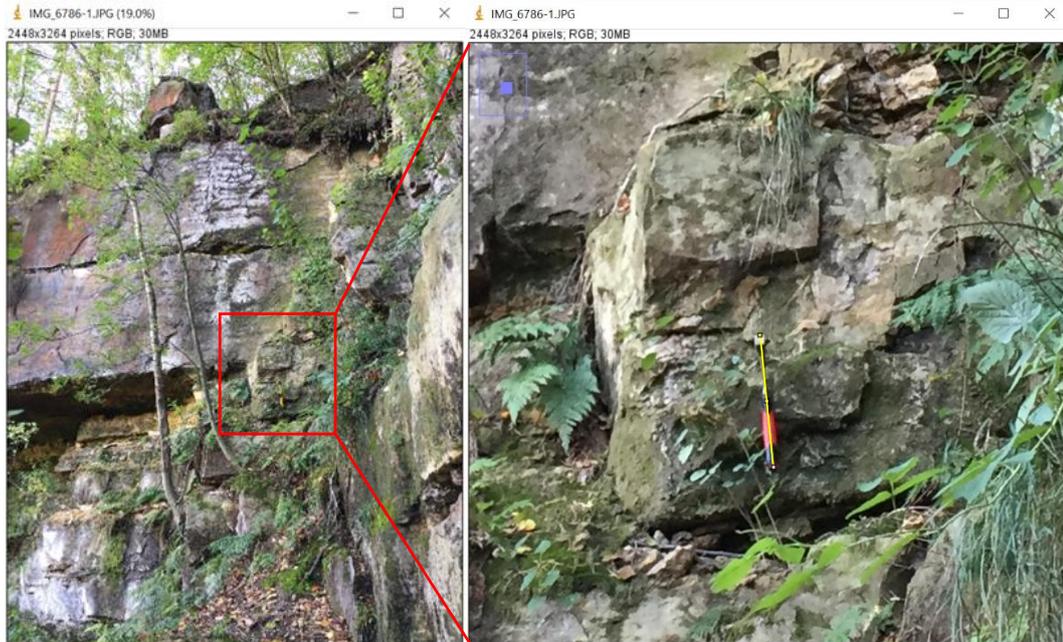


Abb. 3.2: Markierte Strecke des Geologenhammers (Gelbe Linie).

Über *Analyze* und *Set Scale* wird das Eingabefenster zum Skalieren geöffnet (siehe Abbildung 3.3).

Im ersten Eingabefeld erscheint bereits die Länge der Strecke in Pixel (hier 136,7187 Pixel). Im zweiten Feld wird die gemessene Länge des Hammers eingegeben, somit 31,3 cm (Kommazahlen werden durch einen Punkt getrennt). Das vierte Feld beinhaltet die zugehörige Einheit, hier Zentimeter bzw. Meter. Das Programm übermittelt zur Information unten das Verhältnis von Pixeln zur Länge; hierbei sind es 4,3680 Pixel pro Zentimeter.

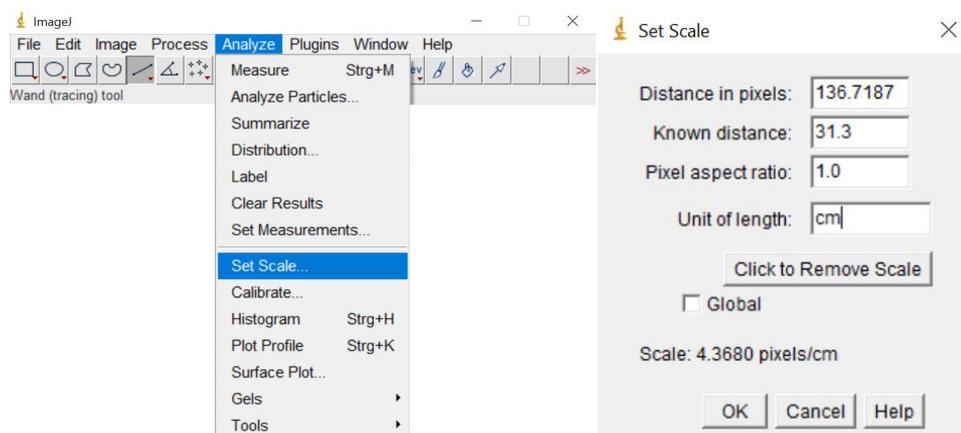


Abb. 3.3: Eingabefenster *Set Scale*.

Soll nun beispielsweise eine Bankmächtigkeit, wie in Abbildung 3.4 ermittelt werden, wird zu Beginn wieder mit dem Linienwerkzeug die Länge markiert. Über *Analyse* und *Measure* wird ein weiteres Fenster geöffnet (siehe Abbildung 3.5). In der letzten Spalte befindet sich nun die vom Programm ermittelte Länge von rund 133 cm.

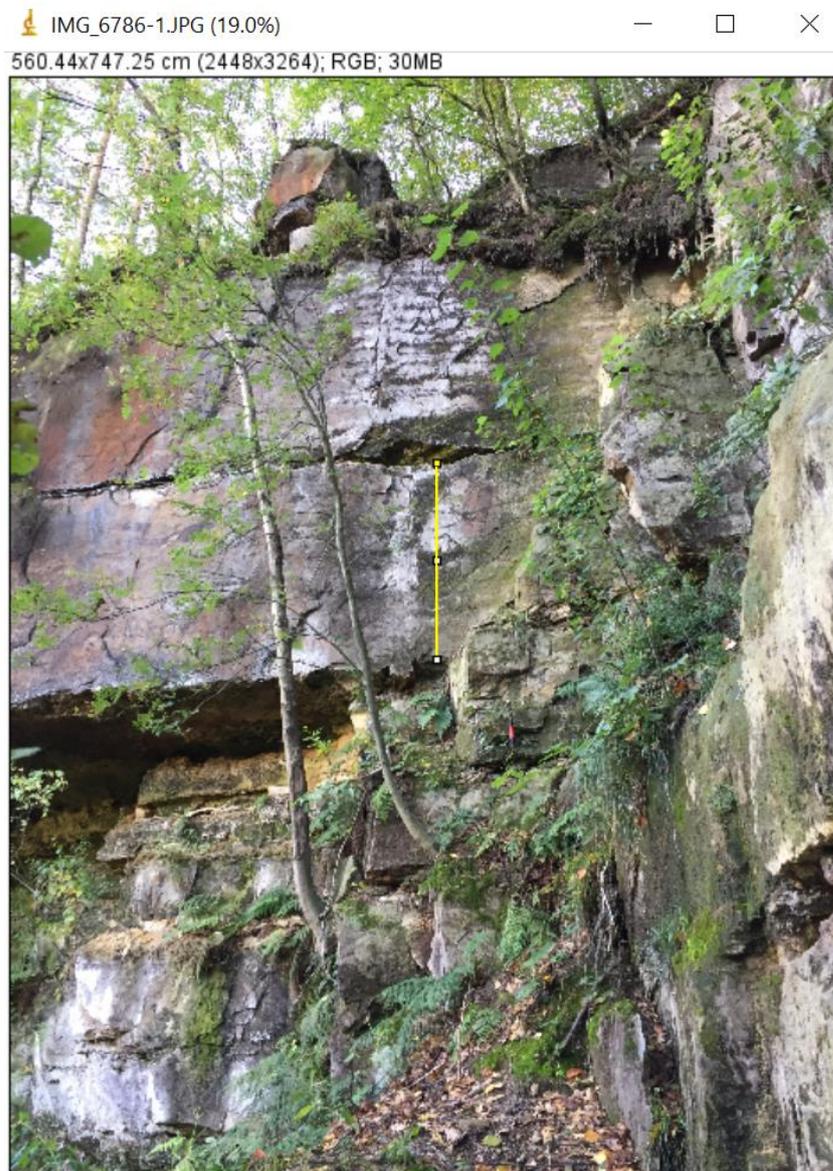


Abb. 3.4: Beispielbild mit gelb markierter Strecke.

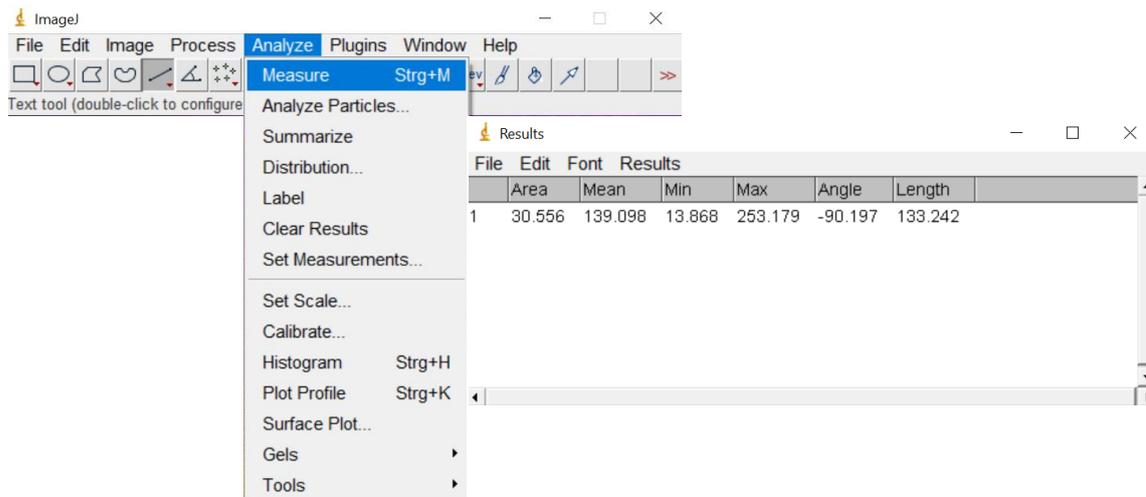


Abb. 3.5: Ausgabefenster *Results* mit Länge der markierten Strecke.

3.2 Gebirgsklassifizierungen

Die geotechnische Aufnahme und Bewertung an der Oberfläche anstehender Felsformationen hinsichtlich ihrer Beschaffenheit und der Standsicherheit ist essenziell wichtig, gestaltet sich jedoch häufig schwierig. Durch den Einsatz von Kernbohrungen können zwar die vorherrschenden geologischen Verhältnisse aufgezeigt und Festigkeiten festgestellt werden, jedoch lassen sich spezifische ingenieurgeologische Kenngrößen auf diese Weise nicht oder nur ungenügend ermitteln [9]. Die Kernbohrung gilt noch immer als wirkungsvolle direkte Erkundungsmethode, jedoch ist auch die direkte Methode der Geländeerfassung notwendig. Angesichts der enormen technischen Umstände und der hohen Kosten muss ein guter Informationsgehalt durch das erbohrte Material erfolgen [9]. Außerdem ist es nachher möglich, zusätzliche Laborproben zu entnehmen, damit weitere geotechnische Kenngrößen berechnet und bestimmt werden können.

Um die Standfestigkeit der Felsen bzw. des Gebirges trotzdem abzuschätzen, müssen die Methoden der Gebirgsklassifikationen verwendet werden. Diese ermöglichen eine geotechnische Einordnung des Gebirges, zum Beispiel in „Sehr gutes Gebirge“, „Gutes Gebirge“ oder auch in „Sehr schlechtes Gebirge“. Gesteinsmassen- und Gebirgsklassifizierungsschemata existieren bereits seit über 100 Jahren [10]. Eine der ersten Veröffentlichungen zu Gebirgsklassifikationen stammte von Terzaghi aus dem Jahr 1946, bei welchem die von Stahlstützen gehaltenen Gesteinslasten beim Tunnelvortrieb auf Basis einer beschreibenden Klassifizierung beruhen [10]. 1958 erschien ein weiteres Verfahren nach Lauffer, dass für den Stollenausbau im Fels Beachtung fand [9]. Lauffer (1958) beschrieb dabei den Zusammenhang zwischen der Spannweite, der Stehzeit und der Qualität des Gebirges [10]. Als Spann- bzw. Stützweite wird die Länge zwischen zwei aufeinanderfolgenden Stützen in einem Tunnel bezeichnet. Die Stehzeit definiert sich als diejenige Zeit, welche erforderlich

ist, um nötige Sicherungsarbeiten auszuführen [11]. Mit der Zeit entwickelten sich weitere Klassifizierungssysteme, dessen Autoren auf verschiedene Parameter unterschiedliche Schwerpunkte legten. In der vorliegenden Arbeit soll vor allem auf zwei Gebirgsklassifizierungen näher eingegangen werden. Dabei handelt es sich einerseits um den „Geological Strength Index“ (kurz GSI), und andererseits um das „Rock Mass Rating“-System von Bieniawski (1989).

3.2.1 Rock Quality Designation-Index

Der Rock Quality Designation-Index (kurz RQD-Index) wurde im Jahr 1967 von Deere zur Beschreibung von Fels entwickelt und ermittelt die Gebirgs- und Gesteinsmassenqualität anhand der Länge der erbohrten Bohrkerne [10]. Ursprünglich galt dieser als vollständige Felsklassifikation [12]. Gegenwärtig wird der RQD-Index allerdings nur noch für die Einstufung des Zerbrechungsgrades von Bohrkernen genutzt [12]. Ebenso geht er als Basiswert vielfach in eine Reihe von Klassifikationssystemen ein, zum Beispiel in das RMR-System von Bieniawski (vgl. Kapitel 3.2.2).

Der RQD-Index ist definiert als der Prozentsatz an intakten Kernstücken, welche eine Länge von mindestens 10 cm besitzen, bezogen auf eine übliche Kernlänge von 1,0 m bzw. die Länge des Kernmarsches [9, 10]. Weiterhin sollte der Kern einen Mindestdurchmesser von 5,47 cm haben und mit einem Doppelkernrohr erbohrt werden [10].

Nach folgender Formel wird der Rock Quality Designation-Index berechnet:

$$\text{RQD} = \frac{\sum L}{S} \cdot 100 \% \quad (3.1)$$

$\sum L$... Summe der Kernstücklängen mit $L > 10$ cm

S ... Gesamtlänge der Kernstrecke in cm

Der ermittelte Zahlenwert liegt dabei in einem Wertebereich von 0 % bis 100 %. Bei 100 % handelt es sich um ein sehr gutes Gebirge mit hoher Standsicherheit [9]. Ein Wert mit 0 % kennzeichnet daneben ein Gebirge ohne Standsicherheit und nachteiligen Eigenschaften [9, 12]. Die folgende Tabelle zeigt deren Einteilung in fünf Klassen:

Tab. 3.1: Klasseneinteilung RQD-Index.

RQD-Index [%]	Felsqualität
90 - 100	sehr gut (excellent)
75 - 90	gut (good)
50 - 75	mäßig (fair)
25 - 50	schlecht (poor)
0 - 25	sehr schlecht (very poor)

Es ergeben sich jedoch Nachteile bezüglich dieser Einteilung. Liegen die Längen der Kernbruchstücke unter der festgelegten Grenze von 10 cm, so ist der errechnete RQD-Index definitionsgemäß immer 0%. Damit wäre dieses Gestein genauso ungenügend, wie zum Beispiel die zermahlenden bzw. mylonitisierten Gesteine entlang einer Störungszone [12]. Ebenso wird keine Unterscheidung zwischen sehr guten Gebirgsbereichen getroffen. Für den Fall, dass alle Bruchstücke über 10 cm sind und kein Kernverlust zu verzeichnen ist, beträgt der RQD-Index 100% [9]. Beispielsweise wird damit ein Kernmarsch von 1,0 Meter, welcher als Bruchstück von ebendieser Länge vorhanden ist, mit einem Kernmarsch mit neun 11 cm-Bruchstücken verglichen und gleichgesetzt, obwohl die Gegebenheiten beider Kerne sehr unterschiedlich sind [9].

Um diesen Defiziten entgegenzuwirken, schlug Palmström 1982 vor, dass der Rock Quality Designation-Index aus der Anzahl der Klüfte pro Volumeneinheit geschätzt werden kann, wenn kein Kern verfügbar ist. Die vorgeschlagene Beziehung für tonfreie Gesteinsmassen wird gegeben durch [9, 10]:

$$RQD = \begin{cases} 115 - 3,3 \cdot J_v & ; \text{für } J_v > 4,5 \\ 100 & ; \text{für } J_v \leq 4,5 \end{cases} \quad (3.2)$$

J_v ...Anzahl der Einzelklüfte pro Kubikmeter [m^{-3}]

3.2.2 Rock Mass Rating-System

In den Jahren 1972 und 1973 entwickelte Bieniawski das „RMR-System“ (Rock Mass Rating), welches auch als „Geomechanische Klassifikation“ bekannt ist [10, 13]. Seit der Veröffentlichung 1976 wurde das System oft genutzt, vielfach verbessert und weiterentwickelt. Bieniawski nahm 1989 selbst signifikante Veränderungen an den Wertungen der unterschiedlichen Einflussgrößen vor [10].

Um Gesteinsmassen nach dem RMR-System klassifizieren zu können, werden die nachfolgenden sechs Parameter verwendet [9, 10]:

1. Festigkeit des Gesteinsmaterials;
2. Rock Quality Designation (RQD)-Index nach Deere;
3. Kluftabstand;
4. Kluftbeschaffenheit;
5. Orientierung/Raumstellung der Klüfte;
6. Zutritt von Grundwasser/Gebirgswasser.

Alle aufgeführten Parameter lassen sich im Gelände bestimmen und können teilweise auch aus Bohrlochdaten gewonnen werden [13]. Bei der Anwendung dieses Klassifizierungssystems wird die Gesteinsmasse dabei in eine Anzahl struktureller Regionen unterteilt und jede Region wird separat klassifiziert. Die Grenzen dieser strukturellen Regionen bilden für gewöhnlich wesentliche, geologische Merkmale, wie beispielsweise eine Verwerfung bzw. Störungszone oder eine Änderung der Gesteinsart. In einigen Fällen können signifikante Änderungen des Kluftflächenabstands oder der Kluftbeschaffenheiten innerhalb desselben Gesteins die Aufteilung der Gesteinsmasse in eine Reihe kleinerer, struktureller Bereiche erforderlich machen [10].

Sobald die obigen sechs Klassifizierungsparameter für jeden Strukturbereich im Feld bestimmt wurden, wird das Rock Mass Rating-System, welches in Tabelle 3.3 dargestellt ist, herangezogen. Gemäß dieser Tabelle wird jedem Parameter eine Bewertung zugewiesen [13]. Um anschließend einen RMR-Wert berechnen zu können, wird die folgende Formel verwendet:

$$RMR = W_{qu} + W_{RQD} + W_a + W_b + W_c + W_d \quad (3.3)$$

W_{qu} ... Wertung für die Festigkeit des Gesteinsmaterials

W_{RQD} ... Wertung für den RQD-Index nach Deere (vgl. Seite 10)

W_a ... Wertung für den Kluftabstand

W_b ... Wertung für die Kluftbeschaffenheit

W_c ... Wertung für die Orientierung der Klüfte

W_d ... Wertung für den Zutritt von Grundwasser

Der Wertebereich des RMR befindet sich zwischen 0 und 100 und besteht aus den sechs Summanden, welche vorher auf Basis der genannten Parameter anhand der Tabelle 3.3 ermittelt wurden. Aus der Berechnung des RMR-Wertes resultiert eine weitere Einteilung in Klassen, die der Tabelle 3.2 entnommen werden kann.

Tab. 3.2: Klasseneinteilung RMR-System.

RMR-Wert	Klasse
81 - 100	I sehr guter Fels (very good rock)
61 - 80	II guter Fels (good rock)
41 - 60	III mäßig guter Fels (fair rock)
21 - 40	IV schlechter Fels (poor rock)
0 - 20	V sehr schlechter Fels (very poor rock)

Tab. 3.3: Rock Mass Rating-System nach Bieniawski (1989) [14].

A. KLASIFIKATIONSPARAMETER UND DEREN WERTUNG									
Parameter			Wertebereich						
1	Festigkeit des intakten Gesteins	Punktbezogener Festigkeitsindex	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	< 1 MPa siehe Uniaxiale Druckfestigkeit		
		Einaxiale Druckfestigkeit	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Wertung	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD-Index		100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%		
	Wertung		20	17	13	8	3		
3	Kluftabstand		> 2 m	0,6 - 2,0 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Wertung		20	15	10	8	5		
4	Kluftbeschaffenheit (Vgl. E)		sehr raue, unverwitterte Oberfläche, nicht kontinuierlich, keine Durchtrennung	schwach raue Oberfläche, Durchtrennung < 1 mm leicht angewittert	schwach raue Oberfläche, Durchtrennung < 1 mm, stark verwittert	harnschartige Oberfl. oder Letten < 5 mm Dicke oder Öffnungsweite 1-5 mm durchgehend	weiche Letten > 5 mm Dicke oder Öffnungsweite > 5 mm durchgehend		
	Wertung		30	25	20	10	0		
5	Zutritt von Grundwasser	Zufluss pro 10 m Tunnellänge	(kein)	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Kluftwasserdruck σ_1	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
	allgem. Bedingungen		vollständig trocken	feucht	nass	tropfend	fließend		
	Wertung		15	10	7	4	0		
B. EINSCHÄTZUNG DER RAUMSTELLUNG DER KLÜFTE (VGL. F)									
Orientierung von Streichen und Fallen			sehr günstig	günstig	gut	ungünstig	sehr ungünstig		
Wertungen	Tunnel & Bergwerke		0	-2	-5	-10	-12		
	Gründungen		0	-2	-7	-15	-25		
	Hänge & Böschungen		0	-5	-25	-50			
C. GESTEINSKLASSEN, BESTIMMT ANHAND DER GESAMTWERTUNG									
Wertung			100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21		
Klasse			I	II	III	IV	V		
Beschreibung			sehr guter Fels	guter Fels	mäßig guter Fels	schlechter Fels	sehr schlechter Fels		
D. BEDEUTUNG DER GESTEINSKLASSEN									
Klasse des Gesteins			I	II	III	IV	V		
durchschnittliche Standzeit			20 Jahre für 15 m Spannweite	1 Jahr für 10 m Spannweite	1 Woche für 5 m Spannweite	10 Stunden für 2,5 m Spannweite	30 Minuten für 1 m Spannweite		
Kohäsion c (kPa)			> 400	300 - 400	200 - 300	100 - 200	< 100		
Reibungswinkel (Grad)			> 45°	35° - 45°	25° - 35°	15° - 25°	< 15°		
E. RICHTLINIEN DER KLASIFIKATION VON KLÜFTBEDINGUNGEN*									
Kluftlänge (Ausbeißern)			< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
Wertung			6	4	2	1	0		
Durchtrennung (Öffnung)			(keine)	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
Wertung			6	5	4	1	0		
Rauhigkeit			sehr rau	rau	schwach rau	glatt	harnschartig		
Wertung			6	5	3	1	0		
Füllung (Letten)			keine	hart < 5 mm	hart > 5 mm	weich < 5 mm	weich > 5 mm		
Wertung			6	4	3	3	0		
Verwitterungsgrad			unverwittert	angewittert	mäßig verwittert	stark verwittert	zersetzt		
Wertung			6	5	3	1	0		
F. EFFEKT DES STREICHENS UND FALLENS IN BEZUG AUF DAS TUNNELBAUWERK**									
Streichen senkrecht zu Tunnelachse				Streichen parallel zu Tunnelachse					
Vortrieb mit Fallen - 45 - 90° sehr günstig		Vortrieb mit Fallen - 20 - 45° günstig		Fallen 45 - 90° sehr ungünstig		Fallen 20 - 45° gut			
Vortrieb gegen Fallen - 45 - 90° gut		Vortrieb gegen Fallen - 20 - 45° ungünstig		Fallen 0-20° - unabhängig von Streichen gut					

* Einige dieser Bedingungen hängen voneinander ab. Zum Beispiel bei Anwesenheit von Füllungen wird die Rauigkeit der Oberfläche überprägt. In diesen Fällen wird empfohlen A.4 zu nutzen.

** modifiziert nach WICKHAM et al (1972).

3.2.3 Geological Strength Index

Da es praktisch unmöglich ist, Informationen zu Festigkeits- und Verformungseigenschaften von Gesteinsmassen aus direkten In-situ-Tests zu erhalten, entwickelten Hoek und Brown (1980) das Versagenskriterium (Bruchkriterium) für Gesteinsmassen [15]. Dieses Kriterium dient in erster Linie dazu, aus den in Laborversuchen ermittelten Daten für die Gesteinsfestigkeit eine Gebirgsfestigkeit zu berechnen [16]. Hoek und Brown (1980) erkannten, dass ein Versagenskriterium für Felsbereiche keinen praktischen Wert hätte, wenn es nicht mit geologischen Beobachtungen in Zusammenhang gebracht werden könnte [15]. Deshalb kam während der Entwicklung des Kriteriums die Idee eines neuen Klassifizierungssystems auf, sie wurde jedoch vorerst nicht verwirklicht und auf das bereits veröffentlichte RMR-System von Bieniawski zurückgegriffen.

