



Technische Universität Graz  
Dekanat für Bauingenieurwissenschaften  
Institut für Bodenmechanik und Grundbau

**Masterarbeit**

# **Steinschlagschutz Landesstraße L127**

**Patryk Zawada, BSc**

Vorgelegt zur Erlangung des  
akademischen Grades Diplom-Ingenieur  
der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Graz, März 2017

---

Betreuer der Diplomarbeit:  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

.....

Mitbetreuender Assistent:  
Univ.-Ass., M. Sc. Andreas Buyer

.....

---

## **Ehrenwörtliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ich versichere, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch im Ausland (einer Beurteilerin oder einem Beurteiler) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Graz, im März 2017

.....

---

## Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit entstand in Zusammenarbeit mit dem Institut für Bodenmechanik und Grundbau sowie dem Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Graz, dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung (Abteilung 16 – Verkehr und Landeshochbau: Referat für Straßenbau- und Geotechnik) und dem geologisch-geotechnischen Ingenieurbüro Geolith Consult aus Graz. In diesem Sinne möchte ich mich bei allen Mitwirkenden und Beteiligten sowie Mitarbeitern dieser Institutionen herzlich für eine förderliche Zusammenarbeit bedanken. Nur auf Basis der gelungenen Kooperation mit gutem Informationsaustausch konnte die vorliegende Arbeit in dieser Form zustande kommen.

Mein besonderer Dank geht an meinen Betreuer Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau für die gute Unterstützung und persönliche Betreuung über den gesamten Bearbeitungszeitraum. Durch die zahlreichen projektspezifischen Diskussionen die ich mit Herrn Marte im Zuge dieser Arbeit führen konnte, habe ich mein fachliches Wissen in vielen Bereichen, durch seine langjährige Projekterfahrung und herausragende Kompetenz im Bereich der Geotechnik, sehr förderlich erweitern können. Ein weiterer großer Dank gilt Univ.-Ass., M. Sc. Andreas Buyer vom Institut für Felsmechanik und Tunnelbau der TU Graz, der mich als mitbetreuender Assistent im Zuge der Modellierung der Steinschlagsimulationen unterstützt hat und während der Einarbeitung und im Verlauf dieser Projektarbeit immer sehr hilfreich zur Seite stand.

Die Danksagung gilt ebenfalls Univ.-Prof. B.A. M.Sc. Ph.D. Scott Kieffer, M.Sc. Maja Bitenc sowie M.Sc. Markus Kaspar vom Institut für Angewandte Geowissenschaften. Mit ihrer Beteiligung ist das digitale Geländemodell für dieses Projekt erstellt worden, welches die grundlegende Basis für die Simulationsmodelle und somit alle Steinschlagsimulationen darstellt.

Dr. Jürgen Loizenbauer und Mag. Peter Preiß (Geolith Consult) haben durch die Erstellung des geologisch-geotechnischen Gutachtens eine weitere wichtige Grundlage für die Erstellung dieser Arbeit geleistet. Den Verantwortlichen seitens dem Referat für Straßenbau- und Geotechnik des Landes Steiermark, Dipl.-Ing. Franz Nöhrer, Mag. Marc Andre Rapp und Dipl.-Ing. Andreas Kammersberger gilt ebenfalls ein besonderer Dank für die gute Kooperation in dieser einleitenden Projektphase.

---

## Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit befasst sich mit der Steinschlagproblematik der Landesstraße L127 in der Obersteiermark. In den vergangenen Monaten kam es an einem Straßenabschnitt der L127 wiederholt zu Steinschlagereignissen – bis dato glücklicherweise ohne Sach- oder Personenschaden. Nach geologisch-geotechnischen Einschätzungen, geht jedoch vom beobachteten Ablösebereich der aufgetretenen Steinschläge, weiter ein akutes Gefährdungspotenzial für die Landestraße und deren Nutzer aus. Die aktuelle Trassenführung der Landesstraße stellt dabei verkehrstechnisch die einzige wirtschaftliche Zufahrtsmöglichkeit für die obersteirische Gemeinde Radmer dar. Daher ist notwendig den betroffenen Straßenabschnitt über die Distanz des Gefährdungsbereichs durch eine geeignete Schutzverbauung zu sichern.

Diese Arbeit umfasst die grundlegenden Untersuchungen der ersten Planungsphasen eines Steinschlagschutzprojektes. Es werden die entscheidenden Randbedingungen für die Konzeption der Schutzbauten festgelegt und die wesentlichen Bemessungsparameter ermittelt. Auf Grundlage eines digitalen Geländemodells des Projektgebietes werden 2D- und 3D-Steinschlagsimulationsmodelle erstellt, die unter anderem Aufschlüsse bezüglich der maßgebenden kinetischen Energien, Geschwindigkeiten, Sturzverläufe und Aufschlagpunkte der Steinschläge im Straßenbereich liefern. Die statistische Auswertung der Simulationsergebnisse ermöglicht hierbei repräsentative Bemessungswerte dieser Steinschlagparameter zu definieren. Die Ergebnisse stellen in weiterer Folge die Planungsbasis für die kommenden Projektphasen dar.

Eine anschließende Variantenstudie stellt mögliche Schutzkonzepte zur Sicherung des gefährdeten Straßenabschnitts vor. Die entwickelten Schutzmaßnahmen sind dabei an die vorliegenden Randbedingungen angepasst und beinhalten daher teils Systemkonzeptionen, die in dieser Form im konventionellen Steinschlagschutz noch nicht angewandt wurden. Die vorgestellten Maßnahmenvarianten unterliegen dabei einer qualitativen Beurteilung in Hinblick auf die maßgebenden Bewertungskriterien, die für dieses Projekt festgesetzt wurden. Auf Grundlage dieser vergleichbaren Beurteilungsmerkmale ist abschließend eine wichtige Entscheidungsgrundlage für die konkrete Wahl des auszuführen Schutzkonzeptes für die verantwortliche Institution des Landes Steiermark gegeben.

---

## **Abstract**

This master's thesis focuses on the rockfall hazard on the state road L127 in Upper Styria. In the past months several rockfall events occurred on a confined road section – fortunately without any personal injury or property damage so far. According to the geological and geotechnical estimations, further rockfall events can be expected at this limited street section in the future. However the current route of the state road incorporates technically the only economic accessibility for the Upper Styrian municipality of Radmer in the mountainous alpine upland. It is therefore necessary to develop appropriate safety structures for the vulnerable road section.

Therefore this thesis includes the fundamental investigations at the initial planning state of a rockfall protection project. For this purpose decisive boundary conditions according to the conceptual development of safety structures and the essential design parameters are defined. Based on a geological assessment of the project area, 2D and 3D rockfall simulation models are created to determine fundamental factors like the kinetic energy, velocity, fall trajectories and impact points of the rockfall events in the concerned hazard area. Statistical analysis of the simulation results allows to define representative rated values of the crucial rockfall parameters. These results represent the planning base for the successive project phases.

A subsequent study of variants provides possible protection concepts to securing the endangered road section. The developed protective measures are adapted to the specified boundary conditions and therefore include system conceptions which are to some extent not applied by conventional rockfall protection structures. Furthermore the concepts are subject to a qualitative assessment with regard to the relevant evaluation criteria for this project. Based on these comparable valuation features an important basis for decision making is developed to select the executing protection concept by the responsible institution and policy makers.

## Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung .....	III
Danksagung .....	IV
Kurzfassung .....	V
Abstract .....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VII
1. Einleitung .....	11
1.1 Projektbeschreibung .....	11
1.2 Projektbeteiligte .....	11
1.3 Zielstellung .....	12
1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit .....	12
2. Einführung in das Projekt und Projektgebiet .....	14
2.1 Geographische Lage .....	14
2.2 Morphologie der Gefahrenzone .....	16
2.2.1 Rinnenstruktur im Haupteinschlagsbereich .....	18
2.3 Rückblick und aktuelle Situation .....	21
2.3.1 Beobachtung von Steinschlagereignissen und Schäden .....	21
2.3.2 Bisherige Maßnahmen .....	23
2.4 Verkehrsaufkommen auf der Landstraße L127 .....	24
3. Geologisch-geotechnische Randbedingungen .....	25
3.1 Definition: Block- und Steinschlag .....	25
3.2 Befundaufnahme .....	25
3.2.1 Bearbeitungsbereich .....	26

3.2.2	Regionale Geologie.....	27
3.2.3	Geomorphologische und strukturgeologische Gegebenheiten.....	28
3.2.3.1	Geomorphologie .....	28
3.2.3.2	Trennflächengefüge .....	29
3.2.3.3	Felsmechanische Eigenschaften.....	31
3.2.4	Stumme Zeugen.....	33
3.2.4.1	Stumme Zeugen im Ablagerungsgebiet .....	33
3.2.4.2	Versagensvolumina.....	39
3.2.4.3	Blockgrößen Ablagerungsbereich .....	39
3.2.4.4	Ausbruchnischen im Ablösebereich .....	41
3.2.4.5	Beschreibung der potentiellen Ablösebereiche.....	41
3.3	Geologisch-geotechnische Beurteilung .....	43
3.3.1	Geologisch-geotechnische Situation: .....	43
3.3.2	Felsmechanische Beurteilung .....	45
3.3.3	Blockgrößen.....	45
3.3.4	Ereignishäufigkeit.....	46
3.4	Geologisch-geotechnische Zusammenfassung.....	47
4.	Steinschlagsimulationen .....	49
4.1	Zielsetzung der Simulationen.....	49
4.2	Berechnungsprogramme und Datengrundlage.....	49
4.3	2D-Simulationen .....	50
4.3.1	Modellierung mit <i>Rocscience Rocfall</i> .....	50
4.3.2	Einwirkungen infolge des Bemessungsblock.....	54
4.3.3	Aufschlagspunkte und Aufprallwinkel im Straßenbereich .....	59
4.3.4	Steinschlagsimulation am Gegenhang .....	62



4.4	3D-Simulationen .....	65
4.4.1	Modellierung in <i>RAMMS ROCKFALL</i> .....	65
4.4.2	Sturztrajektorien .....	68
4.4.3	Untersuchung: Oberer und unterer Ablösebereich .....	72
4.4.4	Aufschlagspunkte .....	75
4.4.5	Einwirkungen infolge des Bemessungsblocks .....	77
4.4.6	Steinschlagsimulationen am Gegenhang .....	87
4.5	Zusammenfassung der Simulationsergebnisse .....	90
5.	Schutzmaßnahmen .....	93
5.1	Anwendungsbereiche von Schutzsystemen .....	93
5.1.1	Steinschlagschutznetze .....	94
5.1.2	Steinschlagschutzdämme .....	98
5.1.3	Steinschlaggalerien .....	99
5.2	Projektspezifische Diskussion: Primärer Steinschlagschutz .....	102
5.3	Steinschlagschutznetz im Bereich der Zwischenstufe .....	103
5.4	Schutzanforderungen auf Basis der vorliegenden Randbedingungen .....	104
5.5	Kurzbeschreibung der Schutzmaßnahmen .....	105
5.6	Variantenstudie: Detailbeschreibung der Schutzkonzepte .....	107
5.6.1	Allgemeine Vorbemerkungen zu den Schutzkonzepten .....	107
5.6.2	Dammkörper mit aufgesetztem Steinschlagnetz .....	110
5.6.4	Schutznetz auf Stahlkonstruktion .....	115
5.6.4.1	Schutznetzüberdeckung auf auskragenden Stahlträgern .....	115
5.6.4.2	Dreigelenksbogen mit Schutznetz- / Schaumglasüberdeckung .....	120
5.6.4.3	Schutznetzüberdeckung auf Pendelstützen .....	123
5.6.5	Steinschlaggalerie .....	129
5.6.6	Straßenverlegung .....	131

---

5.7	Vergleichende Bewertung der Schutzkonzepte .....	134
6.	Zusammenfassung und Fazit.....	137
	Projektunterlagen, Dokumentationen und Gutachten .....	139
	Literaturverzeichnis .....	142
	Abbildungsverzeichnis.....	144
	Tabellenverzeichnis.....	149
	Anhang.....	150

# 1. Einleitung

## 1.1 Projektbeschreibung

Anlass für diese Masterarbeit ist die Steinschlagproblematik an der Landesstraße L127 in der Obersteiermark. Die zweispurige Landstraße verbindet über die Bundesstraße B115 (Eisen-Straße) die obersteirischen Gemeinden Eisenerz bzw. Hieflau mit der Gemeinde Radmer an der Stube. Die L127 bildet derzeit die einzige befahrbare Erschließungsmöglichkeit, der von ca. 600 Einwohner bewohnten Gemeinde Radmer. Eine rund bei Straßenkilometer 3,25 nah zur Straße angrenzende Felswand aus sprödem und brüchigem Kalkgestein, stellt als Ablösegebiet die maßgebende Gefahrenzone bezüglich der vorliegenden Steinschlagproblematik dar. An diesem Straßenabschnitt sind in den letzten Monaten vermehrt Steinschlagereignisse beobachtet worden. Aufgrund eines weiterhin bestehenden Potenzials für kritische Ablöseprozesse besteht bis zum heutigen Tage eine anhaltende akute Gefährdung. Ein in etwa 150 m langer Straßenabschnitt bildet dabei Beobachtungen zufolge, den unmittelbaren Gefahrenbereich an der größtenteils kleinvolumige Steinschläge, jedoch in erhöhter Frequenz stattfinden. Aus diesem Grund gilt es die Steinschlagproblematik grundlegend und fachgerecht zu erfassen und anschließend in dieser ersten Projektphase sicherheitstechnisch sowie wirtschaftlich relevante Schutzkonzepte zu entwickeln. Aufgrund der akuten Gefährdungslage, soll in möglichst naher Zukunft eines der im Zuge dieser Arbeit vorgestellten Schutzkonzepte in die Detail- und Ausführungsplanung übergehen.

## 1.2 Projektbeteiligte

Das verantwortliche Amt der steiermärkischen Landesregierung (Referat für Straßenbau- und Geotechnik, Fachabteilung 16 Straßenerhaltungsdienst) engagierte in diesem Zuge das Institut für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Graz unter Leitung von Prof. Roman Marte für die einleitenden Gutachtenleistungen des Steinschlagschutzprojektes der Landesstraße L127. Zur Erfassung der Geologie und der gegebenen geotechnischen Randbedingungen der Felswand und des Einzugsgebiets, wurde das Ingenieurbüro Geolith Consult beauftragt ein geologisches Gutachten zu verfassen. Geolith Consult wird für dieses Projekt durch Dr. Jürgen Loizenbauer und Mag. Peter Preiss vertreten. Das Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz erstellte mit Hilfe von Prof. Scott Kieffer und MSc. Maja Bitenc durch eine Drohnenbefliegung ein digitales Geländemodell nach dem Prinzip der Photogrammetrie zur Erfassung und Einschätzung der geologisch-geotechnischen Eigenschaften des Projektgebiets.

### 1.3 Zielstellung

In dieser einleitenden Projektphase werden die grundlegenden Untersuchungen zur vollständigen Erfassung der Steinschlaggefährdung im Projektgebiet aufgestellt und dabei alle nötigen Randbedingungen und Eingangsparameter ermittelt. Im Vordergrund stehen diesbezüglich die Erhebungen der maßgebenden Impaktenergien und Fallgeschwindigkeiten sowie die räumliche Verteilung der Sturztrajektorien, Sprungweiten und Aufschlagpunkte der Steinschläge. Auf Basis dieser Untersuchungen werden Lösungsmöglichkeiten im Sinne von sekundären Steinschlagschutzmaßnahmen entwickelt, die Nutzer der Landesstraße vor Steinschlägen zu schützen bzw. das Schadensrisiko langfristig auf ein akzeptables Maß zu reduzieren. Die Schutzmaßnahmen sollen hinsichtlich der technischen und sicherheitsrelevanten Aspekte, zudem vorteilhafte wirtschaftliche Eigenschaften bezüglich der Errichtungs- und Instandhaltungskosten erfüllen. Die Beschreibungen der Schutzmaßnahmen erfolgten aufgrund dieser frühen Projektphase auf konzeptioneller Basis mit überwiegend qualitativen Erläuterungen. Durch die Aufstellung projektspezifischer Bewertungskriterien soll eine vergleichende Gegenüberstellung der einzelnen Sicherungsvarianten aufgestellt werden um als Entscheidungsgrundlage für die zuständige Fachabteilung zur Wahl des folglich auszuführenden Schutzkonzepts zu dienen. Als Normengrundlage und Leitfaden für die Untersuchungen dient die Richtlinie ONR 24810 [27] (Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung) die im Jänner 2013 erstmals veröffentlicht und im Jahr 2016 überarbeitet wurde.

### 1.4 Struktur und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit lässt sich zur Übersicht in die folgenden thematischen Abschnitte eingliedern:

- Die Einführung in die Steinschlagproblematik: Einleitende Beschreibung des Projektgebiets und allgemeine Erläuterungen zur aktuellen Situation.
- Geologisch-geotechnische Randbedingungen: Detaillierte Grundlagen zu den vorliegenden geologischen und felsmechanischen Rahmenbedingungen sowie diesbezügliche geotechnische Bewertungen.

*(Die Inhalte dieses Abschnittes wurden vollständig aus dem projektinternen geologisch-geotechnischen Gutachten entnommen, Geolith Consult [25])*

- Steinschlagsimulationen: Modellierung der Steinschlagprozesse mit Hilfe von 2D- und 3D-Berechnungsprogrammen, mit dem Ziel die auftretenden Impaktenergien, Fallgeschwindigkeiten, Sturzpfade, Sprungweiten und Aufschlagspunkte der Steinschläge zu erfassen.
- Schutzmaßnahmen: Konzeptionelle Erläuterung projektspezifischer Schutzvarianten sowie möglicher Unter- und Teilvarianten für den betroffenen Straßenabschnitt.
- Gegenüberstellung der Schutzbauten: Auf Grundlage relevanter Bewertungskriterien werden die vorgeschlagenen Schutzvarianten qualitativ beurteilt, um eine passende Entscheidungsgrundlage bereitzustellen und ein abschließendes Fazit zu ermöglichen.

## 2. Einführung in das Projekt und Projektgebiet

### 2.1 Geographische Lage

Die L127 ist eine rund 6,9 Kilometer lange Landesstraße in der Obersteiermark in den Ennstaler Alpen und liegt rund 100 Straßenkilometer nördlich von der Landeshauptstadt Graz. Die zweispurige Straße befindet sich im steirischen Verwaltungsbezirk Leoben und verbindet die Gemeinden Radmer an der Stube, Edelsstückl sowie Radmer an der Hasel über die B115 (Eisen-Straße) mit dem Bundesstraßennetz. Ein bekanntes Ausflugsziel und Naherholungsgebiet ist der Nationalpark Gesäuse, der sich unmittelbar westlich vom Projektgebiet befindet (Abbildung 1).

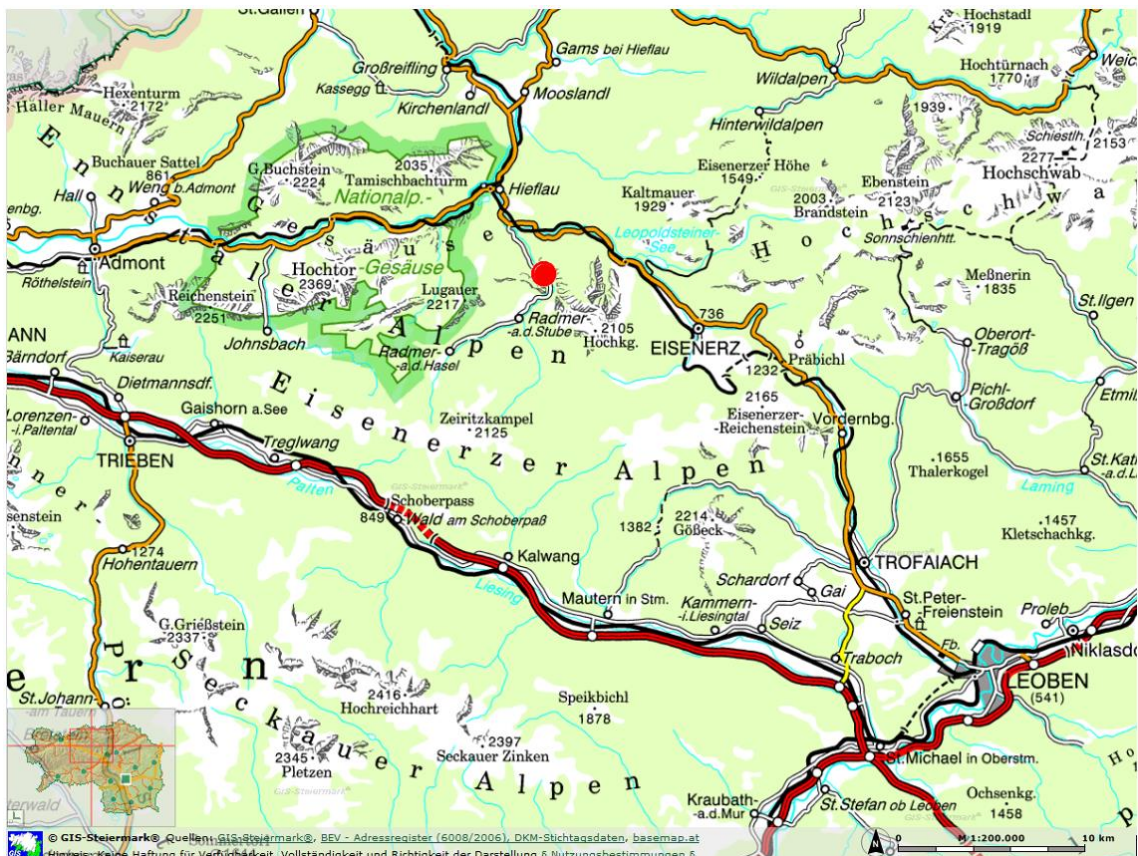


Abbildung 1: Lageübersicht, Maßstab 1:200.000 (GIS-Steiermark, Grundkarte [40])

Radmer (diese Ortsbezeichnung wird in der Folge überbegrifflich für die angeführten Gemeinden verwendet) kann aufgrund der topographischen Gegebenheiten lediglich nördlich über die Zufahrt der Eisen-Straße (rot markierter Straßenverlauf in Abbildung 2) erschlossen werden.

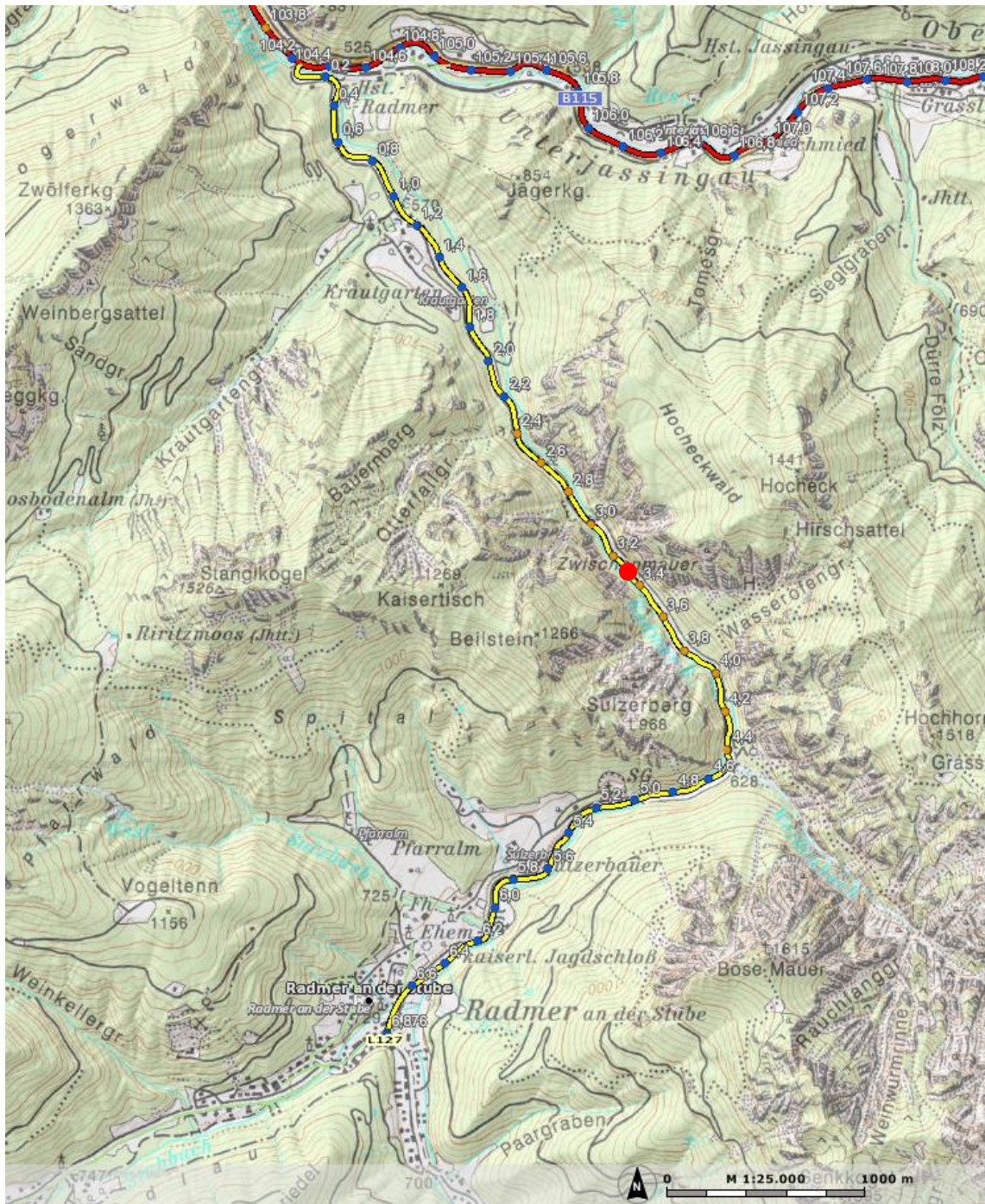


Abbildung 2: Kilometrierung der Landesstraße L127 und Lage des Gefährdungsgebiets rund um km 3,25 (roter Markierungspunkt), Maßstab 1:25.000 (GIS-Steiermark, Amtliche Karte [40])

Die L127 stellt somit eine unumgängliche verkehrstechnische Zufahrtsmöglichkeit für die Gemeinde Radmer dar, wodurch eine systematische Umfahrung des Steinschlaggebiets nicht als Lösungsvariante herangezogen werden kann. Rund um Straßenkilometer 3,25 der L127 befindet der angesprochene Gefahrenbereich (roter Markierungspunkt siehe Abbildung 2) mit dem dazugehörigen Berghang und Steinschlageinzugsgebiet, von dem das akute und unmittelbare Steinschlagrisiko durch bisherige Beobachtungen ausgeht.

## 2.2 Morphologie der Gefahrenzone

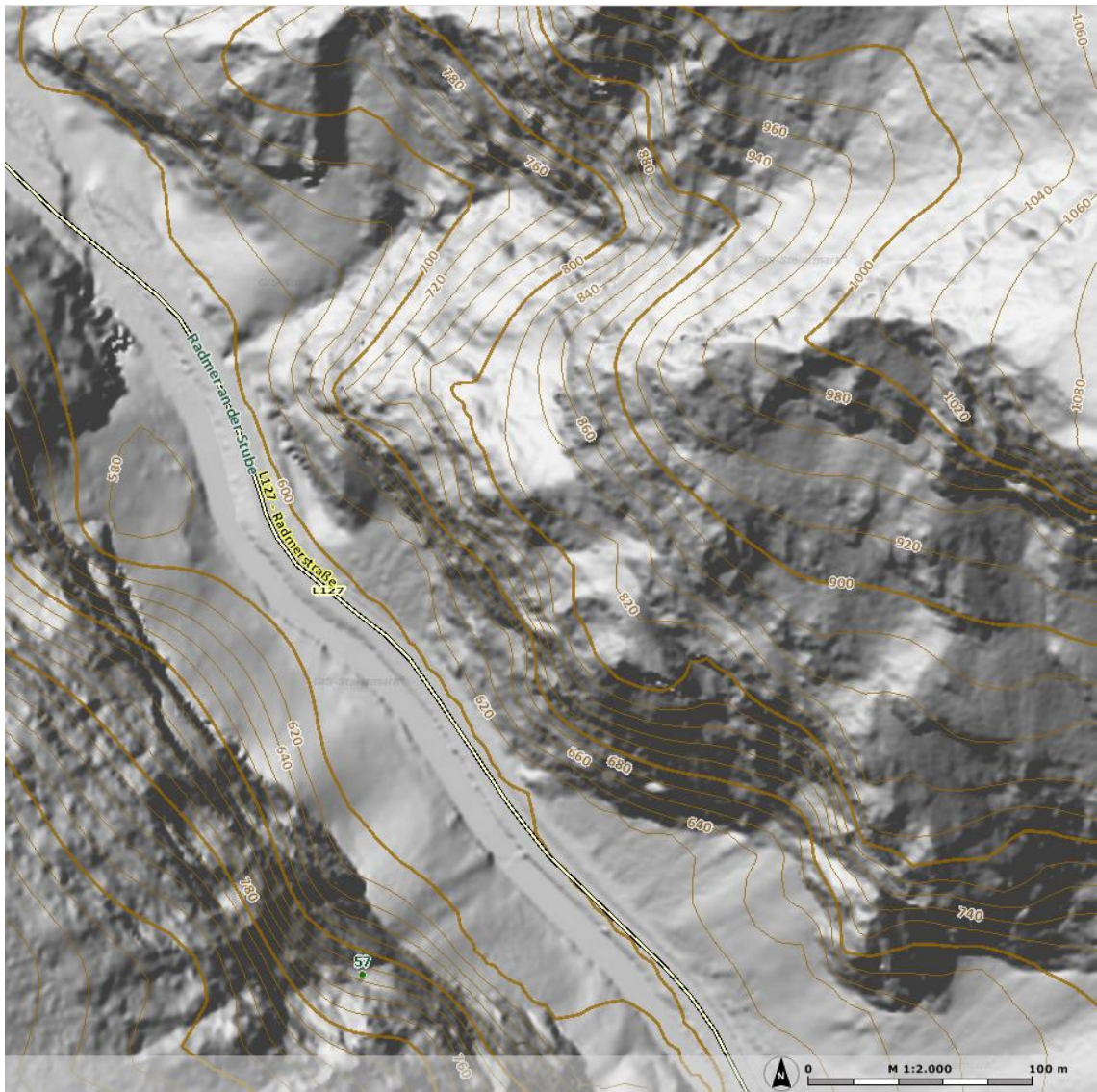


Abbildung 3: Relief und Höhenschichtlinien der Felswand, Maßstab 1:2000 (GIS-Steiermark, Schummerung – Relief [41])

Der gefährdete Straßenabschnitt befindet sich an der sogenannten „Zwischenmauer“, an der die steilen Hänge des Beilsteins (1266 m ü. NN) südwestlich und des Hochecks (1441 m ü. NN) nordöstlich die Eingrenzung des schmalen Talabschnitts bilden (Abbildung 2). Das Relief und die dazugehörigen Höhenschichtlinien des Gefährdungsgebiets sind in Abbildung 3 dargestellt. Die Landesstraße L127 verläuft auf einer Geländehöhe von ca. 600 m ü. NN, parallel dazu fließt der Radmerbach in nordwestliche Richtung. Der Steilhang, von dem das akute Steinschlagrisiko ausgeht, befindet sich in Abbildung 3 auf der orthografisch rechten Talseite, grenzt unmittelbar an die Landestraße an und weist eine südwestliche Fallrichtung auf. Dieser Berghang bildet den südwestlichen



Bergfuß des Hochecks (Abbildung 2). Eine morphologische Schneide unterteilt den betroffenen Bergabschnitt im Allgemeinen in zwei wesentliche Bereiche hinsichtlich der Fallrichtungen: Zum einen jenen mit nordwestlicher Fallrichtung und zum anderen jenen mit südlicher bis südwestlicher Orientierung, von dem die aktuelle Steinschlaggefährdung ausgeht.



*Abbildung 4: Befliegung im Bereich der „Zwischemmäuer“ – Orographisch östliche Talseite, nördliche Blickrichtung [24]*

Die Morphologie an der zentral angrenzenden Felswand lässt sich, hinsichtlich der Steinschlaguntersuchung, generell in drei wesentliche Bereiche eingliedern:

- Erster steiler Abschnitt von ca. 610 bis 800 m ü. NN: Der unmittelbar zur Landesstraße angrenzende Bereich der Felswand, mit einem mittleren Neigungswinkel von ca. 75 bis 80°

- Flachere Zwischenstufe an der Felswand auf einer Höhe von ca. 800 bis 840 m ü. NN: In diesem Bereich liegt eine geringere Böschungsneigung, i.A. von  $< 50^\circ$  bis teilweise eben (siehe Abbildung 6)
- Zweiter Steilabschnitt von 840 bis ca. 950 m ü. NN: Steigungen über  $60^\circ$ , vergleichbar mit dem unteren Steilabschnitt.

Die zentrale Felswand mit dem dazugehörigen Berghang ist in der Aufnahme aus der Hubschrauberbefliegung in Abbildung 4 dargestellt. Hierbei ist die erwähnte Einteilung der angrenzenden Felswand aus der Profilansicht gut veranschaulicht (nördliche Blickrichtung). Die stellenweise auftretende Vegetation zumeist in Form von Nadelbäumen auf Höhe der Zwischenstufe, am südlichen Steilhang sowie auf flacheren Hängen im Talbereich ist ebenfalls aus dieser Perspektive ersichtlich. Das Wurzelwachstum des Bewuchses ist in diesem Sinne ein möglicher Auslöseindikator für die auftretenden Steinschlagprozesse. Eine detaillierte Beschreibung der Morphologie folgt in Kapitel 3.

### 2.2.1 Rinnenstruktur im Haupteinschlagsbereich



Abbildung 5: Gefährdungszone im Straßenbereich und Rinnenstruktur im digitalen Oberflächenmodell [20]

Ein weiteres morphologisches Merkmal ist der rinnenartige Einschnitt an der zentralen Felswand, welcher auch durch den Verlauf der Höhenschichtlinien im Bereich der Zwischenstufe in Abbildung 3 und in Bereich der roten Markierung an der Felswand in Abbildung 5 ersichtlich ist. Dieser morphologischen Rinnenstruktur auf Höhe der Zwischenstufe kommt eine besondere Bedeutung für die Steinschlagproblematik zu. In der orthografischen Aufnahme des digitalen Geländemodells (Abbildung 5) ist deutlich erkennbar, dass im Rinnenbereich und besonders am Bergfuß und im angrenzenden Straßenbereich in der Falllinie der Rinnenstruktur, die Vegetation und der Bewuchs im Allgemeinen ausbleiben. Dies ist vorab ein Hinweis auf einen der Hauptsturzverläufe der Steinschlagprozesse (siehe Kapitel 4.4.2), da aufgrund der auftretenden Steineinschläge das Vegetationswachstum stark gehemmt wird und daher in diesem Bereich die Vegetation optisch deutlich aussetzt. Dies ist zudem jener Straßenbereich in dem die Steinschläge in erhöhter Frequenz stattfinden (siehe 2.3.1). Unterhalb dieser „Rinne“ (diese Bezeichnung soll in weiterer Folge für die morphologische Struktur verwendet werden) befindet sich den Beobachtungen zufolge der räumliche Haupteinschlagsbereich (strichlierte Linie in Abbildung 5). Die Hubschrauber Aufnahme in Abbildung 6 zeigt die zentrale Felswand aus der Vogelperspektive und deutet den Rinneneinschnitt mit der roten Markierung zur Veranschaulichung an.



Abbildung 6: Zentraler Bereich der Felswand aus der Vogelperspektive [24]

Hierbei ist die Rinnenstruktur im oberen Abschnitt der Felswand gut ersichtlich, die durch die beiden Felshöcker links und rechts auf dem Höhenniveau der Zwischenstufe begrenzt wird. Im digitalen, dreidimensionalen Geländemodell ist diese morphologische Charakteristik an der Markierung ebenso gut ersichtlich (Abbildung 7). In den nachfolgenden Abbildungen und Darstellungen wird der Rinneneinschnitt zur besseren Orientierung jeweils durch einen kleinen roten Bogen gekennzeichnet.

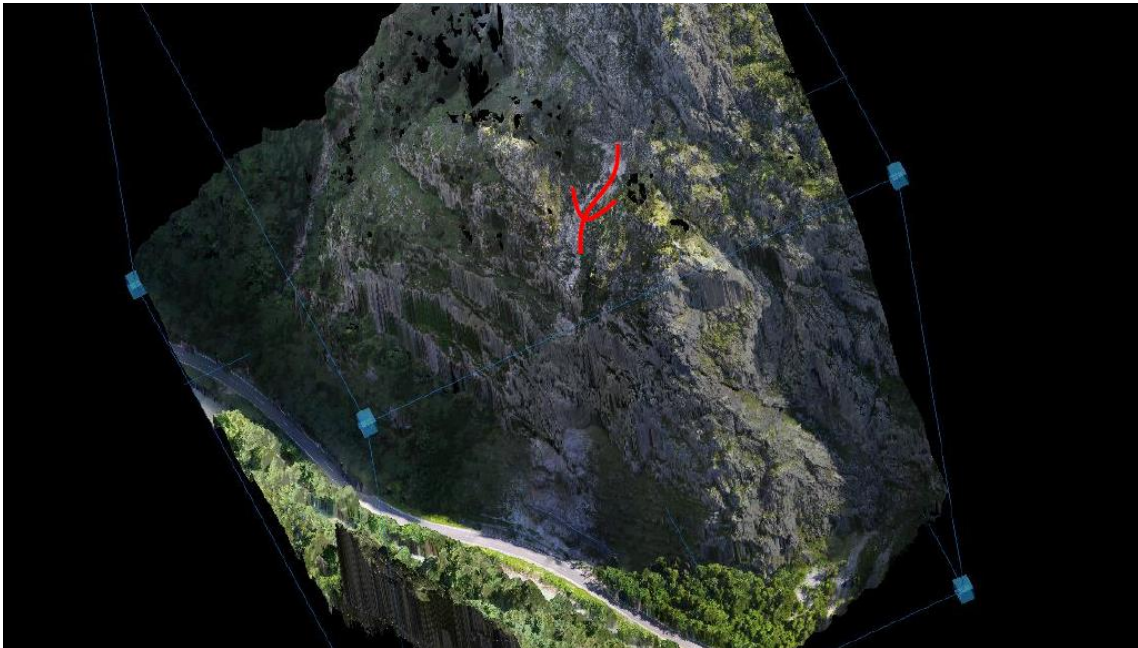


Abbildung 7: Morphologische Rinnenstruktur im 3D-Modell (RAMMS::ROCKFALL)

## 2.3 Rückblick und aktuelle Situation

### 2.3.1 Beobachtung von Steinschlagereignissen und Schäden

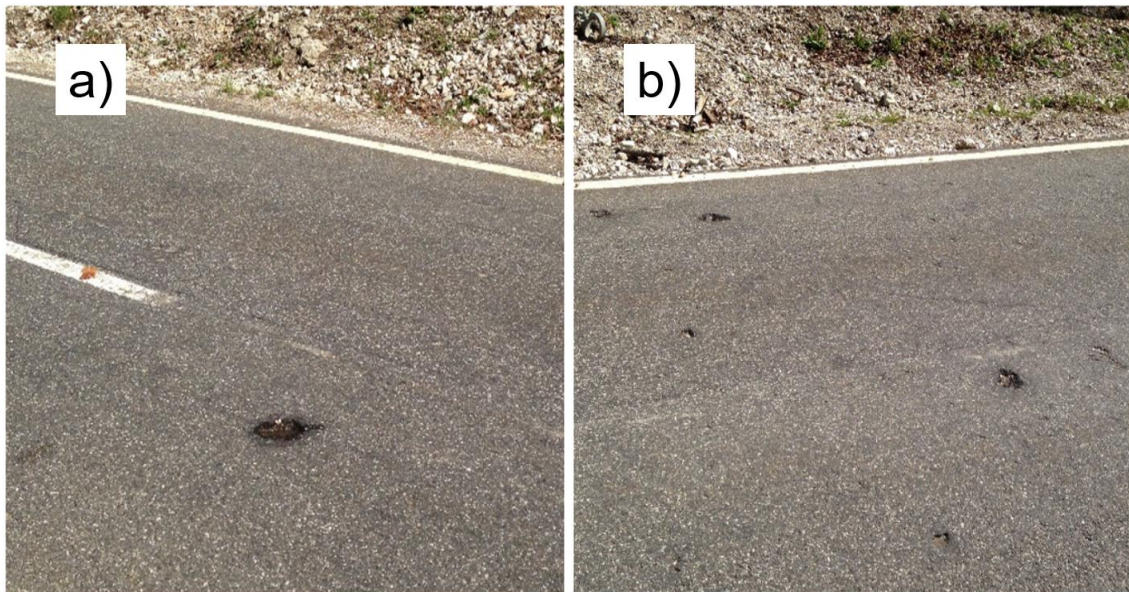
Eine Dokumentation von Steinschlagereignissen für diesen Straßenabschnitt im Zeitraum vom 2011 bis 2016 durch den Straßenerhaltungsdienst liegt in den angeführten projektinternen Unterlagen (Lit. [1] bis [18]) vor, diese Inhalte werden in Kapitel 3 (Geologisch-geotechnische Randbedingungen) näher behandelt. Auf Grundlage der allgemeinen Beobachtungen der zuständigen Straßenmeisterei, beschränken sich die Einschläge der Steinschlagkörper auf jenen Straßenbereich unmittelbar unterhalb der beschriebenen Rinnenstruktur (2.2.1). Der räumliche Haupteinschlagsbereich, der aktuellen und in jüngeren Vergangenheit auftretenden Steinschläge, erstreckt sich entlang des Straßenverlaufs, der in der allgemeinen Falllinie der morphologischen Rinne im zentralen Felswandbereich rund um Straßenkilometer 3,25 liegt.



