

Diploma Thesis

# A critical analysis of the approach of the design block according to ONR 24810 based on a specific case study

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of  
Diplom-Ingenieur  
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

---

DIPLOMARBEIT

## Eine kritische Auseinandersetzung mit dem Ansatz des Bemessungsblockes lt. ONR 24810 anhand eines konkreten Fallbeispiels

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplom-Ingenieurs  
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

**Fabian Moosbrugger, BSc**

Matr.Nr.: 01325730

unter der Anleitung von

Priv. Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Alexander Preh**

Dipl.-Ing. **Mariella Illedtisch, MBA**

Institut für Geotechnik  
Forschungsbereich Ingenieurgeologie  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/220-1, A-1040 Wien

Wien, im März 2022

---



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Wien, den 16. März 2022



---

Fabian Moosbrugger, B.Sc.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Der Gedanke an, da war doch was,  
Ich fang‘ gleich an, Ich mach‘ das dann schon,  
Ich google noch kurz die Bedeutung des Wortes Prokrastination!

Aus Prokrastination von Moop Mama 2016



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Danksagung

Nach vielen lehrreichen, aber auch anstrengenden und nervenaufreibenden Jahren des Bauingenieurstudiums an der TU Wien, stehe ich endlich vor dem lang ersehnten Abschluss. Es ist nun an der Zeit Danke zu sagen an all jene Personen, die mich auf diesem Weg begleitet, unterstützt und stets motiviert haben.

In erster Linie möchte ich mich gerne bei Herrn Priv. Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Preh und bei Frau Dipl.-Ing. Mariella Illedtisch, MBA bedanken, die mir die Möglichkeit gaben am Institut für Ingenieurgeologie diese Diplomarbeit zu schreiben. Mit ihrer Unterstützung, den nötigen Inputs sowie den Freiraum, den ich während der Bearbeitungszeit genoss, war es mir möglich die folgende Arbeit nach meinen Vorstellungen zu erstellen. Insbesondere gilt der Dank Herrn Prof. Preh der sich in den letzten Wochen intensiv mit der Korrektur meiner Arbeit beschäftigte.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Studienkollegen und bei all meinen Freunden, mit welchen ich eine meist wunderschöne Studienzeit in Wien verbringen durfte. Ohne das gemeinsame Lernen, der Austausch von Unterlagen oder die Beantwortung vieler Fragen, wäre es mir nicht möglich gewesen dieses Studium abzuschließen. Vor allem die vielen schönen Momente, die ich zusammen mit euch erlebt habe, werden mir ewig in Erinnerung bleiben.

Besonders hervorheben möchte dabei Herrn Dipl.-Ing. Lukas Warter mit dem ich 2013 das Studium begonnen habe und nach dieser langen Zeit freue ich mich nun umso mehr, dass wir nun beide dieses Studium erfolgreich zum Abschluss gebracht haben. Gegenseitig unterstützten und motivierten wir uns über die gesamte Studienzeit und genossen auch das ein oder andere Bier zusammen. Vielen Dank für die gemeinsame Studienzeit.

Bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Dipl. -Ing. Herbert Wicker, mit dem ich ausgesprochen angenehme drei Jahre in der wohl schönsten Wohnung in Wien verbringen durfte.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinem Bruder Christof Moosbrugger für das Korrekturlesen meiner, in seinen Augen, uninteressanten Arbeiten sowie für die Übernachtungsmöglichkeit in seiner Wohnung, bedanken.

Mein größter Dank gilt aber meinen Eltern Margareta und Karl Moosbrugger die mir durch ihre jahrelange finanzielle Unterstützung dieses Studium erst ermöglicht hatten und die mich trotz meiner langen Studiendauer stets unterstützten und mich nie unter Druck gesetzt haben. Vielen Dank für die unzähligen motivierenden Worte und das Verständnis über das ständige Sudern über Prüfungen oder Abgaben.

Zu guter Letzt möchte ich aber noch mir selbst danken. Trotz der langen Studienzeit bin ich nun unendlich stolz dieses Studium zum Abschluss zu bringen. Es war nicht immer leicht und deshalb freut es mich nun umso mehr das Studium bis zum Ende durchgezogen zu haben!



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

# Kurzfassung

Gravitative Naturgefahren, insbesondere Steinschlag, beschäftigt Geologen und Geotechniker schon seit knapp hundert Jahren. Aufgrund ihrer Unberechenbarkeit, hohen Geschwindigkeit und hoher Aufprallenergie stellen Steinschlagprozesse eine ernste Gefährdung, vor allem für Personen, dar. Immer wieder kommt es zu tödlichen Unfällen sowie Beschädigungen an Infrastruktur durch herabstürzende Felsbrocken entlang Straßenabschnitten und Wegen.

Erste Ansätze oder analytische Modelle stellen einfache und zeitextensive Methoden für die Ausweisung relativer maximaler Reichweiten von Sturzprozessen dar (vgl. dazu Heim 1932; Hungr und Evans 1988 ;Meißl 1998 , Dorren 2003; Volkwein. A et al. 2011; Melzner et al. 2012 ). Diese Methoden beruhen auf einfachen geometrischen Annahmen bzw. Algorithmen, sodass der Anwender bei den meisten dieser Ansätze sehr wenig Eingangsparameter benötigt (Melzner und Preh 2012). Infolge der hohen Komplexität von Steinschlagprozessen sind mit empirischen Ansätzen die Grenzen von Abschätzungen bald erreicht. Durch moderne Computerprogramme (Prozessmodelle) ist es heutzutage möglich, eine Vielzahl an Steinschlagtrajektoren zu simulieren, um die stochastische Natur des Prozesses zu berücksichtigen.

Einen wesentlichen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse hat der Eingangsparameter der Blockgröße mit dem der Steinschlagprozess simuliert wird. Die österreichische Richtlinie ONR 24810 bestimmt zu diesem Zweck einen Bemessungsblock aus der Schutthalde von vorhergegangenen Sturzereignissen. In Abhängigkeit der Ereignishäufigkeit und der Ereignisfrequenzklasse ergibt sich der entsprechende Fraktilwert für das Volumen des Bemessungsblockes. Die Bestimmung einer Bemessungsblockgröße und die Bemessung der Schutzmaßnahmen auf Grundlage dieses Blocks ist der in Österreich geltende Stand der Technik. Dieser Ansatz stellt eine starke Vereinfachung dar. Ein alternativer Ansatz ist es, die Berechnungen mittels der gesamten beobachteten Blockverteilung durchzuführen. Mit dem Ansatz der Blockgrößenverteilung lassen sich in weiterer Folge auch unterschiedliche Jährlichkeiten abbilden (Illeditsch und Preh 2020).

Ziel dieser Untersuchung war es, die Auswirkungen dieser beiden Berechnungsansätze anhand eines konkreten Fallbeispiels zu untersuchen. Dazu wurden, nach erforderlichen Grundlagenerhebungen und Feldbegehungen, beide Berechnungsansätze mittels Steinschlagsimulationsprogramm Wurf 3D simuliert und die Ergebnisse hinsichtlich Reichweite, Sprunghöhe und kinetischer Energie verglichen. In weitere Folge wurde, auf Basis der Reichweite der Sturzblöcke, sowohl eine Risikoanalyse für den Automobilverkehr als auch für den Radverkehr entlang des untersuchten Straßenabschnittes durchgeführt. Auffällig dabei waren die Unterschiede im Sterberisikos des einspurigen Verkehrs. Das Sterberisiko des Fahrradfahrers, beim Berechnungsansatz Blockgrößenverteilung, war dabei um fast 20% höher als beim Ansatz des Bemessungsblockes lt. ONR 24810. Sowohl die Blockvermessung der Schutthalde als auch Lambert und Nicot 2011) belegen, dass die Ereignishäufigkeit von Steinschlagereignissen mit Blockgrößen kleineren Durchmessers deutlich höher ist. Hinsichtlich der Vulnerabilität des Radverkehrs, für den auch bereits Steine mit geringem Volumen tödlich sind, muss somit der Ansatz des Bemessungsblockes lt. derzeitig gültiger Richtlinie ONR 24810 doch deutliche Abstriche gegenüber dem Ansatz der Blockgrößenverteilung machen.

Auf Grundlage der Risikoanalyse wurde ein Schutzmaßnahmenkonzept, für den betrachteten Straßenabschnitt, entwickelt. Auch hier sind die Differenzen der beiden Berechnungsansätze

deutlich erkennbar. Zur Risikoreduzierung für die Verkehrsteilnehmer entlang des untersuchten Straßenabschnittes wurde für den Berechnungsansatz Bemessungsblock eine einzige Netzreihe als ausreichend bemessen. Gegensätzlich dazu benötigte es zur Risikoreduktion für die Blockgrößenverteilung eine Sicherungskette von drei hintereinander folgenden Schutznetzen. Dies verdeutlicht welcher Vereinfachung die derzeit gültige Richtlinie, durch den Ansatz des Bemessungsblockes auf Grundlage der Ereignishäufigkeit, unterliegt.

# Abstract

Gravitational natural hazards, especially rockfall, have preoccupied geologists and geotechnical engineers for almost a hundred years. Due to their unpredictability, high speed and high impact energy, rockfall processes pose a serious hazard, especially to people. Fatal accidents as well as damage to infrastructure by falling boulders along road sections and paths occur again and again.

First approaches or analytical models represent simple and time-extensive methods for the designation of relative maximum ranges of fall processes (cf. Heim 1932; Hungr and Evans 1988; Meißl 1998, Dorren 2003; Volkwein, A et al. 2011; Melzner et al. 2012). These methods are based on simple geometric assumptions or algorithms, so the user needs very few input parameters for most of these approaches (Melzner and Preh 2012). As a result of the high complexity of rockfall processes, the limits of estimations are soon reached with empirical approaches. Nowadays it is possible, through modern computer programs (process models), to simulate a large number of rockfall trajectories to account for the stochastic nature of the process.

The input parameter of the block size with which the rockfall process is simulated has a significant influence on the calculation results. For this purpose, the Austrian guideline ONR 24810 determines a design block from the debris pile of previous fall events. Depending on the event frequency and the event frequency class, the corresponding fractilevalue for the volume of the design block is obtained. The determination of a design block size and the design of protective measures based on this block is the state of the art in Austria. This approach represents a severe simplification. An alternative approach is to perform the calculations using the entire observed block distribution. With the block size distribution approach, different annualities can subsequently be mapped (Illeditsch and Preh 2020).

The aim of this study was to investigate the effects of these two calculation approaches using a concrete case study. For this purpose, after necessary basic surveys and field inspections, both calculation approaches were simulated using the rockfall simulation program Wurf 3D. The results were compared with respect to range, jump height and net energy. Subsequently, based on the range of the falling blocks, a risk analysis was carried out for both automobile traffic and bicycle traffic along the investigated road section. The differences in the mortality risk of the single-lane traffic were striking. The mortality risk of the cyclist, with the calculation approach block size distribution, was almost 20% higher than with the approach of the design block according to ONR 24810. Both the block measurement of the scree slope and Lambert and Nicot (2011) prove that the event frequency of rockfall events with block sizes of smaller diameter is significantly higher. Regarding the vulnerability of bicycle traffic, for which even small stones are fatal, the approach of the design block according to the currently valid guideline ONR 24810 must make significant concessions compared to the approach of the block size distribution.

Based on the risk analysis, a protective measure concept was developed for the road section under consideration. The differences between the two calculation approaches are clearly

visible. In order to reduce the risk for the road users along the examined road section, a single row of nets was considered sufficient for the calculation approach design block. In contrast to this, a safety chain of three consecutive safety nets was required for risk reduction for the block size distribution. This illustrates the simplification of the currently valid guideline due to the approach of the design block based on the event frequency.

## Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	15
1.1	Gravitative Massenbewegungen in Österreich.....	15
1.2	Problemstellung .....	15
1.3	Aufbau und Zielsetzung.....	16
2	Theoretische Grundlagen.....	17
2.1	Einleitung .....	17
2.2	Ablösemechanismen .....	17
2.3	Sturzprozesse .....	20
2.3.1	Definition und Abgrenzung .....	20
2.3.2	Entstehung und Ursachen .....	21
2.4	Steinschlag.....	23
2.4.1	Bewegungsarten .....	23
2.4.2	Prozessbereich.....	25
2.4.3	Einflussfaktoren und Parameter.....	27
2.5	Steinschlagschutz.....	28
2.5.1	Steinschlagintensität .....	28
2.5.2	Technischer Steinschlagschutz.....	28
3	Ansätze zur Beurteilung von Sturzprozessen.....	31
3.1.1	Empirische Ansätze.....	31
3.1.2	Numerische Berechnungen .....	33
4	Risikokonzept.....	37
4.1.1	Risikomanagement .....	37
4.1.2	Risikobegriff .....	37
4.1.3	Ausgehende Gefahr vom Prozess Steinschlag .....	38
5	ONR 24810.....	41
5.1.1	Grundlagenerhebung .....	41

5.1.2	Bestimmung der Schadensfolgeklasse .....	41
5.1.3	Bestimmung der Ablösebereiche.....	42
5.1.4	Bestimmung der Blockgröße.....	42
5.1.5	Bestimmung der einwirkenden Energien auf die Schutzmaßnahmen .....	43
5.1.6	Bestimmung der Sprunghöhen .....	44
6	Fallbeispiel Rossatz .....	45
6.1	Rossatz Untersuchungsgebiet.....	46
6.2	Prozessanalyse und Schadenspotential.....	52
6.3	Prozessmodellierung.....	55
6.3.1	Feldaufnahmen.....	55
6.3.2	Kalibrierung der Oberfläche.....	60
6.3.3	Simulationsdurchgänge.....	62
6.4	Analyse mittels Bemessungsblock .....	63
6.4.1	Simulationsergebnisse.....	64
6.4.2	Risikoanalyse.....	65
6.4.3	Auswirkung auf Sicherungsmaßnahmen .....	68
6.4.4	Bewertung der gesetzten Maßnahmen .....	70
6.5	Analyse mittels Blockverteilung.....	73
6.5.1	Simulationsergebnisse.....	75
6.5.2	Risikoanalyse.....	75
6.5.3	Auswirkung auf Sicherungsmaßnahmen .....	78
6.5.4	Sicherungsmaßnahmen .....	79
6.5.5	Ergebnisse .....	80
6.5.6	Auswirkung der Sicherungsmaßnahmen .....	88
7	Vergleich der beiden Analysen .....	91
8	Schlussfolgerung .....	97
9	Zusammenfassung.....	99

---

10	Abbildungsverzeichnis .....	102
11	Tabellenverzeichnis .....	104
12	Literaturverzeichnis.....	105
13	www-Verzeichnis .....	109
14	Beilagenverzeichnis.....	110

# 1 Einleitung

## 1.1 Gravitative Massenbewegungen in Österreich

Zu den gravitativen Massenbewegungen, wie sie in Gebirgsregionen vielerorts auf der Welt vorkommen, zählen neben Hangmuren und Lawinen vor allem die Gruppe der Sturzprozesse. Die Sturzprozesse umfassen Stein- und Blockschlag, sowie Fels- und Bergstürze und stellen eine hohe Gefährdung für Personen, aber auch für Gebäude und Infrastruktur dar (Suda und Rudolf-Miklau 2012). Ein großer Anteil der Massenbewegungen in Österreich betrifft meist nur lokale Bereiche. vielerorts werden Ackerflächen sowie Wege und Straßen beschädigt oder zerstört (Schwenk 1992).

Die Topografie Österreichs, als Teil der Ost-Alpen, stellt besondere Herausforderungen an ihre Bewohner, die einer ständigen Gefährdung durch Naturgefahren ausgesetzt sind. Neben dem Klimawandel führt insbesondere auch die intensive Nutzung von gefährdeten Gebieten zu einer Steigerung des Risikos in Zusammenhang mit alpinen Naturkatastrophen (Suda und Rudolf-Miklau 2012). Durch die Zunahme von Wetterextremen sowie dem Auftauen von Permafrostgebieten ist mit einem Anstieg an Massenbewegungen im alpinen Raum in den nächsten Jahrzehnten zu rechnen (Engl et al. 2020). Steinschlagereignisse treten allerdings nicht nur in alpinen Gebieten Österreichs, sondern auch in urbanen Regionen, auf. Erst unlängst lösten sich in der Stadt Salzburg fast 60 Tonnen Gestein, stürzten auf das Stadtarchivgebäude und sorgten für erhebliche Beschädigungen. Den Ereignissen voraus gingen anhaltende schwere Regenfälle (Lehner 2021).

Aufzeichnungen von Straßenbauabteilungen in Niederösterreich belegen, dass auch im nicht alpinen Landesteil, eine ständige Gefahr insbesondere durch Steinschlag und Blockschlag besteht. Entlang von Straßen und Verkehrswegen werden immer wieder Steinschlagschäden beobachtet. Dabei müssen jährlich mehrere hundert Tonnen Gesteinsmaterial beseitigt werden. Insbesondere im Bereich der Böhmisches Masse, wo auch das Untersuchungsgebiet liegt, können Steinschlagereignisse auftreten (Schwenk 1992).

## 1.2 Problemstellung

Gravitative Naturgefahren und insbesondere Steinschlagereignisse sind hochdynamisch ablaufende Prozesse mit keiner oder nur sehr geringer Vorwarnzeit. Dies macht eine Vorhersage daher kaum möglich. Ebenso charakterisieren sich Sturzprozesse durch hohe Geschwindigkeiten sowie durch hohe Aufprallenergien. Die hohen freigesetzten Energien können vielerorts zu massiven Beschädigungen an Gebäuden, Verkehrswegen und zu tödlichen Verletzungen bei Personen führen (Engl et al. 2020). Personen sind der Gefahr, durch Steinschlag verletzt oder getötet zu werden, besonders ausgesetzt. Dabei gilt, dass auch das Herabfallen von kleineren Steinen, aufgrund der allgemein höheren Eintrittswahrscheinlichkeit sowie der generell hohen Prozessgeschwindigkeit, ebenso lebensbedrohlich sein kann (Preh et al. 2020).

Um die Gefahr, welche von Steinschlagprozessen ausgeht, quantifizieren zu können werden Risikoanalysen durchgeführt. Dabei müssen Ereignishäufigkeiten, Blockgrößen und auch die

Vulnerabilität der gefährdeten Gebiete berücksichtigt werden (Engl et al. 2020). Definierte Schutzziele geben dabei das nötige Sicherheitsniveau für bestimmte Bereiche des öffentlichen Lebens vor. Durch die Einführung von Schutzziele übernehmen Institutionen in deren Wirkungsbereichen Verantwortung für den Schutz von Leib und Leben. Um Schutzziele definieren zu können, muss das Risiko, durch ein gravitatives Naturereignis ums Leben zu kommen, von der Gesellschaft akzeptiert werden. Ist dieses Risiko zu hoch, muss die verantwortliche Stelle Maßnahmen setzen um es auf ein akzeptables Niveau zu senken (Österreichische Gesellschaft für Geomechanik 2014).

In Österreich bildet die ONR 24810, ab ihrer Erscheinung im Jahr 2013, die Grundlage für die normativen Festlegungen in Planung, Ausführung und Instandhaltung von Steinschlagschutzmaßnahmen. Die Einführung dieser Richtlinie hatte eine Vereinheitlichung der Herangehensweise für die Errichtung und Erhaltung von technischen Steinschlagschutzmaßnahmen, zur Folge (Austrian Standards International 2020).

### 1.3 Aufbau und Zielsetzung

Die vorliegende Diplomarbeit teilt sich in zwei Kapitel. Im ersten Teil dieser Arbeit werden die grundlegenden Definitionen sowie die theoretischen Hintergründe zu Steinschlagereignissen und deren Sturzprozesse vermittelt. Ebenso werden die unterschiedlichen empirischen und numerischen Ansätze zur Steinschlaganalyse und -simulation vorgestellt. Weiters werden grundlegende Begriffe und Formeln zur Risikobewertung von Steinschlagereignissen beschreiben. Die für diese Diplomarbeit relevanten Teile der ONR 24810 werden ebenso kurz dargelegt.

Der Hauptteil der Arbeit widmet sich der Durchführung von Steinschlagsimulationsberechnungen anhand eines konkreten Fallbeispiels. In Anlehnung an die ONR 24810 werden Grundlagenerhebungen sowie aufwendige Feldarbeiten durchgeführt. Besonderes Augenmerk gilt einerseits der Bestimmung der Blockgröße mittels Drohnenaufnahmen und einschlägiger Software und andererseits der Kalibrierung der Eingangsparameter des Steinschlagsimulationsprogramms. Mittels GPS-Gerät wurden Spuren vergangener Ereignisse akribisch vermessen und auf Plänen dargestellt.

Ziel der Arbeit ist der Vergleich der Sturzdynamik des Bemessungsblockes nach ONR 24810 mit der, der gesamten vermessen Blockgrößenverteilung. Dabei wird der Abwurf eines einzelnen Blockes einem Abwurf von 100 Blöcken unterschiedlicher Größe und Verteilung gegenübergestellt. Aufbauend auf Steinschlagsimulationen können die kinetischen Energien, die Sprunghöhen und die Reichweiten bestimmt und für beide Ansätze bewertet und verglichen werden. Die Risikoanalyse stützt sich dabei ebenfalls auf die Simulation der Steinschlagtrajektoren. Durch die potenzielle Anzahl und Reichweite der herabfallenden Gesteinsbrocken sowie dem durchschnittlichen Verkehrsaufkommen können gefährdete Bereich identifiziert und das Risiko für die Benutzung der angrenzenden Bundesstrasse sowie des Radweges quantifiziert werden. Anschließend wird ein Konzept zur Sicherung der steinschlaggefährdeten Bereiche der Bundesstrasse B 33, auf Basis der berechneten kinetischen Energien und simulierten Sprunghöhen, erarbeitet und auf Plänen dargestellt.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Einleitung

Zur Einschätzung der von Felsböschungen ausgehenden Gefahr, ist es einerseits erforderlich den Versagensmechanismus und das Volumen des Abbruchs zu bestimmen und andererseits muss die Reichweite des dem Abbruch folgenden Sturz- bzw. Auslaufprozesses prognostiziert werden. Abbruch und Sturzprozess sind miteinander gekoppelte Prozesse (Preh 2020).

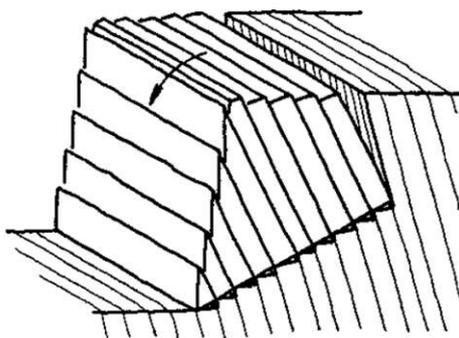
Für den initialen Versagensmechanismus existieren klare Modellvorstellungen (z.B. Poisel & Preh 2004 oder Hungr et al. 2014) und etablierte Berechnungsansätze. Bei den Sturzprozessen hingegen existieren oftmals noch keine allgemein anerkannten mechanischen Modelle. Zur Steinschlagmodellierung stehen z.B. eine Vielzahl von Modellen zur Verfügung, die sich in ihren Berechnungsansätzen oftmals stark voneinander unterscheiden (Preh 2020).

### 2.2 Ablösemechanismen

Die örtlichen geologischen und geometrischen Gegebenheiten der Hänge, Böschungen und Felswände bestimmen den möglichen Ablöse- bzw. Versagensmechanismus. Diese geben den maßgeblichen Versagensmechanismus vor (Witt 2008). Sobald die kinematischen und die mechanischen Bedingungen erfüllt sind und es dadurch zum Verlust des Gleichgewichtes, durch Überschreitung der rückhaltenden Kräfte kommt, ist die Standsicherheit der Böschung nicht mehr gewährleistet (Genske 2015).

#### Kippen

Der Verlust der Standfestigkeit eines Kluftkörpers über einer Rotationsachse wird als Kippen beschrieben. Dabei können sich in steilen Felsböschungen einzelne Blöcke oder zusammenhängende Gesteinsmassen aus dem Gebirgsverband lösen. Für kippgefährdete Gesteinsmassen sind insbesondere horizontal wirkende Kräfte oft der entscheidende Auslöser für den Verlust der Standfestigkeit. Zusätzlich sind erhöhter Erddruck, Erschütterungen und Erdbeben Ursache von Kippbewegungen. In Steilwänden tritt meist eine Kippbewegung gegen den luftseitigen Raum ein, siehe auch **Abb. 2.1**. Dabei rotiert der Gesteinskörper um den Fuß worauf ein plötzliches Kippen folgt (Dachroth und Brezina 2017). Vielerorts wird durch einen einzelnen Kippkörper, am Fußende einer Böschung, ein komplexer Versagensmechanismus ausgelöst und es kommt zum Verlust der Standsicherheit einer gesamten Böschung. In Bezug auf das Kippen besonders problematisch, sind steil stehende Schichtbänke mit flach zur Böschung geneigten bankrechten Fugen (Witt 2008). Bei den passenden morphologischen Verhältnissen ist oftmals ein Übergang zum Fallen zu beobachten (Czurda et al. 2005).

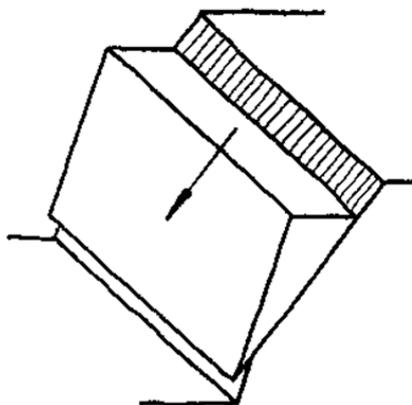


**Abb. 2.1:** Kippen einer Felsböschung (Poisel und Preh 2004 S.41)

### Gleiten

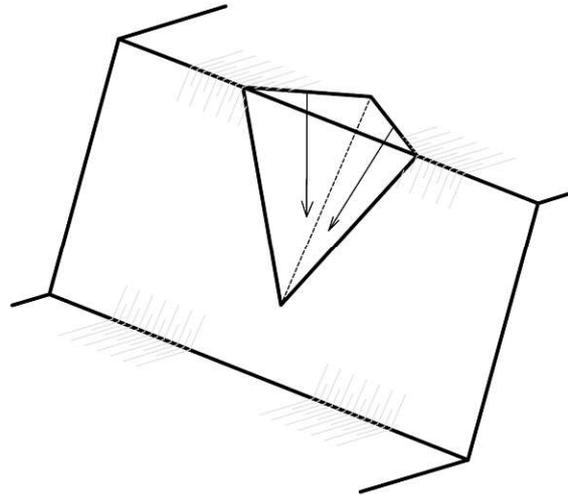
Die Bewegung von Festgestein hangabwärts entlang einer oder mehrerer vorgegebenen Trennflächen oder Gleitflächen wird generell als Gleiten beschrieben (Prinz und Strauß 2011). Gleiten ist dabei eine der am häufigsten beobachteten Versagensmechanismen von Felsböschungen (Poisel 2018). Insbesondere bei Schichtwechsel im massigen Gestein (Kalkstein, Dolomit oder Basalt) über veränderlich festem Gestein, tritt Blockgleiten auf (Dachroth und Brezina 2017). Beim Gleiten unterscheidet man generell zwischen ebenen Gleiten auf einer Trennfläche und räumlichen Gleiten auf zwei oder mehreren Gleitflächen (Witt 2008).

Grundvoraussetzung für das Eintreten des ebenen Gleitens ist eine zur Böschung parallel verlaufende Trennflächenschar. Daraus ergibt sich der Böschung und Trennflächen eine ähnliche Streichrichtung aufweisen (Witt 2008). Fällt die potenzielle Gleitfläche flacher als die der Böschung aus, ist ein Gleiten kinematisch möglich (Genske 2015). Überschreitet die Scherkraft, die auf den Klüftkörper wirkt, z.B. durch Eigengewicht oder Wasserdruck, den in der Trennfläche wirksamen Scherwiderstand, kommt es zum Abgleiten des Klüftkörpers (Poisel 2018).



**Abb. 2.2:** Ebenes Gleiten einer Felsböschung (Poisel und Preh 2004 S.41)

Ebenfalls kann sich bei Verschnittlinien zweier oder mehrere Trennflächen Gleiten in Form des räumlich dreidimensionalen Gleitens ausbilden, wie in **Abb. 2.3** dargestellt. Neben dem Überschreiten der Reibungswiderstände in den Gleitflächen muss das Verschnittlinear aus der Böschung herauszeigen (Genske 2015) .



**Abb. 2.3:** Räumliches Gleiten einer Felsböschung (Poisel 2018 S. 54)

### Fallen

Reines Fallen als Versagensmechanismus wird durch den Abbruch von Felskörpern aus vorgegebenen Trennflächensystemen in überhängendem Gelände beschrieben (Poisel 2018). Die herausgelösten Felsblöcke stürzen ungehindert, im freien Fall, zu Boden und erreichen dabei hohe Geschwindigkeiten, siehe **Abb. 2.4**. Schwierig gestaltet sich dabei die Vorhersage solcher Ereignisse. Meist fehlen die notwendigen Informationen über Kluftbeschaffenheit, sowie Art und Raumlage der Trennflächen. (Czurda et al. 2005). Felsblöcke in überhängenden Felsböschungen werden allein durch die Gravitationskraft belastet. Die Zugfestigkeit der Diskontinuität wirkt einzig der Gravitationskraft entgegen. Meist wird diese Zugfestigkeit aufgrund der Beschaffenheit der Trennflächen als wirkungslos betrachtet (Lambert und Nicot 2011). Vielerorts tritt nach starken Regenfällen und des dadurch ansteigenden Porenwasserdrucks des Bergwassers, Fallen als Versagensmechanismus ein (Czurda et al. 2005).

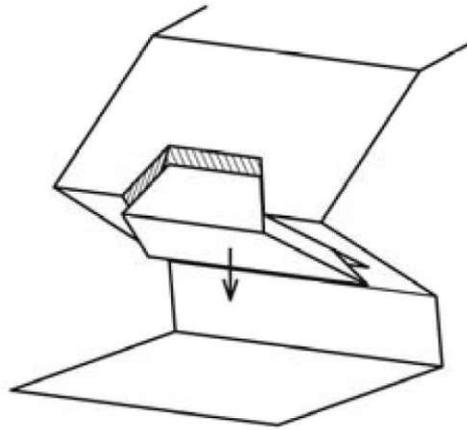


Abb. 2.4: Fallen eines Kluftkörpers aus einem Überhang (Poisel 2018 S. 54)

## 2.3 Sturzprozesse

### 2.3.1 Definition und Abgrenzung

Eine Abgrenzung der von Felsböschungen ausgehenden Sturzprozesse erfolgt in der wissenschaftlichen Literatur meist durch die ausgebrochene und bewegte Kubatur. Nach (Kienholz et al. 1998) ergibt sich dabei folgenden Aufteilung:

- Steinschlag:  $\varnothing < 0.5 \text{ m}$
- Blockschlag:  $\varnothing > 0.5 \text{ m}$
- Felssturz:  $100 \text{ m}^3 - 1 \text{ Mio. m}^3$
- Bergsturz, Felslawine:  $> 1 \text{ Mio. m}^3$

Eine andere Herangehensweise zur Einteilung von Sturzprozessen verfolgte schon 1932 der Schweizer Geologe Albert Heim. Dabei vernachlässigte Heim die Massen und Volumina und konzentrierte sich stattdessen auf die frei werdende Energie (Heim 1932). Wesentlich ist die tatsächliche Energie, welche auf Schutzbauten einwirkt bzw. welche diese aufnehmen müssen (Spang 1997).

Unabhängig von Unterteilung entsprechend der Größenordnung ist insbesondere die Abgrenzung zwischen einzelnen, herabfallenden Fragmenten (Steine und Blöcke) und dem Stürzen zusammenhängender Felsmassen (Sturzstrom, Heim 1932) von Bedeutung.

Großes Interesse gilt auch der Frage, ob Steinschlag als primär ausgelöstes Ereignis stattfindet, oder ob der Ausbruch von Blöcken durch größere ablaufende Massenbewegungen herbeigeführt wird (Spang 1997). So beschreibt Heim in (Heim 1932) eine auffällige Steinschlagaktivität im Vorfeld großer Massenbewegungen.

#### Bergsturz

Der Bergsturz ist gekennzeichnet durch das Abstürzen ganzer Gebirgspartien. Dabei verbleiben die Felsmassen oft im ursprünglichen Verband. Das Erreichen sehr hoher Geschwindigkeiten ist ebenso charakteristisch wie die Ausbildung eines Sturzstromes (Suda und Rudolf-Miklau 2012).

Die abstürzenden Felsmassen bewegen sich meist gleitend dem Abhang zu, bis es zu einer kippenden Bewegung kommt. Dabei spielen definierte Gleitflächen wie Schichtflächen, Schieferungen oder Störungsflächen eine entscheidende Rolle. Am Berg bleiben dabei auch deutlich sichtbare Abrisskanten zurück. Großen Bergstürzen gehen oftmals kleinere Felsstürze, beziehungsweise Steinschlagereignisse, voraus (Dachroth und Brezina 2017).

Die Gesteinsmassen werden aufgrund der hohen Energien stark fragmentiert und stürzen in schnellen Massenströmen talwärts. Durch den hohen Anteil an fragmentierten Gesteinsmaterial kommt es zu einem flüssigkeitsähnlichen Verhalten. Die Mobilität des Sturzstromes hängt im Besonderen vom abstürzenden Volumen ab. Vor allem in Bereich von  $>1 \text{ Mio m}^3$  an Gesteinsmaterial kommt es zu einem stark mobilen Verhalten. Es treten solche, flüssigkeitsähnliche Sturzströme, auch bei geringeren Volumina an ausgebrochen Fels auf. Entscheidend sind die Untergrundverhältnisse der Sturzbahn. Bereits gesättigte Verhältnisse oder Altschneeauflagen haben einen erheblichen Einfluss auf die Mobilität der Felsmassen (Preh 2020).

### Felssturz

Den Felssturz kennzeichnet ein wesentlich geringeres Volumen als den Bergsturz. Dabei lösen sich große Massen zusammenhängenden Gesteinsmaterials, welches während des Sturzes oder beim Aufschlag in Blöcke fragmentiert wird. Interaktionen zwischen dem Gesteinsmaterial haben jedoch keine erhebliche Auswirkung auf die Dynamik des Prozesses (Suda und Rudolf-Miklau 2012).

Aufgrund der kleineren Ausbruchsmasse und der deutlich geringeren Größe der fragmentierten Felsblöcke entwickelt sich beim Felssturz kein ausgeprägter Massenstrom mit flüssigkeitsähnlichem Verhalten. Durch zunehmende Ausbreitung sinkt die Interaktion der Gesteinsblöcke untereinander (Preh 2020). Die entstehenden Gesteinsfragmente verhalten sich dabei gleich wie einzeln herausgelöste Blöcke (Preh et al. 2019).

### Stein- und Blockschlag

Der Steinschlag ( $\emptyset < 0.5 \text{ m}$ ) bzw. Blockschlag ( $\emptyset > 0.5 \text{ m}$ ) wird durch das Herabfallen, Springen, Gleiten oder Rollen einzelner isolierter Blöcke unterschiedlicher Größe charakterisiert. Beim Versagen des Felsgefüges, etwa durch externe Einflüsse, tritt eine Freisetzung und Mobilisierung von Einzelblöcken aus dem Felsen ein. Auslöser können verschiedene geologische und meteorologische Ereignisse, wie zum Beispiel Erdbeben oder Starkregenereignisse, sein. Im weiteren Sturzprozess geht der Steinschlag vom Fallen auf eine rollende und / oder gleitende Bewegung über (Suda und Rudolf-Miklau 2012). Ein weiteres Merkmal des Stein- oder Blockschlag sind die hohen Geschwindigkeiten des herabstürzenden Gesteins. Durch Rückrechnungen von Steinschlagereignissen konnten maximale Geschwindigkeiten von 30 bis 35 m/s bestimmt werden (Preh 2020). Aufgrund der geringen Anzahl, der bei Steinschlagereignissen anfallenden Gesteinsbrocken, können Interaktionen der einzelnen Blöcke fast zur Gänze ausgeschlossen werden. Eine Energiedissipation, durch Berührung der Steine untereinander, ist dadurch begrenzt (Spang 1997).

### 2.3.2 Entstehung und Ursachen

Gründe für Steinschlagereignisse können sowohl geometrische als auch mechanische Ursachen haben. Insbesondere Felsböschungen reagieren sensibel auf Änderungen der Belastung, der

Bergwasserverhältnisse oder der Oberflächentopografie. Durch Erosion veränderte geometrische und topographische Verhältnisse führen zu einer natürlichen Störung des empfindlichen Kräftegleichgewichts bei so manchen natürlichen Hängen. Dies geht mit einer Verminderung der Standfestigkeit einher (Witt 2008).

Die Auflockerung der Gefügestruktur wird besonders durch die meteorologischen Verhältnisse am Standort bestimmt. In weiterer Folge lassen sich die Verminderung der Festigkeitseigenschaften des anstehenden Gesteins auf solche Gefügauflockerungen zurückführen, welche ein Eintreten der Versagensmechanismen begünstigen. Hierbei hat die petrographische Zusammensetzung des Gesteins einen massiven Einfluss (Spang 1997).

Neben den oben angeführten geometrischen Ursachen sind mechanische Versagensmechanismen oft der Grund für die Mobilisierung von Blöcken aus dem anstehenden Felsbereich. Abhängig von der Beschaffenheit und Orientierung der Trennflächen zur Böschung tritt eine Freisetzung durch Gleiten, Kippen oder Fallen ein (Suda und Rudolf-Miklau 2012). Ein mechanisches Versagen ist dabei nur bei ungünstiger Stellung des Trennflächengefüges zur Hangneigung wahrscheinlich. Auch bei einer flacheren Neigung der Schichtflächen zur Böschung ist eine Ausbildung, eines der oben genannten Versagensmechanismen, möglich (Prinz und Strauß 2011).

### **Auslösemechanismen**

Oftmals sind anthropogene Einflüsse Auslöser von Sturzprozessen. Baumaßnahmen oder Bergbau führen vielerorts zu massiven Eingriffen und dadurch zu Störungen des Grenzgleichgewichtes. Erschütterungen durch Sprengungen oder Spezialtiefbaumaßnahmen können auch als Auslöser fungieren (Witt 2008).