Nach mehreren Jahren des Einsatzes stellte sich heraus, dass sich das RMR-System nur schwer auf Gesteinsmassen mit sehr schlechter Qualität anwenden lässt [15]. Da ebenso der RQD-Index für die meisten qualitativ „schwachen“ Gesteinsmassen im Wesentlichen Null ist, war es erforderlich, ein alternatives Klassifizierungssystem in Betracht zu ziehen. Das geforderte System sollte dabei stärker auf grundlegende geologische Beobachtungen der Gesteinsmassenmerkmale und seine Struktur eingehen und speziell für die Abschätzung der Gesteinsmasseneigenschaften und nicht für die Tunnelverstärkung und -unterstützung entwickelt werden [15].

Die neue Klassifikation realisierten Hoek und Wood im Jahr 1992, welche infolgedessen als Geological Strength Index (GSI) bezeichnet wurde [15]. Seit 1998 entwickelten Hoek und Marinos das GSI-System in seiner jetzigen Form, welches in Abbildung 3.6 dargestellt ist. Der Geological Strength Index berücksichtigt durch die Kombination der beiden grundlegenden Parameter des geologischen Prozesses - die Struktur bzw. Blockartigkeit der Gesteinsmasse und die Kluftbeschaffenheit - die wichtigsten geologischen Kräfte, die eine Formation bestimmen [15]. Dabei handelt es sich somit um einen geologischen Index, der im Feld leicht anwendbar ist.

Das GSI-Klassifizierungssystem basiert ebenso auf der Annahme, dass die Gesteinsmasse eine ausreichende Anzahl von zufällig orientierten Klüften enthält, so dass sie sich als homogene, isotrope Masse verhält [15]. Anders formuliert ist das Verhalten der Gesteinsmasse unabhängig von der Richtung der aufgetragenen Lasten. Es ist daher klar, dass das GSI-System nicht auf Gesteinsmassen angewendet werden sollte, bei denen eine klar definierte dominante Strukturorientierung oder strukturabhängige Gravitationsinstabilität vorliegt [15].

Um einen GSI-Wert aus dem Diagramm abzulesen, muss zuerst eine passende Struktur und Kluftbeschaffenheit der Gesteinsmasse gewählt werden. Durch eine waagerechte (bei

der Struktur) und eine senkrechte (bei der Beschaffenheit) Hilfslinie wird ein Schnittpunkt im GSI-Diagramm erzeugt, der auf bzw. im Bereich der schrägen GSI-Linien liegt und mithilfe dieser geschätzt wird. Die GSI-Linien besitzen dabei einen Abstandswert von 5, der Wertebereich reicht von 0 bis 100.

Beim Umgang mit bestimmten Gesteinsmassen wird außerdem empfohlen, die Auswahl des entsprechenden Falls nicht auf die visuelle Ähnlichkeit mit den Skizzen der Struktur zu beschränken, wie sie im GSI-Diagramm dargestellt sind [15]. Die zugehörigen Beschreibungen müssen ebenfalls sorgfältig gelesen werden, damit die am besten geeignete Struktur ausgewählt werden kann. Der passende Fall kann durchaus an einem Zwischenpunkt zwischen der begrenzten Anzahl von Skizzen oder Beschreibungen liegen, die im Diagramm enthalten sind [15].

Eine weitere Möglichkeit den Geological Strength Index festzulegen, kann durch die Verwendung des Rock Mass Rating-Systems erreicht werden. Liegt die Version von 1976 vor (als RMR'^{76} bezeichnet), so wird der GSI-Wert wie folgt bestimmt [9, 17]:

$$\begin{aligned} RMR'^{76} &> 18 \\ GSI &= RMR'^{76} \end{aligned} \quad (3.4)$$

Hierbei sollte der Klassifizierungsparameter W_d (Zutritt von Grundwasser) eine Bewertung von 10 (feucht/trocken) und der Parameter W_c (Orientierung der Klüfte) eine Bewertung von 0 (sehr günstig) erhalten [9, 17].

Falls die Version von 1989 verwendet wird (als RMR'^{89} bezeichnet), so wird der GSI-Wert nach folgender Formel berechnet [9, 17]:

$$\begin{aligned} RMR'^{89} &> 23 \\ GSI &= RMR'^{89} - 5 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Die Parameter W_d (Zutritt von Grundwasser) und W_c (Orientierung der Klüfte) sollten hier ebenfalls angepasst werden. W_d sollte eine Bewertung von 15 (vollständig trocken) und W_c erneut eine Bewertung von 0 (sehr günstig) bekommen.

Bei qualitativ schlechtem Gebirge ist eine Schätzung des RMR-Wertes aus den Tabellen von Bieniawski sehr schwierig, sodass Hoek und Brown 1997 vorschlugen, den RMR-Wert für die Abschätzung des Geological Strength Index nur für gute Gebirgsqualitäten zu verwenden ($GSI > 25$). Bei qualitativ schlechten Gesteinen sollte der GSI demzufolge nicht aus RMR-Werten hergeleitet werden [9].

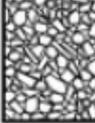
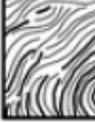
<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced is water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		<p>SURFACE CONDITIONS</p> <p>VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces</p> <p>GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces</p> <p>FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces</p> <p>POOR Slickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments</p> <p>VERY POOR Slickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings</p> <p>DECREASING SURFACE QUALITY →</p>				
<p>STRUCTURE</p>		<p>DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓</p>				
	<p>INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities</p>	90			N/A	N/A
	<p>BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets</p>	80	70	60		
	<p>VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets</p>	70	60	50		
	<p>BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity</p>	60	50	40	30	
	<p>DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces</p>	50	40	30	20	
	<p>LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes</p>	N/A	N/A			10

Abb. 3.6: Geological Strength Index nach Hoek und Marinos (1998) [15].

3.3 Ermittlung der Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag mittels Rockfor^{NET}

In Gebirgsregionen zählen Steinschläge zu den natürlich stattfindenden Naturereignissen. Sie sind jedoch für Städte oder Verkehrswege hinsichtlich ihres unerwarteten Auftretens und der hohen Geschwindigkeiten oft ein großes Sicherheitsrisiko. Dennoch können vorge-schaltete Wälder dabei eine bestimmte Schutzwirkung gegen Steinschlag gewährleisten.

Als Steinschlag wird das Abstürzen von einzelnen Gesteinsblöcken ($< 5 \text{ m}^3$) bezeichnet, die durch Verwitterung, Erosion oder mechanischen Faktoren aus einem Felshang bzw. einer Felsformation herausgelöst wurden [18]. Somit kann Steinschlag an allen steilen Felswänden angetroffen werden.

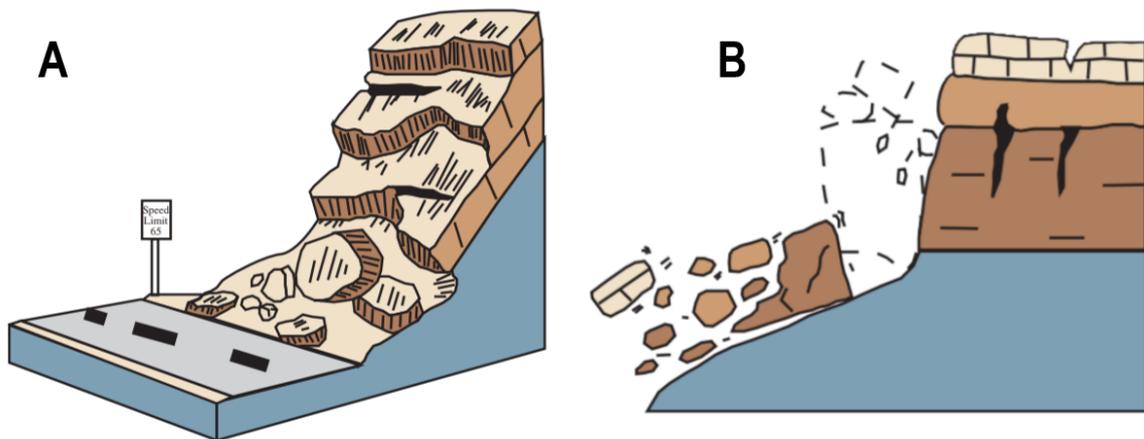


Abb. 3.7: Arten von Massenbewegungen: (A) Felssturz/Steinschlag - Bewegungsmechanismus Fallen, (B) Felssturz/Steinschlag - Bewegungsmechanismus Kippen [19].

Der Einfluss eines Waldes gegen Steinschlag ließ sich lange Zeit nicht beurteilen und quantifizieren. Zum Gegenstand der Forschung entwickelte sich das Verhältnis zwischen Wald und Steinschlag erst ab den 1980er Jahren [18].

Das Schutspotential von Wäldern wird durch verschiedenste Faktoren bestimmt, welche im Folgenden aufgelistet sind [18]:

- Stammzahl;
- mittlerer Stammdurchmesser in Brusthöhe (BHD);
- Baumart;
- Größe des Steines;
- kinetische Energie des Steines.

Prinzipiell ist die Wahrscheinlichkeit des Kontaktes mit jeglichen Bäumen bei kleineren Steinen geringer als bei größeren. Umso höher der mittlere Stammdurchmesser in Brusthöhe (BHD) und die Stammzahl werden, desto mehr steigt auch die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stein mit einem Baum zusammenstößt [18]. Außerdem konnte durch verschiedene Versuche belegt werden, dass die Baumart einen entscheidenden Faktor bei der Energieaufnahme spielt [18]. Abbildung 3.8 zeigt diesbezüglich das Verhältnis zwischen BHD und der maximalen Energieaufnahme fünf verschiedener Baumarten.

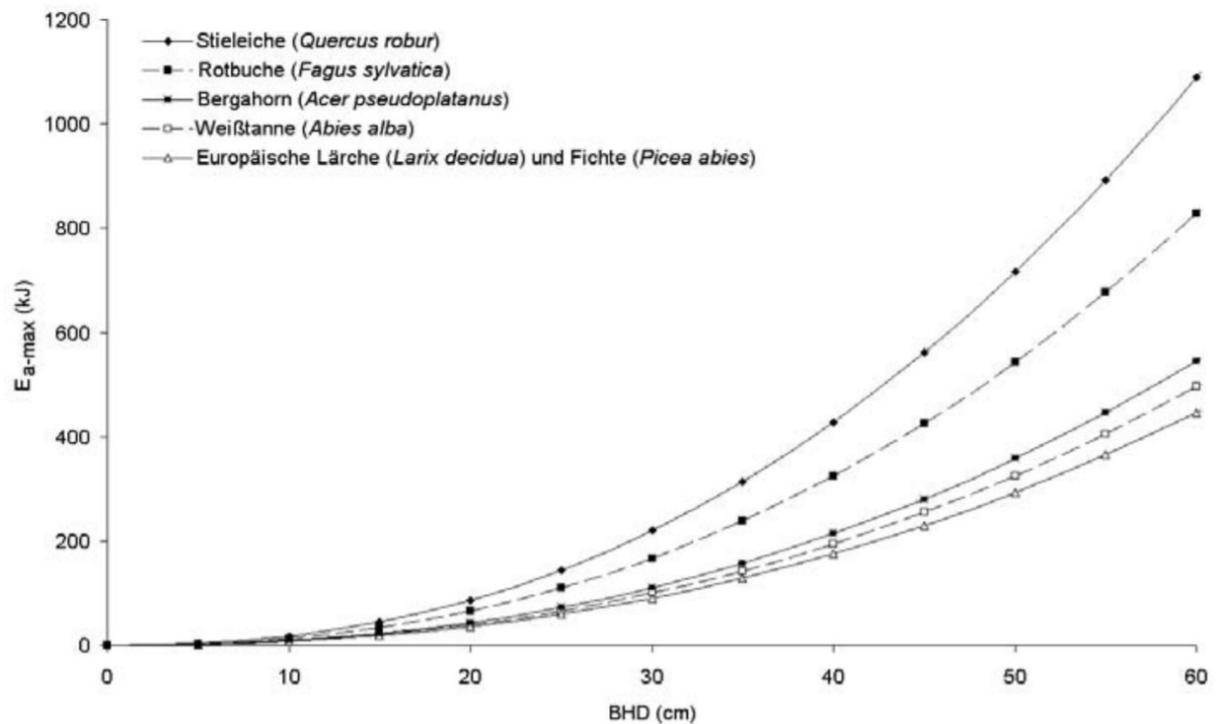


Abb. 3.8: Beziehung zwischen maximaler Energieaufnahme (E_{a-max}) und BHD während eines Kontaktes zwischen Stein und Baum getrennt nach Baumarten [18].

Mit dem kostenlosen und frei zugänglichen Programm Rockfor^{NET} [20] lässt sich die voraussichtliche Steinschlaggefahr von Felshängen am Fuße eines Waldes berechnen. Das Programm konvertiert dabei die tatsächliche Waldstruktur in imaginäre Reihen parallel stehender Bäume [18]. Die Entfernung zwischen zwei Bäumen in der Reihe wird mit 90 % des mittleren Steinblockdurchmessers angegeben (siehe Abbildung 3.9).

Die Entfernung zwischen zwei Reihen beträgt 33 m [18]. Diese Abstände wurden von einer Forschungsgruppe auf einem Testgelände hergeleitet [18]. Um letztendlich die Steinschlaggefahr berechnen zu können, bewertet Rockfor^{NET}, wie viele Reihen mit welchem BHD gebraucht werden, um den Fuß des Hanges vollkommen zu schützen. Der resultierende Wert wird nachfolgend mit dem realen Wald abgeglichen.

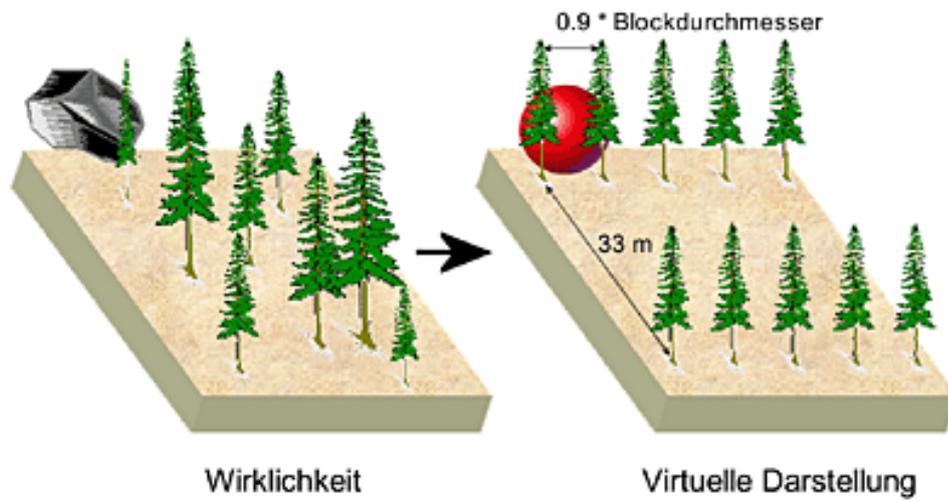


Abb. 3.9: Das Grundprinzip von Rockfor^{NET} zur Berechnung eines Steinschlagrisikos [18].

4 Geographische Lage des Untersuchungsgebietes

Das Untersuchungsgebiet „Gansbrüche“ befindet sich etwa 20 Kilometer südöstlich von Dresden und ist linkselbisch im Nordwesten des Elbsandsteingebirges einzuordnen. Die Gesteinsformation erstreckt sich hierbei über eine Strecke von circa 600 Metern und liegt im Grenzbereich der Ortschaften 'Stadt Wehlen' und 'Kurort Rathen' am Elberadweg. Der Ortschaft 'Stadt Wehlen' wird dabei in etwa zweidrittel des Gebietsanteils zugeordnet. Aus Abbildung 4.1 ist die etwaige Position der Gansbrüche im Elbsandsteingebirge ersichtlich.

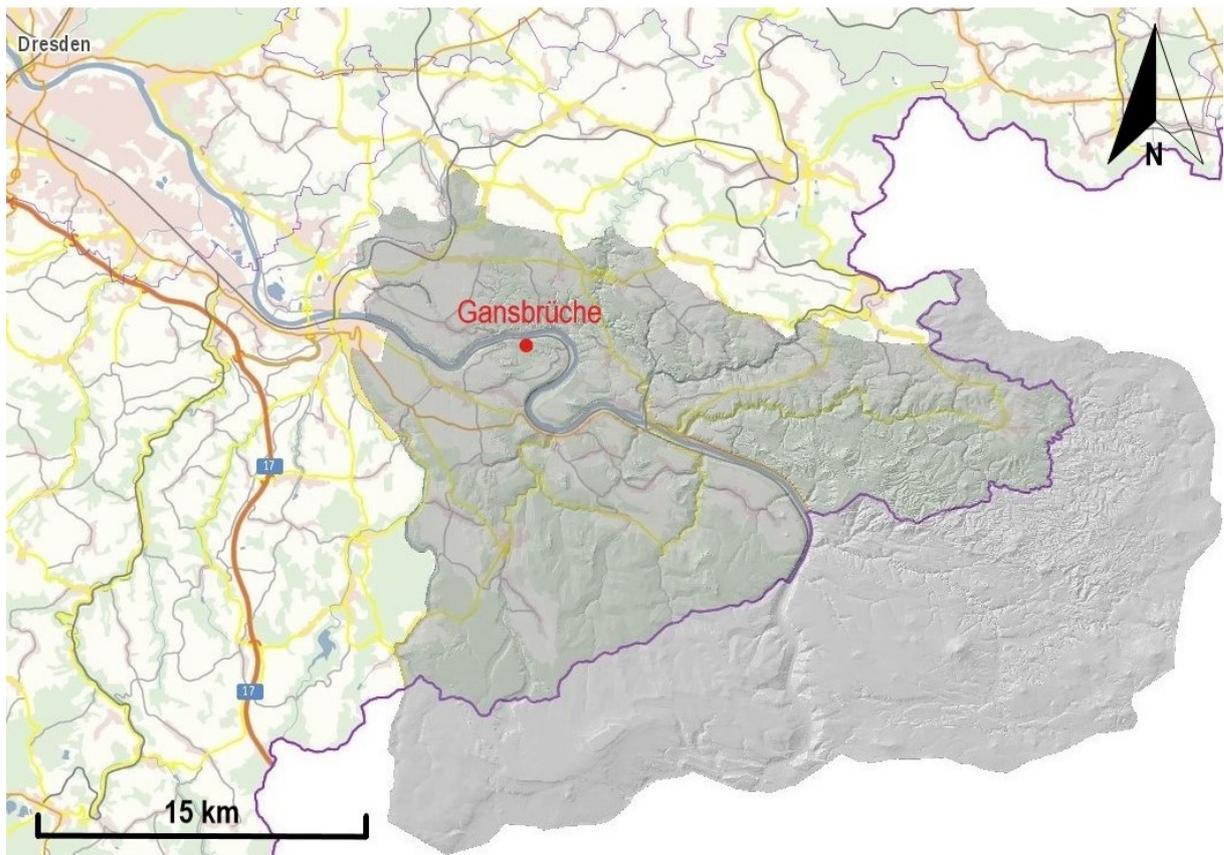


Abb. 4.1: Lage des Elbsandsteingebirges (eingraute Fläche) und des Untersuchungsgebietes Gansbrüche (roter Punkt). Verändert nach [21].

Zur besseren Bearbeitung und Überschaubarkeit wurde das Gebiet zu Beginn in einzelne Abschnitte untergliedert (siehe Abbildung 4.2). Diese sind dabei zum einen nach Homogenbereichen der Gesteinsformation eingeteilt, zum anderen wurden sie aufgrund von Masten des angrenzenden Schienenverkehrs bzw. willkürlich gesetzt.

In der vorliegenden Arbeit werden besonders die Abschnitte Gans 5 - Gans 12 analysiert und bearbeitet. Die anderen Abschnitte haben einen kleineren Anteil an den Untersuchungen.

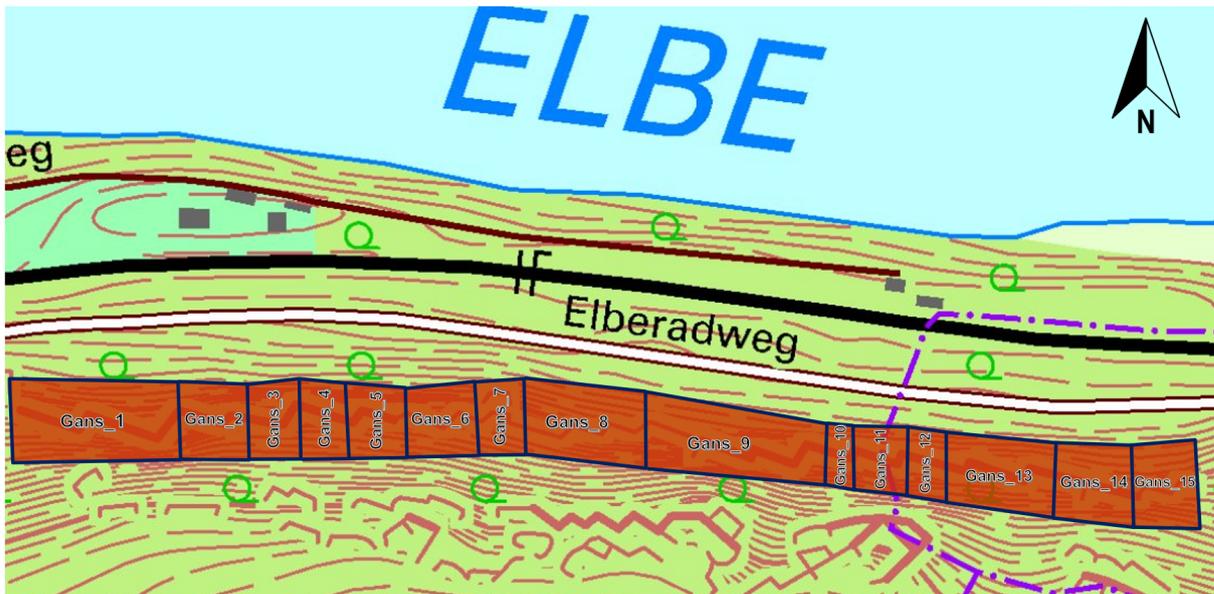


Abb. 4.2: Lage des Untersuchungsgebietes Gansbrüche mit Einteilung der einzelnen Abschnitte der Felsmassive. Verändert nach [22].

4.1 Geologie und Stratigraphie

Im engeren Sinne werden in der Elbtalkreide drei Fazies unterschieden. Dies beinhaltet eine schluffig-kalkige Fazies, eine Übergangsfazies und eine rein sandige Fazies [23]. Im Dresdner Elbtalkessel stehen dabei hauptsächlich die Ablagerungen der schluffig-kalkigen Gesteine an. Es zeigen sich fossilreiche Mergelsteine und Schluffe. Die Ablagerungen der sandigen Fazies sind im Hauptgebiet des Elbsandsteingebirges anzutreffen und können als eher fossilarm beschrieben werden [24]. Während die schluffig-kalkigen Sedimente den tieferen Meeresbereich fern dem Ufer anzeigen, wurden die sandigen Schichten an den ufernahen Flachwasserbereichen abgelagert [25].

Die Gesteine des Elbsandsteingebirges korrespondieren vor allem mit der sandigen Fazies der Elbtalkreide und werden vom Cenomanium bis Coniacium in fünf Formationen gegliedert [23]: Niederschöna-Formation, Oberhäslich-Formation, Schmilka-Formation, Postelwitz-Formation und Schrammstein-Formation (vgl. Seite 2). Das Untersuchungsgebiet der Gansbrüche lässt sich dabei zur mittel-turonischen Postelwitz-Formation zuordnen. Es treten überwiegend mittel- bis feinkörnige, gebankte Quarzsandsteine mit variierenden Mächtigkeiten auf [23]. Klein- und mittelbankige Einheiten treten als Hangverflachungen auf, großbankige Bereiche sind dagegen wandbildend, weshalb die Bezeichnung der „Quadersandsteine“ gebräuchlich ist. Die Art des Bindemittels kann weiterhin als schluffig-tonig oder kieslig beschrieben werden [23].

Der generelle Aufbau innerhalb der Postelwitz-Formation kann der Tabelle 4.1 entnommen werden.

Tab. 4.1: Aufbau der Postelwitz-Formation. Verändert nach [23].