*Abbildung 8: Beräumte kleinvolumige Steine am Straßenrand infolge von Steinschlagereignissen*

Bezüglich der Einschlagintensität und dem auftretenden Volumen der Einschlagskörper lässt sich nach Angaben des Straßenerhaltungsdienst im Allgemeinen die Aussage treffen, dass vordergründig kleinvolumige Steinschläge (bis ca.  $100 \text{ cm}^3$ ; in etwa faustgroße

Steine) den gefährdeten Straßenbereich in erhöhter Frequenz (bis zu mehrere Duzend monatlich) erreichen. Die zuständige Straßenmeisterei beobachtet daher den gefährdeten Straßenabschnitt in regelmäßigen Kontrollintervallen und beräumt diesen umgehend nach auftretenden Steinschlagereignissen. Eine repräsentative Verteilung der im Haupteinschlagsbereich auftreffenden Steinschlagkörper ist hierbei in Abbildung 8 dargestellt (detaillierte Dokumentationen der Schutthalden folgt in Kapitel 3). In Folge der Steinschlagprozesse kommt es immer wieder zu sichtbaren Straßenschäden insbesondere am Asphaltbelag des Straßenaufbaus. Ein repräsentatives Schadensbild in Abbildung 9 a) und b) dargestellt.



*Abbildung 9: Durch Steinschlag verursachte Straßenschäden am Asphaltbelag der L127 bei km 3,24 (a) und km 3,28 (b)*

### 2.3.2 Bisherige Maßnahmen



*Abbildung 10: Aktuelle Sicherungsmaßnahmen in Form von Steinschlagschutznetzen entlang der L127, Blickrichtung SO*

Im Jahr 2015 fand eine gezielte und strukturelle Beräumung des betroffenen Felswandbereichs statt. Durch die Beräumung der losen und bereits gelockerten Felspartien sollte mittelfristig das Steinschlagrisiko reduziert werden. Dabei konzentrierte sich die Beräumung auf den zentralen Wandbereich im Einflussbereich der morphologischen Rinne auf Höhe der Zwischenstufe. Bei dieser Beräumung wurden mehrere Kubikmeter Felsmaterial zum Teil herausgelöst bzw. beräumt. In weiterer Folge wurden zwei versetzte Steinschlagschutzbarrieren bergseitig im Straßenbereich unmittelbar unterhalb der Rinnenstruktur errichtet. Die Schutznetze weisen eine Höhe zwischen 3 m und 5 m auf und erstrecken sich im gefährdeten Straßenabschnitt parallel zur Landesstraße. Die Schutzzäune sind jeweils auf eine maximale Einschlagsenergie von 150 kJ (Zaun unten) und 1000 kJ (Steinschlagnetz oben) ausgelegt. Das Schutzpotenzial dieser Verbauungen gilt dabei vordergründig der rollenden bzw. nahe der (Fels-) Oberfläche springenden Steinschläge. Aufgrund der großen Höhe und steilen Fallneigung (70 bis 80°) der angrenzenden Felswand und den damit verbundenen großen potenziellen Sprungweiten der Steine

und Blöcke, stellt diese Schutzverbauung eine langfristig unzureichende Schutzmaßnahme dar.

## 2.4 Verkehrsaufkommen auf der Landestraße L127

Datengrundlage für das Verkehrsaufkommen der L127 ist die Datenbank des Informationsportals GIS-Steiermark [43]. Mit einem Verkehrsaufkommen von rund 800 Fahrzeugen pro Tag (aktuellstes Erfassungsjahr 2014) gehört die L127 somit zu einer gering frequentierten Landestraße in der Steiermark. Der Anteil der Lastkraftwagen liegt im Jahr 2014 bei lediglich 2%. Die Landestraße L127 dient wie schon eingangs erwähnt als reine Erschließungsstraße in einem schwach besiedelten Alpengebiet, wodurch die Verkehrsbelastung auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau liegt.

*Tabelle 1: Verkehrsbelastung L127 ermittelt für die Jahre 2011, 2012 und 2014 - (GIS-Steiermark, Durchschnittlicher täglicher Verkehr [43])*

Straßenbezeichnung	Jahr	Schwerverkehrsanteil in %	DTV (KFZ / 24 h)
L 127	2011	14	700
	2012	14	700
	2014	2	800

Der prozentuale Anteil eines Tages, an dem die Kraftfahrzeuge den Gefährdungsbereich der Landestraße durchfahren, beträgt demzufolge nach WYLLIE [30] rund 6% ( $r_e = \text{risk of driver impact}$ ). Dies ist ein vergleichsweise geringer Anteil, da bei stark befahrenen Gefährdungsbereichen, Prozentwerte von über 50% auftreten können, wodurch in der Folge das allgemeine Risiko für direkte Steinschlagtreffer am Kraftfahrzeug nachteilig erhöht wird. Dieser Quotient berechnet sich aus dem Produkt der Länge des zu befahren Straßenabschnitts (ca. 150 m) mit der durchschnittlichen täglichen Verkehrsdichte (800 KFZ / 24h) und dem Produkt der durchschnittlichen Fahrtgeschwindigkeit (Annahme von ca. 80 km/h) mit einem Dimensionsfaktor. Die Formel für diesen Quotienten nach WYLLIE [30] ist nachfolgend dargestellt:

$$r_e = \frac{L \times N}{S \times 24000} = \frac{150 \text{ (m)} \times 800 \text{ (KFZ/24h)}}{80 \text{ (km/h)} \times 24000} = \frac{1}{16} \hat{=} 6,25\%$$



### 3. Geologisch-geotechnische Randbedingungen

#### 3.1 Definition: Block- und Steinschlag

Die ONR 24810 [27] definiert als Steinschlag das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken. Gemäß BUWAL [28] werden abgelöste Gesteinspartien mit einem Durchmesser von  $> 50$  cm als Blockschlag und einem Durchmesser  $< 50$  cm als Steinschlag definiert. Der Fallmechanismus nach dem Ablöseprozess des Gesteins hängt in erster Linie vom Neigungswinkel des Geländes ab. Nach DORREN [29] führen Geländeneigungen bis  $45^\circ$  zu einem rollenden Verhalten der Steinschlagkörper. Bei Neigungswinkeln zwischen  $45^\circ$  und  $70^\circ$  ist die Bewegungsform überwiegend durch das Springen und Abprall in kürzeren Abständen gekennzeichnet. Ab Geländeneigungen von  $70^\circ$  wird die translatorische Bewegungsform des Gesteinskörpers durch den freien Fall charakterisiert.

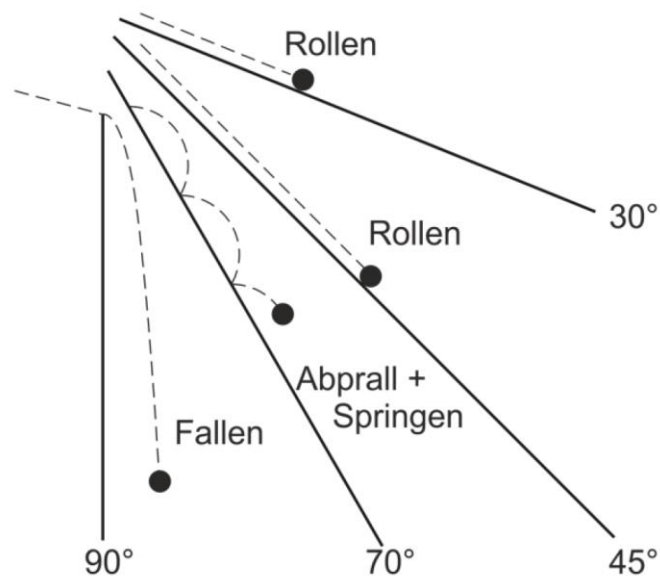


Abbildung 11: Bewegungsformen von Steinschlagprozessen [29]

#### 3.2 Befundaufnahme

**Anmerkung:** Die nachfolgenden Inhalte des Kapitels 3 sind vollständig im Wortlaut bzw. vereinzelt sinngemäß oder in Auszügen aus dem **projektinternen geologisch-geotechnischen Gutachten (Stein- und Blockschlaggefährdung an der L127 Radmerstraße von km 3,0 bis km 3,4 [25])** von Dr. Jürgen Loizenbauer und Mag. Peter Preiß (Geolith Consult) entnommen.

Die Aufnahme dieser Inhalte aus dem Gutachten Geolith in die gegenständliche Masterarbeit basiert darauf, dass die geologisch-geotechnischen Randbedingungen eine wesentliche Grundlage für die in den weiteren Kapiteln folgenden Ausführungen darstellen und somit eine Grundlage für die letztlich ausgearbeiteten Schutzmaßnahmen bilden.

### 3.2.1 Bearbeitungsbereich

Das festgelegte Projektgebiet umfasst die Felswände zu beiden Talseiten des Radmer Baches im Straßenabschnitt ca. km 3,00 bis km 3,50 umfasst. Für dieses Projektgebiet wurde ein digitales Geländemodell erstellt sowie geologisch-geotechnischen Grundlagen und Versagensprozesse erhoben. Die räumliche Erstreckung des Projektgebietes und des nachfolgend ermittelten Bearbeitungsbereiches ist in Abbildung 12 dargestellt.

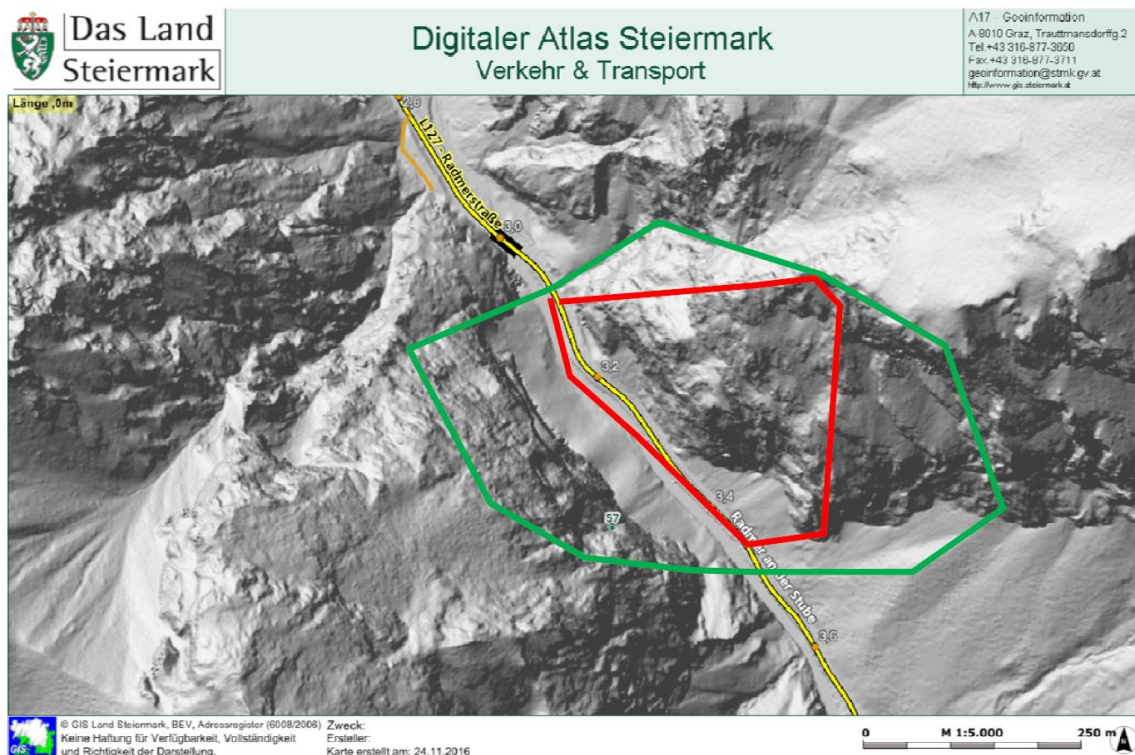


Abbildung 12: Übersichtskarte – Projektgebiet (grün) und Bearbeitungsbereich (rot) (GIS-Steiermark, Verkehr und Transport [43])

Oben dargestellte Abgrenzung des Bearbeitungsbereiches erfolgt gemäß [27] auf Basis folgender Punkte:

- geologisch-geotechnische Homogenbereiche zur Abklärung von potentiellen Versagensereignissen und den daraus ableitbaren Blockgrößen,

- potentielle Ablösebereiche, anhand des digitalen Geländemodells der Steinschlagsimulationen unter Berücksichtigung von 3D-Trajektorienmodellen (4.4.2) in Kombination mit
- Ereignisdokumentationen durch den Straßenerhaltungsdienst des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung und
- stummen Zeugen von Steinschlagprozessen (Schuttfächer, -kegel) im Ablageungsgebiet.

### 3.2.2 Regionale Geologie

Das Projektgebiet wird regionalgeologisch betrachtet aus Gesteinen der Nördlichen Kalkalpen, die dem Oberostalpinen Deckenstockwerk zugeordnet werden, aufgebaut (vgl. z.B. Lit. [23] und [41]).

Lithologisch wird die Geologie hier von den Wettersteinkalken bzw. Wetterstein- und Ramsaudolomiten dominiert, die südlich und westlich von den Gutensteiner Kalken und Dolomiten bzw. der Reichenhaller Rauwacke sowie den Werfener Schichten (Quarzite, Schiefer und Kalke) unterlagert werden. Mit den Werfener Schichten kann lokal auch das Haselgebirge (Mischgesteine von Evaporiten und Peliten) eingeschuppt sein.

Diese Festgesteine werden von Hangschutt und Schutthalden sowie Wildbachschutt und Kolluvien überlagert. In Abbildung 13 ist die geologische Karte des gegenständlichen Untersuchungsgebietes dargestellt. Der betreffende Straßenabschnitt (roter Pfeil) liegt innerhalb der Einheiten der Nördlichen Kalkalpen (NKA) des Oberostalpinen Deckenstockwerkes, das hier aus (3) Wettersteinkalk, Wetterstein- und Ramsaudolomit und (4) Gutensteiner Kalk und Dolomit, Reichenhaller Rauwacke aufgebaut wird. Überlagert werden diese Gesteine von (1) Auzonen, Kolluvien, Wildbachschutt bzw. (2) Hangschutt, Schutthalden, teilweise Würm).

Bei den Wettersteinkalken handelt es sich um meist weiße bis hellgraue, gut geklüftete Gesteine, die bis über 1000 m mächtige „Riff-Komplexe“ mit deutlicher Faziesdifferenzierung in Vorriff, Riffkern und Backriffbereich umfassen, während die Wetterstein- und Ramsaudolomite weiße, dolomitisierte Kalke (Wettersteindolomit) bzw. weiße bis hellgraue, „zuckerkörnige“ massige, gut geklüftete, meist kleinstückig brechende Gesteine darstellen. Die Mächtigkeit dieser stark zur Schuttbildung neigender Gesteine variiert zwischen 500 m und 1000 m.

Die Wettersteinkalke zeigen im Gegensatz zu den dolomitischen Gesteinen (Wetterstein und Ramsaudolomite) eine gute Verkarstungsfähigkeit und sind zufolge ihrer Klüftung in hohem Grad wasserdurchlässig [23].

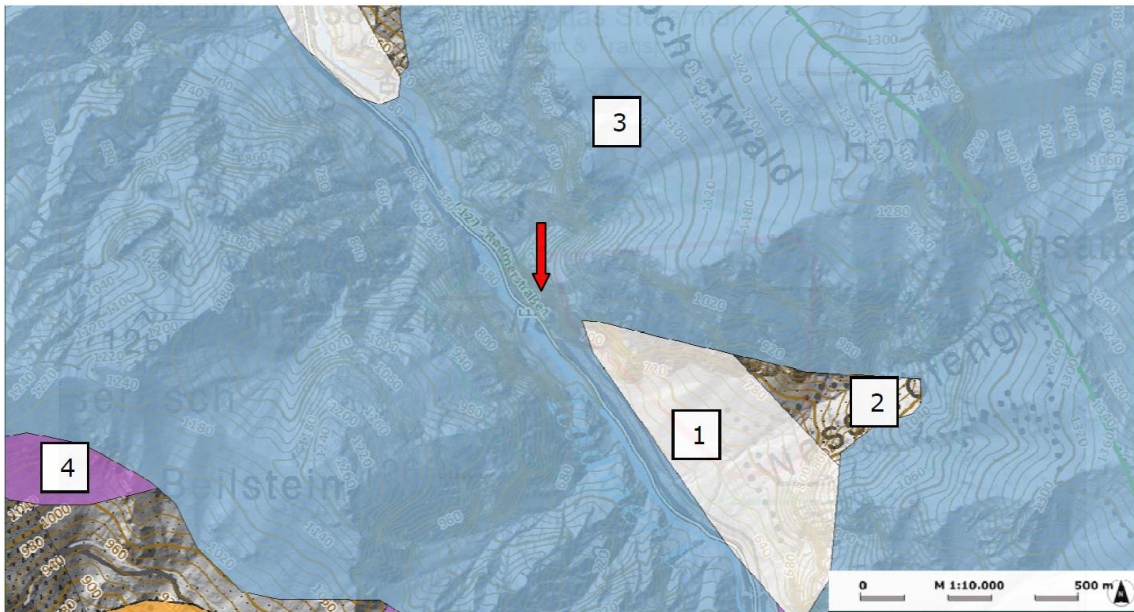


Abbildung 13: Geologische Karte des gegenständlichen Untersuchungsgebietes (GIS-Steiermark Geologie & Geotechnik [41])

### 3.2.3 Geomorphologische und strukturelle Gegebenheiten

Im Rahmen der Begehungen 2016 wurden die Taleinhänge beiderseits der L 127 bergseits des gegenständlichen Straßenabschnittes auf morphologische Merkmale untersucht, wobei der orographisch rechte Taleinhang mit dem aktuellen Trassenverlauf der L127 detaillierter erhoben wurde. Zudem wurden neben der Geologie auch die maßgeblichen Gefügemerkmale erfasst. Die lokalen geologisch-geomorphologischen Gegebenheiten werden im Folgenden näher beschrieben. Zusätzlich wurden Auswertungen an den digitalen Geländeoberflächen, die anhand von Befliegungen mittels Drohne bzw. Helikopter vom Institut für Angewandte Geowissenschaften (TU Graz) erstellt wurden, durchgeführt und deren Ergebnisse eingearbeitet.

#### 3.2.3.1 Geomorphologie

Die Radmer Straße verläuft im untersuchten Abschnitt etwa in Nordwest-Südost Richtung und führt durch einen schluchtartigen, etwa 500 m langen Abschnitt wobei die Felsformationen der s.g. Zwischenmäuer gequert werden. Die Straßentrasse selbst befindet sich am orographisch rechten (östlichen) Taleinhang auf ca. 596 m ü. NN. und damit

etwa 2 m über Bachsohlenniveau des Radmer Baches. Dieser Taleinhang wird morphologisch durch Felswände und -stufen gegliedert und weist zwischen Fahrbahn und Gratverlauf einen Niveauunterschied von mehr als 300 Höhenmetern auf.

Die der Straßentrasse nächstgelegene Felswand an der östlichen Talseite ist mit einem Höhenunterschied von etwa 150 m die höchste dieser Felsformationen. Die Basis dieser Felswand befindet sich in einem minimalen horizontalen Abstand von wenigen Metern zur Straßentrasse.

Die Felsabbrüche an der orographisch linken (westlichen) Talseite stellen die Ausläufer des 1.266 m hohen Beilsteins dar und erreichen eine Höhe von bis zu 200 m über Talgrund. Der minimale Abstand zur gegenwärtigen Straßentrasse beträgt ca. 70 m und wird durch den etwa 2 m tief in die schwach und nur kleinräumig ausgeprägten Verebnungsflächen eingeschnittenen Bachlauf des Radmer Baches getrennt, der eine Breite von etwa 12 m aufweist. An der Basis der Felswände zu beiden Talseiten sind in unterschiedlichem Ausmaß Schutthalden bzw.- kegel entwickelt, deren Stirn durch den Radmer Bach durchschnitten wird.

Die markanten Felswände verlaufen etwa talparallel und sind durch weitläufig durchstreichende Großtrennflächen charakterisiert. Die Felsoberflächen sind im Allgemeinen gut strukturiert und weisen bis zu mehrere Meter auskragende Überhänge aber auch bis zu mehrere 10er Meter breite, flacher geneigte Geländestufen auf. Die vertikale Gliederung wird durch rinnen- bis grabenförmige Geländestrukturen und in untergeordnetem Ausmaß im Besonderen am den östlichen Taleinhängen auch durch parallel zu Großtrennflächen orientierte Rinnen- und Grabenbildungen geprägt. Im Zuge der Geländetätigkeiten wurde eine Wasserführung nur im nördlichen, das Projektgebiet begrenzenden Graben dokumentiert, der in weiterer Folge als „Wasserfallgraben“ bezeichnet wird.

An den in Richtung Süden exponierten Felswänden sind nur vereinzelt und an den in Richtung Norden exponierten Felswänden gehäuft (Halb-) Höhlenbildungen festzustellen, die untergeordnet auch durch eine geringe bzw. temporäre Wasserführung charakterisiert sind.

### 3.2.3.2 Trennflächengefüge

Für die Trennflächenauswertung wurden die Gefügedaten der maßgeblichen Trennflächen am Fuße der gegenständlichen Felswände des Projektgebietes mittels Geologenkompass aufgenommen und die Trennflächen (Schieferungs- Kluft- und Störungsflächen) im Schmidt'schen Netz dargestellt.

Die Orientierungen der Schieferungsflächen zeigen ein generell mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Südwest und lokal eine mittelsteile Einfallsrichtung gegen Nordwest bzw. Ost bis Südost, wodurch ein flachwelliger Faltenbau im m- bis 10er Meterbereich abgeleitet wird. Die Faltenachsen weisen ein flaches Abtauchen in Richtung Südost bzw. Südwest bis West auf. Daneben treten drei klufkörperbestimmende Kluftscharen auf, die als K1, K2 und K3 bezeichnet werden.

Das Kluftset K1 (graue/grüne Punkte in Abbildung 14) weist bei einem Pendeln um die Vertikale ein mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Nordost bzw. Südwest auf.

Die zweite Kluftchar K2 (gelbe Punkte in Abbildung 14) zeigt ein mittelsteiles bis steiles Einfallen sowie ein Pendeln um die Vertikale und im Mittel ein Einfallen nach Ost bzw. West.

Die Kluftchar K3 (blaue Punkte) ist durch ein mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Südost bzw. Nordwest charakterisiert. Vereinzelt dokumentierte Störungen entsprechen bei einem mittelsteilen Einfallen der Orientierung der Kluftchar K3 und können als horizontale bzw. vertikale Strukturen ausgebildet sein.

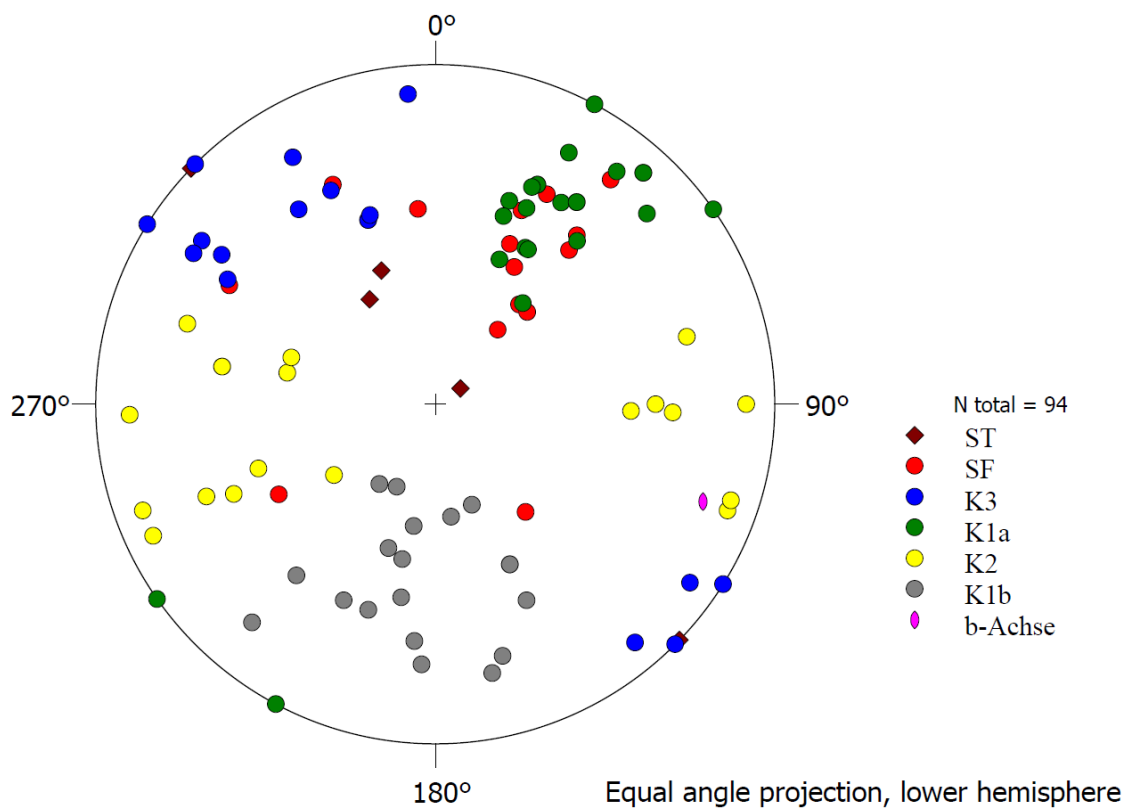


Abbildung 14: Polpunktdarstellung der Gefügedaten im Schmidt'schen Netz [25]

### 3.2.3.3 Felsmechanische Eigenschaften

Der Fels wird im Allgemeinen durch massige teilweise auch undeutlich gebankte, dolomitische Kalkgesteine (siehe Abbildung 15) aufgebaut, wobei ein Faltenbau mit flach in Richtung Südost- bzw. Nordwest abtauchenden Faltenachsen ausgebildet ist. Untergeordnet sind auch Breccien vorhanden, deren Auftreten im Wesentlichen auf das nördliche Projektareal beschränkt ist.

Die Trennflächensysteme weisen lokal korrosive Oberflächen auf. Im südlichen Projektgebiet treten vereinzelt und im nördlichen Abschnitt verstärkt auch Karsthohlformen (Karstschläuche, (Halb-)Höhlenbildungen) auf (siehe Abbildung 16 unten).

Der Gebirgsverband ist generell durch eine geringe bis mäßige Auflockerung gekennzeichnet. Die Kluftöffnungsweiten liegen generell im mm- bis unteren Zentimeterbereich und können sich lokal auch bis in den unteren dm-Bereich erstrecken. Die Kluftfüllung wird, soweit vorhanden, von einem sandigen Material gebildet. Offene Karsthohlformen erstrecken sich bzw. konnten bis über mehrere Meter erkundet werden (Abbildung 16).

Die Trennflächenabstände liegen zumeist im dm- bis Meterbereich. Die Kluftoberflächen sind generell eben, vereinzelt auch wellig bis stufig und weisen eine raue Oberflächenbeschaffenheit auf.

Die in Punkt 3.2.3.2 oben angeführten, maßgeblichen Trennflächen führen zu Verschneidungskörpern, die teilweise eine Bewegung der Kluftkörper aus der Böschung heraus begünstigen könnten.

Dabei wurden von der Geolith Consult mit Unterstützung des Instituts für angewandte Geowissenschaften (digitale Bewertung mittels Computerprogramm "block theory") die wesentlichen Kluftkörper (Einzelblöcke) hinsichtlich ihres versagensrelevanten Trennflächengefüges untersucht. Als Grundlage diente auch hier wieder das visualisierte 3-D-Modell, das vor allem mit Hilfe der Hubschrauberbefliegungen erstellt und im Zuge der Geländearbeiten (strukturgeologische Aufnahmen) auch verifiziert werden konnte.



*Abbildung 15: Überblick auf das Projektareal [25]*



*Abbildung 16: Karsthohlräume im südlichen Projektareal [25]*



### 3.2.4 Stumme Zeugen

Stumme Zeugen stellen rezente bzw. reliktsche Spuren im Gelände dar, die auf Massenverlagerungsprozesse qualitativ rückschließen lassen, wobei gemäß ONR 24810 [27] folgende Begriffserläuterungen für eine Beurteilung zu Grunde liegen:

- Ablagerungsgebiet; Auslaufgebiet: Umhüllende der durch abgelagerte Sturzblöcke gebildeten Flächen
- Ablösebereich; Herkunftsbereich: Ursprungsgebiet von Steinschlagprozessen
- Blockgröße: Volumen (Kubatur) eines Gesteinskörpers, in m<sup>3</sup>
- Blockgrößenverteilung: statistische Verteilung der auftretenden Blockgrößen (Volumina in m<sup>3</sup>), bezogen auf die Anzahl der Blöcke
- Schlagmarken: durch den Impakt von Sturzblöcken am Hang oder an Hindernissen (z. B. Bäumen) verursachte Störungen der Oberfläche

Als Dokumentationsgrundlage von stummen Zeugen wurden die Aufzeichnungen des Straßenerhaltungsdienstes (Lit. [1] bis [18]) für den Straßenabschnitt von ca. km 3,150 bis km 3,330, sowie die an der Basis der Felswände situierten Taleinhänge im Hinblick auf die Ausprägung der Schuttkegel, Schuttfächer und dem Auftreten von Schlagmarken herangezogen.

Des Weiteren wurden im Zuge der Geländebegehungen die von der Basis der Wandbildungen einsehbaren Geländeoberflächen sowie das digitale Geländemodell hinsichtlich dem Auftreten und der Ausbildung von Ausbrunnischen begutachtet.

#### 3.2.4.1 Stumme Zeugen im Ablagerungsgebiet

Die projektrelevanten Ablagerungsräume werden als Schuttfächer Nord (= Projektschwerpunktgebiet, wo Steinschlag auf die Straße dokumentiert ist und Schutzmaßnahmen jedenfalls erforderlich sind), Mitte, Süd und West bezeichnet. Die räumliche Verbreitung ist im Anhang schematisch dargestellt.

Das Ablagerungsgebiet Schuttfächer Nord wird im zentralen Teilabschnitt durch weitgehend von Vegetation frei gelegte Geländeoberflächen charakterisiert, während die Randbereiche von Gras überwachsen bzw. von Baum- und Strauchwerk bestanden sind. Aus diesem zentralen Teilabschnitt war auch das dokumentierte Blockschlagereignis vom 14.01.2011 [1] aufgetreten und wurden hier nachfolgend Beräumungsarbeiten durchgeführt und auch weiteren Versagensereignisse beschrieben (Lit. [2] bis [18]). Auch im

Zuge von Geländebegehungen im Jahr 2016 fand hier Steinfall statt. In den Randbereichen wurden keine oder nur vereinzelt aktuelle Kluffkörper festgestellt. Schlagmarken finden sich sowohl berg- und talseitig der Straßentrasse sowie im Fahrbahnkörper selbst. Das Ablagerungsgebiet reicht bei vereinzelt Steinen und Blöcken der aktuellen Versagensereignisse (natürlich ausgelöster bzw. im Zuge von Beräumungsarbeiten ausgelöster Absturz von Kluffkörpern) bis an das gegenüberliegende Bachufer (Bereich West). Das Volumen der im Zuge der Geländearbeiten sowie in Lit. [2] bis [18] erhobenen Blöcke ist zumeist deutlich kleiner als  $0,0075 \text{ m}^3$ , wobei die überwiegende Anzahl dieser Blöcke nur Kantenlängen im unteren cm-Bereich aufweisen. Einzelne Blöcke sind mit Kantenlängen von bis zu  $0,7 \text{ m}$  dokumentiert. Im nördlichen Randbereich treten auf dem mit vorwiegend Gras überwachsenen Schuttkegel auch Blöcke mit Kantenlängen von mehr als einem Meter auf, sind jedoch bemoost bzw. von Gras bewachsen.



Abbildung 17: Ablagerungsgebiet Schuttfächer Nord [25]

Das Ablagerungsgebiet Schuttfächer Mitte wird im zentralen Teilabschnitt ebenfalls durch weitgehend von Vegetation frei gelegte Geländeoberflächen charakterisiert, während die Randbereiche von Gras überwachsen bzw. von Baum- und Strauchwerk bestanden sind. Dieser zentrale Teilabschnitt bildet die talseitige Fortsetzung einer markanten Rinnenstruktur in den höher liegenden Felsoberflächen. Der von Vegetation

überwachsene Anteil des Schuttfächers ist an der Basis von stark strukturierten Felswänden, die im südlichen Teilbereich auch ein turmartiges Erscheinungsbild zeigen, situiert.

Die am Taleinhang vorliegenden Blöcke sind vereinzelt aktuell, d. h., sie weisen im Vergleich zu den grau verwitternden Gesteinsoberflächen eine hellere weißlich-graue bzw. oxidierte Farbgebung auf und sind in bewaldeten Geländeteilen nicht von der Waldstreu bedeckt. Markante Schlagmarken konnten keine dokumentiert werden, es finden sich aber v.a. in den südlichen Geländeteilen vermehrt Anhäufungen von Blöcken mit Kantenlängen im Zentimeter- bis unteren Dezimeterbereich bergseits von Baumstämmen bzw. sind einige auch im Strauchwerk verkeilt (Abbildung 18). Das Ablagerungsgebiet reicht bei vereinzelt Steinen und Blöcken bis an die wenige Meter bergseits der Straßentrasse situierte aufgelassene Bahntrasse (Abbildung 19). Der im Zuge der Geländearbeiten erhobene überwiegende Teil der Blöcke ist deutlich kleiner als  $0,0075 \text{ m}^3$  (Abbildung 20). Sehr vereinzelt auftretende Blöcke mit Kantenlängen von mehreren Dezimetern sind mit einer Ausnahme stark bemoost und gut in die Schutthalden eingebettet.



Abbildung 18: Detailaufnahme Bewaldeter Schuttfächer Mitte mit Kleinstlöcken [25]



Abbildung 19: Detailaufnahme Bewaldeter Schuttfächer Mitte [25]



Abbildung 20: Detailaufnahme Schuttfächer Mitte (Maßstab 20 cm) [25]

Das Ablagerungsgebiet Schuttfächer Süd wird durch weitgehend von vegetationsfreien Geländeoberflächen charakterisiert und wird an seinem südlichen Rand durch einen baumbestandenen Geländerücken begrenzt. Der Schuttfächer selbst setzt sich aus mehreren untergeordneten Schuttkegeln zusammen.

Die am Einhang vorliegenden Blöcke sind vereinzelt als aktuell einzustufen, d. h. sie weisen auch hier im Vergleich zu den grau verwitternden Gesteinsoberflächen eine hellere, weißlich- graue bzw. oxidierte Farbgebung auf. Markante Schlagmarken an Geländeoberflächen konnten hier keine dokumentiert werden.

Das Ablagerungsgebiet reicht bei vereinzelt Blöcken von Faust- bis Kindskopfgröße bis an die wenige Meter bergseits der Straßentrasse situierte aufgelassene Bahntrasse.

Der im Zuge der Geländearbeiten erhobene überwiegende Teil der Blöcke weist ein Volumen von deutlich kleiner als  $0,0075 \text{ m}^3$  auf (Abbildung 21). In äußerst geringer Anzahl treten Blöcke mit Kantenlängen von mehreren Dezimetern auf und sind diese im Wesentlichen an den Randbereichen untergeordneter Schuttkegel bzw. zu den mit Wald bestandenen Geländeoberflächen konzentriert (Abbildung 22). Im Nahbereich der südlichen Projektgrenze befinden sich Blöcke mit Kantenlängen über 2 m (Abbildung 23), die bemoost bzw. mit Gras bewachsen gut in die Schutthalden eingebettet sind.



Abbildung 21: Detailaufnahme Schuttfächer Süd, Maßstab 20 cm. [25]



Abbildung 22: Detailaufnahme Schuttfächer Süd, Maßstab 60 cm. [25]



Abbildung 23: Detailaufnahme Schuttfächer Mitte. Maßstab 200 cm durch rote Linie markiert [25]

Das Ablagerungsgebiet Schuttfächer West wird weitgehend durch vegetationsfreie Geländeoberflächen charakterisiert und wurde - aufgrund der Eingrenzung des Projektgebietes – auf den an der orographisch rechten Talflanke situierten Bearbeitungsraum nicht im Detail bearbeitet. Generell sind die am Einhang vorliegenden Blöcke vereinzelt als aktuell einzustufen, d.h. sie weisen im Vergleich zu den grau verwitternden Gesteinsoberflächen eine hellere, weißlich- graue bzw. oxidierte Farbgebung auf. Das Ablagerungsgebiet reicht bei vereinzelt Blöcken mit Kantenlängen im oberen Dezimeterbereich bis an das Ufer des Radmer Baches.