Ebenso können Steinschlagereignisse durch wurzelnde Bäume ausgelöst werden. Eindringende Wurzeln vergrößern durch ihr Wachstum den Abstand der Klüfte. In Zusammenspiel mit Wind ergibt sich eine Auflockerung des Gesteins durch die Hebelwirkung des bewegten Baumes (Suda und Rudolf-Miklau 2012).

Weitere natürliche Auslösemechanismen sind Frostsprengungen, erhöhter Kluftwasserdruck nach Starkregenereignissen oder nach der Schneeschmelze, und Kristallisationsdruck durch Erdbeben (Spang 1997).

### **Jahreszeitlicher Einfluss**

Durch die sich ändernden klimatischen Bedingungen im alpinen Raum finden während der Frühjahrsperiode (März, April) sehr ausgeprägte Frost-Tau-Wechsel statt. Durch das Eindringen von Wasser, durch die beginnende, beziehungsweise fortschreitende Schneeschmelze, ergeben sich eine Häufung von Sturzprozessen. Erhöhter Eintrag von Kluftwasser führt zu zusätzlichem Druck auf Kluft- und Ablöseflächen. Die Untersuchungen durch (Gruner 2018) im Schweizer Kanton Bern, welche über einen Zeitraum von 17 Jahre geführt wurden, ergaben rund 500 aktenkundige Steinschlagereignisse, bei welchen Frost-Tau-Wechsel aus Hauptauslösefaktor bestimmt wurde. Ebenso wie im Frühjahr, findet im Spätsommer eine erhöhte Sturzaktivität statt. Auslöser sind zu dieser Zeit in den meisten Fällen starke Windböen, die zur Entwurzelung von Bäumen und somit zu Entfestigung von Felspartien führen (Gruner 2008).

## 2.4 Steinschlag

### 2.4.1 Bewegungsarten

In erster Linie ist der weitere Sturzprozess durch die Gravitation bestimmt (Suda und Rudolf-Miklau 2012). Nach dem Ablösen des Felskörpers, ausgelöst durch die unterschiedliche Auslösetrigger, beeinflusst die Neigung des Geländes entscheidend das weitere Bewegungsverhalten des Materials (Witt 2008). Dabei spielen verschiedenste Parameter, wie Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeit, Dämpfung sowie die Geometrie des gelösten Felsstücks eine entscheidende Rolle, zu welcher Bewegungsform es schlussendlich kommt (Spang 1997).

Der Prozess Steinschlag wird als die Bewegung, einzelner unabhängiger Gesteinsbrocken definiert. Grundsätzlich kann dabei in vier Bewegungsformen, Fallen, Springen, Gleiten und Rollen, unterschieden werden. Fallen, Gleiten und Rollen treten insbesondere am Beginn sowie am Ende des Steinschlagprozesses auf. Das Springen, bzw. die kurzzeitige Interaktion zwischen Boden und Gesteinsfragment ist dabei die dominierende Hauptbewegungsform (Bozzolo 1987). In Abhängigkeit zur Hangneigung findet im Gelände, mit mehr als  $70^\circ$ , ein Fallen der Felskörper statt. Auf- und Rückprallereignisse sind in einem Gelände mit Neigungen zwischen  $70^\circ$  und  $45^\circ$  zu erwarten. Bei Neigungen von  $45^\circ$  bis  $30^\circ$  treten hauptsächlich Roll- beziehungsweise Gleitbewegungen, bis zum endgültigen Stillstand, auf. Die unterschiedlichen Bewegungsarten, in Abhängigkeit zur Hangneigung, sind in **Abb. 2.5** ersichtlich. (Witt 2008).

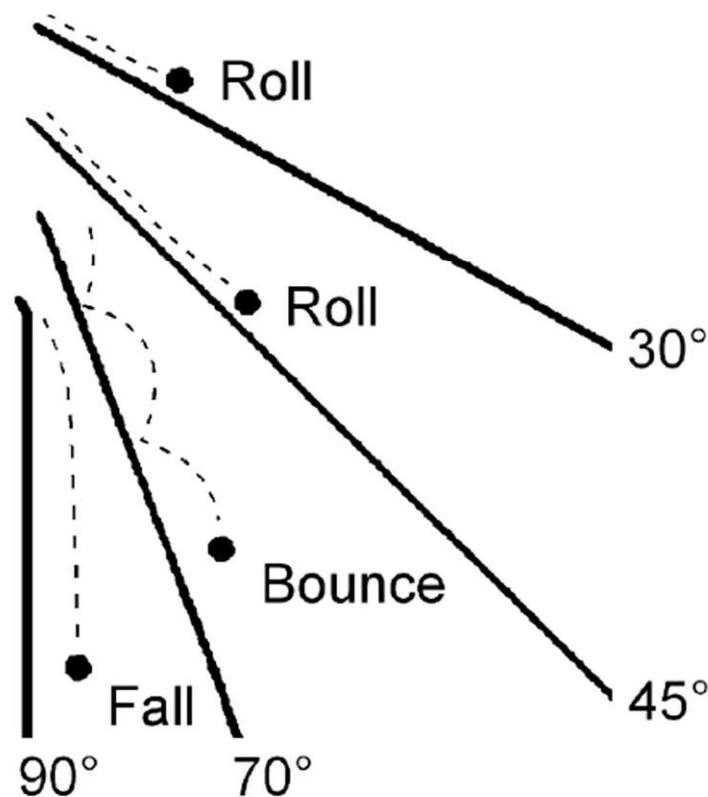


Abb. 2.5: Bewegungsform in Abhängigkeit der Hangneigung (Ritchie 1963 verändert von Dorren 2003 S.72)

### Freier Fall

Nach physikalischer Definition des freien Falles zeigt die Fallrichtung eines Sturzobjektes zum Erdmittelpunkt. Dadurch ergibt sich der reine freie Fall erst bei Geländeneigungen über  $90^\circ$ . Daraus folgt, dass der freie Fall nur bei überhängenden Böschungen auftreten kann (Roth 2003).

Experimente zeigten, dass für Berechnungsmodelle der Luftwiderstand auf die Bewegung vernachlässigbar ist (Bozzolo 1987).

### Springen

Das Springen ist gekennzeichnet durch die Abfolge von parabolischen Flügen, in welchen die Felsblöcke nach dem Abprall am Hang übergehen. Beeinflusst werden Sprunghöhe und Weite insbesondere durch die vorherrschende Bodenart sowie durch die Hangneigung und durch die Blockgröße (Roth 2003). Dabei konnte in Großversuchen mit Felsblöcken unterschiedlicher Größe gezeigt werden, dass kleinere Blöcke wesentlich höher und weiter, im Vergleich zu größeren und massigeren Blöcken, springen. Auch bei steilen Hängen tendieren größere Felsblöcke eher zum Rollen als zum Springen. Bei den durchgeführten Versuchen konnte ein Zusammenhang zwischen Sprungweite und -höhe zur Blockgröße festgestellt werden. Der Sprungphase folgend tritt meist eine Rotation um die eigene Achse ein (Broili 1974).

### Rollen

Rollende Bewegungen definieren sich durch durchgehenden Bodenkontakt und Rotation um die eigene Achse (Roth 2003). (Ritchie 1963) begrenzt die maximale Böschungsneigung, bei der rollende Bewegungen auftreten können, mit  $45^\circ$ . Beobachtungen in experimentellen Versuchen haben gezeigt, dass beim Rollen häufig kurzes, flaches Springen auftritt (Bozzolo 1987). In **Abb. 2.6** ist der Unterschied zwischen einem rollenden (links) und einen springenden Block (rechts) gut ersichtlich.



**Abb. 2.6:** Links: rollender Felsblock; Rechts: springender Felsblock (Lambert und Nicot 2011 S.159)

## Gleiten

Gleitende Bewegungen spielen während eines Steinschlagprozesses eine untergeordnete Rolle. Nur bei Überschreitung der statischen Reibungskräfte durch eine ausreichende Hangneigung kann es zu Gleiterscheinungen kommen. Bei steiler werdenden Hangneigungen gehen die gleitenden Blöcke in eine springende, rollende oder fallende Bewegung über (Bozzolo 1987).

### 2.4.2 Prozessbereich

Auf die Sturzbahn und auf die Sturzweite von fallenden Gebirgskörpern haben mehrere Parameter Einfluss. Dabei kommt der Geometrie des Hanges eine entscheidende Bedeutung zu. Die Geschwindigkeit, vor und nach dem Aufprall, kann ebenso als entscheidendes Kriterium für die Sturzweite angesehen werden. Der Aufbau der Geländeoberfläche ist hierbei wesentlich, weil während des Bewegungsvorganges Interaktionen zwischen Geländeoberfläche und Gesteinsblöcken auftreten (Witt 2008).

Dämpfende Eigenschaften des Geländes sind für eine Umwandlung der kinetischen Energie, hervorgerufen durch die Gravitationsbeschleunigung, in die Verformungsenergie verantwortlich. Maßgebend ist das Verhältnis zwischen Blockgröße und die Rauigkeit der Geländeoberfläche. Durch die dämpfende Wirkung des Untergrundes nimmt die kinetische Energie und damit auch die Geschwindigkeit stetig, bis zum völligen Stillstand des Blocks, ab (Suda und Rudolf-Miklau 2012).

Die durch Steinschlag gefährdeten Bereich eines Projektgebietes können in verschiedene Prozessbereiche unterteilt werden. Unterschieden wird dabei zwischen:

- Entstehungs-, bzw. Ablösebereich
- Transitbereich
- Ablagerungsbereich

Eine scharfe Abgrenzung ist allerdings nicht bzw. nur schwer möglich. Häufig findet man eine Überschneidung dieser drei Gebiete vor (Suda und Rudolf-Miklau 2012). **Abb. 2.7** gibt einen guten Überblick über den gesamten Prozessbereich, mögliche Auslösemechanismen und Bewegungsarten.

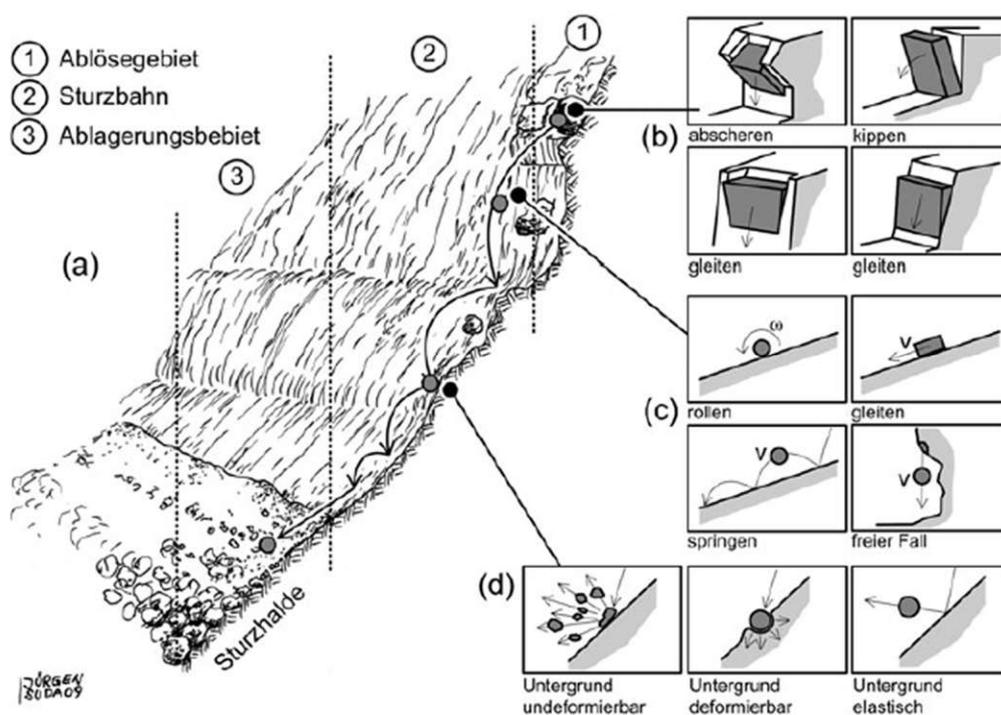


Abb. 2.7: Steinschlagprozess: (a) Ablauf; (b) mögliche Ablösetypen; (c) Bewegungstypen; (d) Aufpralltypen (Suda und Rudolf-Miklau 2012 S.52)

### Entstehungs- und Ablösebereich

Ausgangspunkt für Steinschlagereignisse sind die Ablösebereiche steiler Felswände. Neben den bereits bekannten Parametern, wie Gesteinsart, Schichtung bzw. Trennflächengefüge, ist ein weiteres charakteristisches Kriterium die Hangneigung. Ab einem kritischen Winkel von  $>35^\circ$  kann eine Mobilisierung bzw. Remobilisierung von Sturzobjekten stattfinden. Neben dem Hangneigungswinkel hat insbesondere die Sturzhöhe großen Einfluss auf die weitere Sturzbahn und auf die Energieentwicklung.

### Transitbereich

Im Bereich zwischen Entstehungsgebiet und Ablagerungsgebiet findet der eigentliche Transport des abgelösten Materials statt. Größere Hangneigungen führen zu sprungartigen Bewegungen, wodurch eine geringere Anzahl an Bodenkontakten entsteht als bei flacherem Gelände. Der Transitbereich hat wesentlichen Einfluss auf die Dynamik und auf die Ausbreitung des Sturzprozesses. Je nach vorherrschender Topographie und Beschaffenheit der Geländeoberfläche wird dem Steinschlag kinetische Energie entzogen und dessen Ausbreitung verringert (Roth 2003). Durch den Verlust an Energie (z.B. Anprall an Bäumen) können auch im Transitbereich Steine zum Stillstand kommen. Aus diesem Grund ist eine Abgrenzung zum Ablagerungsbereich nur schwer möglich ist (Frehner et al. 2005).

### Ablagerungsbereich

Beim Übergang in flacheres Terrain treffen die Sturzkörper vermehrt auf den Untergrund, wodurch eine Verminderung der Energie auftritt und sich die Bewegung verlangsamt. Der kritische Hangneigungswinkel wird dabei mit  $30^\circ$  beziffert. Die beim Übergang von

Transitbereich zum Ablagerungsbereich vorhandene Rotationsenergie der Sturzkörper wirkt sich maßgeblich auf die Reichweite der einzelnen Blöcke aus. Bei Hangneigungen unter  $25^\circ$  tritt ein abruptes Stoppen der Sturzkörper ein (Frehner et al. 2005).

### 2.4.3 Einflussfaktoren und Parameter

Verschiedenste Parameter, sowohl des Gesteins als auch der Beschaffenheit der Oberfläche, beeinflussen das Sturzgeschehen maßgeblich. Energie sowie Geschwindigkeit und Reichweite der Sturzblöcke werden durch eine Vielzahl natürlicher Einflussgrößen bestimmt (Meißl 1998).

#### **Blockeigenschaften**

Die Bemessungsblockgröße hat erheblichen Einfluss auf die Bemessung der Schutzbauwerke sowie auf die Intensität und Ausbreitung des Steinschlages. Mittels geeigneter Verfahren (Linienzählverfahren, Flächenzählverfahren, etc.) werden Schutthalde von Steinschlagergebnissen analysiert und vermessen (Meißl 1998).

#### **Hangneigung**

Durch den direkten Zusammenhang zwischen Neigung, Gewichtskraft und daraus resultierender Reibungskraft beeinflusst die Hangneigung die Bewegung des Sturzkörpers im wesentlichen Ausmaß, insbesondere in Bezug auf die Geschwindigkeit und auf die Reichweite. Die Hangneigung bestimmt somit, ob ein Sturzkörper abgebremst oder beschleunigt wird. Nur bei entsprechend steilem Gefälle wird eine Überschreitung der Reibungskräfte durch die Zunahme der hangwärts gerichteten Kräfte möglich und ein potentieller Sturzkörper gerät in Bewegung (Meißl 1998).

#### **Relief**

Die lokale Beschaffenheit und die Besonderheiten des Geländes beeinflussen maßgeblich das relevante Bewegungsverhalten des Sturzkörpers. Geländeabsätze sowie Verflachungen führen zu Ablenkungen und zu einer beziehungsweise Abnahme der Geschwindigkeit. Insbesondere können, durch das Überspringen von Geländestufen, hohe Aufprallenergien auftreten. Beim Aufprall mit hoher Geschwindigkeit treten große Deformationen und somit auch ein Energieverlust des Sturzkörpers auf. Mulden oder flache Stellen im Gelände, besonders bei Füllung mit Lockermaterial, beeinflussen wesentlich das Abbremsverhalten des Sturzkörpers (Gsteiger 1989).

#### **Oberflächenrauigkeit**

Eine Verminderung oder Erhöhung der Energie und der Geschwindigkeit eines Sturzkörpers während des Bewegungsvorganges ist abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit des Untergrundes. Je nach Größe des Sturzobjekts haben Hindernisse mehr oder weniger Einfluss auf dessen Bewegungsverhalten. Oftmals können Blöcke durch Hindernisse schon nach kurzer Strecke zum Stillstand gebracht werden. Die Oberflächenrauigkeit setzt sich dabei aus mehreren Parametern zusammen. Insbesondere Vegetation, eventuell vorhandenes Totholz und andere natürliche und anthropogene Hindernisse, sind im Zuge der Feldbegehung aufzunehmen, zu quantifizieren und in weiterer Folge in der Berechnung zu berücksichtigen (Zinggeler 1990).

## Dämpfungseigenschaften des Untergrundes

Beim Aufprall eines Sturzblockes wird kinetische Energie aus dem Sturzprozess in plastische Verformung des Untergrundes umgewandelt. Aus den auftretenden plastischen Verformungen, die sich als Einschlagkrater im Boden manifestieren, können Rückschlüsse auf die Geschwindigkeit und den Energieverlust gezogen werden. Die dämpfende Wirkung des Untergrundes bestimmt somit in welchem Maße die Energie vor dem Aufprall in die nächste Flugphase mitgenommen werden kann. Ebenso ergibt sich ein Zusammenhang zwischen Dämpfungseigenschaft und Bewegungsart. Hohe Energieverluste führen daher oft zu verringerten Sprunghöhen und damit zu einem Rollen des Blockes. Wohingegen es auch zum Zerbrechen von Gesteinsbrocken beim Auftreffen auf Untergrund, ohne maßgebliche Dämpfungseigenschaften, kommen kann (Zinggeler 1990).

## 2.5 Steinschlagschutz

### 2.5.1 Steinschlagintensität

Durch Spang erfolgte in (Spang 1997) eine weitere Einteilung von Steinschlag durch die am Schutzbauwerk maximal auftretenden, beziehungsweise aufzunehmenden Energien:

- Leichter Steinschlag  $E \leq 70 \text{ kJ}$ .
- Mittlerer Steinschlag  $E \leq 700 \text{ kJ}$ .
- Schwerer Steinschlag  $E \leq 2000 \text{ kJ}$

Eine weitere Einteilung zur Beurteilung des Schweregrades von Steinschlägen erfolgte durch das Schweizer BAFU (Bundesamt für Umwelt). Die Unterteilung erfolgt in starke, mittlere und schwache Intensität und deren Schadensbilder an Gebäuden, Infrastruktur und Personen. So finden sich nach Sturzprozessen mit starker Intensität, erhebliche Schäden, die in weiterer Folge zum Verlust der Standsicherheit und zum Einsturz von Gebäuden führen können. Ebenso können solche Ereignisse eine komplette Zerstörung von oberirdischer Infrastruktur bewirken. Bei Beschädigungen durch Sturzprozesse mit mittlerer Intensität ist hingegen die Gebäudestabilität nicht gefährdet. Menschen in Gebäuden sind dabei kaum einer Gefahr ausgesetzt. Auch Straßen, Leitungen und Schienen können meist nach kurzer Sperrung und Reparatur wieder freigegeben werden. Einzelne Steine können bei schwacher Intensität kleinere Schäden an Mauerwerk oder Dächer verursachen. Gefahr für Leib und Leben besteht jedoch außerhalb von Gebäuden. Direkte Treffer, insbesondere am Kopf, können zu lebensbedrohlichen Verletzungen führen (Raetzo und Loup 2016).

### 2.5.2 Technischer Steinschlagschutz

Es gibt eine Vielzahl an Möglichkeiten Maßnahmen gegen gravitative Sturzprozesse zu setzen. Eine Unterscheidung wird dabei durch lokale Platzierung im Prozessgebiet sowie der Wirkungsweise des Steinschlagschutzes vorgenommen (Valentin und Rauscher 2021).

Um die dynamisch auftretenden Belastungen besser aufnehmen und auf den Untergrund übertragen zu können sind verformbare Schutzkonstruktionen gegenüber starren Konstruktionen vorzuziehen. Zu den verformbaren Schutzmaßnahmen zählen insbesondere Schutznetze aus Stahldrahtseilen und Schutzdämme (Engl et al. 2020).

### Aktive Schutzmaßnahmen und passive Schutzmaßnahmen

Als technischer Steinschlagschutz werden konstruktive Maßnahmen definiert, welche durch ihr Wirken, aktiven Einfluss auf das Prozessgeschehen des Steinschlages ausüben. Dadurch soll die Gefahr, ausgehend durch den Sturzprozess, abgemindert oder verhindert werden. Diese Maßnahmen werden auch als aktive Steinschlagschutzmaßnahmen bezeichnet (Dachroth und Brezina 2017).

Zu den wichtigsten aktiven Schutzmaßnahmen zur Unterbindung eines Steinschlagereignisses im Entstehungsgebiet zählen unter anderem:

- Vernetzungen
- Beräumung
- Sprengung (Valentin und Rauscher 2021).

Ebenso können auch stabilisierende Maßnahmen, direkt am Ausbruchsgebiet, zu einer Reduktion der Gefährdung führen (Noack 2003). Verankerungen von absturzgefährdeten Blöcken, sowie Vernetzungen und Sicherungen mittels Spritzbeton von Ablösegebieten, können ebenfalls zur Gefährdungsminderung beitragen (Dachroth und Brezina 2017).

Maßnahmen, die im Prozessbereich des Steinschlagereignisses gesetzt werden, werden als passive Maßnahmen bezeichnet. Dazu zählen insbesondere:

- Steinschlagschutznetze
- Steinschlagschutzdämme
- Galerien und Stollen (Valentin und Rauscher 2021).

### Weitere Schutzmaßnahmen

Neben den oben erwähnten konstruktiven Schutzmaßnahmen können auch biologische Maßnahmen, wie das Aufforsten eines Schutzwaldes, getroffen werden. Ebenso können organisatorische Maßnahmen, wie die Sperrung von Verkehrswegen bei entsprechender Wetterlage, Personenschäden verhindern (Valentin und Rauscher 2021). Sekundäre Schutzmaßnahmen reduzieren durch das Vermeiden potenziell gefährdeter Bereiche das Schadenspotential. Eine solche Reduktion des Schadenspotential erfolgt insbesondere durch raumplanerische Maßnahmen (Noack 2003).

## 3 Ansätze zur Beurteilung von Sturzprozessen

### 3.1.1 Empirische Ansätze

Durch die Angabe eines Grenzgefälles bzw. eines Pauschalgefälles, können Reichweiten von Einzelereignissen oder auch von größeren Sturzprozessen abgeschätzt werden. Die Anwendung empirischer Modelle von Steinschlagprozessen ist einfach und lässt sich ohne nennenswerten Aufwand durchführen.

Die Anfänge empirischen Methoden und Ansätze gehen bereits auf Heim zurück. Heim erkannte, dass die Höhen- und die Längendifferenz zwischen dem Ablagerungsgebiet und dem Ablösebereich proportional zueinanderstehen. Der Winkel, der zwischen den beiden Strecken aufgespannt werden kann beschreibt dabei die relative Weite (Heim 1932). Diese Weite dient in der Praxis häufig als erster Anhaltspunkt, insbesondere dort wo Gefahr in Verzug ist, oder als erste Orientierungshilfe bei unzureichender Datengrundlage.

Neben der Fahrböschung und dem geometrischen Gefälle zählt auch der Schattenwinkel und die mittlere Neigung des Sturzhangs zu den wichtigsten Methoden um die Reichweite von Sturzprozessen überschlagsartig abschätzen zu können (Meißl 1998).

#### Fahrböschung und geometrisches Gefälle

Die Fahrböschung und das geometrische Gefälle wurden von Heim als charakteristische Parameter für die Reichweite von Bergstürzen eingeführt. Als geometrisches Gefälle ist die Steigung der Geraden vom obersten Ablösepunkt bis zum tiefsten Ablagerungspunkt definiert. Die Verbindungslinie zwischen dem obersten Ablösepunkt und dem entferntesten und tiefsten Ablagerungspunkt wird als Fahrböschung bezeichnet, siehe **Abb. 3.1**. Allerdings wird hier nicht die direkte Verbindungslinie gewählt, sondern jene, in welche sich der Sturzkörper bewegt. Je gerader die Sturzbahn des Sturzkörpers, desto mehr nähern sich Fahrböschung und geometrisches Gefälle an (Meißl 1998).

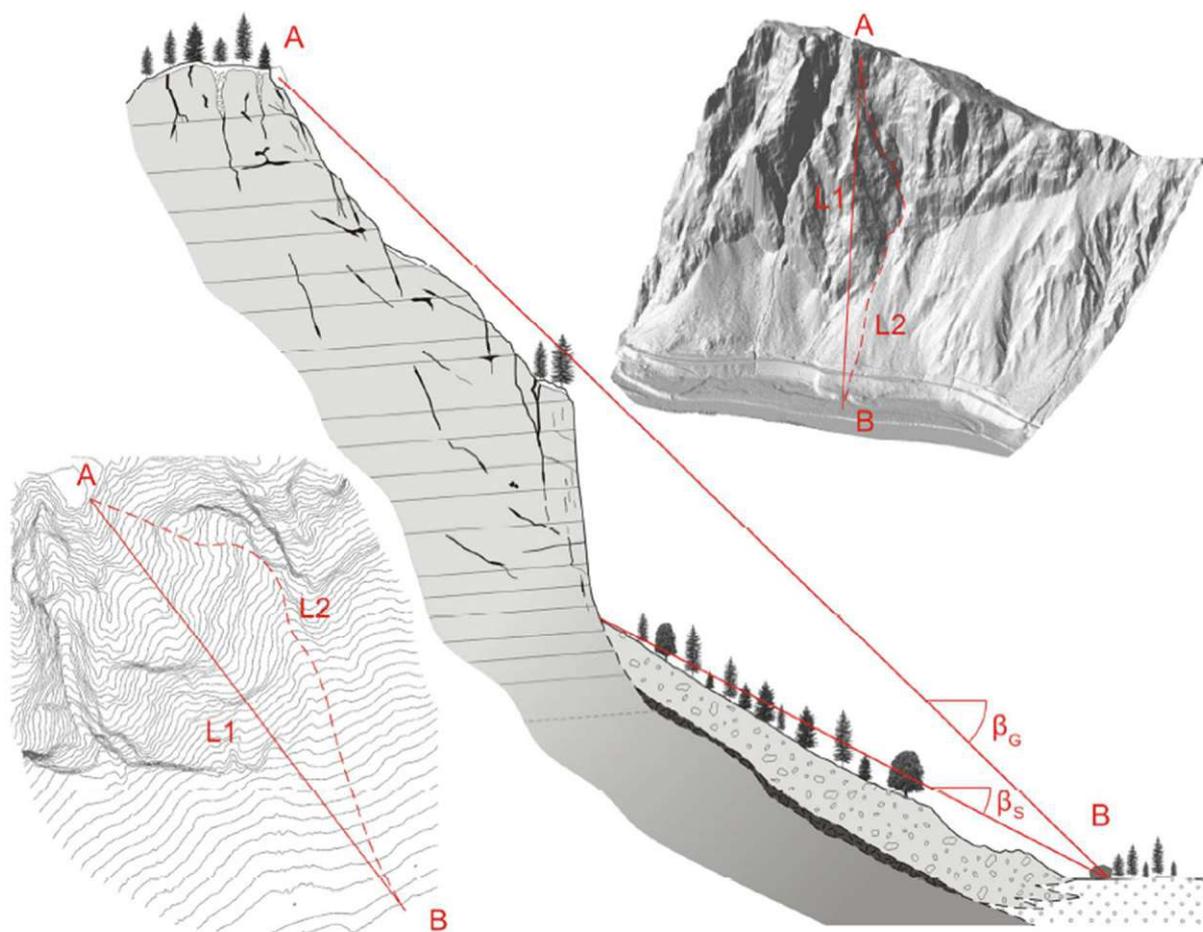
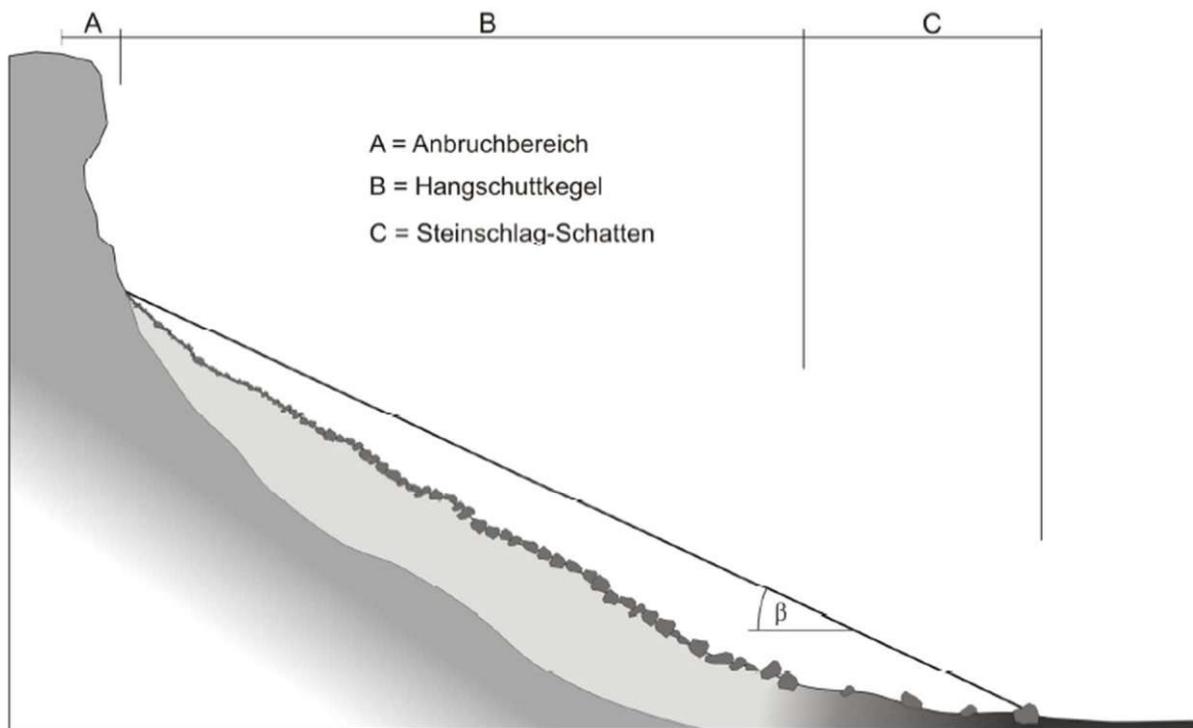


Abb. 3.1: Vergleich von Schattenwinkel  $\beta_s$  und geometrischen Gefälle  $\beta_g$  (Zwack 2013 S.32)

### Schattenwinkel

In Anlehnung an Lied (1977) führt (Evans und Hungr 1993) den Schattenwinkel ein, **Abb. 3.2**. Dieser ist definiert als der Neigungswinkel der Verbindungslinie zwischen dem höchsten Punkt der Schuttablagerung und dem Sturzblock mit der größten Reichweite. Der Schattenwinkel besitzt gegenüber der Fahrböschung den Vorteil, den Einfluss der Wandhöhe auf die Reichweite nicht zu überschätzen. Wegen des hohen Energieverlusts beim ersten Aufprall am Wandfuss erreichen dabei die Sturzblöcke unabhängig von deren Fallhöhe, ähnliche Reichweiten. Die Abschätzungen mit dem Schattenwinkel erzielen häufig genauere Ergebnisse, weil oftmals die genaue Abbruchkante nicht eindeutig erkennbar ist. Diese ist jedoch für die Bestimmung des geometrischen Gefälles Voraussetzung (Meißl 1998). (Evans und Hungr 1993) geben nach ihren Untersuchungen an 16 Gebieten in British Columbia in Kanada einen Minimalwert für den Schattenwinkel von  $27,5^\circ$  an. Bei glatten Hangoberfläche können allerdings auch geringere Winkel auftreten. In (Dorren 2003) wird, nach dem Vergleich einiger Studien, ein Wertebereich zwischen  $22^\circ$  und  $30^\circ$  angegeben.



**Abb. 3.2:** Prozessbereich Steinschlag mit Schattenwinkel  $\beta$  (Meißl 1998 verändert von Zwack 2013 S.33)

Daraus lässt sich schließen, dass empirische Ansätze nur als erste grobe Abschätzung zu verwenden sind und Felduntersuchungen, kombiniert mit numerischen Simulationen, nicht ersetzen können.

### 3.1.2 Numerische Berechnungen

Seit Mitte der 1970 Jahre sind erste Berechnungsprogramme zur Modellierung von Steinschlagprozesse auf dem Markt erhältlich. Mittlerweile gibt es mehrere etablierte Steinschlagprogramme, welche die Situation in 3D simulieren. **Tab. 3.1** gibt einen guten Überblick über die zurzeit vorhandenen Steinschlagprogramme und deren Ansätze.

**Tab. 3.1:** Überblick über die vorhandenen Steinschlagberechnungsprogramme (Volkwein, A et al. 2011 verändert von Preh und Mölk 2018).

Modell / Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabilistisch	Wald
CRSP (4.0)	Pfeiffer & Bowen 1989	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Nein
Rockfall 7.1 (2008)	Spang & Sönser 1995	2D (Profil)	Starrkörper	Ja	Ja
ROFMOD 4.1	Zinggeler et al. 1990	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
3D-GEOTEST-Zinggeler	Krummenacher et al. 2008	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RocFall 5.0 (2013)	Stevens 1998	2D (Profil)	Massenpunkt	Ja	Nein
Sturzeschwindigkeit	Meissl 1998	2D (x,y)	Massenpunkt	Nein	Nein
STONE	Guzzetti et al. 2002	3D (x,y,z)	Massenpunkt	Ja	Nein
Rockyfor 3D 5.2 (2014)	Dorren et al. 2006	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RAMMS::Rockfall	Christen et al. 2007	3D (x,y,z)	Starrkörper (reale Form)	Ja	Ja
THROW	Preh 2015	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
WURF	Fleris & Preh 2016	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja

Die ONR 24810 fordert für die Berechnung von Schutzmaßnahmen eine physikalische Simulation der Sturzprozesse. Zur Berechnung und Dimensionierung von Steinschlagschutzmaßnahmen werden meistens 2D-Programme verwendet. Mit diesen werden die maßgebenden Profilschnitte, welche im Gelände festgelegt werden, berechnet. 3D-Simulationen finden insbesondere bei der Erstellung von Gefahrenzonenplänen ihre Anwendung. Die meisten Programme beschäftigen sich dabei vor allem mit dem Sturzprozess. Ablöseprozesse werden hingegen nur als Anfangsbedingung, durch Position und Geschwindigkeit, abgebildet (Preh und Mölk 2018).

Steinschlagprozesse sind häufig durch ihre komplexen Randbedingungen definiert. Oft ist es nicht möglich die Randbedingungen vollständig und korrekt zur ermitteln, wodurch Steinschlagsimulationen meist statistische Probleme darstellen. Durch die Berechnung bzw. durch die Simulation möglichst vieler Flugkurven und Bewegungstrajektoren soll versucht werden die Streuung des Aufpralles und somit auch der Sturzbahn möglichst genau darzustellen. Sprunghöhen und Energieverläufe werden durch die statistische Häufigkeitsverteilung der Flugkurve erzeugt. Gewünschte Resultate sind neben Sprunghöhen und Energien die Reichweite und die räumliche Verteilung der Sturzblöcke. Diese geben Auskunft über die potentiell gefährdeten Bereiche (Azzoni et al. 1995).

Hauptsächlich finden solche Steinschlagberechnungsprogramme in der Planung von Schutzbauwerken Verwendung. Durch die an jeden Punkt des Geländes vorhanden Daten zu Sprunghöhen und Aufprallenergie lassen sich die konstruktiven Schutzmaßnahmen, mit der erforderlichen Sicherheit und Wirtschaftlichkeit, dimensionieren.

Entscheidend für die Interpretation der Resultate ist das Verständnis der Grenzen und die Kenntnis der Eingangsparameter beim erzeugten Simulationsmodell. Die Qualität der errechneten Ergebnisse hängt, im Wesentlichen, von der Menge und der Genauigkeit der eingegebenen Daten ab. Modelle sind durch ihre Abbildung nur eine Momentaufnahme der Wirklichkeit und stehen dadurch in einer ständigen dynamischen Veränderung, welche in den Berechnungen zu berücksichtigen sind (Zwack 2013).

Zusätzlich ist eine Kalibrierung zwischen simulierten Ergebnissen der Reichweite und realen Ereignissen sinnvoll. Durch den Vergleich von unterschiedlichen Simulationsmodellen lässt sich außerdem die statistische Stabilität der Resultate überprüfen. Plausibilitätskontrollen können, durch bereits durchgeführte Steinschlagversuche, geführt werden (Preh und Mölk 2018).

### **Berechnungsansätze**

Neben der Unterscheidung von 3D und 2D-Simulationen, können die Berechnungsprogramme, nach der mathematischen Formulierung der Bewegung des Sturzblockes, sowie des Rückpralls und weiteren Parametern unterschieden werden. Eingeteilt werden die Modelle grob in, Massenpunktmodelle, Starrkörpermodelle und hybride Modelle (Preh und Mölk 2018).

### **Massenpunktmodell**

Der Sturzblock wird bei Massenpunktmodellen als dimensions- und formloser Massenpunkt moduliert (Preh und Mölk 2018). Aufgrund der fehlenden Geometrie des Blockes, werden für die Reaktion mit dem anstehenden Gelände Dämpfungsfaktoren verwendet. Durch die Einführung dieser Faktoren lassen sich die Auswirkungen beim Auftreffen des Sturzblockes beschreiben. Die Deformationsarbeit beim Aufschlag, das Gleiten am Kontaktpunkt sowie die Energieumwandlungen finden dadurch Einzug ins Modell. Die Abhängigkeit des Simulationsmodells von den Dämpfungseigenschaften führt zu großen Unsicherheiten bei der Bewertung des Eingangswerts (Hungr und Evans 1988).