Sandstein- abfolge, markanter Horizont	petrographische Ausbildung	morphologische Ausbildung	Mächtigkeit im Gebiet Königstein
c1	Mittel- bis kleinbankig, fein- bis mittelkörnig, Bindemittel: tonig/schluffig	geböschte und meist überrollte Gehänge, teilweise terrassiert	32 m
b	mittel- bis grobbankig (Quadersandstein), mittel- bis grobkörnige Lagen	wandbildend	8 m
$\alpha 3$	dünnplattig; stark toniger Quarzsandstein	Schichtfuge tief ausgewittert	in a3 mit einbezogen
a3	mittel- bis kleinbankig, schluffig	Klippen am Hang	30 m
a2	kleinbankig, feinkörn. Quarzsandstein bis Schluffstein	Hangverflachung, meist stark überrollt	15 m
a1	mittel- bis grobbankig, mittelkörniger Quarzsandstein mit grobkörnigen Lagen und Linsen	Klippen am Hang, teilweise überrollt	20 m

Die geologische Einheit der Gansbrüche umfasst die Sandsteinstufe a und b. Im liegenden Bereich ist der Sandstein der Stufe a vorzufinden, welcher überwiegend mittel- bis kleinbankig ausgebildet ist. Innerhalb dieser Sandsteinstufe unterscheiden sich die Quarzsandsteine farblich und in der Art der Körnung, weswegen eine weitere Gliederung in a1, a2 und a3 erfolgt [24]. In den Gansbrüchen sind die oberen Zonen der Sandsteinstufe a aufgeschlossen. Charakteristisch sind die bioturbaten Feinsandsteine, schlecht sortierte Mittelsandsteine und feinkiesige Grobsandsteinlagen [26]. Ton- und Schluffsteinlagen wechsellagern dabei zwischen den Feinsandsteinen. Die Bioturbationen fallen bei der Anwitterung des Gesteins erkennbar auf und größtenteils sind Crustaceen-Gangsysteme (Thalassinoides) vorzufinden [26]. Die Sandsteinstufe a kann Mächtigkeiten bis zu 110 Meter annehmen. Die Sandsteinstufe b, im Topbereich der Gansbrüche, lässt sich durch ungegliederte, massive Mittelsandsteine charakterisieren, die auf eine starke Quarzzementation hinweisen [26]. Ein Auftreten von feinkiesigen, grobsandigen und feinsandigen Partien ist ebenso möglich. Durch die Mittel- bis Grobbankigkeit wird der Sandstein auch als Quadersandstein bezeichnet. Im Gegensatz zur Sandsteinstufe a ist die Stufe b wandbildend und nimmt Mächtigkeiten bis 60 Meter an [26]. Ein typisches Merkmal in den Gansbrüchen ist außerdem das Vorhandensein von Überhängen.

Wie oben bereits erwähnt, bilden die Sandsteinbänke unterschiedliche Mächtigkeiten aus. Der Grund dafür liegt in wasserstauenden Zwischenlagen von tonigem Material, welche im Sandstein vorhanden sind. Durch eine besonders starke Auswitterung wird eine Bankung ermöglicht [24]. Kleinbankige Bereiche besitzen eine hohe und großbankige eine geringe Dichte an Tonlagen. Die Mächtigkeit der Zwischenlagen schwankt dabei von wenigen Millimetern bis zu mehreren Dezimetern [24].

Grundsätzlich sind die Sandsteine der Gansbrüche von gräulicher oder weiß-gelblicher Farbe. Hellorangene, rote oder rot-braune Verfärbungen deuten auf einen Eisengehalt hin. Der Grund dafür sind angereicherte Eisenoxide, wie Hämatit oder Magnetit. Diese eisenhaltigen Schlieren können dabei ein gebändertes oder geflammttes Aussehen besitzen. In Abbildung 4.3 ist die stratigraphische Schichtenfolge an einem Beispiel in den Gansbrüchen dargestellt. Eine Beschreibung der Schichten folgt im Anschluss.

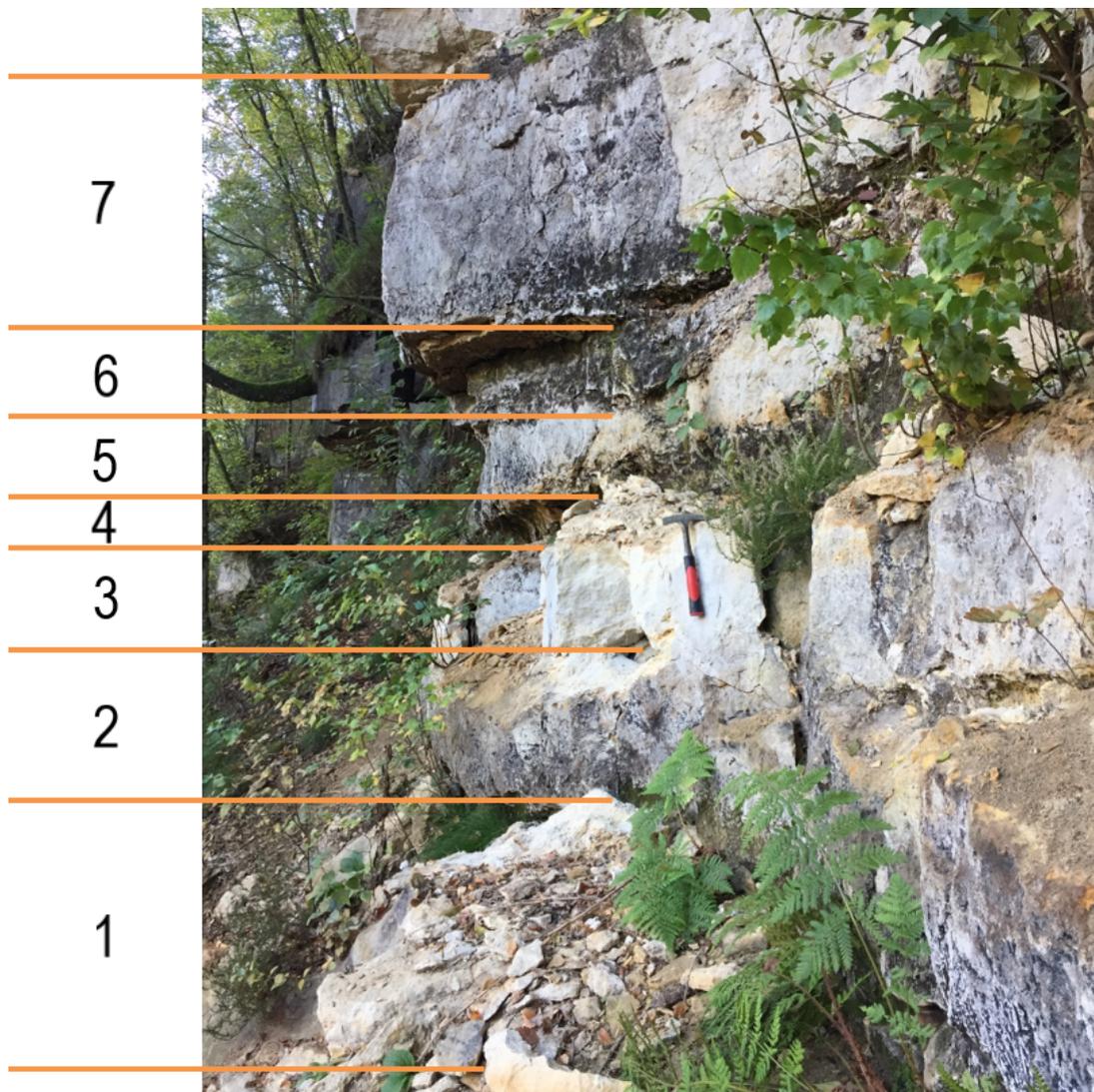


Abb. 4.3: Typische Schichtenfolge in den Gansbrüchen. Foto stammt aus Abschnitt Gans 12.

Schicht 1:

- entfestigter Bereich bestehend aus Feinsand, Mittelsand und grobsandigen Bereichen, sowie Gesteinsbruchstücken;
- weiß- bis hellgelbliche Farbe.

Schicht 2:

- feinsandiger Mittelsand;
- weiß-gräuliche Farbe;
- gute Sortierung;
- gerundete bzw. angerundete Quarzkörner;
- kieseliges Bindemittel;
- dünne, rot-braune Eisenschlieren.

Schicht 3:

- feinsandiger Mittelsand;
- weiße (bis graue) Farbe;
- gute Sortierung;
- gerundete Quarzkörner;
- dünne Tonschlieren eingeschaltet.

Schicht 4:

- mehrere Zentimeter mächtige Tonschicht;
- dunkelgraue Farbe;
- keine Komponenten erkennbar;
- teilweise grünlich verwittert;
- wasserstauende Schicht.

Schicht 5:

- feinkiesiger Grobsand;
 - weiß-graue Farbe;
 - gefärbte, angerundete Quarzkörner von rosa, violetter bis gräulicher Farbe;
 - mäßig bis gut sortiert;
 - wenig Eisenschlieren.
-

Schicht 6:

- grobsandiger Mittelsand;
- bräunliche Farbe;
- schlecht sortiert;
- dunkle (gräulich-grüne) Quarzkörner;
- angerundete bzw. gerundete Körner.

Schicht 7:

- grobsandiger Mittelsand;
- weiß-graue Farbe;
- schlecht sortiert;
- hellere Quarzkörner (rosa, gräulich, rötlich);
- Bildung von Überhängen.

In Abbildung 4.4 sind beispielhaften eisenhaltigen Schlieren in einer Gesteinsprobe dargestellt. Weiterhin zeigt Abbildung 4.5 die Tonschicht, welche im Untersuchungsgebiet lateral verfolgbar ist. In Abbildung 4.6 ist dagegen das beispielhafte Aussehen der Überhänge und in 4.7 liegende gebliebene Gesteine am oberen Ende der Böschung erkennbar.



Abb. 4.4: Rote, eisenhaltige Schlieren im Sandstein. Die Gesteinsprobe wurde am Fuß der Böschung im Bereich von Abschnitt Gans 2 gefunden.



Abb. 4.5: Toniger Bereich aus Schicht 4.



Abb. 4.6: Exemplarisches Aussehen von Überhängen im Untersuchungsgebiet.



Abb. 4.7: Liegegebliebene Gesteine von Stein- und Blockschlägen im Bereich von Abschnitt Gans 10.

4.2 Gegebenheiten im Untersuchungsgebiet

Im Untersuchungsgebiet der Gansbrüche ist eine Mauer vorhanden, welche in erster Linie als Barriere für mögliche Steinschläge errichtet wurde. Dabei handelt es sich bei der genannten Elberadwegmauer um eine Trockenmauer, ohne dass ein Mörtel oder ein anderes Bindemittel verwendet wurde. Abbildung 4.8 zeigt das Aussehen dieser Mauer.

Die Mauer befindet sich am Fuß der Böschung und besitzt eine durchschnittliche Höhe von 2,50 Meter, kann stellenweise aber auch nur 2,00 oder sogar 3,00 Meter hoch sein. Die Breite schwankt ebenfalls und beträgt höchstens 3,00 Meter. Vor der Mauer befindet sich eine 2,60 Meter breite Straße, der Elberadweg. In Richtung Elbe existiert weiterhin Schienenverkehr, welcher ebenso durch Bahnschutzmauern gesichert ist.

Durch bereits vorgekommene Stein- oder Blockschläge wurde die Elberadwegmauer auf einer Strecke von etwa 12 Metern zerstört. Unter diesen Umständen kommt es zu einer erheblichen Herabsetzung der Barrierewirkung der Mauer. In Abbildung 4.9 ist diese Gegebenheit dargestellt.



Abb. 4.8: Aussehen der Elberadwegmauer.



Abb. 4.9: Zerstörte Mauer im Bereich von Gans 11.

5 Ingenieurgeologische Untersuchungen, Auswertung und Ergebnisse

5.1 Trennflächenmessungen

Zur Messung der vorhandenen Klüfte und Spalten in den Gansbrüchen wurde ein Freiburger Geologenkompass (Gefügekompas) verwendet. Die Messreihe umfasst dabei 55 Werte des Fallwinkels und der Fallrichtung aus den Bereichen Gans 5, Gans 7, Gans 8 und Gans 12. Zur Auswertung der Daten wurde das Streichen jeder Fläche (Addition/Subtraktion der Fallrichtung mit 90°) berechnet und die Lage der Flächenpole bestimmt. Die Klüfte wurden anschließend als Flächenpole und Großkreise in einem Schmidt'schen Netz dargestellt (siehe Abbildung 5.1). Weiterhin ließen sich alle Messwerte in einer Klüftrose zur Darstellung der Richtungshäufigkeiten bringen. Diese ist in Abbildung 5.2 erkennbar.

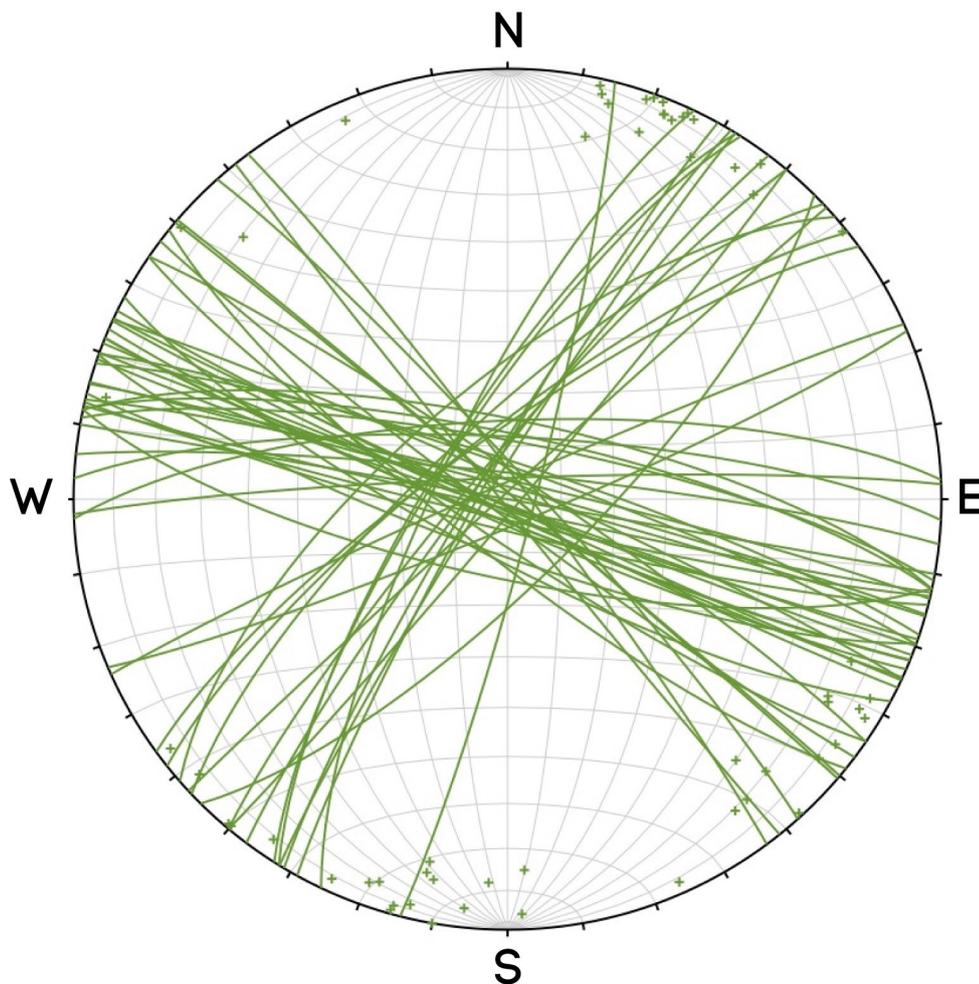


Abb. 5.1: Flächenpole und dazugehörige Großkreise der Flächen.

Am Kluftrösendiagramm lassen sich zwei Hauptkluftrichtungen ausmachen, welche in etwa senkrecht zueinander orientiert sind. Darunter zählen zum einen Klüfte, die NO-SW streichen und damit parallel zur Störungslinie des Erzgebirgsabbruchs (Streichen NO-SW) verlaufen. Unter anderem gibt es Klüfte, welche NW-SO bzw. WNW-OSO streichen. Diese verlaufen wiederum parallel zur NW-SO streichenden Lausitzer Störung [24].

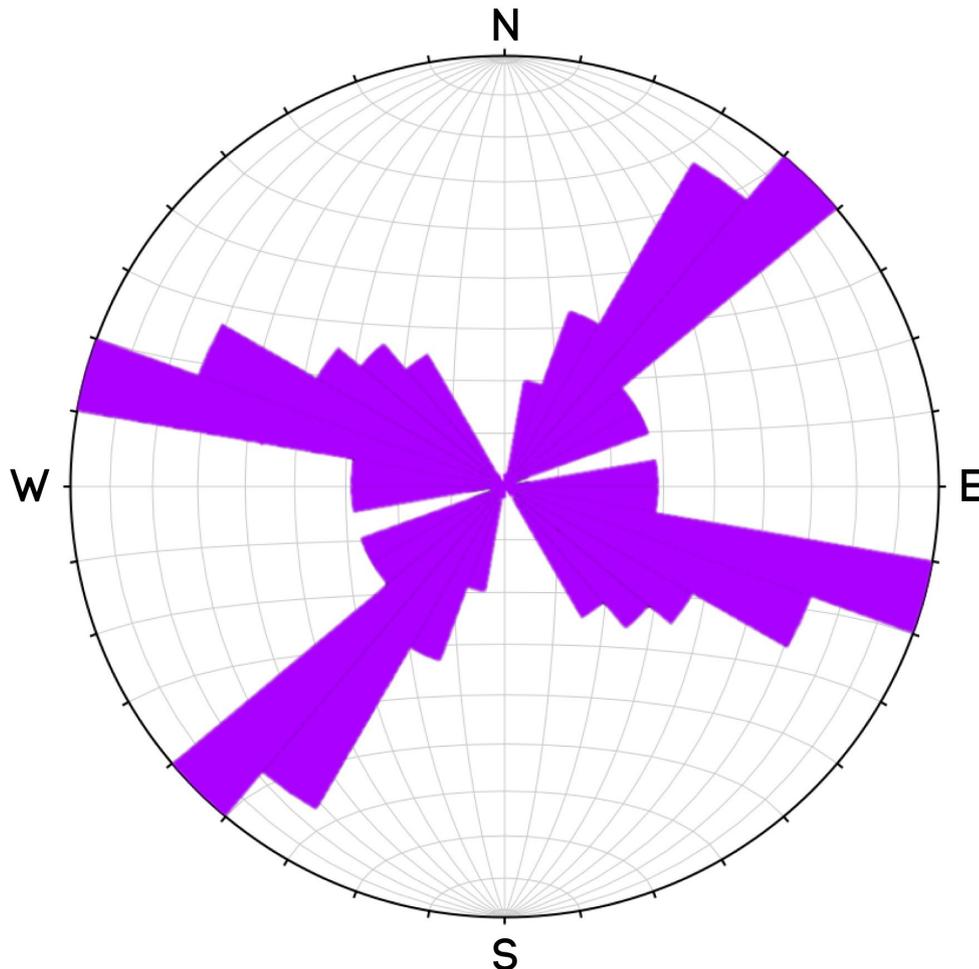


Abb. 5.2: Kluftröse zur Darstellung der vorherrschenden Streichrichtungen und deren Häufigkeiten.

5.2 Druckfestigkeitsprüfung mittels Schmidt-Hammer

Der Schmidt'sche Betonprüfhammer („Schmidt-Hammer“) wurde ursprünglich für die zerstörungsfreie Festigkeitsuntersuchung von Beton konstruiert. Diese geotechnische Prüfmethode, die zum einen sehr schnell, kostengünstig und gut vergleichbar ist, entwickelten Gaede & Schmidt (1964) [27]. Als Feldmethode wird der Schmidt-Hammer, hier der Betonprüfhammer PCE-HT225A der Firma PCE Instruments, zur Bewertung und Charakterisierung der Festigkeit (einaxiale Druckfestigkeit) des Gesteins herangezogen [28].

Zur Nutzung wird der Schlag- bzw. Druckbolzen senkrecht auf die zu prüfende Gesteins-

fläche gedrückt, wodurch sich eine Feder spannt und das Schlaggewicht („Schlaghammer“) vom Bolzen getrennt wird. Bei vollständigem Andrücken trifft die Klinke auf die Endlage, sodass es zur Auslösung des Schlages kommt [29]. Das gespannte Schlaggewicht trifft nun mit einer definierten Energie auf den Bolzen und überträgt die Energie auf die Gesteinsoberfläche. Je nach dem wie sich die Gesteinsoberfläche plastisch verhält, prallt das Schlaggewicht mehr oder weniger weit zurück [28]. Die Strecke des Rückpralls kann an der Anzeigevorrichtung abgelesen werden und gibt als dimensionsloser Rückprallwert Schlussfolgerungen über die Druckfestigkeit des Gesteins. In Abbildung 5.3 sind dazu vier Schemata des Schmidt-Hammers in der Reihenfolge A-D dargestellt.

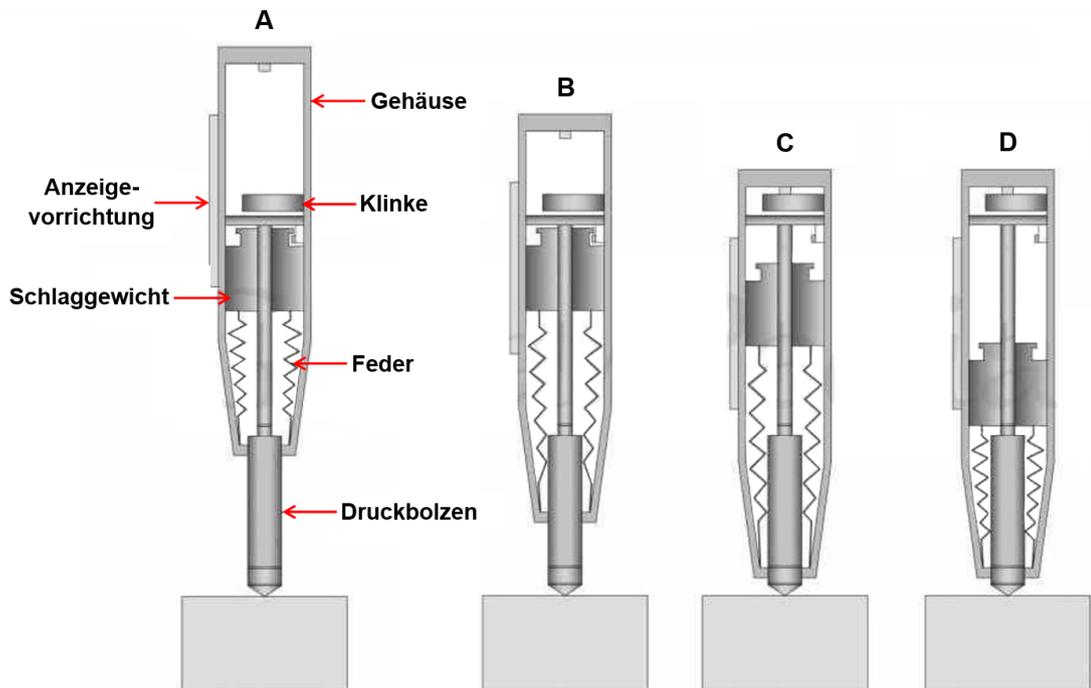


Abb. 5.3: Schematischer Aufbau des Schmidt-Hammers. (A) Schmidt-Hammer vor der Prüfung, (B) Schmidt-Hammer wird in Richtung der Gesteinsoberfläche gedrückt, (C) Klinke trifft auf Endlage und Schlaggewicht wird losgelassen, (D) Schlaggewicht trifft auf Bolzen. Verändert nach [30].

Der Messvorgang besteht aus dem Auswählen von 10 Messpunkten pro Abschnitt auf dem anstehenden Felsmassiv, die je nach Möglichkeit einen Abstand von 10 - 15 cm aufweisen sollten. Im Anschluss daran wird jeder Messpunkt zwölfmal gemessen. Der kleinste und größte Messwert jeder Messung wird weggestrichen, sodass insgesamt 10 Werte der mittleren Größenordnung verbleiben. Diese einhundert Messungen führen bei korrekter Prüfung und passender Auswahl von Prüfpunkten zu einem repräsentativen Ergebnis eines Abschnitts und werden unter anderem für die folgende Mittelwerts- und Standardabweichungsberechnung verwendet. In Tabelle 5.1 bis 5.5 sind diesbezüglich die Messwerte von fünf Abschnitten dargestellt. Darunter folgt jeweils eine Angabe des Mittelwerts und der

Standardabweichung jedes Messpunkts.