Die Blockgrößenverteilung entspricht augenscheinlich den Ablagerungsräumen der Schuttfächer Nord, Mitte und Süd an der gegenüberliegenden östlichen Talflanke, wobei auch hier der überwiegende Anteil der Blöcke deutlich kleiner als  $0,0075 \text{ m}^3$  ist und nur untergeordnet Blöcke mit Kantenlängen von mehreren Dezimetern auftreten. Vereinzelt sind Blöcke mit Kantenlängen über 2 m vorhanden, die bemoost bzw. Gras bewachsen gut in die Schutthalden eingebettet sind.

#### 3.2.4.2 Versagensvolumina

Im Zuge der Kartierungsarbeiten wurden zur Ermittlung von potentiellen Versagensvolumina die Blockgrößen im Fußbereich der Felswände (Schutthalden, -kegel) sowie Gesamtvolumina von Versagensereignissen anhand von Ausbrüchnischen an den Felswänden dokumentiert.

#### 3.2.4.3 Blockgrößen Ablagerungsbereich

Zur Festlegung der Bemessungsblockgröße wurde im gesamten Ablagerungsbereich der Schuttfächer Mitte und Süd die Häufigkeitsverteilung einzelner Blockgrößenklassen an der Geländeoberfläche und Schutthalden über eine Flächenanalyse ermittelt. Im Bereich der vegetationsfreien Schutthalden lassen sich an der Oberfläche flächenhaft verbreitete, eng gestufte Kornfraktionierungen auskartieren (Abbildung 24). Über eine gemittelte Kantenlänge der einzelnen Blockgrößenklassen lässt sich auf eine Anzahl von Einzelblöcken pro Flächeneinheit hochrechnen. Die Ermittlung der Blockgrößenklassen wurde an repräsentativen Teilbereichen in einzelnen Schutthalden mittels Maßband durchgeführt und sind die Blockgrößenklassen sowie deren Häufigkeit in den entsprechenden Schutthalden in der Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 2: Blockgrößenklassen Schutthalde Mitte [25]

Blockgrößen- klasse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Anteil Einzelblöcke pro Gesamtfläche
Bezeichnung	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[%]
1	0,025	0,025	0,025	0,000016	93,68
2	0,2	0,1	0,05	0,001	6
3	0,6	0,2	0,1	0,012	0,32
4	0,8	0,4	2	0,064	<<0,1

Tabelle 3. Blockgrößenklassen Schutthalde Süd [25]

Blockgrößen- klasse	Länge	Breite	Höhe	Volumen	Anteil Einzelblöcke pro Gesamtfläche
Bezeichnung	[m]	[m]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[%]
1	0,02	0,02	0,02	0,000008	92,27
2	0,1	0,05	0,05	0,00025	7,39
3	0,2	0,18	0,1	0,0036	0,34
4	1	0,8	0,8	0,64	0,03
5	2,5	1,4	0,8	2,8	<<0,01
6	6	4	2,5	60	<<0,01

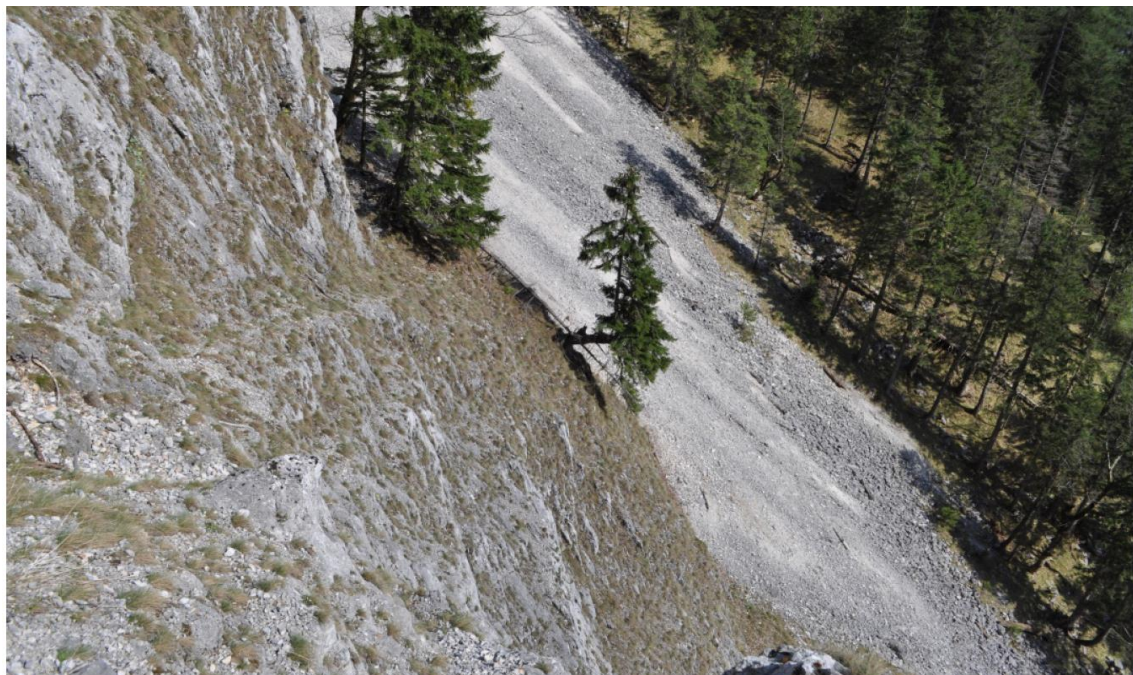


Abbildung 24: Detailaufnahme Schutthalde Süd mit Kornfraktionierung im Ablagerungsraum [25]



Für den Ablagerungsbereich des Schuttfächers Nord wird eine Abschätzung der Blockgrößen anhand der an der Basis der Felswand abgelagerten und der im Zuge der Versagensereignisse dokumentierten Blöcke vorgenommen. Als zusätzliche Informationsquellen dienen die im Zuge von Hubschrauberbefliegungen festgestellten Schutthalden im Einzugsgebiet der zentralen Rinnenstruktur, die aktuell das wesentlichste Liefergebiet für Steinschlag darstellt (siehe auch 3.2.4.5).

#### 3.2.4.4 Ausbruchnischen im Ablösebereich

Die vom Wandfuß und anhand des digitalen Geländemodells abgeschätzten Volumina von Ausbruchnischen an den Felswänden im Projektgebiet können mehrere 10er m<sup>3</sup> bis vereinzelt über 100 m<sup>3</sup> erreichen (auf Ereignisse mit derart großen Blöcken konnten bei der Recherche jedoch nicht gestoßen werden) und führen häufig zur Ausbildung von überhängenden Felsoberflächen. Die Felsoberflächen der Ausbruchnischen weisen keine „frischen“ Anbruchflächen auf und sind in der Regel als reliktsch einzustufen. Ausnahmen bilden an der östlichen Talflanke das in Lit. [1] dokumentierte Versagensereignis sowie zwei Ausbrüche von Klufkörpern mit einem Volumen von <0,75 m<sup>3</sup> im Bereich der Schutthalde Mitte bzw. Süd. An der westlichen Talflanke befindet sich eine aktuelle Ausbruchnische im Bereich der Wandkrone und umfasst augenscheinlich abgeschätzt ein Volumen von ca. 10 m<sup>3</sup> bis 15 m<sup>3</sup>.

#### 3.2.4.5 Beschreibung der potentiellen Ablösebereiche

Basis der Beschreibung potentieller, großvolumiger Ablösebereiche bildet im Wesentlichen auf Grund der Unzugänglichkeit großer Teile des Projektgebietes das digitale Geländemodell unterstützt von Fotodokumenten aus den Hubschrauberbefliegungen und visuellen Beurteilungen vom Wandfuß aus. Die gemeinsamen Befliegungen, an denen u. a. auch die Herren Mag. Preiß und Dr. Loizenbauer (beide Geolith Consult) teilnahmen, stellten auch eine wesentliche Grundlage für die nun vorliegende geologisch-geotechnische Bewertung dar.

Zur Ermittlung potentieller Versagensmechanismen an Einzelblöcken in den vorherrschenden Wandfluchten wurde vom Institut für Angewandte Geowissenschaften das Programm "block theory" zur Verfügung gestellt [22] und von der Geolith Consult mit Unterstützung des Institutes im Detail einzelne mögliche Versagensbereiche mittels Computerprogramm ausgeschieden, die im Folgenden beziehungsweise auf die oben genannten Einzugsgebiete beschrieben werden.

**Einzugsgebiet Schutthalde Nord (= wesentlichster Projektbereich):**

Das Einzugsgebiet der Schutthalde Nord umfasst die unmittelbar vom Talgrund aufsteigende unterste Wandflucht an deren Wandkrone eine Rinnenstruktur eingeschnitten ist, durch die konzentriert potentielle Stein- und Blockschlagereignisse aus den höher situ-ierten Felswänden (siehe Abbildung 25 unten) abgeführt werden.

In geringer geneigten Geländeteilen dieser Rinne sind kleinräumige Schuttkörper entwi-ckelt, deren vegetationsbedeckten Oberflächen durch die Versagensereignisse der letz-ten Jahre gestört sind und nunmehr einer verstärkten Erosion unterliegen. Informationen über die aktuelle geologisch-geotechnische Situation an diesen, vom Wandfuß aus nicht einseh-baren Wandabschnitten, konnten nur im Zuge von Hubschrauberbefliegungen ge-wonnen werden und wurden mit den Literaturangaben Lit. [1] bis [18] in Verbindung ge-setzt. Eine schematische Darstellung der Lage des Einzugsgebietes ist Abhang zu ent-nehmen.



*Abbildung 25: Detailaufnahme Einzugsgebiet Schutthalde Nord [25]*

An den Felswänden wurden insgesamt 4 Bereiche identifiziert, die in Lit. [21] als Block 1, Block 3a und Block 3b sowie Block 4 bezeichnet sind und Gesamtvolumina zwischen ca. 66 m<sup>3</sup> und 800 m<sup>3</sup> aufweisen. Aufzeichnungen oder andere Informationen über Ver-sagensereignisse mit derart großen Blöcken sind nicht bekannt, d. h. wurden im Zuge

der Recherchen seit Aufzeichnungen vorliegen nicht angetroffen. Zusätzlich befinden sich in o. a. Rinne bis zu vier Blöcke im Schuttkörper eingebettet, die durch das digitale Geländemodell und durch die Beobachtungen während der Hubschrauberbefliegungen von der Geolith Consult identifiziert werden konnten. Die Volumina dieser Blöcke variieren zwischen ca. 0,5 m<sup>3</sup> und 1,6 m<sup>3</sup>.

#### **Einzugsgebiet Schutthalde Mitte:**

Eine schematische Darstellung der Lage des Einzugsgebietes ist im Anhang zu entnehmen und wird durch eine ebenfalls im tiefer liegenden Wandabschnitt situierte Rinnenstruktur charakterisiert. An den Felswänden wurde gemäß [22] ein Bereich identifiziert, der in Lit. [21] als Block 2 bezeichnet wird und ein Gesamtvolumen von ca. 550 m<sup>3</sup> aufweist.

#### **Einzugsgebiet Schutthalde Süd:**

Das Einzugsgebiet Süd wurde nicht mehr in den Bearbeitungsbereich übernommen.

### **3.3 Geologisch-geotechnische Beurteilung**

#### **3.3.1 Geologisch-geotechnische Situation:**

Das gegenständliche Arbeitsgebiet wird durch Einheiten der Nördlichen Kalkalpen des Oberostalpinen Deckenstockwerks (OOA) aufgebaut. Bei der geologischen Kartierung hat sich gezeigt, dass sich diese Einheiten im Wesentlichen aus überwiegend massigen, teilweise auch undeutlich gebankten, dolomitischen Kalken zusammensetzen, die einen Faltenbau mit flach in Richtung Südost- bzw. Nordwest abtauchenden Faltenachsen zeigen.

Die strukturgeologischen Untersuchungen führen zum Ergebnis, dass die Foliation im Projektgebiet generell ein mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Südwest und lokal eine mittelsteile Einfallrichtung gegen Nordwest bzw. Ost bis Südost aufweist und so den markanten Faltenbau bewirkt. Daneben treten drei Kluftscharen auf, die für die Ausbildung der Kluftkörper verantwortlich sind. Das Kluftset K1 weist ein mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Nordost bzw. Südwest auf. K2 zeigt ein mittelsteiles bis steiles Einfallen nach Ost bzw. West. Die Kluftchar K3 steht nahezu orthogonal zu K1 und

ist durch ein mittelsteiles bis steiles Einfallen in Richtung Südost bzw. Nordwest charakterisiert. Vereinzelt treten auch Störungsflächen auf, die zumeist subparallel zu K3 orientiert sind. Großräumig betrachtet sind die Trennflächen annähernd parallel zur Ausrichtung der großen Flusssysteme (Palten und Liesing, Salza, Radmer Bach, Erzbach, Mur und Mürz), d. h. den Hauptstörungssystemen in der Obersteiermark folgend, und sind mit den geologisch jüngsten tektonischen Ereignissen in Zusammenhang zu bringen.

Der Auflockerungsgrad an den Felsoberflächen kann als mäßig beschrieben werden, wobei im Allgemeinen trotz z. T. großer Öffnungsweiten eine gut Verzahnung des Gebirges besteht und eine mittlere bis hohe Gebirgsfestigkeit gegeben ist. Im Bereich des nördlich an der Projektgebietsgrenze verlaufenden, Wasser führenden Grabens sind auch bis zu mehrere Meter mächtige Breccien aufgeschlossen. An der Basis der Felswände sind im Besonderen an der Ausmündung von Graben- und Rinnenstrukturen mächtige Schuttfelder ausgebildet. Kleinere Schuttkegel können auch an Felsstufen lagern.

An der Böschung der aufgelassenen Bahntrasse finden sich über dem aktuellen Talsohlniveau auch fluvio-glaziale Ablagerungen, die im Gegensatz zu den kantigen Kornformen der Schutthalden durch gerundete Gesteinskomponenten charakterisiert werden. Die Höhlenbildungen sowie der Karstschlauch im südlichen Projektareal sind an den Verschnitt steil einfallender und Nordost-Südwest- bzw. etwa Nord-Süd-streichender Trennflächensysteme gebunden.

Die markanten, im nördlichen Projektbereich auftretenden Höhlen weisen, soweit erkundet, Tiefen von wenigen Metern auf und werden durch den Verschnitt Nordwest-Südost und Nord-Süd-streichender, steil in Richtung Südost bzw. Ost einfallender Kluftscharen (K1 und K2) geometrisch begrenzt, sodass häufig ein dreieckförmiges Höhlendach entsteht.

Die Schuttfelder an der Basis der Felswände im östlichen Taleinhang setzen sich aus quaderförmigen bis polyedrischen Kluftkörpern unterschiedlicher Korngröße (Kies- bis Blockgröße) zusammen und sind lokal mit Gras bewachsen bzw. bereits mit Bäumen bestanden.

### 3.3.2 Felsmechanische Beurteilung

Die Felswände weisen im Projektgebiet ein steiles, mit etwa 70° nach Südwesten gerichtetes Einfallen auf. Einzelne Bereiche in der Felsböschung sind auch steiler geneigt, bzw. sind auch Überhänge bis in den Meterbereich ausgebildet. Als geologisch-felsmechanisch ungünstige Grunddisposition ist die räumliche Lage der Schieferungsflächen und der Südwest abtauchenden Faltenschenkeln, die hier aus dem Gebirgsverband heraus in Richtung Straße (parallel zu K1a) einfallen, zu bewerten. Die Felswände weisen jedoch eine gute Verbandsfestigkeit des Gebirges auf.

Aus dem Verschnitt der einzelnen Trennflächenscharen lassen sich plattige bis polyedrische Kluftkörper mit einer überwiegenden Kubatur von  $<0,125 \text{ m}^3$  bzw. einer maximalen Kubatur von ca.  $10 \text{ m}^3$  bei Einzelblöcken ableiten, erreichen aber in Ausnahmefällen bis zu ca.  $60 \text{ m}^3$ . Aus geologischer Sicht sind durch das überwiegende Auftreten dieser Blöcke mit mehreren Kubikmeter Volumen an bereits konsolidierten und mit Wald bestandenen Schuttkörpern an der südlichen Grenze des Projektgebiets auch fluvio-glaziale Ablagerungsbedingungen im Bereich der Einmündung des Wasserofengrabens in das Radmertal nicht gänzlich auszuschließen.

Auf Basis der durch die "block theory" ermittelten potentiellen versagensrelevanten Trennflächenverschnittmuster wurden von der Geolith Consult anhand des zur Verfügung gestellten, digitalen Geländemodells fünf Bereiche identifiziert, in denen großvolumige Felsmassen (zwischen ca.  $66 \text{ m}^3$  und  $800 \text{ m}^3$ ) ausgeschieden werden können. Ein Versagen von Blöcken dieser Größenordnung ist in den verfügbaren Daten nicht dokumentiert und fließt in die statische Betrachtung der Blockgrößen, die als Grundlage für die weitere Planung herangezogen wurden, nicht ein.

### 3.3.3 Blockgrößen

Die Blockgrößen für Steinschlagereignisse wurden aus einer Ansprache der Ablösebereiche (Kluftkörpergrößen) und über die detaillierte Aufnahme der einzelnen Schutthalden bzw. der vorliegenden Sturzblöcken in den Halden abgeschätzt. Die oberhalb der untersten Wandstufe gelegenen Schutthalden im unmittelbaren Gefahrenbereich (Einzugsgebiet Nord) konnten für die Aufnahme nicht begangen werden. Daher wurden zur Bewertung die Beobachtungen während der Hubschrauberbefliegungen herangezogen. Zudem werden das Einzugsgebiet Nord, Mitte und Süd auf Grund der geologischgeo-

technischen Ähnlichkeit der Felsformationen als Homogenbereich definiert und die Ergebnisse der einzelnen Teilbereiche zur Blockgrößenverteilung im Bearbeitungsbereich in der nachstehenden Tabelle zusammengeführt.

*Tabelle 4: Blockgrößenklassen Bearbeitungsbereich [25]*

<b>Blockgröße</b>	<b>Länge</b>	<b>Breite</b>	<b>Höhe</b>	<b>Volumen</b>	<b>Blockgrößenverteilung</b>
Bezeichnung	[m]	[m]	[m]	[m³]	[%]
1	0,1	0,05	0,02	0,0001	90
2	0,25	0,25	0,2	0,0125	9
3	0,5	0,5	0,5	0,125	0,5
4	1,5	1	0,5	0,75	0,45
5	2	1	0,75	1,5	0,04
6	2,5	1	1	2,5	0,005
7	6	4	2,5	60	episodisch

Hinsichtlich „Zerkleinerungsgrad“ wird auf die Blockgrößen im Fußbereich verwiesen. Diese Blockgrößen sollten je nach Sturzbahnverlauf (überwiegender Aufprall auf Fels bzw. Lockergestein) bereits den „Zerkleinerungsgrad“ darstellen.

### 3.3.4 Ereignishäufigkeit

Zur Beurteilung der Ereignishäufigkeit gelten gemäß ONR 24810 [27] folgende Begriffsdefinitionen:

Die Ereignishäufigkeit (n) ermittelt sich aus Anzahl von Ereignissen im Projektgebiet, normiert auf ein Jahr (1/a):

- $n \geq 10$  (> 10 Ereignisse/Jahr)
- $1 \leq n < 10$  (1 bis 10 Ereignis/Jahr)
- $0,03 \leq n < 1$  (1 Ereignis/1 bis 30 Jahre)
- $n < 0,03$  (< 1 Ereignis/30 Jahre)

In den vom Wandfuß einsichtigen Felswänden sind nur sehr vereinzelt aktuelle, durch eine helle Verwitterungsfarbe gekennzeichnete Ausbruchnischen in einer Größenordnung von mehreren dm<sup>3</sup> festzustellen. Dies spiegelt sich auch auf den Schutthalden wider, die nur sehr vereinzelt „frische“ Sturzblöcke aufweisen. Auch sind Schlagmarken am Bewuchs sehr selten anzutreffen. Der hohe Anteil an kleinstvolumiger Sturzkörper weist auf ein vornehmlich witterungsbedingtes (Frost-Tauwechsel-bedingtes) Abplatzen von Gesteinsmaterial aus den Wandoberflächen hin. Großvolumige (> 0,75 m<sup>3</sup>) Versagen treten episodisch auf und werden durch das reliktsiche Auftreten im Waldbestand und durch Bewuchs der Sturzblöcke angezeigt. Als zusätzlicher Ablösebereich treten im Abschnitt Schutthalde Nord bestehende Schuttablagerungen in einer markanten Rinnenstruktur bergseits der untersten Wandflucht in Erscheinung.

Aus der Ereignisdokumentation (Lit. [1] bis [18]) sowie aus der Blockgrößenverteilung in den Schutthalden und der als aktuell dokumentierten Sturzblöcke und Ausbruchnischen in den Ablösebereichen wird für Blockgrößen mit einem Volumen <0,0001 m<sup>3</sup> die Ereignisfrequenzklasse EF 4 (sehr hoch), für Blockgrößen mit einem Volumen <0,0125 m<sup>3</sup> die Ereignisfrequenzklasse EF 3 (hoch) und für Blockgrößen mit einem Volumen <0,125 m<sup>3</sup> die Ereignisfrequenzklasse EF 2 (gering) festgelegt. Als Bemessungsblock ist aufgrund der Häufigkeit gemäß [27] ein Block mit einem Volumen von 0,0125 m<sup>3</sup> in Betracht zu ziehen.

Da jedoch in den Fotodokumenten jüngster Ereignisse auch einzelne Blöcke, deren Größe auf Basis der Fotos eine Kantenlänge von bis zu 0,50 m abschätzen lassen, auf die L127 abgestürzt sind, wird als Bemessungsblock aufgrund dieser Beobachtungen von einer Kubatur von 0,125 m<sup>3</sup> ausgegangen.

### **3.4 Geologisch-geotechnische Zusammenfassung**

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass das markanteste Einzugs- bzw. Liefergebiet des aktuellen Steinschlags im nördlichen Bereich des Arbeitsgebietes (einleitend als zentraler Felswandbereich bezeichnet) zu finden ist. Der Oberhang dieses Bereichs ist schwer einsichtig und wurde dieser Bereich, in dem auch oben beschriebene vegetationsfreie Rinne situiert ist, mit Hilfe von Hubschrauberüberfliegungen untersucht. Da im unmittelbaren Umfeld der L127 im Unterhang des Bereiches Nord stetig Material fraktioniert wird (durch die Entsorgung nach Steinschlag) ist eine statistische Zuordnung der Bemessungsblöcke alleine aus diesem Bereich nur mehr beschränkt möglich und es

wurden zur Bewertung auch die Schutthalden der Bereiche Mitte und Süd herangezogen. Die homogenen geologischen Grundbedingungen erlauben diese Vorgehensweise und konnten in Kombination mit den detaillierten Untersuchungen sämtlicher Bereiche (vgl. Anhang) auf Basis der Häufigkeit eine mehrheitliche Blockgröße von  $0,0125 \text{ m}^3$  ermittelt werden.

Da jedoch bei den jüngsten Ereignissen auch einzelne Blöcke mit Kantenlängen bis zu 0,5 m dokumentiert wurden (abgeschätzt aus Fotodokumenten), wird die Bemessungsblockgröße nach geologischer Bewertung mit einer Kubatur von  $0,125 \text{ m}^3$  festgelegt. Diese Blockgröße ist maßgeblich für die Bemessung der Steinschlagschutzmaßnahmen, die im Abschnitt „Bereich Nord“ von etwa km 3,150 bis ca. km 3,330 nun geplant sind. Die Untersuchungen haben ergeben, dass in diesem Bereich aktuell die höchste Häufigkeit von Steinschlagereignissen gegeben ist, von denen auch die L127 erfasst werden kann. Stein- oder Blockschlagereignisse aus den Bereichen „Mitte“ und „Süd“ sind zwar grundsätzlich möglich, jedoch erscheint aufgrund der Distanz zur L127 eine Gefährdung nur untergeordnet gegeben zu sein.

Die Untersuchung der Ablösebereiche hat gezeigt, dass die strukturgeologischen Rahmenbedingungen (auch für größere Einzelblöcke) eine ungünstige geologische Disposition aufweisen (Trennflächen fallen auch aus dem Gebirgsverband in Richtung L127 heraus). Bei der Recherche der vorhandenen Dokumente wurden jedoch auf keine Ereignisse gestoßen, bei denen seit Aufzeichnung der Stein- und Blockschlagereignisse auch große Blöcke auf die Straße gefallen sind, woraus eine geringe Häufigkeit von Versagensereignissen für größerer Blöcke abzuleiten ist.

Die detaillierten geologischen Untersuchungen im Gelände, die computergestützte 3-D-Geländemodellierung und die Beobachtungen aus den Hubschrauberbefliegung sowie auch die örtliche Erfahrung (direkte Beobachtung von Blockgrößen nach Steinschlagereignissen) führen zum Schluss, dass für die Bemessung von Steinschlagschutzmaßnahmen im gegenständlichen Projektgebiet eine Blockgröße von  $0,125 \text{ m}^3$  anzusetzen ist.



## 4. Steinschlagsimulationen

### 4.1 Zielsetzung der Simulationen

Die Steinschlagsimulationen zielen darauf ab, die relevanten Größenordnungen wie z.B. die Bandbreite der auftretenden kinetischen Energien, Fallgeschwindigkeiten, Sprungweiten und die maßgebenden Sturztrajektorien der Steinschlagereignisse für dieses Projekt zu erfassen. Trotz der komplexen Geländegeometrie und der zahlreichen Kontaktpunkte der Blöcke mit dem Untergrund im Sturzverlauf, lassen sich die Bandbreiten dieser Kennwerte nach heutigem Entwicklungsstand, mit zwei- und dreidimensionalen Softwaresimulationen, gut abschätzen (eine absolute Sicherheit derartiger Simulationsergebnisse ist naturgemäß nicht möglich). Die wichtigsten Untersuchungsaspekte bezüglich der angeführten Steinschlagsimulationen sind:

- Die kinetischen Energien der Blöcke im Sturzverlauf
- Impaktenergien und Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich
- Räumliche Sturztrajektorien und lokale Hauptsturzpfade und Sprungweiten
- Aufprallwinkel und Aufschlagpunkte im zu schützenden Straßenbereich

Es werden für dieses Projekt 2D- und 3D-Steinschlagsimulationen durchgeführt und mit Hilfe der Simulationsergebnisse die maßgebenden Randbedingungen und Kriterien für die Konzeption der Schutzmaßnahmen festgesetzt.

### 4.2 Berechnungsprogramme und Datengrundlage

Die softwaregestützten Steinschlagsimulationen erfolgen mit Hilfe von zwei Berechnungsprogrammen. Im ersten Schritt wird für die Untersuchungen die 2D-Software *Rocscience Rocfall* von *Rocscience Inc.* herangezogen. In einem zweiten Schritt sollen unterschiedliche Steinschlagszenarien zur genaueren Auswertung mit der 3D-Software *RAMMS::ROCKFALL* der *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, ETH Zürich* analysiert werden. Bei diesen Simulationsprogrammen handelt es sich um urheberrechtlich geschützte und kostenpflichtige Software. Die Eingangsdaten für die Modellierung der Simulationen werden in Form eines digitalen Geländemodells (DGM) und dazugehörigen Orthofoto vom Land Steiermark zur Verfügung gestellt. Das Institut für Angewandte Geowissenschaften der TU Graz stellt zudem ein hochauflösendes digitales Oberflächenmodell (DOM) des Projektgebiets zu Verfügung, welches von Prof. Scott Kieffer und MSc. Maja Bitenc durch eine Drohnenbefliegungen nach dem Prinzip der Photogrammetrie erstellt wurde.

### 4.3 2D-Simulationen

#### 4.3.1 Modellierung mit *Rocscience Rocfall*

Grundlage für die 2D-Simulationen ist das digitale Oberflächenmodell. Aus diesem dreidimensionalen Modell wird für die Steinschlagsimulation ein charakteristischer 2D-Querschnitt des Geländes entnommen. Aufgrund der beschriebenen morphologischen Gegebenheiten und auf Grundlage von Beobachtungen der bisherigen Steinschlagereignisse, wird als kritischer und maßgebender Querschnitt, das Geländeprofil im Bereich der Rinnenstruktur gewählt. Mit Hilfe des Geoinformationssystem *QGIS (QGIS Development Team)* wird aus dem digitalen Oberflächenmodell ein charakteristischer zweidimensionaler Geländequerschnitt im Rinnenverlauf herausgelesen und generiert. In Abbildung 26 ist die orthografisch Lage des verwendeten Geländeprofiles gekennzeichnet.



Abbildung 26: Lage des Geländequerschnitts im zentralen Rinnenbereich als Basis die 2D-Simulation (DOM-Modell)

Nach dem Import des Geländeprofiles in das 2D-Simulationsprogramm *Rocfall Rocscience* werden die Untergrundparameter entsprechend der programmspezifischen Beschreibungen in den jeweiligen Teilabschnitten angepasst.

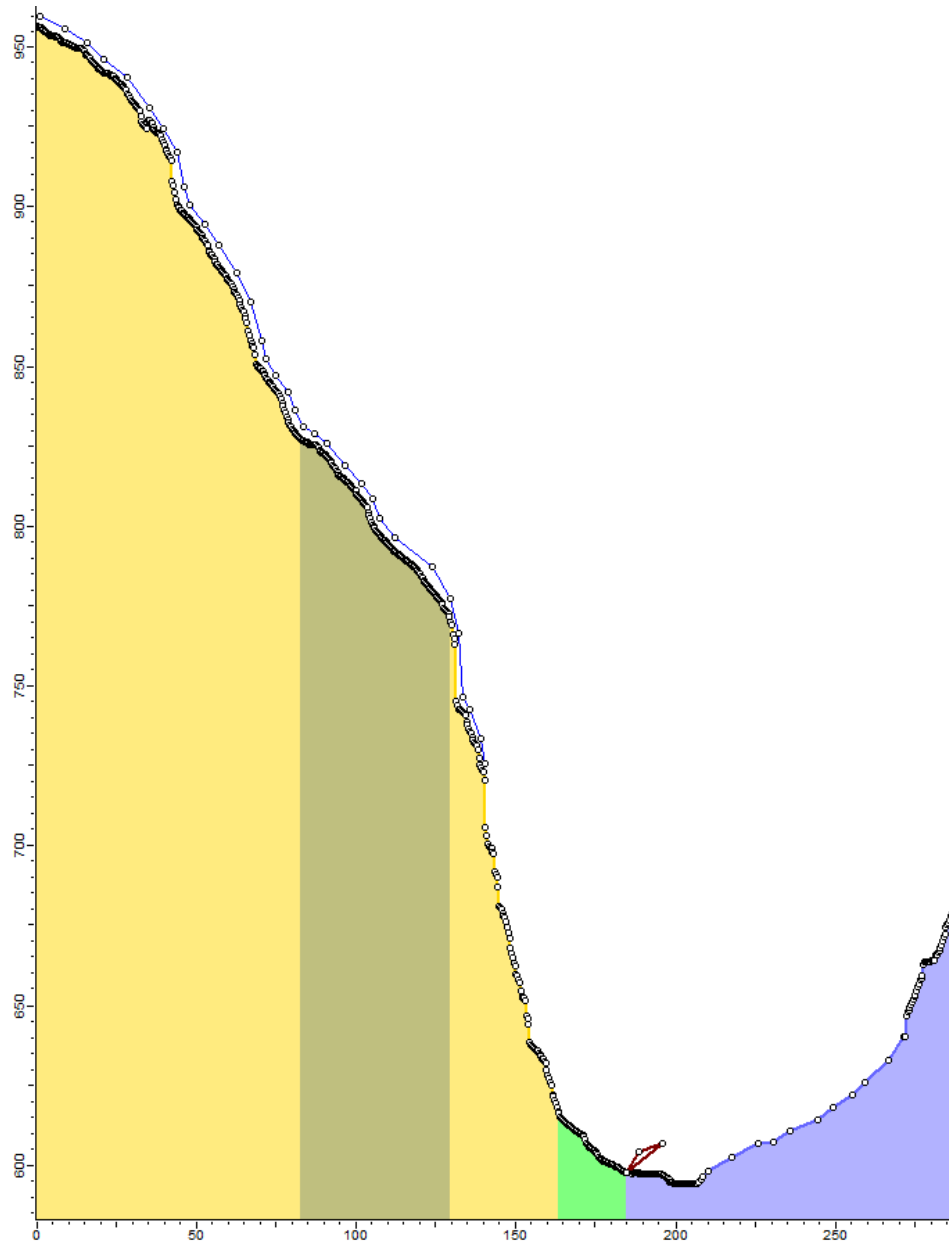


Abbildung 27: Geländeprofil im Rinnenbereich der zentralen Felswand im 2D-Schnitt (Rocscience Rocfall)

Das Berechnungsmodell von *Rocscience Rocfall* basiert auf dem Berechnungsprinzip, dass dem Untergrund, je nach Eigenschaften eine gewisse Energieabsorption beim Stoßprozess zugeordnet wird. Demnach wird ein kinetischer Energierückgabekoeffizient (lt. Rocfall: Coefficient of Restitution, [37]) in tangentialer und normaler Orientierung festgelegt und dient als wesentliches Kriterium für das translatorische Sprung- und Rollverhalten der Blöcke. In Tabelle 5 sind die programspezifischen Untergrundbezeichnungen von *Rocfall* mit den dazugehörigen Energierückgabekoeffizienten, die nach einer Sensitivitätsanalyse festgelegt wurden und abschnittsweise auf das repräsentative Geländeprofil angewendet werden. Diese Koeffizienten beinhalten empirische Mittelwerte, die

Streuung bzw. Abweichung wird durch die angegebene Standardabweichung berücksichtigt [37]. Hierbei repräsentiert beispielsweise ein tangentialer Energierückgabekoeffizient  $R_T = 0,7$ , dass 70 % der tangentialen Energiekomponente in Stoßrichtung, nach dem Stoßvorgang mit dem Untergrund, erhalten bleibt, d.h. eine Energieabsorption von 30% für die Energiekomponente in tangentialer Richtung beim Impact erfolgt. Das gleiche Prinzip gilt für die orthogonale (normale) Energieabsorption, die deutlich größer ausfällt und im Allgemeinen einen Wert von rund Zweidrittel aufweist ( $R_N = \sim 0,3$ ).

Tabelle 5: Projektspezifische Energierückgabekoeffizient  $R_N$  und  $R_T$  in Rocfall (2D-Modellierung)

Beschreibung ( <i>Rocfall Rocscience</i> )	$R_N$	$R_T$
Limestone face	0,315 *(0,064)	0,712 *(0,116)
Partially vegetated limestone scree	0,303 *(0,080)	0,615 *(0,170)
Talus cover	0,32	0,82
Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff	0	0

\*(Standardabweichung des empirischen Mittelwerts)

Die Untergrundparameter eines Kalksteingebirges (Limestone face) werden der Felswand zugeordnet. Im Bereich der Felswandzwischenstufe auf ca. 800 m ü. NN wird Kalksteingeröll mit vereinzeltm Bewuchs angesetzt. Der Fußbereich des Steilhangs wird als Geröllhalde (Talus) angenommen. Jener Geländebereich ab der Landesstraße und darüber hinaus wird mit Energierückgabekoeffizienten modelliert, die keinen weiteren Bewegungsvorgang nach dem Stoß zulassen. Die Energierückgabe wird hier mit einem Faktor von 0 definiert, um somit den irrelevanten Vorgang des Ausrollens und Springens nach dem Passieren des Straßenabschnitts zu unterbinden, um die graphische Auswertung der Sturztrajektorien übersichtlicher zu gestalten. Für die Untersuchung der Aufschlagpunkte (Kapitel 4.3.3) werden diese Untergrundeigenschaften auch für den gesamten Fußbereich des Steilabschnitts angesetzt. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die tatsächlichen Aufschlagpunkte am Bergfuß zur Analyse erfasst werden können und nicht durch das Ausrollenverhalten der Steinschlagkörper verfälscht werden.

Anmerkung: *Rocfall* ermöglicht die Auswertung der Blockpositionen nur nach vollständigem Ausrollen, daher wird bei dieser Modellierungsvariante der Sturzblock bewusst

durch diese Parameterzuordnung an seinem ersten Aufschlagpunkt im Talbereich angehalten. Durch diesen Sachverhalt kann die Auswertung der Aufschlagpunkte aussagekräftig untersucht werden

Für die Steinschlagsimulationen wird der Felswandbereich zwischen ca. 730 und 950 m ü. NN als allgemeiner, großflächiger Ablösebereich definiert. Dieser Ablösebereich ist in Abbildung 27 mit der blauen Polylinie gekennzeichnet. Die Steinschlagkörper werden entlang dieser Polylinie verteilt und für den Sturzverlauf ausgelöst und simulieren somit mögliche Ablöseprozesse.

#### 4.3.2 Einwirkungen infolge des Bemessungsblock

Die im nachfolgenden Abschnitt angeführten Ergebnisse beziehen sich allesamt auf den auf den maßgebenden Bemessungsblock und dienen daher als Basis für die Einwirkung auf die Schutzbauten im Straßenbereich. Die Bemessungsnorm ONR 24810 [27] schreibt für die Auslegung des Bemessungsblocks je nach jährlicher Ereignishäufigkeit einen Fraktilwert der Blockgrößenverteilung vor. Für die vorliegende Steinschlagproblematik wird die höchste in der Norm definierte Ereignishäufigkeit von mehr als 10 Steinschlagereignissen pro Jahr (Ereignisfrequenzklasse 4; „sehr hoch“) festgelegt. Demnach ist der 98%-Fraktilwert der Blockgrößenverteilung, die charakteristische Blockgröße für die Simulationsmodelle. Auf Grundlage des geotechnischen Gutachtens (Kapitel 3) wird für die nachfolgende Steinschlagsimulationen der Bemessungsblock mit einer Kubatur von  $0,125 \text{ m}^3$  zugrunde gelegt. Zur Veranschaulichung entspricht diese Kubatur einer Kugel mit einem Durchmesser von 60 cm bzw. einem Würfel mit einer Kantenlänge von 50 cm. Die Bandbreite der Gesteinsdichte für das vorliegende Festgestein liegt zwischen  $2600$  und  $2900 \text{ kg/m}^3$ . Im Hinblick auf die maßgebende Energiebetrachtung wird die obere Grenze von  $2900 \text{ kg/m}^3$  für die Gesteinsdichte als konservative Annahme festgesetzt.