### **Starrkörpermodell**

Bei Starrkörpermodellen wird der Sturzblock in seiner wahren Form oder in einer Annäherung, modelliert. Dadurch kann eine Betrachtung aller vorhandenen Bewegungsformen simuliert werden. Eine Vereinfachung der Blockform ist aufgrund der Komplexität beim Auftreffen des Sturzkörpers am Untergrund nötig, weshalb Starrkörpermodelle meist Zylinder oder sphärisch geformte Sturzkörper verwenden (Zwack 2013).

### **Hybride Modelle**

Hybride Modelle stellen eine Mischform der oben genannten Modellansätze dar. Für die Berechnung der Flugbahn wird dabei auf die Modellierung des Sturzkörpers als Massenpunkt zurückgegriffen. Während bei der Berechnung des Rückpralles der Block in seiner Größe und Form nachgebildet wird (Preh und Mölk 2018).

### **Modellparameter und Kalibrierung**

Grundsätzlich wird bei allen unterschiedlichen Berechnungsansätzen versucht, durch Einsatz von Restitutionskoeffizienten oder Dämpfungsparametern, die Energieverluste während des Aufpralles am Untergrund zu berücksichtigen. Die Energieverluste, durch beim Aufprall entstehende Deformationen bzw. durch Bruch des Bemessungsblockes, werden durch die Restitutionsfaktoren aufsummiert. Eine Kalibrierung ist daher für unterschiedlicher Untergründe zwingend nötig. Dabei gilt stets je höher die einwirkende kinetische Energie, desto höher auch deren Verlust. Durch die bekannte Energie vor Ersteinschlag oder der

Aufprallgeschwindigkeit können die Restitutionsfaktoren in tangentialer und in normaler Richtung bestimmt werden (Preh 2020).

### **Umgang mit Unsicherheiten**

Eine grundsätzliche Unsicherheit, bezüglich der Eingangsdaten wie Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität, lässt sich bei Naturprozessen nie vermeiden. Daraus folgt ein Ermessungsspielraum für alle beteiligten Akteure. Unsicherheiten führen zu Unschärfen bei der Gefahrenbeurteilung und bei der Maßnahmenplanung. Eine Abdeckung aller potenziellen Abläufe ist auch mit modernsten Computertechnik nicht möglich. Sturzprozesse sind natürliche Vorgänge, welche durch unzählige Parameter beeinflusst werden; so können Verstärkungen oder Veränderungen nie ganz ausgeschlossen werden (Raetzo und Loup 2016).

## 4 Risikokzept

Beim Umgang mit gravitativen Sturzprozessen ist eine gewisse Risikoakzeptanz Grundvoraussetzung. Ein hundertprozentiger Schutz vor Naturgefahren kann nie erreicht werden. Durch die Definition eines Schutzziels und die dadurch gesetzten Maßnahmen lässt sich die Todeswahrscheinlichkeit allerdings auf ein gesellschaftlich akzeptiertes Risiko reduzieren. Das Schutzziel beschreibt das Niveau, auf welches das Risiko für einen bestimmten Verantwortungsbereich gesenkt werden muss. Für unterschiedliche Organisationen und Bereiche gibt es Sicherheitsniveaus, die erreicht werden müssen.

2010 erfolgte durch die Salzburger Landesstraßenverwaltung erstmalig eine Definition des Schutzziels für gravitative Naturgefahren. Dabei wurde ein individuelle Todesfallrisiko von  $1 \times 10^{-5}$ /Jahr für den öffentlichen Straßenraum sowie wie für ausgewiesene Fuß- und Radwege festgelegt (Valentin und Rauscher 2021).

Beim viermaligen Passieren eines Straßenabschnittes über ein gesamtes Jahr hinweg darf das Sterberisiko 1 zu 100.000 nicht überschreiten. Dies entspricht dem Risiko während eines Verkehrsunfalles ums Leben zu kommen und dies wird von der Gesellschaft akzeptiert (Kaindl 2021).

### 4.1.1 Risikomanagement

Unterschiedliche Konzepte und Ansätze zum Risikomanagement sowie zur Risikoanalyse für Naturgefahren gehen auf Entwicklungen in der Schweiz zurück (Valentin und Rauscher 2021). In der Schweiz arbeitet man seit Gründung des PLANAT (Plattform für Naturgefahren) im Jahre 1999 an Leitfäden und Bewertungsmethoden für Naturgefahren jeglicher Art. Das integrale Risikomanagement verfolgt ein einheitliches und allumfassendes Konzept in Umgang mit Naturgefahren. Grundgedanke ist ein Wandel von Gefahrenabwehr zur Risikokultur.

Um anspruchsvolle Sicherheitsprobleme und die damit verbundenen Sicherungsmaßnahmen analysieren, bewerten und planen zu können wurde das Modell der Risikoanalyse geschaffen. Eine Planung im Sinne des Risikokzeptes umfasst daher mehrerer Teilbereiche. Neben Analyse und Bewertung der IST-Situation, umfasst dieses Modell des Risikokzeptes auch Planung und Bewertung der gesetzten Maßnahmen. Versucht wird dabei, die komplexen Zusammenhänge, qualitativ und quantitativ greifbar zu machen und Aussagen über die Zuverlässigkeit von Sicherheitskonzepten zu treffen. Ebenso werden Risikokzepten von Fachleuten verwendet, um die hohen Kosten von Sicherheitsmaßnahmen transparent begründen und darstellen zu können (Bründl 2009).

### 4.1.2 Risikobegriff

In der gängigen Literatur wird Risiko als die Möglichkeit des Eintretens eines Schadens infolge von Ereignissen definiert. Durch die Berechnung von bestimmten Risikogrößen wird eine Quantifizierung des Risikos ermöglicht. Es findet damit als Eingangsgröße im Umgang von Sicherheitsbetrachtungen ihren Einsatz (Bründl 2009).

### Risikoformel

Risiko ergibt sich, gemäß der Definition, als Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit und dem daraus entstehenden Schaden für die Gesundheit, Eigentum oder Umwelt (Lambert und Nicot 2011).

$$R = H * E * V * C \quad (4.1)$$

R	Risiko
H	Eintrittswahrscheinlichkeit eines potenziellen Schadensereignisses
E	Exposition des gefährdeten Elements
V	Vulnerabilität des gefährdeten Elements
C	Kosten des Elements

Zur Beschreibung der Eintrittswahrscheinlichkeit werden die Begriffe der Häufigkeit und Jährlichkeit verwendet. Die Jährlichkeit definiert dabei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis beim Eintritt eine bestimmte Ereignisgröße erreicht oder überschreitet. Als Häufigkeit bezeichnet man hingegen die Anzahl an eingetretenen Ereignissen in einem definierten Intervall.

Der Schaden, ausgelöst durch den Eintritt eines Ereignisses, setzt sich durch die Anzahl an Personen und den Wert der gefährdeten Objekte, die sich zum Eintrittszeitpunkt im gefährdeten Bereich befinden, zusammen. Ebenso spielen dabei die Schadensempfindlichkeit und die Vulnerabilität der gefährdeten Personen und Werte eine entscheidende Rolle (Bründl 2009).

### Schutzziele

Durch die Definition eines Schutzziels kann von Verantwortungsträgern das angestrebte Sicherheitsniveau klar quantifiziert werden. Besteht für ein bestimmtes Gebiet/Projekt ein sogenanntes Schutzdefizit können durch die öffentliche Hand Maßnahmen getroffen werden um das Erreichen des Schutzziels zu gewährleisten und das Risiko zu senken (Raetzo und Loup 2016).

#### 4.1.3 Ausgehende Gefahr vom Prozess Steinschlag

Auf den Prozess des Steinschlages lässt sich die aus Kap. 4.1.2 bekannte Risikoformel in abgewandelter Form anwenden. Die Gefahr durch Steinschlag wird hauptsächlich durch das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Intensität beschreiben. Steinschlag ist aufgrund der hohen Prozessgeschwindigkeit selbst bei Sturzblöcken mit Durchmessern von wenigen Zentimetern eine extreme Gefährdung für ungeschützte Personen. Zusätzlich ist die Eintrittswahrscheinlichkeit bei Ereignissen mit kleinen Blockgrößen signifikant größer als Blockschlag oder Felsstürze, die nur im alpinen Raum auftreten können (Preh et al. 2020).

Die Abwandlung der Risikoformel zur objektiven Beurteilung der Gefahr ist somit bei Steinschlagereignissen von Vorteil. Wie erwähnt, können hier Ereignisse mit geringer Intensität und hoher Eintrittswahrscheinlichkeit ein tödliches Ende haben (Preh et al. 2020).

### Direkte und indirekte Treffer

Die Hauptgefährdung in dem untersuchten Gebiet liegt bei den Straßen bzw. Verkehrswegen. Sturzprozesse führen zu zwei grundsätzlichen unterschiedlichen Unfällen auf Straßen:

- Direkte Treffer: Das Fahrzeug oder eine Person wird direkt durch herabfallende Blöcke getroffen.
- Indirekte Treffer: Das Fahrzeug prallt auf bereits herabgefallenes Material und verursacht aufgrund dessen einen Unfall.

Insbesondere bei direkten Treffern spielen die Ereignishäufigkeit sowie die Frequenz entlang des Verkehrsweges eine entscheidende Rolle.

Eine weitere Unterscheidung kann bei indirekten Treffern getroffen werden. Fußgänger und Fahrradfahrer können aufgrund ihrer Geschwindigkeit ausgeschlossen werden und sind nicht relevant, da sie Blöcken leicht ausweichen können. (Bründl 2009).

### Schadensfolgekassen

Da Sturzprozesse häufig spontan auftretenden Ereignisse sind, ist es schwierig im Vorhinein die Kategorie des Schadenspotential zu definieren.

In der ONR 24810 erfolgt die Einteilung in Schadensfolgekassen. Dabei werden die Folgen für Menschenleben und wirtschaftliche Schäden berücksichtigt. Daraus ergeben sich auch die für die Bemessung von Schutzbauwerken notwendigen Teilsicherheitsbeiwerte (Austrian Standards International 2020).

### Häufigkeitsanalyse

Die Ereignishäufigkeit von Steinschlagprozessen, die eine potenzielle Gefährdung darstellen setzt sich aus der jährlichen Anzahl an Steinschlagereignissen und aus den potenziellen gefährlichen Sturzblöcken zusammen:

$$Nr = f * r \quad (4.2)$$

$N_r$	Eintrittswahrscheinlichkeit
$f$	Jährliche Anzahl an Steinschlagereignissen
$r$	Anzahl an potenziell gefährlichen Sturzblöcken eines Steinschlagereignisses (Lambert und Nicot 2011).

### Konsequenzanalyse

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers durch einen Sturzblock mit einem beliebigen Fahrzeug ergibt sich wie folgt:

$$P(S:T) = \frac{Nv}{24} * \frac{Lv}{1000} * \frac{1}{v} \quad (4.3)$$

P(S:T)	Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers
Nv	Tägliche durchschnittliche Verkehrsstärke
Lv	Länge des Fahrzeuges in [m]
v	Durchschnittliche Geschwindigkeit in [km/h]

Daraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Unfalles eines Fahrzeuges, ausgelöst durch Steinschlag mit:

$$P(S) = 1 - (1 - P(S:T))^{Nr} \quad (4.4)$$

P(S)	Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers
Nr	Eintrittswahrscheinlichkeit

Das Risiko eines tödlichen Ausgangs bei einem Treffer eines Fahrzeuges durch einen Sturzblock berechnet sich wie folgt:

$$R = P(S) * V \quad (4.5)$$

R	Risiko eines tödlichen Unfalles einer Person
V	Vulnerabilität (Lambert und Nicot 2011).

## 5 ONR 24810

In Österreich werden die Maßnahmen zum technischen Steinschlagschutz durch die Richtlinie ONR 24810, die seit 2012 besteht, standardisiert. Darin finden sich Vorgaben zur Planung, Ausführung sowie zur Instandhaltung von Steinschlagschutzmaßnahmen. Ebenso ist in der ONR 24810 die Erhebung der prozessrelevanten Einflussgrößen sowie Bestimmung der Bemessungsgrößen geregelt. Weiters finden sich in der Richtlinie Bemessungsgrundlagen für die unterschiedlichen Schutzbauten sowie die Teilsicherheitsbeiwerte für die jeweilige Schadensfolgeklasse (Preh et al. 2019).

### 5.1.1 Grundlagenerhebung

Mit dem erforderlichen vorhandenen Datensatz erfolgt nach ONR 24810 eine Abgrenzung des Projektgebietes. Dabei ist insbesondere auf den potenziellen Gefährdungsbereich und die dadurch auftretenden Konflikte mit Siedlungsräumen und Infrastruktur zu achten. Ebenso ist eine Abklärung in geologisch-geotechnischer Hinsicht erforderlich. Dabei gilt es zu bestimmen, ob eine übergeordnete Massenbewegung den Grund für die Steinschlaggefährdung darstellt.

Datengrundlage für die Abgrenzung des Gefährdungsbereiches bilden Kartenwerke jeglicher Art und Maßstab sowie Orthofotos und Airborne-Scans. Für die Erhebung zu Reichweiten und Ereignisfrequenzen sollen auch Befragungen durchgeführt werden. Ansprechpartner sind hier meist der Forsttechnische Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung sowie kompetente Personen in den Gemeinden. Weites können auch „Stumme Zeugen“ (Sturzblöcke, Schlagmarken, etc.) für eine erste Abgrenzung des Gefahrenbereichs herangezogen werden (Austrian Standards International 2020).

In Österreich gibt es zurzeit keine einheitliche Aufzeichnungsdatenbank von Sturzprozessen. Auch sind historische Chroniken oder Ereignisdatenbanken selten vorhanden. Dadurch kann die erforderliche Ereignishäufigkeit nur schwer bzw. ungenau abgeschätzt werden (Preh et al. 2020).

(Schwenk 1992) schätzt, dass circa nur 3% der Steinschlagereignisse und 3-5% der Blockabstürze in Niederösterreich gemeldet werden.

### 5.1.2 Bestimmung der Schadensfolgeklasse

In der ONR 24810 erfolgt die Einteilung, gemäß **Tab. 5.1**, in Schadensfolgeklassen. Dabei werden, je nach Schadensausmaß, die Folgen für Menschenleben und wirtschaftliche Schäden berücksichtigt. Daraus ergeben sich die für die Bemessung von Schutzbauwerken notwendigen Teilsicherheitsbeiwerte. In die Ermittlung der Schadensfolgeklasse haben, unter anderem, auch die Größe der durchschnittlichen täglichen Verkehrsstärke Einfluss. Die Klassifikation erfolgt gemäß ÖNORM EN 1990:2013 zu:

**Tab. 5.1:** Schadensfolgeklassen (Austrian Standards International 2020 S. 17).

Schadensfolgeklasse CC	Merkmale	Beispiele
CC 1	Geringe Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, wie Scheunen, Gewächshäuser, Forst- und Güterwege mit geringer Verkehrsfrequenz
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen, wie Bürogebäude, regionale und überregionale Verkehrswege mit $DTV \leq 50\,000$ KFZ
CC 3	Schwerwiegende Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen, wie Konzerthallen, regionale und überregionale Verkehrswege mit $DTV > 50\,000$ KFZ

### 5.1.3 Bestimmung der Ablösebereiche

Maßgeblich für eine Modellierung ist die Identifikation von Ablösebereichen. Dazu müssen die geologischen, geomorphologischen und geotechnischen Verhältnisse des Steinschlaggebietes analysiert und nachvollziehbar dargestellt werden. Die ONR 24810 setzt dafür folgende Analysen voraus:

- Beschreibung der Trennflächen
- Beschreibung des Gebirges
- Beschreibung vom maßgeblichen Versagensmechanismus
- Klufkörperanalyse

Insbesondere sollen die Ablösebereiche identifiziert werden und in sich geschlossene homogene Bereiche gegliedert werden (Austrian Standards International 2020).

Ablösebereiche können durch unterschiedliche Methoden festgelegt werden. Einerseits durch umfangreiche Kartierung im Projektgebiet durch erfahrene Gutachter, andererseits durch Festlegung eines Grenzneigungswinkels (Preh et al. 2020).

### 5.1.4 Bestimmung der Blockgröße

Ebenso wichtig, wie die Bestimmung von homogenen Ablösebereichen, ist die Festlegung einer Bemessungsblockgröße. Dabei ist eine statistische Auswertung der Schutthalden durchzuführen. Als geeignete statistische Verfahren für die Festlegung der Bemessungsblockgröße haben sich das Linienzählverfahren und das Flächenzählverfahren durchgesetzt. Die ONR 24810 verknüpft dabei die Bemessungsblockgröße mit der Ereignishäufigkeit. Dabei unterliegen sowohl die Ereignisfrequenz als auch die Bemessungsblockgröße großen Unsicherheiten. Durch die Bestimmung eines Bemessungsblockes werden die kleineren und auch der größte Block vernachlässigt und somit auch wichtige Ergebnisse zu Sprunghöhe und Einschlagsenergie beeinflusst bzw. vernachlässigt (Preh et al. 2020). Ausgehend von der Ereignisfrequenz wird, wie **Tab. 5.2**, die Bemessungsblockgröße bestimmt:

**Tab. 5.2:** Festlegung der Bemessungsblockgröße in Abhängigkeit der Ereignisfrequenzklasse (Austrian Standards International 2020 S. 30).

Ereignisfrequenzklasse	Ereignishäufigkeit $n$ (1/a)	Fraktil für die Bemessungsblockgröße
EF 4 (sehr hoch)	$n \geq 10$ ( $\geq 10$ Ereignisse/Jahr)	$V_{98}$
EF 3 (hoch)	$1 \leq n < 10$ (1 bis 10 Ereignisse/Jahr)	$V_{97}$
EF 2 (gering)	$0,03 \leq n < 1$ (1 Ereignis/1 bis 30 Jahre)	$V_{96}$
EF 1 (selten)	$n < 0,03$ ( $< 1$ Ereignis/30 Jahre)	$V_{95}$

Ein alternatives Konzept zum Bemessungsblock aus der ONR 24810 verfolgt Preh. Dabei wird versucht die gesamte Blockverteilung zu simulieren. Dadurch können einerseits die Energie- und Sprunghöhenverteilung realitätsgetreuer nachgestellt werden andererseits werden dadurch auch Ungenauigkeiten bei der Aufnahme der Blockgröße geglättet (Preh et al. 2020).

### 5.1.5 Bestimmung der einwirkenden Energien auf die Schutzmaßnahmen

Nach Bestimmung des Bemessungsblockes kann mit Hilfe von Steinschlagsimulationsprogrammen die charakteristische Einwirkungsenergieverteilung errechnet werden. Aus dieser Energieverteilung wird als charakteristischer Wert für die einwirkende Energie das 99%-Fraktil verwendet. Daraus ergibt sich durch Multiplikation mit dem Teilsicherheitsbeiwert (abhängig von der Schadensfolgeklasse), in **Tab. 5.3** dargestellt, der Bemessungswert der einwirkenden Energie wie folgt:

$$T_{E,d} = T_{E,k} * \gamma_{E,kin} \quad (5.1)$$

$\gamma_{E,kin}$	Teilsicherheitsbeiwerte für die Energie-Einwirkung in Abhängigkeit von der Schadensfolgeklasse nach <b>Tab. 5.3</b>
$T_{E,d}$	Bemessungswert der Energie, in kJ
$T_{E,k}$	charakteristischer Wert der Energie ( als 99% Fraktil der Einwirkungs-Energieverteilung definiert), in kJ

**Tab. 5.3:** Teilsicherheitsbeiwerte für Schutzmaßnahmen (Austrian Standards International 2020 S. 31).

	CC 1	CC 2	CC 3
$\gamma_{E,kin}$	1,0	1,05	1,15

### 5.1.6 Bestimmung der Sprunghöhen

Als charakteristische Sprunghöhe wird die Normale zwischen der Oberkante des Bemessungsblockes und der Hangoberfläche definiert. Dabei wird das 95%-Fraktil der Sprunghöhenverteilung verwendet. Der Bemessungswert der Sprunghöhe ergibt sich, nach Multiplikation mit den Teilsicherheitsbeiwerten aus **Tab. 5.4**, wie folgt:

$$h_{E,d} = h_{E,k} * \bar{\alpha}_1 \quad (5.2)$$

$\bar{\alpha}_1$	Vergrößerungsfaktor auf den charakteristischen Wert der Sprunghöhe nach <b>Tab. 5.4</b>
$h_{E,d}$	Bemessungswert der Sprunghöhe, in m
$h_{E,k}$	charakteristischer Wert der Sprunghöhe ( als Höhe der Oberkante des Bemessungsblockes $h_{95[VBB]}$ definiert), in m

**Tab. 5.4:** Teilsicherheitsbeiwerte für die Berechnung der Sprunghöhen (Austrian Standards International 2020 S. 31).

	CC 1	CC 2	CC 3
$\bar{\alpha}_1$	1,05	1,1	1,3

## 6 Fallbeispiel Rossatz

Für die Untersuchung und die Risikoanalyse wurde ein Gebiet ausgewählt, in welchem regelmäßig Steinschlagereignisse auftreten. Von Bedeutung ist darüber hinaus, dass beim betroffenen Gebiet noch keine Schutzmaßnahmen zur Sicherung der angrenzenden Verkehrswege errichtet wurden. So lässt sich die IST-Simulation getreu nachbilden. In Verbindung mit dem tatsächlichen Verkehrsaufkommen kann eine Risikoanalyse durchgeführt werden. Durch die Steinschlagsimulation der IST-Situation kann das Risiko für die Verkehrsteilnehmer quantifiziert werden und es können die entsprechend konstruktiven Maßnahmen zur Sicherung gesetzt werden. Dabei wird das Schutzziel lt. (Valentin und Rauscher 2021) für gravitative Naturgefahren mit  $1 \times 10^{-5}$  festgelegt.

Die durchgeführten Sturzsimulationen haben den Zweck insbesondere die Reichweite, die Sprunghöhe und die Aufprallenergie am Schutzbauwerk zu bestimmen. Durch die Berechnung der Reichweite kann die Gefährdung der Verkehrsteilnehmer entlang der Bundesstraße quantifiziert werden. Die Risikobewertung des Straßenabschnittes stützt sich daher besonders auf die maximale Reichweite der Sturzblöcke. Durch die Simulation mehrerer Sturztrajektoren kann dann die Reichweite als Entscheidungsgrundlage für die Errichtung konstruktiver Maßnahmen herangezogen werden. Die Sprunghöhe sowie die Aufprallenergie am Schutzbauwerk sind vor allem für die Bemessung der sekundären Schutzmaßnahmen von Interesse. Eine optimale Position der geplanten Schutzmaßnahmen kann ebenfalls durch die Berechnung mittels Wurf 3D gefunden werden.

Um Rückschlüsse auf die Bemessungsblockgröße sowie die Berechnungen im 3D-Modell durchführen zu können wurde, im Vorfeld, die Schutthalde und der Ablösebereich mit Hilfe einer Drohne aufgenommen. Daraus wurde mit entsprechender Software ein 3D-Modell erstellt.

Im Zuge der Bearbeitung des Untersuchungsgebiets erfolgte zu Beginn eine Datenerhebung aus Luftbildern, Laserscans und Grundlagenkarten. Gemeinsam mit Feldaufnahmen und Kartierarbeiten bilden diese Daten die Basis für die computergestützte Steinschlagsimulation mit Wurf 3D.

Geographisch befindet sich das Projektgebiet im österreichischen Bundesland Niederösterreich, siehe **Abb. 6.1**. Südlich der Donau, zur niederösterreichs Mitte gehörig, befindet sich das Steinschlaggebiet in der Nähe des Ortes Rossatz.

Großtektonisch gehört das untersuchte Gebiet zur Böhmisches Masse. An dem Standort lässt sich der Gföhler Gneis als Hauptgesteinsart identifizieren (Steininger 1999).

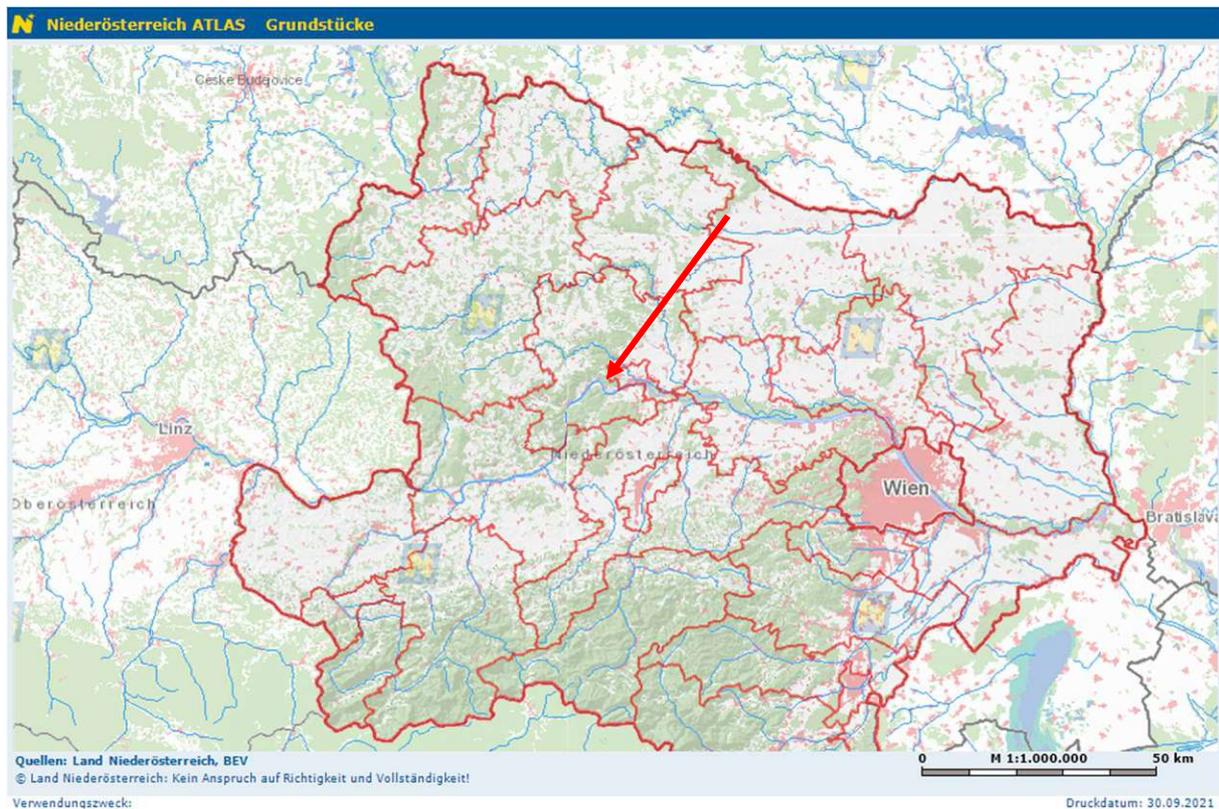


Abb. 6.1: Übersichtskarte mit dem Standort des Untersuchungsgebiets (Auszug aus www-01)

## 6.1 Rossatz Untersuchungsgebiet

### Geographische Lage

Das Untersuchungsgebiet befindet sich im österreichischen Bundesland Niederösterreich in der geographischen Region des Waldviertels. Das Projektgebiet befindet sich circa 8 km westlich der Stadt Krems an der Südseite der Donau und gehört zum Dunkelsteinerwald, siehe **Abb. 6.2** und **Abb. 6.3**. Das Steinschlaggebiet befindet sich in der Gemeinde Rossatz-Arnsdorf auf einer Seehöhe von ca. 225 m ü. A. Der circa 2 km lange betroffene Abschnitt liegt entlang der B33 der Aggstenerstraße, welche von Melk bis nach Krems an der Donau führt. Ebenso führt der bekannte Donauradweg entlang dieser Strecke. Für die Berechnung wurde ein kleinerer Abschnitt im westlichen Bereich der Felskette ausgewählt (siehe Beilage 1 – Lageplan). **Abb. 6.4** zeigt eine Drohnenaufnahme des ausgewählten Untersuchungsgebietes.

Die Geschwindigkeitsbegrenzung liegt im betrachteten Abschnitt bei 100 km/h.

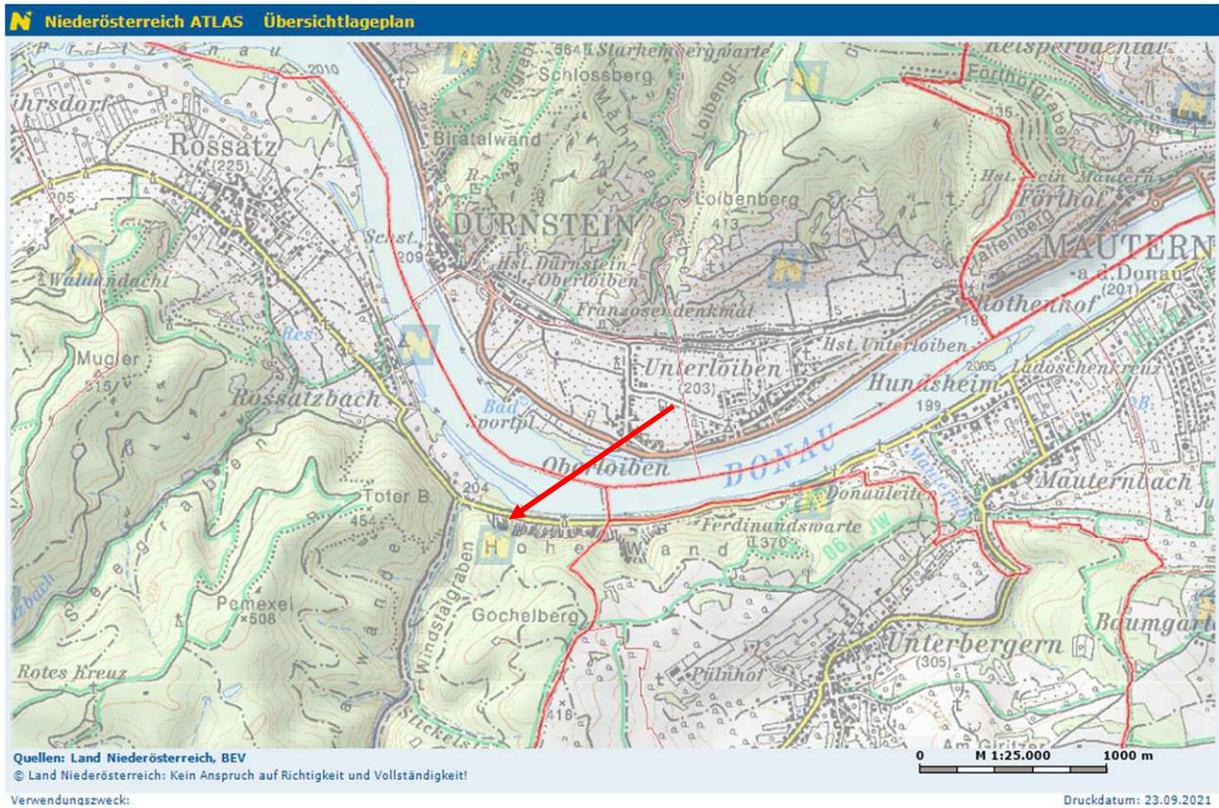


Abb. 6.2: Übersichtslageplan (Auszug aus www-01)

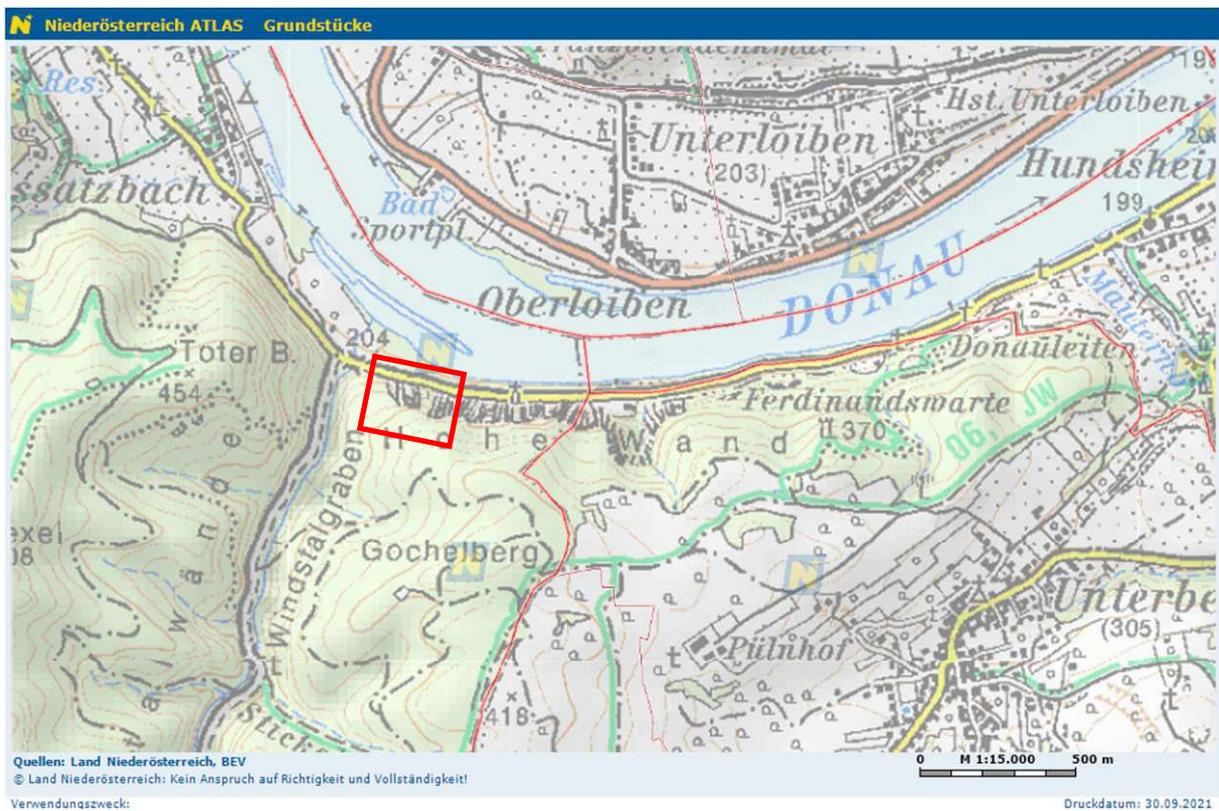


Abb. 6.3: Lageplan mit Untersuchungsgebiet im roten Rechteck (Auszug aus www-01)



**Abb. 6.4:** Drohnenaufnahme des Untersuchungsgebiets mit B33 im Vordergrund und steil abfallenden Felswänden im Hintergrund

### Geologisch-tektonischer Überblick

Das untersuchte Gebiet Rossatz gehört großtektonisch der böhmischen Masse an, siehe **Abb. 6.5**, und kann, untergeordnet, der sogenannten Gföhler Einheit zugeordnet werden. Charakteristisch für die Gföhler Einheit sind Tiefengesteine wie Gneise und Granulite. Im Allgemeinen zählen Gneise und Granulite zu den metamorphen Gesteinen. Ihre Bildung liegt circa 340-320 Mio. Jahre zurück. Geographisch beschränkt sich das Vorkommen beider Gesteine auf einen circa 10-15km breiten Streifen inmitten des Waldviertels, wie in **Abb. 6.6** ersichtlich. Häufig anzutreffen sind die beiden Gesteinsarten in Ybbs, im Dunkelsteiner Wald sowie in Gföhl und Horn (Steininger 1999).