Das arithmetische Mittel \bar{x} der Messwerte berechnet sich dabei wie folgt:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Dabei beschreiben $x_1 \dots x_n$ die Einzelmesswerte des Schmidt-Hammers. Mit n wird die Anzahl der Messwerte pro Messpunkt definiert, welche in diesem Fall 10 beträgt. Durch Einsetzen in die Gleichung resultiert daraus beispielsweise ein Mittelwert von Messpunkt 1 (Abschnitt Gans 5) von 28,7 (siehe Formel 5.2 bzw. 5.3).

$$\bar{x} = \frac{(33 + 27 + 31 + 32 + 22 + 31 + 30 + 27 + 29 + 25)}{10} \quad (5.2)$$

$$\bar{x} = 28,7 \quad (5.3)$$

Um zu beurteilen, wie weit die einzelnen Messwerte im Durchschnitt vom arithmetischen Mittel abweichen, wird die Standardabweichung s benötigt. Sie bildet die quadratische Wurzel der Streuung s^2 und lässt sich folgendermaßen ermitteln:

$$s = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}} = \sqrt{\frac{1}{n - 1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (5.4)$$

Nach Einsetzen der einzelnen Werte in die Gleichung ergibt sich die Standardabweichung von 3,43 für Messpunkt 1 des Abschnitts Gans 5 (siehe Formel 5.5 bzw. 5.6).

$$s = \sqrt{\frac{((33 - 28,7)^2 + (27 - 28,7)^2 + (31 - 28,7)^2 + (32 - 28,7)^2 + (22 - 28,7)^2 + (31 - 28,7)^2 + (30 - 28,7)^2 + (27 - 28,7)^2 + (29 - 28,7)^2 + (25 - 28,7)^2)}{10 - 1}} \quad (5.5)$$

$$s = 3,43 \quad (5.6)$$

Tab. 5.1: Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 5. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.

		MP									
	RW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abschnitt Nr.: Gans 5	1	33	31	20	25	36	29	35	27	23	32
Schlagrichtung: horizontal	2	27	32	31	24	30	31	35	24	33	35
Schlagrichtung Kompass: 225	3	36	26	34	28	27	28	31	30	34	31
Prüfhöhe über GOK: 60 cm	4	31	28	25	32	23	24	29	26	26	22
Prüfabstand: ~10 cm	5	32	29	17	26	31	26	32	31	30	24
Mittelwert Abschnitt: 28,07	6	22	25	31	30	20	37	24	24	29	31
Standardabweichung: 3,69	7	31	37	25	23	18	33	28	33	33	25
	8	30	31	27	23	29	30	30	34	24	28
	9	27	24	28	29	28	17	29	25	35	27
	10	29	27	31	35	26	15	25	27	31	33
	11	24	31	39	31	32	31	29	32	20	26
	12	25	28	19	27	31	25	24	30	18	23

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mittelwert	28,7	28,8	27,1	27,5	27,7	27,4	28,7	28,5	28,3	28,0
Standardabweichung	3,43	2,39	4,93	3,03	3,83	4,65	3,59	3,10	4,81	3,56

Tab. 5.2: Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 6. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.

		MP									
	RW	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Abschnitt Nr.: Gans 6	1	35	28	34	33	27	30	32	17	28	31
Schlagrichtung: horizontal	2	31	27	25	24	30	34	26	27	30	22
Schlagrichtung Kompass: 203	3	19	36	20	26	31	24	37	25	35	25
Prüfhöhe über GOK: 50 cm	4	22	29	31	35	35	28	23	31	23	33
Prüfabstand: ~15 cm	5	32	31	38	25	30	32	29	33	31	28
Mittelwert Abschnitt: 28,1	6	20	24	27	24	26	26	32	24	24	37
Standardabweichung: 4,00	7	33	25	30	26	24	25	24	36	27	30
	8	26	31	31	19	27	31	30	31	29	27
	9	25	24	23	33	30	22	25	26	21	23
	10	30	31	31	37	25	30	24	30	32	25
	11	28	31	15	31	31	33	35	35	38	21
	12	34	24	33	22	20	35	22	19	23	34

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mittelwert	28,1	28,1	28,5	27,9	28,1	29,1	27,3	28,1	28,0	27,8
Standardabweichung	4,75	2,96	4,58	4,63	2,60	3,81	4,55	4,79	4,35	4,13

Tab. 5.3: Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 9. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.

	MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	RW										
Abschnitt Nr.: Gans 9	1	37	23	31	35	28	30	31	33	17	25
Schlagrichtung: horizontal	2	31	26	23	16	31	35	24	28	28	27
Schlagrichtung Kompass: 336	3	30	34	25	31	38	21	36	32	25	31
Prüfhöhe über GOK: 80 cm	4	34	20	33	29	23	33	25	35	32	26
Prüfabstand: ~15 cm	5	25	31	37	26	27	24	27	26	31	24
Mittelwert Abschnitt: 27,47	6	26	25	23	27	34	39	20	24	22	32
Standardabweichung: 4,22	7	29	27	24	25	31	20	32	23	23	34
	8	31	31	27	23	16	23	28	33	28	35
	9	24	24	31	21	35	26	18	25	31	22
	10	23	32	35	36	19	28	26	31	27	19
	11	19	28	20	32	20	31	30	20	31	21
	12	21	36	17	25	22	23	31	30	34	23

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mittelwert	27,4	28,1	27,2	27,4	27,0	27,4	27,4	28,5	27,8	26,5
Standardabweichung	4,20	3,73	5,00	4,33	5,77	4,74	3,78	3,81	3,55	4,45

Tab. 5.4: Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 11. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.

	MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	RW										
Abschnitt Nr.: Gans 11	1	32	31	34	26	23	26	31	32	30	19
Schlagrichtung: horizontal	2	38	27	30	36	34	20	23	30	21	29
Schlagrichtung Kompass: 198	3	22	16	31	33	30	33	38	35	25	28
Prüfhöhe über GOK: 60 cm	4	31	25	24	31	31	30	26	36	27	30
Prüfabstand: ~10 cm	5	20	31	25	24	24	33	30	22	31	27
Mittelwert Abschnitt: 27,81	6	25	34	31	25	35	34	31	31	35	23
Standardabweichung: 3,75	7	23	35	27	29	27	24	29	25	26	25
	8	33	23	37	28	25	25	24	30	30	34
	9	36	20	21	31	26	28	19	24	33	31
	10	29	28	20	32	39	29	25	27	17	26
	11	24	26	23	26	24	31	31	19	22	24
	12	27	30	28	25	15	22	28	26	23	33

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mittelwert	28,2	27,5	27,4	28,6	27,9	28,1	27,8	28,2	26,8	27,6
Standardabweichung	4,73	4,20	4,14	3,03	4,33	3,78	3,08	4,05	4,10	3,20

Tab. 5.5: Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 12. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.

	MP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RW											
Abschnitt Nr.: Gans 12	1	31	30	26	31	38	22	24	19	30	25
Schlagrichtung: horizontal	2	34	23	31	29	27	25	22	31	37	21
Schlagrichtung Kompass: 204	3	24	25	37	31	26	32	28	34	34	23
Prüfhöhe über GOK: 40 cm	4	25	18	24	35	33	35	26	26	25	22
Prüfabstand: ~10 cm	5	24	30	20	23	23	31	23	36	20	30
Mittelwert Abschnitt: 26,91	6	23	26	31	26	35	22	31	33	15	24
Standardabweichung: 4,08	7	26	35	30	27	20	30	35	23	23	33
	8	25	28	27	22	19	31	22	21	26	27
	9	22	26	28	16	31	23	31	27	31	32
	10	30	29	23	36	33	34	25	31	28	20
	11	31	27	25	26	22	21	20	25	30	24
	12	33	21	23	28	25	15	33	25	17	31

Messpunkt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Mittelwert	27,0	26,5	26,8	27,8	27,5	27,1	26,5	27,6	26,4	25,9
Standardabweichung	3,89	2,95	3,12	3,91	5,21	4,95	4,03	4,40	5,27	3,90

Aus den Rückprallwerten wird ersichtlich, dass die einzelnen Mittelwerte im Bereich zwischen 25,9 und 29,1 liegen. Die niedrigsten Werte lassen sich dabei im Abschnitt Gans 12 finden, die höchsten dagegen bei Abschnitt Gans 6. Die Standardabweichungen von ca. 2 bis 5 implizieren weiterhin eine relativ gute Schwankung um die Mittelwerte.

Um die ermittelten Rückprallwerte in einaxiale Druckfestigkeiten umzurechnen, wird eine mathematische Beziehung verwendet. Tabelle 5.6 zeigt diesbezüglich verschiedene empirische Formeln, mit denen sowohl die Druckfestigkeit, als auch der Elastizitätsmodul natürlicher Gesteine berechnet werden kann. In diesem Fall wird die Beziehung nach Katz et al. (2000) genutzt, da sie speziell für Kalk- und Sandsteine ausgelegt ist. Des Weiteren werden die Rückprallwerte des Schmidt-Hammers des Typs N („N-Hammer“) verwendet (siehe Tabelle 5.6). In den verschiedenen Abschnitten der Gansbrüche wurde ebenso mit einem N-Hammer der Firma PCE Instruments gearbeitet.

Tab. 5.6: Zusammenstellung von empirischen Beziehungen zwischen mit dem Schmidt'schen Rückprallhammer gemessenen Rückprallwerten und der einaxialen Druckfestigkeit bzw. des E-Moduls natürlicher Gesteine. Abkürzungen: σ_{UCS} : Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (MPa); E_t : Elastizitätsmodul bei 50 % der Druckfestigkeit; ρ : Dichte (g/cm^3); R_L/R_N : Rückprallwerte für L- und N-Hämmer; r : Bestimmtheitsmaß. Verändert nach [31].

References	Proposed correlations*	r	Validity range		
			Rock type	σ_{UCS}	R
Aufmuth (1973)	$\sigma_{UCS}=0.33*(R_L*\rho)^{1.35}$ $E_t=4911.84*(R_L*\rho)^{1.06}$	0.80 0.75	25 different lithologies	12–362	10–54
Kahraman (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.00045*(R_N*\rho)^{2.46}$	0.96	10 different lithologies	–	–
Gokceoglu (1996: in Yilmaz and Sendir, 2002)	$\sigma_{UCS}=0.0001*R^{3.27}$	0.84	Marl	–	–
Yasar and Erdogan (2004)	$\sigma_{UCS}=0.000004*R_L^{4.29}$	0.89	Carbonates, sandstone, basalt	40–112	45–55
Dearman and Irfan (1978)	$\sigma_{UCS}=0.00016*R_L^{3.47}$ $E_t=1.89*R_L-60.55$	– 0.93	Granite (Grade I to IV)	11–266	23–62
Xu et al. (1990)	$\sigma_{UCS}=2.98*e^{(0.06*R_L)}$	0.95	Mica-schist	9–56	17–53
	$E_t=1.77*e^{(0.07*R_L)}$	0.96			
	$\sigma_{UCS}=2.99*e^{(0.06*R_L)}$	0.91	Prasinite	8–145	21–64
	$E_t=2.71*e^{(0.04*R_L)}$	0.91			
Deere and Miller (1966)	$\sigma_{UCS}=9.97*e^{(0.02*R_L*\rho)}$	0.94	28 different lithologies	22–358	23–59
	$E_t=0.19*R_L*\rho^2-7.87$	0.88			
Beverly et al. (1979: in Xu et al., 1990)	$\sigma_{UCS}=12.74*e^{(0.02*R_L*\rho)}$	–	20 different lithologies	38–218	–
Cargill and Shakoor (1990)	$E_t=0.19*R_L*\rho^2-12.71$	–			
	$\sigma_{UCS}=3.32*e^{(0.04*R_L*\rho)}$	0.93	Sandstones		
Kahraman (2001) <i>This study</i>	$\sigma_{UCS}=18.17*e^{(0.02*R_L*\rho)}$	0.98	Carbonates	35–271	27–49
	$\sigma_{UCS}=6.97*e^{(0.01*R_N*\rho)}$	0.78	Carbonates	4–153	15–70
	$\sigma_{UCS}=1.45*e^{(0.07*R_L)}$	0.92	Granite	6–196	20–65
	$E_t=1.04*e^{(0.06*R_L)}$	0.91	(Grade I to IV)		23–76
	$\sigma_{UCS}=0.92*e^{(0.07*R_N)}$	0.94			
Yilmaz and Sendir (2002)	$E_t=0.72*e^{(0.05*R_N)}$	0.92			
	$\sigma_{UCS}=2.27*e^{(0.06*R_L)}$	0.91			
	$E_t=3.15*e^{(0.05*RL)}$	0.95	Gypsum	15–30	30–44
Katz et al. (2000)	$\sigma_{UCS}=2.21*e^{(0.07*R_N)}$	0.96	Limestone, sandstone	11–259	24–73
	$E_t=0.00013*R_N^{3.09}$	0.99	Syenite, granite		
Kidybinski (1980)	$\sigma_{UCS}=0.52*e^{(0.05*R+\rho)}$	–	Coal, shale, mudstone, siltstone, sandstone	–	–
Shorey et al. (1984)	$\sigma_{UCS}=0.40*R_N-3.60$	0.94	Coal	3–13	15–40
Haramy and DeMarco (1985)	$\sigma_{UCS}=0.99*R_L-0.38$	0.70	Coal	7–46	12–44
Ghose and Chakraborti (1986)	$\sigma_{UCS}=0.88*R_L-12.11$	0.87	Coal	13–41	28–53
Singh et al. (1983)	$\sigma_{UCS}=2.00*R_L$	0.86	Sandstone, siltstone, mudstone, seatearth	12–73	10–35
O' Rourke (1989)	$\sigma_{UCS}=4.85*R_L-76.18$	0.77	Sandstone, siltstone, limestone, anhydride	14–215	19–52
Sachpazis (1990)	$\sigma_{UCS}=4.29*R_L-67.52$	0.96	33 different carbonates	22–311	16–60
	$E_t=1.94*R_L-33.93$	0.88			
Tugrul and Zarif (1999)	$\sigma_{UCS}=8.36*R_L-416.00$	0.87	Granite	109–193	64–72

Die einaxiale Druckfestigkeit nach Katz et al. (2000) berechnet sich wie folgt:

$$\sigma_{UCS} = 2,21 \cdot e^{(0,07 \cdot R_N)} \quad (5.7)$$

Durch Einsetzen eines Rückprallwertes von beispielsweise 28,7 (Mittelwert Messpunkt 1, Abschnitt Gans 5) ergibt sich die einaxiale Druckfestigkeit von 16,48 MPa.

$$\sigma_{UCS} = 2,21 \cdot e^{(0,07 \cdot 28,7)} \quad (5.8)$$

$$\sigma_{UCS} = 16,48 \text{ MPa} \quad (5.9)$$

Durch Nutzen der Formel 5.7 wurden die noch fehlenden einaxialen Druckfestigkeiten der verschiedenen Messpunkte berechnet. Diese sind in Tabelle 5.7 dargestellt. Die Werte schwanken im Bereich von ca. 13 MPa bis 17 MPa. Die höchste Festigkeit zeigt sich dabei in Abschnitt Gans 6 mit 16,95 MPa, die niedrigste in Abschnitt Ganz 12 mit 13,54 MPa.

Tab. 5.7: Errechnete einaxiale Druckfestigkeiten σ_{UCS} (MPa) der zehn Messpunkte in den Abschnitten Gans 5, Gans 6, Gans 9, Gans 11 und Gans 12. Abkürzungen: MP: Messpunkt; AS: Abschnitt.

MP \ AS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Gans 5	16,48	16,59	14,73	15,15	15,36	15,04	16,48	16,25	16,02	15,69
Gans 6	15,80	15,80	16,25	15,58	15,80	16,95	14,94	15,80	15,69	15,47
Gans 9	15,04	15,80	14,84	15,04	14,63	15,04	15,04	16,25	15,47	14,13
Gans 11	15,91	15,15	15,04	16,36	15,58	15,80	15,47	15,91	14,43	15,26
Gans 12	14,63	14,13	14,43	15,47	15,15	14,73	14,13	15,26	14,03	13,54

Die Kornbindung bzw. die Festigkeit eines Gesteins steht in enger Wechselbeziehung zum Verwitterungsgrad. Angelehnt an DIN EN ISO 14 689-1 wurde eine Einteilung und Relation untereinander vorgenommen, welche in Tabelle 5.8 zusammengestellt ist. Für die anschließende Einordnung der errechneten Werte der einaxialen Druckfestigkeit wird diese Tabelle verwendet. In Spalte 3 sind dabei die Bereiche der Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Gesteinsverwitterungsgrades angegeben. Die berechneten Werte zeigen, wie oben erwähnt, Druckfestigkeiten von 13 - 17 MPa und liegen damit im Rahmen des in der vierten Zeile angegebenen Bereichs von 5 - 25 MPa. Der zugehörige Gesteinsverwitterungsgrad wird dabei mit 'mäßig entfestigt' bezeichnet. Das Erscheinungsbild des Gesteins kann ebenso herangezogen werden, wobei auch hier von einer Entfestigung des Gesteins ausgegangen werden kann. Zudem sind Verfärbungen der Kluftflächen vorhanden. Feldversuche haben weiterhin gezeigt, dass sich der Sandstein der Gansbrüche nicht von Hand zerbrechen lässt, jedoch mit einzelnen Schlägen brechbar ist.

Tab. 5.8: Gesteinsfestigkeiten in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades und der üblichen Feldversuche (in Anlehnung an DIN EN ISO 14 689-1). Abkürzung: σ_{UCS} : einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (MPa). Verändert nach [32].

Gesteinsverwitterungsgrade	Beschreibung, Erscheinungsbild	Kornbindung, Festigkeit, einaxiale Druckfestigkeit	Feldversuch: Hammerschlag
unverwittert	keine sichtbare Verwitterung, schwache Verfärbung an Trennflächen	gute Kornbindung, sehr hart, hart, sehr fest bzw. hoch; $\sigma_{UCS} = 50 - 250 \text{ MPa}$	heller klang bei Hammerschlag, mehrere Hammerschläge erforderlich
angewittert	Gestein fest - gering entfestigt, Verfärbungen der Kluftwandungen und der angrenzenden Gesteinsbereiche	mäßige Kornbindung, mäßig hart - fest; $\sigma_{UCS} = 25 - 50 \text{ MPa}$	wenig heller klang, mit wenigen Schlägen brechbar, nicht bis schwach ritzbar
mäßig entfestigt	Gestein ist entfestigt (spürbar verändert), aber noch nicht mürbe; Verfärbungen der Kluftwandungen und des Gesteins	geringe Kornbindung, mäßig fest, schwach absandend; $\sigma_{UCS} = 5 - 25 \text{ MPa}$	dumpfer Klang, leicht zu zerschlagen, mit Hand nicht zerbrechbar, schwer ritzbar
stark entfestigt	Gestein ist deutlich bis stark entfestigt, starke Verfärbung der Kluftwandungen und des Gesteins	Gestein ist brüchig mürbe, absandend, halbfest; $\sigma_{UCS} = 1 - 5 \text{ MPa}$	brüchig bei Hammerschlag, mit Hand zerbrechbar; gut ritzbar
zersetzt	Gestein ist völlig entfestigt oder zersetzt, Gesteinsgefüge jedoch erkennbar	steif - halbfest; $\sigma_{UCS} < 1 \text{ MPa}$	von Hand zerdrückbar; in Wasser zu plastifizieren

5.3 Gebirgsklassifizierung nach RMR

In der vorliegenden Arbeit wird auf zwei Gebirgsklassifizierungssysteme näher eingegangen, darunter das Rock Mass Rating-System nach Bieniawski (vgl. Seite 11), welches für die Felsformation der Gansbrüche Anwendung findet.

Um hierbei einen gesamten RMR-Wert zu bestimmen, werden die verschiedenen Abschnitte der Gansbrüche zu einem einzigen Homogenbereich zusammengefasst. Nachfolgend werden die in Kapitel 3.2.2 bereits diskutierten sechs Parameter:

1. Festigkeit des Gesteinsmaterials;
2. Rock Quality Designation (RQD)-Index nach Deere;
3. Kluftabstand;
4. Kluftbeschaffenheit;
5. Orientierung/Raumstellung der Klüfte und
6. Zutritt von Grundwasser/Gebirgswasser

des Klassifizierungssystems aus Tabelle 3.3 bzw. Tabelle 5.9 herangezogen.

Die Festigkeit des intakten Gesteins wurde mit Hilfe des Schmidt'schen Betonprüfhammers des vorangegangenen Kapitels ermittelt. Hierbei zeigten sich einaxiale Druckfestigkeiten von 13 - 17 MPa. Diese Werte können im Klassifizierungssystem in den Bereich „5 - 25 MPa“ eingeordnet werden und erhalten damit eine Bewertung von 2 (siehe Tabelle 5.9). Der Rock Quality Designation-Index nach Deere wurde anhand von Gleichung 3.2 (Seite 11) an kluftreichen Abschnitten der Gansbrüche bestimmt. Es ergaben sich dabei zum einen Indexwerte von 25 - 30 %, zum anderen Werte von unter 25 %. Mengenmäßig überwiegen die Indexwerte von unter 25 %, wodurch eine Wertung von 3 für den zweiten Parameter vorliegt.

Der Kluftabstand konnte mit Hilfe des Programms ImageJ bestimmt werden und zeigt nach DIN EN ISO 14689-1 engständige Klüfte mit kleinen Kluftkörpern und einem schwach bis deutlich zerklüfteten Zerklüftungsgrad an. Dieser Parameter erhält dadurch eine Bewertung von 8. Parameter 4 (Kluftbeschaffenheit), 5 (Zutritt von Grundwasser) und 6 (Orientierung von Klüften) wurden durch subjektive Beobachtungen ermittelt und erhalten Wertungen von 20, 10 und (-5) (siehe Tabelle 5.9).

Tab. 5.9: Rock Mass Rating-Klassifizierungssystem nach Bieniawski (1989). Rot eingerahmte Felder bezeichnen die in den Gansbrüchen angetroffenen Gegebenheiten mit dessen Parameter-Wertung. Verändert nach [14].

A. KLASSIFIKATIONSPARAMETER UND DEREN WERTUNG									
Parameter		Wertebereich							
1	Festigkeit des intakten Gesteins	Punktbezogener Festigkeitsindex	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	< 1 MPa siehe Uniaxiale Druckfestigkeit		
		Einaxiale Druckfestigkeit	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
		Wertung	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD-Index	100% - 90%	90% - 75%	75% - 50%	50% - 25%	< 25%			
	Wertung	20	17	13	8	3			
3	Kluftabstand	> 2 m	0,6 - 2,0 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm			
	Wertung	20	15	10	8	5			
4	Kluftbeschaffenheit (Vgl. E)	sehr raue, unverwitterte Oberfläche, nicht kontinuierlich, keine Durchtrennung	schwach raue Oberfläche, Durchtrennung < 1 mm leicht angewittert	schwach raue Oberfläche, Durchtrennung < 1 mm, stark verwittert	harnischartige Oberfl. oder Letten < 5 mm Dicke oder Öffnungsweite 1-5 mm durchgehend	weiche Letten > 5 mm Dicke oder Öffnungsweite > 5 mm durchgehend			
		Wertung	30	25	20	10	0		
5	Zutritt von Grundwasser	Zufluss pro 10 m Tunnellänge	(kein)	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125		
		Kluftwasserdruck σ_1	0	< 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	> 0,5		
		allgem. Bedingungen	vollständig trocken	feucht	nass	tropfend	fließend		
		Wertung	15	10	7	4	0		
B. EINSCHÄTZUNG DER RAUMSTELLUNG DER KLÜFTE (VGL. F)									
Orientierung von Streichen und Fallen		sehr günstig	günstig	gut	ungünstig	sehr ungünstig			
Wertungen	Tunnel & Bergwerke	0	-2	-5	-10	-12			
	Gründungen	0	-2	-7	-15	-25			
	Hänge & Böschungen	0	-5	-25	-50				
C. GESTEINSKLASSEN, BESTIMMT ANHAND DER GESAMTWERTUNG									
Wertung		100 ← 81	80 ← 61	60 ← 41	40 ← 21	< 21			
Klasse		I	II	III	IV	V			
Beschreibung		sehr guter Fels	guter Fels	mäßig guter Fels	schlechter Fels	sehr schlechter Fels			

Nach Bieniawski errechnet sich der RMR-Wert nach folgender Gleichung (Variablenerklärung siehe Seite 11 bzw. 12):

$$RMR = W_{qu} + W_{RQD} + W_a + W_b + W_c + W_d \quad (5.10)$$

Durch Einsetzen der jeweiligen Bewertung in die Additionsgleichung resultiert daraus ein RMR-Wert von 38 (siehe Gleichung 5.11), was die Felsformationen der Gansbrüche als „schlechten Fels“ einstuft. Die Parameter, Werte und Bewertungen sind diesbezüglich in Tabelle 5.10 zusammengefasst.

$$2 + 3 + 8 + 20 + (-5) + 10 = 38 \quad (5.11)$$

Tab. 5.10: Rock Mass Rating-Klassifizierungsparameter, Werte und Bewertungen für die Gesteinsmassen der Gansbrüche.