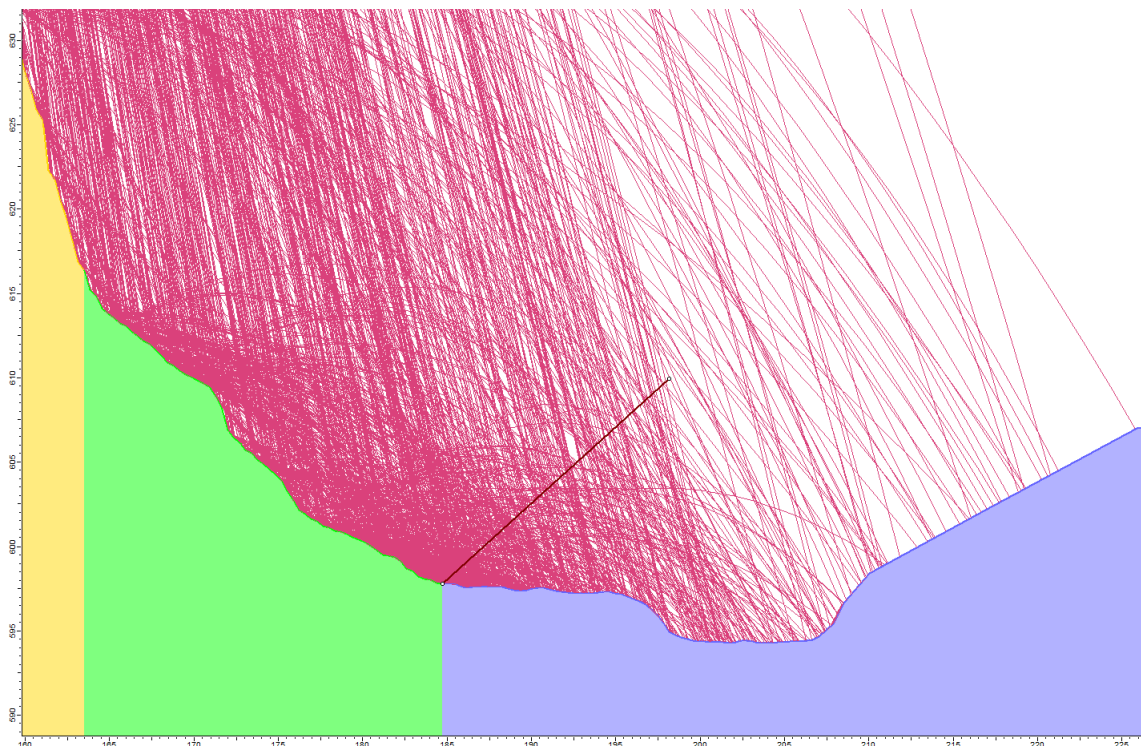


Abbildung 28: Sturztrajektorien im Straßenbereich (magentafarbene Linien) und Datenkollektor (schwarze Linie), Rocfall 2D-Simulation

Simulationsergebnisse:

Für die nachfolgenden Ergebnisse wurden 10.000 Steinschlagkörper mit den genannten Bemessungsvolumen von 0,125 m<sup>3</sup> simuliert.

In Abbildung 28 sind die Sturztrajektorien des Bemessungsblocks im Straßenbereich dargestellt. Die geneigte schwarze Linie in Abbildung 28 dient zur Datenaufnahme der fallenden oder rollenden Blöcke, welche die Landesstraße erreichen. Mit Hilfe dieses Datenkollektors (in den nachfolgenden Abbildungen als Collector 1 bezeichnet) können die kinetischen Energien sowie translatorische Geschwindigkeiten der Steinschlagblöcke im Straßenbereich aufgenommen werden. Die statistische Auswertungen in Abbildung 29 und Abbildung 30 geben einen Überblick über die Verteilung der kinetischen Energien mit den zugehörigen statistischen Häufigkeiten im Straßenbereich. Aus der kumulativen Energieverteilung ist zu entnehmen, dass der Großteil der Steinschlagkörper (rund 75 %) kinetische Energien im Straßenbereich bis 200 kJ aufweisen.

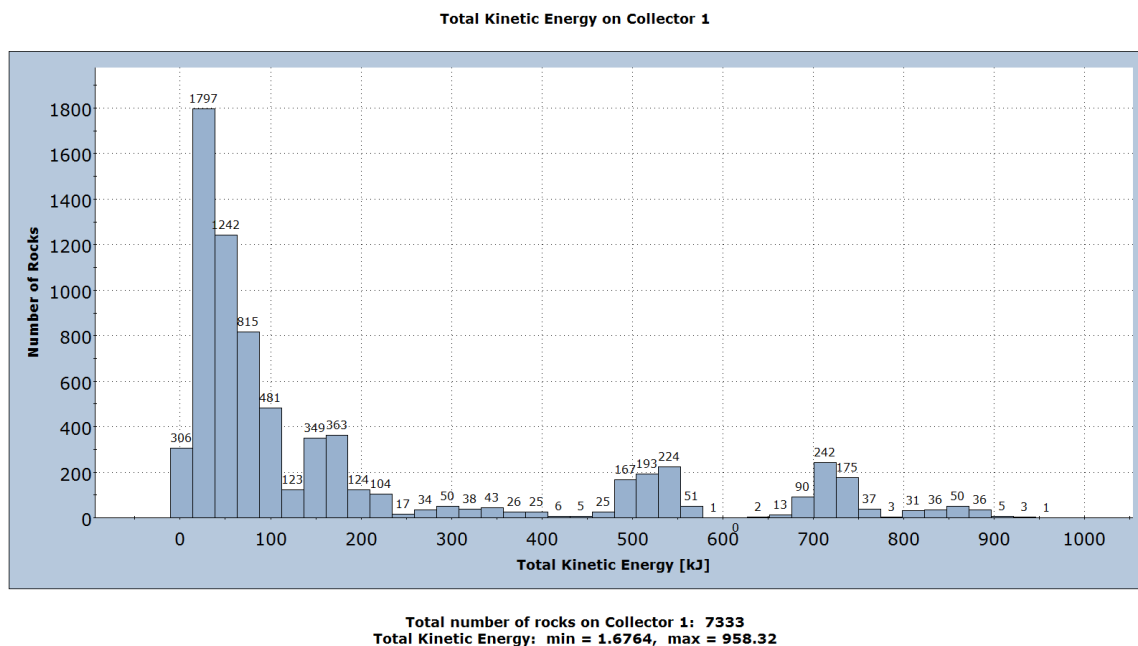
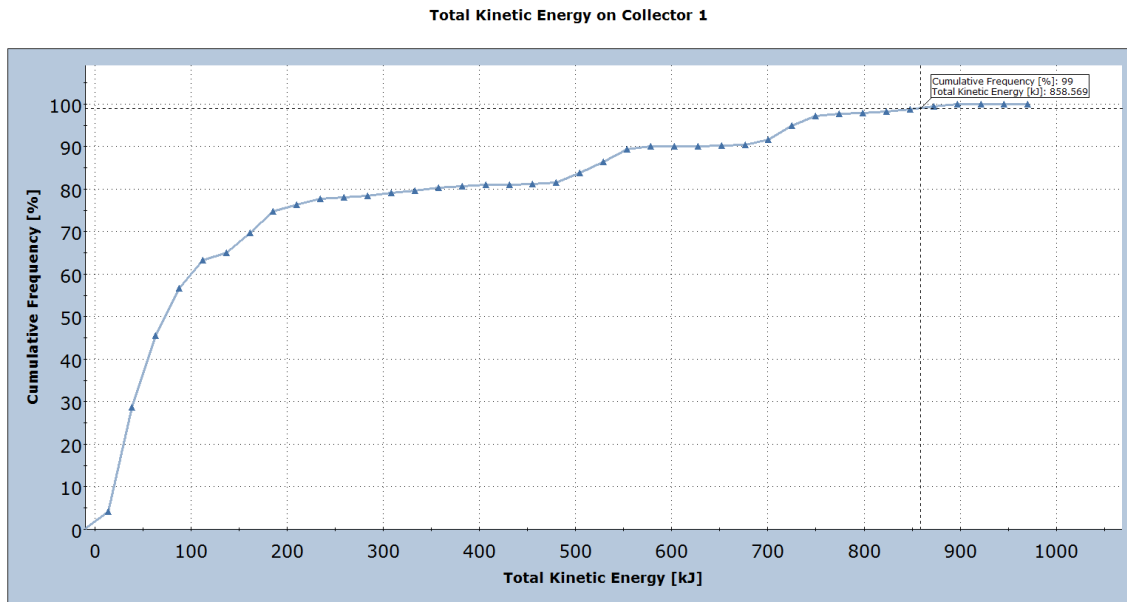


Abbildung 29: Histogramm – Verteilung der kinetischen Energien im Straßenbereich

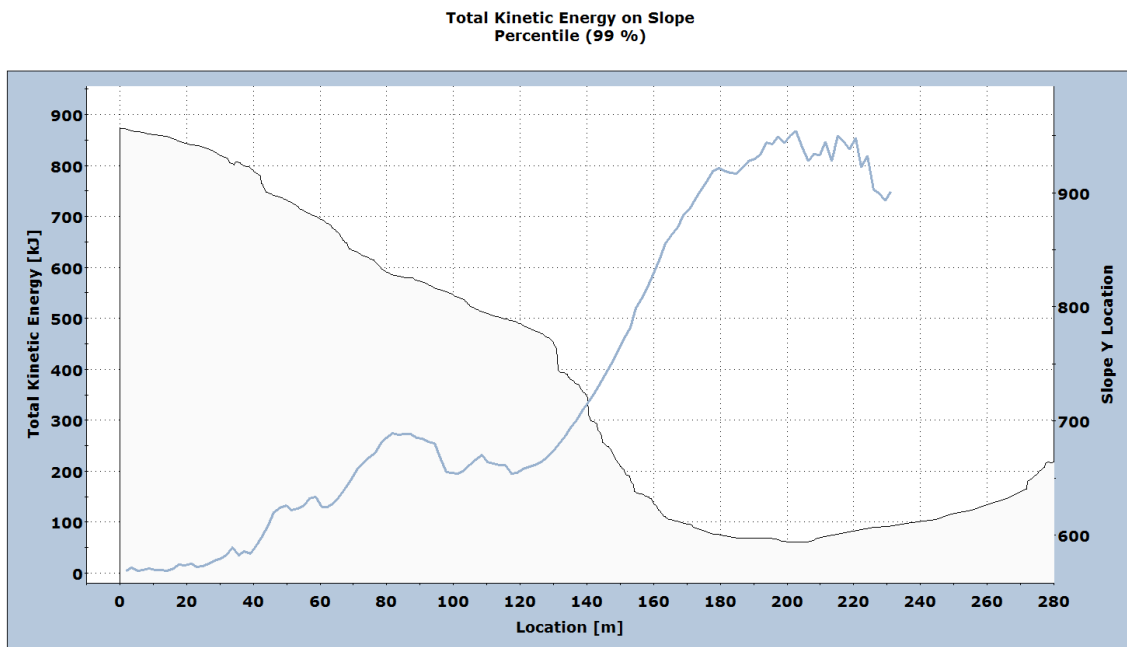
Rund die Hälfte der Blöcke erreicht die Straße mit einer Bewegungsenergie von weniger als 80 kJ (Abbildung 30). Der untere Energiebereich ist jenen Blöcken zuzuordnen, die den gefährdeten Straßenbereich überwiegend rollend, bzw. springend mit kleinen Sprungweiten, erreichen. Diese Ablösekörper verlieren durch die Vielzahl der Aufschlagspunkte im Sturzverlauf einen großen Teil ihrer kinetischen Energie und erreichen die Landesstraße mit einem verhältnismäßig geringeren Energieniveau.



Total number of rocks on Collector 1: 7333  
 Total Kinetic Energy: min = 1.6764, max = 958.32

Abbildung 30: Kumulative Verteilung - Kinetische Energien im Straßenbereich

Blöcke, welche die Straße nach längerem freiem Fall erreichen, entwickeln aufgrund der geringeren Energieabsorption durch Stoßprozesse, deutlich höhere Fallgeschwindigkeiten und somit höhere kinetische Energien. Der nach der ONR 24810 maßgebende Energiewert zur Bemessung der Schutzbauten ist das 99%-Quantil der Energieverteilung und beträgt hierbei 859 kJ (siehe Abbildung 30).



Total number of rock paths: 10000

Abbildung 31: Kinetische Energien im Sturzverlauf über das Geländeprofil



In Abbildung 31 sind die auftretenden kinetischen Energien im Sturzverlauf über das Geländeprofil dargestellt. Blöcke aus den obersten Ablösebereichen erreichen auf Höhe der Zwischenstufe Energien um 270 kJ (Rinnenbereich). Der nicht zunehmende Energieverlauf zwischen 80 und 120 m bestätigt den Einfluss der Zwischenstufe durch die geringere Hangneigung auf den Sturzprozess. Nach längerem freien Fall an der steilen Felswand, erreichen die Steinschlagkörper im Straßenraum maximale Energien im Bereich von etwa 800 bis 850 kJ (Abbildung 31).

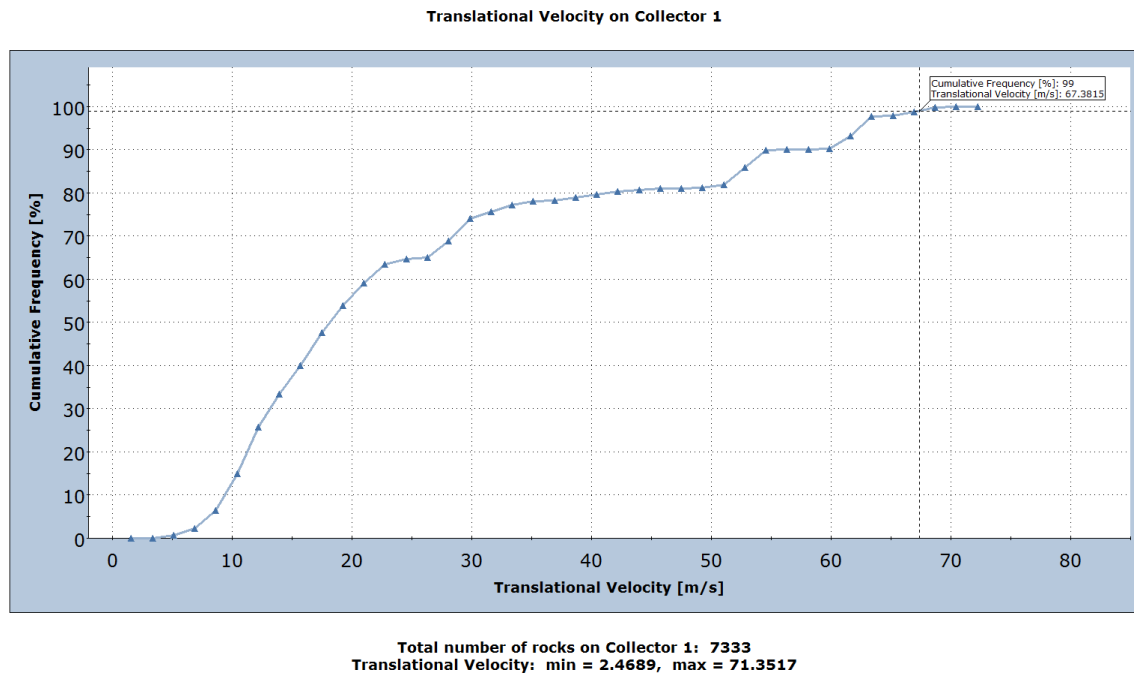


Abbildung 32: Kumulative Verteilung - Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich

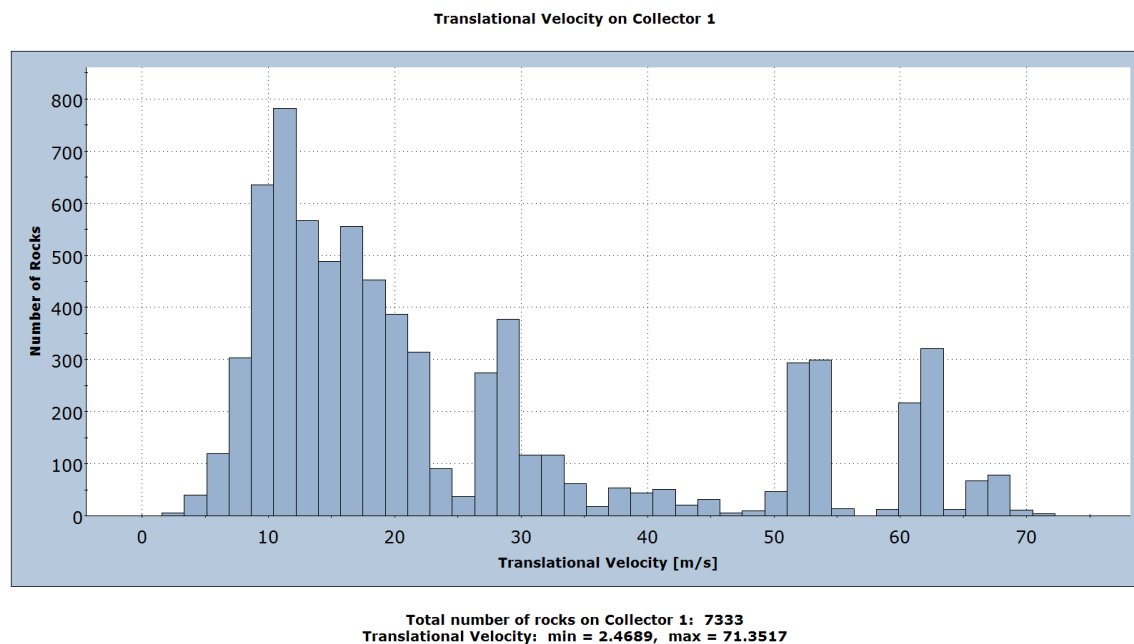


Abbildung 33: Histogramm – Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich

Hinsichtlich der Aufprallgeschwindigkeiten ergibt sich aufgrund der Korrelation zur kinetischen Energie ein ähnliches statistisches Verteilungsbild. Die Steinschlagkörper erreichen translatorische Geschwindigkeiten von bis zu 71 m/s. Dies entspricht einem Wert von rund 256 km/h. Rund 65 % der Blöcke weisen Geschwindigkeiten bis maximal 25 m/s auf (rollende und seitlich springende Blöcke). Höhere Geschwindigkeiten sind den Blöcken zuzuordnen, die über längere Distanzen im freien Fall und somit einer steilen Flugbahn auf die Landesstraße auftreffen (vgl. Abbildung 28).

## 4.3.3 Aufschlagpunkte und Aufprallwinkel im Straßenbereich

In diesem Abschnitt werden die räumlichen Aufschlagpunkte sowie die Fallneigungen der Steinschlagkörper an Hand der 2D-Simulationen beschrieben. Die statistische Verteilung der Aufschlagpunkte am Fuß der Felswand ist in Abbildung 34 darstellt. Es sind die absoluten und normierten Häufigkeiten (vertikale Achse) in Abhängigkeit zum Abstand der Felswand (horizontale Achse) aufgetragen. Im Hintergrund des Diagramms sind zur besseren Veranschaulichung die Flugbahnen der Steinschläge und der Geländeverlauf dargestellt. Für diese statistische Untersuchung wurden 10.000 Steinschlagkörper mit dem Bemessungsvolumen simuliert.

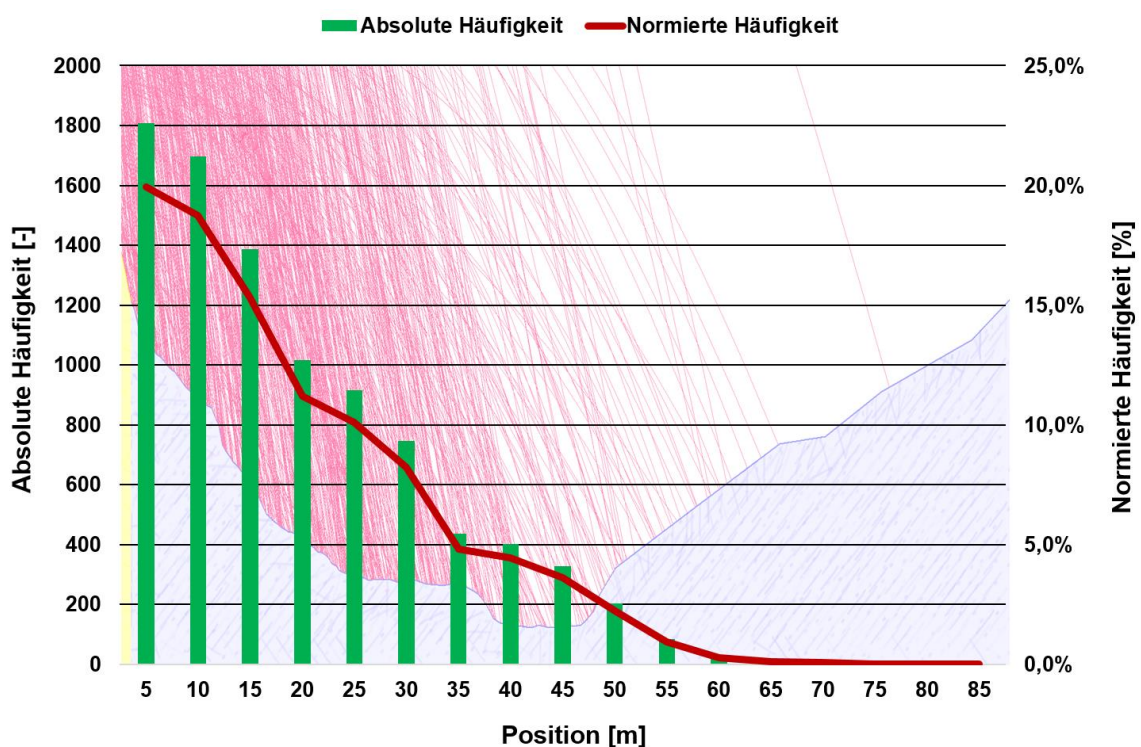


Abbildung 34: Statistische Verteilung der Aufschlagpunkte im Fußbereich der Felswand

Die Auswertung zeigt, dass die statistische Einschlagshäufigkeit mit zunehmenden Abstand von der Felswand abnimmt. Der unmittelbar zum Beginn der Felswand angrenzende Bereich (Abstand von 5 bis 10 m) weist eine normierte Aufschlagshäufigkeit von rund 20% auf. Die Anzahl der Steinschläge reduziert sich bis zur Landesstraße (Position bei ca. 30 m) auf einen normierten Anteil von ca. 8%. Diese Untersuchung berücksichtigt nur den ersten Auftreffpunkt der Steinschlagkörper im Fußbereich der Felswand und somit die hochenergetischen Einschläge. Dadurch sind jene Blöcke die zwischen der Felswand und Straße aufkommen und in der Folge die Straße seitlich rollend oder springend erreichen, in dieser Betrachtung unberücksichtigt. Die reale Einschlagsintensität

im Straßenbereich ist daher im Vergleich zu dieser Auswertung tendenziell etwas höher anzunehmen. Eine örtliche Verlagerung des Straßenverlaufs ist in Anbetracht der abnehmenden Einschlagsdichte mit zunehmendem Abstand, unter Berücksichtigung eines Restrisikos denkbar aber wie die Darstellung zeigt nur bedingt hilfreich.

Die Verteilung der Aufschlagpunkte kann auch durch Differenzierung der höhenmäßigen Ablösebereiche untersucht werden. Demnach wird zwischen den oberen und unteren Ablösebereich unterschieden. Der obere Ablösebereich befindet sich oberhalb der Felswandzwischenstufe bzw. des Rinneneinschnitts. Der untere Ablösebereich liegt unterhalb dieser Zwischenstufe. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind im Diagramm in Abbildung 35 ausgewertet (ebenfalls mit dem Talprofil im Hintergrund). Die Aufschläge sind mit absoluten Häufigkeiten (Säule) und normierten Verteilungen (Linienverlauf) in Abhängigkeit zum Abstand der Felswand angegeben. Es sind pro Ablösebereich jeweils 10.000 Blöcke mit dem Bemessungsvolumen simuliert worden.

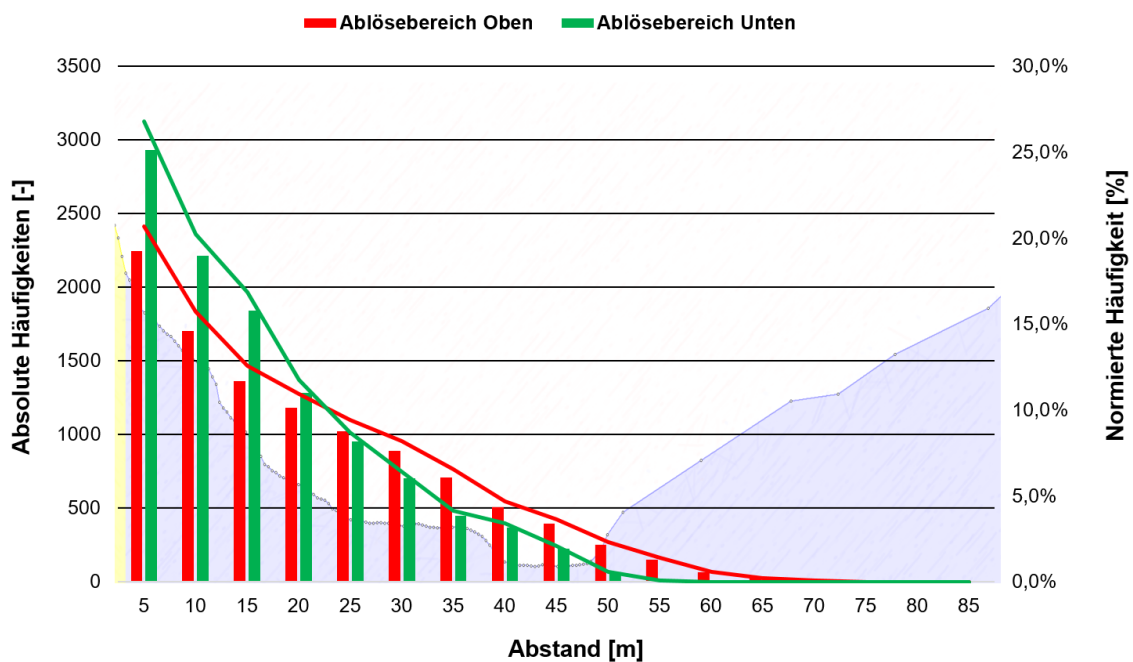


Abbildung 35: Verteilung der Aufschlagpunkte bei Differenzierung der Ablösebereiche

Aus den statistischen Verteilungen ist ersichtlich, dass Steinschlagkörper aus dem unteren Ablösebereich dazu tendieren, näherer an der Felswand aufzutreffen. Dies belegen die normierten Kennwerte, die bis zu einem Felswandabstand von 20 m, rund um 5% höherer sind, im Vergleich zu den normierten Häufigkeiten aus dem oberen Ablösebereich. Blöcke aus dem unteren Ablösebereich erreichen die Straße daher tendenziell häufiger rollend bzw. springend aus seitlicher Richtung, da die ersten Aufschläge im Talbereich, häufiger zwischen der Straße und der Felswand stattfinden. In Relation dazu

ist die Verteilung der Steinschläge aus dem oberen Ablösebereich über das Talprofil etwas weiterräumiger und gleichmäßiger gestreut (flacherer Linienvorlauf der normierten Verteilung). Dadurch werden zudem auch weitere Flugreichweiten in Richtung des Gegenhangs erreicht.

Die Aufprallwinkel der Steinschläge auf die Straßenfahrbahn unterliegen einer größeren Bandbreite. In Abbildung 28 ist die allgemeine Variation der Fallneigungen der Steinschlagkörper ersichtlich. Blöcke, die im unteren Bereich des Bergfußes aufschlagen bevor sie in ihrem Sturzverlauf die Straße erreichen, variieren in der Fallneigung im Allgemeinen zwischen  $30^\circ$  und  $50^\circ$ . Jene Blöcke, mit mehreren Aufschlägen im Fußbereich, erreichen die Straße vorwiegend rollend.

In Abbildung 36 sind jene 100 der 10.000 Blöcke mit den höchsten kinetischen Impaktenergien im Bereich der Straße herausgefiltert. Die Fallneigungen der Flugbahnen dieser Blöcke liegen auf Höhe der Landstraße zwischen  $75^\circ$  und  $80^\circ$  zur Horizontalen. Demnach kann im Rahmen der Schutzbaubemessung davon ausgegangen werden, dass die größten Fallneigungen Werte von bis zu  $80^\circ$  zur Horizontalen aufweisen.

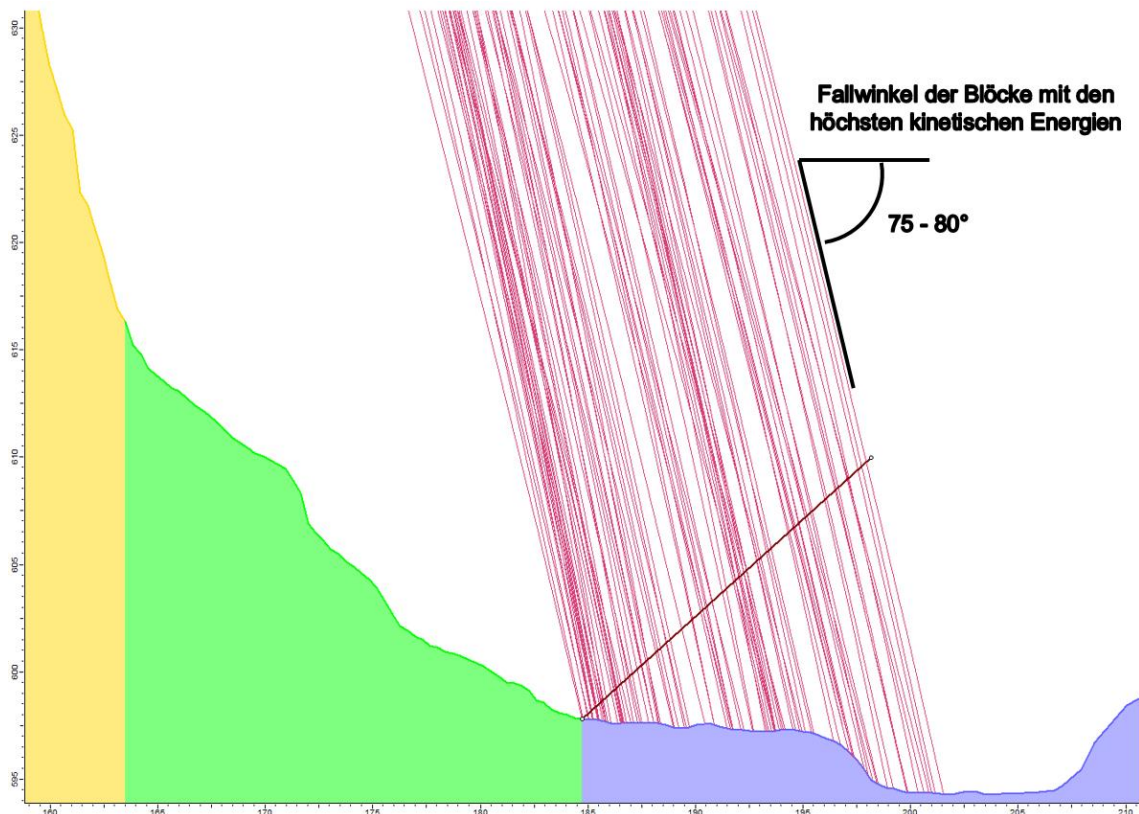


Abbildung 36: Fallneigung der Steinschlagkörper mit den höchsten kinetischen Energien

#### 4.3.4 Steinschlagsimulation am Gegenhang

Um die vollständigen Auswirkungen der Steinschläge auf die Landesstraße zu erfassen, ist es ebenfalls sinnvoll das Steinschlagszenario vom Gegenhang in die Beurteilung miteinfließen zu lassen. Im Hinblick auf eine eventuelle Straßenverlegung auf den Gegenhang, bietet diese Untersuchung ebenfalls relevante Informationen. Das Hauptaugenmerk bei dieser Steinschlagsimulation liegt bei der Ermittlung der Reichweiten und Energien der Steinschläge im Talbereich. Um auf der orographisch linken Talseite ein entsprechendes Steinschlagszenario zu erstellen, ist das Geländeprofil in Richtung des Gegenhangs erweitert (Abbildung 37). Auf einem vergleichbaren Höhenniveau zur bisher untersuchten Felswand, wird von ca. 760 bis 880 m ü. NN der Ablösebereich am gegenüberliegenden Steilhang definiert.

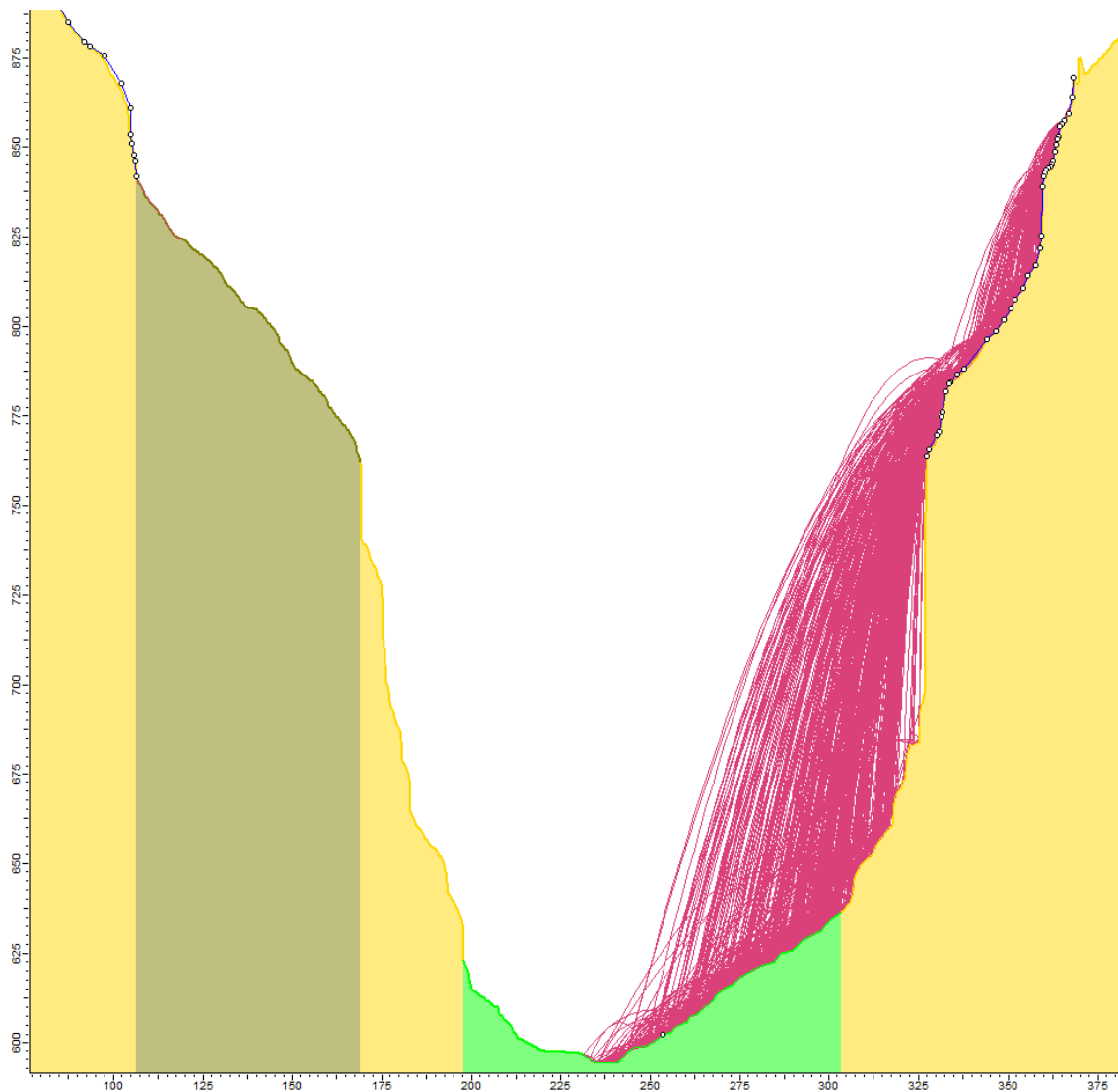


Abbildung 37: Sturztrajektorien – Gegenhang (2D)

Für die Simulation ist ebenfalls der Bemessungsblock ( $V_{98} = 0,125 \text{ m}^3$ ) zugrunde gelegt, da am Gegenhang im Allgemeinen ähnliche Kluftkörpergrößen bzw. Blockfragmentierungen anzunehmen sind.

In Abbildung 37 sind die Sturztrajektorien der simulierten Steinschläge über den Steilhang dargestellt. Die Sturzbahnen der Steinschläge erreichen rollend bzw. springend das Bachbett und kommen dort gleichermaßen zu Liegen. Hinsichtlich steil herabfallender Steinschläge ist ersichtlich, dass diese ebenfalls Reichweiten bis in den Bereich des Baches ausweisen.

Die Reichweiten der Steinschläge sind dabei analog zu der Untersuchung in Kapitel 4.3.3 durch statistische Häufigkeiten im Diagramm in Abbildung 38 ausgewertet. Zur Veranschaulichung ist der Geländeverlauf im Hintergrund des Diagramms dargestellt. Die Sprungreichweiten beziehen sich dabei gleichermaßen auf den horizontalen Abstand zum unteren Beginn des Steilabschnitts am Gegenhang. Die Verteilung der Reichweiten ist hierbei vergleichbar mit denen, der orographisch rechten Felswand. In etwa 0,5% der steil fallenden Steinschläge erreichen dabei vom Gegenhang die derzeitige Straßenlage der L127, die bei einem Abstand von ca. 75 m positioniert ist. Eine mögliche Straßenverlegung würde an etwa bei einem Abstand von 50 m positioniert sein. Hierbei erreichen 3 bis 4 % der hochenergetischen Einschläge diese kritische Reichweite.