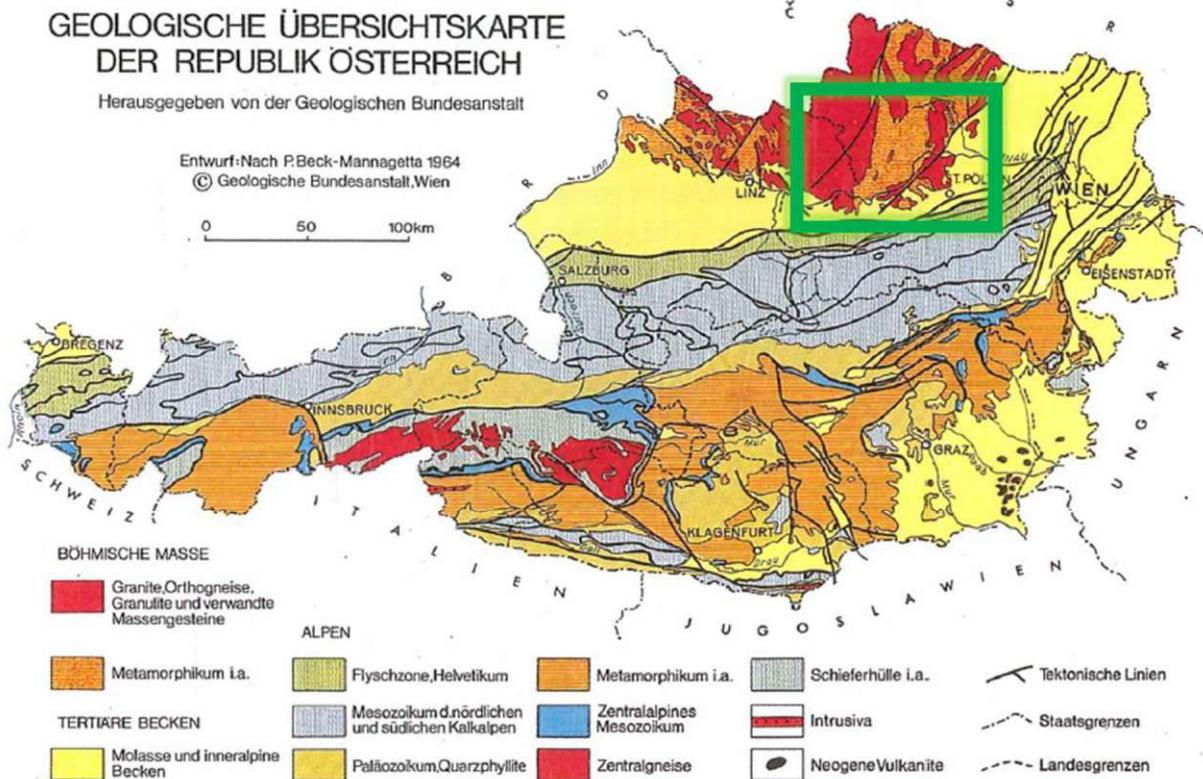


Abb. 6.5: Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich (Steininger 1999 S. 1)

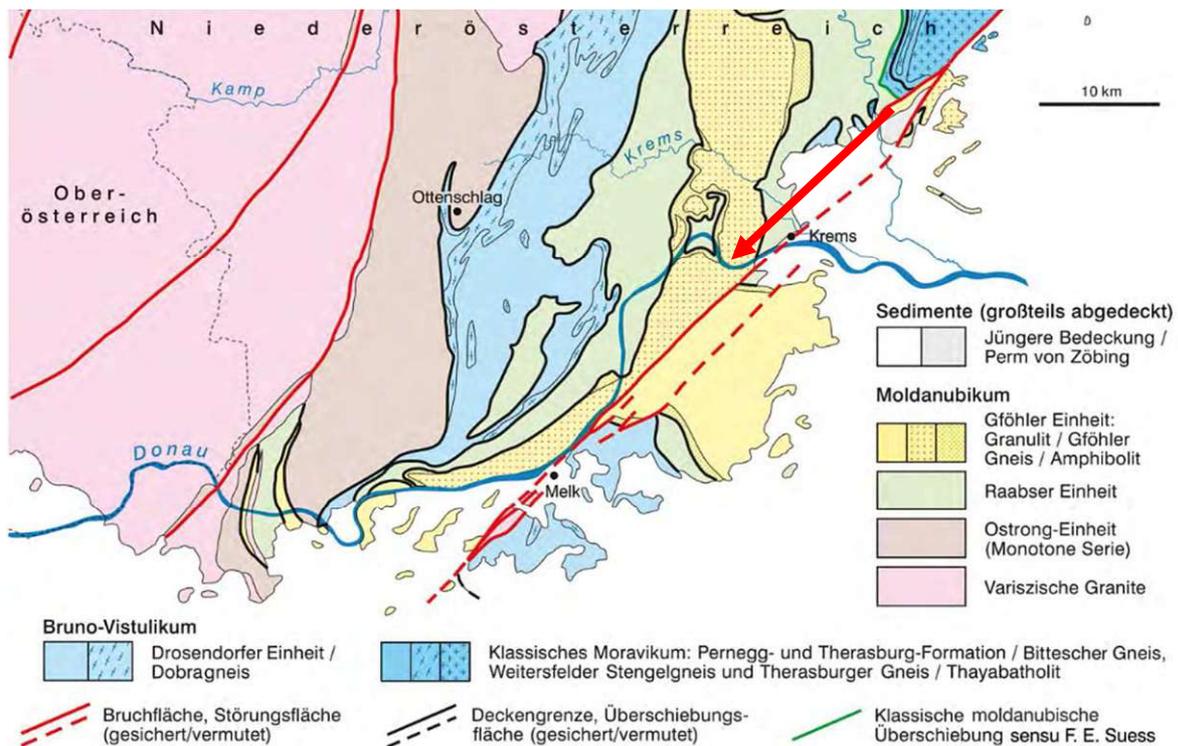
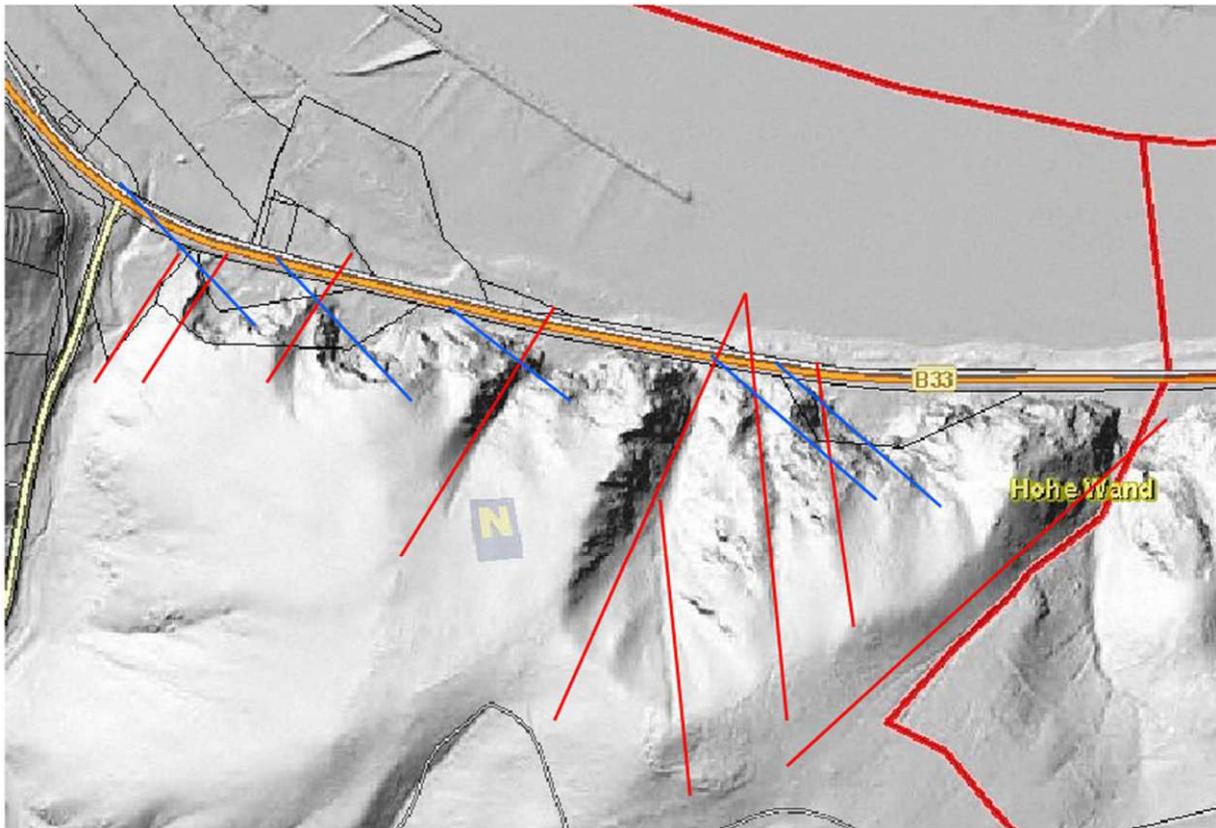


Abb. 6.6: Ausschnitt geologische Karte mit Untersuchungsgebiet in der Gföhler Einheit (Finger und Schubert 2015 S.170)

Der Blick auf die Schummerungskarte **Abb. 6.7.** zeigt deutliche tektonischen Strukturen. Neben dem Donautal befinden sich zahlreiche Störungen, welche mit circa  $65\text{-}85^\circ$  in Richtung Donau einfallen. Durch zur Donau parallel verlaufende Klufflächen werden diese Störungen durchtrennt und dadurch können sich Felskörper aus dem Gefüge lösen. Meist erfolgt der Ausbruch der Gesteinsbrocken durch eine gleitende und / oder kippende Bewegung (Furtmüller 2019).



**Abb. 6.7:** Schummerungskarte mit tektonischen Strukturen (rot) und den donauparallelen Klufflächen (blau) (Furtmüller 2019 S.9).

Das Gebiet um Rossatz befindet sich außerdem in der Erdbebengefährdungszone 2. Dort ist mit horizontalen Bodenbeschleunigungsraten von  $0,59 \text{ m/s}^2$  zu rechnen (www-02).

### Gesteinsdichte

Die Dichte ist abhängig von der vorherrschenden Geologie und von der Art des Gesteins. Durch die Festlegung eines entsprechenden Wertes und durch die Ableitung des Radius aus der Bemessungsblockgröße erstellt Wurf 3D eine Äquivalentkugel aus der Steinschlagmasse (Fleris und Preh 2018). Die Dichte von Gneisgesteinen kann mit circa  $2,7 \text{ t/m}^3$  angegeben werden (Dachroth und Brezina 2017).

### Klima

Die Jahresmitteltemperatur beträgt in der Stadt Krems ca.  $9,4^\circ \text{ C}$ , der mittlere Jahresniederschlag beträgt  $515,7 \text{ l/m}^2$  (www-03).

### Anthropogene Einflüsse

Das Gebiet wird weder forstwirtschaftlich noch anderwärtig genützt. Schutzbauten sind zurzeit nicht vorhanden. Während der Erstellung dieser Arbeit wurden im östlichen Teil der Felswand zwischen km 27,2 – 27,8 Felsräumarbeiten und Seilvernetzung auf Grundlage eines Gutachtens von G. Furtmüller durchgeführt (Furtmüller 2019). Der in dieser Arbeit beschriebene Abschnitt ist aber davon nicht betroffen.

### Vegetation und Oberflächenbeschaffenheit

Die Vegetation im Transit- bzw. Ablagerungsbereich ist durch niederes Strauchwerk, Kletterpflanzen und vereinzelte Laubbäume, gekennzeichnet. Aufgrund des geringen Baumbestandes und der Nähe zum Gefahrenbereich kann sich hier eine Schutzwaldfunktion nicht ausbilden. Auf eine Modellierung des Waldes wurde deshalb verzichtet. Die Oberfläche im Ablagerungsbereich ist dabei von Schutthalden vergangener Ereignisse gekennzeichnet.

Nördlich der Straße nimmt der Bewuchs durch Laubbäume deutlich zu. Dieser Bereich erstreckt sich bis zum Donauufer.

### Datenquellen

Für die Bearbeitung des Gebietes standen Orthofotos sowie Kartenmaterial aus dem NÖ-Atlas als Datenquelle zur Verfügung. Ebenso konnten aus dem NÖ-Atlas aktuelle digitale Geländemodelle, mit einer Auflösung von 1m x 1m, bezogen werden. Für die Profilschnitte zur Kalibrierung der Reichweite wurde ein Schichtlinienmodell mit einem Höhenintervall mit 1 m verwendet. Orthofotos sowie Kartenmaterial dienten insbesondere für die Abgrenzung des Gebietes sowie zur Plandarstellung. Die Grundlage für die Berechnung mit Wurf 3D bildet ein digitales Höhenmodell (DGM) mit einer Auflösung von 1 m x 1 m Meter. Das 3D Modell des Untersuchungsbereiches ist in **Abb. 6.8** dargestellt. Aufgrund der hohen Auflösung spielen in der Steinschlagsimulation Unebenheiten im Gelände eine untergeordnete Rolle.

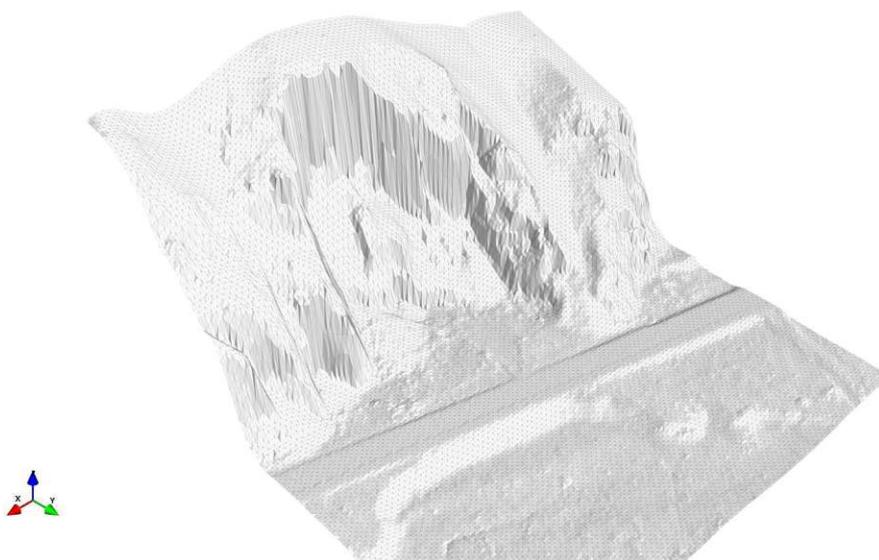


Abb. 6.8: Digitales 3D Höhenmodell des Untersuchungsbereiches

## 6.2 Prozessanalyse und Schadenspotential

### Steinschlagprozess

Der steinschlaggefährdete Bereich befindet sich entlang der Bundesstraße 33, der Aggstenerstraße. Die Bundesstraße befindet sich in manchen Bereichen nur weniger Meter vom anstehenden Felsen entfernt. Nördlich, in unmittelbarer Nähe, befindet sich die Donau, welche auch die natürliche Grenze des betrachteten Gebietes darstellt.



**Abb. 6.9:** Drohnenaufnahme der Situation vor Ort mit B 33 im linken Bildrand

Der zu betrachtende Bereich stellt eine, circa 70 m, bis 90° steil abfallende Felswand aus Gföhler Gneis dar, siehe **Abb. 6.9**. An manchen Stellen des Abschnittes befinden sich auch überhängende Bereiche. Am Fuße der Felswand liegen bereits Blöcke mit einem Durchmesser von mehreren Metern (stumme Zeugen), welche sich im direkten Gefahrenbereich der Felswand befinden. Auf eine Begehung der Schutthalde wurde daher aus Sicherheitsgründen verzichtet. Aus den oben beschriebenen Gründen waren auch Messungen für die Klufkörperanalyse in der Wand nicht möglich.



**Abb. 6.10:** Stark zerklüftete Bereich im oberen Drittel der Felswand

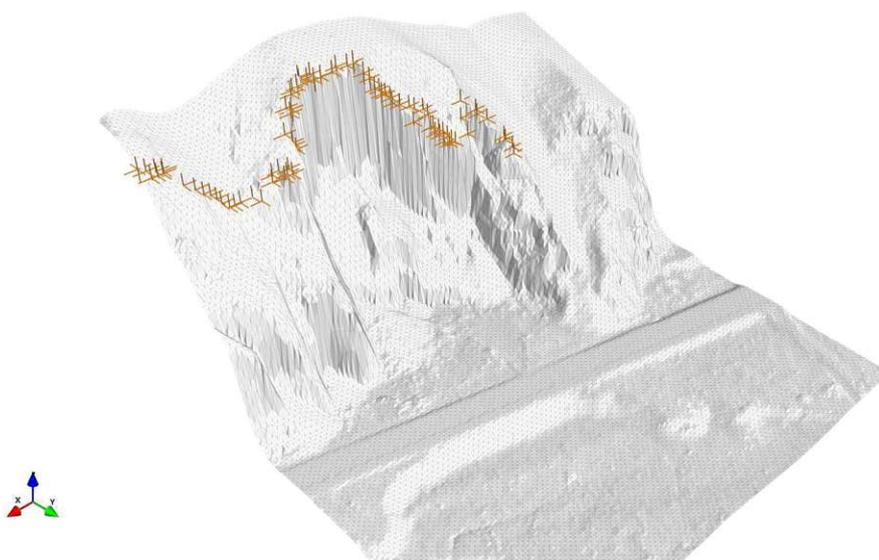
In **Abb. 6.10** sind die stark zerklüfteten Bereiche im oberen Drittel der Felswand gut ersichtlich. Die Klüfte sind circa 20 cm geöffnet. Helle Bereiche weisen hier auf eine rege Steinschlagaktivität hin. Im östlichen Teil liegen kompakte Felspartien vor.

Als primärer Versagensmechanismus kann hier das Gleiten auf zwei oder mehreren Flächen angenommen werden. Solche Gleitflächen sind hier gut ausgebildet und verlaufen nahezu parallel. Ebenso kann in den überhängenden Wandbereichen Fallen eintreten.

Anthropogene Auslöser, wie zum Beispiel durch Bauarbeiten oder durch Wurzeldruck, können hier ausgeschlossen werden. Mögliche Ursachen für die rege Steinschlagaktivität könnten häufige Frost-Tauwechsel in der Frühjahrsperiode sowie die allgemeine Verwitterung, mit dadurch entstehender Verminderung der Festigkeit, sein. Ebenso kann ein erhöhter Kluftwasserdruck, aufgrund großer Niederschlagsmengen, möglicher Auslöser für Steinschlagereignisse sein. Es ist daher tendenziell im Frühjahr und im Herbst von einer erhöhten Steinschlagsaktivität auszugehen. Aufgrund der starken Zerklüftung, kann auch in Zukunft nicht von einer Beruhigung der Steinschlagaktivität ausgegangen werden. Zur notwendigen Sicherung der Bundestrasse 33 sind daher sekundäre Sicherungsmaßnahmen geplant.

### Ablöse-, Transit- und Ablagerungsbereich

Als Ablösebereich konnte der stark zerklüftete Bereich in der oberen Wandhälfte des Gebietes ausfindig gemacht werden. Deutlich erkennbar ist auch ein zum Absturz gefährdeter Block im westlichen Wandbereich. Im südöstlichen Bereich sind ebenfalls hellere Zonen erkennbar. Hier dürfte es sich um jüngst abgefallene Gesteinspartien handeln. Dazu zählen ebenso lose Steine, welche sich am Ende der Felswand beim Übergang zum gewachsenen Boden, befinden. Als Auslöser der Steinschlagereignisse wurde der obere Bereich der Wand festgelegt, dies entspricht einer konservativen Annahme. Mittels Polygonzug wurden 80 mögliche Abbruchpunkte entlang der oberen Kante der Felswand ausgewählt. Die ausgewählten Abbruchpunkte sind in **Abb. 6.11** dargestellt.



**Abb. 6.11:** Digitales Höhenmodell mit den gewählten Abbruchpunkten

Transit- und Ablagerungsbereich unterscheiden sich wegen der geringen räumlichen Ausdehnung in diesem Fall kaum. Zwischen den beiden Prozessbereichen besteht ein fließender Übergang. Als Ablagerungsbereich kann dabei der gesamte Bereich unterhalb der Felswand angesehen werden (siehe Beilage 3 – Prozessbereiche).

### Schadenspotential

Aufgrund der Nähe des Steinschlagablösebereiches zur Bundesstraße 33 besteht hier eine direkte Gefährdung der Straße und deren Benützer wie LKWs, PKWs sowie Radfahrern. Die im Zeitraum vom 24.02. bis 04.03.2020 durchgeführten Messungen der Straßenbauabteilung 7 des Amtes der niederösterreichischen Landesregierung, ergaben die in der Tabelle, **Tab. 6.1**, angeführten Ergebnisse:

Tab. 6.1: Verkehrszählung.

Verkehrszählung	
24.02.2020 - 04.03.2020	
Art	Anzahl
Einspurig	2294
PKW	45294
LKW	932
LKW Zug	114
Summe	48634
DTV	5318
MSV	222

Im entsprechenden Straßenabschnitt ist mit einer durchschnittlich täglichen Verkehrsstärke (DTV) von 5138 Verkehrsteilnehmern auszugehen. Die Verkehrsstärke unterliegt naturgemäß jahreszeitlichen Schwankungen.

In den Sommermonaten ist mit einem erhöhten Aufkommen von einspurigen Fahrzeugen insbesondere Fahrradfahrern zu rechnen. Die Ergebnisse einer Radverkehrszählung aus dem Jahr 2016 dienen als Basis für die Bestimmung des durchschnittlichen täglichen Radverkehrs (DTRV). Am südlichen Donauufer ergab die Zählung im Bereich Mitterarnsdorf – Rossatz ein jährliches Radfahraufkommen von 93045. Dies ergibt einen durchschnittlich täglichen Radverkehr von rund 255 (www-04).

Aufgrund der Auslastung der Bundesstraße kann nach ÖNORM EN 1990:2013 Anhang B.1 eine Beurteilung über die Schadensfolgekategorie erfolgen. Für das projektierte Gebiet ergibt dies die Schadensfolgekategorie CC2 (Austrian Standards International 2020).

## 6.3 Prozessmodellierung

### 6.3.1 Felddatenerhebungen

Unerlässlich für Steinschlagsimulationen ist eine möglichst genaue Nachbildung der Realität des Steinschlaggebiets (Austrian Standards International 2020). Neben technischen Hilfsmitteln ist eine Begutachtung der örtlichen Gegebenheiten und eine Durchführung von Felduntersuchungen des betroffenen Gebietes unumgänglich.

#### Steinschlagindikatoren

Entlang der B33 finden sich an verschiedenen Stellen so genannte Steinschlagindikatoren. Dabei finden sich Schlagmarken von eingeschlagenen Felsbrocken an Bäumen oder auf der Fahrbahn, **Abb. 6.12** und **Abb. 6.13**. Schlagmarken können Auskunft über Reichweite, Sprunghöhe, Aufprallenergie sowie Ereignishäufigkeit geben (Austrian Standards International 2020).

Während der Begehung wurde versucht, insbesondere Schlagmarken im Gelände zu finden. Diese Schlagmarken wurden mittels GPS-Gerät vermessen und in einem Plan dargestellt (siehe Beilage 2 – Lageplan Schlagmarken). Durch die Vermessung von Treffern an Bäumen

und Straße konnte die maximale Reichweite von Sturzblöcken entlang des Abschnittes in mehreren Profilschnitten ermittelt werden. Aufgrund der hohen Anzahl von Schlagmarken kann von einer regen Steinschlagfähigkeit ausgegangen werden. **Abb. 6.12** zeigt einen Einschlagkrater von ca. 7 cm auf der Fahrbahn der B33.



**Abb. 6.12:** Schlagmarke und kleiner Sturzblock entlang der B33



Abb. 6.13: Schlagmarke an einem Laubbaum im Bereich der Schutthalde

### Sturzblöcke und stumme Zeugen

Rückschlüsse auf vergangene Steinschlagereignisse lassen sich auch aus den Sturzblöcken selbst gewinnen (stumme Zeugen). Die Sturzblöcke werden dabei aufgrund des relativen Alters, des Bewuchses und des Verwitterungsgrades unterschieden und sind, wie in **Tab. 6.2** ersichtlich, in drei Kategorien eingeteilt.

**Tab. 6.2:** Zusammenhang zwischen relativem Alter und Verwitterung nach (Zwack 2013, S.39)

Kategorie	Relatives Alter	Kennzeichnung
Alt	> 10	bemoost, stark verwittert
Jung	5-10	leicht bemoost, angewittert
Frisch	1-2	frische Oberfläche, scharfe Kanten, unverwittert

Stark bemooste und verwitterte Blöcke der Kategorie „Alt“ können dabei auch mehrere hunderte Jahre alt sein. Dies lässt auf eine schon lang andauernde Steinschlaggefährdung schließen. Jüngere Blöcke weisen auf eine akute Gefährdung des Bereiches hin (Zwack 2013).

In der Schutthalde befindet sich ein großes Spektrum an Gesteinsmaterial unterschiedlichen Alters, was auf eine andauernde Steinschlaggefährdung hinweist und mit der Analyse der Felswand übereinstimmt. Neben stark angewitterten und bemoosten Blöcken können auch immer wieder frische Blöcke mit scharfen Kanten ausgemacht werden. **Abb. 6.14** zeigt stark bemooste Sturzblöcke im Bereich der Schutthalde.

**Abb. 6.14:** Stark bemooste Sturzblöcke im Bereich der Schutthalde

### Ereignisfrequenzklasse

Wesentlich für Steinschlagsimulationen sind die Ereignisfrequenzklassen und die damit verbundene Größe des Bemessungsblockes. Aufgrund fehlender Aufzeichnungen über Steinschlagereignisse muss die Ereignisfrequenzklasse geschätzt werden. Als Grundlage für die Abschätzung der Häufigkeit von Steinschlagprozessen werden, die in den Kapitel Steinschlagindikatoren und Kapitel Sturzblöcke durchgeführten Feldarbeiten verwendet. Basierend auf den Feldarbeiten und unter Berücksichtigung eines konservativen Ansatzes wird eine Annahme mit mehr als zehn Ereignissen pro Jahr getroffen. Dies entspricht der Ereignisfrequenzklasse EF4 (Austrian Standards International 2020).

### Bemessungsblockgröße

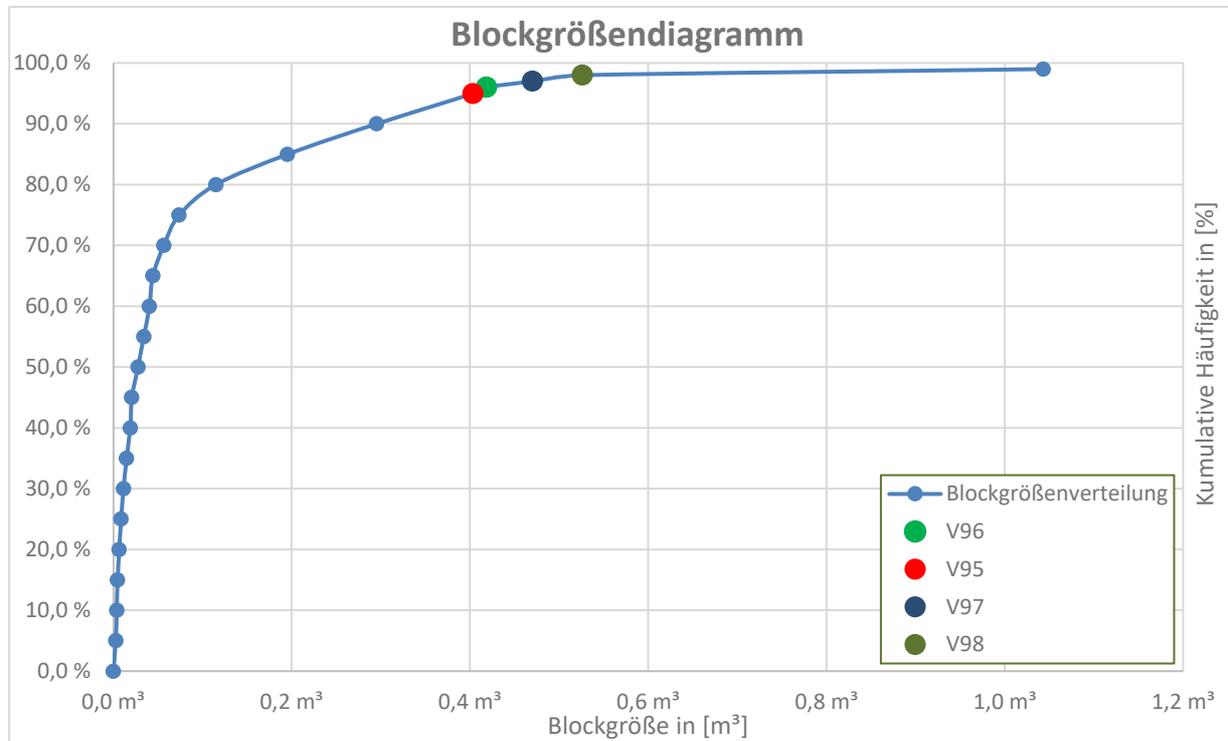
Die Vermessung der Schutthalde erfolgte durch eine Befliegung mittels Drohne. Danach konnte aus den Aufnahmen der Drohne mithilfe einschlägiger Software (CloudCompare) ein 3D Modell erstellt werden. Die Vermessung der Blöcke erfolgte ebenfalls mittels Software (Agisoft – Metashape).

Aus der solcherart aufgenommenen Schutthalde konnte mit Hilfe des Linienzählverfahrens die Bemessungsblockgröße bestimmt werden. Durch die Vermessung von ca. 100 Blöcken am Böschungsfuß entlang einer gedachten geraden Linie, siehe **Abb. 6.15**, konnte ein Blockgrößendiagramm erstellt werden. Dadurch kann die, laut ONR 24810 geforderte, Bemessungsblockgröße bestimmt werden (Austrian Standards International 2020). Dabei wurde festgestellt, dass aufgrund der Auflösung eine Längenmessung der Blöcke nur bis zu einer bestimmten Größe möglich ist. Sturzblöcke mit einer Länge unter 8,0 cm konnten nicht mehr oder nur mit großer Ungenauigkeit vermessen werden.



**Abb. 6.15:** Screenshot des Linienzählverfahrens aus Agisoft Metashape

Die Blockgröße wurde dabei über die Längenmessung zweier Hauptachsen bestimmt. Die Länge der dritten Hauptachse wurde durch das arithmetische Mittel berechnet. Aus den gemessenen Längen ergibt sich die Blockgrößenverteilung, welche in **Abb. 6.16** dargestellt ist.



**Abb. 6.16:** Blockgrößendiagramm mit kumulativer Häufigkeit und Blockgröße in  $\text{m}^3$

Der Fraktilwert für das Volumen des Bemessungsblockes ergibt sich aus der in der ONR 24810 beschriebenen Ereignisfrequenzklasse (Austrian Standards International 2020). Für das untersuchte Gebiet ergibt sich somit, nach **Tab. 6.3** aufgrund einer Ereignisfrequenzklasse EF 4, eine Bemessungsblockgröße von  $0,53 \text{ m}^3$ .

**Tab. 6.3:** Bemessungsblockgröße

Fraktil für Bemessungsblockgröße	Ereignisfrequenzklasse	Volumen [ $\text{m}^3$ ]
$V_{98}$	EF 4	0,53
$V_{97}$	EF 3	0,47
$V_{96}$	EF 2	0,42
$V_{95}$	EF 1	0,40

### 6.3.2 Kalibrierung der Oberfläche

Wichtig für die Berechnungen mit Wurf 3D ist eine Kalibrierung der Oberflächenbeschaffenheit. Die Eigenschaften des Untergrundes wirken sich dabei direkt auf die Verformungen des Bodens und somit auch auf Reichweite, Energie und Sprunghöhe des

Sturzblockes aus. Aufgrund der geringen räumlichen Ausdehnung des Untersuchungsgebietes ist eine Unterscheidung in mehrere Homogenbereiche nicht nötig.

### Geometrisches Gefälle

Die Kalibrierung der Oberfläche erfolgte mittels geometrischen Gefälle an zwei Profilschnitten entlang der B33. Dabei wurde versucht die mit GPS-Gerät vermessenen Schlagmarken und die möglichen Abbruchgebiete zu verbinden und so das geometrische Gefälle dieser Sturzereignisse zu definieren (siehe Beilage 2 – Lageplan Schlagmarken und Beilage 4 – Profilschnitte). Durch die vorgefunden Schlagmarken konnte die Reichweite vorhergegangener Steinschlagereignisse abgeschätzt werden. Die maßgeblichen Winkel zwischen Abbruch und Aufschlagpunkt sind in der nachfolgenden Tabelle, **Tab. 6.4** abgebildet. Für den Profilschnitt der Felswand wurde das gemittelte geometrische Gefälle verwendet.

**Tab. 6.4:** Geometrisches Gefälle der Profilschnitte

Profilschnitt	Profil 1	Profil 2	Profil 3
geometrisches Gefälle	62°	55°	59°

Das geometrische Gefälle wurde auf den Profilschnitt des Untersuchungsgebietes (siehe Beilage 4 – Profilschnitt, Profil 3) übertragen. Dadurch kann die maximale Reichweite für den untersuchten Abschnitt abgeschätzt werden. Eine Kalibrierung der Oberflächenrauigkeit erfolgt in Wurf 3D mittels den Faktoren RL (longitudinal scale roughness) und RT (transversal scale roughness). Durch eine schrittweise Erhöhung dieser Faktoren kann die Reichweite, Sprunghöhe und Aufprallenergie reduziert werden und eine Anpassung an die gemessenen Aufprallpunkte erfolgen. Dabei kommt vor allem der Reichweite besonderes Augenmerk zu. Das geometrische Gefälle deckt sich in weiten Teilen mit der vorgefundenen Schutthalde. Eine Bestätigung der Kalibrierung erfolgte danach durch umfangreiche Felduntersuchungen. Grundsätzlich gilt dabei je höher die Werte der Roughness-Faktoren desto geringer die Reichweite der Sturzblöcke (Fleris und Preh 2018). Für das Fallbeispiel ergeben sich für die Faktoren RL und RT die in der folgenden Tabelle, **Tab. 6.5**, aufgelisteten Werte.

**Tab. 6.5:** Endwerte für die Faktoren RL und RT

Faktor	RL	RT
Wert	0,65	0,47

Anmerkend muss noch erwähnt werden, dass die Auflösung des digitalen Geländemodells die Faktoren RL und RT maßgeblich beeinflusst. Aufgrund der hohen Auflösung werden Unebenheiten der Oberfläche bereits im DGM berücksichtigt. Die Oberflächenrauigkeitsfaktoren RL und RT befinden sich daher in niedrigeren Wertebereichen als bei digitalen Höhenmodellen mit geringerer Auflösung (Fleris und Preh 2018).

### 6.3.3 Simulationsdurchgänge

Um die Bemessungsgrößen, Sprunghöhe und Aufprallenergie, für die sekundären Schutzmaßnahmen zu bestimmen wurden Steinschlagsimulationen mittels Wurf 3D durchgeführt. Dabei wurden zwei Berechnungsansätze untersucht. Pro Berechnungsansatz wurden mehrere Steinschlagsimulationen durchgeführt, um eine statistische Absicherung der Ergebnisse zu gewährleisten. Pro Berechnungsansatz wurden 4-6 Simulationsdurchgänge durchgeführt.

Beim Berechnungsansatz Bemessungsblock wurden, pro Simulationsdurchgang, 67 Würfe von 80 Ablösepunkten berechnet. Dies ergibt insgesamt eine Anzahl von 32160 simulierten Steinschlagtrajektoren.

Bei dem Berechnungsansatz Blockgrößenverteilung musste eine Reduktion der simulierten Steinschlagtrajektoren vorgenommen werden, da die hohe Gesamtanzahl an Blöcken (100) und der Abwurfpunkte (80) die Rechenzeit enorm erhöhen würden. Daher wurde beim Berechnungsansatz Blockgrößenverteilung pro Simulationsdurchgang jeweils nur ein Abwurf pro Ablösepunkt durchgeführt. Dadurch ergibt sich eine Gesamtzahl von 32000 simulierten Sturztrajektoren. Eine Aufteilung der Simulationen in mehrere Durchgänge erbrachte kürzere Rechenzeiten und erhöhte die Programmstabilität. Es konnte beobachtet werden, dass Wurf 3D ab circa. 9000 berechneten Steinschlagtrajektoren an Stabilität verliert. Besonders sind dabei die Darstellung der Trajektoren betroffen. Um die beiden Berechnungsansätze vergleichen zu können wurde daher versucht dieselbe Gesamtanzahl an Trajektoren zu simulieren.

Mittels Screen-Funktion in Wurf 3D, **Abb. 6.17**, konnte die Anzahl der Sturzblöcke, welche die Straße erreichen, ermittelt werden (Fleris und Preh 2018). Dies dient als Grundlage für die spätere Risikobewertung der Bundesstraße. Für die Bemessung der konstruktiven Schutzmaßnahmen wurden, lt. ONR 24810, der 95% Fraktilwert der Sprunghöhe und der 99% Fraktilwert der Energieverteilung entlang des Screens herangezogen.

Da Wurf 3D das, von der ONR 24810 geforderte, 99% - Fraktil der kinetischen Energieverteilung von Wurf 3D nicht berechnet, wird eine lineare Interpolation zwischen der maximalen kinetischen Energie und des von Wurf 3D berechneten 98% - Fraktilwertes durchgeführt (Austrian Standards International 2020).

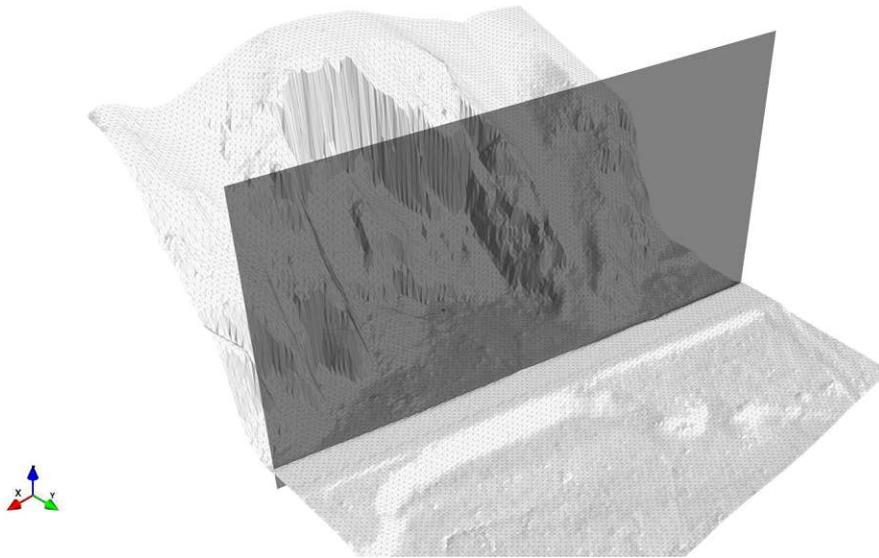


Abb. 6.17: Screenfunktion (grau) im 3D Modell entlang der B33

## 6.4 Analyse mittels Bemessungsblock

Bei der Analyse mit dem Berechnungsansatz Bemessungsblock wurden die Simulationsrechnungen mit dem, durch die Vermessung der Schutthalde bestimmten, Bemessungsblock durchgeführt. Dies ist die Methode zur Bestimmung der Eingangsgrößen, welche zurzeit von der ONR 24810 für die Bemessung der Schutzbauten (Fleris und Preh 2018) vorgegeben wird. Die Verwendung des Bemessungsblocks stellt eine klare Vereinfachung dar. Größere Blöcke mit höheren Aufprallenergien und kleinere Sturzobjekte mit höheren Sprunghöhen werden dabei vernachlässigt (Preh et al. 2020).

### Eingabeparameter

Alle aus den erhobenen Daten bestimmte Eingabeparameter für die 3D-Simulation, sind in der nachfolgenden Tabelle, **Tab. 6.6**, aufgelistet.