Parameter	Wert	Bewertung
1. Festigkeit des intakten Gesteins	5 - 25 MPa	2
2. RQD-Index	< 25 %	3
3. Kluftabstand	60 - 200 mm	8
4. Kluftbeschaffenheit	schwach raue Oberfläche, Durchtrennung < 1 mm, stark verwittert	20
5. Zutritt von Grundwasser	feucht	10
6. Orientierung der Klüfte	günstig	-5
Gesamtbewertung	-	38
Gesteinsklasse	-	schlechter Fels

5.4 Gebirgsklassifizierung nach GSI

Die Felsformationen der Gansbrüche wurden zum anderen durch den Geological Strength Index (GSI) bewertet und beschrieben. Dabei wurden verschiedene Kategorien von Gesteinsmassentypen basierend auf der Struktur der Gesteinsmasse und den Oberflächenbedingungen bzw. der Beschaffenheit der Klüfte bestimmt. Jeder Gesteinsmassentyp erhält einen Code in Form des Buchstabens *S* für die Gesteinsmassenstruktur und *K* für die Kluftbeschaffenheit [33]. Beispielsweise wird die intakte/massive Struktur als *S1* und die laminierte/gescherte Gesteinsmasse als *S6* definiert, während Trennflächen mit einem sehr guten Zustand als *K1* und solche mit einem sehr schlechten Zustand als *K6* definiert werden. Somit würde mit *S3/K2* eine Gesteinsmasse beschrieben werden, die eine sehr blockartige Struktur und einen guten Zustand von Kluftflächen aufweist [33].

In Abbildung 5.4 ist die Klassifizierung der einzelnen Abschnitte der Gansbrüche dargestellt. Die detaillierten Daten zu den Gesteinsmassen sind in Tabelle 5.11 aufgeführt.

Die meisten Gesteinsmassen weisen eine blockhaft/gestörte Struktur mit mäßig bis schlechten Trennflächenbeschaffenheiten auf (*S4/K3* bis *S4/K4*), während einige eine sehr blockartige Struktur besitzen (*S3/K3* bis *S3/K4*). Abschnitt Gans 4 lässt sich im Bereich 'blockhaft/sehr blockhaft' (*S2-3*) einordnen und besitzt damit den höchsten GSI-Wert von 47-50. Abschnitt Gans 7 kann wiederum als 'bröckelig' (*S5*) beschrieben werden. Dessen GSI wird auf 30 geschätzt und ist somit der geringste Wert dieser Gebirgsklassifizierung. Alle anderen GSI-Werte der Felsabschnitte schwanken um 30 - 45.

Tab. 5.11: Detaillierte Daten der Gebirgsklassifizierung nach GSI.

Felsabschnitt	Struktur/ Kluftbeschaffenheit	GSI
Gans 1	S4/K4	33-35
Gans 2	S4/K3	38-40
Gans 3	S3/K3	43-45
Gans 4	S2-3/K3	47-50
Gans 5	S4/K4	30-33
Gans 6	S3-4/K4	30-35
Gans 7	S5/K3	30
Gans 8	S4/K3	35
Gans 9	S4-5/K3	32-35
Gans 10	S3/K4	38-40
Gans 11	S3/K3	40
Gans 12	S3/K3	43-45
Gans 13	S4/K3	30-35
Gans 14	S4/K3	35-40
Gans 15	S4/K3	40-43

Weiterhin lässt sich der Geological Strength Index auch durch die Nutzung des RMR-Werts bestimmen (vgl. Seite 15). Da die Version von 1989 (RMR'^{89}) verwendet wird, errechnet sich der GSI-Wert nach folgender Formel [9, 17]:

$$RMR'^{89} > 23$$

$$GSI = RMR'^{89} - 5 \quad (5.12)$$

In Kapitel 5.3 wurde bereits ein RMR-Wert für die Gesamtheit der Gansbrüche bestimmt. Das Ergebnis von 38 liegt über der Bedingung von 23 und kann damit anschließend in die Gleichung eingesetzt werden. Nachfolgend ergibt sich ein GSI-Wert von 33.

$$38 - 5 = 33 \quad (5.13)$$

Vergleichend zu den subjektiv bestimmten GSI-Werten der einzelnen Abschnitte der Gansbrüche lässt sich sagen, dass das errechnete Ergebnis von 33 an sechs von fünfzehn Felsabschnitten ebenfalls ermittelt wurde (vgl. Tabelle 5.11). An den restlichen neun Felsabschnitten sind zum Teil höhere GSI-Werte bestimmt worden. Dennoch kann der errechnete Wert als repräsentativ angesehen werden.

5.5 Berechnung der Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag

Eine Untersuchung der Steinschlag-Schutzwirkung des angrenzenden Waldes der Gansbrüche wurde mit Hilfe des internetbasierten Tools Rockfor^{NET} durchgeführt. Das Tool

errechnet dabei ein Anforderungsprofil (ideal und minimal) und simuliert, in welchem Maß die Verhältnisse des aktuellen Baumbestandes von der optimalen Schutzwirkung abweichen. Die Schutzwirkung der vom Wald zurückgehaltenen Steine wird dabei als Prozentsatz angegeben [20]. Zur Berechnung werden unter anderem einige Eingangsdaten und -parameter benötigt, welche im Folgenden dargestellt werden.

Tab. 5.12: Benötigte Eingangsgrößen zur Berechnung des Anforderungsprofils und der Schutzwirkung im Internettool Rockfor^{NET}. Verändert nach [34].

Eingangsgröße	Bemerkung
<i>Beschreibung des Steines</i>	
Steingrößen (in m)	Höhe, Breite und Tiefe des maßgebenden Gesteines
Gesteinsdichte (in kg/m ³)	Beispielwerte werden im Tool vorgeschlagen; hier Sandstein mit einer mittleren Dichte von 2500 kg/m ³
Form des Steines	Eckig oder gerundet
<i>Beschreibung des Hanges</i>	
Mittlere Hangneigung (in °)	
Höhe der Felswand (in m)	
Bewaldete Hanglänge (in m)	Horizontal gemessen
Hanglänge unbewaldet (in m)	Zwischen Felswandfuß und der Obergrenze des bewaldeten Gebietes; horizontal gemessen
<i>Beschreibung des Waldes</i>	
Aktuelle Baumartenmischung/Baumartenanteile (Anteil Deckungsgrad in %)- Fichte, Tanne, Buche, übrige Laubbäume, übrige Nadelbäume	Der Prozentsatz entspricht dem Anteil der Stämme
<i>Zusätzliche Angaben zur Berechnung der aktuellen Schutzwirkung des Waldes</i>	
Stammzahl mit BHD 8 - 12 cm (St./ha)	Angaben nur für die Berechnung der Schutzwirkung des Waldes benötigt
Stammzahl mit BHD 12 - 24 cm (St./ha)	
Stammzahl mit BHD 24 - 36 cm (St./ha)	
Stammzahl mit BHD \geq 36 cm (St./ha)	
oder	
mittlere Stammzahl (St./ha) und Grundfläche (in m ² /ha)	

Das internetbasierte Tool zeigt grafisch die benötigte Stammzahlverteilung, wobei ein Ideal- und Minimalprofil, sowie die benötigten Stammzahlen entsprechend der verschiedenen BHD-Klassen aufgelistet werden (siehe Abbildung 5.5). Die Bestimmung der Stammzahlverteilung für das Minimal- und Idealprofil beruhen auf der Feststellung derjenigen Grundfläche, welche erforderlich ist, um die Sturzenergie des definierten Steines innerhalb der definierten bewaldeten Länge des Hanges zu vernichten [34]. Weiterhin werden folgende Faktoren hinzugezogen:

- die theoretische Grundfläche $G_{(theo)}$ entspricht derjenigen Grundfläche, die ein Stein auf seiner Steinschlagbahn antreffen muss, um die Sturzenergie mit einer minimalen Anzahl Zusammenstöße vernichten zu können (alle 43 m ein wirksamer Aufprall; Standardwert in Rockfor.net) [34];
- $G_{(theo)}$ wird für das Minimalprofil genutzt, für das Idealprofil wird ein Sicherheitszuschlag von $5 m^2$ Grundfläche zugegeben;
- da $G_{(theo)}$ die im Wald nachhaltig mögliche Grundfläche unbegrenzt übersteigen kann, wurden realistische Maximalwerte ($G_{(max)}$) als Obergrenze festgelegt. Im Tool sind diese abhängig von den existierenden Baumarten (siehe Tabelle 5.13). Für das Idealprofil besteht $G_{(max)}$ als Obergrenze, für das Minimalprofil werden von diesen Werten $5 m^2$ subtrahiert [34].

Tab. 5.13: Maximale Grundflächen ($G_{(max)}$) für drei verschiedene Waldtypen. Die nachhaltig möglichen Grundflächen werden in Abhängigkeit von den tatsächlich vorhandenen Baumarten vom Tool Rockfor^{NET} errechnet [34].

Waldtyp	Verwendete Kriterien	$G_{(max)}$ (m^2/ha)
Buchenmischwald	Buchenanteil <80 % und Nadelbaumanteil <30 %	40
Buchenwald	Buchenanteil >80 % und Nadelbaumanteil <30 %	45
Übrige Wälder	Nadelbaumanteil >30 %	50

Daraus werden, nach anschließender Berechnung der Grundflächen von Minimal- und Idealprofil, die Stammzahlverteilungen bzw. die sogenannten Basiskurven ausgegeben. Hierfür werden gleichmäßig die Grundflächen über die gesamten BHD-Klassen verteilt [34]. Das heißt, dass jede BHD-Klasse einen identischen Anteil an der Grundfläche besitzt.

Ebenso wurden für verschiedene Gesteinsvolumen unterschiedliche maximale BHD-Klassen ausgewählt, da besonders größere Steine am effektivsten gestoppt werden können, wenn auch massive Bäume verfügbar sind, und bei kleineren Steinen eine hohe Stammzahl geeignet ist [34]. Wenn das Volumen des ausschlaggebenden Gesteins größer als $0,2 m^3$ ist, werden die BHD-Klassen 10 (8-12 cm) bis 58 (56-60 cm) genutzt. Bei Volumen unterhalb $0,05 m^3$ wird die maximale BHD-Klasse 38 (36-40 cm) verwendet, bei Gesteinsvolumen zwischen $0,05$ und $0,2 m^3$ Klasse 46 (44-48 cm) [34].

Steinschlagexperimente im Wald ergaben, dass die Anwesenheit von Bäumen mit geringem Durchmesser relevant ist für eine erhöhte Trefferwahrscheinlichkeit. Große Steine können ebenso von dünnen Bäumen zum Stillstand gebracht werden, vorausgesetzt diese sind zuvor auf dicke Bäume gestoßen.

Außerdem wurde die Effektivität von liegenden Stämmen auf die Steinschlaggefährdung untersucht, was durch Steinschlagexperimente und Modellsimulationen erreicht wurde. Dabei konnte gezeigt werden, dass auch liegende Stämme mit Durchmessern von etwa der Größe des Steindurchmessers die Steinschlaggefährdung erheblich verringern [34]. Damit die Gesteine bereits während der Beschleunigung abgebremst werden können, ist es von Bedeutung, dass die Stämme möglichst nahe am Entstehungsort platziert werden. Dabei können auch kleinere Verflachungen im Gebiet Verwendung finden [34].

Um anschließend eine Schutzwirkung berechnen zu können, müssen nun die verschiedenen Eingangsgrößen aus Tabelle 5.12 Werte erhalten.

Die Beschreibung des Hanges konnte mit Hilfe des Kompasses und Satellitenbildern bzw. durch das Programm ImageJ realisiert werden. Auf einer Fläche von 20 m x 20 m im Abschnitt Gans 11 wurden weiterhin die unterschiedlichen Baumarten und die jeweiligen Stammzahlgrößen gezählt. Die Werte wurden auf 100 m x 100 m (10.000 m²/1 ha) erweitert und gerundet. Daraus ergeben sich die aktuelle Baumartenmischung und die optionalen Angaben zu den Stammzahlen mit Stammdurchmesser.

Im Abschnitt Gans 11 wurden außerdem sieben Gesteinsblöcke nach ihrer Höhe, Breite und Tiefe vermessen. Die Blöcke befanden sich dabei am Fuße des Waldes vor Beginn der Mauer in einem Abstand von 0,3 m bis 1 m.

Die Beschreibung des Hanges, die aktuelle Baumartenmischung und die zusätzlichen Stammzahlangaben bilden gleichbleibende Werte, die bei jedem Durchlauf des Tools Rockfor^{NET} nicht verändert wurden. Diese sind nachfolgend aufgelistet.

Beschreibung des Hanges

Mittlere Hangneigung: 36°

Höhe der Felswand: 20 m

Bewaldete Hanglänge (horizontal gemessen): 50 m

Unbewaldete Hanglänge unter Felswand (horizontal gemessen): 3 m

Aktuelle Baumartenmischung (Anteil Deckungsgrad)

- Fichte (*Picea abies*): 5 %
 - Tanne (*Abies alba*): 5 %
 - Buche (*Fagus sylvatica*): 30 %
 - Übrige Laubbäume: 60 %
 - Übrige Nadelbäume: 0 %
-

Zusätzliche Angaben zur Berechnung der aktuellen Schutzwirkung des Waldes (optional)

Stammzahl mit BHD 8 - 12 cm: 300 St./ha

Stammzahl mit BHD 12 - 24 cm: 500 St./ha

Stammzahl mit BHD 24 - 36 cm: 200 St./ha

Stammzahl mit BHD \geq 36 cm: 50 St./ha

oder

Stammzahl (BHD \geq 8 cm): 1050 St./ha

Grundfläche (BHD \geq 8 cm): 36 m²/ha

Einzig und allein die Steingröße wurde modifiziert. Im Tool ist dabei eine absteigende Steingröße als Reihenfolge der Durchläufe gewählt worden. Zusätzlich errechnete das Programm bei jeder Gesteinsbeschreibung weitere Eingangsdaten für die Berechnung.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der sieben Berechnungen durch das Programm Rockfor^{NET} dargestellt. Da für die verwendeten Modelle im Tool vereinfachende Bedingungen angenommen werden, beispielsweise eine sehr vereinfachte Topographie oder die Vernachlässigung von Oberflächenbeschaffenheiten, wird die Schutzwirkung in Prozent nur in den fünf Klassen ermittelt: 0-25 %, 25-50 %, 50-75 %, 75-95 % und 95-99 %. Ein hundertprozentiger Schutz wird vom Tool nicht vergeben, da dies von keiner Schutzmaßnahme gewährleistet werden kann.

In den folgenden Abbildungen (Abbildung 5.5 bis 5.11) charakterisiert die rote Linie ausgehend von der theoretisch erforderlichen Grundfläche (G_{theo}) die Stammzahlverteilung für die maximale Energievernichtung. Die grünen bzw. grauen Balken bezeichnen das realistische, nachhaltige bzw. Minimalprofil, welches anhand der maximalen, nachhaltigen Grundfläche (G_{max}) errechnet wurde [34].

Beschreibung des Steines Nr. 1

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 2,70 m x 1,40 m x 0,90 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 3.4 m³

Steinmasse = 8505 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 1600 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 1

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 250 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 0 - 25 %

Beschreibung des Steines Nr. 2

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 1,40 m x 1,00 m x 0,50 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.7 m³

Steinmasse = 1750 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 350 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 2

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 90 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 25 - 50 %

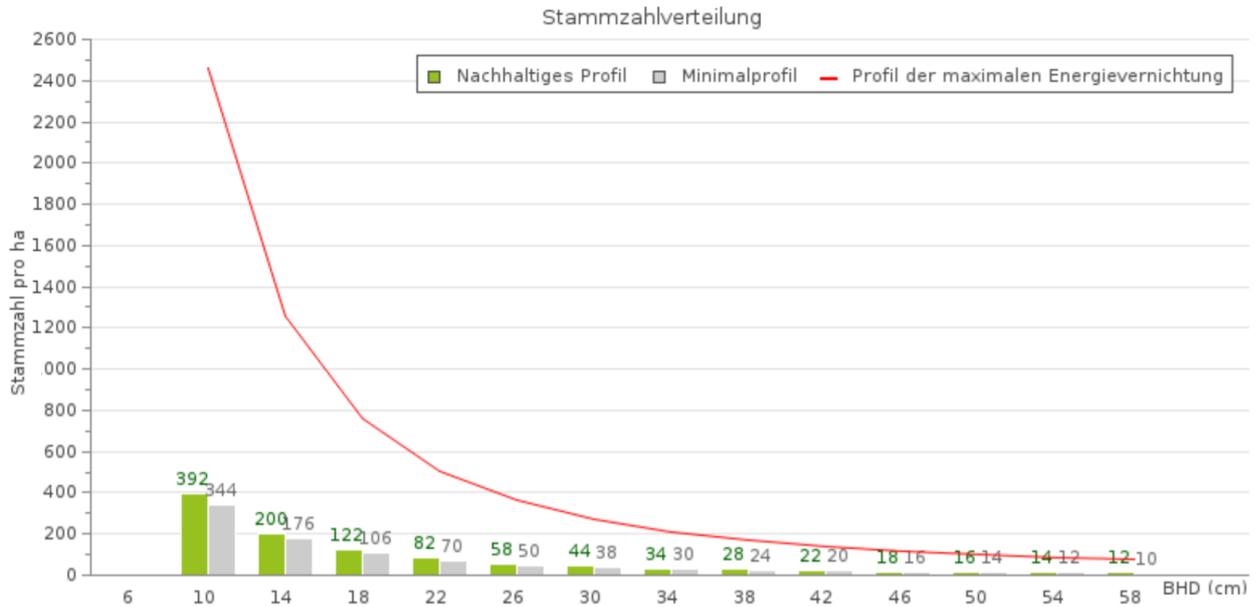


Abb. 5.5: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 1.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 250 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 0 - 25 %

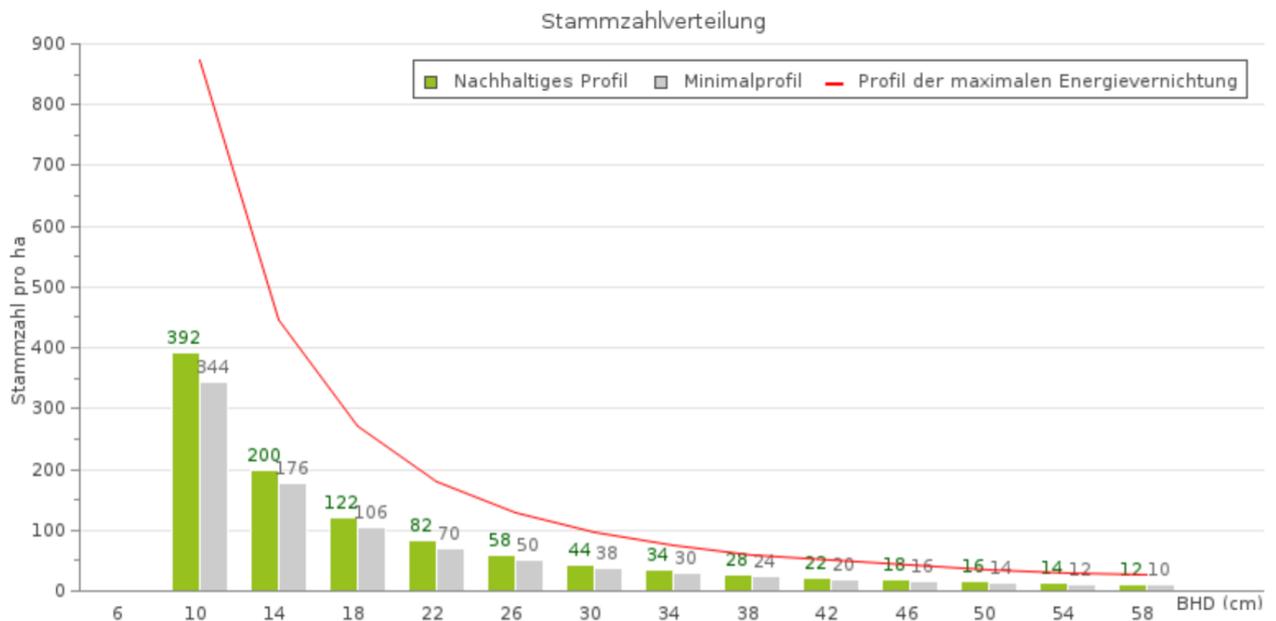


Abb. 5.6: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 2.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 90 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 25 - 50 %

Beschreibung des Steines Nr. 3

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 0,50 m x 1,50 m x 0,90 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.68 m³

Steinmasse = 1688 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 300 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 3

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 86 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 25 - 50 %

Beschreibung des Steines Nr. 4

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 0,80 m x 0,80 m x 0,40 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.26 m³

Steinmasse = 640 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 100 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 4

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 62 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 75 - 95 %

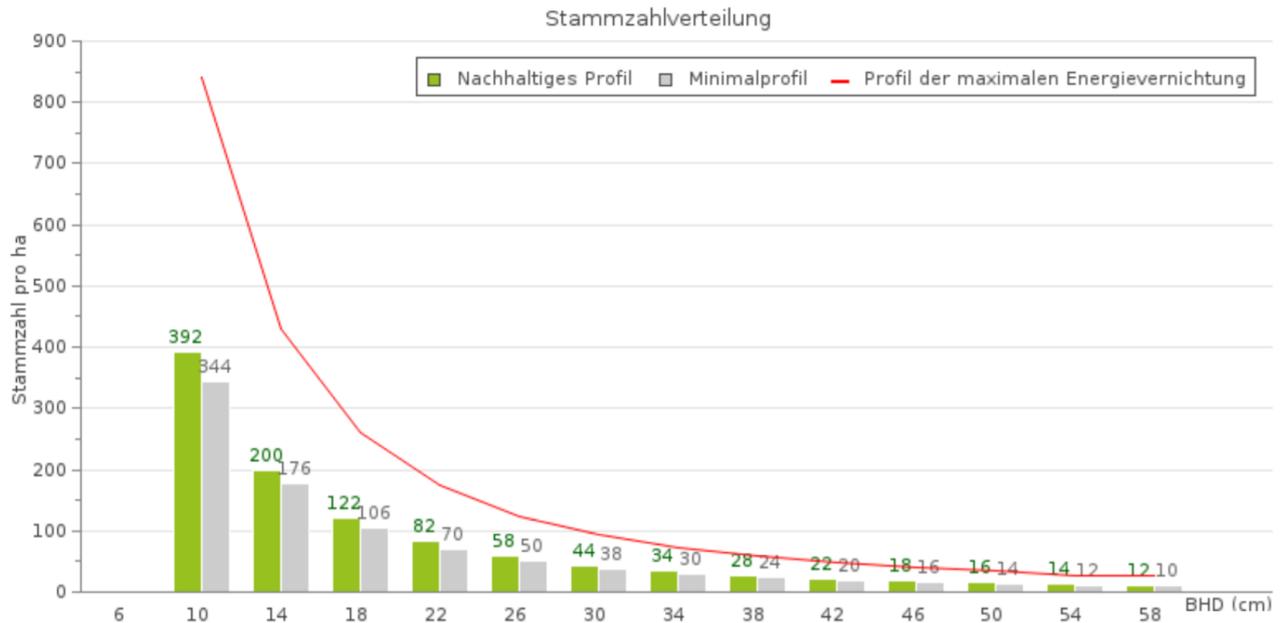


Abb. 5.7: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 3.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 86 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 25 - 50 %

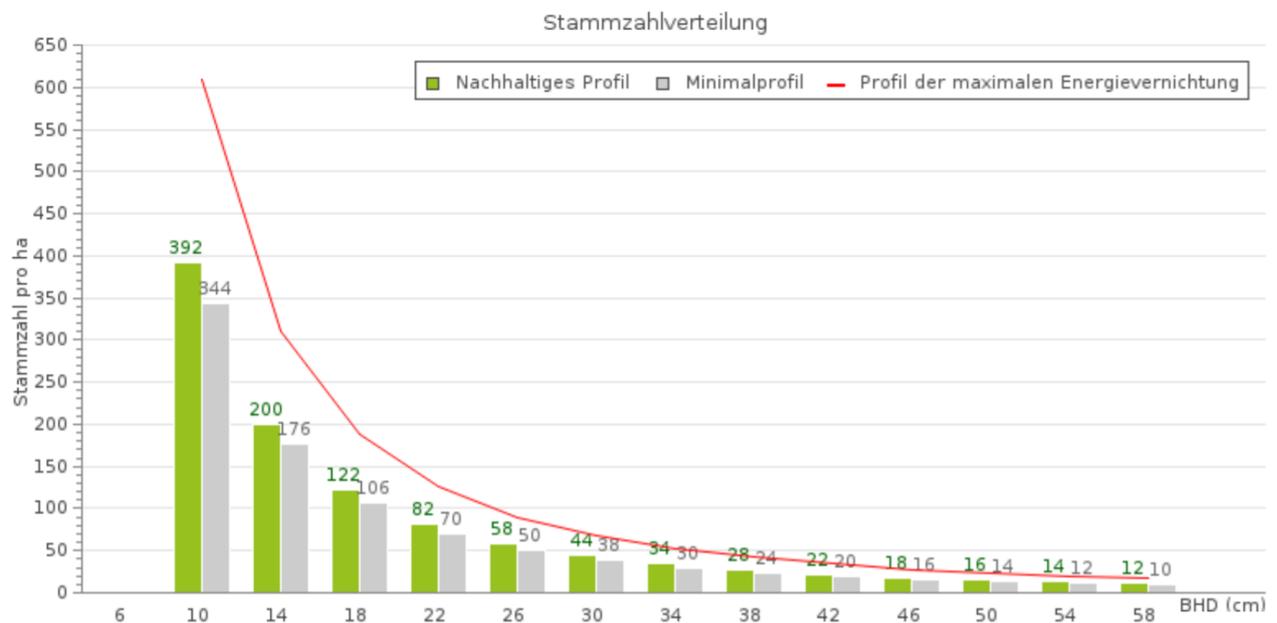


Abb. 5.8: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 4.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 62 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 75 - 95 %