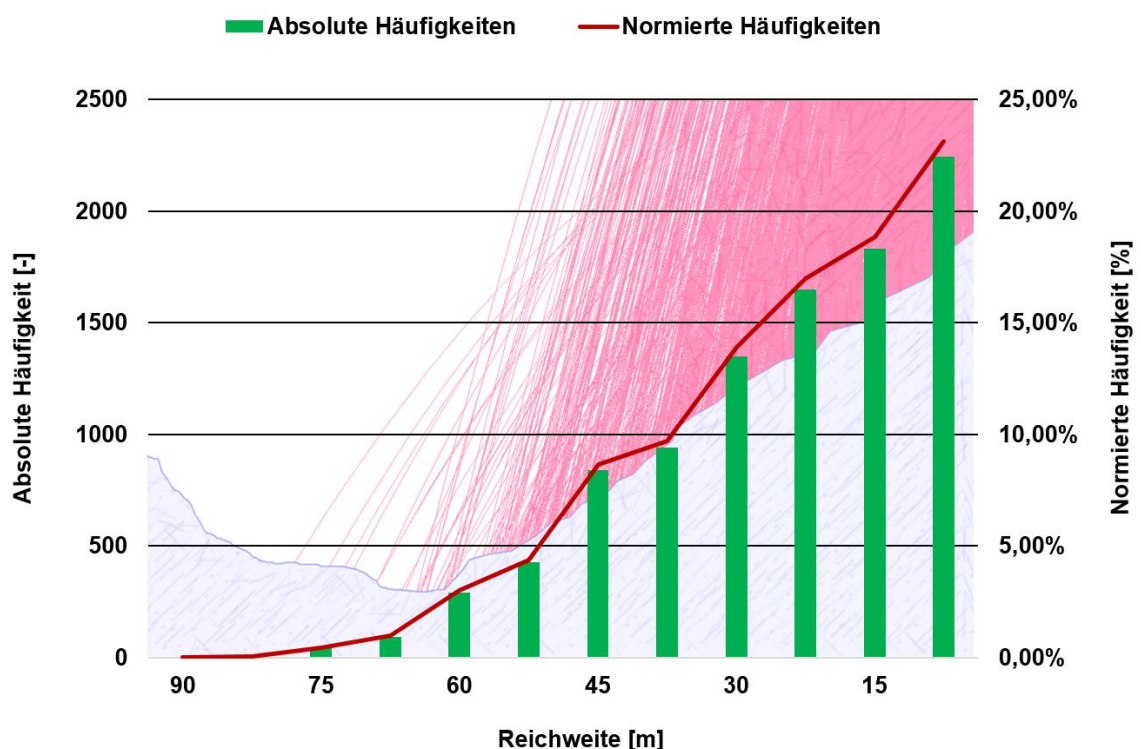


Abbildung 38: Reichweiten der Steinschläge am Gegenhang (2D)

An dem Geländeabschnitt, orographisch links vom Bachbett, wo eine mögliche Straßenverlegung situiert sein könnte, sind die energetischen Daten der Steinschlagkörper durch einen Datenkollektor erfasst. Das Ergebnis bezüglich der kinetischen Energieverteilung an diesem Geländeabschnitt ist in Abbildung 39 ausgewertet. Anhand der kumulativen Verteilung ist ersichtlich, dass gut 93 % der Steinschläge kinetische Energien von keiner 100 kJ erreichen. Diese Energien sind den Blöcken zuzuweisen, die rollend und springend mit mehreren keinen Sprungweiten diesen Geländeteil erreichen und somit größere Energieabsorptionen im Sturzverlauf durch Stoßprozesse erfahren. Jene Steinschlagkörper mit großen Sprungweiten und Sturztrajektorien mit längerem freiem Fall, weisen Aufprallenergien von rund maximal ca. 750 kJ auf. Das maßgebende 99%-Quantil der Energieverteilung beträgt 717 kJ und ist daher vergleichbar mit dem Quantil der orografisch rechten Talseite (836 kJ).

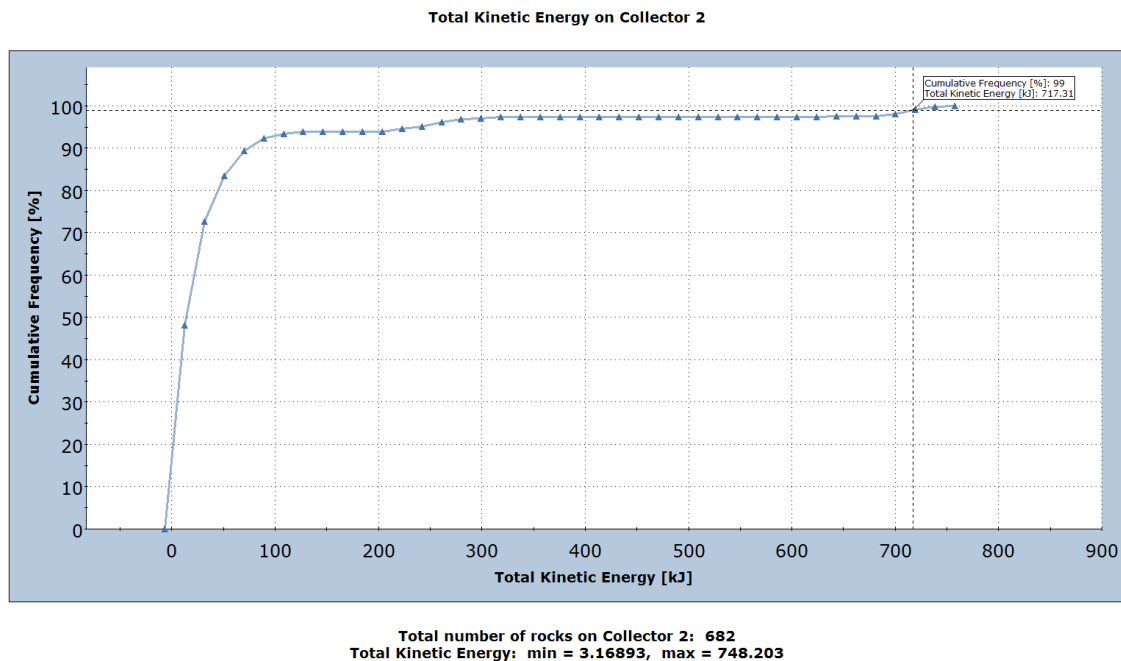


Abbildung 39: Kumulative Verteilung der kinetischen Energien an möglicher Straßenposition am Gegenhang



## 4.4 3D-Simulationen

### 4.4.1 Modellierung in RAMMS ROCKFALL

Grundlage für die 3D-Berechnungen ist das digitale Geländemodell (DGM) aus dem Geoinformationssystem des Landes Steiermark, welches von der Landes- und Regionalentwicklung des Amtes der steirischen Landesregierung zur Verfügung gestellt wurde. Dieses Modell hat gegenüber dem digitalen Oberflächenmodell (DOM) den Vorteil, dass ausschließlich die tatsächliche Geländeoberfläche d.h. ohne etwaiger Vegetation und Bewaldung abgebildet wird (Abbildung 40) und daher eine bessere Grundlage hinsichtlich der Berechnung der Sturzverläufe bietet. Das DGM hat zudem eine Geländeauflösung von einem Meter, was auch bezüglich der ONR 24810 [27] eine empfohlene Modellierungsgenauigkeit darstellt.

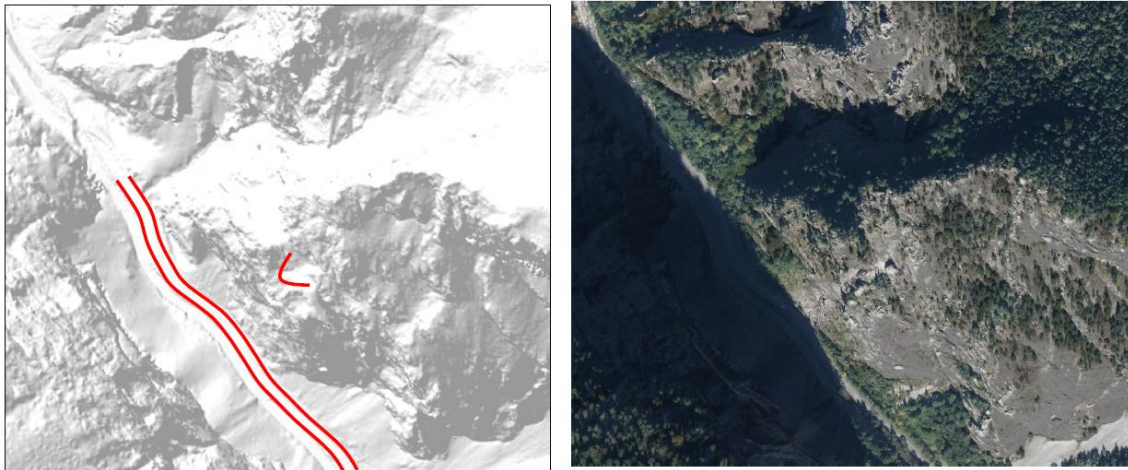


Abbildung 40: Digitales Geländemodell (Relief links, Orthofoto rechts)

Die Koordinaten dieses Geländemodells basieren auf dem österreichischen Bundesmeldenetz (BMN). Die kartesischen Eckpunkte des Gauß-Krüger-Koordinatensystems (Georeferenzierung: GK M31) sind in Tabelle 6 dokumentiert.

Tabelle 6: Koordinaten des digitalen 3D-Geländemodells (GK M31)

<b>Links Unten</b>	RW 108492	HW 270515
<b>Links Oben</b>	RW 108492	HW 271060
<b>Rechts Oben</b>	RW 109092	HW 270515
<b>Rechts Unten</b>	RW 109092	HW 271060

Hinsichtlich der Untergrundparameter wird die ungünstigste und somit wiederum konservative Annahme getroffen, dass der Gebirgsuntergrund die härtesten Festigkeitseigenschaften aufweist und somit die höchstmögliche Energierückgabe in den Stoßvorgängen bewirkt. Im Simulationsprogramm RAMMS wird dieser Untergrund als „extra hard“ bezeichnet (Beschreibung lt. Benutzerhandbuch: „Ground is very hard and is marginally deformed by rocks. No vegetation and no surface soil; Bedrock, cliff“[38]).

Diese Untergrundbeschreibung deckt sich zudem gut mit den vorliegenden Geländeeigenschaften. Im Bereich der Rinne und des Schüttkegels unterhalb der Rinne im Straßenbereich wird die Untergrundkategorie „hard“ gewählt (lt. Benutzerhandbuch: „Rocks jump over ground. Mixture of large and small rocks. Usually without any vegetation; Rock scree, pebble, coarse rock, paved roads“[38]).



Abbildung 41: Kartierungen im 3D-Modell – Berücksichtige Bewaldung (links) und Hangschutt (rechts)

Die in Abbildung 41 (links) grün dargestellten Zonen repräsentieren, die für die 3D-Simulationen relevanten Bewaldungsgebiete. In diesen Bereichen wird konservativ eine Bewaldungsdichte von 20 m<sup>2</sup> pro Hektar angenommen was nach der Vorgabe der Software die lichteste Bewaldung repräsentiert. Die Modellierung der Bewaldung stellt in diesem Sinne eine leichte Energiedämpfung für die Blöcke dar, welche diese Bereiche passieren. Die bewaldeten Teile im oberen Gebirge werden für die Steinschlagmodellierung nicht berücksichtigt, da diese für die Steinschlagszenarien im Bereich des Bergfußes und im Straßenbereich eine untergeordnete Rolle spielen.

Die Untersuchung der Aufschlagpunkte ist ein weiterer wichtiger Aspekt zur Erfassung der vollständigen Steinschlaggefährdung. Die übliche Auswertungsanwendung in

*RAMMS* erlaubt nur eine graphische Darstellung der finalen Ablagerungspunkte der Blöcke, die erst nach dem Ausklingen des Ausrollens erreicht werden. Die maßgebenden Auswertungspunkte sind jedoch jene, bei den der Sturzblock die Straße nach längerem freiem Fall (weite Sprünge, mit hoher kinetischer Impaktenergie) zum ersten Mal erreicht. Um diese Punkte übersichtlich zu erfassen ist eine gesonderte Geländemodellierung notwendig. Hierbei wird im Talbereich, ein von *RAMMS* vordefinierter Untergrund, mit den Eigenschaften eines Moorgewässers modelliert (schriftl. Mitteilung Marc Christen (SLF), 03.08.2016). Dies hat den praktischen Vorteil hinsichtlich der Untersuchung, dass Sturzblöcke die den Straßenbereich erreichen im definierten Moorbereich stecken bleiben und das Programm mit der Abfrage der Ablagerungspunkte die gewünschten Punkte graphisch darstellt. In Abbildung 42 ist die Aufschlagsfläche dargestellt, welche in *RAMMS* als Moorgewässer modelliert wird, zur Auswertung der kritischen Aufschlagspunkte.

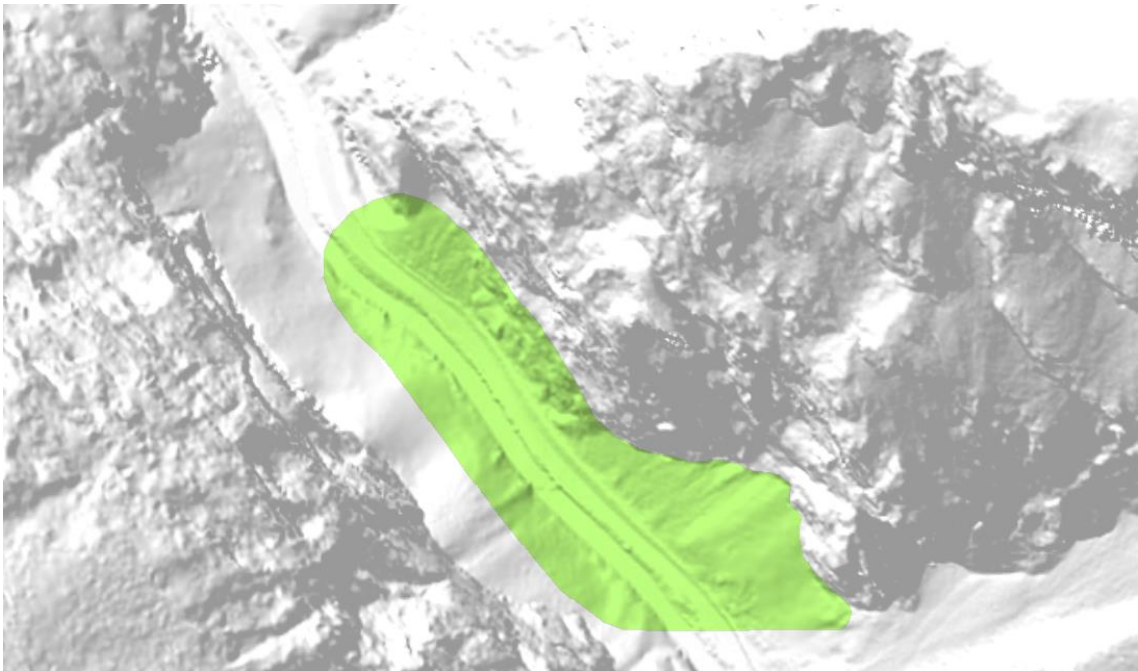


Abbildung 42: Relevante Aufschlagsfläche im Straßenbereich (Modellierung eines Moorgewässers)

#### 4.4.2 Sturztrajektorien

Der folgende Abschnitt beinhaltet Untersuchungen, um die allgemeinen räumlichen Sturztrajektorien im Zuge dieses Projektes zu erfassen. Es werden somit die Hauptsturzpfade und deren Verteilung über den betroffenen Gebirgsabschnitt hinweg ersichtlich. Die in Abbildung 43 grün dargestellte Fläche kennzeichnet das Ablösegebiet für die großflächige Steinschlagsimulation. Die Fläche deckt den Teil der Felswand ab, der im Einflussbereich der Rinnenstruktur im zentralen Wandbereich steht. Die Landesstraße ist zur besseren Darstellung strichliert gekennzeichnet.

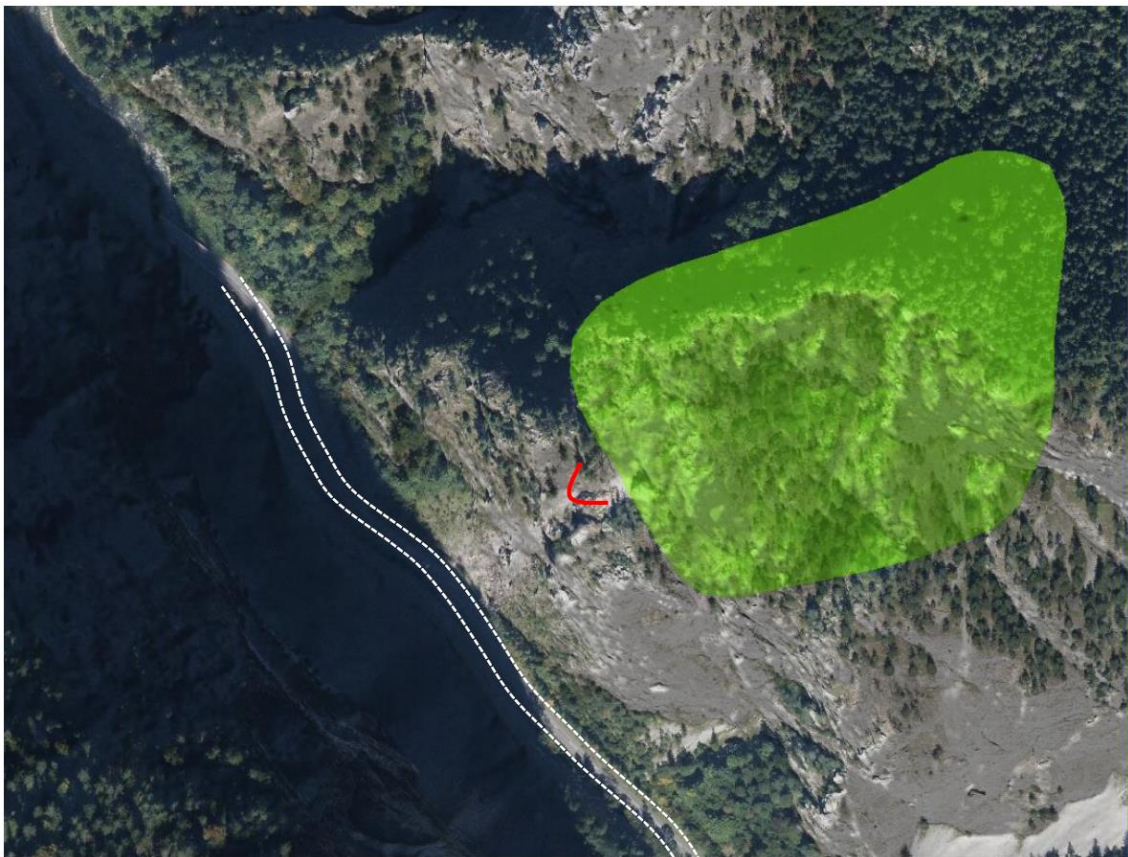


Abbildung 43: Auslösefläche für den Simulationsszenario „Großflächiger Ablösebereich“ (grün markiert)

#### Untersuchungsergebnisse:

Die Abbildung 44 zeigt die graphische Übersicht der räumlichen Sturztrajektorien der großflächigen Simulation für ein Blockvolumen von  $0,1 \text{ m}^3$ . Zur Auswertung wird dabei der Durchgang der Steinschlagkörper durch jede Rasterzelle (Kantenlänge  $1 \times 1 \text{ m}$ ) des Geländemodells gezählt und im Orthofoto übersichtlich farblich, nach der Häufigkeit dargestellt. Zellen des digitalen Geländemodells, die einen Durchgang von 100 oder mehr

Blöcken aufweisen werden als maximale Werte rot markiert und all jene mit geringeren Durchgangszahlen werden entsprechend der Legende farblich abgestuft.

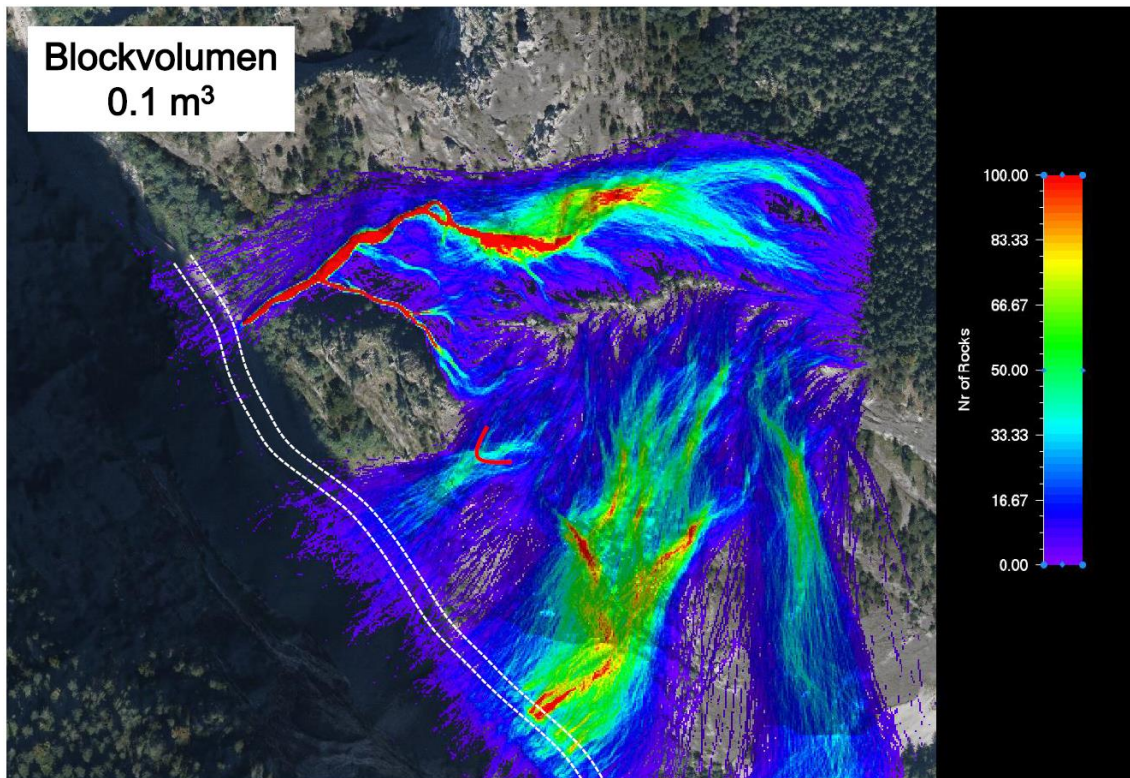


Abbildung 44: Hauptsturzpfade (großflächiger Ablösebereich über der Rinnenstruktur)

Anhand dieser graphischen Auswertung ist ersichtlich, dass sich aus dem zentralen großflächigen Ablösebereich, vier Hauptsturzbahnen einstellen (rote und grüne Bereiche). Diese Hauptpfade können wie folgt unterteilt werden (Prozentwerte Klammern geben gerundete normierte Anteile der Sturzpfade an):

- Bereich Nord, Rinne nördlich der Wandbereiches (~ 30 %)
- Rinnenbereich (rote Markierung) (~ 10 %)
- Wandbereich südlich der Rinne (~ 40 %)
- Bereich Süd, Schutthalde (~ 20 %)

Die großflächige Simulation bestätigt die in den vorherigen Kapiteln beschriebenen Beobachtungen bezüglich der Rinnenwirkung aufgrund der vorliegenden Morphologie, die Aufteilung der Sturzbahnen ist somit ein wichtiger Informationsbestand. Etwa ein Zehntel der abgelösten Blöcke finden den Weg über den zentralen Felswandbereich der Rinne nach unten. Ein weiterer großer, möglicherweise bezüglich der Steinsteinschlaggefährdung im Straßenbereich relevanter Teil, findet sich auf der südlichen Seite im Bezug zur

zentralen Felswand (rund 60 % der Blöcke durchlaufen diese Sturzbahnen). Aufgrund dieser Tatsache wird dieser Bereich in einer zusätzlichen Untersuchung hinsichtlich der Sprungweiten genauer betrachtet (4.4.6). Dieses Simulationsergebnis bestätigt die beschriebenen Beobachtungen der auftretenden Steinschlagereignisse im zentralen Wandbereich durch die Rinnenstruktur und begründet die große Schutthalde im Fußbereich des südlichen Steilhangs.

Eine weitere Teiluntersuchung liegt in der Erfassung der volumenabhängigen Sturztrajektorien. In diesem Zuge werden drei Blockgrößen untersucht:  $0,1 \text{ m}^3$ ,  $1,0 \text{ m}^3$  und  $5,0 \text{ m}^3$ . Diese Blöcke werden jeweils aus einem Ablösebereich oberhalb der Zwischenstufe gestartet. Die graphische Auswertung und Gegenüberstellung der Sturztrajektorien ist in Abbildung 45 ersichtlich.

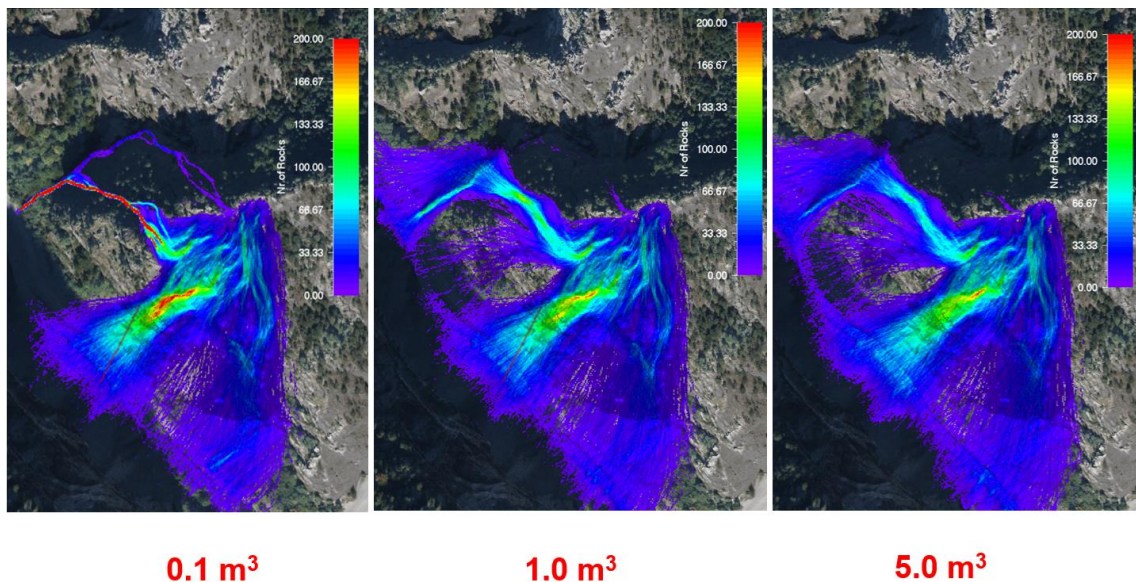


Abbildung 45: Volumenabhängige Sturzverläufe für einen Ablösebereich oberhalb der Rinne, Farbgebung skaliert auf 200 Blöcke

Im zentralen Bereich der Felswand ist die „Bündelung“ der Trajektorien über den Rinneneinschnitt bei kleinerem Blockvolumen ( $0,1 \text{ m}^3$ ) stärker ausgeprägt. Diese Beobachtung ist auch hinsichtlich des nördlichen Sturzpfades der betroffenen Felswand zu erkennen. Es ist zudem ersichtlich, dass die Blöcke mit  $1,0 \text{ m}^3$  und  $5,0 \text{ m}^3$  keine auffallenden Unterschiede im räumlichen Sturzverlauf zeigen. Aufgrund der mit der Blockmasse zunehmenden Trägheit, fällt die geländeanhängige Ablenkung und Beeinflussung der Falltrajektorien, bei den großvolumigen Blöcken ( $> 1,0 \text{ m}^3$ ) deutlich geringer aus. Es lässt sich damit auch im Allgemeinen eine geringere „Rinnenwirkung“ bei großvolumigen Blöcken feststellen.

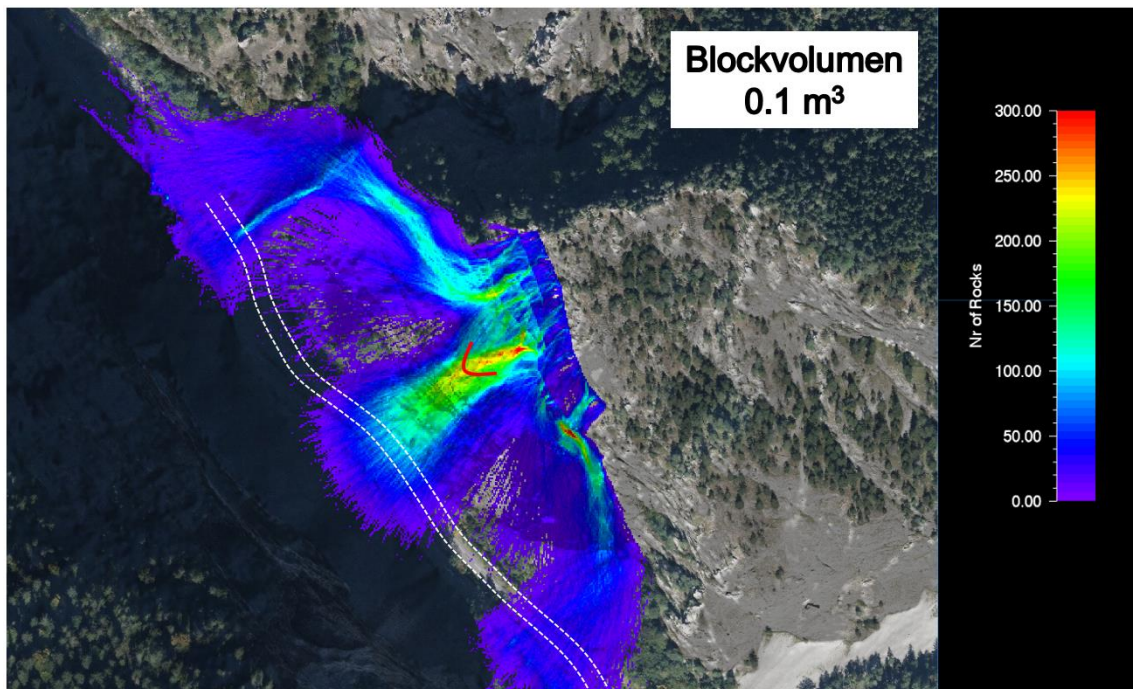


Abbildung 46: Sturztrajektorien mit Ablösebereich unmittelbar oberhalb der Rinnenstruktur

In Hinblick auf eine weitere genauere Untersuchung der Wirkung der morphologischen Rinne auf den Sturzpfad, werden unmittelbar auf Höhe und knapp oberhalb der Zwischenstufe, leicht versetzte, Ablöselinien definiert. Dieser Ablösebereich erstreckt sich maximal rund 60 m oberhalb der Zwischenstufe im zentralen Wandbereich, auf einer Länge von ca. 130 m parallel zur Landesstraße. Abbildung 46 verdeutlicht die morphologische „Rinnenwirkung“ im zentralen Abschnitt der Felswand und zeigt eine deutliche Dreiteilung der Hauptsturzpfade: Jeweils einen Sturzpfad über den nördlichen bzw. südlichen Steilhang sowie die zentrale Rinne. Etwa die Hälfte der simulierten Blöcke finden den Weg über den Rinneneinschnitt ins Tal. Auf die beiden äußeren Hauptpfade kommen jeweils rund ein Viertel der normierten Blöcke. Dadurch ist es auch ersichtlich, dass der zentrale Hauptsturzpfad über die Rinne eine höhere Durchgangsdichte aufweist (stellenweise knapp bis zu 300 Blöcke pro Rasterzelle). Dies deckt sich auch mit den realen Steinschlagbeobachtungen.

Die Steinschlagsimulationen bestätigen somit, dass dem morphologischen Rinneneinschnitt im Bereich der Zwischenstufe der Felswand eine entscheidende Rolle für die vorliegende Steinschlagproblematik zukommt. Felsablösungen oberhalb der zentralen Zwischenstufe finden zum großen Teil über die Rinne den Weg zum Haupteinschlagsbereich. Dabei werden die Blöcke in ihrem Sturzverlauf entscheidend in die Fallrichtung der Rinne abgelenkt, wodurch sich die bis dato beobachteten Einschläge, auf einen konzentrierten Straßenabschnitt unmittelbar unterhalb der Rinne konzentrieren.

#### 4.4.3 Untersuchung: Oberer und unterer Ablösebereich

**Anmerkung:** Im Hinblick auf eine eventuelle Teilsicherungsmaßnahme, steht die Möglichkeit im Raum, ein Steinschlagschutznetz bereits im Bereich der Felswand zu installieren. Diese Schutzbarriere kann möglicherweise auf Höhe der Felswandzwischenstufe im Rinnenbereich angebracht werden. Dieses Teilsicherungskonzept hat das Ziel, gelöste Steinschlagkörper aus den Felspartien oberhalb der morphologischen Zwischenstufe frühzeitig abzufangen. Diese Maßnahme hätte möglicherweise den sicherheitstechnischen Vorteil, dass die Steinschlagkörper, die bereits mit hohen kinetischen Energien (aufgrund der größeren Fallhöhe) die Rinne passieren, in ihrem Sturzverlauf zu stoppen um damit das Gesamtrisiko und die Bemessungsenergie im Straßenbereich zu senken. In der Folge könnte der allgemeine Ablösebereich flächenmäßig etwas reduziert werden. Das Hauptablösegebiet der Steinschläge, im Hinblick auf die Bemessung der Schutzbauten, könnte tendenziell als der Abschnitt unterhalb der Zwischenstufe angenommen werden. Um den allgemeinen Mehrwert einer Steinschlagbarriere im Felswandbereich zu erfassen, werden die nachfolgenden Untersuchungen aufgestellt.

Die Auswirkungen der Steinschlagereignisse werden hinsichtlich zweier Ablösebereiche verglichen (Abbildung 47):

- Ablösebereich Oben: Jener Bereich der zentralen Felswand der sich oberhalb dem Rinneneinschnitt befindet (850 bis 950 m ü. NN)
- Ablösebereich Unten: Der zentrale Abschnitt der Bergwand, unterhalb der Rinne und parallel zur Landesstraße. (750 bis 820 m ü. NN)

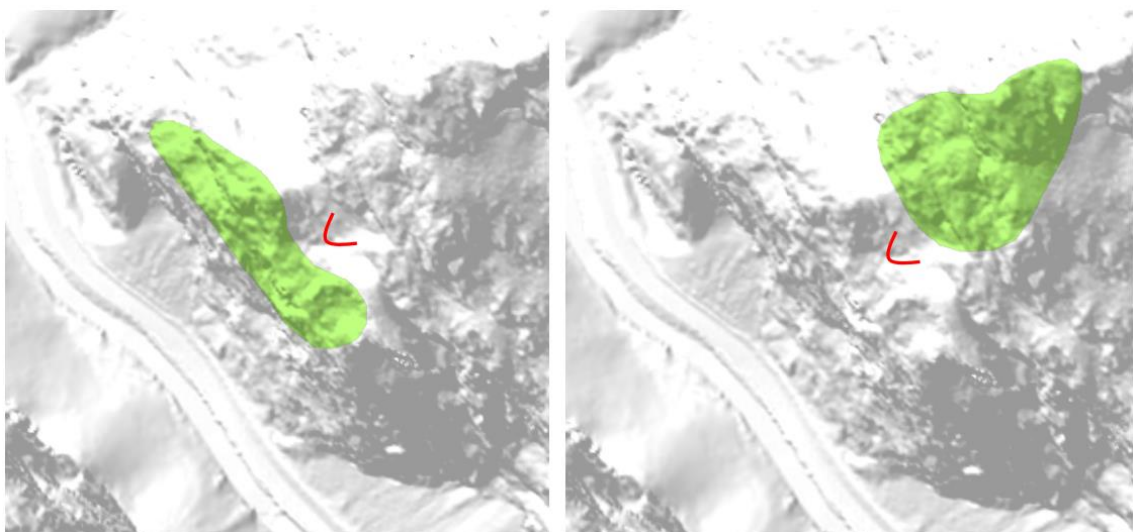


Abbildung 47: Ablösebereich unterhalb der Zwischenstufe (links) und oberhalb (rechts)



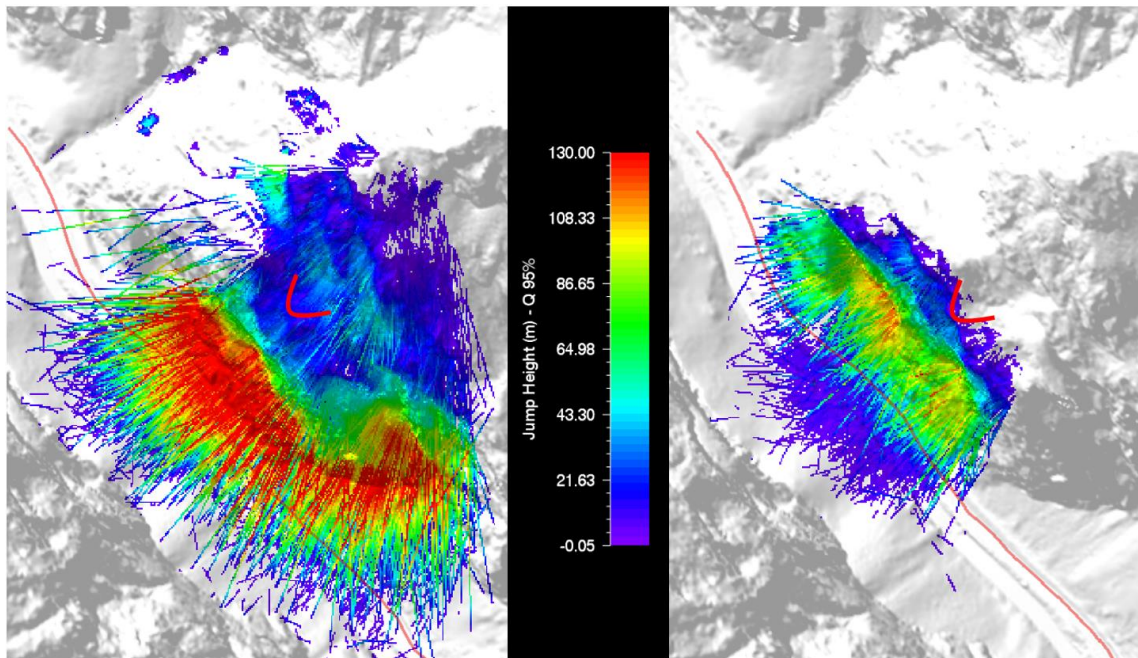


Abbildung 48: Sprunghöhenverteilung - Ablösebereich Oben (links) und Unten (rechts)

Die Ergebnisse der Simulationen beziehen sich auf Steinschlagkörper mit einem Volumen von  $0,1 \text{ m}^3$ . Abbildung 48 stellt die Sprunghöhenverteilung der beiden Ablösebereich räumlich gegenüber (Die Sprunghöhe ist dabei der gemessene vertikale Abstand zwischen dem Steinschlagkörper und der Geländeoberkante zu deuten). Es ist hierbei aus der Gegenüberstellung ersichtlich, dass dieses Untersuchungskriterium ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal beider Szenarien darstellt. Steinschlagkörper aus den oberen Ablösebereichen weisen deutlich größere Sprunghöhen mit gleichzeitig größeren Sprungweiten in Talrichtung gegenüber dem unteren Ablösebereich.

Für Sturzblöcke aus dem oberen Ablösebereich stellt die Zwischenstufe der zentralen Felswand eine Art Sprungschanze bezüglich ihrer Falltrajektorien dar. In Hinblick auf den Straßenschutz, entsteht dadurch ein äußerst ungünstiges Sprungverhalten, da die Blöcke überwiegend nach langem freiem Fall (rund 200 m) im Straßenbereich auftreffen. Dadurch erreichen die Steinschlagkörper in der Folge die Straße mit hohen Geschwindigkeiten und somit größeren Aufprallenergien.