**Tab. 6.6:** Eingangsparameter für die Simulationen in Wurf 3D.

Eingangsparameter Rossatz		
Anzahl der Abwürfe		
n	67	[-]
Anzahl der Abwurfpunkte		
p	80	[-]
Anzahl Simulationen		
s	6	[-]
Gesamtanzahl an Trajekturen		
g	32160	[-]
Referenz Verformungs-Energie		
$E_{n0,5}$	10	[-]
$E_{t0,95}$	50	[-]
Oberflächenrauigkeit		
$R_I$	0,65	[-]
$R_T$	0,47	[-]
Gesteinsdichte		
$\rho$	2,7	[kg/m <sup>3</sup> ]
Bemessungsblockvolumen		
$V_{98}$	0,53	[m <sup>3</sup> ]
Blockmasse		
$M_{98}$	1,431	[to]
Reibungswinkel		
$\phi$	30	[°]

### 6.4.1 Simulationsergebnisse

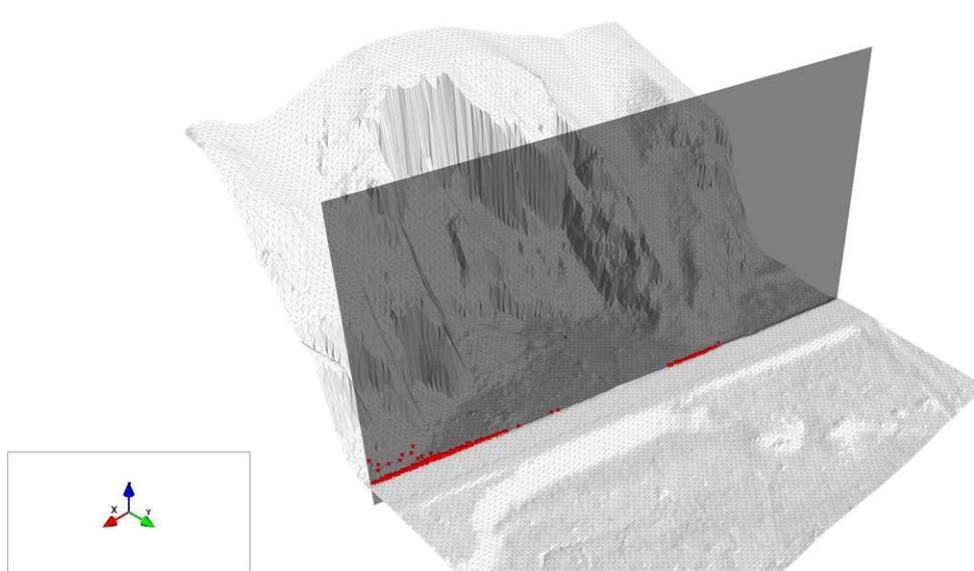
Die Ergebnisse der durchgeführten Steinschlagsimulationen sind in der folgenden Tabelle, **Tab. 6.7**; aufgelistet:

**Tab. 6.7:** Ergebnisse der Simulationen mit Bemessungsblock.

Simulation	Passing Trajectories	Passing Trajectories	Kinetische Energie P98	Kinetische Energie Max	Sprunghöhe P95
n	[%]	[-]	[kJ]	[kJ]	[m]
1	4,70	252	217,20	536,7	1,40
2	4,86	260	419,90	550,2	1,93
3	5,22	280	376,81	571	1,31
4	5,12	274	286,51	602,9	1,37
5	5,83	312	454,14	565,7	1,50
6	5,15	276	206,74	643,1	1,40
Mittelwert	5,15	276	326,88	578,27	1,49
Maximalwert	5,83	312	454,14	643,10	1,93

## Reichweite

Bei einem Steinschlagereignis erreichen im Mittel rund 5,15% die Bundesstraße 33 und stellen dadurch eine Gefahr für die Verkehrsteilnehmer dar. Besonders gefährdet sind dabei jene Bereiche der Straße, welche nur wenige Meter von der Felswand entfernt sind. Die simulierten Ergebnisse decken sich auch mit den im Feld erhobenen Daten, wie die Schlagmarken auf der Straße deutlich machen. **Abb. 6.18** zeigt die Anzahl und die Position der Durchschlagpunkte entlang des Screens. Der Mittelwert der sechs Simulationdurchgänge dient dabei als Grundlage für die Risikoberechnung.



**Abb. 6.18:** Durchschlagpunkte (rot) durch den Screen (grau)

### 6.4.2 Risikoanalyse

Für die Risikoanalyse müssen weitere Annahmen und Differenzierungen getroffen werden. Die Grundlage für die Berechnung des Risikos bilden die Verkehrszählung, die Ereignishäufigkeit und die Steinschlagsimulationen. Ebenso wird davon ausgegangen, dass ein Treffer mit dem Bemessungsblock ( $\varnothing = \text{circa } 0,8 \text{ m}$ ,  $M = 1,41 \text{ to}$ ) für den Lenker eines Kfz oder eines Lkw lt. (Lambert und Nicot 2011) mit einer Vulnerabilität von 0,5 zu bewerten ist. Für den Radfahrer ist ein Treffer mit dem Bemessungsblock mit Sicherheit tödlich. Hierfür wird ein Wert für die Vulnerabilität von 1,0 angegeben (Lambert und Nicot 2011)

Eine Unterscheidung zwischen Radfahrern und Lenkern von motorisierten Fahrzeugen ist aufgrund der unterschiedlichen Geschwindigkeit sinnvoll. Der Straßenabschnitt unterliegt einer Geschwindigkeitsbeschränkung von 100 km/h. Die durchgeführten Verkehrsmessungen belegen, dass sich die Durchschnittsgeschwindigkeit in beide Fahrrichtungen zwischen 96-98 km/h bewegt.

### Risikobewertung für Kfz und Lkw

Für die Risikobewertung werden die in der nachfolgenden Tabelle, **Tab. 6.8**, aufgelisteten Eingangsparameter vorausgesetzt:

**Tab. 6.8:** Eingangsparameter Risikobewertung für Kfz und Lkw.

Eingangsparameter Risikobewertung					
f	r	Nv	Lv	v	V
[-]	[%]	[Fhz/d]	[m]	[km/h]	[-]
10	5,15	5318	4,5	100	0,5

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $N_r$  ergibt sich zu:

$$Nr = 10 * 0,0515 = 0,515 \quad (6.1)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers durch einen Sturzblock mit einem beliebigen Fahrzeug ergibt sich wie folgt:

$$P(S:T) = \frac{5318}{24} * \frac{4,5}{1000} * \frac{1}{100} = 0,00997 \quad (6.2)$$

Daraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Fahrzeugunfalles, ausgelöst durch Steinschlag mit:

$$P(S) = 1 - (1 - 0,00997)^{0,515} = 0,005147 \quad (6.3)$$

Das Risiko eines tödlichen Ausgangs bei einem Treffer eines Fahrzeuges durch einen Sturzblock berechnet sich wie folgt:

$$R = 0,005147 * 0,5 = 0,002573 \quad (6.4)$$

Das jährliche Risiko eines tödlichen Unfalls liegt also im Bereich von rund 2,57 Promille. Passiert man den Streckenabschnitt viermal täglich über ein gesamtes Jahr liegt die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles bei:

$$P(S: 4 * 365) = \frac{0,002573}{5318} * 4 = 1,94 * 10^{-6} \quad (6.5)$$

Das Risiko bei einem Unfall zu sterben, ergibt sich zu:

$$R = 1,94 * 10^{-6} * 1,0 = 1,94 * 10^{-6} \quad (6.6)$$

Das Risiko, durch einen mittels Steinschlag ausgelösten Unfall zu sterben, überschreitet dabei das definierte Schutzziel nicht (Kaindl 2021).

### Risikobewertung für Radfahrer

Die Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern beträgt circa 16 km/h (www-05). Die Vulnerabilität bei einem Treffer durch den Bemessungsblock wird bei Radfahrern mit 1,0, also mit einem tödlichen Ausgang bewertet.

Für die Risikobewertung werden die in der nachfolgenden Tabelle, **Tab. 6.9**, aufgelisteten Eingangsparameter vorausgesetzt:

**Tab. 6.9:** Eingangsparameter Risikobewertung Radfahrer

Eingangsparameter Risikobewertung					
f	r	Nv	Lv	v	V
[-]	[%]	[Fhz/d]	[m]	[km/h]	[-]
10	5,15	255	2	16	1

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $N_r$  ergibt sich zu:

$$N_r = 10 * 0,0515 = 0,515 \quad (6.7)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers durch einen Sturzblock mit einem beliebigen Fahrzeug ergibt sich wie folgt:

$$P(S:T) = \frac{255}{24} * \frac{2}{1000} * \frac{1}{16} = 0,00133 \quad (6.8)$$

Daraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Unfalles eines Fahrzeuges, ausgelöst durch Steinschlag mit:

$$P(S) = 1 - (1 - 0,00133)^{0,515} = 0,000685 \quad (6.9)$$

Das Risiko eines tödlichen Ausgangs bei einem Treffer eines Fahrzeuges durch einen Sturzblock berechnet sich wie folgt:

$$R = 0,000685 * 1 = 0,000685 \quad (6.10)$$

Das jährliche Risiko eines tödlichen Unfalls liegt also im Bereich von 0,6 Promille. Passiert man den Streckenabschnitt viermal täglich über ein gesamtes Jahr liegt die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles mit tödlichem Ausgang bei:

$$P(S) = \frac{0,000685}{255} * 4 = 1,07 * 10^{-5} \quad (6.11)$$

Das Sterberisiko überschreitet dabei das in (Kaindl 2021) definierte Schutzziel von 1 zu 100.000. Um das Risiko entlang des Streckenabschnittes zu verringern, müssen also Maßnahmen gesetzt werden.

### 6.4.3 Auswirkung auf Sicherungsmaßnahmen

Um die Sicherung der Verkehrsteilnehmer zu gewährleisten, wurde aufgrund der Risikobewertung und der Simulationsergebnisse ein Sicherungskonzept für den untersuchten Straßenabschnitt entwickelt.

#### Sprunghöhe

Die Sprunghöhen des 95% Fraktils bewegen sich im Bereich zwischen 1,31 m und 1,93 m. Hier ist eine große Streuung der berechneten Werte erkennbar. Die höchsten Sprungweiten ergeben sich in den östlichen Bereichen des untersuchten Abschnittes. Dort wurde auch die maximale Sprunghöhe, **Abb. 6.19**, errechnet. Für die Bemessung des konstruktiven Steinschlagschutzes wird der maximal Wert verwendet. Durch die Schadensfolgeklasse CC2 ergibt sich eine erforderliche Netzhöhe  $h_{E,d}$  von:

$$h_{E,d} = 1,93 * 1,1 = 2,12 \text{ m} \quad (6.12)$$

Die Mindestnetzhöhe ergibt sich somit zu 2,12, m.

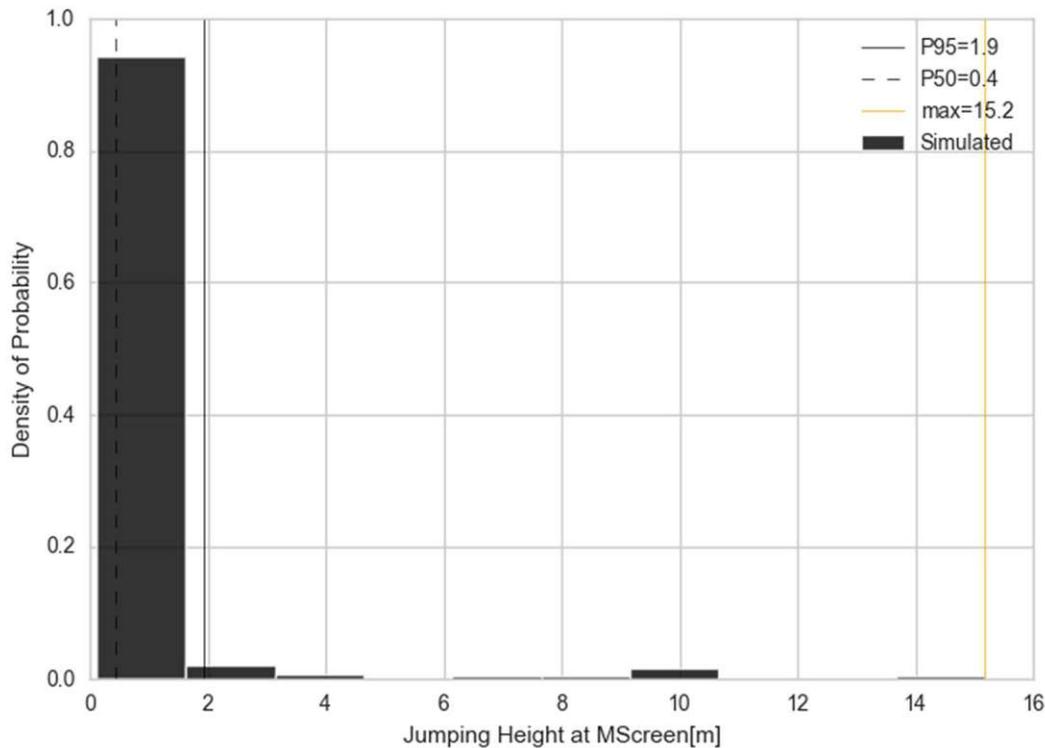


Abb. 6.19: Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchgangs

### Aufprallenergie

Einer ebenso deutlichen Streuung unterliegt die Aufprallenergie am Screen. Die Ergebnisse der kinetischen Energieverteilung eines Simulationsdurchganges sind in **Abb. 6.20** dargestellt. Die laut ONR 24810 benötigte kinetische Energie des 99% Fraktil wird hier zwischen der maximalen Energie und dem 98% Fraktil linear interpoliert. Für die Bemessung wird der Wert von 548,6 kJ herangezogen. Als Schadensfolgeklasse wird CC2 angesetzt, womit sich ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,05 ergibt. Damit ergibt sich nach Formel (6.13) ein Bemessungswert der Aufprallenergie  $T_{E,d}$  zu:

$$T_{E,d} = 548,6 * 1,05 = 576,0 \text{ kJ} \quad (6.13)$$

Für die Sicherung der Bundesstraße wird ein Steinschlagschutznetz, mit einer aufnehmbaren Energie von mindestens 576,0 kJ, benötigt.

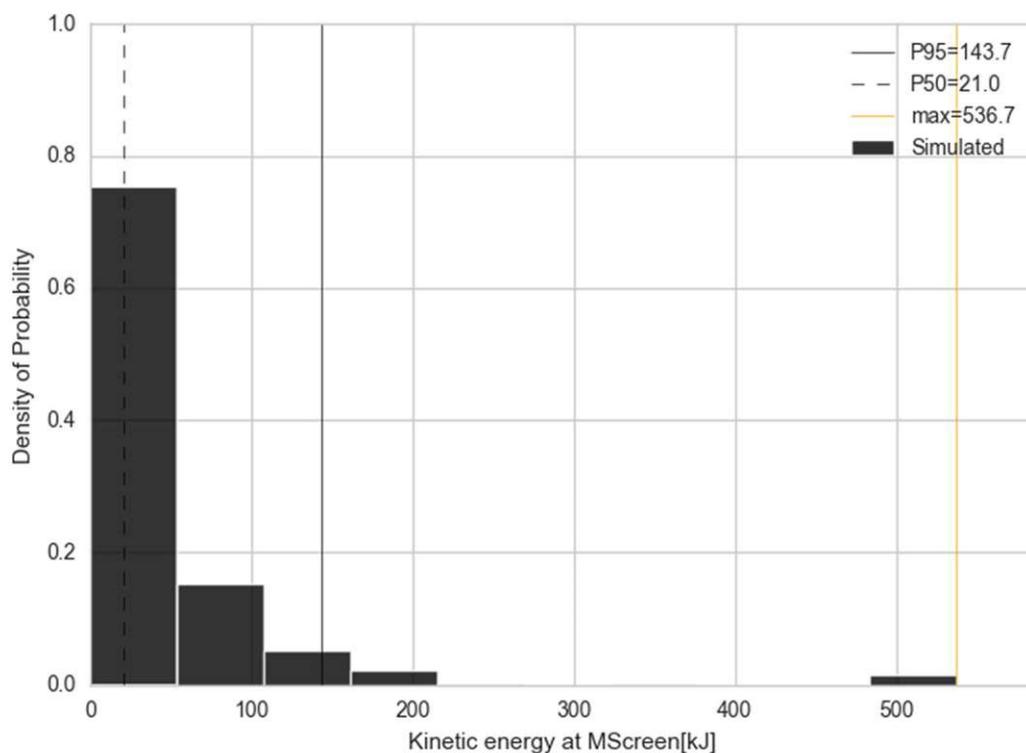
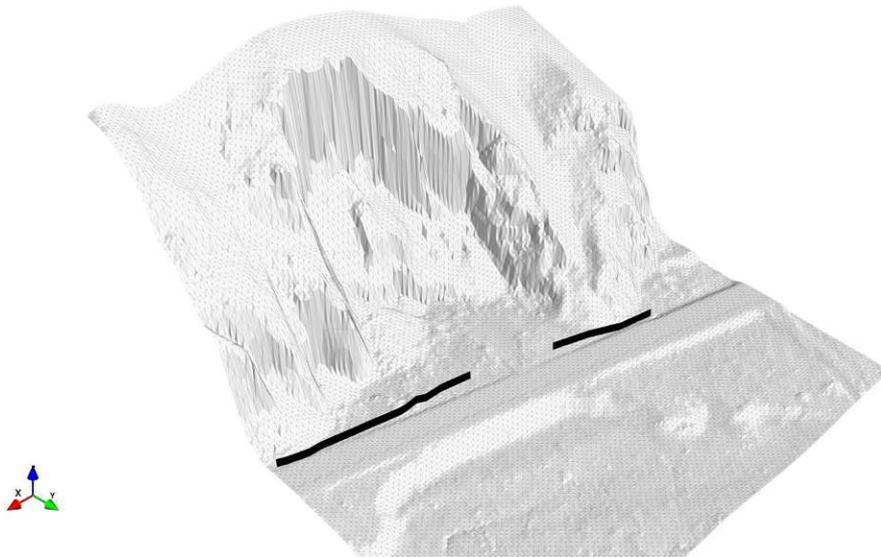


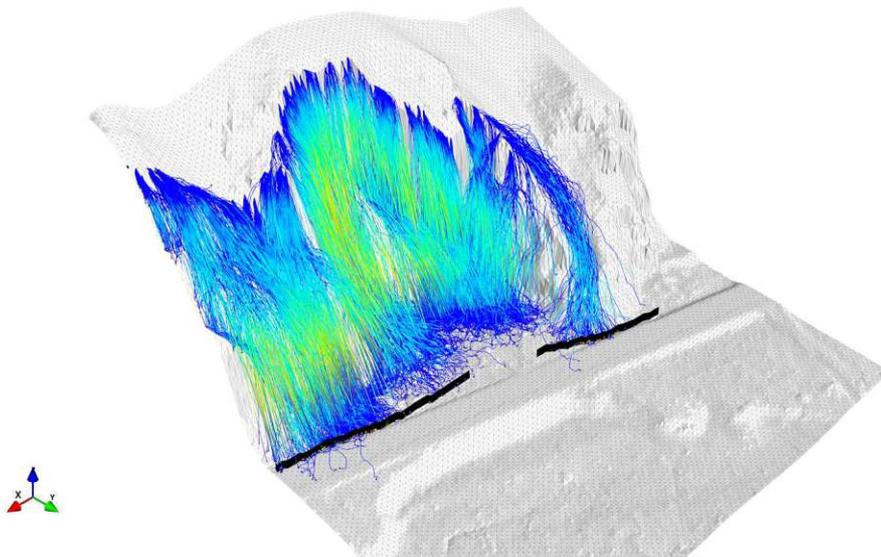
Abb. 6.20: Kinetische Energieverteilung des ersten Simulationsdurchgangs

#### 6.4.4 Bewertung der gesetzten Maßnahmen

Die Sicherungsmaßnahmen können durch, die in Wurf 3D enthaltenen Funktionen, bewertet werden. Mittels Barriere-Funktion, **Abb. 6.21**, kann eine künstliche Sicherungsmaßnahme in das Steinschlagprogramm eingebaut werden, welche den Einfluss auf die Trajekturen zeigt. Der Wirkung der Schutzmaßnahmen ist in **Abb. 6.22** klar erkenntlich.



**Abb. 6.21:** Barrierefunktion von Wurf 3D – die Schutzmaßnahmen sind in schwarz dargestellt.



**Abb. 6.22:** Steinschlagtrajektoren und Steinschlagbarriere – die Wirkung der Schutzmaßnahme ist deutlich erkennbar.

Dabei kann die Anzahl der Sturzblöcke, welche in der Barriere hängen bleiben, bestimmt werden. Die Simulationen mit Steinschlagbarriere wurden mit denselben Eingangsparametern wie in Kapitel 6.4 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der nächsten Tabelle, **Tab. 6.10**, aufgelistet.

**Tab. 6.10:** Vergleich der Passing Trajectories und der aufgehaltene Sturzblöcke

Simulation	Passing Trajectories	Trajectories hit Screen
n	[%]	[%]
1	4,70	4,57
2	4,86	4,64
3	5,22	4,47
4	5,12	4,62
5	5,83	4,65
6	5,15	4,44
Mittelwert	5,15	4,57

Wie deutlich erkennbar kommt es aufgrund der gesetzten Maßnahme zu einer deutlichen Reduktion der Sturzblöcke, die eine Gefährdung der Straße darstellen. Durch die Errichtung der Steinschlagbarriere konnte die Eintrittswahrscheinlichkeit des Erreichens des Bemessungsblockes auf ca. 0.6 % reduziert werden. Wegen der sehr geringen Wahrscheinlichkeit und der bestätigten Wirkung der Schutzmaßnahmen wurde auf eine zweite Risikobewertung verzichtet.

Es wurde beobachtet, dass eine geringe Anzahl an Trajektoren unter der Barriere „durchgerutscht“ sind. Dies dürfte in der hohen Auflösung des 3D Modells geschuldet sein. Die Einschlagpunkte in der Barriere waren dennoch deutlich erkennbar. Die Gesteinsbrocken, die trotz Steinschlagbarriere die Bundesstrasse 33 erreichten, wurden daher zusätzlich händisch gezählt. Die Ergebnisse decken sich dabei mit den von Wurf 3D berechneten Prozentsätzen.

## 6.5 Analyse mittels Blockverteilung

Bei der zweiten Analyse wurde entgegen dem Ansatz der ONR 24810 die gesamte Blockverteilung der Schutthalde als Eingangsblockgröße verwendet. Eine genauere Nachbildung des Sturzprozesses ist dadurch gegeben. Durch die Berücksichtigung des größten Blockes verändern sich die für die Bemessung benötigten Energien wesentlich. Ebenso werden größere Sprunghöhen, welche maßgeblich durch die Größe des Sturzblockes beeinflusst werden, beobachtet.

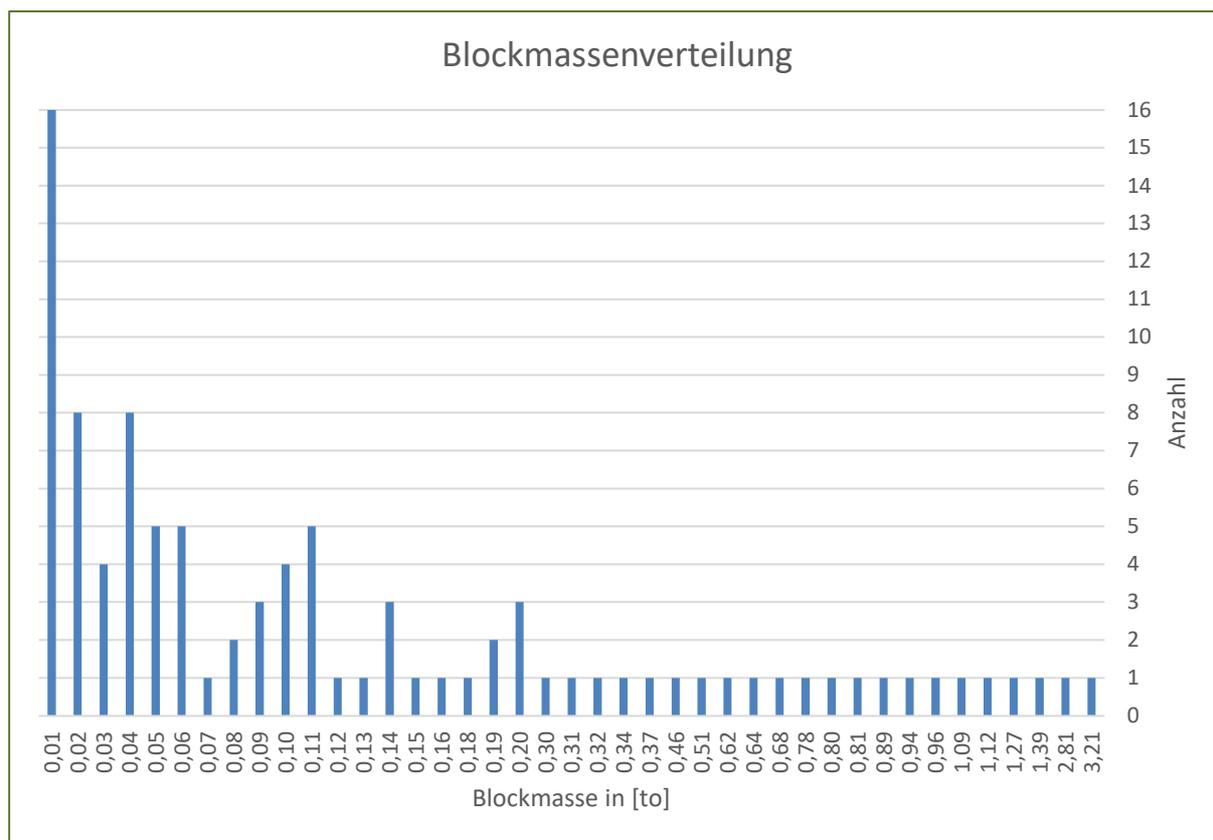
### Eingangsparameter

Für die Simulationen mit der Blockgrößenverteilung wurden folgende Eingangsparameter, **Tab. 6.11** gewählt:

**Tab. 6.11:** Eingangsparameter für die Steinschlagsimulationen

Eingangsparameter Rossatz		
Anzahl der Abwürfe		
n	1	[-]
Anzahl der Abwurfpunkte		
p	80	[-]
Anzahl Simulationen		
s	4	[-]
Anzahl Blöcke		
b	100	[-]
Gesamtanzahl an Trajektorien		
g	32000	[-]
Referenz Verformungs-Energie		
$E_{n0,5}$	10	[-]
$E_{t0,95}$	50	[-]
Oberflächenrauigkeit		
$R_l$	0,65	[-]
$R_T$	0,47	[-]
Gesteinsdichte		
$\rho$	2,7	[kg/m <sup>3</sup> ]
Reibungswinkel		
$\phi$	30	[°]

Wie bereits erwähnt wird für die Berechnung die gesamte vermessene Blockgrößenverteilung verwendet. Die Häufigkeit der einzelnen Blockmassen ist in der nächsten Abbildung, **Abb. 6.23**, dargestellt.



**Abb. 6.23:** Anzahl der unterschiedlichen Blockmassen der Blockverteilung

### 6.5.1 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Steinschlagsimulationen sind in der folgenden Tabelle, **Tab. 6.12** aufgelistet.

**Tab. 6.12:** Berechnungsergebnisse zum Szenario Blockverteilung

Simulation	Passing Trajectories [%]	Passing Trajectories [-]
n	[%]	[-]
1	5,97	478
2	5,98	478
3	5,91	473
4	6,51	521
Mittelwert	6,09	487
Maximalwert	6,51	521

#### Reichweite

Im Mittel erreichen bei einem Steinschlagereignis rund 6,09% die Bundesstraße 33 und stellen dadurch eine Gefahr für die Verkehrsteilnehmer dar.

Der Mittelwert dient wieder als Grundlage für die Risikoberechnung.

## 6.5.2 Risikoanalyse

Für die Risikoanalyse gelten dieselben Annahmen wie in Kapitel 6.4 Analyse mittels Bemessungsblock. Verändert wird hierbei nur die Vulnerabilität der Kfz- und Lkw-Lenker. Die Simulationen des Berechnungsansatzes Blockverteilung berücksichtigen eine gewisse Jährlichkeit (Preh et al. 2020). Die Wahrscheinlichkeit von einem kleinen Block mit geringerem getroffen zu werden, erhöht sich durch die Verwendung der Blockverteilung als Sturzblock. Während ein Treffer mit dem Bemessungsblock tödlich enden würde, kann davon ausgegangen werden, dass Personen in Fahrzeugen vermutlich vor Treffern mit kleineren Steinen ( $\emptyset = \text{circa } 0,1 \text{ m}$ ,  $M = 100 \text{ kg}$ ) geschützt sind. Weswegen die Vulnerabilität mit 0,3 zu bewerten ist (Lambert und Nicot 2011). Für den Radfahrer ist ein Treffer durch Steinblock, jeglicher Größe, mit großer Wahrscheinlichkeit tödlich. Hierfür wird ein Wert für die Vulnerabilität von 1,0 angegeben (Lambert und Nicot 2011).

### Risikobewertung für Kfz und Lkw

Für die Risikobewertung werden die in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Eingangsparameter vorausgesetzt:

**Tab. 6.13:** Eingangsparameter Risikobewertung für Kfz und Lkw

Eingangsparameter Risikobewertung					
f	r	Nv	Lv	v	V
[-]	[%]	[Fhz/d]	[m]	[km/h]	[-]
10	6,09	5318	4,5	100	0,3

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $N_r$  ergibt sich zu:

$$N_r = 10 * 0,0609 = 0,609 \quad (6.14)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers durch einen Sturzblock mit einem beliebigen Fahrzeug ergibt sich wie folgt:

$$P(S:T) = \frac{5318}{24} * \frac{4,5}{1000} * \frac{1}{100} = 0,00997 \quad (6.15)$$

Daraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Unfalles eines Fahrzeuges, ausgelöst durch Steinschlag mit:

$$P(S) = 1 - (1 - 0,00997)^{0,609} = 0,00608 \quad (6.16)$$

Das Risiko eines tödlichen Ausgangs bei einem Treffer eines Fahrzeuges durch einen Sturzblock berechnet sich wie folgt:

$$R = 0,00608 * 0,3 = 0,00182 \quad (6.17)$$

Das jährliche Risiko eines tödlichen Unfalls liegt also im Bereich von rund 1,82 Promille. Passiert man den Streckenabschnitt viermal täglich über ein gesamtes Jahr liegt die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles bei:

$$P(S: 4 * 365) = \frac{0,00608}{5318} * 4 = 4,573 * 10^{-6} \quad (6.18)$$

Das Risiko bei einem Unfall zu sterben, ergibt damit zu:

$$R = 4,573 * 10^{-6} * 0,3 = 1,37 * 10^{-6} \quad (6.19)$$

Das Risiko, durch einen mittels Steinschlag ausgelösten Unfall zu sterben, überschreitet dabei das definierte Schutzziel nicht (Kaindl 2021).

### Risikobewertung für Radfahrer

Die Durchschnittsgeschwindigkeit von Fahrradfahrern beträgt circa 16 km/h (Kasanmascheff 2021). Die Vulnerabilität bei einem Treffer durch den Bemessungsblock wird bei Radfahrern in diesem Berechnungsansatz mit 1,0 bewertet.

Für die Risikobewertung werden die in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Eingangsparameter vorausgesetzt:

**Tab. 6.14:** Eingangsparameter Risikobewertung Radfahrer

Eingangsparameter Risikobewertung					
f	r	Nv	Lv	v	V
[-]	[%]	[Fhz/d]	[m]	[km/h]	[-]
10	6,09	255	2	16	1

Die Eintrittswahrscheinlichkeit  $N_r$  ergibt sich zu:

$$N_r = 10 * 0,0609 = 0,609 \quad (6.20)$$

Die Wahrscheinlichkeit eines direkten Treffers durch einen Sturzblock mit einem beliebigen Fahrzeug ergibt sich wie folgt:

$$P(S:T) = \frac{255}{24} * \frac{2}{1000} * \frac{1}{16} = 0,00133$$

(6.21)

Daraus ergibt sich die jährliche Wahrscheinlichkeit eines Unfalles eines Fahrzeuges, ausgelöst durch Steinschlag mit:

$$P(S) = 1 - (1 - 0,00133)^{0,609} = 0,00081 \quad (6.22)$$

Das Risiko eines tödlichen Ausgangs bei einem Treffer durch einen Sturzblock berechnet sich wie folgt:

$$R = 0,00081 * 1,0 = 0,00081 \quad (6.23)$$

Das jährliche Risiko eines tödlichen Unfalls liegt also im Bereich von 0,8 Promille. Passiert man den Streckenabschnitt viermal täglich über ein gesamtes Jahr liegt die Wahrscheinlichkeit eines Unfalles mit tödlichem Ausgang bei:

$$P(S: 4 * 365) = \frac{0,00081}{255} * 4 = 1,27 * 10^{-5} \quad (6.24)$$

Das Sterberisiko überschreitet dabei das in (Kaindl 2021) definierte Schutzziel von 1 zu 100.000. Um das Risiko entlang des Streckenabschnittes zu verringern, müssen also Maßnahmen gesetzt werden.

### 6.5.3 Auswirkung auf Sicherungsmaßnahmen

Aufgrund der sich ergebenden Sprunghöhen im Bereich der Straße musste die Planung und die Bemessung der Sicherungsmaßnahmen auf mehrere Berechnungsschnitte aufgeteilt werden. Um die Straße in Zukunft vor Steinschlag zu schützen, wurde eine Kombination aus drei Steinschlagnetzen gewählt. In **Tab. 6.15** sind die Ergebnisse des Bemessungsschnittes entlang der Straße dargestellt. Sinngemäß lässt sich daraus keine Netzhöhe errechnen.

**Tab. 6.15:** Berechnungsergebnisse am Screen entlang der B33.

Simulation	Kinetische Energie P95 [kJ]	Kinetische Energie Max [kJ]	Sprunghöhe P95 [m]
n	[kJ]	[kJ]	[m]
1	69,89	228,00	8,00
2	66,19	173,90	7,94
3	63,75	227,70	6,48
4	68,31	289,40	7,27
Mittelwert	67,04	229,75	7,42
Maximalwert	69,89	289,4	8,00

### 6.5.4 Sicherungsmaßnahmen

Im östlichen Bereich des projektierten Gebietes ist die größte Gefährdung der B33 erkennbar. Hier werden drei Steinschlagnetzreihen hintereinander platziert, um den Großteil der Gesteinsbrocken aufzufangen und das Risiko für die Straßenbenutzer zu minimieren. Um die Simulationszeit zu reduzieren, wurden in diesem Abschnitt 20 Abwurfpunkte mittels Polygonzug bestimmt. Die Ablösepunkte sowie die geplanten Netzreihen sind in **Abb. 6.23** dargestellt. Die Eingangsparameter für die östlichen Bereiche sind in der folgenden Tabelle, **Tab. 6.16**, ersichtlich:

**Tab. 6.16:** Eingangsparameter Ost.

Eingangsparameter Rossatz Ost		
Anzahl der Abwürfe		
n	1	[-]
Anzahl der Abwurfpunkte		
p	20	[-]
Anzahl Simulationen		
s	5	[-]
Anzahl Blöcke		
b	100	[-]
Gesamtanzahl an Trajekturen		
g	10000	[-]
Referenz Verformungs-Energie		
$E_{n0,5}$	10	[-]
$E_{t0,95}$	50	[-]
Oberflächenrauigkeit		
$R_l$	0,65	[-]
$R_T$	0,47	[-]
Gesteinsdichte		
$\rho$	2,7	[kg/m <sup>3</sup> ]
Reibungswinkel		
$\phi$	30	[°]

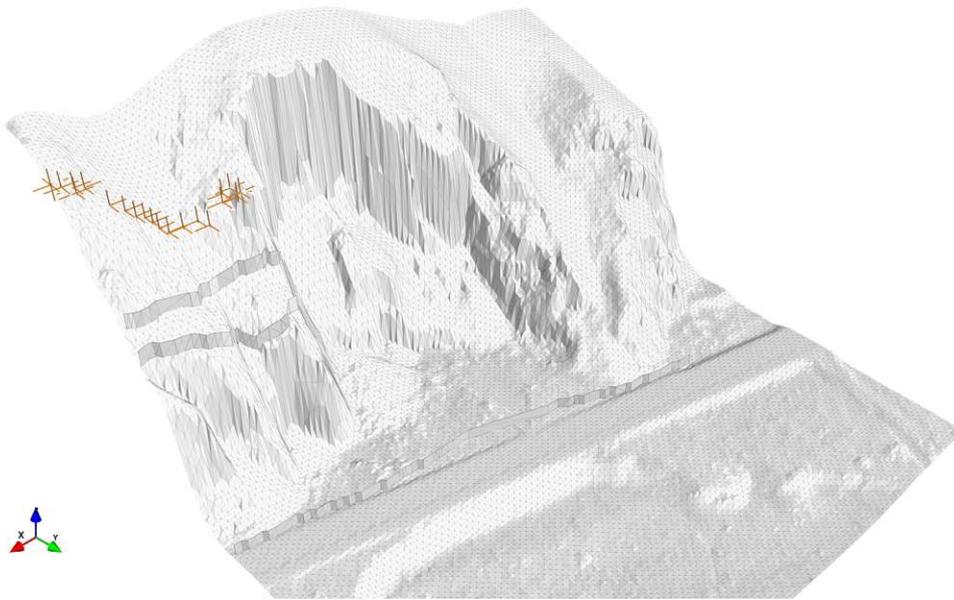


Abb. 6.23: Ablösepunkte und die drei Steinschlagschutznetze in hellgrau

### 6.5.5 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Berechnungen der drei Netzreihen sind in den folgenden Kapiteln dargestellt.

#### Netzreihe 1

Die Sprunghöhen sowie die kinetischen Energien für die erste Netzreihe sind in **Tab. 6.17**: Simulationsergebnisse: **Tab. 6.17** aufgelistet:

Tab. 6.17: Simulationsergebnisse:

Simulation	Kinetische Energie P95	Kinetische Energie Max	Sprunghöhe P95
n	[kJ]	[kJ]	[m]
1	88,50	529,30	3,80
2	81,30	436,90	4,10
3	91,20	382,20	3,90
4	81,30	423,70	3,90
5	85,20	587,80	3,80
Mittelwert	85,50	472,0	3,90
Maximalwert	91,20	587,8	4,10

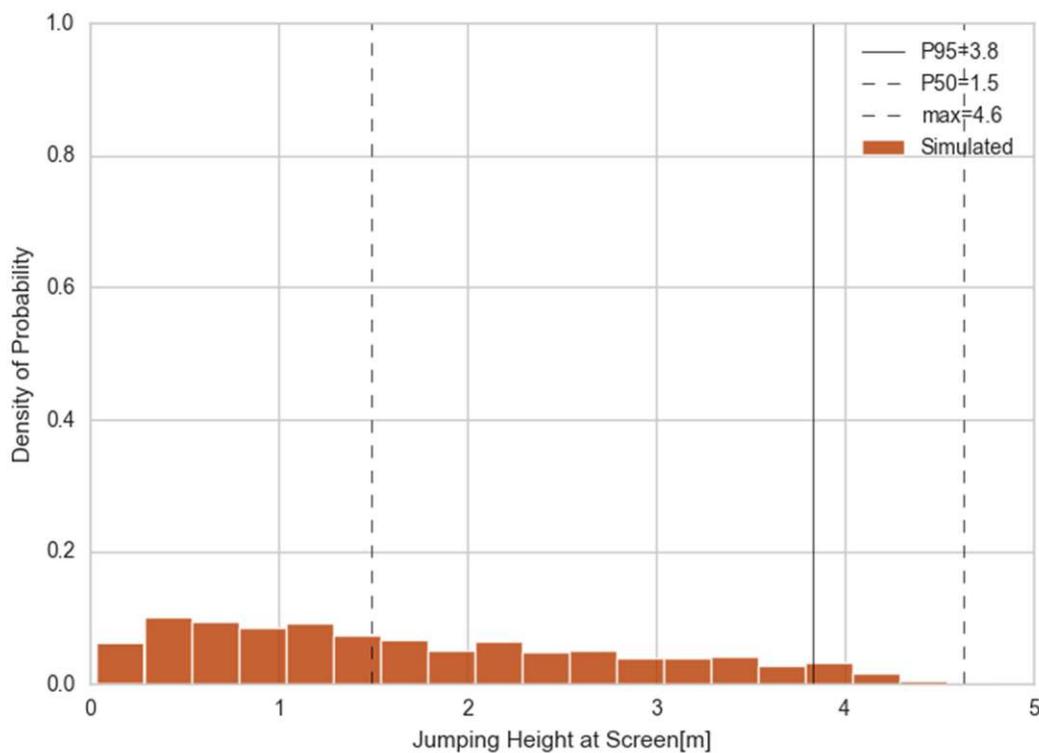
## Sprunghöhe

Die Sprunghöhen des 95% Fraktils bewegen sich im Bereich zwischen 3,8 m und 4,1 m. **Abb. 6.24** zeigt die Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchganges.