Beschreibung des Steines Nr. 5

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 0,60 m x 0,65 m x 0,55 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.21 m³

Steinmasse = 536 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 100 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 5

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 60 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 75 - 95 %

Beschreibung des Steines Nr. 6

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 0,65 m x 0,50 m x 0,35 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.11 m³

Steinmasse = 284 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 50 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 6

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 56 m²/ha

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 95 - 99 %

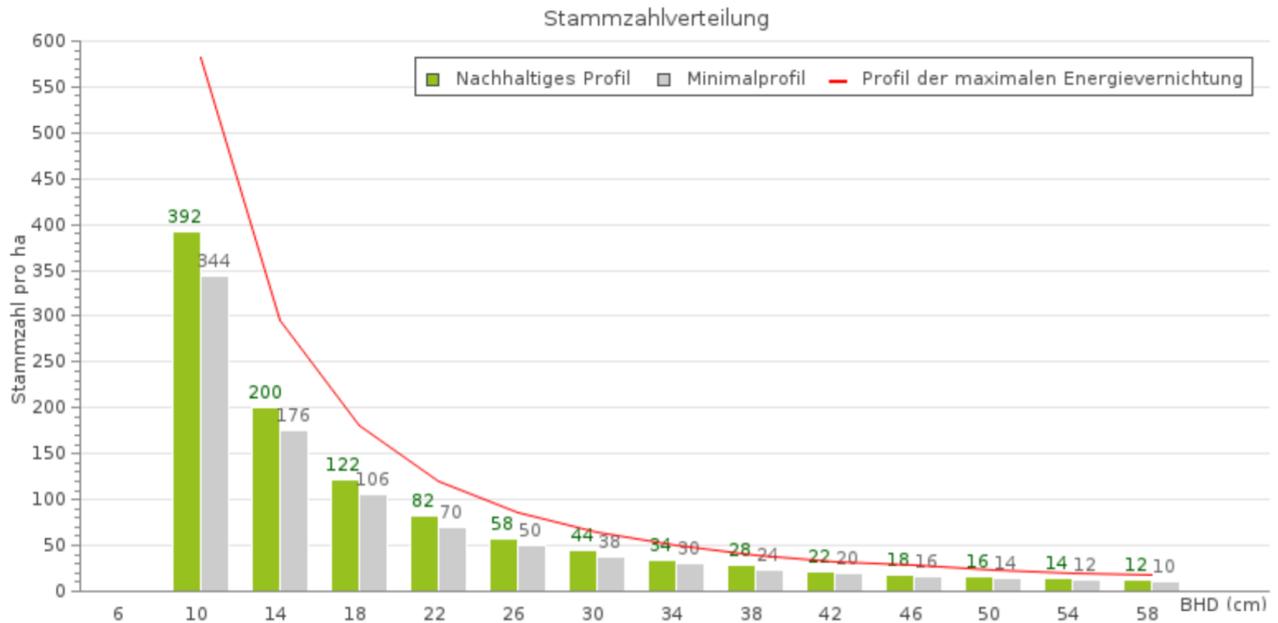


Abb. 5.9: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 5.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 60 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 75 - 95 %

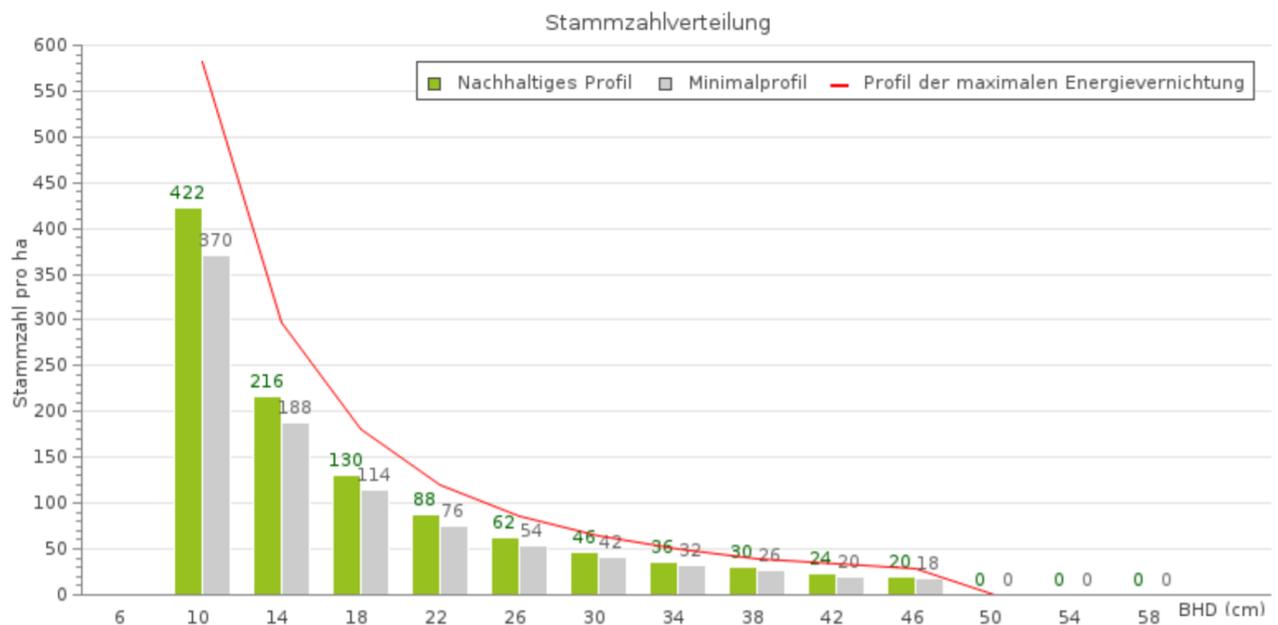


Abb. 5.10: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 6.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 56 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 95 - 99 %

Beschreibung des Steines Nr. 7

Steingrößen (Höhe, Breite, Tiefe): 0,35 m x 0,45 m x 0,50 m

Gesteinsdichte: 2500 kg/m³

Form des Steines: eckig

Eingangsdaten für die Berechnung

Steingröße = 0.08 m³

Steinmasse = 197 kg

Maximale Sturzenergie im Wald = 37 kJ

Aktuelle Bestandesgrundfläche = 36 m²/ha

Bewaldete Hanglänge (entlang vom Hang) = 62 m

Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 7

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 46 m²/ha

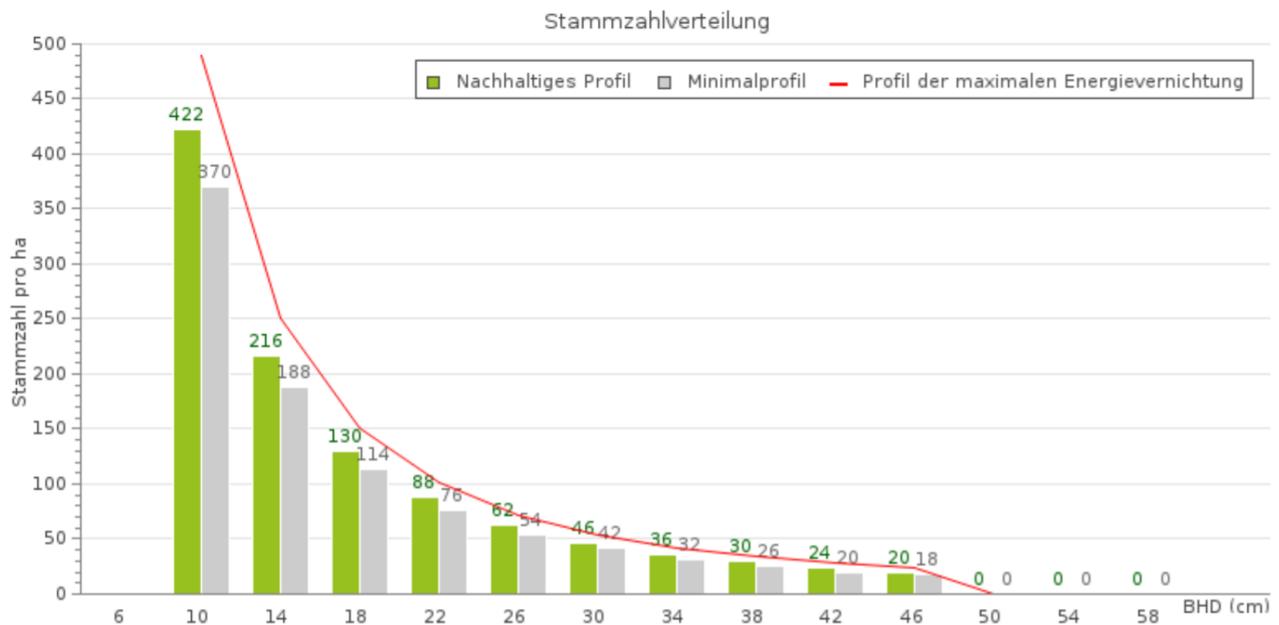


Abb. 5.11: Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 7.

- Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil)
- Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 46 m²/ha.

Aktuelle Schutzwirkung des Waldes: 95 - 99 %

Jeder Steinschlagprozess im Wald kann einfach veranschaulicht und zusammengefasst werden, indem man die Bilanz zwischen energieerhöhenden und energiemindernden Aspekten untersucht. Ein energieerhöhender Aspekt ist zum einen die Masse des Gesteins, welche bestimmt wird durch die Steingröße, die Form und die Gesteinsdichte [34]. Zum anderen ist es die Sturzgeschwindigkeit, welche durch die Steilheit des Geländes und der initialen Fallhöhe des Gesteins bestimmt wird. Energiemindernde Faktoren der Sturzenergie können zum Beispiel durch die Masse an Holz, die ein Stein auf der jeweiligen Sturzbahn begegnet, und durch die Energieaufnahmekapazität der Bäume erreicht werden [34]. Hierbei ist die Baumart entscheidend. Die gesamte Masse an Holz ist wiederum abhängig von der Stammzahl und der Durchmesser- und Verteilung der Bäume, sowie von der bewaldeten Hanglänge. Sie lässt sich durch die Grundfläche repräsentieren [34].

Zusammenfassend ist durch die Abbildungen 5.5 bis 5.11 erkennbar, dass sich die Balken des Minimal- und Idealprofils mit abnehmender Steingröße immer stärker an das Profil der maximalen Energievernichtung annähern. Bei Gestein Nr. 6 und Nr. 7 kann dadurch sogar eine aktuelle Schutzwirkung von 95 - 99 % erreicht werden. Die Grundflächen zur maximalen Energievernichtung unterscheiden sich diesbezüglich vom Idealprofil nur um 6 m²/ha bzw. 16 m²/ha. Weitere Durchläufe des Programms haben außerdem gezeigt, dass die Schutzwirkung des Waldes der Gansbrüche schon ab einer Steingröße von 0,45 m x 0,50 m x 0,50 m auf 75 - 95 % herabgesetzt wird. Bei einer Steingröße von 0,40 m x 0,50 m x 0,50 m ist die Schutzwirkung von 95 - 99 % jedoch noch gegeben. Wird die Größe des Gesteins weiter erhöht, beispielsweise auf 0,65 m x 0,65 m x 0,65 m, beträgt die Schutzwirkung nur noch 50 - 75 %. Gesteinen mit 1,15 m x 1,10 m x 1,10 m Größe wird keine bzw. eine sehr geringe Schutzwirkung (0 - 25 %) zugeteilt.

Die Tatsache, dass die sieben Gesteinsblöcke am Fuße des Waldes vor Beginn der Mauer gefunden wurden, lässt vermuten, dass an dieser Stelle keine Schutzwirkung des Waldes gegeben war. Auch der kleinste Gesteinsblock von 0,35 m x 0,45 m x 0,50 m befand sich darunter, welcher gewissermaßen vom Tool Rockfor^{NET} eine Schutzwirkung von 95 - 99 % erhielt. Dies zeigt wiederum, dass ein hundertprozentiger Schutz von keiner Schutzmaßnahme gewährleistet werden kann. Da die Blöcke in einem Abstand von 0,3 m bis 1 m gefunden wurden, könnte hingegen auch ein Felssturz stattgefunden haben, was eine Aufspaltung zu unterschiedlich großen Gesteinen nach dem Aufprall zur Folge haben könnte. In diesem Fall hätte die vorgeschaltete Mauer ein Fallen der Gesteinsblöcke auf die angrenzende Straße verhindert.

5.6 Steinschlaganalysen mittels *RocFall*

Bei *RocFall* handelt es sich um ein statistisches 2D-Analyseprogramm, mit dessen Hilfe die Gefahr von Steinschlägen beurteilt werden kann. Das Programm kann die Kurven für

Energie, Geschwindigkeit und „Sprunghöhe“ für die gesamte Steigung sowie die Position der Steinschlagendpunkte bestimmen [35]. Verteilungen von Energie, Geschwindigkeit und Sprunghöhe werden ebenfalls entlang des Steigungsprofils berechnet. Mit RocFall kann der Benutzer sowohl Steinschlaganalysen mit konzentrierter Masse als auch mit starren Körpern durchführen [35]. In der vorliegenden Arbeit werden dabei zwei Profile (Gans 11, Gans 12) mit dem Steinschlagprogramm bearbeitet. Abbildung 5.12 zeigt die Lage dieser beiden Profile. Ein Ausschnitt des Profils Gans 11 ist weiterhin in Abbildung 5.13 dargestellt.

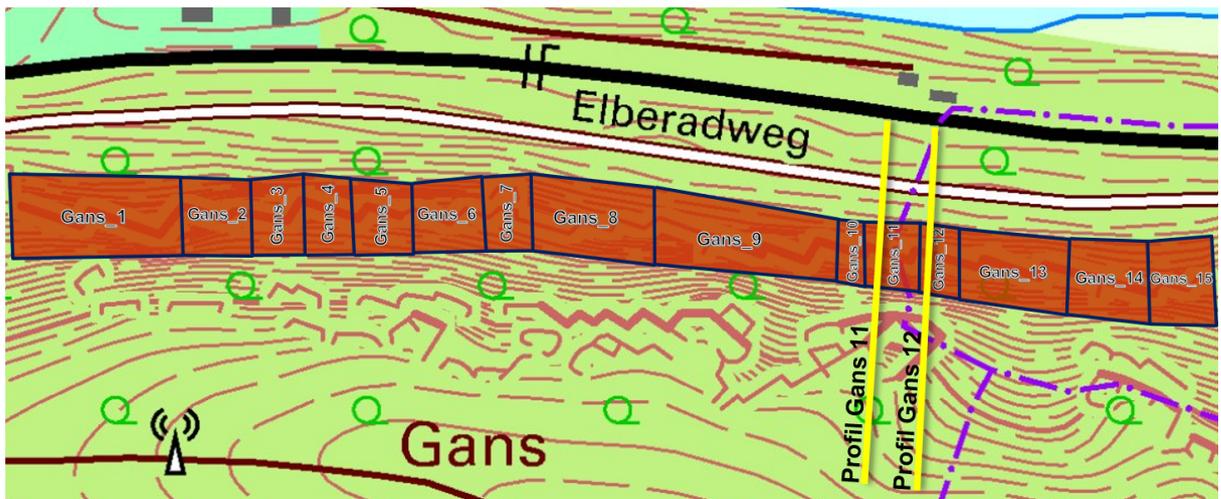


Abb. 5.12: Lage der Profillinien in den Gansbrüchen mit Einteilung der einzelnen Abschnitte der Felsmassive. Verändert nach [22].



Abb. 5.13: Ausschnitt des bearbeiteten Profils aus Gans 11 mit Blick auf die Felswand.

Zum Generieren der Vertikalprofile wurde in Quantum GIS das VoGIS Plugin verwendet, wobei standardmäßig jeden Meter ein Punkt aufgenommen wird. Zusätzlich wurde alle 0,25 Meter ein Punkt erfasst, um ein detaillierteres Profil zu erhalten. Nachdem dieses im Programm erstellt worden war, galt es mehrere vertikale Schichten bzw. Bereiche (Sandstein, Straße usw.) zu definieren und zuzuweisen. Die dabei verwendeten Böschungsparameter wurden aus Tabellen des Programmherstellers Rocscience (Rocscience Coefficient of Restitution Table [36]) entnommen. Nachfolgend lassen sich fünf Bereiche ausmachen:

1. Sandstein Fels (Abkürzung SF);
2. Asphalt (A);
3. Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung (SoBmW);
4. Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung (SmBoW);
5. Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung (SmBmW).

In Tabelle 5.14 sind die jeweiligen Parameter mit den dazugehörigen Werten für jeden Bereich aufgelistet.

Tab. 5.14: Werte der Böschungsparameter in RocFall für die fünf erstellten Bereiche.

Parameter	SF	A	SoBmW	SmBoW	SmBmW
gewählte Farbe	gelb	grau	grün	orange	orange
Normaler Restitutionskoeffizient	0,5	0,4	0,35	0,35	0,35
Tangentialer Restitutionskoeffizient	0,95	0,9	0,85	0,85	0,85
Gleitreibung	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55
Rollreibung	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Wald- und Vegetationsdämpfung	deaktiviert	deaktiviert	aktiviert	deaktiviert	aktiviert
Effektive Waldhöhe (m)	–	–	2,5	–	2,5
Waldwiderstandsbeiwert (kg/s)	–	–	500	–	500

Im nächsten Schritt werden den Profilen Gans 11 bzw. Gans 12 jeweils zwei unterschiedliche Abfolgen zugeordnet, die sich im Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (Farbe orange) unterscheiden. Hierbei wird die Analyse zuerst ohne Walddämpfung und später mit Wald-

dämpfung durchgeführt. Die drei Meter hohe Elberadwegmauer und die Bahnmauer wird im Programm ebenfalls hinzugefügt. Entsprechend ergeben sich die nachfolgenden vier vertikalen Abfolgen für Gans 11 und 12.

Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung:

- 0 bis ca. 79 m: Sandstein Fels;
- 79 bis ca. 93 (bzw. 98) m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung;
- 93 (bzw. 98) bis ca. 101 m: Sandstein Fels;
- 101 bis ca. 132 m: Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung;
- 132 m: Elberadwegmauer (Höhe 3 m);
- 132 bis ca. 145 m: Asphalt;
- 150 m: Bahnmauer (Höhe 2 m);
- 150 bis ca. 167 m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung.

Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung:

- 0 bis ca. 79 m: Sandstein Fels;
- 79 bis ca. 93 (bzw. 98) m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung;
- 93 (bzw. 98) bis ca. 101 m: Sandstein Fels;
- 101 bis ca. 132 m: Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung;
- 132 m: Elberadwegmauer (Höhe 3 m);
- 132 bis ca. 145 m: Asphalt;
- 150 m: Bahnmauer (Höhe 2 m);
- 150 bis ca. 167 m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung.

Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung:

- 0 bis ca. 79 m: Sandstein Fels;
 - 79 bis ca. 93 (bzw. 98) m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung;
 - 93 (bzw. 98) bis ca. 101 m: Sandstein Fels;
 - 101 bis ca. 132 m: Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung;
 - 132 m: Elberadwegmauer (Höhe 3 m);
 - 132 bis ca. 145 m: Asphalt;
 - 150 m: Bahnmauer (Höhe 2 m);
 - 150 bis ca. 167 m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung.
-

Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung:

- 0 bis ca. 79 m: Sandstein Fels;
- 79 bis ca. 93 (bzw. 98) m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung;
- 93 (bzw. 98) bis ca. 101 m: Sandstein Fels;
- 101 bis ca. 132 m: Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung;
- 132 m: Elberadwegmauer (Höhe 3 m);
- 132 bis ca. 145 m: Asphalt;
- 150 m: Bahnmauer (Höhe 2 m);
- 150 bis ca. 167 m: Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung.

Nach der Zuweisung im Programm lassen sich nun die Steinschlagkörper mit den jeweiligen Startpunkten definieren. Als Funktionseinheit wurde hier „starrer Körper“ (Rigid Body) benutzt, da im Gegensatz zur „konzentrierten Masse“ (Lump Mass) aus einer Vielzahl vordefinierter glatter/runder oder polygonaler Gesteinsformen ausgewählt werden kann. Die Formen sind zweidimensional und werden in die dritte Dimension überführt, um die dreidimensionale Größe und Masse zu berücksichtigen [37].

Für alle vier Steinschlaganalysen wurde die Form der Superellipse bzw. des Quadrates verwendet, da sie am ehesten mit den Gesteinskörpern der Gansbrüche vergleichbar sind. Abbildung 5.14 zeigt das Aussehen dieser beiden Körper.

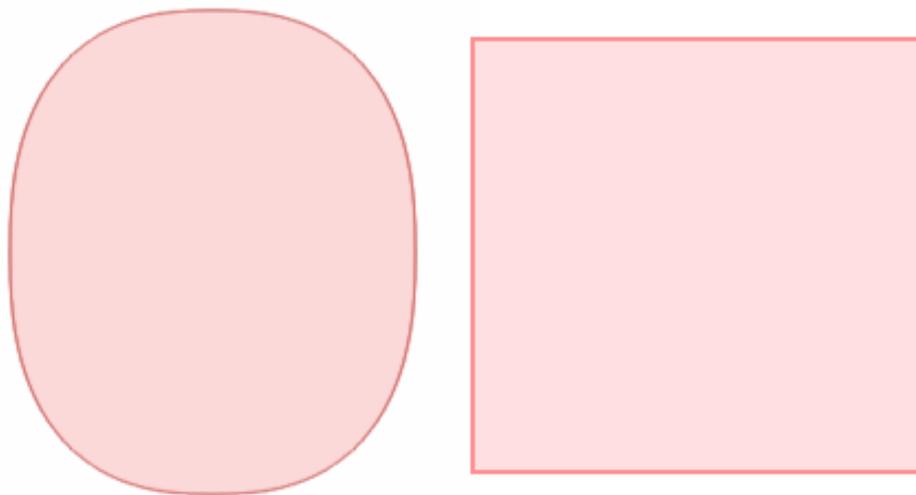


Abb. 5.14: Im Programm RocFall genutzte Form der Superellipse und des Quadrates.

Die Masse jedes Steinschlagkörpers wurde auf 1000 kg, sowie die mittlere Dichte auf 2500 kg/m^3 ($2,5 \text{ g/cm}^3$) gesetzt. Die Körper selbst erhalten ebenso verschiedene Werte der Anfangsbedingungen zu Rotation oder Geschwindigkeit, welche in Tabelle 5.15 aufgelistet sind.

Tab. 5.15: Werte der Böschungsparameter in RocFall für die fünf erstellten Bereiche.

Anfangsbedingung	Wert	Verteilung	Rel. Minimum	Rel. Maximum
Horizontale Geschwindigkeit (m/s)	2	keine	–	–
Vertikale Geschwindigkeit (m/s)	0	keine	–	–
Rotationsgeschwindigkeit (°/s)	0,6	keine	–	–
Anfangsrotation (°/s)	60	gleichmäßig	0	360

Nach der Eingabe aller Parameter und Werte im Programm wurden die Anfangspunkte für die Steinschlagkörper gesetzt. Insgesamt sind dabei jeweils neun Punkte auf dem Profil verteilt worden, welche sich ausschließlich im Bereich von „Sandstein Fels“ (gewählte Farbe gelb) befinden. Anschließend simuliert das Programm die Steinschlagbahnen des möglichen Auftreffens der Gesteine. In Abbildung 5.15, 5.17, 5.19 und 5.21 sind die vier Simulationen der Steinschlaganalyse dargestellt. Dabei wurde innerhalb eines Profils, wie oben bereits erwähnt, nur der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (Farbe orange) verändert, indem eine weitere Walddämpfung aktiviert bzw. deaktiviert wurde.

Vom Programm wird ebenso eine Verteilung der Endauftreffer der Steinschlagkörper ausgegeben. Diese Verteilungen sind unter der jeweiligen Simulation in Abbildung 5.16, 5.18, 5.20 und 5.22 erkennbar.