Diese Schlussfolgerung wird auch durch eine statistische Auswertung der kinetischen Energien bestätigt. Das 99%-Quantil der auftretenden Energieverteilung über den Straßenverlauf liegt für das Steinschlagszenario aus dem oberen Ablösebereich bei 699 kJ. Dieser charakteristische Energiewert beträt beim unteren Ablösebereich hingegen 468 kJ. Dies entspricht einer Energiereduktion von 33%.

Da sich die kinetischen Energien der Steinschlagkörper annähernd proportional zum Steinschlagvolumen entwickeln, kann im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass eine Steinschlagbarriere auf Höhe der Zwischenstufe die Impaktenergien im Straßenbereich um ca. ein Drittel reduziert. Zur Veranschaulichung ist diesbezüglich in Abbildung 49 die räumliche Verteilung der kinetischen Energien für den zentralen Wandbereich abgebildet.

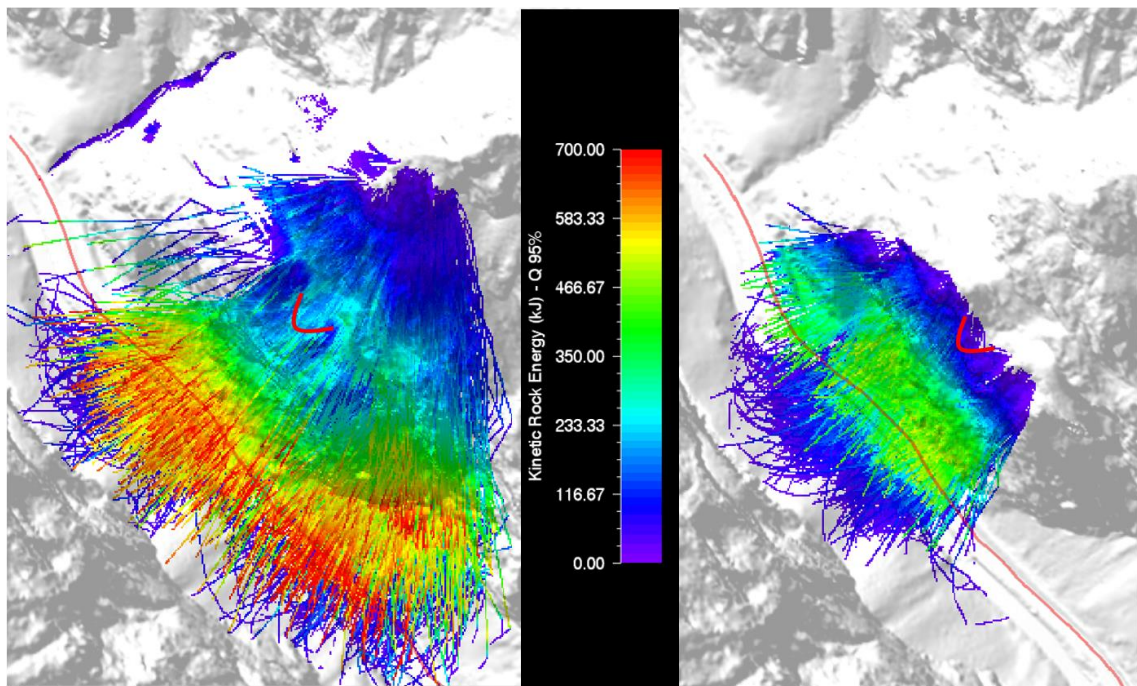


Abbildung 49: Kinetische Energieverteilung - Ablösebereich Oben (links) und Unten (rechts)

#### 4.4.4 Aufschlagpunkte

Die Untersuchung der Aufschlagpunkte ist ein weiterer wichtiger Aspekt zur Erfassung der vollständigen Steinschlaggefährdung. Die übliche Auswertungsanwendung in *RAMMS* erlaubt lediglich eine graphische Darstellung der finalen Ablagerungspunkte der Sturzkörper, die erst nach dem Ausrollen bei endgültigen Stillstand erreicht werden. Die maßgeblichen Punkte sind jedoch jene, bei denen der Sturzblock die Straße nach längerem freiem Fall (weite Sprünge, mit hoher kinetischer Impaktenergie) erreicht. Um diese Punkte übersichtlich zu erfassen ist eine gesonderte Geländemodellierung notwendig. Hierbei wird im Talbereich, ein von *RAMMS* vordefinierter Untergrund mit den Eigenschaften eines Moorgewässers, modelliert (siehe 4.4.1). Dies bringt den praktischen Vorteil hinsichtlich der Untersuchung mit sich, dass die Sturzblöcke, die den Straßenbereich erreichen, im definierten Moorbereich stecken bleiben und das Programm mit der Abfrage der Ablagerungspunkte die gewünschten kritischen Aufschlagpunkte graphisch darstellt.

Zur Analyse der Aufschlagpunkte wird zunächst die Unterscheidung zwischen oberem und unterem Ablösebereich im zentralen Wandbereich aufgestellt. Es wird zudem der untere südliche Teil hinsichtlich der zentralen Felswand als Ablösebereich herangezogen. Dadurch soll untersucht werden, ob die Sturzkörper aus dem unteren südlichen Wandabschnitt ebenfalls den Straßenbereich erreichen können und ein Gefährdungspotenzial darstellen, da die Ergebnisse der allgemeinen lokalen Sturztrajektorien (Kapitel 4.4.2) einen deutlichen Hinweis auf diesen Sachverhalt ergeben.

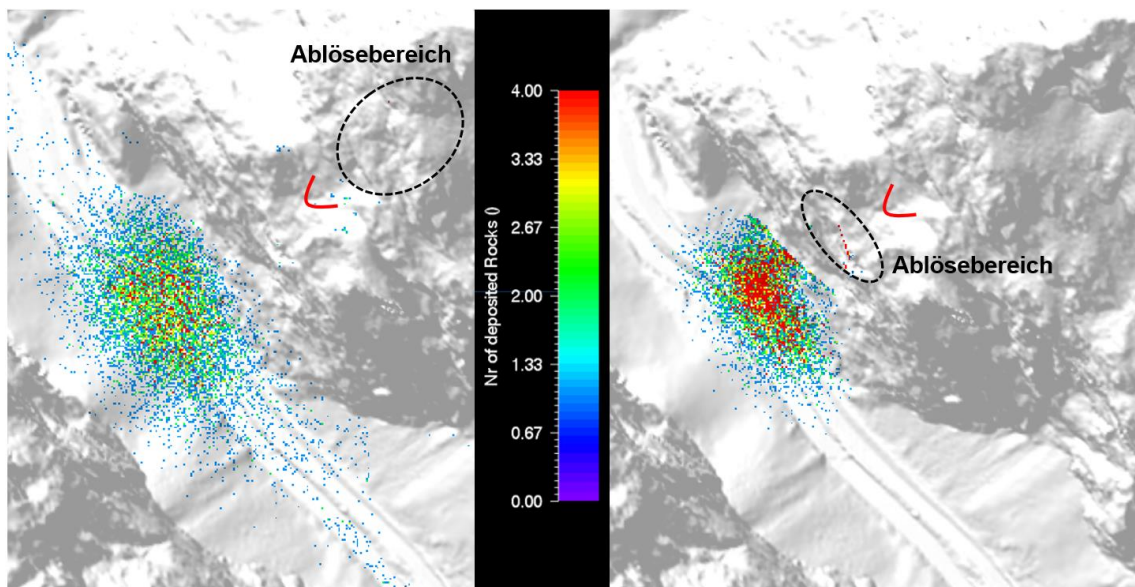


Abbildung 50: Vergleich der Aufschlagpunkte - Ablösebereich Oben und Unten

Die Abbildung 50 zeigt die Gegenüberstellung der räumlichen Aufschlagpunkte im Straßenbereich, im Hinblick auf Steinschlagablösungen im unteren und oberen zentralen Bereich der Bergwand. Die farbliche Abstufung der Aufschlagpunkte gibt Auskunft mit welcher Häufigkeit ein Steinschlagkörper in der jeweiligen Rasterzelle des Geländemodells zum Liegen kommt (Nr of deposited Rocks). Beim oberen Ablösebereich ist die Streuung der Aufschlagpunkte deutlich größer gegenüber den Blöcken, die unterhalb der Rinne abgelöst werden. Das Zentrum der Streuung liegt optisch auf Höhe der Landesstraße bzw. in der orthographischen Ansicht leicht links davon, wohingegen das deutlich konzentriertere Einschlagszentrum vom unteren Ablösebereich auch die Straßenlage überdeckt, jedoch tendenziell zwischen der Felswand und der Straße liegt. Des Weiteren ist auch zu erkennen, dass die Steinschlagkörper oberhalb der Zwischenstufe die L127 auf einen längeren Straßenabschnitt erreichen und somit quer als auch längs zum Straßenverlauf eine größere Streuung bezüglich der Aufschlagpunkte aufweisen.

Die Untersuchungen hinsichtlich des unteren südlichen Teilabschnitts bestätigen, dass die kritischen Sprungweiten der Blöcke im Allgemeinen die Landesstraße ebenfalls erreichen können. Das Einschlagszentrum befindet sich dabei jedoch nahe des flacheren, südlichen Bergfußes, was darauf hindeutet, dass die Blöcke überwiegend rollend und mit geringem Energieniveau den Straßenverlauf erreichen (80% der Steinschläge, die bis zur Landestraße vordringen, weisen eine Energie von kleiner als 10 kJ auf). Die maximalen kinetischen Energien der Steinschlagkörper aus diesen Ablösegebiet, liegen dabei in der Größenordnung des unteren zentralen Ablösebereichs. Der 99%-Fraktilwert der Energieverteilung über den Straßenverlauf beträgt diesbezüglich rund 390 kJ.

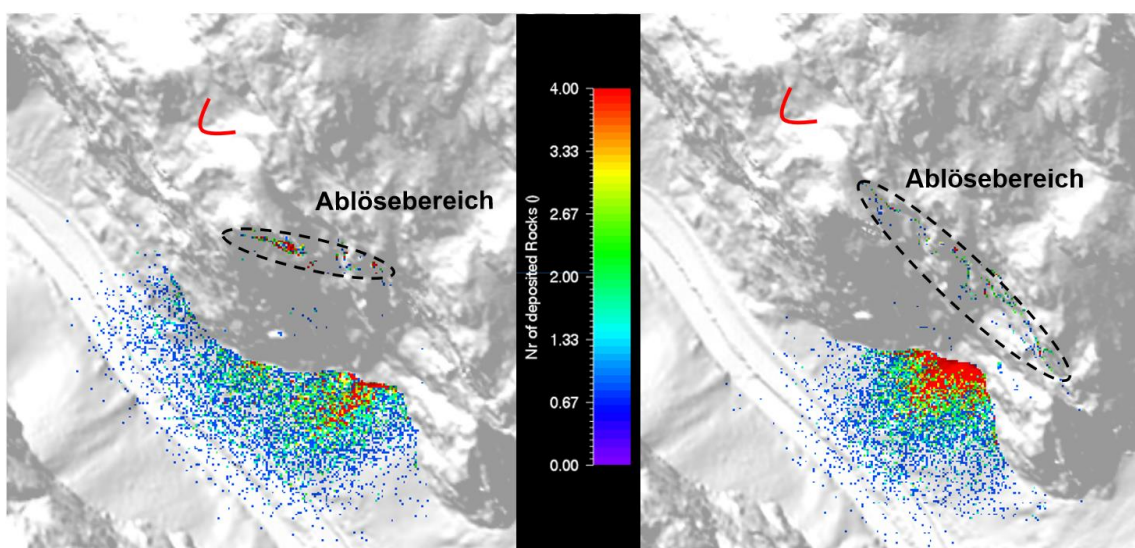


Abbildung 51: Aufschlagpunkte aus dem unteren südlichen Ablösebereich

#### 4.4.5 Einwirkungen infolge des Bemessungsblocks

In diesem Abschnitt werden die Bemessungsenergien und -geschwindigkeiten für die Schutzverbauungen zufolge des dreidimensionalen numerischen Berechnungsmodells beschrieben. Bei dieser Energieuntersuchung wird zunächst ein globaler und großflächiger Ablösebereich untersucht und anschließend der zentrale Abschnitt des nah angrenzenden Steilhangs untersucht.

Der Bemessungsblock wird in RAMMS durch einen unsymmetrischen, ungleichförmigen und leicht gedrungenen Block modelliert um eine möglichst realistische Formgebung zu gewährleisten (Abbildung 52). Die Blockformkennzahl (analog zur Kornformkennzahl) entspricht einem Wert von 1,2 (Verhältnis der längsten zur schmalsten Seite von ca. 1,2:1). Die Masse des Bemessungsblocks liegt gerundet bei einem Wert von 370 kg.

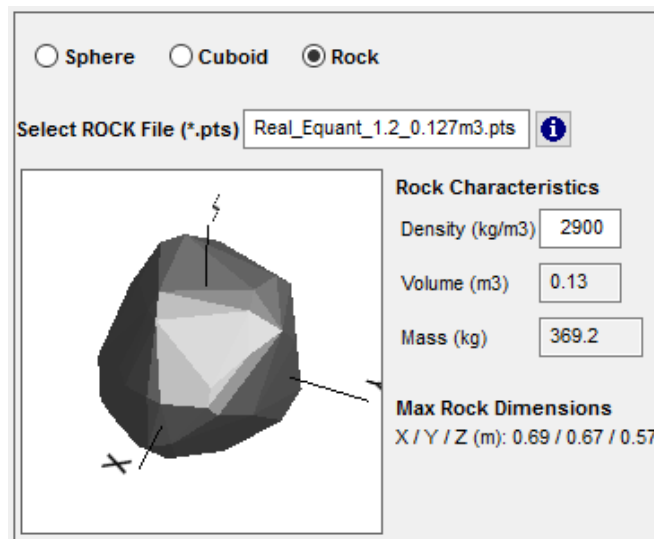


Abbildung 52: Bemessungsblock in RAMMS ROCKFALL

#### Szenario: Großflächiger Ablösebereich

Die großflächige Steinschlagsimulation stellt das maßgebende Steinschlagszenario zur Erfassung der Bemessungswerte der Schutzbauten dar. Der Ablösebereich umfasst jene Flächen von denen ein potenzielles Ablöserisiko ausgeht und somit für die Energieermittlung im Straßenbereich maßgeblich ist. Dieser Bereich umfasst somit jene Felsabschnitte oberhalb als auch unterhalb der beschriebenen Zwischenstufe, sowie den südlichen Teil der Felswand (Abbildung 53). Aus diesem Bereich werden in gleichmäßigen Abständen rund 10.000 Bemessungsblöcke ausgelöst.

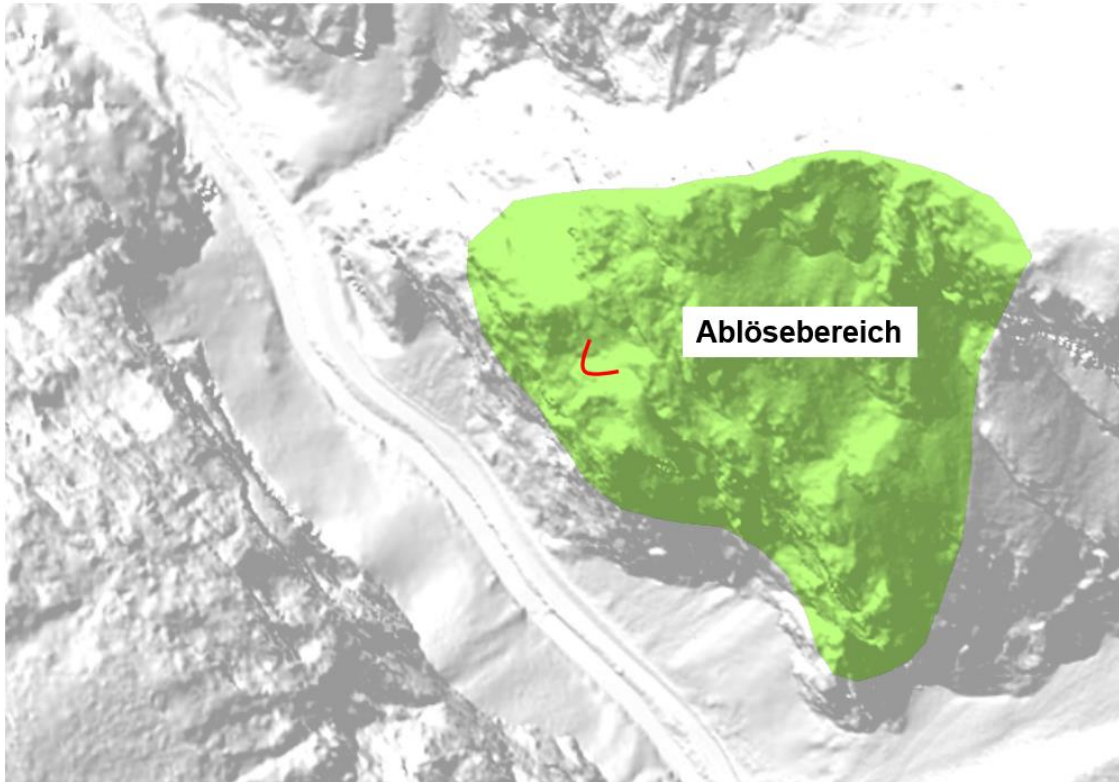


Abbildung 53: Großflächiger Ablösebereich für den Bemessungsblock

Ergebnisse:

Die Abbildung 54 zeigt die Verteilung der Sturztrajektorien mit der dazugehörigen farblichen Darstellung der kinetischen Energie. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Sturzblöcke die Landesstraße (gekennzeichnet durch die rote Linie) über eine große Länge (ca. 350 bis 400 m) erreichen können. In dem Straßenabschnitt unterhalb der Felsrinne treten kinetische Energien von rund 1000 kJ auf (grüne Sturztrajektorien). Sturzblöcke aus dem südlicheren Bereich der Felswand erreichen trotz der dazwischen liegenden flacheren Schutthalde die Landesstraße mit Energien in einer ähnlichen Bandbreite. Die Länge des Straßenabschnitts, der durch das großflächige Ablöseszenario von der Steinschlaggefährdung betroffen ist, beträgt auf Basis dieser Simulation ca. 350 bis 400 m.

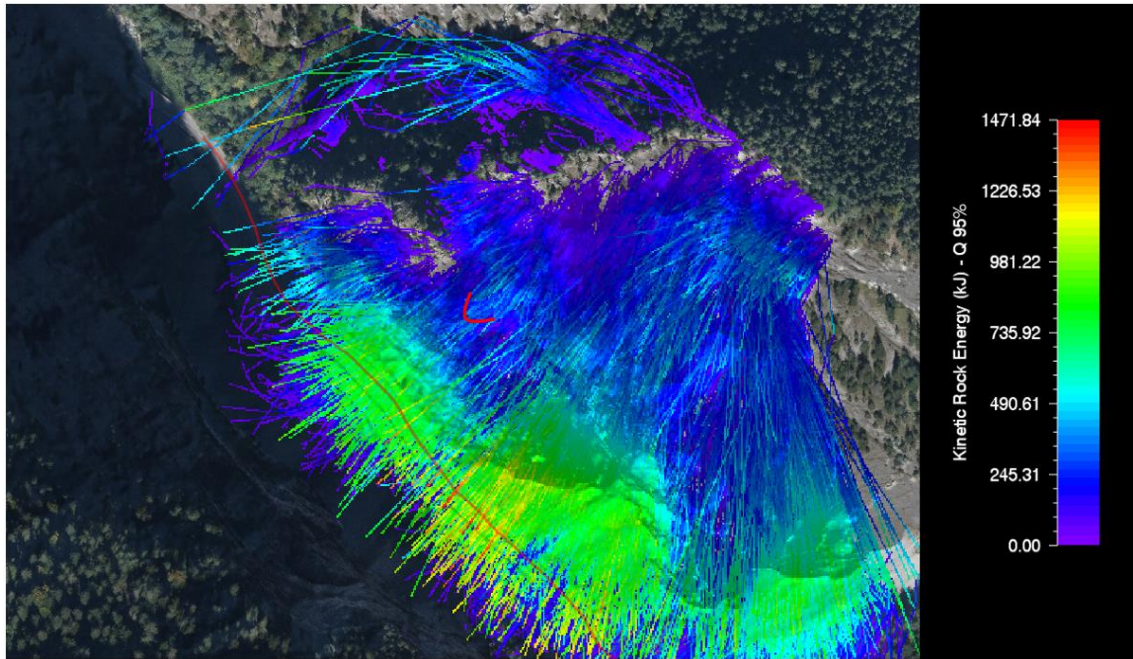


Abbildung 54: Kinetische Energie der Sturztrajektorien

Im oberen Bereich der Felswand (jene oberhalb der ersten Steilstufe) sind die kinetischen Energien der Blöcke bis um etwa die Hälfte geringer (blaue Farbgebung) als im untersten Teil in der Nähe der Straße. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in dem oberen Teil der Felswand die Blöcke, hauptsächlich rollend und auf kurzen Strecken springend, den Weg ins Tal finden. Durch die erhöhte Anzahl der Kontaktpunkte mit dem Gebirge wird ein maßgeblicher Teil der kinetischen Energie durch die zahlreichen Stoßvorgänge vom Untergrund absorbiert. Erreichen die Blöcke jenen Teil der ersten Steilstufe, ist die vorwiegende Bewegungsart das reine Fallen bzw. Springen bis zum Auftreffen im Talbereich. Die gesamte restliche potenzielle Energie wird ohne Interaktion der Blöcke mit dem Untergrund in kinetische Fallenergie umgewandelt. Diese Umstände führen zu der Abgrenzung der Energien innerhalb der Sturztrajektorien, die auch durch die farbliche Darstellung in Abbildung 54 gut ersichtlich ist.

Anhand der statistischen Auswertung der Simulationsergebnisse können genauere Aussagen bezüglich der kinetischen Impaktenergien getroffen werden. Der relevante örtliche Auswertungsbereich ist dabei der Straßenverlauf entlang des betroffenen Abschnitts der Felswand. Dafür wird ein Auswertungsprofil erstellt, welches identisch mit dem betroffenen Straßenverlauf ist (rote Linie, Abbildung 54). Bei dieser Auswertung wird jeder Block der dieses Profil durchquert, hinsichtlich seiner kinetischen Energie bei Durchgang aufgenommen. Die Ergebnisse dieser statistischen Auswertung sind in Abbildung 55 dargestellt.

## Barrier - Statistics Summary:

### Parameter: Kinetic Rock Energy (kJ)

Min / Max: 0.00 / 1350.57

Mean / Median: 159.32 / 15.29

Std Dev: 272.58

Q1 / Q3 / IQR: 3.44 / 156.29 / 152.84

Q90 / Q95 / Q99: 639.95 / 813.18 / 1034.14

Scenario: gis\_GAG\_0.127m3\_2.9t\_10K

Line Profile: Verlauf\_L127\_2.shp

Traj./Stopped: 3505/151

Nr of data values: 4568

Histogram bin size: 18.50

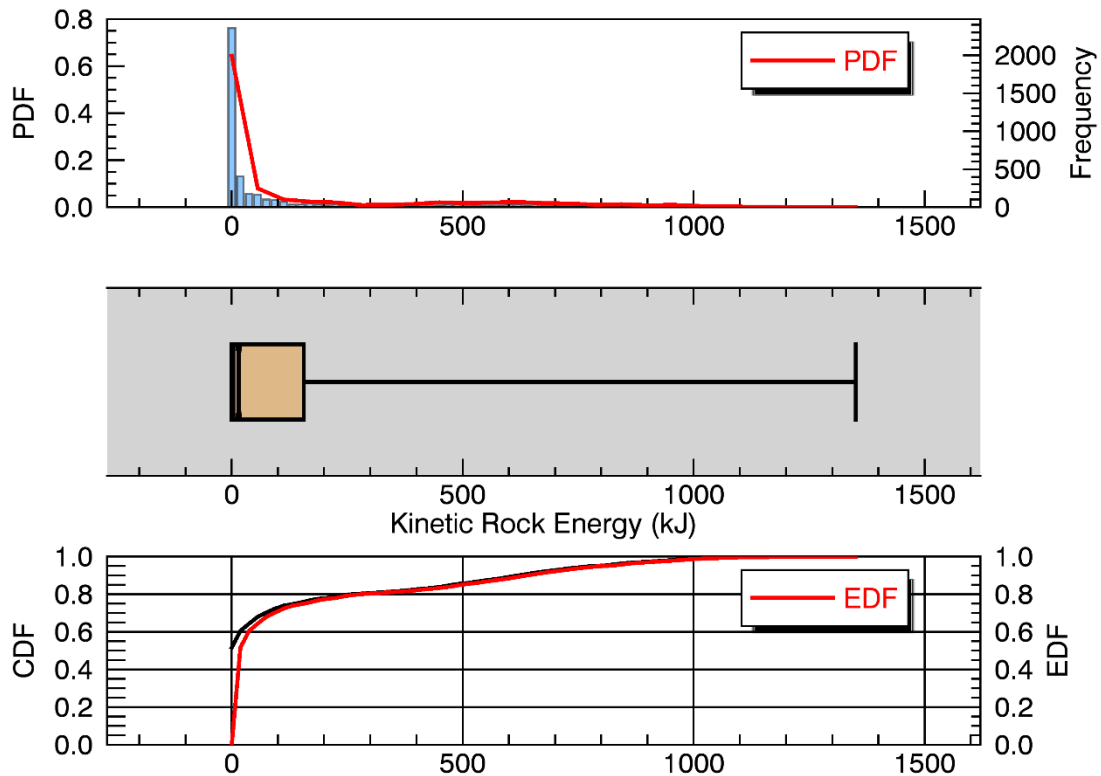


Abbildung 55: Statistische Auswertung der kinetischen Energie über den Straßenverlauf

Die Diagramme zeigen die statistische Verteilung der kinetischen Energie bis zu einem Wert von 1500 kJ mittels eines Histogramms, Boxplots und einer kumulativen Verteilung. Die rote Linie im Histogramm stellt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion dar, die blaue Linie die empirische Verteilungsfunktion der Verteilung. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Blöcke (ca. 80 %) eine kinetische Energie von keiner als 200 kJ aufweist (Anstieg der empirischen Verteilungsfunktion, Boxplot) und somit die Straße mit einem eher geringeren Energieniveau erreicht. Der nach der ONR 24810 maßgebende 99%-Fraktilwert der kinetischen Energieverteilung liegt bei 1034 kJ.



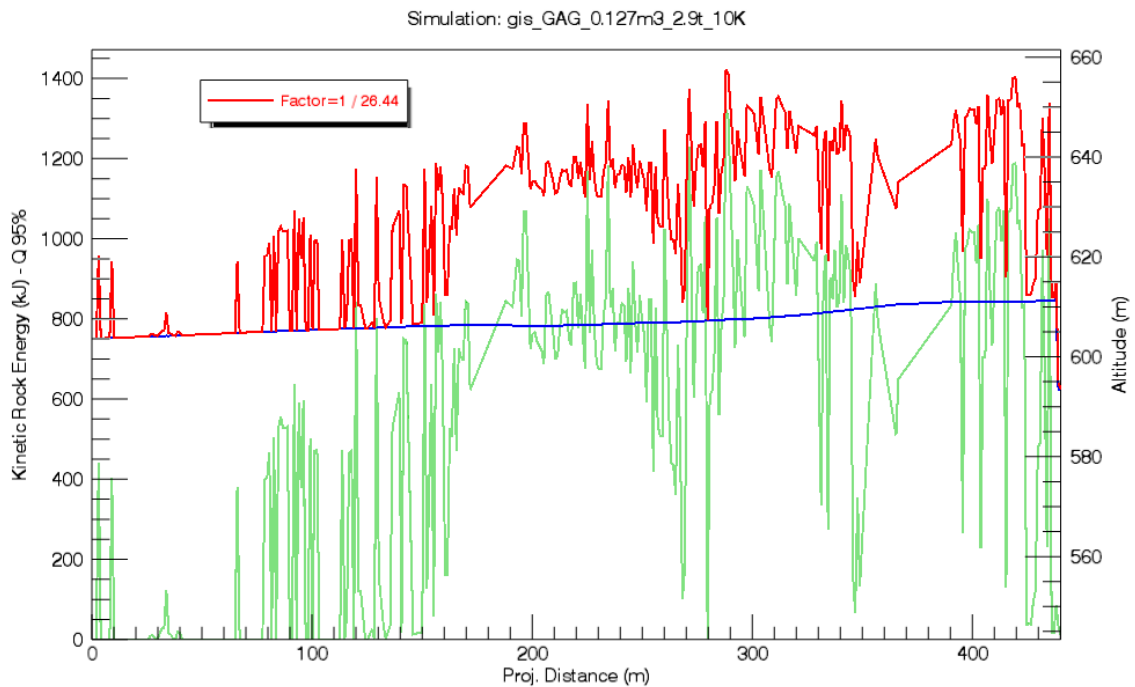


Abbildung 56: Kinetische Energieverteilung über das Straßenprofil der L127

Zur weiteren Veranschaulichung zeigt die Abbildung 56 die kinetische Energieverteilung über den Verlauf des Straßenprofils der Landesstraße (blaue Linie). Der grüne Linienverlauf stellt das 95%-Energiefraktile in Abhängigkeit zur Straßenposition dar (projizierte Distanz, horizontale Skalierung). Dabei ist die rot gekennzeichnete Linie, eine skalierte und auf die Straßenachse (blauer Verlauf) bezogene Darstellung der örtlichen Energieverteilung. Die Geländehöhe (Altitude) bezieht sich dabei auf den Straßenverlauf im Profil. Im Bereich zwischen ca. 150 und 250 m der projizierten Straßendistanz liegt jener Abschnitt der Felswand, welcher sich durch die darüber liegende Rinnenstruktur kennzeichnet. In diesem Bereich liegen die energetischen Fraktile bei ca. 800 bis maximal 1200 kJ. Über den gesamten betrachteten Straßenabschnitt treten jedoch maximale Energiespitzen von rund 1300 bis 1400 kJ auf.

Der Parameter der Aufprallgeschwindigkeit entlang des gefährdeten Straßenprofils zeigt aufgrund der Korrelation zur kinetischen Energie ein nahezu identisches Bild. Anhand der statistischen Daten lässt sich bezüglich der Fallgeschwindigkeiten festhalten, dass 99 % der Blöcke ( $Q_{99}$ ) mit bis zu 73 m/s (rund 263 km/h) den Straßenbereich erreichen. Der Maximalwert beträgt 82 m/s. Der Verlauf der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion legt den Schluss nahe, dass die überwiegend rollenden und springenden Blöcke den Geschwindigkeitsbereich zwischen 0 und etwa 30 m/s abdecken. Blöcke die den letzten Abschnitt ihrer Sturztrajektorie über den freien Fall ins Tal finden, weisen dahingegen Impaktgeschwindigkeiten in etwa von 40 bis 80 m/s (je nach freier Fallhöhe) auf.

Es ist im Allgemeinen aus diesen Ergebnissen ersichtlich, dass die Steinschläge im ungünstigsten Fall mit sehr hohen Fallgeschwindigkeiten (~ 250 km/h) den gefährdeten Straßenabschnitt erreichen. Dieses Ergebnis bestätigen auch die 2D-Simulationen (siehe Kapitel 4.3.2) Diese hohen Geschwindigkeiten stellen in weiterer Folge besondere Anforderungen an die zu konzipierenden Schutzmaßnahmen.

### Barrier - Statistics Summary:

**Parameter: Velocity (m s-1)**

Min / Max: 0.00 / 82.36

Mean / Median: 18.38 / 7.76

Std Dev: 21.16

Q1 / Q3 / IQR: 3.70 / 24.36 / 20.66

Q90 / Q95 / Q99: 57.49 / 64.38 / 73.16

Scenario: gis\_GAG\_0.127m3\_2.9t\_10K

Line Profile: Verlauf\_L127\_2.shp

Traj./Stopped: 3505/151

Nr of data values: 4568

Histogram bin size: 2.50

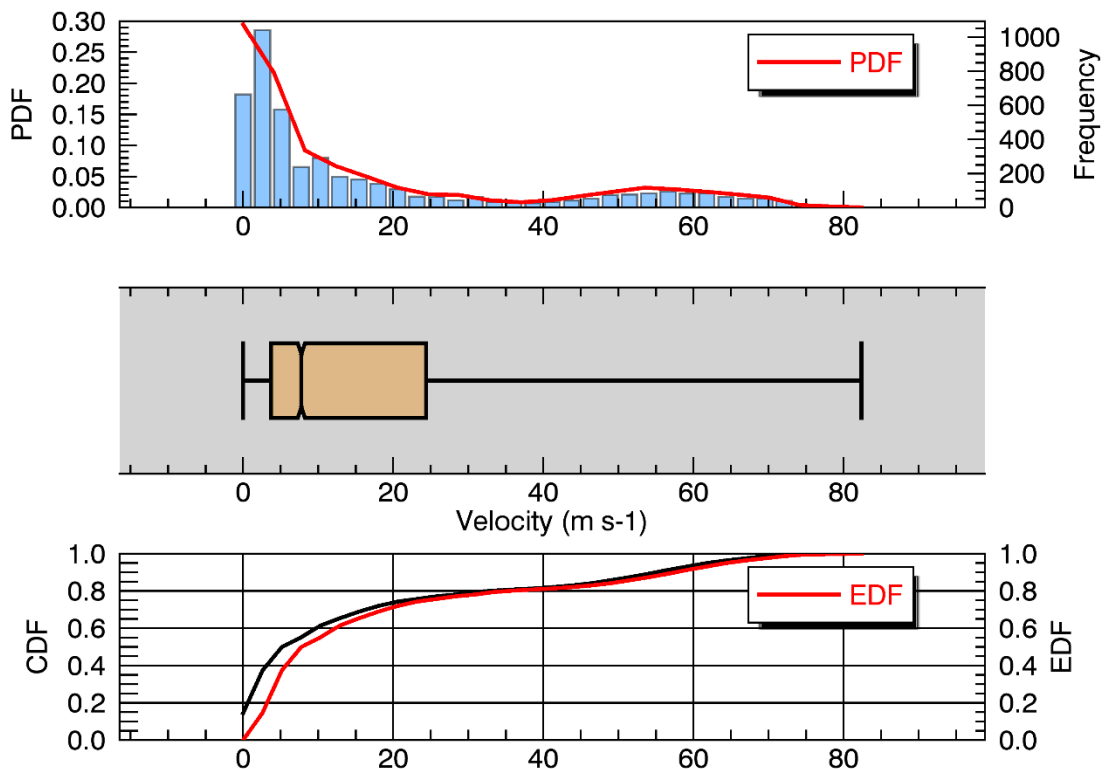
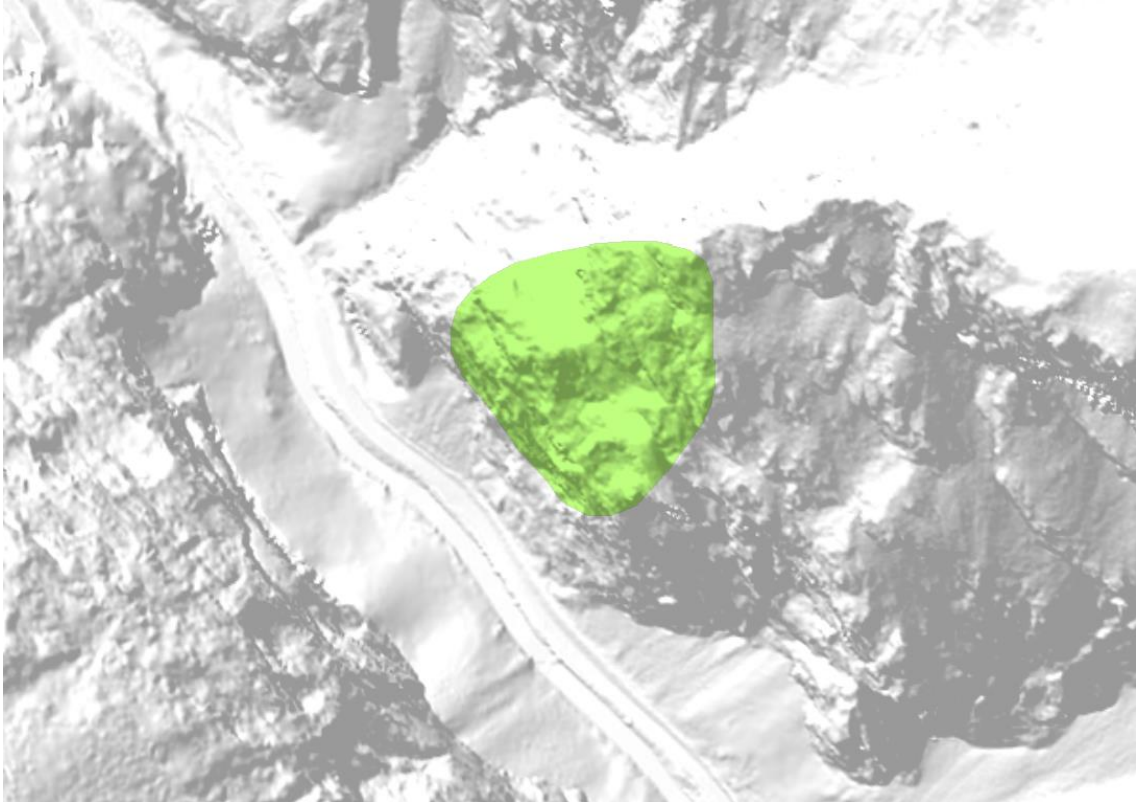


Abbildung 57: Statistische Auswertung der Impaktgeschwindigkeit über den Straßenverlauf

Szenario: Zentraler Ablösebereich:

Als Ablösefläche wird der zentrale Felswandabschnitt im Bereich der morphologischen Rinne definiert. Diese Fläche umfasst rund 300 Höhenmeter, wobei das untere Ablöseniveau auf 650 m ü. NN und das oberste auf ca. 950 m ü. NN liegt. Somit werden die Wandabschnitte oberhalb und unterhalb der Zwischenstufe als Startpunkte für die Steinschlagkörper miteinbezogen.



*Abbildung 58: Zentrale Ablösefläche an der Felswand*

Ergebnisse:

Die räumliche Verteilung der kinetischen Energien im Sturzverlauf sind in Abbildung 59 abgebildet. Aus dieser Darstellung ist zum einen ersichtlich, dass die kinetische Energien im Straßenbereich unmittelbar unterhalb der Rinne am größten sind und zum anderen, dass auch dort die Einschlagsdichte der Steinschlagkörper am höchsten ist. Diese Beobachtung bestätigen auch die Untersuchungen in den bisher beschriebenen Kapiteln. Auch sind die erhöhten Energien im Verlauf der Rinne ersichtlich, diese liegen in etwa bei maximal rund 400 kJ. Diese Energien sind somit im Vergleich zu benachbarten Sturzpfaden (auf gleichem Höheniveau und außerhalb der Rinne) annähernd doppelt so groß. Durch dieses verhältnismäßig hohe Energieniveau, bereits auf Höhe der Zwischenstufe, erreichen jene Blöcke die großen Sprungweiten und maximalen Energien im Talbereich (bis zu ca. 1100 kJ).