Für die Bemessung des konstruktiven Steinschlagschutzes wird der maximal Wert verwendet. Durch die Schadensfolgeklasse CC2 ergibt sich eine erforderliche Netzhöhe  $h_{E,d}$  von:

$$h_{E,d} = 4,1 * 1,1 = 4,5 \text{ m} \quad (6.25)$$

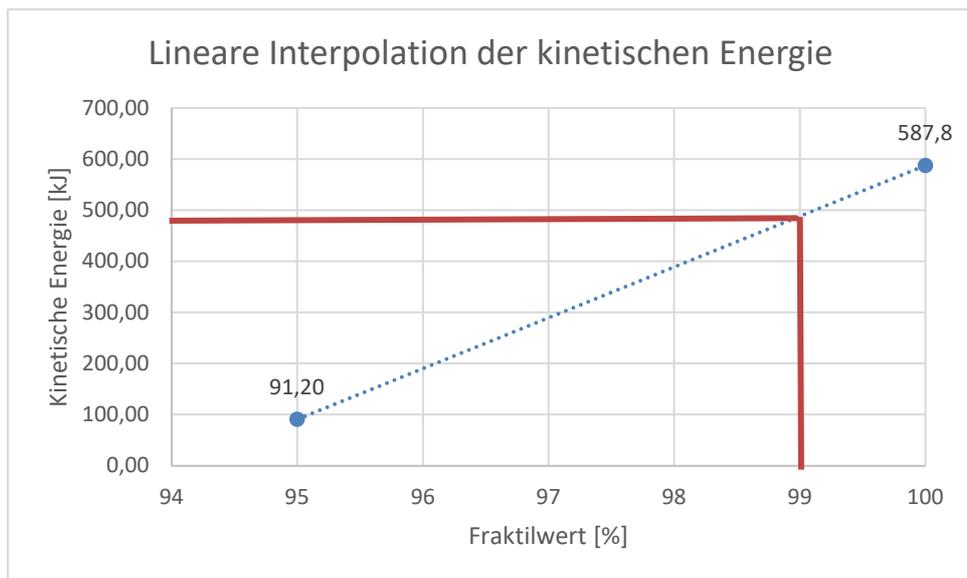
Die Mindestnetzhöhe ergibt sich somit zu 4,5 m.



**Abb. 6.24:** Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchganges

## Aufprallenergie

Der Wertebereich für die maximale kinetische Energie am Steinschlagnetz erstreckt sich von 382,2 – 587,8 kJ. Die laut ONR 24810 benötigte kinetische Energie des 99% Fraktils wird hier zwischen dem 95% - Fraktile und dem Maximalwert linear interpoliert, siehe **Abb. 6.25**. Für die Bemessung wird der Wert von 488,5 kJ herangezogen.



**Abb. 6.25:** Lineare Interpolation der kinetischen Energie am Berechnungsscreen

Als Schadensfolgeklasse wird CC2 angesetzt, womit sich ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,05 ergibt. Damit ergibt sich nach Formel (6.26) ein Bemessungswert der Aufprallenergie  $T_{E,d}$  zu:

$$T_{E,d} = 488,5 * 1,05 = 513 \text{ kJ} \quad (6.26)$$

Für die Sicherung der Bundesstraße wird ein Steinschlagschutznetz, mit einer aufnehmbaren Energie von mindestens 513 kJ, benötigt.

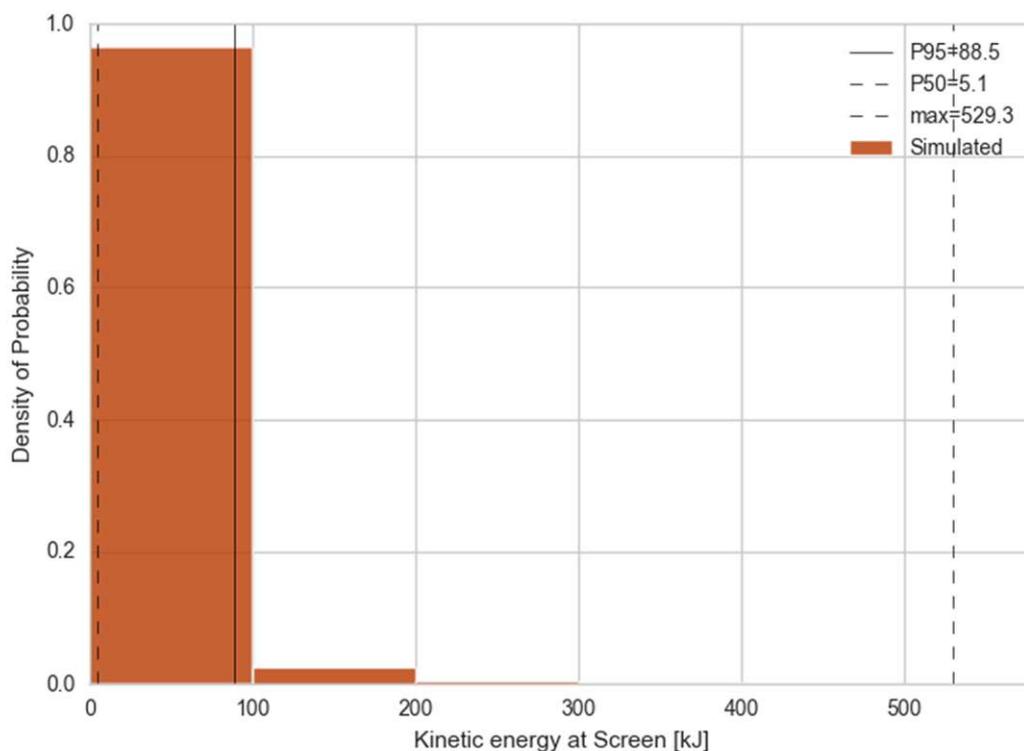


Abb. 6.26: Kinetische Energieverteilung

Abb. 6.26 zeigt die kinetische Energieverteilung eines Simulationsdurchganges. Klar erkenntlich ist die hohe Differenz zwischen P95 und der maximal simulierten kinetischen Energie.

### Netzreihe 2

Die zweite Netzreihe wird unterhalb der ersten Reihe angebracht. Die Sprunghöhe sowie die kinetischen Energien, der fünf Simulationsdurchgänge, sind in Tab. 6.18 für die zweite Netzreihe dargestellt:

Tab. 6.18: Berechnungsergebnisse an Netzreihe 2:

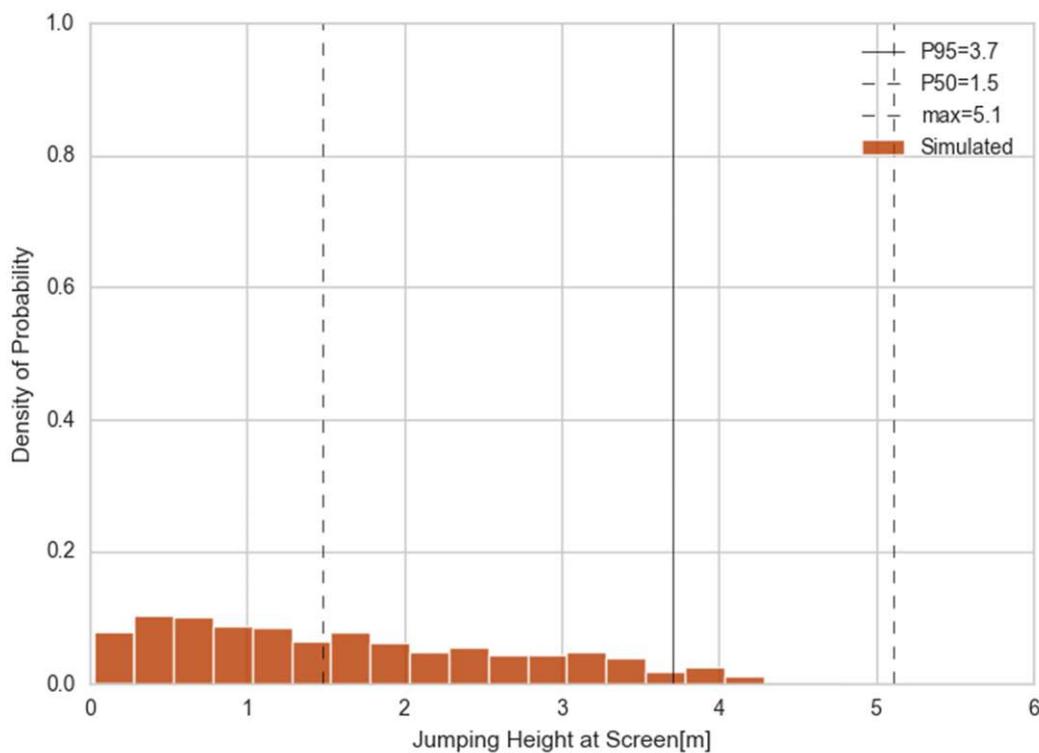
Simulation	Kinetische Energie P95 [kJ]	Kinetische Energie Max [kJ]	Sprunghöhe P95 [m]
n	[kJ]	[kJ]	[m]
1	63,25	494,20	3,70
2	66,50	342,20	3,70
3	70,40	439,40	3,82
4	70,60	533,30	3,70
5	72,20	446,90	3,68
Mittelwert	68,59	451,2	3,72
Maximalwert	72,20	533,3	3,82

## Sprunghöhe

Die Sprunghöhen des 95% Fraktils bewegen sich im Bereich zwischen 3,68 m und 3,82 m. Die Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchganges ist in **Abb. 6.27** dargestellt. Für die Bemessung des konstruktiven Steinschlagschutzes wird der maximal Wert verwendet. Durch die Schadensfolgeklasse CC2 ergibt sich eine erforderliche Netzhöhe  $h_{E,d}$  von:

$$h_{E,d} = 3,82 * 1,1 = 4,20 \text{ m} \quad (6.27)$$

Die Mindestnetzhöhe ergibt sich somit zu 4,20 m.



**Abb. 6.27:** Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchganges

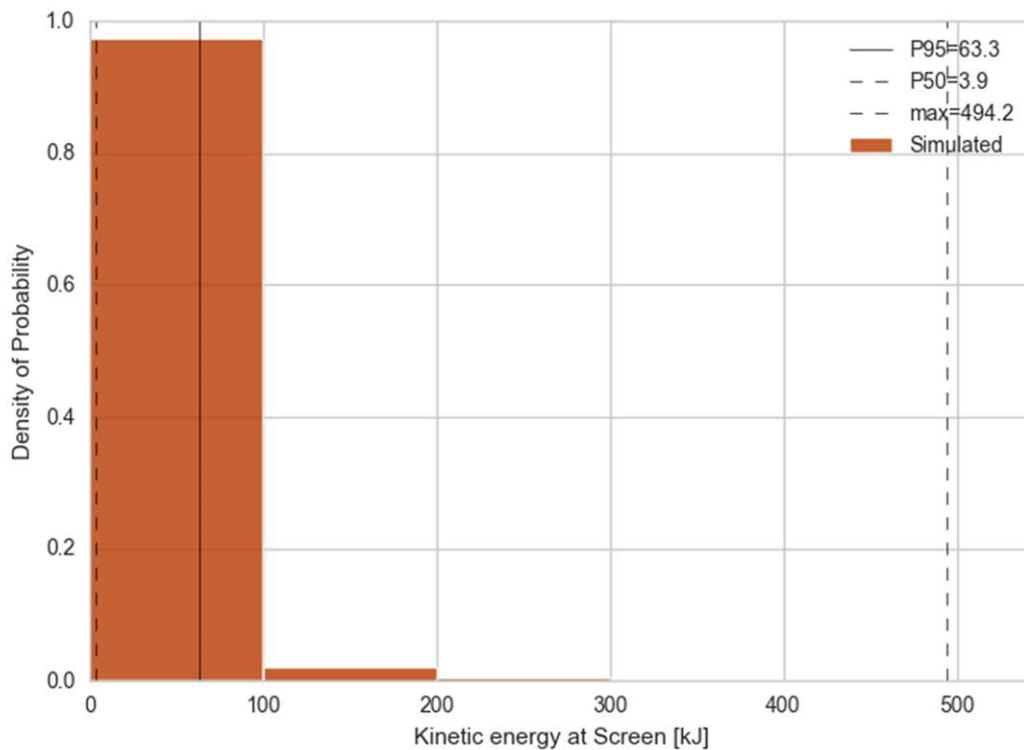
## Aufprallenergie

Der Wertebereich für die maximale kinetische Energie am Steinschlagnetz erstreckt sich von 342,0 – 533,3 kJ. Die laut ONR 24810 benötigte kinetische Energie des 99% Fraktil wird hier zwischen dem 95% - Fraktile und dem Maximalwert linear interpoliert. Für die Bemessung wird der Wert von 441,1 kJ herangezogen. Die maximale simulierte kinetische Energie beträgt 494,2 kJ und ist in **Abb. 6.28** dargestellt. Als Schadensfolgeklasse wird CC2 angesetzt, womit sich ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,05 ergibt.

Damit ergibt sich nach Formel (6.28) ein Bemessungswert der Aufprallenergie  $T_{E,d}$  zu:

$$T_{E,d} = 441,1 * 1,05 = 463,2 \text{ kJ} \quad (6.28)$$

Für die Sicherung der Bundesstraße wird ein Steinschlagschutznetz, mit einer aufnehmbaren Energie von mindestens 463,2 kJ, benötigt.



**Abb. 6.28:** Kinetische Energieverteilung des Simulationdurchgangs mit der maximalen kinetischen Energie

### Netzreihe 3

Die dritte Netzreihe wird entlang der Bundestrasse 33 angebracht. Die simulierten Ergebnisse sind in **Tab. 6.19** zusammengefasst.

**Tab. 6.19:** Berechnungsergebnisse an Netzreihe 3:

Simulation	Kinetische Energie P95	Kinetische Energie Max	Sprunghöhe P95
n	[kJ]	[kJ]	[m]
1	16,30	118,90	2,07
2	19,90	125,90	2,20
3	15,40	126,50	2,19
4	22,37	179,02	1,96
5	21,97	150,20	2,16
Mittelwert	19,19	140,1	2,12
Maximalwert	22,37	179,02	2,20

### Sprunghöhe

Die Sprunghöhe des 95% Fraktils bewegen sich im Bereich zwischen 1,96 m und 2,20 m. **Abb. 6.29** zeigt die Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchganges, mit den davor positionierten Netzreihen. Für die Bemessung des konstruktiven Steinschlagschutzes wird der maximal Wert verwendet. Durch die Schadensfolgeklasse CC2 ergibt sich eine erforderliche Netzhöhe  $h_{E,d}$  von:

$$h_{E,d} = 2,2 * 1,1 = 2,42 \text{ m} \quad (6.29)$$

Die Mindestnetzhöhe ergibt sich somit zu 2,42 m.

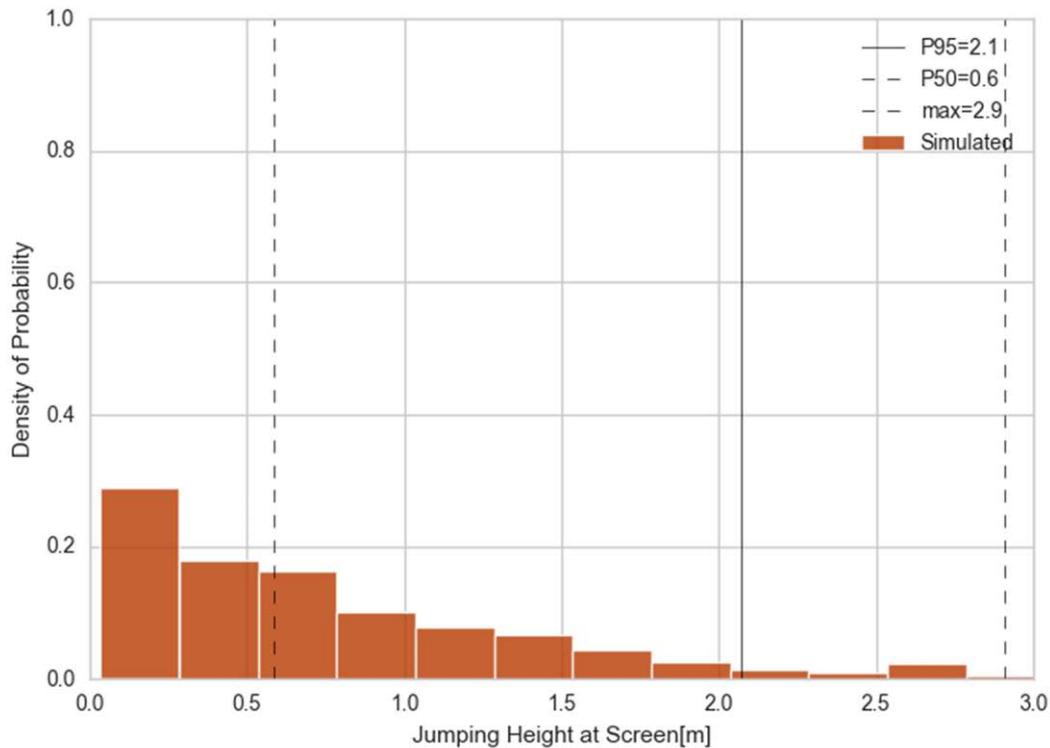


Abb. 6.29: Sprunghöhenverteilung des ersten Simulationsdurchgangs

### Aufprallenergie

Der Wertebereich für die kinetische Energie am Steinschlagnetz erstreckt sich von 118,9 – 179,0 kJ. Die laut ONR 24810 benötigte kinetische Energie des 99% Fraktiles wird hier zwischen dem 95% - Fraktile und dem Maximalwert linear interpoliert. Für die Bemessung wird der Wert von 147,7 kJ herangezogen. Exemplarisch ist die Energieverteilung in **Abb. 6.30** dargestellt. Als Schadensfolgeklasse wird CC2 angesetzt, womit sich ein Teilsicherheitsbeiwert von 1,05 ergibt. Damit ergibt sich nach Formel (6.26) ein Bemessungswert der Aufprallenergie  $T_{E,d}$  zu:

$$T_{E,d} = 147,7 * 1,05 = 155,1 \text{ kJ} \quad (6.30)$$

Für die Sicherung der Bundesstraße wird ein Steinschlagnetz, mit einer aufnehmbaren Energie von mindestens 155,1 kJ, benötigt.

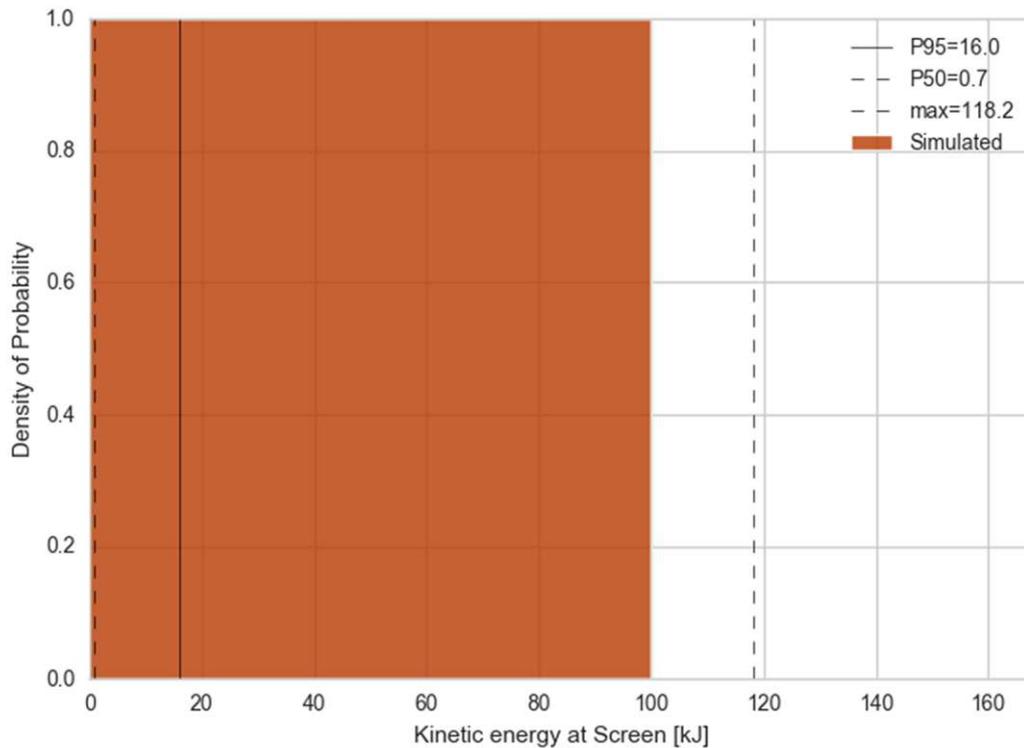


Abb. 6.30: Kinetische Energieverteilung eines Simulationsdurchgangs

### 6.5.6 Auswirkung der Sicherungsmaßnahmen

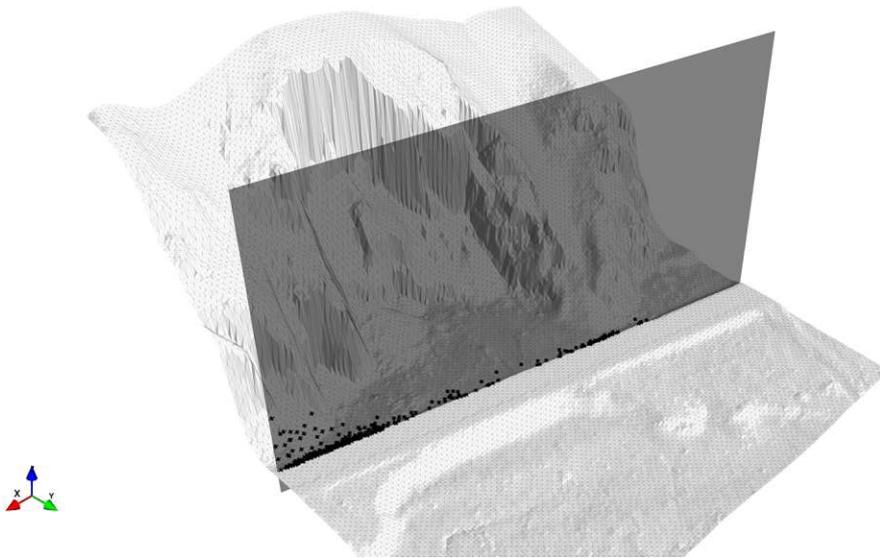
Um die Wirkung des Steinschlagschutzes quantifizieren zu können, werden die Steinschlagsimulationen vor und nach Errichtung der Schutzmaßnahmen verglichen und diese sind in **Tab. 6.20** dargestellt.

Tab. 6.20: Vergleich der Passing Trajectories ohne und mit Schutzmaßnahmen.

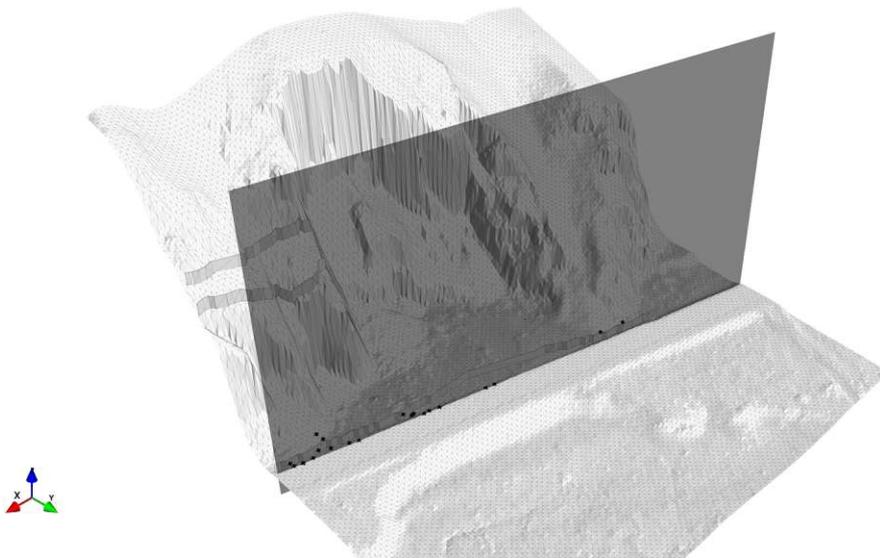
	ohne Maßnahmen	mit Maßnahmen
Simulation	Passing Trajectories	Passing Trajectories
n	[%]	[%]
1	5,97	0,27
2	5,98	0,36
3	5,91	0,17
4	6,51	0,32
Mittelwert	6,09	0,28
Maximalwert	6,51	0,36

Die Wirkung der Schutzmaßnahmen ist klar ersichtlich. Durch die Errichtung der drei Reihen an Steinschlagschutznetzen verringert sich der Prozentsatz an Gesteinsbrocken, die die

Bundestraße erreichen könnten auf maximal 0,36%. Eine Risikobewertung der gegebenen Situation wird dadurch obsolet. Deutlich erkennbar ist dies auch an den zwei nachfolgenden Abbildungen. In **Abb. 6.31** ist die Situation ohne Maßnahmen dargestellt und in **Abb. 6.32** mit Sicherungsmaßnahmen.



**Abb. 6.31:** Durschlagspunkte (schwarz) entlang des Screens (grau) ohne Maßnahmen



**Abb. 6.32:** Durschlagspunkte (schwarz) entlang des Screens (grau) mit Maßnahmen

### Zusammenfassung der Sicherungsnetze

Für die Sicherung der B33 werden folgenden Mindestanforderungen an die Steinschlagnetze gestellt. Die Sicherungsmaßnahmen sind in Beilage 6 – Szenario Blockverteilung dargestellt.

- Netzreihe 1: Mindesthöhe 4,20 m, Mindestenergie 513 kJ
- Netzreihe 2: Mindesthöhe 4,20 m, Mindestenergie 463 kJ
- Netzreihe 3: Mindesthöhe 2,42 m, Mindestenergie 155 kJ

## 7 Vergleich der beiden Analysen

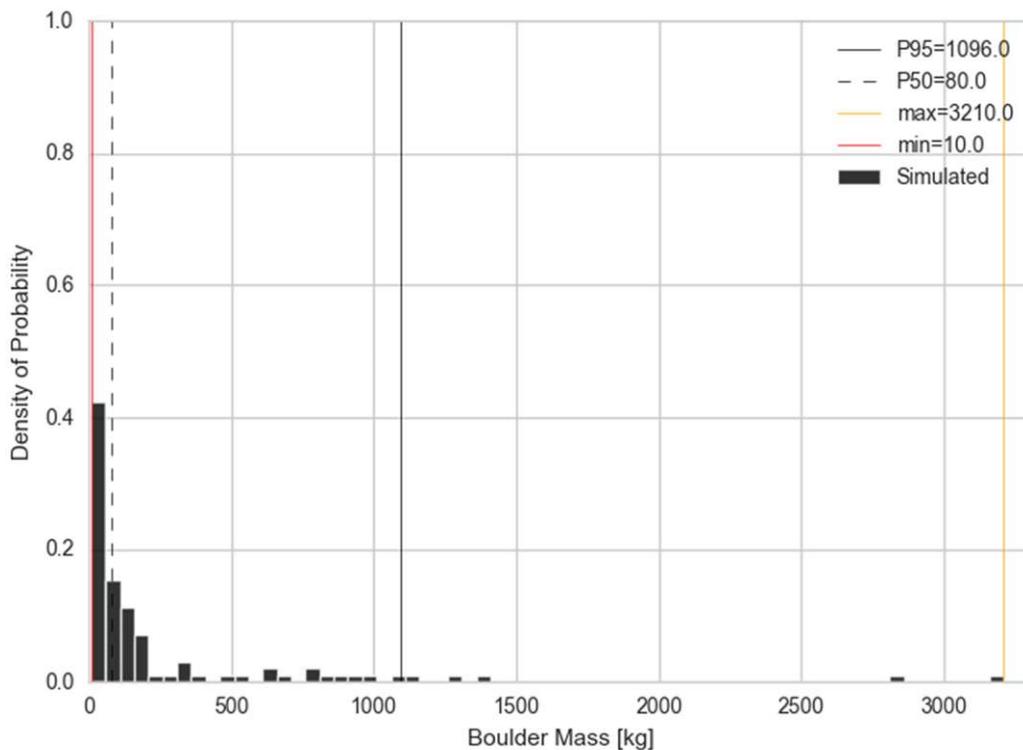
Durch die Wahl eines Screens entlang der Straße können nicht nur die Schutzmaßnahmen in Hinblick auf ihre Wirksamkeit überprüft, sondern es können auch die beiden Berechnungsansätze (Bemessungsblock und Blockverteilung) bewertet und miteinander verglichen werden.

Während sich die Reichweite und die Anzahl der, für die Verkehrsteilnehmer potenzielle gefährlichen, Sturzblöcke im Mittel fast kaum unterscheiden, ist bei den Sprunghöhen und bei der kinetischen Energieverteilung ein klarer Unterschied erkennbar.

Erkennbar ist auch der unterschiedliche Aufwand bei Sicherungsmaßnahmen. Während beim Szenario Bemessungsblock nur eine Netzreihe nötig ist, muss beim Szenario Blockverteilung im östlichen Bereich eine Sicherungskette, bestehend aus drei Netzreihen unterschiedlicher Höhe, errichtet werden.

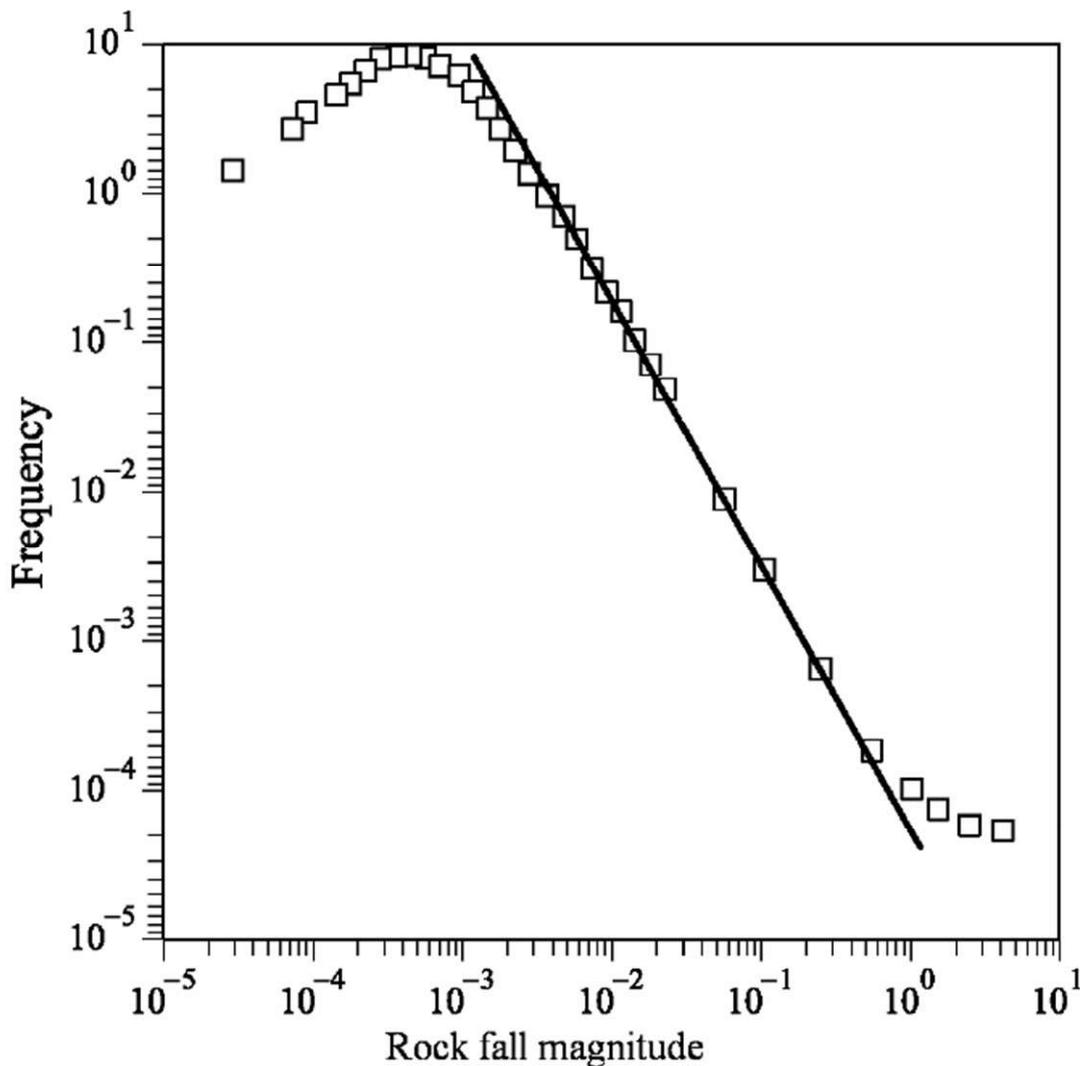
### Bemessungsblock vs. Blockgrößenverteilung

Die Blockgrößenverteilung bzw. die Blockmassenverteilung der Schutthalde zeigt deutlich, dass die Anzahl der kleineren Steine mit einem Gewicht von 200 kg – 10 kg mit fast 75% Anteil den Hauptteil der Blöcke darstellen, siehe **Abb. 7.1**.



**Abb. 7.1:** Blockgrößenverteilung der vermessenen Schutthalde

Dies lässt den Schluss zu, dass die Ereignishäufigkeit von Steinschlagereignissen mit kleineren Blockgrößen deutlich höher ist als jene mit großen Blockgrößen. Dies deckt sich auch mit der in (Lambert und Nicot 2011) beschriebenen Beziehung zwischen Häufigkeit und dem Ausmaß von Steinschlagereignissen. Diese Beziehung ist auch in abgebildet **Abb. 7.2** .



**Abb. 7.2:** Beziehung zwischen Ausmaß und Häufigkeit von Steinschlagereignissen (Lambert und Nicot 2011 S.90)

Durch den Ansatz des Bemessungsblockes wird sowohl dieser Teil als auch der größte Block nicht berücksichtigt. Der Vergleich des maximalen Blockes mit einer Masse von 3,21 to und dem Bemessungsblock mit einer Masse von 1,43 to macht deutlich, welche Verringerung durch den Ansatz des Bemessungsblockes entsteht. Es erfolgt also bereits vor der Berechnung eine Verminderung der Eingangsparameter durch die Wahl des Bemessungsblockes in Abhängigkeit von der Ereignishäufigkeit. Durch die Simulation der gesamten Blockverteilung werden ebenfalls Ungenauigkeiten bei der Vermessung der Schutthalde verringert (Preh et al. 2020).

Während des Sturzes erfährt der Block eine Transformation der potenziellen Energie in kinetische Energie. Sturzblöcke mit mehr Masse erreichen eine höhere kinetische Energie. Dies nimmt direkten Einfluss auf dessen Reichweite (Kuehne 2005). Dadurch gehen in der Simulation wichtige Ergebnisse verloren bzw. werden nicht berücksichtigt. Maximale Energien vom größten Block und maximale Sprunghöhen von kleineren Blöcken werden ignoriert. Aus der Annahme, dass die Ereignishäufigkeit von Steinschlagereignissen mit kleineren Blockgrößen größer ist, könnten durch den Ansatz des Bemessungsblockes wichtige Ergebnisse für die Bemessung von Schutzmaßnahmen fehlen und somit zu Schäden an Schutzmaßnahmen führen. (Preh et al. 2020).

### Kinetische Energie

Als Eingangsgröße ist die kinetische Energieverteilung eine maßgebliche Größe für die Berechnung und Bemessung von Schutzmaßnahmen. Für die Bemessung von Netzen wird dabei lt. ONR 24810 das 99% Fraktile der Energieverteilung verwendet. Wie in den nächsten Abbildungen, **Abb. 7.3** und **Abb. 7.4** beziehungsweise in **Tab. 7.1** erkennbar, liegt zwischen den beiden Szenarien ein deutlicher Unterschied in den maximalen Energien sowie erwartungsgemäß auch in der Energieverteilung. Durch die maximale Blockmasse, die im Berechnungsansatz Blockverteilung auch berücksichtigt wird, kann somit auch der Worst-Case-Fall abgedeckt werden. Durch die hohe Anzahl an kleinen Gesteinsbrocken ergeben sich, unter Annahme eines linearen Zusammenhanges, deutlich kleine Werte für das 99% Fraktile. Eine sinnvolle Bemessung nach ONR24810 ist daher nicht mehr gegeben.

**Tab. 7.1:** Vergleich der Energieverteilungen der Berechnungsansätze.

Bemessungsblock			Blockverteilung		
Kinetische Energie P98	Kinetische Energie Max	Kinetische Energie P99	Kinetische Energie P98	Kinetische Energie Max	Kinetische Energie P99
[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]	[kJ]
454,1	643,10	548,60	68,8	700,4	384,6

Beim Berechnungsansatz Blockverteilung könnte, als konservativer Ansatz, die Bemessung der Schutzmaßnahmen mit der maximalen kinetischen Energie erfolgen.