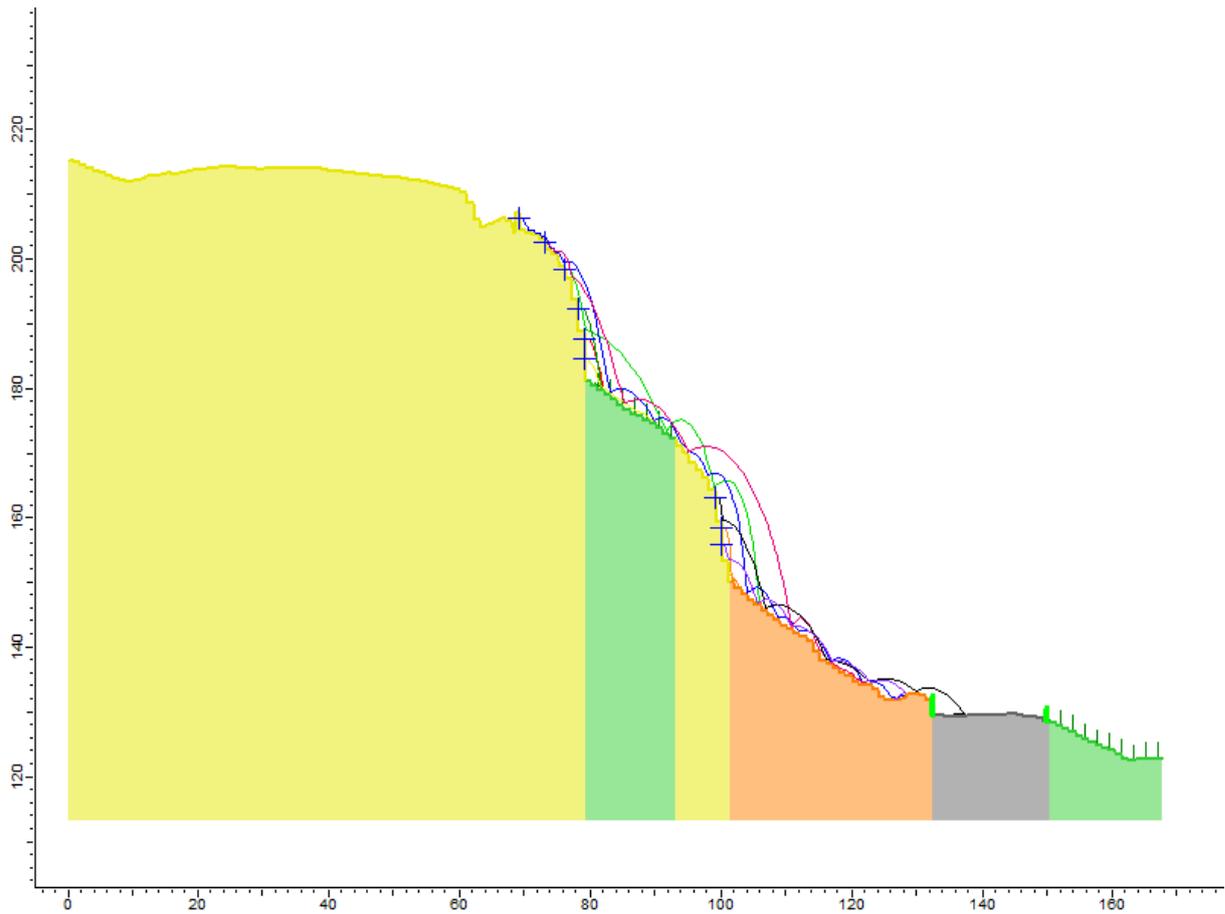


Abb. 5.15: Steinschlagsimulation Profil Gans 11. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt keine Walddämpfung.

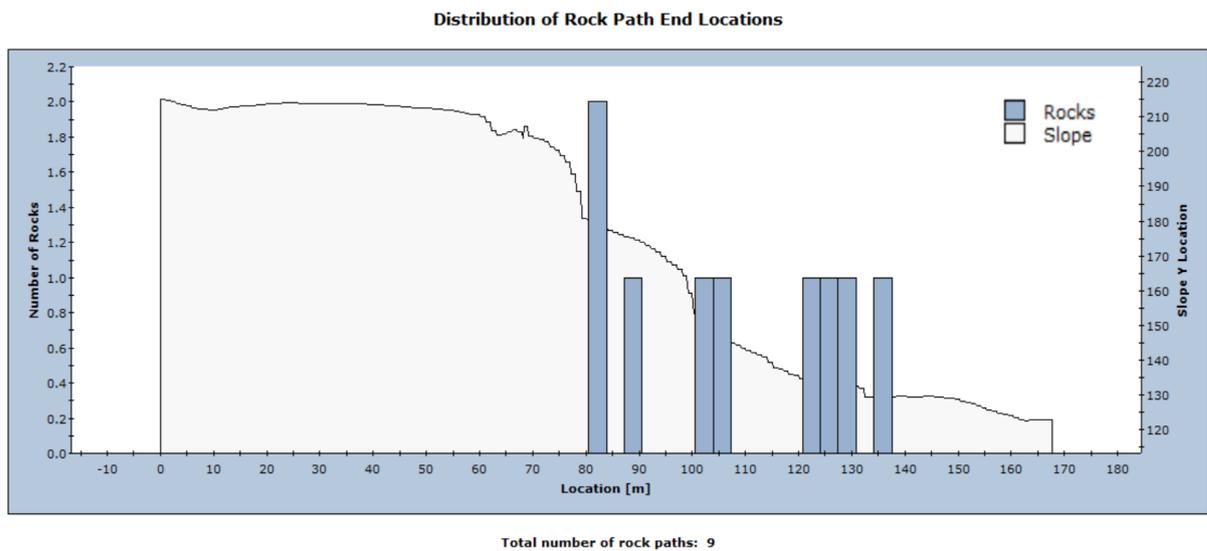


Abb. 5.16: Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung.

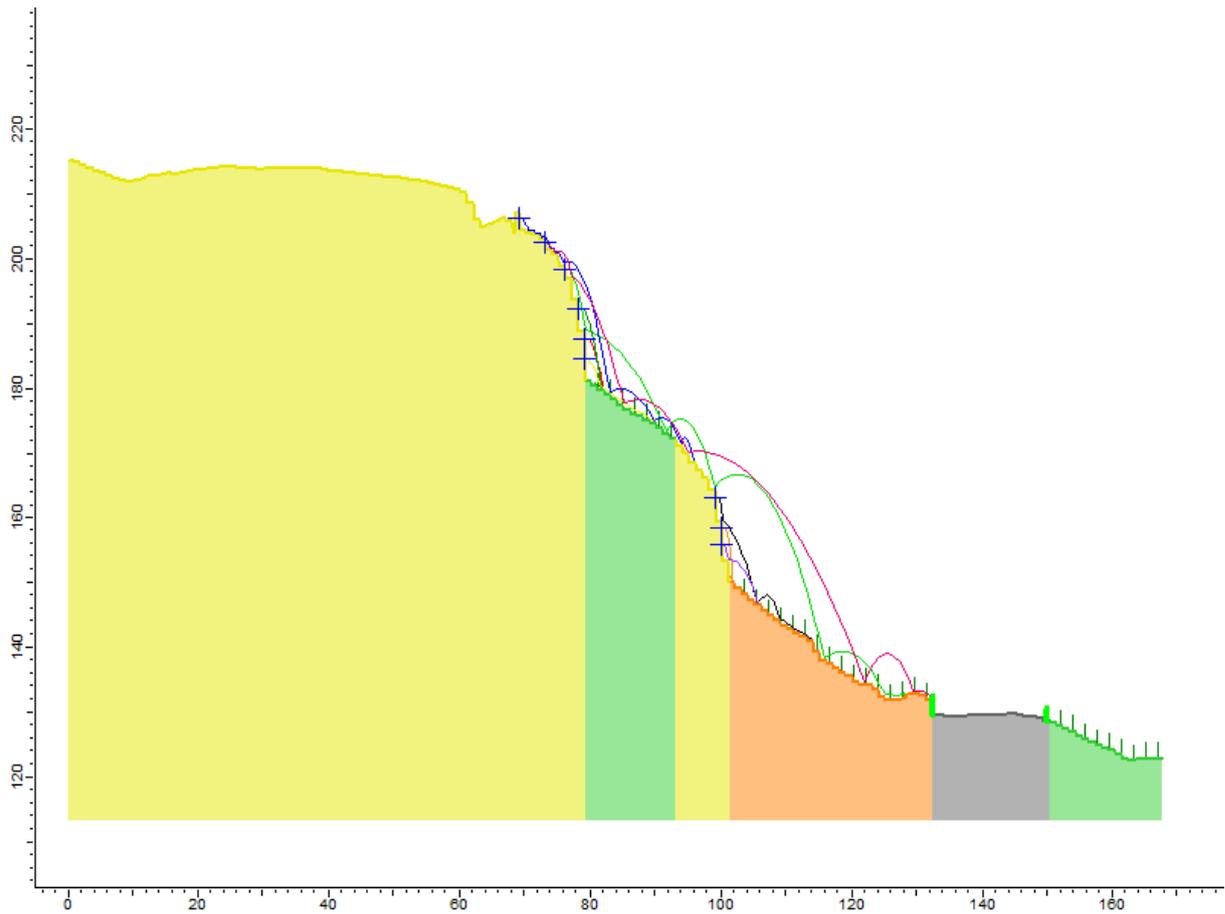


Abb. 5.17: Steinschlagsimulation Profil Gans 11. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt eine Walddämpfung mit einer effektiven Walddhöhe von 2,5 Meter und einen Waldwiderstandsbeiwert von 500 kg/s.

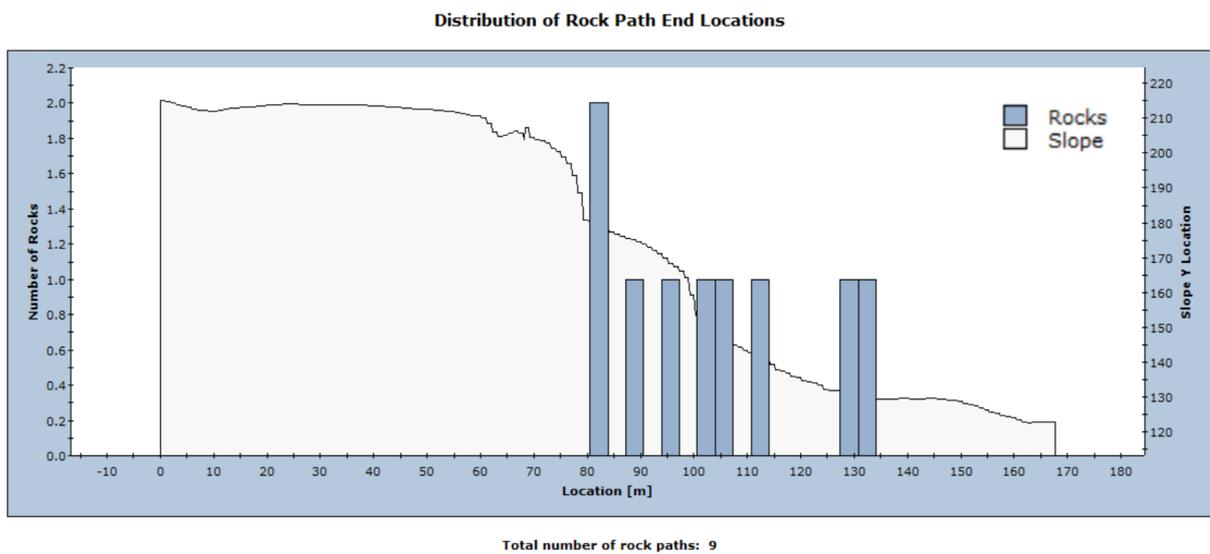


Abb. 5.18: Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung.

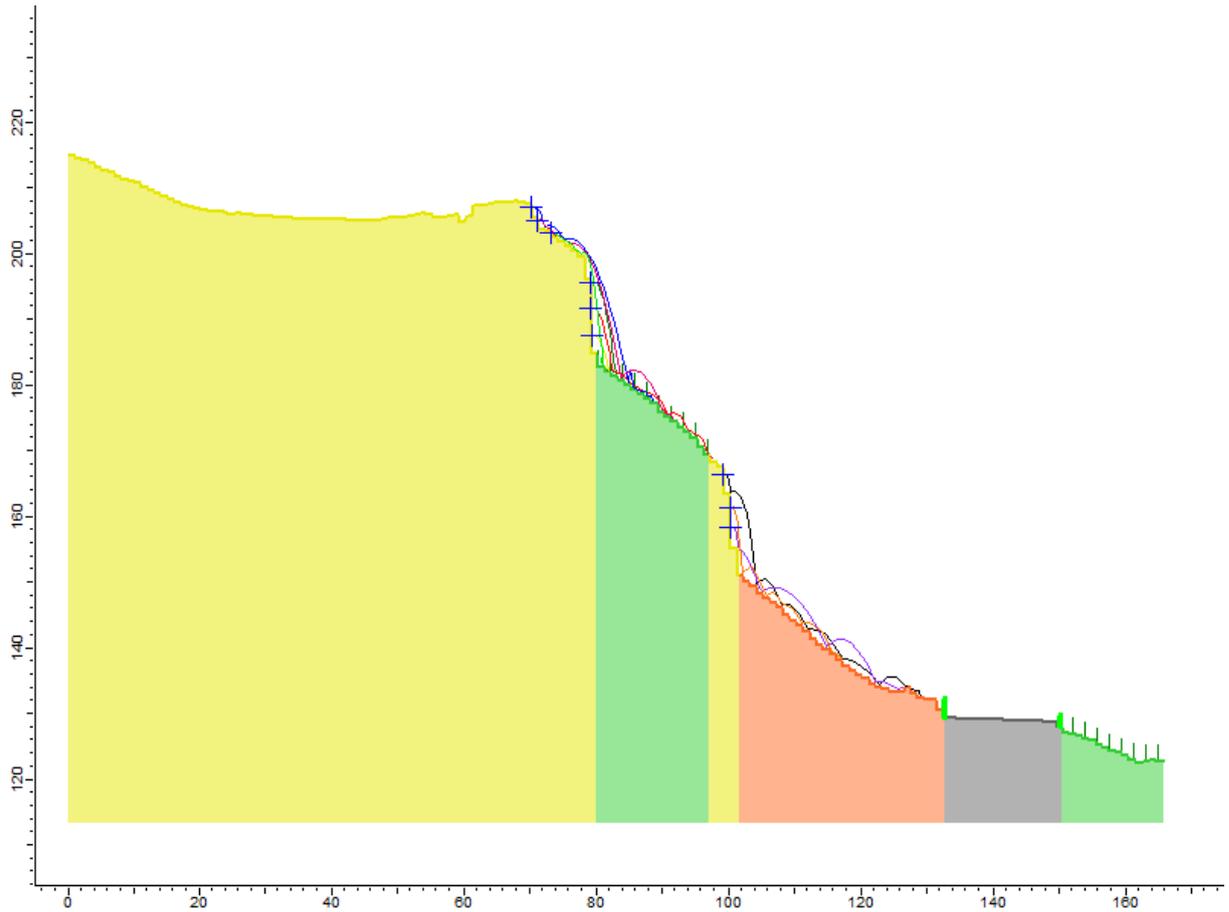


Abb. 5.19: Steinschlagsimulation Profil Gans 12. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt keine Walddämpfung.

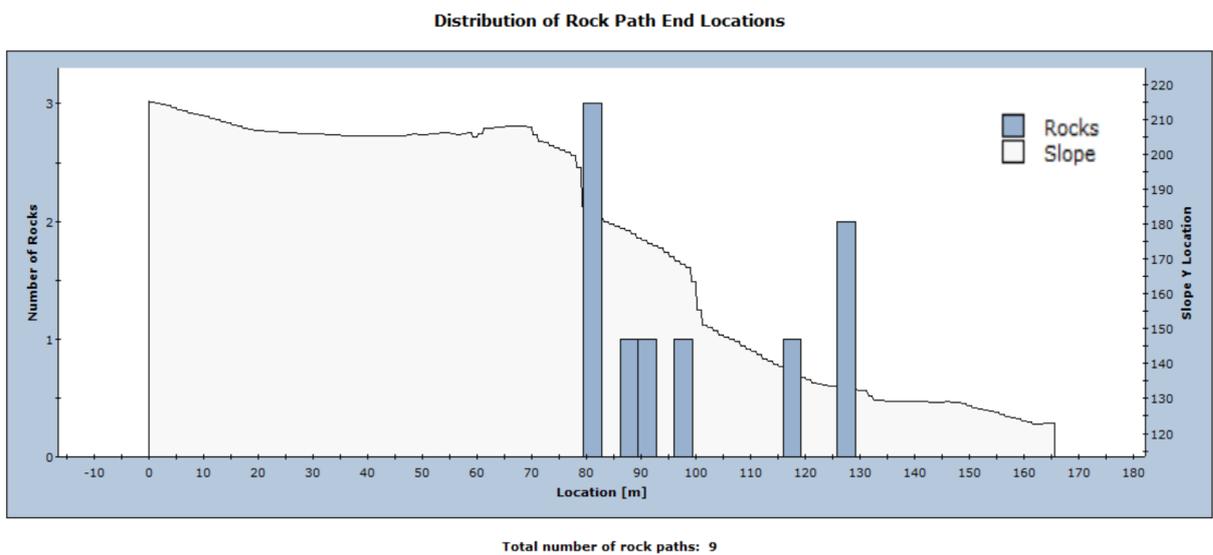


Abb. 5.20: Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung.

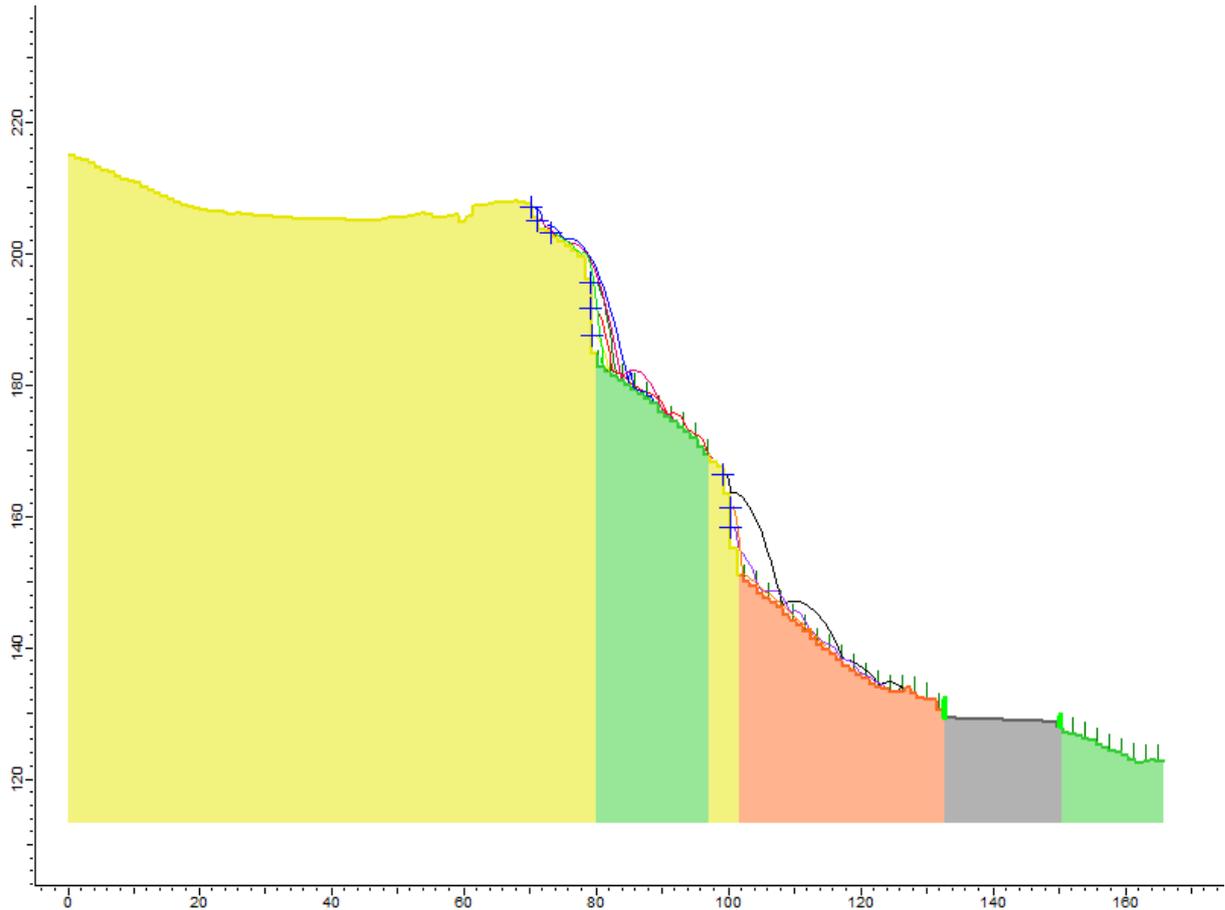


Abb. 5.21: Steinschlagsimulation Profil Gans 12. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt eine Walddämpfung mit einer effektiven Walddhöhe von 2,5 Meter und einen Waldwiderstandsbeiwert von 500 kg/s.

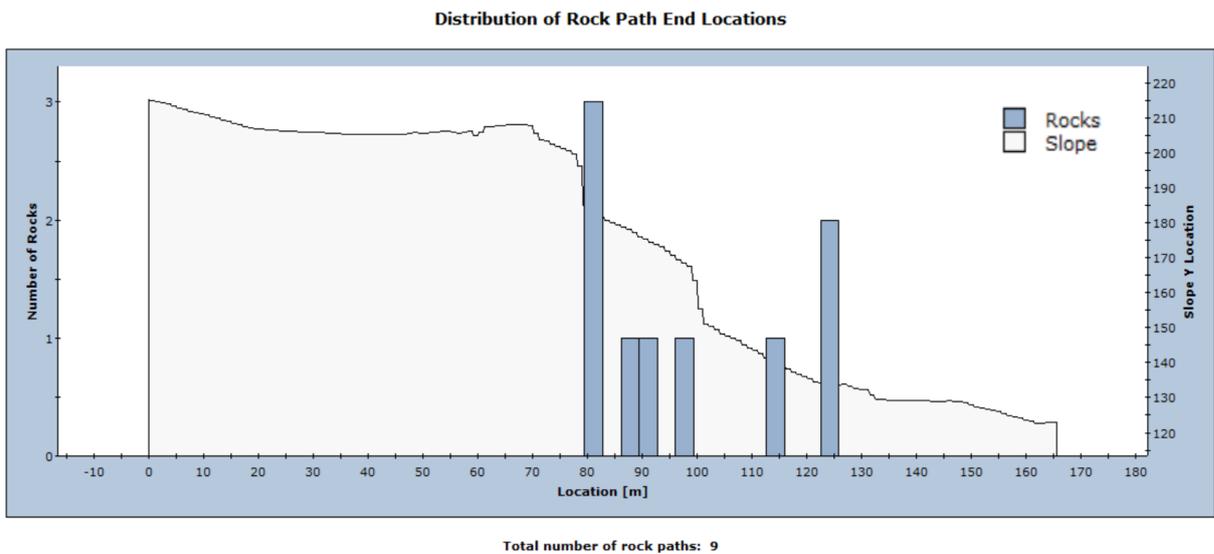


Abb. 5.22: Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung.

In Abbildung 5.15 lässt sich deutlich erkennen, dass die Steinschlagkurven mit den Farben *Blau* (Blockform Superellipse, Quadrat), *Magenta* (Superellipse, Quadrat) und *Hellgrün* (Superellipse) im Bereich „Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung“ (orange) auftreffen. Je höher dabei der Startpunkt dieser drei Kurven gesetzt wurde, desto weiter Richtung Straße (Elberadweg) erfolgte der Aufprall in diesem Vertikalbereich. Steinschlagkurve *Blau* (Superellipse, Quadrat) erreicht sogar knapp die Mauer des Elberadweges und wird in einer kleinen Senke davor aufgehalten. Auffällig an den Kurven ist ebenso, dass hierbei die größten Kurvenamplituden erreicht werden, bevor die Steine gestoppt werden. Die Gesteine der Kurven *Rot* (Superellipse, Quadrat), *Dunkelgrün* (Superellipse, Quadrat) und *Gelb* (Superellipse) landen allesamt im Bereich „Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung“ (grün) und werden durch diese Walddämpfung an den Bäumen zurückgehalten. Ein Auftreffen auf dem Elberadweg ist ausgeschlossen. Steinschlagbahn *Orange* (Superellipse, Quadrat) verliert sich ebenfalls, wie auch die Kurven zuvor, auf dem Bereich „Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung“ (orange). Zum Schluss verbleiben Kurve *Lila* (Superellipse) und *Schwarz* (Superellipse, Quadrat), welche eine Besonderheit darstellen. Die Steinschlagkurve *Lila* (Superellipse) erreicht wie *Blau* (Superellipse, Quadrat) fast das Ende der Böschung und wird in der Senke vor der Elberadwegmauer gestoppt. Das Gestein der Kurve *Schwarz* (Superellipse, Quadrat) erreicht dagegen den Asphalt und wird über die drei Meter hohe Mauer hinweg transportiert. In den vergangenen Jahren ist diese Situation in den Gansbrüchen bereits vorgekommen und stellt praktisch keine Seltenheit dar. Ein Unterschied kann jedoch im Deaktivieren der Walddämpfung im Programm RocFall liegen, was eine veränderte Steinschlagkurve zur Folge hat. Abbildung 5.16 zeigt unterdessen die Verteilung der Endpunkte.