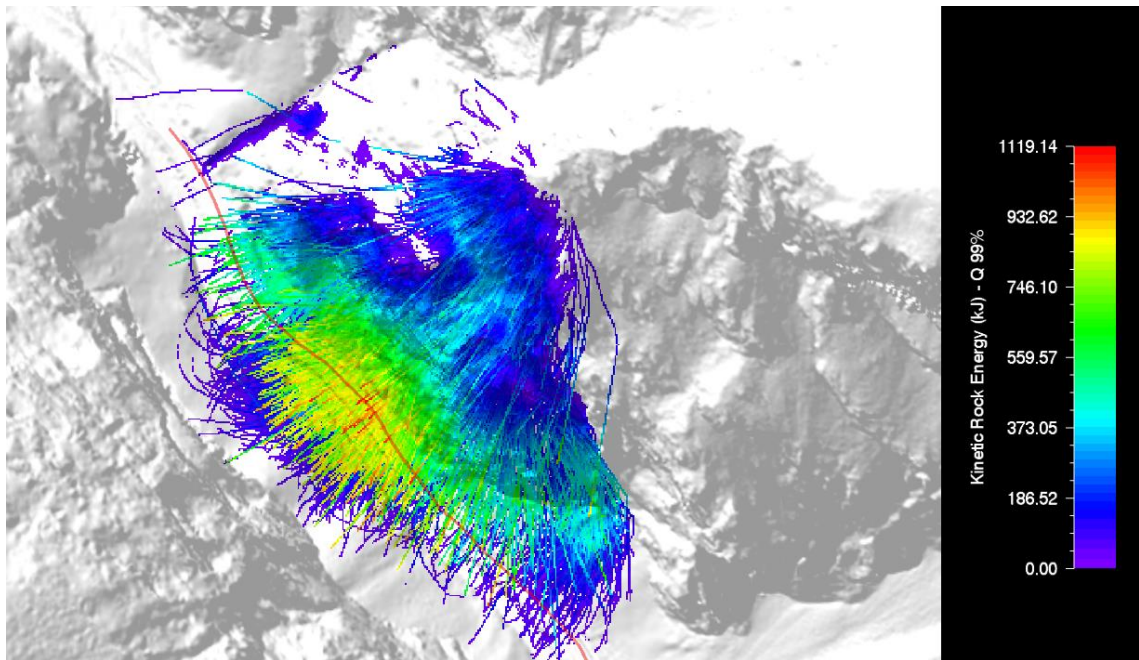


Abbildung 59: Kinetische Energie im Sturzverlauf im zentralen Ablösebereich

Zur genaueren Auswertung der Energien werden die Informationen aus den Abbildung 60 und Abbildung 61 herangezogen. Die Verteilung der kinetischen Energien der Steinfallkörper entlang des relevanten Straßenabschnitts (Abbildung 60) zeigt, dass die Einschlagsdichte sich in einen Kernbereich und in einen seitlichen Einflussbereich unterteilen lässt. Die projizierte Straßendistanz zwischen 140 und 270 m stellt den Abschnitt mit der höchsten Einschlagsdichte mit den höchsten Energien dar (Kernbereich).

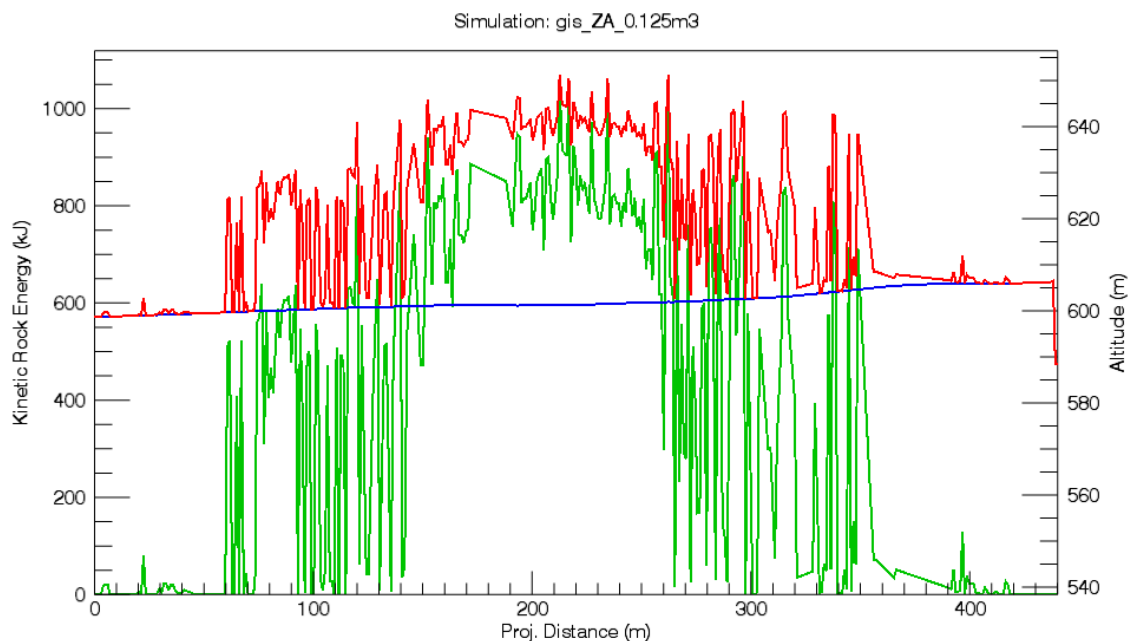


Abbildung 60: Kinetische Energien im Verlauf der Landstraße bei zentralen Ablösebereich

Die Energien sind hier relativ gleichmäßig auf einem vergleichsweise höheren Energieniveau (ca. 800 bis 1000 kJ). Dieser Straßenabschnitt befindet sich unmittelbar unter dem Rinneneinschnitt. Die Bereiche links und rechts davon weisen im Allgemeinen geringere energetische Werte auf und haben zudem einen verhältnismäßig sehr un stetigen und springenden Verlauf über die Straßendistanz (seitlicher Einflussbereich). Es kann somit von einer konstant hohen Einschlagsdichte mit den höchsten kinetischen Energien im Straßenabschnitt unterhalb der Rinne ausgegangen werden. Dieser Abschnitt befindet sich ca. zwischen Straßenkilometer 3,19 und 3,33.

Anhand einer genaueren statistischen Auswertung der Daten (Abbildung 61) kann festgehalten werden, dass der maßgebende 99%-Fraktilwert der Energieverteilung bei rund 848 kJ liegt. Der Boxplots gibt zudem relevante Auskunft über den Medianwert (115 kJ), das obere Quantil (507 kJ) und den Interquartilsabstand (490 kJ). Die maximale kinetische Energie wird bei 1048 kJ erreicht. Das Histogramm und die kumulative Verteilung bieten weiters eine statistische Übersicht der ermittelten Energieverteilung.

### Barrier - Statistics Summary:

#### Parameter: Kinetic Rock Energy (kJ)

Min / Max: 0.00 / 1048.52

Mean / Median: 251.88 / 115.73

Std Dev: 270.63

Q1 / Q3 / IQR: 16.99 / 507.45 / 490.46

Q90 / Q95 / Q99: 680.22 / 743.22 / 848.16

Scenario: gis\_ZA\_0.125m3

Line Profile: Verlauf\_L127\_2.shp

Traj./Stopped: 3161/92

Nr of data values: 3989

Histogram bin size: 61.68

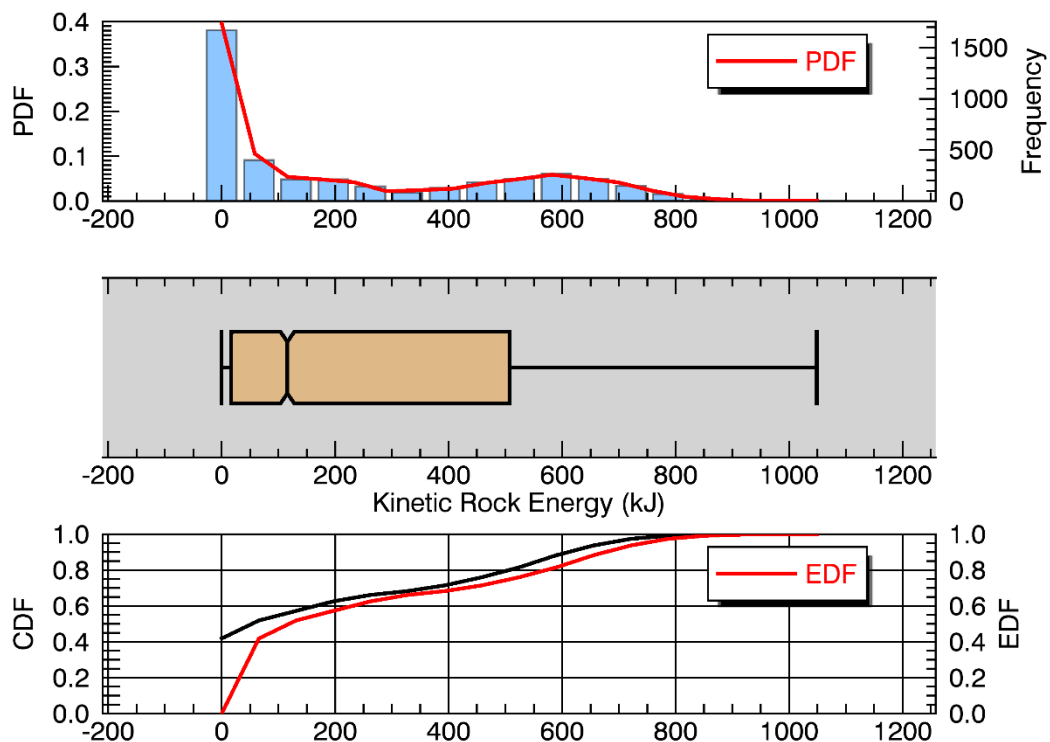


Abbildung 61: Statistische Auswertung der kinetischen Energien im Straßenverlauf

Hinsichtlich der Fallgeschwindigkeiten ergibt sich aus der Korrelation zur kinetischen Energie eine sehr ähnliche räumliche Verteilung (Abbildung 62 bzw. Abbildung 63). Die höchsten Aufprallgeschwindigkeiten werden auf einem ca. 200 m langen Abschnitt unterhalb der Rinne erreicht. Das 99%-Quantil der Impaktgeschwindigkeiten beträgt rund 67 m/s (241 km/h) und ist in dieser Größenordnung den im Straßenbereich steil auftreffenden Blöcken zuzuordnen. Der Maximalwert liegt bei ca. 75 m/s (270 km/h).

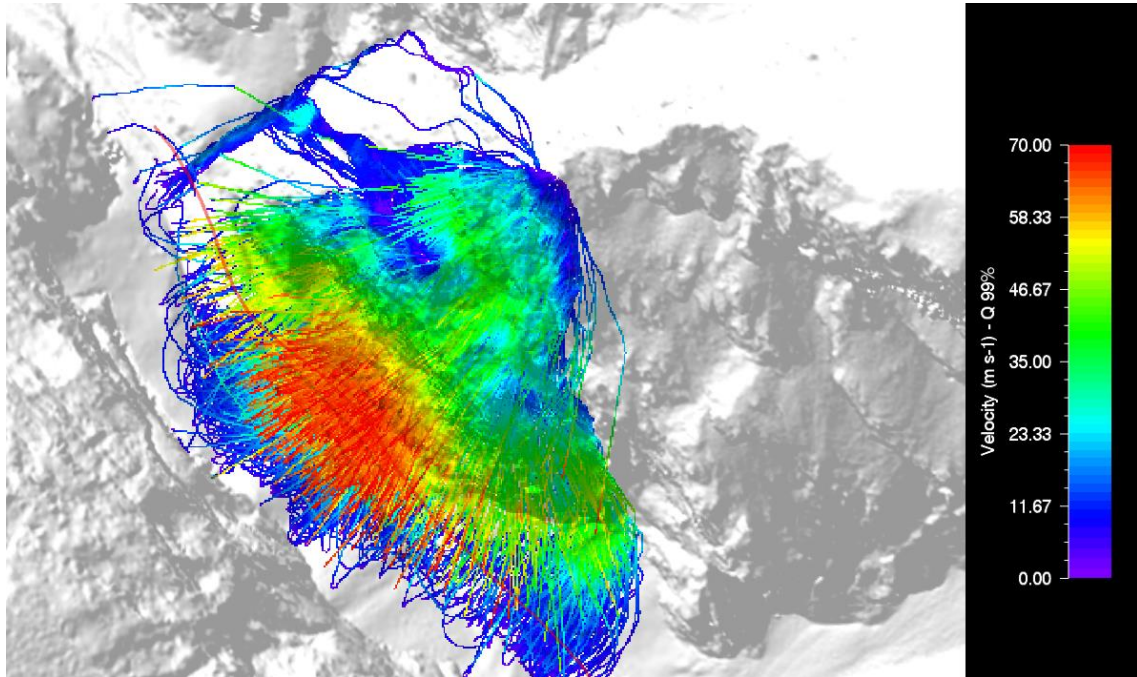


Abbildung 62: Räumliche Fallgeschwindigkeiten aus dem Ablösebereich (99%-Fraktile)

### Barrier - Statistics Summary:

Parameter: Velocity (m s-1)

Min / Max: 0.00 / 74.55

Mean / Median: 28.11 / 21.46

Std Dev: 21.62

Q1 / Q3 / IQR: 8.14 / 51.22 / 43.08

Q90 / Q95 / Q99: 59.78 / 62.57 / 66.87

Scenario: gis\_ZA\_0.125m3

Line Profile: Verlauf\_L127\_2.shp

Traj./Stopped: 3161/92

Nr of data values: 3989

Histogram bin size: 4.97

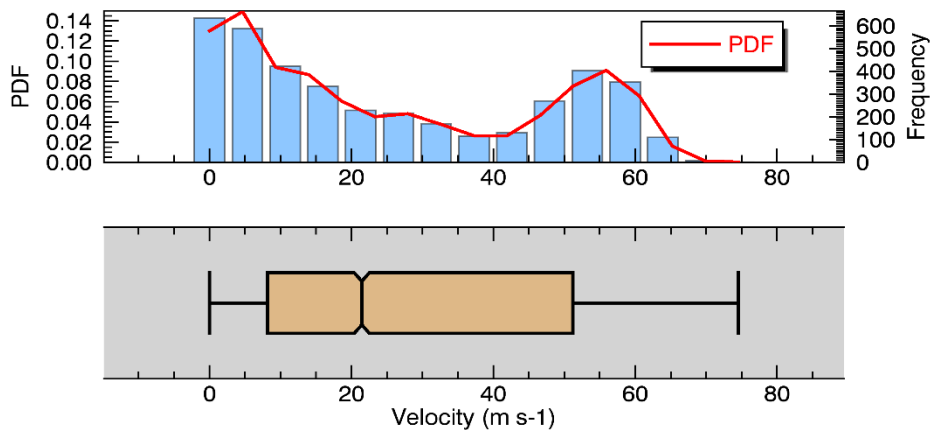


Abbildung 63: Statische Auswertung der Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenverlauf der L127

#### 4.4.6 Steinschlagsimulationen am Gegenhang

Mittels einer weiteren 3D-Simulation wird die Steinschlaggefährdung vom Gegenhang untersucht. Hierbei sollen analog zu Kapitel 3.4.4 hauptsächlich die Reichweite Steinschläge und die auftretenden Impaktenergien im Talbereich ermittelt werden, da hinsichtlich möglicher Maßnahmen, eine Straßenverlegung auf die orografisch linke Bachseite (Gegenhang) ebenfalls in Betracht gezogen werden kann.

Alle Simulationen werden hierbei ebenfalls mit dem Bemessungsblock ( $0,125 \text{ m}^3$ ) durchgeführt, da anzunehmen ist, dass am Gegenhang ähnliche Kluftkörpergrößen bzw. Blockfragmentierungen an der Schutthalde vorzufinden sind. Für die Modellierung des Szenarios wird der im digitalen Geländemodell verfügbare Geländeteil der gegenüberliegenden Felswand als Ablösefläche definiert (Abbildung 64). Zusätzlich wird eine lichte Bewaldung ( $20 \text{ m}^2/\text{ha}$ ) am unteren Flachhang modelliert. Der Ablösebereich erstreckt sich von rund 650 bis 950 m ü. NN. Eine mögliche verlegte Straßenführung ist mit dem roten Linienverlauf in der Abbildung 64 und Abbildung 65 markiert.

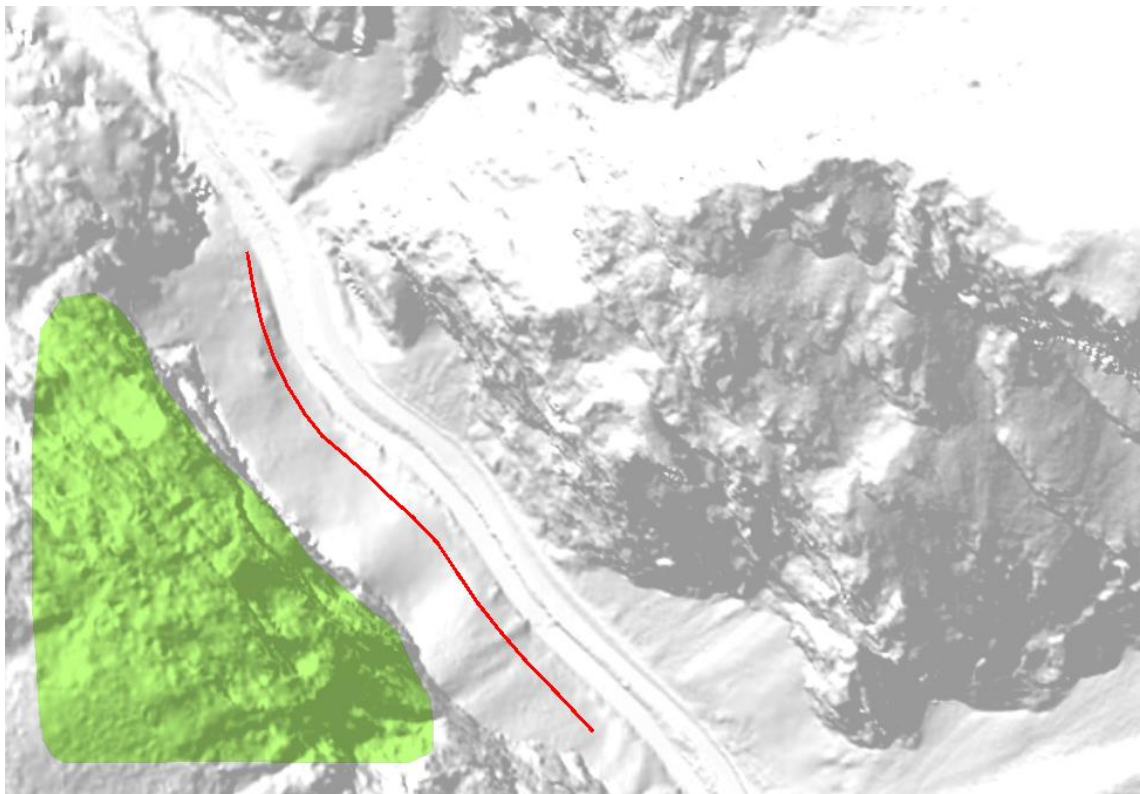


Abbildung 64: Ablösebereich (grün) auf der orographisch linken Talseite (Gegenhang)

Das Ergebnis hinsichtlich der räumlich auftretenden kinetischen Energien ist in Abbildung 65 ersichtlich. Entlang der verlegten Straße werden, nach statistischer Auswertung

der Daten, maßgebende kinetische Energien von 868 kJ erreicht. Dieser Energiewert entspricht dem 99%-Quantil der generierten Energieverteilung.

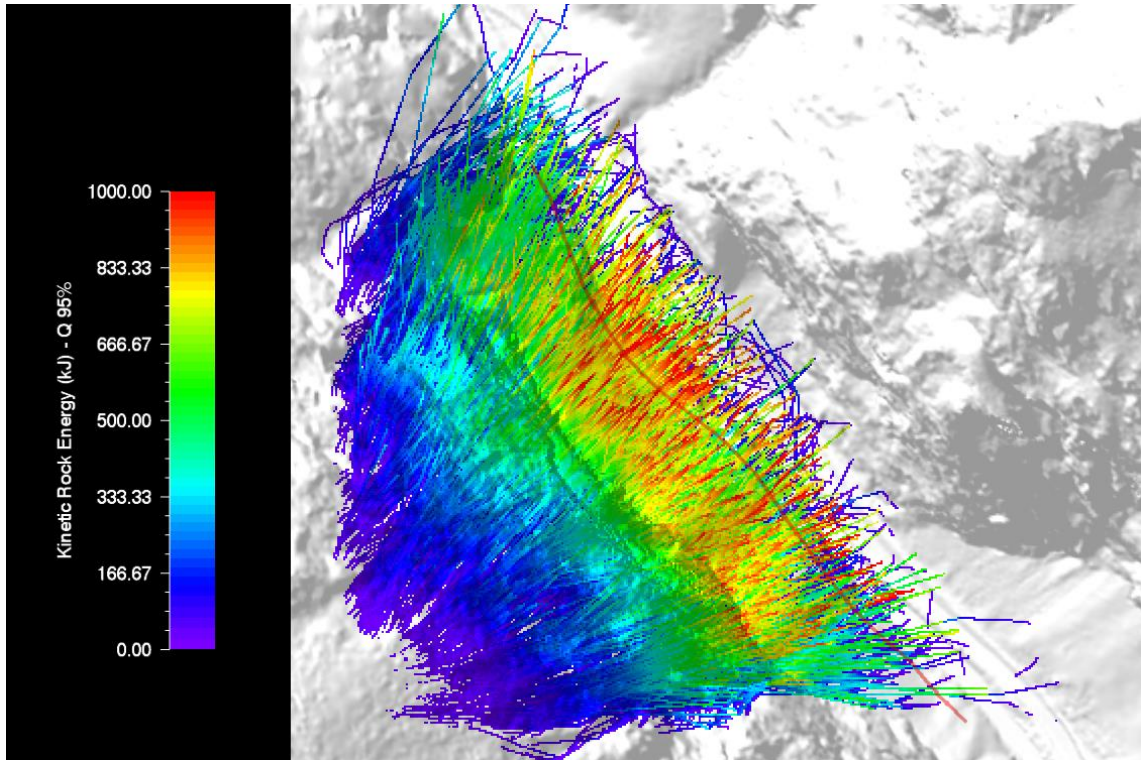


Abbildung 65: Kinetische Energien am Gegenhang

Die Reichweiten der Steinschläge zeigen auch anhand der räumlichen Energieverteilung konsistente Ergebnisse zu den 2D-Steinschlagsimulationen (4.3.4).

In Abbildung 66 sind in einer gesonderten Übersicht die Aufschlagpunkte der simulierten Steinschläge dargestellt. Die roten Punktmarkierungen repräsentieren jeweils einen Aufschlagpunkt im Talbereich. Zur Veranschaulichung sind die aktuelle Straßenführung der L127 sowie der Verlauf einer möglichen Straßenverlegung auf der orographisch linken Talseite gekennzeichnet. Demnach ist gut ersichtlich, dass die Flugweiten der Steinschlagkörper beide Straßenbereiche über einen breiten Abschnitt erreichen. Es ist somit abschließend davon auszugehen, dass bei eventuellen Steinschlägen vom Gegenhang ein ähnliches Schadenspotenzial für die Befahrung der Landesstraße ausgeht, wie von der betroffenen zentral angrenzenden Felswand.



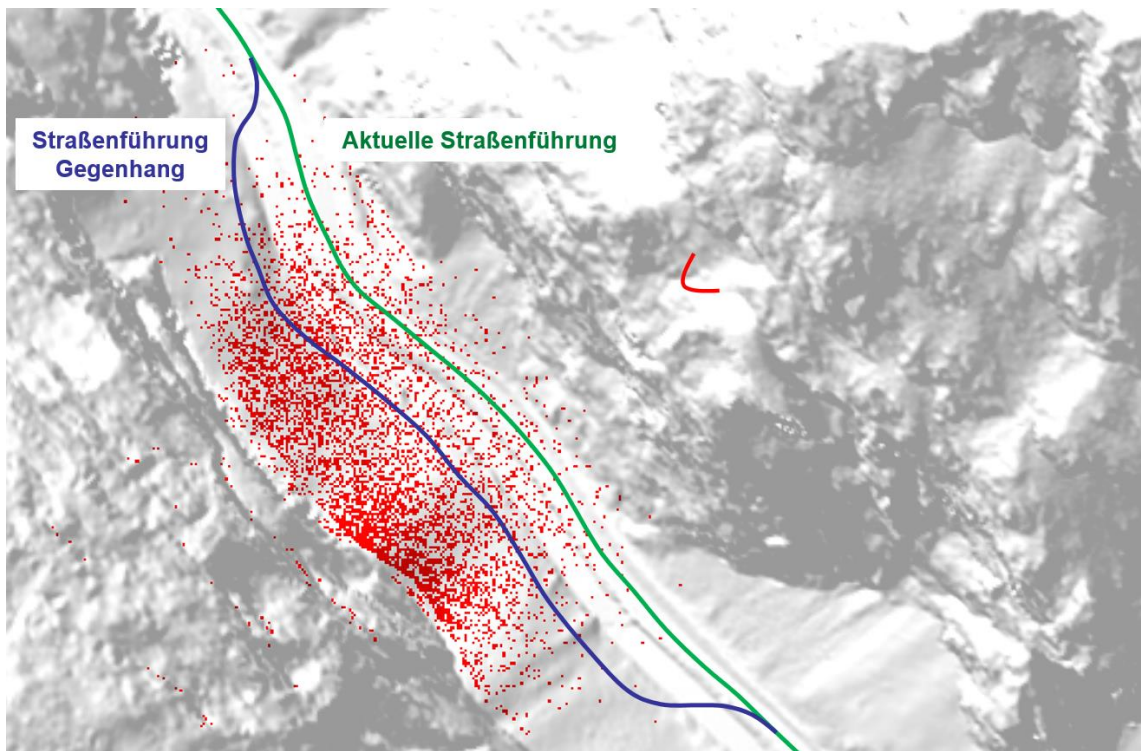


Abbildung 66: Aufschlagpunkte durch Steinschlagereignisse am Gegenhang

#### 4.5 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die maßgebenden Ergebnisse der zuvor beschriebenen Steinschlagsimulationen werden nachfolgend kurz zusammengefasst. Die Ergebnisse beziehen sich auf die im Bereich der Landesstraße ermittelten kinetischen Energien, Aufprallgeschwindigkeiten, Sprungreichweiten und Aufprallwinkel der Steinschläge. Die genannten Kennzahlen stellen für die Bemessung der Schutzbauten die relevanten Eingangsparameter dar.

Die ONR 24810 definiert als maßgebende Energie zur Bemessung der Schutzbauten, das 99%-Fraktile der simulierten Energieverteilung. Die folgenden Tabellen dokumentieren übersichtlich die berechneten maßgebenden Energiefraktile der 2D- und 3D-Steinschlagsimulationen.

##### Kinetische Energien der Steinschlagkörper:

*Tabelle 7: Zusammenfassung der kinetischen Energien im Straßenbereich*

99%-Fraktile der Energieverteilung	
Berechnung	Kinetische Energie
2D (zentraler Ablösebereich)	859 kJ    *(958 kJ)
3D (zentraler Ablösebereich)	848 kJ    *(1049 kJ)
3D (großflächiger Ablösebereich)	1034 kJ    *(1351 kJ)

\* (maximaler Wert der kinetischen Energieverteilung)

Die energetischen Bemessungswerte aus dem zentralen Ablösebereich stimmen zwischen den 2D- und 3D-Berechnung gut überein. Demnach beträgt die Aufprallenergie in etwa 850 kJ. Das 99%-Quantil hinsichtlich des großflächigen Ablösebereichs liegt bei 1034 kJ und ist damit um ca. 20% höher. Dies ist auf die höhergelegenen Ablösepunkte der Steinschlagkörper zurückzuführen. Dadurch wird die höhere potenzielle Lageenergie der Blöcke im Sturzprozess in eine größere kinetische Energie umgewandelt. Da nicht ausgeschlossen werden kann, dass künftige Steinschläge aus diesem Ablösegebiet entspringen, ist es im Allgemeinen auf der sicheren Seite vom höheren Fraktilewert, sprich 1034 kJ, auszugehen.

**Es wird daher empfohlen, auf Basis des definierten Bemessungsblocks und der aufgestellten Steinschlagsimulationen, konservativ eine maßgebende kinetische Bemessungsenergie von rund 1000 kJ für die Schutzbauten anzusetzen.**

Aufprallgeschwindigkeiten:

Tabelle 8: Zusammenfassung der Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich

99%-Fraktile der Aufprallgeschwindigkeiten	
Berechnung	Aufprallgeschwindigkeiten
2D (zentraler Ablösebereich)	67 m/s *(71 m/s)
3D (zentraler Ablösebereich)	67 m/s *(75 m/s)
3D (großflächiger Ablösebereich)	73 m/s *(82 m/s)

\* (maximaler Wert der Aufprallgeschwindigkeiten)

Die ausschlaggebenden Aufprallgeschwindigkeiten liegen beim zentralen Ablösebereich bei 67 m/s, dies entspricht einem Wert von 241 km/h. Für Steinschlagkörper aus dem großräumigen Ablösegebiet erreicht dieser Wert rund 73 m/s (263 km/h).

**Sinngemäß zu der Begründung hinsichtlich der kinetischen Energien, wird hier ebenfalls empfohlen als ungünstigsten Bemessungsfall für Schutzverbauungen eine Impaktgeschwindigkeit von 73 m/s (263 km/h) anzunehmen.**

Aufprallwinkel und Sprungreichweiten:

Der Aufprallwinkel der Steinschläge im Straßenbereich variiert in der Bandbreite zwischen ca. 30° (rollend bis leicht springend) und rund 80° (steil fallend) zur Horizontalen. Steinschlagkörper, mit steilen Aufprallwinkel (> 60°) erreichen im Allgemeinen die höchsten auftretenden kinetischen Aufprallenergien im Straßenbereich. Die Sprungreichweiten der Steinschläge reichen zudem bei allen aufgestellten Simulationen teilweise bis weit über den Straßenverlauf der Landesstraße hinaus. Es werden hierbei Sprungweiten von bis zu 60 m, im horizontalen Abstand zum Fuß des Steilabschnitts, erreicht. Die Landesstraße hat im Vergleich dazu eine projizierte Distanz von rund 30 m zum Beginn des Steilabschnitts im Fußbereich der zentralen Felswand. Aufgrund der begrenzten Platzverhältnisse in diesem schmalen Talabschnitt ist somit festzuhalten, dass Steinschläge flächendeckend den Talbereich erreichen können.

In der Kombination der den auftretenden Sprungweiten und den steilen Fallwinkel, liegt eine große Herausforderung dieses Projektes: Die höchsten kritischen Energien (ca. 1000 KJ) erreichen die Landesstraße mit Fallneigung von bis zu 80° zur Horizontalen. Konventionelle Steinschlagschutzsysteme (Schutzzäune bzw. Schutzdämme), die zu-

meist auf einen seitlichen Schutz ausgelegt sind, können unter diesen Randbedingungen keine ausreichende Sicherheit gegenüber nahezu vertikalen Steinschlägen im Straßenbereich gewährleisten. Es ist daher absolut notwendig bei der Konzeption der Schutzbauten straßenüberdeckende Systeme anzuwenden bzw. zu entwickeln um dieser Anforderung gerecht zu werden.

Die zu schützende Straßenlänge kann bei Ablösungen der Steinschläge aus dem zentralen Wandbereich mit rund 140 m angenommen werden (vgl. 4.4.5). Dieser Straßenabschnitt im zentralen Haupteinschlagsbereich liegt in etwa zwischen Straßenkilometer 3,19 und 3,33. Auf Basis einer großräumigen Betrachtung ist hingegen die Landesstraße ab ca. 3,11 km bis 3,43 km auf einer Länge von 320 m zu schützen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass vereinzelte, hochenergetische Steinschläge die Straße auf diesen Abschnitten erreichen können (siehe Abbildung 60, Kapitel 4.4.5). Da jedoch Steinschläge auf diesem ausgedehnten Abschnitt in den letzten Jahren nicht beobachtet wurden, ist im Sinne einer Kosten-Ereignis-Betrachtung eine Konzentration der Schutzmaßnahmen auf den genannten Zentralbereich zu überlegen.

## 5. Schutzmaßnahmen

### 5.1 Anwendungsbereiche von Schutzsystemen

Aufgrund der zunehmenden Besiedlung sowie dem Ausbau der Verkehrsinfrastruktur in Gebirgsregionen und oftmals schmalen Talgebieten, entstehen hinsichtlich der potenziellen Steinschlaggefährdung vermehrt lokale Risikoabschnitte. Der technische Steinschlagschutz hat aufgrund dieser Entwicklungen in den vergangenen Jahren besonders in alpinen Regionen stark zugenommen. Die heute verfügbaren Schutzsysteme und -verbauungsmaßnahmen gewährleisten je nach projektorientierten Anforderungen zumeist eine signifikante Risikominimierung für Menschenleben, Sachschaden und Schäden an der Infrastruktur.

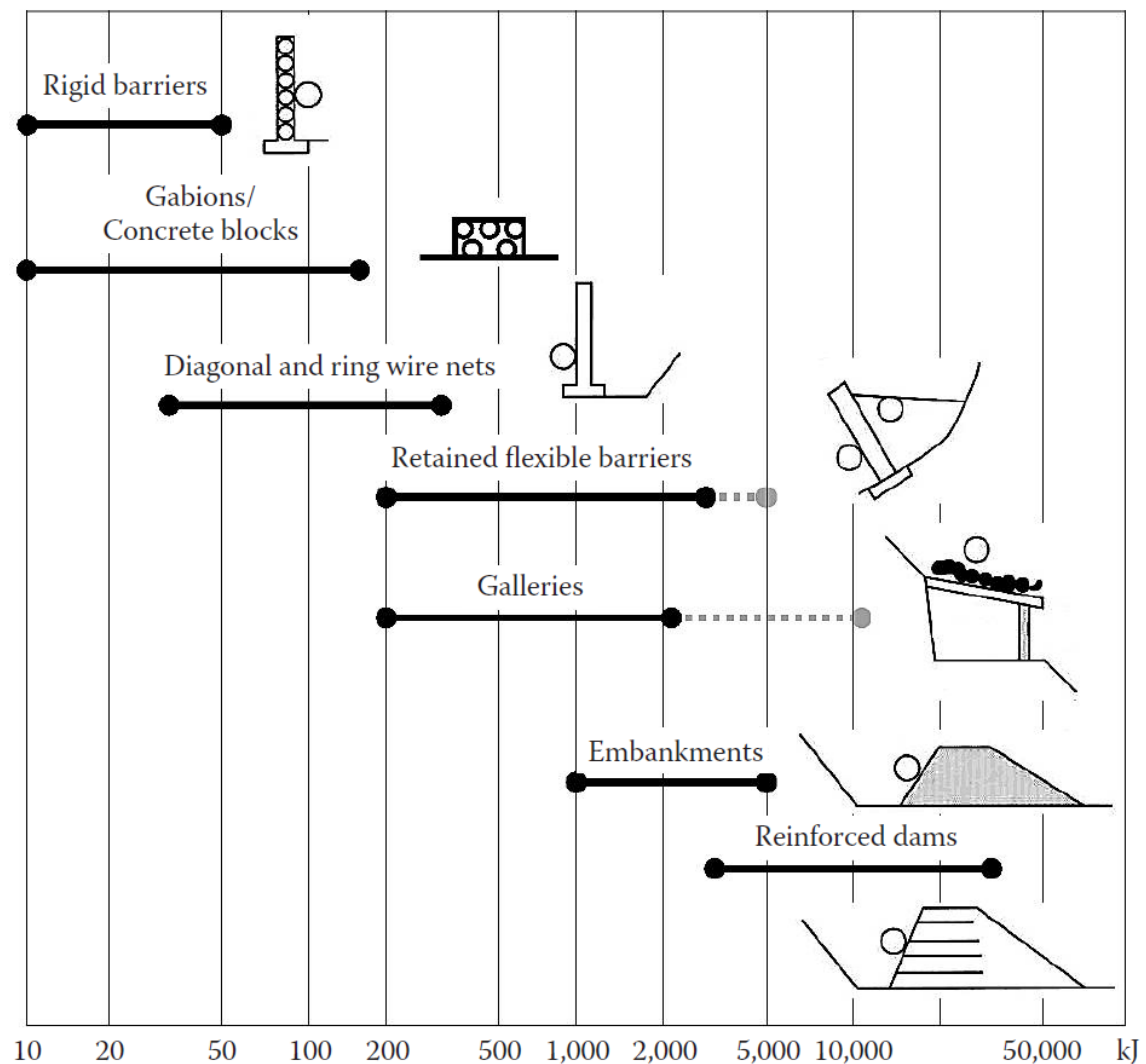


Abbildung 67: Energieabhängige Anwendungsbereiche von Schutzsystemen gegen Steinschlag [30]

Die Wahl des Schutzsystems ist nach WYLLIE [30] in erster Linie abhängig von der:

- **Kinetischen Impaktenergie  $E_{kin}$ :** Berechnet sich aus der maßgebende Masse  $m$  des Bemessungsblocks und der translatorischen Impaktgeschwindigkeit  $v$  des Steinschlagkörpers nach  $E_{kin} = \frac{1}{2} \times m \times v^2$
- **Geländegeometrie:** Entscheidende Parameter der Geländegeometrie in Bezug auf die Bemessung der Schutzbauten sind die Fallhöhe und die Hangneigung im Abbruchgebiet
- **Kosten-Nutzen-Analyse:** Eine vertretbare und ausgewogene Relation hinsichtlich der Errichtungskosten einer Schutzverbauung und der abgeschätzten Kosten für Folgeschäden

In Abbildung 67 werden die energetischen Aufnahmekapazitäten der heute verbreiteten Schutzsysteme übersichtlich dargestellt. Demnach ist zu entnehmen, dass für Impaktenergien im Bereich von 1000 kJ hauptsächlich flexible Schutznetzverbauungen sowie Galeriekonzepte angewendet werden. Die Anwendung von (ggf. bewehrten) Damm-  
schutzkörpern bildet bei der vorliegenden kinetischen Energie die untere Grenze der anzuwendenden Energiebandbreite. Diese Schutzkonzepte bilden daher den Fokus im Entwurf und der Konzeption der projektspezifischen Lösungsmöglichkeiten und sollen in den nachfolgenden Kapiteln kurz in ihrer Funktion und Anwendungsgebieten einleitend beschrieben werden.

### 5.1.1 Steinschlagschutznetze

Steinschlagschutznetze können nach dem heutigen Entwicklungsstand auf eine große Bandbreite an Impaktenergien angelegt werden. Das Energiespektrum liegt hierbei zwischen ca. 100 kJ und bis maximal ca. 8000 kJ. Ein charakteristisches Merkmal von Steinschlagschutznetzen ist die Flexibilität des gesamten Systemaufbaus zur Absorption von dynamischen Belastungen, wodurch die Steinschlagkörper abgefangen und in ihrem Sturzverlauf gestoppt werden. Die Dimensionierung der Steinschlagschutznetze basiert vordergründig auf der Bemessungsenergie der Steinschläge sowie den maßgebenden Sprunghöhen auf Grundlage der ermittelten Sturztrajektorien.