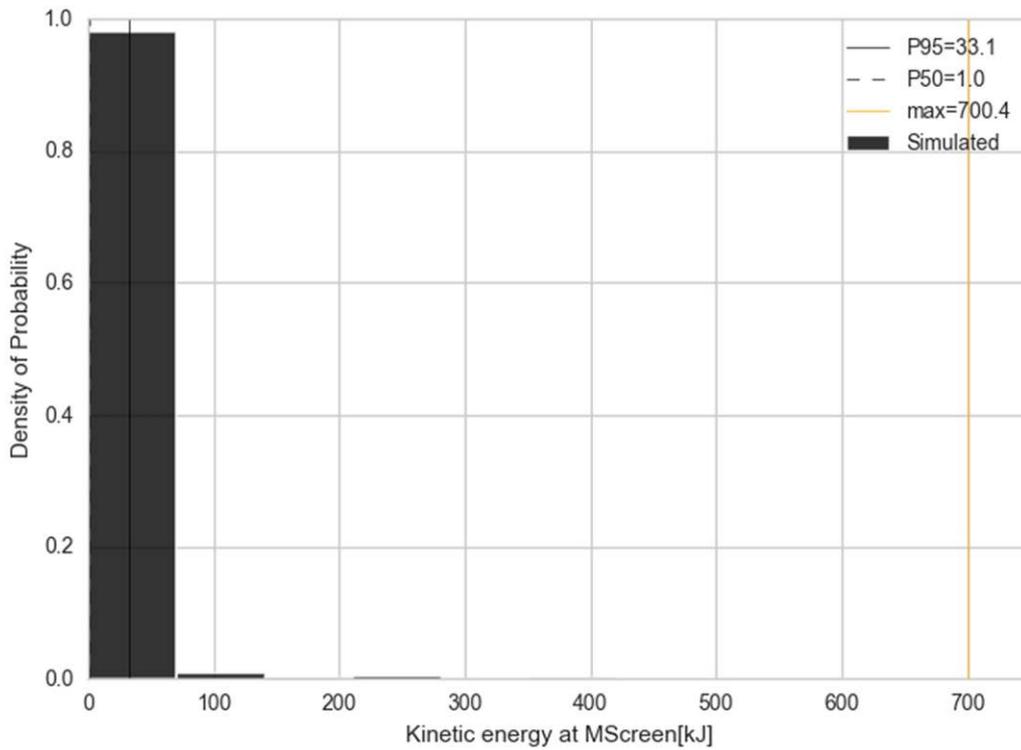


Abb. 7.3: Kinetische Energieverteilung des Berechnungsansatzes Blockgrößenverteilung

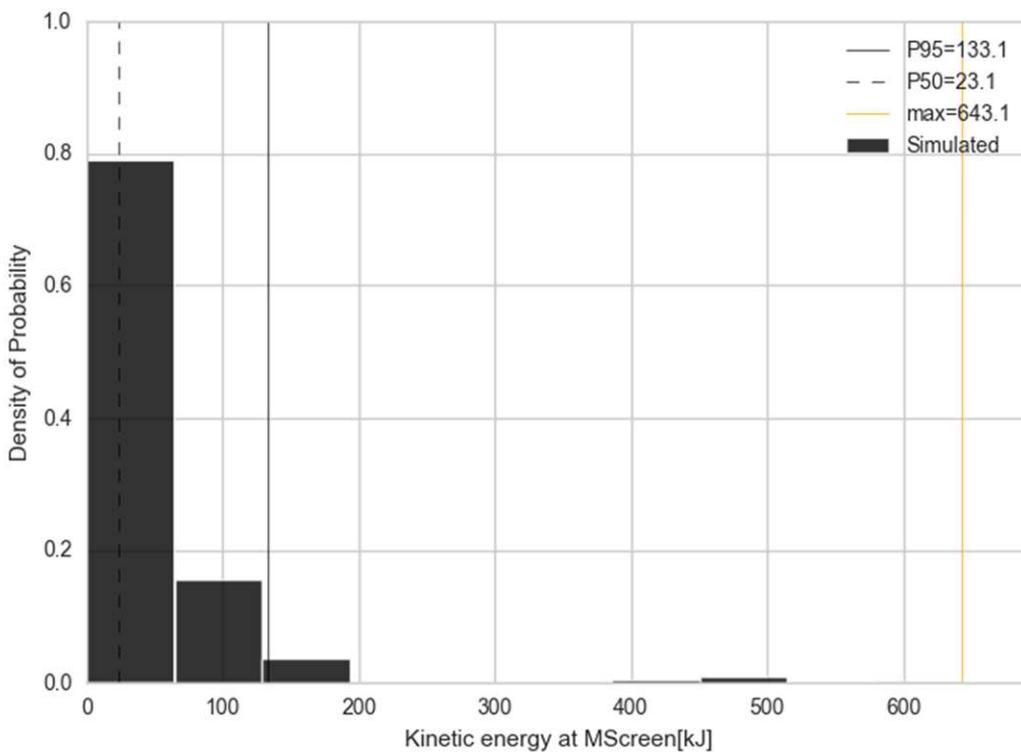


Abb. 7.4: Kinetische Energieverteilung des Berechnungsansatzes Bemessungsblockes

## Sprunghöhe

Ähnlich wie bei den kinetischen Energien ergeben sich bei der Analyse der Sprunghöhen deutlich differenzierte Verteilungen und deutlich unterschiedliche Maximalwerte für die von der ONR 24810 geforderte P95 Sprunghöhe. Aufgrund der großen Sprunghöhen in Szenario Blockgrößenverteilung am Bemessungsschnitt entlang der Straße, wurde schnell ersichtlich, dass eine technische Lösung zur Sicherung der Straße mittels einer Netzreihe nicht möglich ist. Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund der Geländetopografie und der steil abfallenden Felskante im östlichen Bereich selbst bei geringen Energien hohe Sprunghöhen erreicht werden. Die hohen Sprunghöhen ergeben sich vor allem aus dem Geländesprung und wirken sich dennoch nachteilig auf die Bemessung der Sicherungsmaßnahmen aus. Der Vergleich der Maximalwerte der Sprunghöhe ist in **Tab. 7.2** dargestellt.

**Tab. 7.2:** Vergleich der Maximalwerte der Sprunghöhen P95 der zwei Berechnungsansätze.

Bemessungsblock	Blockverteilung
Sprunghöhe P95 Maximalwert	Sprunghöhe P95 Maximalwert
[m]	[m]
1,93	8,00

Durch die Kombination von drei Netzreihen, wie für das Szenario Blockverteilung vorgesehen, kann dieser Effekt reduziert bzw. egalisiert werden. Besonderem Augenmerk kommt also der Platzierung der Sicherungsnetzte zu.

## Reichweite

Betrachtet man die Reichweite und somit die Wahrscheinlichkeit, dass Sturzblöcke, unabhängig deren Masse, die Straße erreichen, so zeigen beiden Berechnungsansätze im Mittel nahezu ähnliche Werte, siehe **Tab. 7.3**. Der Grund dafür ist mit großer Wahrscheinlichkeit in der Topografie zu suchen. Aufgrund der steilabfallenden Felswände und des kurzen Transitbereichs landet ein beachtlicher Teil der simulierten Gesteinsbrocken, unabhängig dessen Volumen, auf der B33.

**Tab. 7.3:** Vergleich der Passing Trajectories der zwei Berechnungsansätze.

Bemessungsblock	Blockverteilung
Passing Trajectories	Passing Trajectories
[%]	[%]
5,15	6,09

## Risiko

Beim Vergleich des Risikos für die Straßenteilnehmer findet das von (Kaindl 2021) definierte Schutzziel Verwendung. Das Sterberisiko darf dabei entlang des untersuchten Straßenabschnittes beim viermaligen, täglichen Passieren 1 zu 100.000 nicht überschreiten. Einfluss auf die Berechnung des Sterberisiko hat dabei auch die Vulnerabilität. Diese wird

beim Fahrradfahrer unabhängig des Berechnungsansatzes mit 1,0 gewählt. Auffällig ist dabei, dass das Sterberisiko für den Fahrradfahrer beim Ansatz des Bemessungsblockes um 20% niedriger als beim alternativen Berechnungsansatz mit Blockgrößenverteilung.

Beim Automobilverkehr kann aufgrund des Schutzes durch die Fahrzeughülle die Vulnerabilität beim Ansatz des Bemessungsblockes mit 0,5 und beim Ansatz der Blockgrößenverteilung mit 0,3 beziffert werden. Der Unterschied zwischen den beiden Werten ergibt sich aufgrund der Annahme, dass Personen in Fahrzeugen vor kleineren Steinen geschützt sind. Grund für die Differenzen sind einerseits die in Berechnungsansatz Blockverteilung höhere Reichweite der Sturzblöcke sowie auch die Vulnerabilität in Hinblick auf den Automobilverkehr. Die Ergebnisse des Sterberisikos sind in der nachstehen Tabelle, **Tab. 7.4**, angeführt.

**Tab. 7.4:** Vergleich des Sterberisikos der Berechnungsansätze

Sterberisiko	Bemessungsblock	Blockverteilung
Fahrradverkehr	$1,07 \cdot 10^{-5}$	$1,27 \cdot 10^{-5}$
Automobilverkehr	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-6}$

## 8 Schlussfolgerung

Durch die Simulation der beiden Berechnungsansätze kann der Unterschied in den Ergebnissen klar gezeigt werden. Die Reduzierung der gesamten Blockgrößenverteilung auf einen einzelnen Block hat Vorteile für die Bemessung und vereinfacht daneben auch den Rechenvorgang. Aus den oben dargestellten Ergebnissen wird jedoch ersichtlich, mit welchen Unsicherheiten der derzeitige Ansatz lt. ONR 24810 behaftet ist. Weiters ist die Abhängigkeit der Bemessungsblockgröße von der Ereignishäufigkeit ein äußerst kritisch zu betrachtender Punkt, da in Österreich kaum Aufzeichnungen über Steinschlagereignisse vorhanden sind. Die Ereignishäufigkeit kann daher oftmals nur aufgrund von Feldbegehungen und Feldaufnahmen abgeschätzt werden. So ergeben sich, neben der Ungenauigkeit beim Vermessen der Schutthalde, erste Unsicherheiten bei der Berechnung. Selbst mit Teilsicherheitsbeiwerten können die auf Grundlage des Bemessungsblockes bemessenen Steinschlagschutznetze die Aufprallenergie des Maximalblocks (vgl. V100 = ca. 3,21 t) nicht aufnehmen.

Deutlich realistischere Werte liefern dabei die Simulationen mit dem gesamten Spektrum an Gesteinsblöcken. Hier können auch unterschiedliche Jährlichkeiten abgebildet werden. Für die Bemessung der Schutzbauwerke, auf Basis der Simulationen mit der Blockgrößenverteilung, lässt sich feststellen, dass bei der Übertragung des Ansatzes der ONR 24810 große Vorsicht geboten ist. Durch die hohe Anzahl an kleineren Gesteinsbrocken ergibt sich auch eine Verschiebung der kinetischen Energieverteilung, sowie der Sprunghöhenverteilung. Mehr als 75% der vermessenen Sturzblöcke weisen eine Masse geringer als 200kg auf. Es folgt dadurch eine Reduzierung der charakteristischen Einwirkungsenergie, sowie der charakteristischen Sprunghöhe. Die lt. ONR 24810 geforderten Fraktilwerte für die Bemessung der Sicherungsmaßnahmen können daher nicht mehr sinnvoll angewendet werden. Sicherungsnetze würden dabei deutlich unterdimensioniert werden. Hierfür könnte als sehr konservativer Ansatz die Bemessung mit der maximalen Aufprallenergie erfolgen.

Als erste Abschätzung in Hinblick auf Reichweite und erforderliche Sicherungsmaßnahmen könnte auch in Zukunft der Bemessungsblock Verwendung finden. Für genauere Risikoanalysen in besonders gefährdeten Gebieten, zum Beispiel in der Nähe wichtiger Infrastruktureinrichtungen oder Straßen, Rad- bzw. Wanderwegen, könnte eine deutlich aufwendigere Simulation mit der gesamten Blockverteilung von erheblichem Vorteil sein. Dafür müssen allerdings erst die notwendigen normativen Bedingungen, in Hinblick auf die Bemessung der Schutzmaßnahmen, geschaffen werden.

Weiters ist bei den beiden Berechnungsansätzen die Vulnerabilität differenziert zu betrachten. Während die Vulnerabilität von Radfahrern oder auch Fußgängern bei beiden Ansätzen mit 1,0 beziffert werden kann, muss beim KFZ-Lenker eine Unterscheidung getroffen werden. Fahrzeuge bieten gegen kleine Gesteinsbrocken sicherlich ausreichend Schutz vor einem tödlichen Aufprall, weswegen beim Berechnungsansatz Blockgrößenverteilung die Vulnerabilität anders zu bewerten ist als beim Ansatz Bemessungsblock. Hierfür finden sich auch in der einschlägigen Literatur kaum Wertebereiche. Da besonders für den Radverkehr die Gefahr besteht tödliche Verletzungen auch bei Treffern von Gesteinsbrocken mit geringer Masse zu erleiden, sollte daher in

Zukunft über eine Simulation mittels Blockverteilung entlang vielbefahrenen Radwegen nachgedacht werden.

Schlussendlich erfordern Simulation und Berechnung von Steinschlagereignissen eine hohe Genauigkeit und fundierte Kenntnisse der relevanten Parameter und Einflussgrößen. Die Berechnung von Steinschlagtrajektoren hat nur bedingt Sinn, wenn keine klaren Eingangparameter definiert werden können. Als natürlicher Prozess unterliegt Steinschlag Schwankungen, die auch bei unzählig durchgeführten Simulationen nicht abgedeckt werden können. Hundertprozentigen Schutz vor Steinschlag kann naturgemäß nie erreicht werden. Mittels computergesteuerter Steinschlagsimulationen können die vorhandenen Risiken entlang von Felsböschungen jedoch gut abgebildet werden. Durch die Bemessung moderner Sicherungsmaßnahmen, auf Grundlage durchgeführter Berechnungen, kann das Risiko auf ein akzeptables Maß reduziert werden.

## 9 Zusammenfassung

Ziel dieser Untersuchung war die Auswirkung zweier Berechnungsansätze, anhand eines konkreten Beispiels zu vergleichen. Einerseits wurde der lt. derzeit gültiger Richtlinie empfohlene Ansatz mittels Bemessungsblockes simuliert und andererseits fanden die gesamten Blockgrößen der Schutthalde Eingang in die Steinschlagsimulation. Versucht wurde dabei die beiden unterschiedlichen Ansätze hinsichtlich Reichweite, Sprunghöhe und Sterberisiko zu vergleichen und zu beurteilen.

Hohe Prozessgeschwindigkeiten, Aufprallenergien und ein hohes Maß an Unberechenbarkeit charakterisieren den Prozess des Steinschlags und stellen damit eine nicht zu vernachlässigende Gefährdung dar. Herabstürzende Gesteinsbrocken führen immer wieder zu schweren Beschädigungen an Gebäuden oder zu tödlichen Unfällen. Eine Abgrenzung von Steinschlag zu Fels- und Bergstürzen, sowie grundlegende Kenntnisse über die zugrundeliegenden Versagens- und Ablösemeechanismen, ist Voraussetzung für das Prozessverständnis, die Prozessmodellierung und in weiterer Folge für Steinschlagsimulationen. Einen Überblick über die theoretischen Grundlagen des Steinschlagprozesses, Bewegungsarten, empirische und numerische Prozessmodelle sowie Grundzüge der Risikobewertung finden sich in den Kapiteln 2 – 4.

Die derzeit gültige Richtlinie ONR 24810 bestimmt als Berechnungsansatz dazu einen Bemessungsblock aus der Schutthalde von vorhergehenden Steinschlagereignissen. In Abhängigkeit der Ereignisfrequenzklasse wird somit ein Fraktilwert für das Volumen des Bemessungsblockes bestimmt, der als Eingangsgröße die Berechnungsergebnisse wesentlich beeinflusst. Die Bemessung der Sicherungsmaßnahmen auf Grundlage des Bemessungsblockes ist zurzeit der Stand der Technik in Österreich. Kapitel 5 gibt einen kurzen Überblick über die lt. ONR 24810 benötigten Bemessungseingangsgrößen sowie Teilsicherheitsbeiwerte zur Dimensionierung von Schutzbauten. Neben den Simulationen mit dem Ansatz des Bemessungsblockes wurden alternativ dazu Steinschlagsimulationen mit der gesamt vermessen Blockverteilung durchgeführt.

Für den Vergleich der beiden Berechnungsansätze musste ein Gebiet mit reger Steinschlagaktivität, sowie einer Schutthalde gewählt werden. Ebenso durften dort noch keine konstruktiven Schutzmaßnahmen vorhanden sein. Das untersuchte Gebiet liegt nahe Rossatz in Niederösterreich. Geographische Lage, geologisch-tektonischer Überblick, sowie eine kurze Beschreibung der klimatischen Bedingungen und der Vegetation finden sich in Kapitel 6.1. Um die Gefahr ausgehend von der dortigen Felswand konkretisieren zu können, wurde eine Analyse des Steinschlagprozesses, sowie des Schadenspotential durchgeführt. Die Definition der Ablösebereiche war von entscheidender Bedeutung für die nachfolgende Steinschlagsimulation. Die Ablösebereiche wurden durch die Wahl der Ablösebereiche in den obersten Bereichen der Felswand festgelegt. Damit wurde ein konservativer Ansatz gewählt, da die Sturzblöcke somit höhere kinetische Energien erreichten. Die Ablösepunkte wurden im 3D-Modell durch einen Polygonzug definiert. Transit- und Ablagerungsbereich spielten aufgrund der geringen geographischen Ausbreitung des Untersuchungsgebiet keine entscheidende Rolle.

Das Schadenspotential wurde aufgrund von Verkehrsdaten aus vorliegenden Verkehrszählungen definiert. Die Anzahl der Schlagmarken und Steinschlagindikatoren

entlang des untersuchten Straßenabschnittes zeugen von einer regen Steinschlagaktivität. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse über das Prozessgeschehen, insbesondere über die Reichweite von Steinschlagereignissen, in Erfahrung gebracht werden.

Während erste analytische Steinschlagmodelle mit wenigen Eingangsparametern gute Ergebnisse hinsichtlich der Reichweite liefern, benötigen computergesteuerte Steinschlagsimulationsprogramme, wie zum Beispiel Wurf 3D, eine Vielzahl an unterschiedlichen Eingangsparametern. Mit modernen Computerprogrammen können in kurzer Zeit eine hohe Anzahl an Steinschlagtrajektoren berechnet und die stochastische Natur des Steinschlagprozesses berücksichtigt werden. Die Eingangsparameter für die Prozessmodellierung mussten daher im Vorfeld im Zuge von Grundlagenhebungen und Feldbegehungen bestimmt werden, diese finden sich in Kapitel 6.3.

Neben der Reichweite war vor allem die Schutthalde am Fuße des Felsböschung von größtem Interesse. Mittels Drohnenbefliegung und anschließender Vermessung der Blöcke unter Verwendung entsprechender Software, konnte eine maßgebliche Blockgrößenverteilung erstellt werden. Diese diente einerseits als Grundlage für die Bestimmung des Bemessungsbereiches gemäß ONR 24810, sowie andererseits für den Berechnungsansatz Blockverteilung. Die mittels GPS-Gerät vermessenen Schlagmarken entlang der B33 dienten als Grundlage für die Kalibrierung der Oberflächenfaktoren des Steinschlagsimulationsprogramms. Das geometrische Gefälle entlang zweier Profilschnitte wurde dabei auf das Untersuchungsgebiet übertragen. Die im Rahmen dieser Untersuchung durchgeführten Feldbegehungen trugen einen wesentlichen Teil zur Durchführbarkeit der Simulation sowie zur Verifizierung der Ergebnisse bei.

Untersucht wurden anschließend die Auswirkungen der beiden Berechnungsansätze anhand eines konkreten Fallbeispiels in Niederösterreich. Die Steinschlagsimulation, sowie die Risikoanalyse der beiden Berechnungsansätze werden in Kapitel 6.4 und in Kapitel 6.5 behandelt. Interessant waren neben der Reichweite der Sturzblöcke insbesondere die Sprunghöhenverteilungen, sowie die kinetische Energie an bestimmten Bemessungsschnitten. In weiterer Folge wurde durch Risikoanalysen der beiden Berechnungsansätze die IST-Situation simuliert. Die von Steinschlagereignissen ausgehende Gefahr entlang des untersuchten Abschnittes konnte sowohl für Fahrradfahrer als auch für KFZ-Lenker quantifiziert werden. Durch die Überschreitung des vorher definierten Schutzziels beim Sterberisiko für den Radverkehr bei beiden Berechnungsansätzen, mussten bestimmte Maßnahmen gesetzt werden, um das Risiko entsprechend zu verringern. Mittels Sicherungsnetzen, die in Wurf 3D modelliert wurden, konnte die getroffenen Maßnahmen auf ihre Wirkung geprüft werden. Das Risiko für die Verkehrsteilnehmer konnte durch die gesetzten Schutzmaßnahmen deutlich reduziert werden.

Der Vergleich der beiden Berechnungsansätze hinsichtlich simulierter kinetischer Energie, Sprunghöhenverteilung, sowie Reichweite und Sterberisiko, wird in Kapitel 7 behandelt. Auffällig ist dabei vor allem der große Unterschied der kinetischen Energieverteilung, sowie der Sprunghöhen. Interessante Differenzen ergaben sich bei dem Sterberisiko des Radverkehrs. Das Sterberisiko des einspurigen Verkehrs beim Berechnungsansatz Blockgrößenverteilung ist dabei um fast 20% höher als bei dem lt. Richtlinie vorgesehenen Ansatz des Bemessungsbereiches. Auch die getroffenen Sicherungsmaßnahmen sind bei beiden Ansätzen unterschiedlich. Während die Sicherung beim Bemessungsbereich mit einer Netzreihe

auskommt, mussten beim alternativen Berechnungsansatz drei Netzreihen hintereinander platziert werden. In Anbetracht der Tatsache, dass die Ereignishäufigkeit von kleineren Blöcken deutlich höher ist und die Schutthalde zum größten Teil ca. 75% aus Blöcken mit kleinem Durchmesser besteht, wird klar, welche Vereinfachung die derzeit gültige Richtlinie, in Hinblick auf den Berechnungsansatz und in weiterer Folge auf die Sicherungsmaßnahmen, darstellt.

## 10 Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 2.1:</b> Kippen einer Felsböschung (Poisel und Preh 2004 S.41).....	18
<b>Abb. 2.2:</b> Ebenes Gleiten einer Felsböschung (Poisel und Preh 2004 S.41) .....	18
<b>Abb. 2.3:</b> Räumliches Gleiten einer Felsböschung (Poisel 2018 S. 54) .....	19
<b>Abb. 2.4:</b> Fallen eines Kluftkörpers aus einem Überhang (Poisel 2018 S. 54).....	20
<b>Abb. 2.5:</b> Bewegungsform in Abhängigkeit der Hangneigung .....	
(Ritchie 1963 verändert von Dorren 2003 S.72).....	23
<b>Abb. 2.6:</b> Links: rollender Felsblock; Rechts: springender Felsblock .....	
(Lambert und Nicot 2011 S.159).....	24
<b>Abb. 2.7:</b> Steinschlagprozess: (a) Ablauf; (b) mögliche Ablösetypen; (c) .....	
Bewegungstypen; (d) Aufpralltypen (Suda und Rudolf-Miklau 2012 S.52). 26	
<b>Abb. 3.1:</b> Vergleich von Schattenwinkel $\beta_s$ und geometrischen Gefälle $\beta_g$ (Mitte).....	
(Zwack 2013 S.32).....	32
<b>Abb. 3.2:</b> Prozessbereich Steinschlag mit Schattenwinkel $\beta$ .....	
(Meißl 1998 verändert von Zwack 2013 S.33).....	33
<b>Abb. 6.1:</b> Übersichtskarte mit dem Standort des Untersuchungsgebiets .....	
(Auszug aus www-01) .....	46
<b>Abb. 6.2:</b> Übersichtslageplan (Auszug aus www-01).....	47
<b>Abb. 6.3:</b> Lageplan mit Untersuchungsgebiet im roten Rechteck (Auszug aus www-01)	
.....	47
<b>Abb. 6.4:</b> Drohnenaufnahme des Untersuchungsgebiets mit B33 im Vordergrund .....	
und steil abfallenden Felswänden im Hintergrund.....	48
<b>Abb. 6.5:</b> Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich (Steininger 1999 S. 1).	
.....	49
<b>Abb. 6.6:</b> Ausschnitt geologische Karte mit Untersuchungsgebiet in der .....	
Gföhler Einheit (Finger und Schubert 2015 S.170) .....	49
<b>Abb. 6.7:</b> Schummerungskarte mit tektonischen Strukturen (rot) und .....	
den donauparallelen Kluftflächen (blau) (Furtmüller 2019 S.9). .....	50
<b>Abb. 6.8:</b> Digitales 3D Höhenmodell des Untersuchungsgebietes.....	51
<b>Abb. 6.9:</b> Drohnenaufnahme der Situation vor Ort mit B 33 im linken Bildrand.....	52
<b>Abb. 6.10:</b> Stark zerklüftete Bereich im oberen Drittel der Felswand.....	53
<b>Abb. 6.11:</b> Digitales Höhenmodell mit den gewählten Abbruchpunkten.....	54

<b>Abb. 6.12:</b> Schlagmarke und kleiner Sturzblock entlang der B33.....	56
<b>Abb. 6.13:</b> Schlagmarke an einem Laubbaum im Bereich der Schutthalde .....	57
<b>Abb. 6.14:</b> Stark bemooste Sturzblöcke im Bereich der Schutthalde.....	58
<b>Abb. 6.15:</b> Screenshot des Linienzählverfahrens aus Agisoft Metashape .....	59
<b>Abb. 6.16:</b> Blockgrößendiagramm mit kumulativer Häufigkeit und Blockgröße in $m^3$ ..	60
<b>Abb. 6.17:</b> Screenfunktion (grau) im 3D Modell entlang der B33 .....	63
<b>Abb. 6.18:</b> Durchschlagpunkte (rot) durch den Screen (grau) .....	65
<b>Abb. 6.19:</b> Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchgangs .....	69
<b>Abb. 6.20:</b> Kinetische Energieverteilung des ersten Simulationsdurchgangs .....	70
<b>Abb. 6.21:</b> Barrierefunktion von Wurf 3D – die Schutzmaßnahmen sind in schwarz dargestellt. ....	71
<b>Abb. 6.22:</b> Steinschlagtrajektoren und Steinschlagbarriere – die Wirkung der Schutzmaßnahme ist deutlich erkennbar. ....	71
<b>Abb. 6.23:</b> Anzahl der unterschiedlichen Blockmassen der Blockverteilung .....	744
<b>Abb. 6.24:</b> Ablösepunkte und die drei Steinschlagschutznetze in hellgrau .....	79
<b>Abb. 6.25:</b> Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchgangs .....	80
<b>Abb. 6.26:</b> Lineare Interpolation der kinetischen Energie am Berechnungsscreen .....	81
<b>Abb. 6.27:</b> Kinetische Energieverteilung .....	82
<b>Abb. 6.28:</b> Sprunghöhenverteilung eines Simulationsdurchgangs .....	83
<b>Abb. 6.29:</b> Kinetische Energieverteilung des Simulationsdurchgangs mit der maximalen kinetischen Energie.....	84
<b>Abb. 6.30:</b> Sprunghöhenverteilung des ersten Simulationsdurchgangs.....	86
<b>Abb. 6.31:</b> Kinetische Energieverteilung eines Simulationsdurchgangs .....	87
<b>Abb. 6.32:</b> Durchschlagpunkte (schwarz) entlang des Screens (grau) ohne Maßnahmen. .....	88
<b>Abb. 6.33:</b> Durchschlagpunkte (schwarz) entlang des Screens (grau) mit Maßnahmen	88
<b>Abb. 7.1:</b> Blockgrößenverteilung der vermessenen Schutthalde .....	90
<b>Abb. 7.2:</b> Beziehung zwischen Ausmaß und Häufigkeit von Steinschlagereignissen .....	
(Lambert und Nicot 2011 S.90) .....	91
<b>Abb. 7.3:</b> Kinetische Energieverteilung des Berechnungsansatzes .....	
Blockgrößenverteilung .....	93
<b>Abb. 7.4:</b> Kinetische Energieverteilung des Berechnungsansatzes Bemessungsblockes	93

## 11 Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 5.1:</b> Schadensfolgeklassen (Austrian Standards International 2020 S. 17) .....	42
<b>Tab. 5.2:</b> Festlegung der Bemessungsblockgröße in Abhängigkeit der .....	
Ereignisfrequenzklasse (Austrian Standards International 2020 S. 30).....	43
<b>Tab. 5.3:</b> Teilsicherheitsbeiwerte für Sicherungsmaßnahmen .....	
(Austrian Standards International 2020 S. 31).....	43
<b>Tab. 5.4:</b> Teilsicherheitsbeiwerte für die Berechnung der .....	
Sprunghöhen (Austrian Standards International 2020 S. 31) .....	44
<b>Tab. 6.1:</b> Verkehrszählung.....	55
<b>Tab. 6.2:</b> Zusammenhang zwische relativen Alter und Verwitterung nach .....	
(Zwack 2013, S.39).....	58
<b>Tab. 6.3:</b> Bemessungsblockgröße .....	60
<b>Tab. 6.4:</b> Geometrisches Gefälle der Profilschnitte .....	61
<b>Tab. 6.5:</b> Endwerte für die Faktoren RL und RT .....	61
<b>Tab. 6.6:</b> Eingangparameter für die Simulationen in Wurf 3D .....	64
<b>Tab. 6.7:</b> Ergebnisse der Simulationen mit Bemessungsblock .....	64
<b>Tab. 6.8:</b> Eingangparameter Risikobewertung für Kfz und Lkw.....	66
<b>Tab. 6.9:</b> Eingangparameter Risikobewertung Radfahrer .....	67
<b>Tab. 6.10:</b> Vergleich der Passing Trajectories und der aufgehaltene Sturzblöcke.....	72
<b>Tab. 6.11:</b> Eingangparameter für die Steinschlagsimulationen.....	73
<b>Tab. 6.12:</b> Berechnungsergebnisse zum Szenario Blockverteilung .....	74
<b>Tab. 6.13:</b> Eingangparameter Risikobewertung für Kfz und Lkw .....	75
<b>Tab. 6.14:</b> Eingangparameter Risikobewertung Radfahrer .....	76
<b>Tab. 6.15:</b> Berechnungsergebnisse am Screen entlang der B33.....	77
<b>Tab. 6.16:</b> Eingangparameter Ost.....	78
<b>Tab. 6.17:</b> Simulationsergebnisse:.....	79
<b>Tab. 6.18:</b> Berechnungsergebnisse an Netzreihe 2: .....	82
<b>Tab. 6.19:</b> Berechnungsergebnisse an Netzreihe 3: .....	85
<b>Tab. 6.21:</b> Vergleich der Passing Trajectories ohne und mit Schutzmaßnahmen: .....	87
<b>Tab. 7.1:</b> Vergleich der Energieverteilungen der Berechnungsansätze .....	92
<b>Tab. 7.2:</b> Vergleich der Maximalwerte der Sprunghöhen .....	
P95 der zwei Berechnungsansätze.....	94
<b>Tab. 7.3:</b> Vergleich der Passing Trajectories der zwei Berechnungsansätze.....	94

## 12 Literaturverzeichnis

Austrian Standards International (2020): ONR 24810. Technischer Steinschlagschutz. Begriffe, Einwirkungen, Bemessungen und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung. Austrian Standards International. Wien.

Azzoni, A.; La Barbera, G.; Zaninetti, A. (1995): Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 32 (7), S. 709–724..

Bozzolo, D. (1987): Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. - Unveröff. Dissertation. ETH Zürich.

Broili, L. (1974): Ein Felssturz im Grossversuch. In: *Rock Mechanics* 1974 (3), S. 69–78. Wien.

Bründl, M. (Hg.) (2009): Risikokzept für Naturgefahren - Leitfaden. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT, Bern. 420 S.

Czurda, K.; Ruff, M.; Kühn, M. (2005): Gefährdungsanalyse für Hangbewegungen. In: *Vorarlberger Naturschau - Forschen und Entdecken*, Band 18. Hg. v. Vorarlberger Naturschau (Inatura). Dornbirn.

Dachroth, W.; Brezina, J. (2017): Handbuch der Baugeologie und Geotechnik. 4. Auflage. Springer Spektrum. Berlin.

Dorren, L. (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches. In: *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 27 (1), S. 69–87.

Engl, D.; Oberleitner, S.; Rudolf-Miklau, F.; Amberger, C.; Mölk, M.; Pittracher, M. (2020): Rock 'n' Roll Steinschlagschutz in Österreich. Hg. v. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus.

Evans, S. G.; Hungr, O. (1993): The assesement of rockfall hazard at the base of talus slopes. 1993 (30), S. 620–636.

Finger, F.; Schubert, G. (2015): Die böhmische Masse in Österreich: Was gibt es Neues? Band 64. Hg. v. Geologische Bundesanstalt. Wien (Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt).

Fleris, E.; Preh, A. (2018): Wurf Rockfall Simulations in 3D. Benutzer Handbuch. Technische Universität Wien.

- Frehner, M.; Wasser, B.; Schwitter, R.; Thormann, J.; Wehrli, A.; Bugmann, H. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt Wald und Landschaft (BUWAL). Bern.
- Furtmüller, G. (2019): Geologisch - Geotchnisches Gutachten betreffend der Steinschlag- und Felssturzgefährdung. B 33, km 27,2-27,8 Hohe Wand. Bischofshofen.
- Genske, D. (2015): Ingenieurgeologie. Grundlagen und Anwendung. Springer Spektrum. Berlin-Heidelberg.
- Geologische Bundesanstalt (Hg.) (2018): Gefahren durch Steinfall und Felssturz. Tagungsband vom 22. bis 23. Mai 2018, St.Pölten, Geologische Bundesanstalt (125). Wien.
- Gruner, U. (2008): Klimatische und Meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. In: *Proc. Intrapraevent* S. 147-158
- Gsteiger, P. (1989): Steinschlag, Wald, Relief. Empirische Grundlagen zur Steinschlagmodellierung. Unveröffentlichte Diplomarbeit; Universität Bern.
- Heim, A. (1932): Bergsturz und Menschenleben. Fretz & Wasmuth. Zürich.
- Hungr, O.; Evans, S. G. (1988): Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards. Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Rotterdam.
- Illeditsch, Mariella; Preh, Alexander (2020): The concept of design block size – A critical review of ONR 24810 “Technical Protection against Rockfall”. In: *Geomechanics and Tunnelling* 13 (6), S. 604–611. DOI: 10.1002/geot.202000021.
- Kaindl, A. (2021): Das Sterberisiko auf Wegen wird berechnet. In: *Salzburger Nachrichten* 2021, 23.11.2021, S. 8–9. Salzburg.
- Kienholz, H.; Zeilstra, P.; Hollenstein, K. (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko. Arbeitspapier. BUWAL. Bern.
- Kuehne, R. (2005): Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern. Validierung und Anwendung eines 3D Modells zur Quantifizierung der Schutzwirkung von Wald. Diplomarbeit. Universität Bern.

- Lehner, G. (2021): Felssturz zersört Teile des Stadtarchivs. Online verfügbar unter <https://salzburg.orf.at/stories/3086537/>.
- Melzner, S.; Lotter, M.; Tilch, N.; Kociu, A. (2012): Rockfall susceptibility assessment at the regional and local scales as a basis for planning site-specific studies in the Up-per Moelltal (Carinthia, Austria). INTERREG IV, Proj 1381-277. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* (Band 91), S. 107.
- Melzner, S.; Preh, A. (2012): Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis. In: *Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz* (169).
- Meißl, G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen. Dissertation. Universität Innsbruck.
- Lambert, S.; Nicot, F. (2011): Rockfall Engineering: John Wiley & Sons.London.
- Noack, A. (2003): Luftbild- und GIS- gestützte Analyse der Veränderung von Gleitfaktoren auf Windwurfflächen. Zur Beurteilung der Schutzwirkung vor Lawinen und Steinschlag. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Hochschule für Forstwirtschaft, Rottenburg.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (Hg.) (2014): Empfehlung für das Schutzziel bei gravitativen Naturgefahren in Österreich. Salzburg.
- Poisel, R.; Preh, A. (2004): Rock slope initial failure mechanisms and their mechanical models. In: *Felsbau* (22), S. 40–45.
- Poisel, R. (2018): Felstürze - Ablösemeechanismen. Tagungsband Gefahren durch Steinfall und Felssturz. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* (125), S. 49–58.
- Preh, A. (2019): Angewandte Felsmechanik. Vorlesungs Skript;. Technische Universität Wien.
- Preh, A. (2020): Sturzprozesse ausgehend von Felsböschungen: Abschätzung der Reichweite mithilfe numerischer Modelle. In: *Geomechanik und Tunnelbau 13* (1), S. 59–73.
- Preh, A.; Fleris, E.I; Illeditsch, M. (2020): Die Beurteilung der von Steinschlag ausgehender Gefahr mithilfe von Prozessmodelle: Stolperstein und Risiken. Technische Universität Wien.
- Preh, A.; Mölk, M. (2018): Steinschlagmodelle. Tagungsband Gefahren durch Steinfall und Felssturz. In: *Bereichte der Geologischen Bundesanstalt* (125), S. 18–24.