Betrachtet man weiterhin Abbildung 5.17, bei welcher der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) eine Walddämpfung erhält, so fällt auf, dass Steinschlagbahn *Blau* (Superellipse, Quadrat) diesen Bereich nicht erreicht und das Gestein schon vorher auf einem der Sandsteinfelsen liegen bleibt. Dagegen besitzen Steinschlagkurve *Hellgrün* (Superellipse) und *Magenta* (Superellipse, Quadrat) wieder die höchsten Kurvenamplituden und erreichen knapp das Ende von Bereich „Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung“. Kurve *Hellgrün* (Superellipse) wird indes in der Senke vor der Elberadwegmauer gestoppt, jedoch zeigt sich bei Kurve *Magenta* (Superellipse, Quadrat) ein direktes Auftreffen auf die Mauer. Mit Bezug auf die Praxis und die realen Gegebenheiten in den Gansbrüchen ist hierbei erkennbar, dass die Elberadwegmauer eine gewisse Schutzfunktion gegenüber Stein- und Blockschlägen besitzt, damit es zu keiner Beeinträchtigung des Radweges kommt. In diesem simulierten Fall der Kollision von Gesteinen mit der angrenzenden Elberadwegmauer ist jedoch auch die Gefahr des Einsturzes der Mauer selbst gegeben, wie dies in Kapitel 4.2 (Seite 28) bereits beschrieben wurde. Durch die Zerstörung der Teilbereiche der Mau-

er, wie im Bereich von Gans 11 können Stein- und Blockschläge, sowie größere Felsstürze nicht mehr zurückgehalten werden und gefährden sowohl den Radweg, als auch den angrenzenden Schienenverkehr mit weitreichenden Folgen.

Abbildung 5.18 zeigt ebenso die Verteilung der Endpunkte für dieses Profil.

Mit Blick auf die zwei Simulationen von Profil Gans 12 wird deutlich, dass die oberen sechs Steinschlagkurven *Blau* (Superellipse, Quadrat), *Magenta* (Superellipse, Quadrat), *Hellgrün* (Superellipse), *Dunkelgrün* (Superellipse, Quadrat), *Rot* (Superellipse, Quadrat) und *Gelb* (Superellipse) in beiden Fällen im Bereich „Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung“ (grün) enden, da im oberen Teil der Gansbrüche keine Veränderungen der Vertikalschichten gemacht wurden (siehe Abbildung 5.19 und 5.21). Gründe für diese Steinschlagendpunkte könnten in der sich geänderten Profillinien liegen, wie ebenso an dem bereits erwähnten Bereich „Sandstein ohne Blockfeld mit Walddämpfung“ (grün), welche um ca. 5 Meter vergrößert wurde.

Die unteren drei Steinschlagbahnen (*Schwarz* (Superellipse, Quadrat), *Orange* (Superellipse, Quadrat), *Lila* (Superellipse)) zeigen dagegen etwas höhere Sprunghöhen der Gesteine an (siehe Abbildung 5.19). Kurve *Schwarz* (Superellipse, Quadrat) erreicht sogar den Endbereich der vertikalen Schicht „Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung“ in der Nähe der Mauer. Durch die Aktivierung der Walddämpfung in diesem Bereich können die Gesteine der drei Steinschlagkurven etwas früher gestoppt werden. Die Endposition hat sich jedoch nicht merklich verändert (siehe Abbildung 5.21). Die Verteilungen der Steinschlagendpunktbahnen dieses Profils sind Abbildung 5.20 und 5.22 zu entnehmen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass denkbare Steinschlagsituationen in den Gansbrüchen jederzeit auftreten können. Durch die Größe bzw. Höhe des Steinbruchs gibt es zahlreiche Stellen, an denen ein Felsversagen aufgrund der Trennflächen möglich sein kann. Gesteine aus den oberen Bereichen der Gansbrüche (zum Beispiel Profil Gans 11) werden bei ihrem Fallen zum Teil stärker beschleunigt und erreichen den Fuß der Böschung, die Straße oder werden an der Elberadwegmauer gestoppt, ohne dass die Walddämpfung größere Sprunghöhen dieser Gesteine verhindert. Steine aus den unteren Bereichen der Gansbrüche zeigen ähnliche Bewegungen, können aber besser von der Walddämpfung erfasst werden. Durch die minimal veränderte Morphologie in Profil Gans 12 ist hier von weniger Steinschlägen auszugehen. Alle simulierten Steinschlagbahnen ließen sich bestmöglich an den Bereichen mit Walddämpfung stoppen.

6 Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick

Geologisch gesehen wird das Elbsandsteingebirge aus vielen Unstetigkeits- bzw. Trennflächen aufgebaut, entlang derer die Festigkeit des Gebirges abnimmt. Für die Nutzung von Gebirgsklassifizierungen spielen diese Trennflächen eine entscheidende Rolle. Die ingenieurgeologischen Gegebenheiten in den Gansbrüchen weisen diesbezüglich auf Felsinstabilitäten hin und wurden nach dem Rock Mass Rating-System nach Bieniawski (1989) und deren Parametern (Kluftabstand, Kluftbeschaffenheit, Raumstellung der Klüfte usw.) ausgewertet. Insgesamt ergibt sich bei dieser Methode nach dem errechneten RMR-Wert von 38 ein qualitativ „schlechter Fels“. Der Geological Strength Index nach Hoek und Marinos (1998) beurteilt die Gebirgsqualität mithilfe der Kluftbeschaffenheit und der Struktur, verzichtet aber auf andere Trennflächencharakteristiken. Auch hier zeigten sich geringe Werte von 30 bis maximal 50, was ebenso für ein entfestigtes Gestein und mäßig bis schlechte Gebirgsverhältnisse spricht. Ein unter diesen Umständen mögliches Felsversagen entlang der Trennflächen kann dabei nur unzureichend vom angrenzenden Wald oder der Elberadwegmauer abgefedert werden. Da die Untersuchungsmethoden, beispielsweise die des Schmidt-Hammers, nicht für alle Abschnitte der Gansbrüche und in den höher gelegenen Bereichen durchgeführt wurden, sind die Ergebnisse als erste allgemeine Aussagen zu verstehen.

Dennoch darf der Einfluss und die Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag nicht vernachlässigt werden. Mit einer ausreichenden Grundfläche, Stammzahl und Stammdurchmesser bietet ein vorgeschalteter Wald sowohl großen als auch kleinen Gesteinsblöcken eine angemessene Trefferfläche, wodurch diese gestoppt oder die Geschwindigkeit der Gesteine herabgesetzt werden kann. Im gezeigten Beispiel der Gansbrüche wurden Schutzwirkungen von 0 - 99 % bei verschiedenartigen Gesteinsgrößen erzielt. Kleinere Steinschläge konnten durch den Wald entscheidend abgedämpft werden, wohingegen größere Steine ab einem Kubikmeter Größe weniger gut zurückgehalten wurden und sich Schutzwirkungen unter 50 % ergaben. Dies zeigt, dass der Wald nur einen Teil der Gesteinsmassen abfedern kann, sollte es zu möglichen Steinschlägen kommen.

Mit Hilfe von 2D-Simulationen im Programm RocFall konnten die Vorgänge in den Gansbrüchen bei Stein- und Blockschlägen am Beispiel zweier Profile nachvollzogen werden. Auch hier wurde gezeigt, dass ein mögliches Auftreten von Steinschlägen oder größeren Felsstürzen nicht ausgeschlossen ist und ebenso durch das Vorhandensein von Überhängen und Kluftflächen begünstigt wird. In gleicher Weise ließ sich die Bedeutung der Elberadwegmauer erklären, welche als Barriere für kleine und mittelgroße Steinschläge erbaut wurde. Im Fall der simulierten Steinschlagbahnen, beispielsweise im Profil Gans 11 (vgl. Seite 61/62), kann es jedoch aufgrund der größeren Sprunghöhe der Gesteine zu einem

Mauerdurchbruch oder dem Fallen über die Mauer kommen. In Anbetracht dieser Tatsache sollte über eine Stabilisierung oder Erhöhung der Elberadwegmauer nachgedacht werden.

Die simulierten Steinschlagbahnen der vorliegenden Arbeit liefern lediglich erste Informationen zu den Steinschlagendpunkten bei Felsversagen. Aufgrund der Dreidimensionalität der Gansbrüche sind die erstellten 2D-Modelle eine vorläufige Darstellung der Natur. Die Resultate sollten aus diesem Grund kritisch überprüft und als erste Approximation an die tatsächlichen Abläufe betrachtet werden. Um das Verhalten und die Umstände in der Natur während Stein- oder Blockschlägen genauer zu erfassen, ist die Erstellung eines 3D-Modells und numerische Berechnungen wünschenswert. Im Fall der Gansbrüche könnten anhand der erhaltenen Resultate anschließend Möglichkeiten zu erforderlichen Sicherungsmaßnahmen erarbeitet werden. Beispielsweise zählt darunter die Stabilisierung bzw. Erhöhung der Elberadwegmauer oder die direkte bzw. aktive Sicherung durch Felsanker oder passive Maßnahmen, wie Steinschlagnetze oder Steinschlagschutzzäune.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Stratigraphie der Elbtal-Gruppe [3].	2
2.2	Paläogeographie der frühen Oberkreide (vor etwa 94 Millionen Jahren (spätes Cenomanium)) mit Lage des sächsischen Kreidebeckens [3].	3
2.3	Vereinfachtes Ablagerungsmodell der Elbtalkreide als lateral zonierter (gradierter) Schelf [3].	4
2.4	Geologische Übersichtskarte mit Verbreitung der Elbtalkreide (grün) [3].	5
3.1	In den Gansbrüchen aufgenommenes Beispielbild für das Programm ImageJ. Oben: Werkzeug-Leiste des Programms.	6
3.2	Markierte Strecke des Geologenhammers (Gelbe Linie).	7
3.3	Eingabefenster <i>Set Scale</i>	7
3.4	Beispielbild mit gelb markierter Strecke.	8
3.5	Ausgabefenster <i>Results</i> mit Länge der markierten Strecke.	9
3.6	Geological Strength Index nach Hoek und Marinos (1998) [15].	16
3.7	Arten von Massenbewegungen: (A) Felssturz/Steinschlag - Bewegungsmechanismus Fallen, (B) Felssturz/Steinschlag - Bewegungsmechanismus Kippen [19].	17
3.8	Beziehung zwischen maximaler Energieaufnahme (E_{a-max}) und BHD während eines Kontaktes zwischen Stein und Baum getrennt nach Baumarten [18].	18
3.9	Das Grundprinzip von Rockfor ^{NET} zur Berechnung eines Steinschlagrisikos [18].	19
4.1	Lage des Elbsandsteingebirges (eingegraute Fläche) und des Untersuchungsgebietes Gansbrüche (roter Punkt). Verändert nach [21].	20
4.2	Lage des Untersuchungsgebietes Gansbrüche mit Einteilung der einzelnen Abschnitte der Felsmassive. Verändert nach [22].	21

4.3	Typische Schichtenfolge in den Gansbrüchen. Foto stammt aus Abschnitt Gans 12.	23
4.4	Rote, eisenhaltige Schlieren im Sandstein. Die Gesteinsprobe wurde am Fuß der Böschung im Bereich von Abschnitt Gans 2 gefunden.	25
4.5	Toniger Bereich aus Schicht 4.	26
4.6	Exemplarisches Aussehen von Überhängen im Untersuchungsgebiet.	26
4.7	Liegegebliebene Gesteine von Stein- und Blockschlägen im Bereich von Abschnitt Gans 10.	27
4.8	Aussehen der Elberadwegmauer.	28
4.9	Zerstörte Mauer im Bereich von Gans 11.	28
5.1	Flächenpole und dazugehörige Großkreise der Flächen.	29
5.2	Kluftrose zur Darstellung der vorherrschenden Streichrichtungen und deren Häufigkeiten.	30
5.3	Schematischer Aufbau des Schmidt-Hammers. (A) Schmidt-Hammer vor der Prüfung, (B) Schmidt-Hammer wird in Richtung der Gesteinsoberfläche gedrückt, (C) Klinke trifft auf Endlage und Schlaggewicht wird losgelassen, (D) Schlaggewicht trifft auf Bolzen. Verändert nach [30].	31
5.4	Gebirgsklassifizierung nach dem Geological Strength Index für die Felsabschnitte Gans 1 bis Gans 15. Verändert nach [15].	42
5.5	Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 1. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m ² /ha (Minimalprofil) bis 40 m ² /ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 250 m ² /ha. . .	49
5.6	Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 2. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m ² /ha (Minimalprofil) bis 40 m ² /ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 90 m ² /ha. . .	49

-
- 5.7 Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 3. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 86 m²/ha. . . . 51
- 5.8 Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 4. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 62 m²/ha. . . . 51
- 5.9 Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 5. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 60 m²/ha. . . . 53
- 5.10 Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 6. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 56 m²/ha. . . . 53
- 5.11 Ergebnis der Stammzahlverteilung für Gestein Nr. 7. - Nachhaltige Grundfläche (G_{max}) ab 8 cm BHD: 35 m²/ha (Minimalprofil) bis 40 m²/ha (Idealprofil) - Grundfläche (G_{theo}) ab 8 cm BHD für die notwendige Energievernichtung (damit möglichst alle Steine gestoppt werden): 46 m²/ha. . . . 54
- 5.12 Lage der Profillinien in den Gansbrüchen mit Einteilung der einzelnen Abschnitte der Felsmassive. Verändert nach [22]. 56
- 5.13 Ausschnitt des bearbeiteten Profils aus Gans 11 mit Blick auf die Felswand. 56
- 5.14 Im Programm RocFall genutzte Form der Superellipse und des Quadrates. 59
- 5.15 Steinschlagsimulation Profil Gans 11. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt keine Walddämpfung. 61
- 5.16 Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung. 61
- 5.17 Steinschlagsimulation Profil Gans 11. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt eine Walddämpfung mit einer effektiven Waldhöhe von 2,5 Meter und einen Waldwiderstandsbeiwert von 500 kg/s. 62
-

5.18	Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 11 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung.	62
5.19	Steinschlagsimulation Profil Gans 12. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt keine Walddämpfung.	63
5.20	Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld ohne Walddämpfung.	63
5.21	Steinschlagsimulation Profil Gans 12. Der Bereich „Sandstein mit Blockfeld“ (orange) besitzt eine Walddämpfung mit einer effektiven Waldhöhe von 2,5 Meter und einen Waldwiderstandsbeiwert von 500 kg/s.	64
5.22	Verteilung der Endpositionen der Steinschlagbahnen im Profil Gans 12 - Sandstein mit Blockfeld mit Walddämpfung.	64

Tabellenverzeichnis

3.1	Klasseneinteilung RQD-Index.	10
3.2	Klasseneinteilung RMR-System.	12
3.3	Rock Mass Rating-System nach Bieniawski (1989) [14].	13
4.1	Aufbau der Postelwitz-Formation. Verändert nach [23].	22
5.1	Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 5. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.	33
5.2	Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 6. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.	33
5.3	Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 9. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.	34
5.4	Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 11. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.	34
5.5	Messergebnisse des Schmidt-Hammers im Abschnitt Gans 12. Abkürzungen: MP: Messpunkt; RW: Rückprallwert.	35
5.6	Zusammenstellung von empirischen Beziehungen zwischen mit dem Schmidt'schen Rückprallhammer gemessenen Rückprallwerten und der einaxialen Druck- festigkeit bzw. des E-Moduls natürlicher Gesteine. Abkürzungen: σ_{UCS} : Einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (MPa); E_t : Elastizitätsmodul bei 50 % der Druckfestigkeit; ρ : Dichte (g/cm^3); R_L/R_N : Rückprallwerte für L- und N-Hämmer; r : Bestimmtheitsmaß. Verändert nach [31].	36
5.7	Errechnete einaxiale Druckfestigkeiten σ_{UCS} (MPa) der zehn Messpunkte in den Abschnitten Gans 5, Gans 6, Gans 9, Gans 11 und Gans 12. Abkür- zungen: MP: Messpunkt; AS: Abschnitt.	37
5.8	Gesteinsfestigkeiten in Abhängigkeit des Verwitterungsgrades und der üb- lichen Feldversuche (in Anlehnung an DIN EN ISO 14 689-1). Abkürzung: σ_{UCS} : einaxiale Gesteinsdruckfestigkeit (MPa). Verändert nach [32].	38

5.9	Rock Mass Rating-Klassifizierungssystem nach Bieniawski (1989). Rot eingerahmte Felder bezeichnen die in den Gansbrüchen angetroffenen Gegebenheiten mit dessen Parameter-Wertung. Verändert nach [14].	40
5.10	Rock Mass Rating-Klassifizierungsparameter, Werte und Bewertungen für die Gesteinsmassen der Gansbrüche.	41
5.11	Detaillierte Daten der Gebirgsklassifizierung nach GSI.	43
5.12	Benötigte Eingangsgrößen zur Berechnung des Anforderungsprofils und der Schutzwirkung im Internettool Rockfor ^{NET} . Verändert nach [34].	44
5.13	Maximale Grundflächen ($G_{(max)}$) für drei verschiedene Waldtypen. Die nachhaltig möglichen Grundflächen werden in Abhängigkeit von den tatsächlich vorhandenen Baumarten vom Tool Rockfor ^{NET} errechnet [34].	45
5.14	Werte der Böschungsparameter in RocFall für die fünf erstellten Bereiche. .	57
5.15	Werte der Böschungsparameter in RocFall für die fünf erstellten Bereiche. .	60

Literaturverzeichnis

- [1] Heinz Gliniorz. Felsstürze. <http://www.1999er.gipfelbuch.de/felsstuerze.htm>, 2003. [Zugriff am 16.07.2019].
 - [2] Sächsische Zeitung Online-Archiv. Die Mauer am Elberadweg bröckelt. *Sächsische Zeitung*, 28.02.2014.
 - [3] Frank Horna und Markus Wilmsen. Stratigraphie und Fazies der sächsischen Kreide (Elbtal-Gruppe, Cenoman–Unterconiac)(Exkursion F am 10. April 2015). *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 97:117–142, 2015.
 - [4] Markus Wilmsen und Birgit Niebuhr. 1. Die Kreide in Sachsen. *Geologica Saxonica*, 60(1):3–12, 2014.
 - [5] Werner Pälchen und Harald Walter. *Geologie von Sachsen*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 2008.
 - [6] Staatsbetrieb Sachsenforst, Nationalparkverwaltung Sächsische Schweiz. Entstehung des Elbsandsteingebirges. <https://www.nationalpark-saechsische-schweiz.de/der-nationalpark/naturraum/geologie/entstehung/>. [Zugriff am 04.06.2019].
 - [7] Jan-Michael Lange, Nadine Janetschke, Martin Kaden, und Marvin Preusse. Landschaftsentwicklung in der Umgebung von Dresden – Sedimentation, Vulkanismus und Tektonik im Känozoikum (Exkursion D am 9. April 2015). *Jahresberichte und Mitteilungen des Oberrheinischen Geologischen Vereins*, 97:69–102, 2015.
 - [8] Andreas Gerth. *Geologische Exkursionen in der Oberlausitz und im Elbsandsteingebirge: [mit 92 ausgesuchten Zielen]*. Oberlausitzer Verlag, 2006.
 - [9] Jörg Meier. Vergleichende Untersuchungen zur Repräsentanz des Lm-Wertes. Studienarbeit, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2001.
 - [10] Evert Hoek. Rock mass classification. <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/Practical-Rock-Engineering-Chapter-3-Rock-Mass-Classification.pdf>, 2002. [Zugriff am 06.06.2019].
 - [11] Wolfgang R. Dächroth. *Baugeologie: eine praxisorientierte Anleitung für Bauingenieure und Geowissenschaftler*. Springer-Verlag, 2013.
 - [12] Klaus Eichler. *Fels-und Tunnelbau*, volume 1. Expert Verlag, 2000.
 - [13] Arild Palmström. Short on the RMR (Rock Mass Rating) system. http://www.rockmass.net/files/short_on_RMR-system.pdf, 2014. [Zugriff am 11.06.2019].
-

-
- [14] Zdzisław Tadeusz Bieniawski. *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 1989.
- [15] Paul Marinos, Vassilis Marinos, und Evert Hoek. Geological Strength Index (GSI). A characterization tool for assessing engineering properties for rock masses. In *Proceedings International Workshop on Rock Mass Classification for Underground Mining, Mark, Pakalnis and Tuchman (editors), Information Circular*, volume 9498, pages 87–94, 2007.
- [16] Gerald Skalla. Methode zur Ermittlung des Einflusses der Streuung von Gebirgskennwerten auf die Verteilung der Gebirgsverhaltenstypen. Diplomarbeit, Technische Universität Graz, 2002.
- [17] Tanja Schriebl. Gebirgsklassifikationen einst und heute - Eine Literaturstudie mit praktischer Anwendung an einer Felsböschung in einem Steinbruch. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur Wien, 2007.
- [18] Luuk Dorren, Frédéric Berger, und Bernhard Maier. Der Schutzwald als Steinschlagnetz. *LWFaktuell*, 50:25–27, 2005.
- [19] Lynn Highland. Landslide types and processes. *U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2004-3072*, 2004.
- [20] International EcorisQ Association (ecorisQ). Rockfor^{NET}. <http://www.ecorisq.org/rockfor-net-de>. [Zugriff am 30.10.2019].
- [21] Portal e.V. Elbsandsteingebirge. <http://fotofestival-sandstein.de/elbsandsteingebirge/>. [Zugriff am 25.07.2019].
- [22] Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen (GeoSN). Geoportal Sachsenatlas. <https://geoportal.sachsen.de/cps/karte.html?showmap=true>. [Zugriff am 24.09.2019].
- [23] Werner Pälchen und Harald Walter. *Geologie von Sachsen I – Geologischer Bau und Entwicklungsgeschichte, 2. Auflage*. 2011.
- [24] Horst Rast. *Geologischer Führer durch das Elbsandsteingebirge*. Bergakademie Freiberg, 1959.
- [25] Dieter Kutschke. *Steinbrüche und Steinbrecher in der sächsischen Schweiz*, volume 11. Stadtmuseum, 2000.
-

-
- [26] Thomas Voigt, Julia Franke, und Sandra Franke. Grundlagen für ein geologisch-tektonisches modell der kreideablagerungen im sächsisch-böhmischen grenzbereich im rahmen des ziel 3-projektes grace.–jena: 42 s. *Abschlussbericht, im Auftrag des LfULG*, 2013.
- [27] Katalin Szilágyi und Adorján Borosnyói. 50 years of experience with the schmidt rebound hammer. *Concrete Structures*, 10:46–56, 2009.
- [28] Reşat Ulusay. *The ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 2007-2014*. Springer International Publishing, 2014.
- [29] Marco Brandestini. Hammerevolution. *Tec21*, 136 (Heft 33-34):27–29, 2010.
- [30] GharPedia. Rebound hammer test procedure for concrete hardness. <https://gharpedia.com/wp-content/uploads/2017/03/0710050002-01-Rebound-Hammer-Test-1.jpg>. [Zugriff am 19.11.2019].
- [31] Adnan Aydin und Arindam Basu. The schmidt hammer in rock material characterization. *Engineering Geology*, 81(1):1–14, 2005.
- [32] Helmut Prinz und Roland Strauß. *Ingenieurgeologie*. Springer-Verlag, 2011.
- [33] George Tsiambaos und Harry Saroglou. Excavatability assessment of rock masses using the geological strength index (gsi). *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69(1):13–27, 2010.
- [34] Luuk Dorren, Frédéric Berger, Monika Frehner, Markus Huber, Kathrin Kühne, Roland Métral, Arthur Sandri, Raphael Schwitter, Jean-Jacques Thormann, und Berchtold Wasser. Das neue NaiS-Anforderungsprofil Steinschlag. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166 1:16–23, 2015.
- [35] Rocscience Inc. Rocfall. <https://www.rocscience.com/software/rocfall>, . [Zugriff am 28.12.2019].
- [36] Rocscience Inc. Rocscience coefficient of restitution table. https://www.rocscience.com/help/rocfall/baggage/rn_rt_table.htm, . [Zugriff am 03.01.2020].
- [37] Rocscience Inc. Analysis method setting in rocfall. https://www.rocscience.com/help/rocfall/rocfall/Analysis_Method.htm, . [Zugriff am 07.01.2020].
-