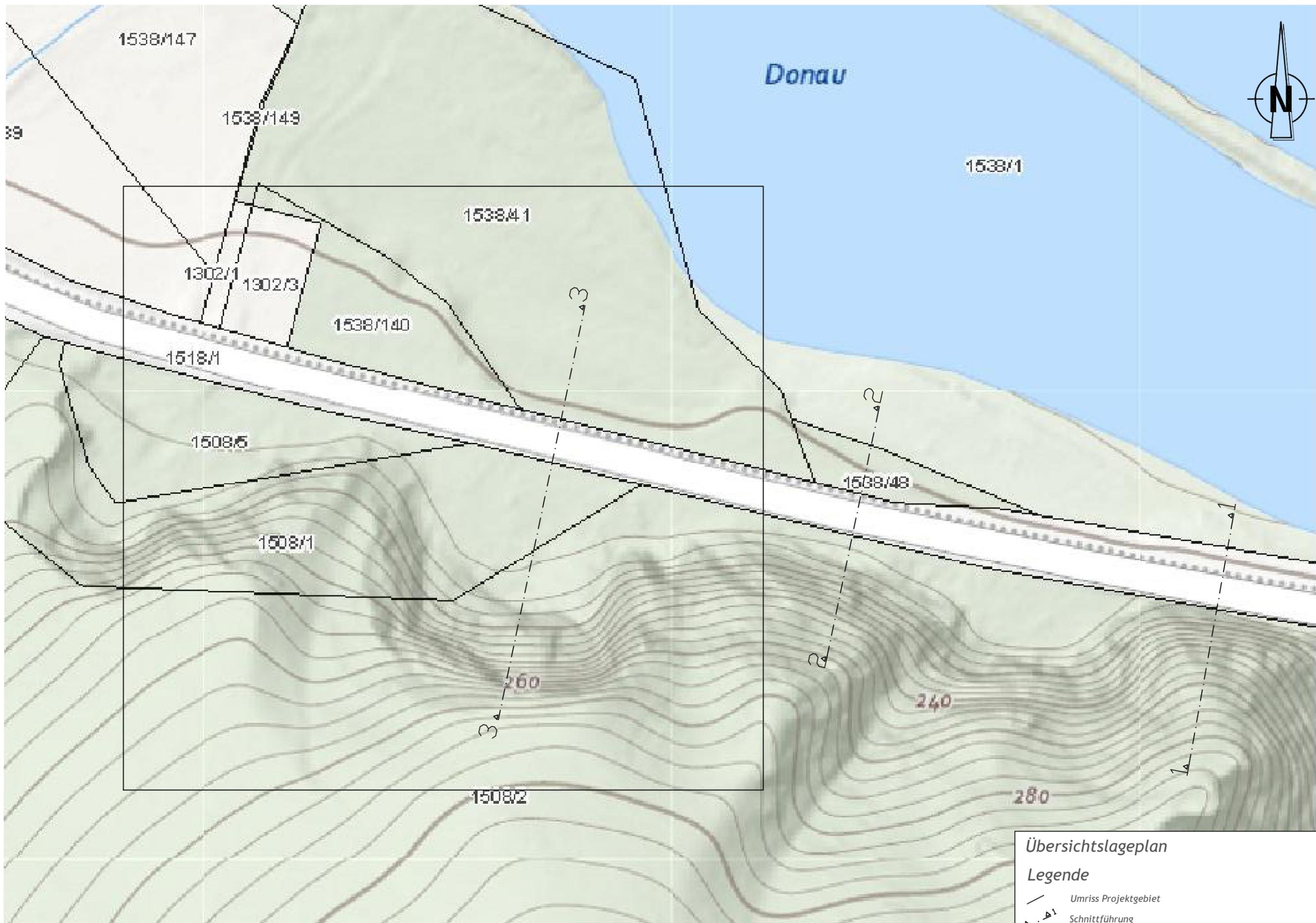
- Preh, A.; Mölk, M.; Illeditsch, M. (2010): Steinschlag und Felssturz. In: T. Glade, M. Mergilig, K. Sattler (Hrsg.), *Extrem A 2019. Aktueller Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich*, S. 425–456
- Prinz, H.; Strauß, R. (2011): *Abriss der Ingenieurgeologie*. 5. Aufl. Elsevier, Spektrum Akademischer Verlag. München, Heidelberg.
- Raetzo, H.; Loup, B. (2016): *Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren*. Bern.
- Ritchie, A. M. (1963): Evaluation of Rockfall and Its Control. In: *Highway research record* (17).
- Roth, W. (2003): *Dreidimensionale numerische Simulation von Felsmassenstürzen mittels der Methode der Distinkten Elemente (PFC)*. Dissertation. Technische Universität Wien.
- Schwenk H. (1992): Massenbewegungen in Niederösterreich 1953-1990. In: *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* (2), S. 598–660. Wien.
- Spang, R. M. (1997): Geologisch-Geotechnische Grundlagen des Steinschlagschutzes. In: *Bündner Wald Heft* (4), S. 1–10.
- Steininger, F. (1999): *Erdgeschichte des Waldviertels*. Unter Mitarbeit von Christa Frank. 2. Aufl.: Waldviertler Heimatbund (Schriftenreihe des Waldviertler Heimatbundes, Bd. 38). Horn, Waidhofen/Thaya.
- Suda, J.; Rudolf-Miklau, F. (2012): *Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz*. Springer Vienna. Wien.
- Valentin, G.; Rauscher, R. (2021): Gefahren- und Risikoanalyse in Schauklammen als Instrument zum Schutz vor Naturgefahren. In: *Analyse Berg*, S. 102–109.
- Witt, K. (Hg.) (2008): *Grundbau-Taschenbuch*. 7. Aufl. Ernst. Berlin:
- Zinggeler, A. (1990): *Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern. Modellierung der relevanten Teilprozesse*. Diplomarbeit. Universität Bern.
- Zwack, T. (2013): *Vergleich zweier numerischer Steinschlagsimulationsprogramme (2D) anhand eines Fallbeispiels*. Unveröffentlichte Diplomarbeit. Technische Universität München.

## 13 www-Verzeichnis

- www-01: <https://atlas.noe.gv.at>, am 02.01.2022.
- www-02: <https://www.zamg.ac.at/cms/de/geophysik/produkte-und-services-1/erdbebenbemessungswerte>, am 03.01.2022
- www-03: [https://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe7100/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.html](https://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe7100/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.html), am 03.01.2022.
- www-04: <https://docplayer.org/197504913-Radverkehrszaehlung-am-donauradweg-2016.html>, am 02.01.2022
- www-05: <https://www.netzwelt.de/news/187881-google-maps-fahrrad-laufgeschwindigkeit-einstellengeht-.html>, am 02.01.2022.

## 14 Beilagenverzeichnis

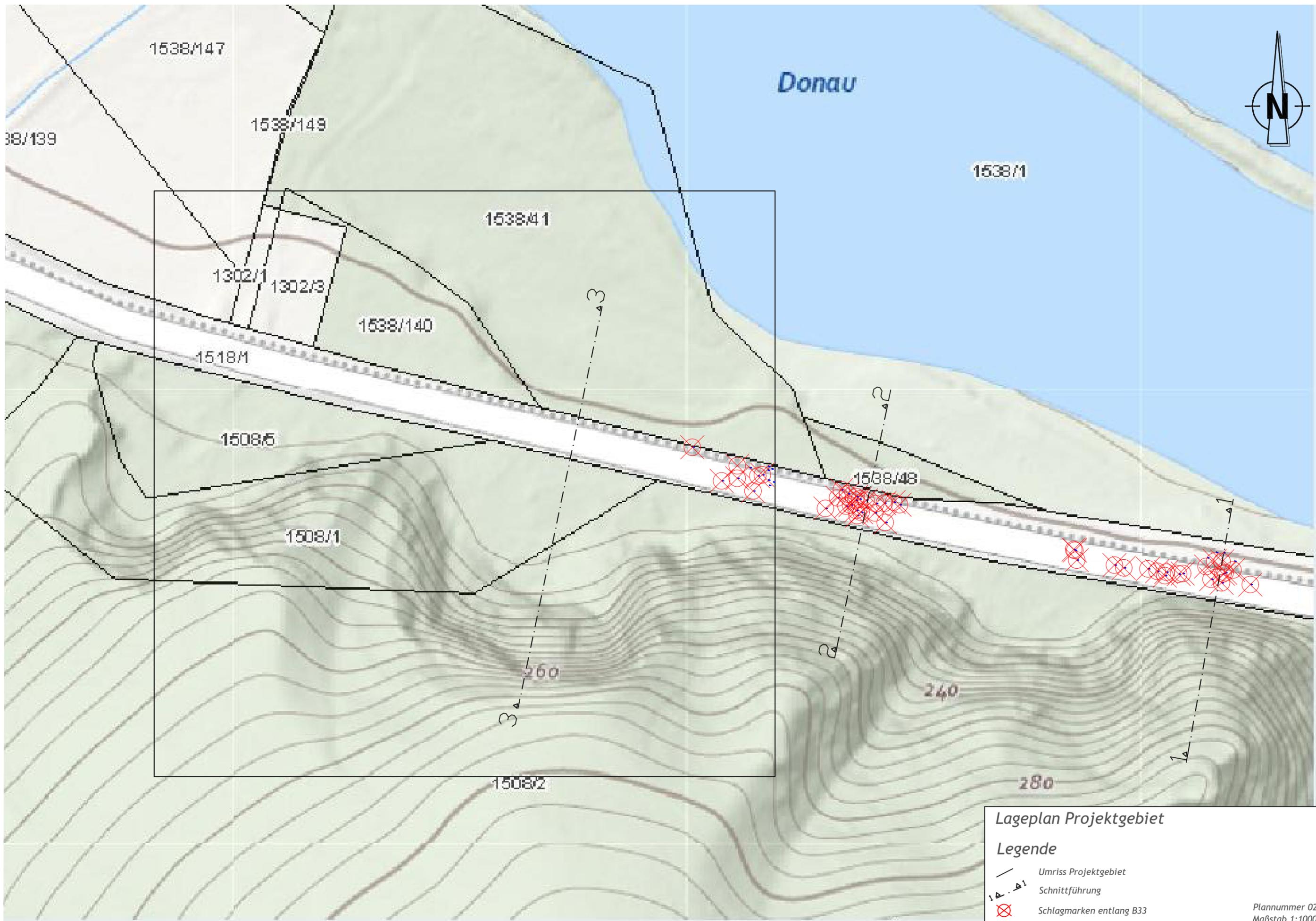
Beilage 1: Übersichtslageplan.....	110
Beilage 2: Lageplan Schlagmarken .....	111
Beilage 3: Prozessbereich Profilschnitt 3-3.....	112
Beilage 4: Profilschnitte:.....	113
Beilage 5: Sicherungsmaßnahmen Szenario 1.....	114
Beilage 6: Sicherungsmaßnahmen Szenario 2.....	115
Beilage 7: Blockliste.....	116



Übersichtslageplan

Legende

- Umriss Projektgebiet
- - - - - Schnittführung



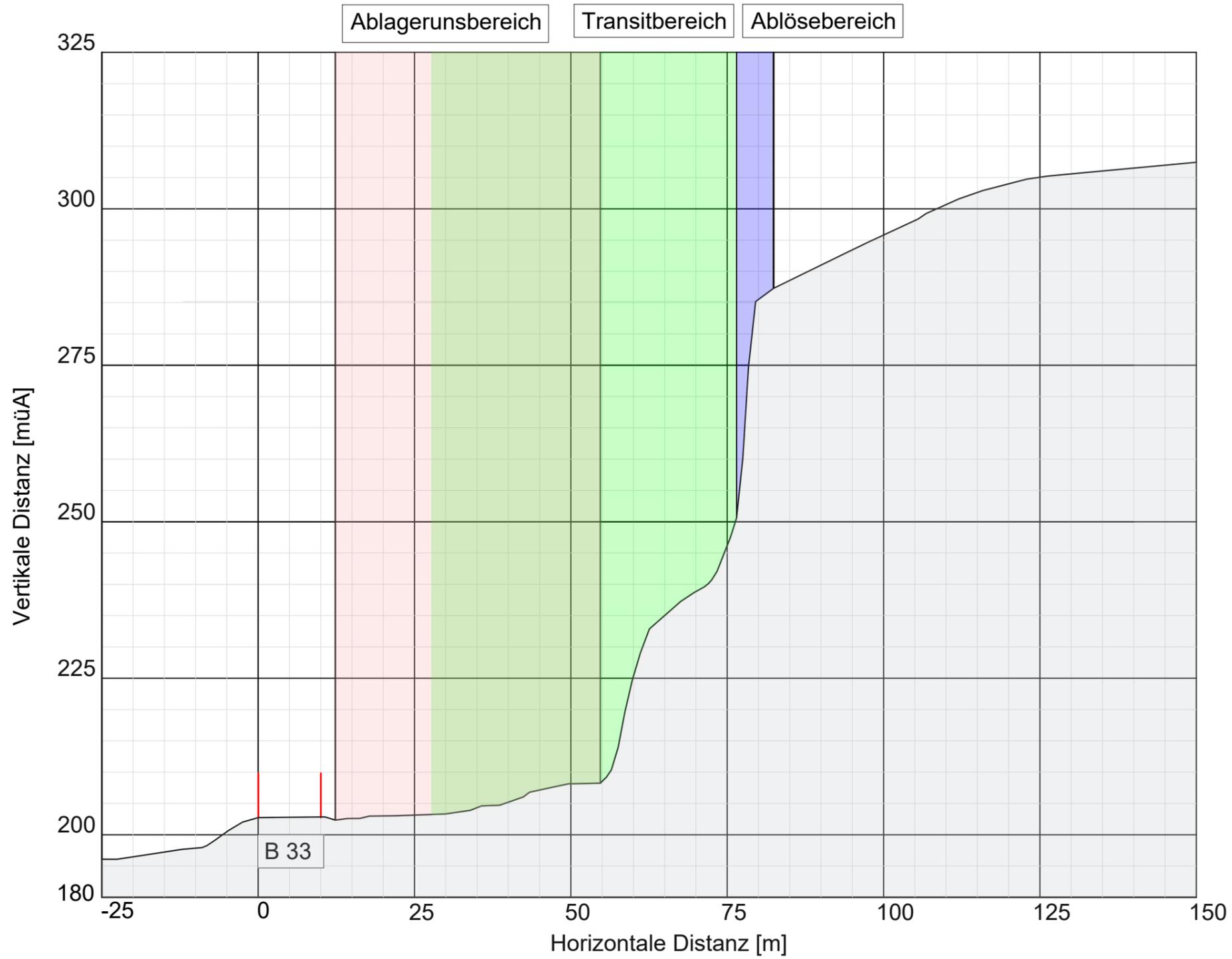
**Lageplan Projektgebiet**

**Legende**

- Umriss Projektgebiet
- Schnittführung
- Schlagmarken entlang B33

Plannummer 02  
Maßstab 1:1000

# Profilschnitt 3-3



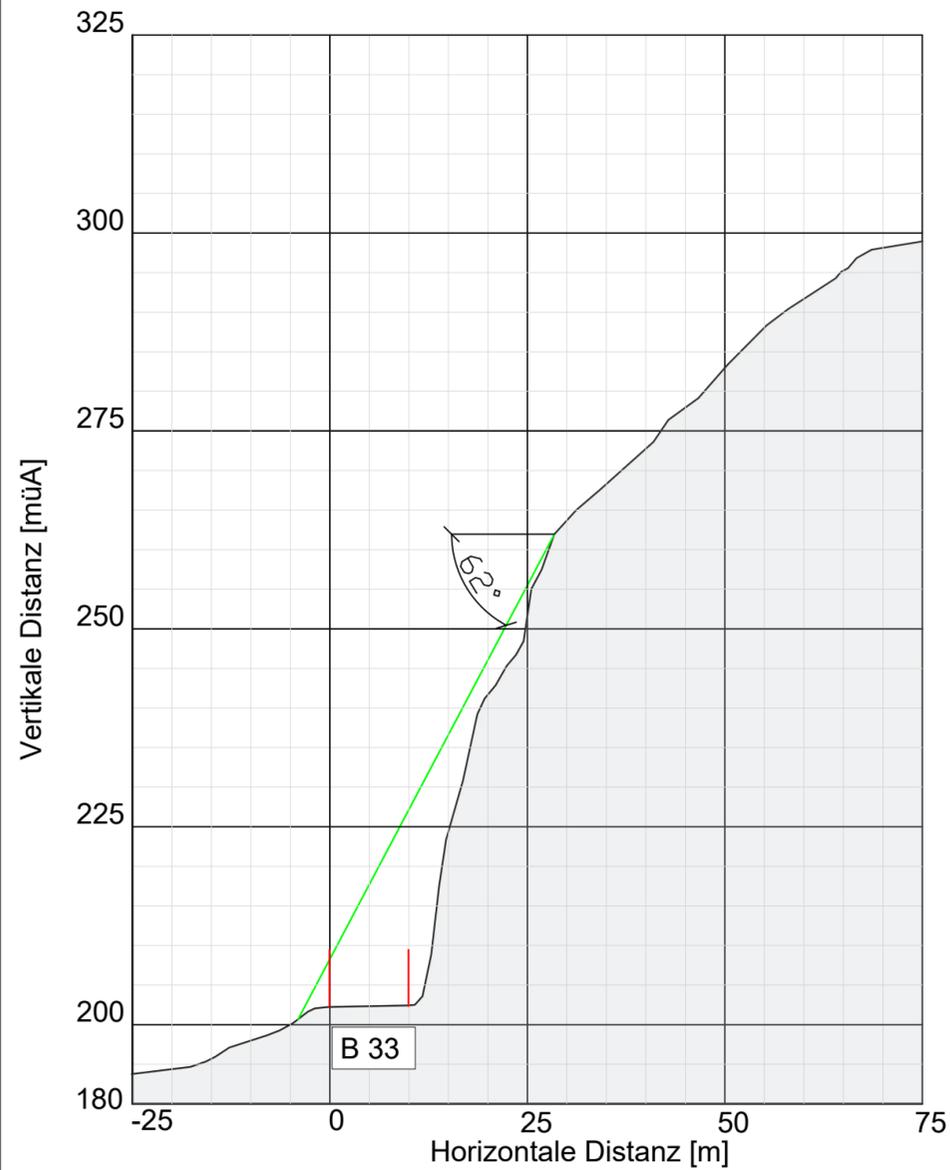
**Profilschnitt 3-3 Prozessbereiche**

**Legende**

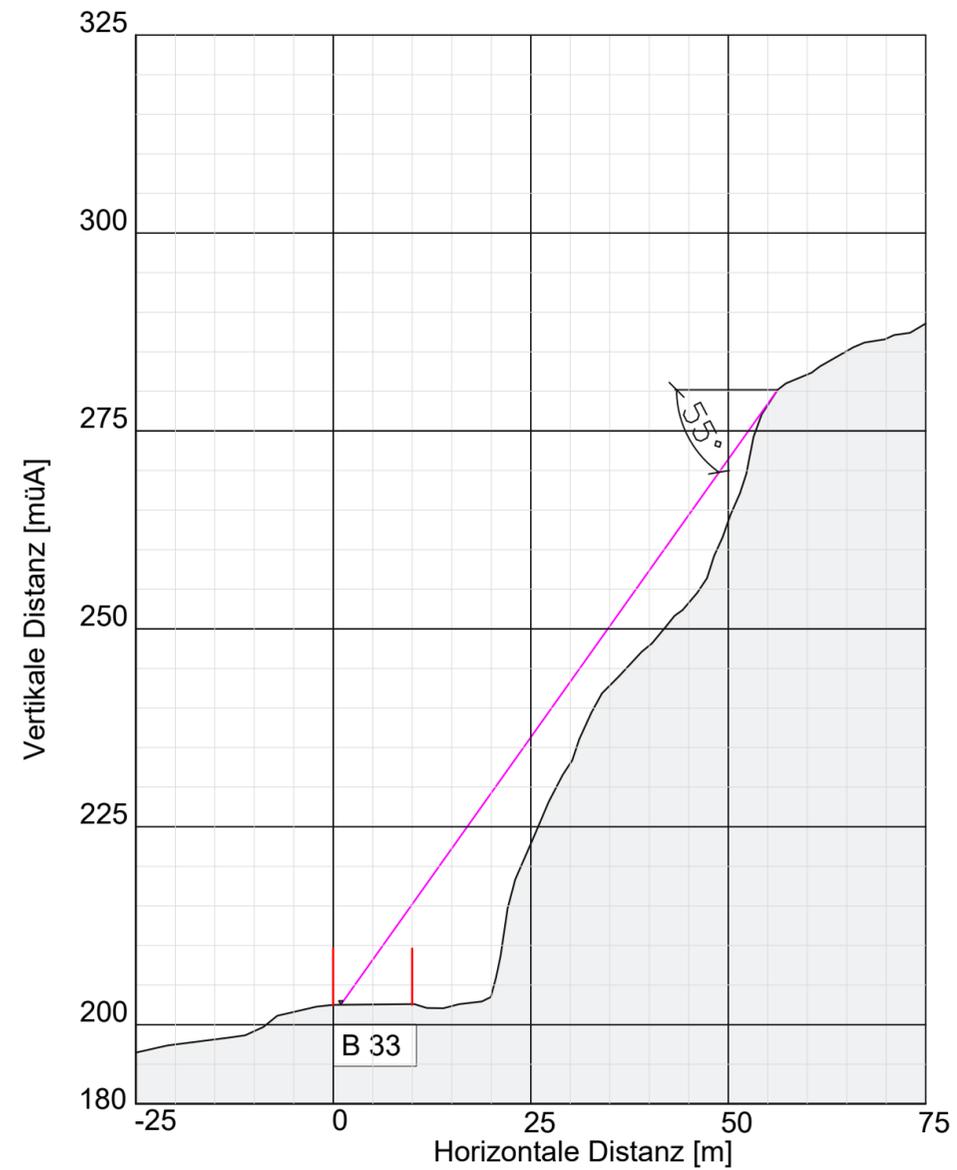
- Ablösebereich
- Transitbereich
- Ablagerungsbereich

Plannummer 03  
Maßstab 1:750

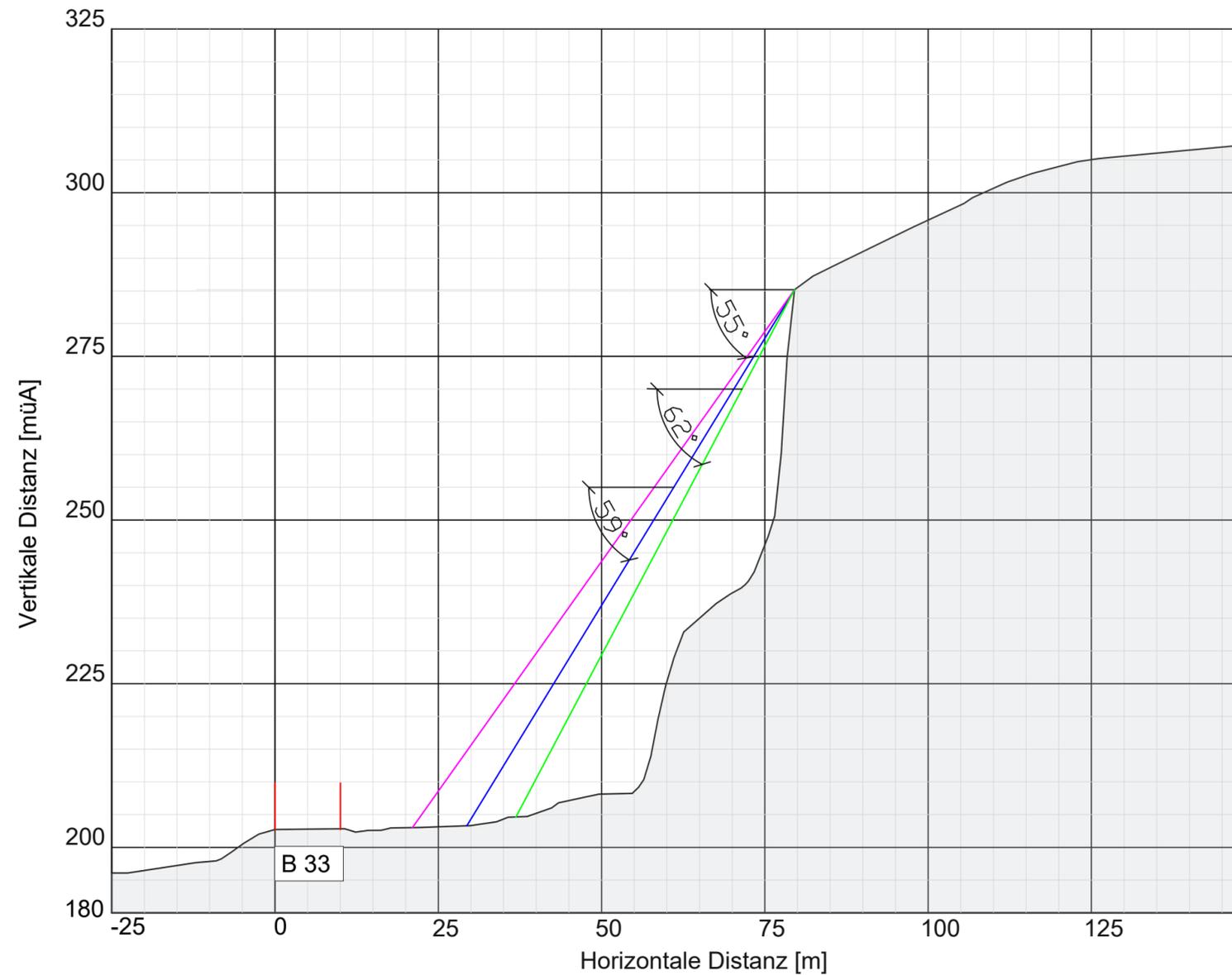
### Profilschnitt 1-1



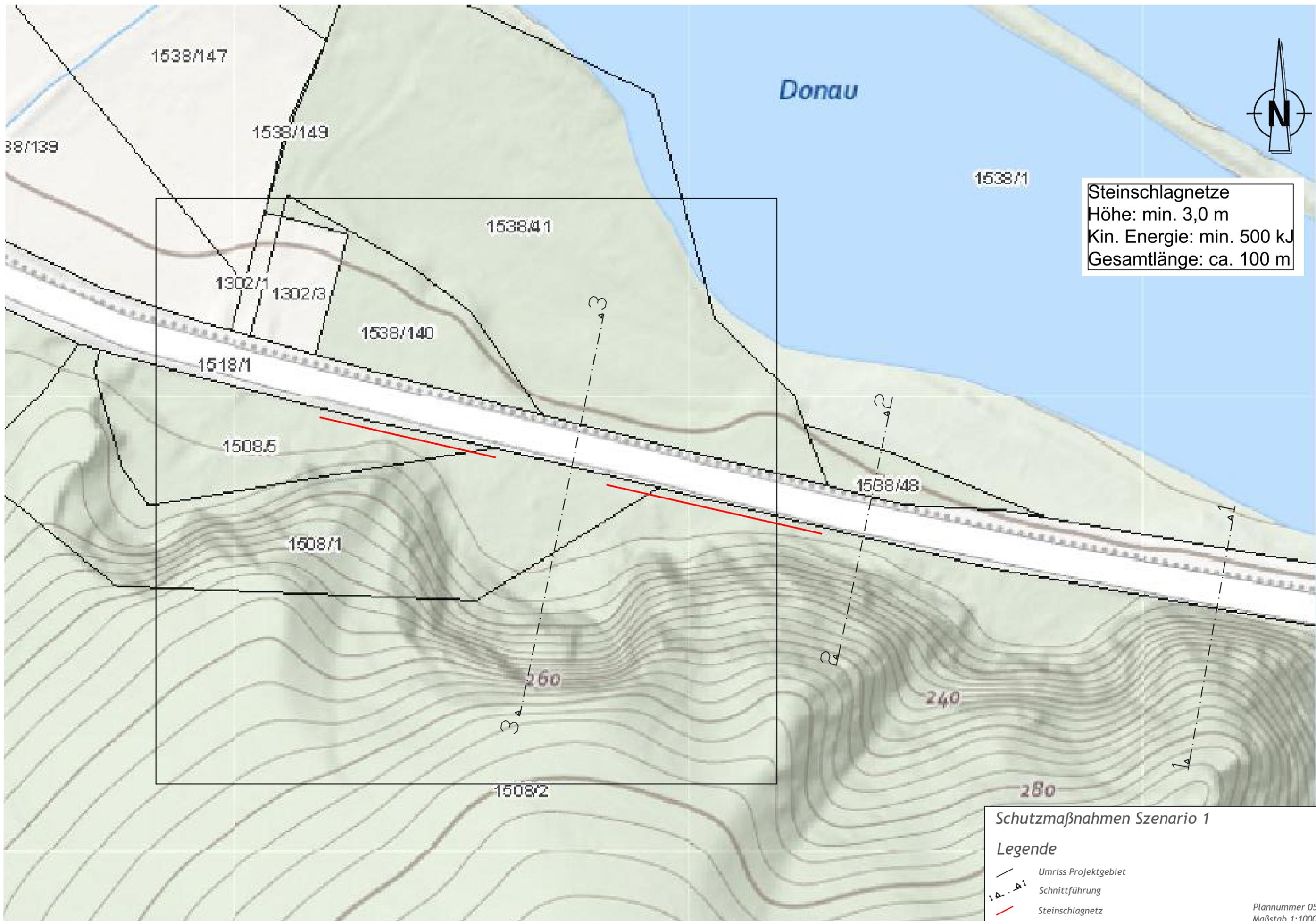
### Profilschnitt 2-2



### Profilschnitt 3-3



**Profilschnitte**  
**Legende**  
Geometrisches Gefälle



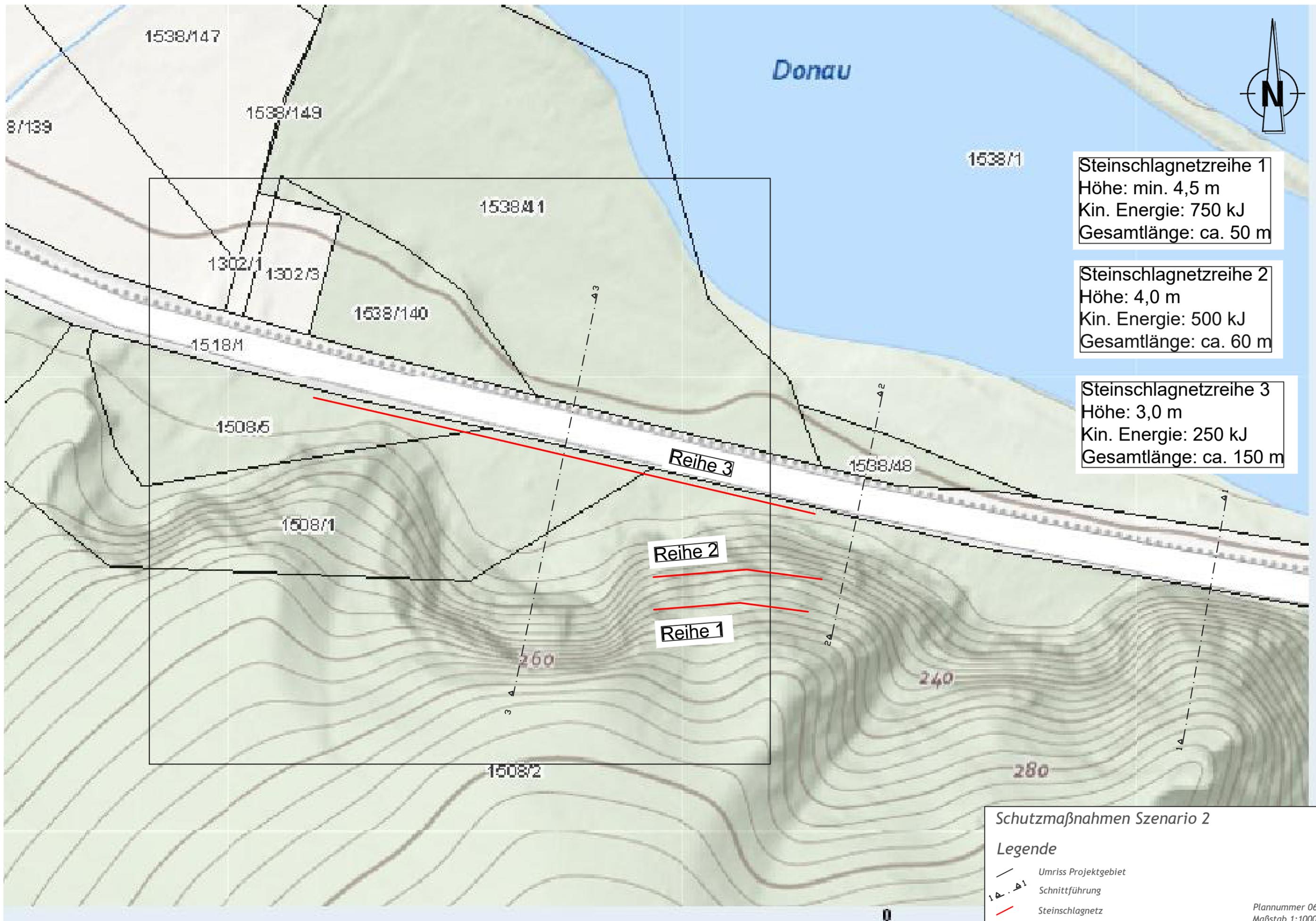
Steinschlagnetze  
Höhe: min. 3,0 m  
Kin. Energie: min. 500 kJ  
Gesamtlänge: ca. 100 m

**Schutzmaßnahmen Szenario 1**

**Legende**

- Umriss Projektgebiet
- Schnittführung
- Steinschlagnetz

Plannummer 05  
Maßstab 1:1000



**Steinschlagnetzreihe 1**  
Höhe: min. 4,5 m  
Kin. Energie: 750 kJ  
Gesamtlänge: ca. 50 m

**Steinschlagnetzreihe 2**  
Höhe: 4,0 m  
Kin. Energie: 500 kJ  
Gesamtlänge: ca. 60 m

**Steinschlagnetzreihe 3**  
Höhe: 3,0 m  
Kin. Energie: 250 kJ  
Gesamtlänge: ca. 150 m

**Schutzmaßnahmen Szenario 2**

**Legende**

- Umriss Projektgebiet
- - - Schnittführung
- Steinschlagnetz

Plannummer 06  
Maßstab 1:1000

Nr.	l [cm]	b [cm]	t [cm]	Vol [m³]	Nr.	l [cm]	b [cm]	t [cm]	Vol [m³]	Nr.	l [cm]	b [cm]	t [cm]	Vol [m³]
1	68,2	79,8	74,0	0,403	50	18	13,8	15,9	0,004	99	32,3	27,5	29,9	0,027
2	60	22,3	41,2	0,055	51	16,4	8,9	12,7	0,002	100	35,7	49,2	42,5	0,075
3	36,5	95,3	65,9	0,229	52	27,6	15,8	21,7	0,009					
4	58,4	81,1	69,8	0,330	53	39,1	31,1	35,1	0,043					
5	81,3	79,1	80,2	0,516	54	28,5	38,8	33,7	0,037					
6	131	84,3	107,7	1,189	55	8,91	12,4	10,7	0,001					
7	66,6	74,4	70,5	0,349	56	13,2	15,5	14,4	0,003					
8	21,8	27,8	24,8	0,015	57	19,2	22,1	20,7	0,009					
9	29,3	12,6	21,0	0,008	58	18,1	22,6	20,4	0,008					
10	72,2	61,2	66,7	0,295	59	23,2	11,8	17,5	0,005					
11	19,7	28,3	24,0	0,013	60	62,5	63,5	63,0	0,250					
12	53,4	42,8	48,1	0,110	61	47,8	49,3	48,6	0,114					
13	12,3	18,6	15,5	0,004	62	54,5	79,5	67,0	0,290					
14	14,2	17,1	15,7	0,004	63	31,1	23	27,1	0,019					
15	17,1	14,7	15,9	0,004	64	46,2	25,5	35,9	0,042					
16	13,8	12,5	13,2	0,002	65	28,2	59,4	43,8	0,073					
17	10,1	15,3	12,7	0,002	66	21,2	32,3	26,8	0,018					
18	26,1	22,3	24,2	0,014	67	12,9	18,8	15,9	0,004					
19	14,2	16,3	15,3	0,004	68	28,4	33	30,7	0,029					
20	35	26,8	30,9	0,029	69	28,7	39,6	34,2	0,039					
21	27,8	22,8	25,3	0,016	70	23,5	19	21,3	0,009					
22	49,3	30,5	39,9	0,060	71	18,2	10,3	14,3	0,003					
23	102	57,6	79,8	0,469	72	37,7	36,8	37,3	0,052					
24	31,7	37,7	34,7	0,041	73	38,5	42,5	40,5	0,066					
25	111	92,3	101,7	1,041	74	74,6	50,6	62,6	0,236					
26	75,7	66	70,9	0,354	75	20,9	15,3	18,1	0,006					
27	49,1	108	78,6	0,417	76	31,5	23,3	27,4	0,020					
28	45,7	37,4	41,6	0,071	77	39	28,1	33,6	0,037					
29	33,5	32,6	33,1	0,036	78	24,1	25,2	24,7	0,015					
30	66,1	45,9	56,0	0,170	79	67,6	34,2	50,9	0,118					
31	45,4	37	41,2	0,069	80	26,3	28	27,2	0,020					
32	75,2	42,7	59,0	0,189	81	20,1	12,5	16,3	0,004					
33	25,9	20,2	23,1	0,012	82	18,1	16,1	17,1	0,005					
34	42,3	27,2	34,8	0,040	83	15,1	19	17,1	0,005					
35	29,5	25,7	27,6	0,021	84	58,8	44,7	51,8	0,136					
36	34,3	40,1	37,2	0,051	85	24,2	30,7	27,5	0,020					
37	27,3	36,9	32,1	0,032	86	16,6	21,5	19,1	0,007					
38	35,4	36,9	36,2	0,047	87	21,3	19,2	20,3	0,008					
39	30,5	33,1	31,8	0,032	88	65	37,9	51,5	0,127					
40	68,6	65,2	66,9	0,299	89	37	27,3	32,2	0,032					
41	28,4	41,6	35,0	0,041	90	35,6	20,9	28,3	0,021					
42	35,5	22,6	29,1	0,023	91	43,6	44,1	43,9	0,084					
43	32	37,2	34,6	0,041	92	26,7	23,4	25,1	0,016					
44	19	22,7	20,9	0,009	93	27,9	26,4	27,2	0,020					
45	22	26,3	24,2	0,014	94	16,8	26,6	21,7	0,010					
46	19,5	30,4	25,0	0,015	95	25,2	11,3	18,3	0,005					
47	43,2	31,3	37,3	0,050	96	15,8	24,9	20,4	0,008					
48	27,4	29	28,2	0,022	97	18,4	14,4	16,4	0,004					
49	59	28,9	44,0	0,075	98	11,1	7,8	9,5	0,001					

Blocklänge und Blockbreite wurden gemessen. Die dritte Hauptrichtung wurde durch Mittelung der Breite und Länge berechnet. Das Volumen wurde als Quader, mit  $V = l \cdot b \cdot t$ , berechnet.