In Abbildung 68 sind die grundlegenden Komponenten dieses Systemaufbaus schematisch abgebildet. Die Absorption der Einschlagsenergie erfolgt durch die Verformung und Auslenkung des aufgespannten Stahlgeflechts (Ring- und Maschendrahtnetze) sowie

Aktivierung der Brems Elemente an den Abspannungen und der Tragseile im Falle eines Einschlags. Die Aufhängung der Fangnetze wird über Stahltragseile gewährleistet, die auf Stahlpfosten angebracht sind. Die Stahlpfosten können bei konventionellen Systemen mit einer Länge von bis zu ca. 10 m ausgeführt werden (zumeist als HEA oder Rohrprofile). Diese Stahlstützen werden dabei in Abständen von 6 bis 12 m über eine Grundplatte auf einem Betonfundament gelagert. Jede Stütze wird dabei doppelt über zwei Verankerungspunkte durch Stahlseile abgespannt. Die Verankerungen können als Spiralseilanker ausgeführt und anschließend mit Injektionsgut verpresst werden.

Der geringe Platzbedarf, die variable Dimensionierung und die schnelle Installation der Komponenten bilden die grundlegenden Vorteile dieses Systems. In Anbetracht der zudem verhältnismäßig wirtschaftlichen Errichtungskosten stellen dynamische Schutznetzsysteme oft eine vorteilhafte Bilanz in Hinblick die relevante Kosten-Nutzen-Analyse und finden daher immer häufiger Anwendung im sekundären Steinschlagschutz.

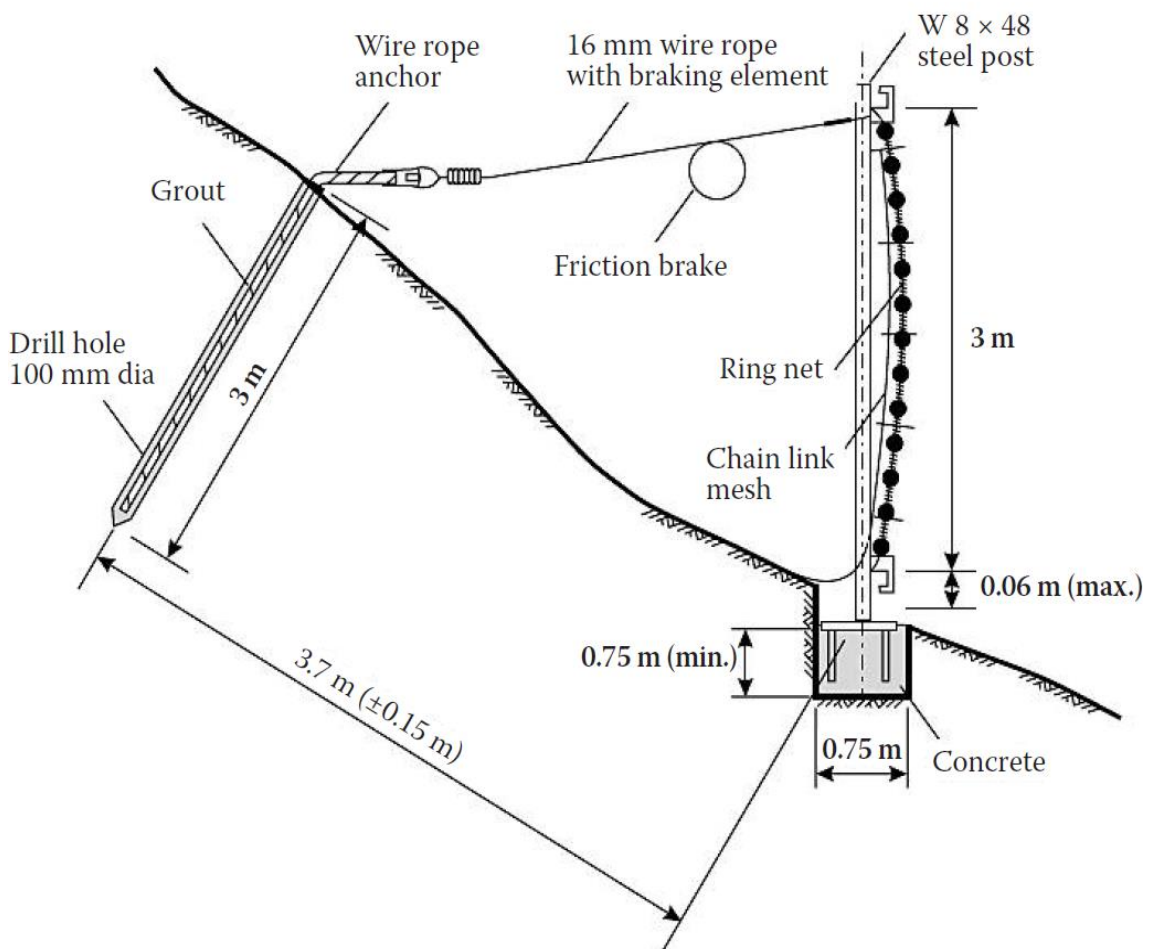


Abbildung 68: Systematische Komponenten eines Steinschlagnetzes [30]

Ein weiterer Vorteil liegt zudem in der variablen Gestaltung der allgemeinen Schutzbaukonstruktionen. Beispielhaft hierfür ist eine flexible Steinschlaggalerie an einem Tunnelportal als Alternative zu einer Betongalerie entlang der exponierten Kantonsstraße ins Val d'Anniviers im Wallis (Schweiz) [39].

Diese Verbauung repräsentiert eine weitere Anwendungsmöglichkeit flexibler Schutzbauwerke auf Basis von Steinschlagnetzen. In diesem Fallbeispiel ersetzt eine auf Stahlträgern auskragende flexible Schutznetzüberdeckung aus einem Ringnetz und weiteren Stahlgeflechten, die allgemeine Schutzwirkung einer Stahlbetongalerie mit einem energetischen Absorptionsvermögen bis zu 2000 kJ.



Abbildung 69: Installiertes Schutznetzsystem, Val d'Anniviers im Wallis/Schweiz [39]





*Abbildung 70: Schutznetzüberdeckung im Bereich des Tunnelportals, Val d'Anniviers im Wallis / Schweiz [39]*

### 5.1.2 Steinschlagschutzdämme

Steinschlagschutzdämme werden in jenen Fällen bevorzugt gebaut, in denen die Hanggeometrie und der zur Verfügung stehende Platz ein solches Bauwerk zulassen. Dammkörper weisen vor allem Vorteile im Hinblick auf die Lebensdauer, Baukosten und je nach angewendeter Konstruktion, auch bezüglich der Energieaufnahmefähigkeit auf [32].

Die Energieabsorption erfolgt bei auftreffenden Steinschlägen durch plastische Deformationen und Überwindung des lokalen Scherwiderstands am Dammkörper. Die erforderliche Dammbreite und -höhe sind von den maßgebenden kinetischen Impaktenergien und Sprunghöhen abhängig.

Bei reinen Erddämmen sind, je nach Qualität des Dammschüttmaterials, maximale Neigungen von 2:3 und 4:5 realistisch. Diese Böschungsneigungen sind jedoch für die Gebrauchstauglichkeit der Konstruktion (im Sinne einer Sicherheit gegen Überrollen des Dammes) sehr ungünstig und erfordern demnach ein größeres Freibord im Ausmaß zumindest des zweifachen Blockdurchmessers [31].

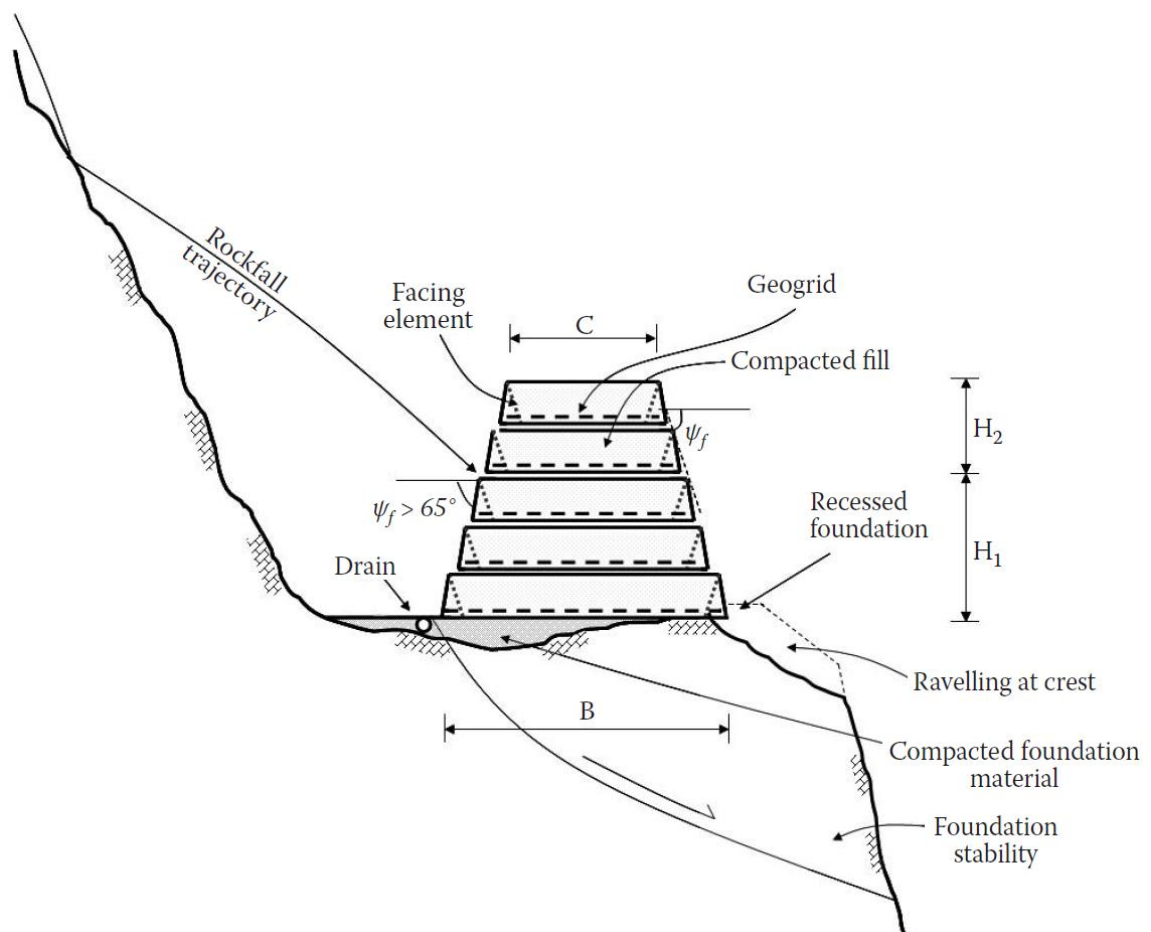


Abbildung 71: Komponenten eines bewehrten Dammkörpers zum Schutz vor Steinschlägen [30]

In vielen Fällen sind aufgrund der nicht ausreichenden Platzverhältnisse im Gefährdungsgebiet nur Dammnegungen möglich, die mit unbewehrten Dammkörpern nicht ausführbar sind um die nötige Standsicherheit zu gewährleisten. Aus diesem Grund bietet die Konstruktion einer bewehrten Erde eine sinnvolle Ausführungsvariante (Abbildung 71). Das Füllmaterial soll nach Möglichkeit einen hohen Reibungswinkel und Lagerungsdichte aufweisen, um einen angemessenen Scherwiderstand beim Stoßprozess zu gewährleisten. Ein grobkörniges Füllmaterial ist daher empfehlenswert (z.B. grober bis feiner Kies).

Ein mit Geokunststoffen bewehrter Dammkörper kann mit steileren Böschungen (z.B. größer  $70^\circ$ ) sowohl berg- als auch talseitig ausgeführt werden, wodurch eine schlanke und platzsparende Konstruktion ermöglicht wird. Dies führt zudem zu einer positiven Sicherheit gegen ein mögliches Überrollen der Steinschlagkörper. Der beim Einschlag aktivierte Dammkörper erreicht nach HOFMANN und MÖLK [31] eine maximale Breite des 5- bis 6-fachen Blockdurchmessers. Unter der Voraussetzung, dass die Geobewehrung die Eigenschaften gemäß ONR 24810 erfüllt, können zudem bedingt durch die größere Querkraftverteilung verhältnismäßig höhere Bemessungsenergien aufgenommen werden. Sind diese Mindestanforderungen an die Geogitter hinsichtlich der Dehnsteifigkeit und Zugfestigkeit nach ONR 24810 eingehalten, kann eine Querkraftverteilung von maximal des 8- bis 9-fachen Blockdurchmessers angesetzt werden [31].

### 5.1.3 Steinschlaggalerien

Steinschlaggalerien finden Anwendung wo ein hohes Sicherheitsniveau bezüglich einer Steinschlaggefährdung zu gewährleisten ist, beispielsweise an stark befahrenen Verkehrsabschnitten oder an Tunnelportalen von Straßenfahrzeugen oder Eisenbahnen. Eine Galerie ist ein Schutzbauwerk, das den zu schützenden Bereich vollflächig, zumeist durch eine Stahlbetonkonstruktion überdeckt. Diese Schutzverbauungen werden besonders an Steilhängen, die nahe oder unmittelbar am Verkehrsweg angrenzen, eingesetzt. Daher liegt die Hauptfunktion bei Steinschlaggalerien dabei, den befahrenen Straßenraum von steil fallenden Blöcken und Steinen von oben herab zu schützen.

Um die Stahlbetonkonstruktion vor direkten Einschlägen durch die Steinschlagkörper abzuschirmen, ist es zwingend notwendig die Betondecke mit geeignetem Dämpfungsmaterial zu überdecken. Hierfür eignen sich beispielsweise Sand- bzw. Kiesfüllungen oder alternative Dämmmaterialien wie Styrofoam, Altreifen oder Schaumglas (Dämpfungssysteme der Geobrug AG bzw. Misapor AG). Letztere verbinden besonders gute

Eigenschaften bezüglich der Energieabsorption und weisen zudem ein geringes Eigengewicht ( $\sim 250 \text{ kg/m}^3$ ) gegenüber konventionellen Korneindeckungen. In Abbildung 72 ist beispielhaft die Simplon-Galerie in Gabi (Schweiz) abgebildet, bei der vergleichbare Randbedingungen in Hinblick auf die Morphologie und Bemessungsenergie wie bei diesem Projekt vorlagen. Zum Schutz der Stahlbetonkonstruktion wurde im Zuge einer Generalsanierung eine Überdeckung aus Schaumglasmodulen (Abbildung 73) eingesetzt. Die Schaumglasschicht wurde im Anschluss von einer sandigen Kiesschicht überdeckt (Abbildung 74).

Eine Steinschlaggalerie zeichnet sich besonders durch den geringen Wartungsaufwand bei auftretenden Steinschlagereignissen aus und gewährleistet somit eine lange Nutzungsdauer. Je nach den projektspezifischen Anforderungen können Galerien im Vergleich zu flexiblen Schutznetz-Barrieren auf teils höhere kinetische Impaktenergien bemessen werden (Abbildung 67). Darüber hinaus bietet lediglich eine Galerielösung, unter den konventionellen Systemen, Schutz vor vertikalen Steinschlägen bei steilen, angrenzenden Felswänden. Die hohen Errichtungskosten sowie die gesetzlichen Verpflichtungen zur verkehrstechnischen Instandhaltung sind jedoch mit einem erheblichen finanziellen Aufwand verbunden, wodurch ein großer Nachteil bei Galerievarianten gegeben ist. Daher liegt bei der Wahl von Galerielösungen ein besonderer Fokus auf der Kosten-Nutzen-Analyse.



Abbildung 72: Steinschlaggalerie in Gabi, Schweiz (Simplon-Galerie) [44]



Abbildung 73: Schaumglass-Dämpfungsmodule der Simplon-Galerie [44]



Abbildung 74: Oberste Überdeckungsschicht der Simplon-Galerie [44]

## 5.2 Projektspezifische Diskussion: Primärer Steinschlagschutz

Der primäre Steinschlagschutz umfasst all jene Sicherungsmaßnahmen, die im Ablösebereich zur Verringerung der Steinschlagprozesse beitragen. Bei diesen technischen Sicherungsmaßnahmen unterscheidet man vor allem zwischen:

- Vernagelungen: Gezielter Einsatz von geotechnischen Nägeln zur statischen Sicherung gefährdeter Blöcke und Felspartien
- Vernetzungssysteme: An der Felswand gespannte Netzvorhänge halten gelöste Felssegmente zurück und unterbinden somit eine dynamische Steinschlagentwicklung

Der Einsatz dieser Schutzmaßnahmen muss jedoch einer projektspezifischen Beurteilung unterzogen werden. Aufgrund der flächendeckend stark ausgeprägten Zerklüftung ist die potenzielle Ablösefläche für Steinschlagereignisse mit rund über 50.000 m<sup>2</sup> anzunehmen. Aus wirtschaftlicher Sicht ist bei solchen Dimensionen und unter den sonstigen, gegenständlichen Randbedingungen der Einsatz von primären Steinschlagschutzmaßnahmen nicht vertretbar. Darüber hinaus besteht die Gefahr, dass im Zuge der Verankerung der Fangnetze, weitere Auflockerungen in der Felswand geschaffen werden, wodurch der generelle Ablöseprozess weiter gefördert wird. Unter diesen Voraussetzungen ist die Anwendung von anliegenden Vernetzungssystemen im Allgemeinen nicht zielführend.

In einzelnen Fällen, insbesondere bei gefährdeten großvolumigen Felspartien, kann jedoch durch gezielte Vernagelungen das Ablöserisiko minimiert werden. Gefährdete Felspartien mit einem Volumen von mehreren Kubikmetern, erzeugen bei diesen Fallhöhen dynamische Belastungen, die die allgemeinen Grenzzustände der Tragfähigkeit deutlich überschreiten und so zu einem Totalschaden der Schutzbauten führen würden. Deshalb kann es hierbei vereinzelt angemessen sein, durch weitere geotechnische Analysen, eine beschränkte Anzahl von besonders kritisch eingestuften Felsblöcken statisch zu sichern, um das Spektrum der kritischen Einwirkungen im Straßenbereich nach oben hin einzuschränken. Dadurch lässt sich eine wirtschaftliche Auslegung der Schutzbauten im Straßenbereich realisieren. Die Auswahl dieser kritischen Felspartien unterliegt einer geologisch-fachspezifischen Bewertung im Zuge der weiteren Detailplanung.

### 5.3 Steinschlagschutznetz im Bereich der Zwischenstufe

Die Steinschlagsimulationen zur Untersuchung der Sturztrajektorien (4.4.2) bestätigen den Einfluss der morphologischen Rinnenstruktur bezüglich des Sturzverlaufes der Steinschlagkörper im zentralen Wandbereich. Der Rinneneinschnitt führt zu einer Zusammenführung bzw. Bündelung der Sturztrajektorien in diesem Abschnitt der Felswand. Die Installation von Steinschlagschutznetzen im Bereich der Rinne, auf Höhe der Zwischenstufe, könnte somit im Allgemeinen eine plausible Sicherungsmaßnahme darstellen, um einen großen Teil der Blöcke und Steine bereits oberhalb des Straßenniveaus abzufangen. Dadurch lässt sich die statistische Bemessungsenergie im Straßenbereich in etwa um ein Drittel reduzieren (siehe 4.4.3). Durch das Abfangen von Steinschlagkörpern aus Ablösebereichen oberhalb der Rinne könnte zudem auch die Häufigkeit der Einschläge im Straßenbereich und die Sprungweiten im Allgemeinen verringert werden. Eine ergänzende Sicherung bzw. gezielte Energiedämpfung der durchquerenden Blöcke und Steine, rund 200 m oberhalb des Straßenniveaus, bringt diesbezüglich Vorteile für die Dimensionierung der Schutzbauten, wodurch sich gewisse wirtschaftliche Vorzüge für das Projekt ergeben.

Andererseits gehen jedoch auch entscheidende Nachteile mit dieser Teilsicherungsmaßnahme einher: Aufgrund der topographischen Gegebenheiten ist es beispielsweise nicht möglich die Schutznetze vom Straßenniveau aus zu überwachen. Die fehlende Einsehbarkeit der Netze erfordert somit zusätzliche Überwachungsmaßnahmen, möglicherweise in Form von einer Kamerastation in Verbindung mit Photovoltaikanlage oder durch eine regelmäßig durchgeführte Befliegung. Die Schutznetze müssen des Weiteren situativ bzw. in regelmäßigen Abständen beräumt werden. Im Falle eines größeren Steinschlagereignisses ist es notwendig diese zu sanieren bzw. auszutauschen um die Schutzfunktion weiter gewährleisten zu können. Diese notwendigen Sanierungsmaßnahmen können aufgrund der fehlenden Zugänglichkeit über das Gelände, nur über den Luftweg erfolgen, wodurch zusätzliche Hubschraubereinsätze anfallen die mit erheblichen Kosten verbunden sind. Der Arbeiterschutz im Zuge der Errichtung und bei Wartungseinsätzen stellt einen weiteren kritischen Bewertungsaspekt dar. Unter Einbeziehung dieser Randbedingungen, ist die Schutzmaßnahme im Rinneneinschnitt mit den im Wesentlichen genannten Vor- als auch Nachteilen verbunden und dessen Ausführung unterliegt dem betroffenen Entscheidungsorgan.

#### **5.4 Schutzanforderungen auf Basis der vorliegenden Randbedingungen**

Die Berechnungsergebnisse der Steinschlagsimulationen zeigen, dass für die Sicherung der Landesstraße L127 wichtige Kriterien für die Steinschlagschutzbauten erfüllt sein müssen. Die maßgebende Anforderung basiert auf dem Faktum, dass die Steinschlagkörper den gefährdeten Straßenabschnitt aufgrund der steilen, hohen und knapp angrenzenden Felswand sowohl rollend und springend als auch annähernd vertikal fallend (bis zu 80° zur Horizontalen) erreichen.

Daher ist es notwendig die Straße nicht nur hinsichtlich seitlicher Einschläge zu schützen, sondern es gilt die gesamte Straßenfläche auch von oben, aufgrund der nahezu senkrechten Falltrajektorien zu überdecken. Da konventionellen Steinschlagschutzsysteme (im Sinne von Schutznetzen und -dämmen) zumeist auf eine seitliche Protektion ausgelegt sind, gilt es hierbei für dieses Projekt angepasste Alternativen zu entwickeln. Dazu wird es erforderlich sein, bestehende Schutzsysteme zu einer Sonderlösung zu adaptieren bzw. modifizieren, um für dieses Projekt ein sicherheitstechnisches und wirtschaftlich zweckmäßiges Gesamtkonzept zu erstellen.

Die hohen Aufprallgeschwindigkeiten der Steinschläge im Straßenbereich (mit einer Fallneigung von bis zu 80°) stellen wie eingangs erwähnt eine der kritischen Randbedingungen für das Projekt dar. Im ungünstigsten Fall (bei Ablösungen aus den oberen Abschnitten) werden Fallgeschwindigkeiten von bis zu 73 m/s (rund 263 km/h) beim Aufprall im Bereich der Straße erreicht. Die heutigen, angebotenen dynamischen Schutzverbauungen stoßen bei solch hohen Geschwindigkeiten hinsichtlich der Systemträgheit an ihre Grenzen. Insbesondere bei einer einfachen Schutznetzlage besteht aufgrund der geschossartigen Steinschläge im ungünstigsten Fall ein Durchstanzrisiko. Es gilt daher ein mögliches lokales Durchschlagen des Netzverbandes, in den nachfolgenden Planungsphasen im Detail mit den Schutznetzherstellern zu diskutieren bzw. zu untersuchen. Es kann diesbezüglich empfohlen werden die entsprechenden Netzsysteme in einem Praxisversuch unter diesen Belastungen zu testen oder mit Hilfe von FE-Berechnungen in den folgenden Projektphasen zu untersuchen.

Die Fangnetze sollen in allen nachfolgend beschriebenen Konzepten, mehrlagig und in Maschenweite abgestuft ausgeführt werden. Neben dem Ringnetz ist ein feineres Zweit- und Drittgeflecht anzubringen. So kann berücksichtigt werden, dass kleinere Steine und Blöcke nicht durch die größeren Ringnetze durchfallen können und dass ein mögliches Durchschlagen der Fangnetze durch den vergrößerten Widerstand ggf. unterbunden oder reduziert wird.



Ein Lösungsansatz bezüglich einer eventuellen Durchstanz-Problematik kann auch darin bestehen, eine Schaumglasschotterschicht auf die Schutznetze anzubringen, um die Gefährdung des Durchschlagens zu minimieren bzw. zu verhindern. Eine Abdeckung mittels Glasschaumbaustoffen (in Geotextilsäcken, Bigbags) reduziert aufgrund der hohen Energieabsorptionsfähigkeit und einer flächenmäßig vergrößerten Verteilung der Einschlagskraft, das lokale Versagensrisiko des Netzverbandes erheblich. Diese mögliche Präventionsmaßnahme ist ebenfalls mit den Herstellern der Steinschlagnetze im Detail zu diskutieren.

Eine weitere pragmatische Alternative liegt in der Ausführung einer doppelten Vernetzung, bei der die Fangnetze in gewissem Abstand parallel über den Straßenbereich aufgespannt werden, so dass im Versagensfall des oberen Netzes das untere Fangnetz weiterhin Schutz bietet. Die konzipierten Schutzmaßnahmen beinhalten daher besonders im Hinblick auf flexible Galerieüberdeckungen (5.6.4) Anpassungen im Sinne der soeben geäußerten Überlegungen.

### 5.5 Kurzbeschreibung der Schutzmaßnahmen

Für die vorliegende Steinschlagproblematik wurden entsprechend der gegebenen Randbedingungen angepasste Schutzkonzepte zur Befahrung der Landstraße entwickelt. Die Schutzmaßnahmen werden im Folgenden kurz zur Übersicht beschrieben:

- Dammkörper mit aufgesetztem Schutznetz: Ein bergseitig, bewehrter Dammkörper, gestützt durch eine Stahlbeton-Winkelstützmauer, schützt den Straßenraum vor seitlichen springenden oder rollenden Einschlägen. Ein auf die Stützmauer aufgesetztes Steinschlagnetz bietet Schutz vor vertikalen Einschlägen auf die Fahrbahn.
- Straßenüberdeckendes Schutznetz auf abgespannten Stahlträgern: Über eine aufgelöste Trägerrippenkonstruktion aus Stahl, die durch Felsverankerungen abgespannt wird, ist ein Steinschlagnetz aufgespannt. Die geneigte und auskragende Stützkonstruktion gewährleistet Schutz vor seitlichen und vertikalen Impact.
- Dreigelenksbogen mit aufgesetztem Schutznetz/Schaumglasüberdeckung: Im Abstand versetzte, straßenüberdeckende Dreigelenksbogen bilden die Tragkonstruktion für ein aufgespanntes Schutznetz, das den gesamten Straßenraum aus

den betroffenen Richtungen schützt. Aufgrund einer möglichen Problematik des Durchstanzens (Netze) kann alternativ eine Schaumglasüberdeckung auf das Schutznetz angebracht werden.

- Straßenüberdeckendes Schutznetz auf abgespannten Pendelstützen: Zwei parallele Pendelstützreihen links und rechts der Landesstraße bilden die Tragkonstruktion für das straßenüberdeckende, bergseitige Fangnetz. Die Stahlpendelstützen werden dabei über Verankerungen inkl. Bremsen, in Straßenrichtung und quer dazu abgespannt.
- Steinschlaggalerie bzw. Tunnellösung: Da beide Varianten von ihrer Schutzwirkung her keine signifikanten Unterschiede aufweisen können beide Maßnahmen in derselben Kategorie betrachtet werden. Eine massive straßenumhüllende Stahlbetonkonstruktion mit zusätzlicher Überdeckungsschicht (Dämpfungsfunktion) bietet Schutz vor Steinschlägen. Aufgrund der hohen Lasteinleitung in den Untergrund durch den Konstruktionsaufbau sind möglicherweise zusätzliche (Tiefen-) Gründungsmaßnahmen erforderlich.
- Verlegung der Straße mit bergseitigem Schutznetz: Eine Umlegung der Straßenführung auf die orographisch linke Talseite, um die Straße aus dem Haupteinschlagsbereich zu verlagern. Die Straße wird dabei zusätzlich beidseitig durch Schutznetze abgeschildert.

## 5.6 Variantenstudie: Detailbeschreibung der Schutzkonzepte

### 5.6.1 Allgemeine Vorbemerkungen zu den Schutzkonzepten

**Anmerkung:** Es wird vermerkt, dass aufgrund des frühen Planungsstadiums dieses Projektes einige Angaben und Eigenschaften zu den Schutzverbauungen nur qualitativ beschrieben werden können. Besonders monetäre und zeitliche Beurteilungen können nur auf Grundlage vorsichtiger und konservativer Annahmen grob abgeschätzt werden. Abweichungen der genannten Einschätzungen sind in den kommenden Planungsphasen nicht ausgeschlossen. Die in der Folge beschriebenen Schutzvarianten werden unter Betrachtung der nachfolgenden Aspekte erläutert und qualitativ bewertet:

- Allgemeines Konzept:

Zusammensetzung des konstruktiv-statischen Gesamtkonzeptes sowie die groben Dimensionen der Schutzbauten. Teilvarianten der Schutzverbauungen werden ebenfalls als einspurige Gegenverkehrsanlagen vorgeschlagen. Aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens ist hierbei die Befahrung auf Sicht denkbar oder alternativ mit einer situativ gesteuerten Ampelanlage lösbar.

- Schutzwirkung und Vulnerabilität der Verbauung:

Erläuterungen zur Funktion der Konstruktionselemente sowie der allgemeinen Schutzwirkung vor Steinschlägen. Anmerkungen zu Restrisiken, die aufgrund einer gewissen verbleibenden Vulnerabilität der Schutzverbauung nicht ausgeschlossen werden können.

- Bauzeit (Arbeiterschutz):

Die Abschätzung der Bauzeit wird qualitativ unterteilt in kurz, mäßig und lang. Die Bauzeit ist in Anbetracht des Arbeiterschutzes ein wichtiger Bewertungsaspekt, da bauausführendes Personal in diesem Zeitraum sich permanent im Gefährdungsgebiet aufhält. Für die Ausführungsdauer der jeweiligen Schutzverbauung kommt es zu einer zeitweiligen Sperrung der L127. Aufgrund fehlender alternativer Zufahrtsmöglichkeiten und der sehr beengten Platzverhältnisse am Gefahrenabschnitt (im Hinblick auf eine Umfahrung der Baustelle) ist die Verkürzung der Bauzeit als essentieller Vorteil für das Gesamtprojekt zu sehen.

- Herstellungskosten und Wartungsaufwand:

Die anfallenden Gesamtkosten werden ebenfalls wie bei der Bauzeit durch drei qualitative Einteilungen unterschieden: niedrig, mäßig und hoch. Der Wartungs- und Sanierungsbedarf durch Steinschläge sowie der gesetzlich vorgeschriebene Überwachungsaufwand stellen zusätzliche finanzielle Belastungen über die Nutzungsdauer dar und sollen ebenfalls nachfolgend kurz verbal bewertet werden.

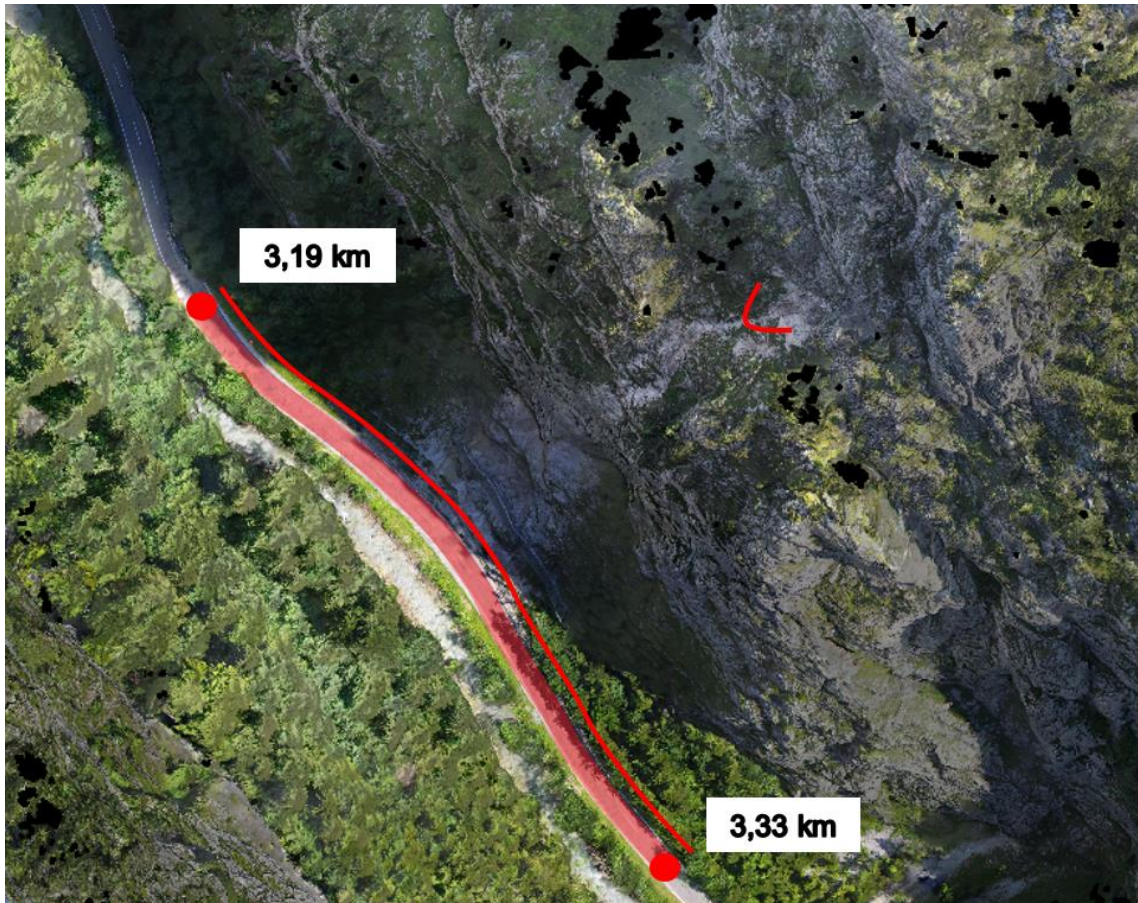


Abbildung 75: Lage und empfohlene Mindestlänge der Schutzverbauung im zentralen Wandbereich im DOM

Die in der Folge beschriebenen Schutzverbauungen beziehen sich hinsichtlich der Lage und Länge auf den in Abbildung 75 dargestellten rund 140 m langen Straßenabschnitt (von ca. Straßenkilometer 3,19 bis 3,33). Dieser Abschnitt deckt den Haupteinschlagsbereich der zentralen Felswand ab und sollte auf Grundlage der dargelegten Steinschlagsimulation als Mindestlänge ausgeführt werden (vgl. Abbildung 60, Kapitel 4.4.5). Da ein großflächig stark zerklüftetes, potenzielles Ablösegebiet vorliegt, wäre zur Reduzierung des Gefährdungspotenzials für die Nutzer der Landesstraße zweckmäßig, die Schutzverbauung mit einer Länge von 320 m ab etwa Straßenkilometer 3,11 bis 3,43

auszuführen (siehe Kapitel 4.4.5). Da an den, zur zentralen Felswand seitlich angrenzenden Straßenabschnitten bis dato keine Steinschlagereignisse dokumentiert sind, ist es aus ökonomischer Sicht kaum vertretbar die Schutzverbauung auf dieser Länge auszuführen. Die Entscheidung hierfür liegt jedoch beim Straßenbetreiber.

### 5.6.2 Dammkörper mit aufgesetztem Steinschlagnetz

#### Aufbau / Konstruktion:

Die Straße wird bei diesem Konzept durch einen Dammkörper in Kombination mit einem aufgesetzten Fangnetz geschützt und kann als einspurige oder zweispurige Variante ausgeführt werden. Eine Stahlbeton-Winkelstützmauer verleiht dabei dem System die nötige statische Standsicherheit im Gebrauchszustand und im Grenzzustand beim dynamischen Impakt. Die Stützmauer kann im Sohlbereich zusätzlich nach geotechnischen Erfordernissen auf Kleinbohrpfählen (Mikropfähle) fundiert werden. Die Ausführung der Stützmauer erfolgt in Ortbetonbauweise, da bei einer Fertigteillösung die Ausführung der Querkraftverbindungen sowie der Transport aufgrund der Abmessungen und des hohen Gewichts als problematisch einzustufen ist.

Der Schutzdamm kann konventionell unbewehrt oder durch den Einbau von geeigneten Geogitter als bewehrte Erde ausgeführt werden. Eine lagenweise eingebaute Geogitterbewehrung dient zur effizienteren Energieabsorption durch eine breitere Verteilung der dynamischen Stoßkraft in der Dammachse. Es wird somit eine größere Dammbreite beim Stoßvorgang aktiviert, wodurch die aus dem Impakt resultierende Belastung auf eine signifikant größere Fläche abgeleitet wird. Werden die nach ONR 24810 [27] vorgeschriebenen Mindestanforderungen der Bewehrung hinsichtlich der Zugfestigkeiten und Dehnsteifigkeiten eingehalten, kann die statische Ersatzlast auf eine maximale Breite mit dem 8- bis 9-fachen Bemessungsblockdurchmessers in Richtung der Dammachse angesetzt werden. Dahingehend kann die Bemessung der Winkelstützmauer wirtschaftlicher gestaltet werden. Bei einer unbewehrten Dammkonstruktion wird hingegen eine Lastausbreitung des 5- bis 6-fachen des Bemessungsblockdurchmessers erreicht [31]. Es wird jedoch empfohlen das obere Drittel des Dammkörpers in jedem Fall mit einer Geobewehrung auszuführen, um die Auskragung der Stützmauer durch eine breitere Kraftverteilung bestmöglich zu entlasten und somit das kritische Biegemoment im Sohlbereich zu reduzieren. Ein vollständig bewehrter Dammkörper kann zudem durch eine steilere bergseitige Dammneigung zu einer Sicherheit hinsichtlich des Überrollens beitragen. Als Dammfüllung ist grobkörniges Material zu empfehlen (z.B. sandiger Kies) um einen möglichst hohen Reibungswinkel ( $> 40^\circ$ ) sowie Restscherwinkel zu gewährleisten. Das Füllmaterial kann größtenteils aus den umliegenden Schutthalden am Fuß der Steilhänge entnommen werden. Die Schutzkonzepte (bewehrter bzw. unbewehrter Dammkörper) mit den vorerst groben geometrischen Abmessungen der Konstruktion sind übersichtlich in Abbildung 76 und Abbildung 77 für die einspurige Ausführung dargestellt.

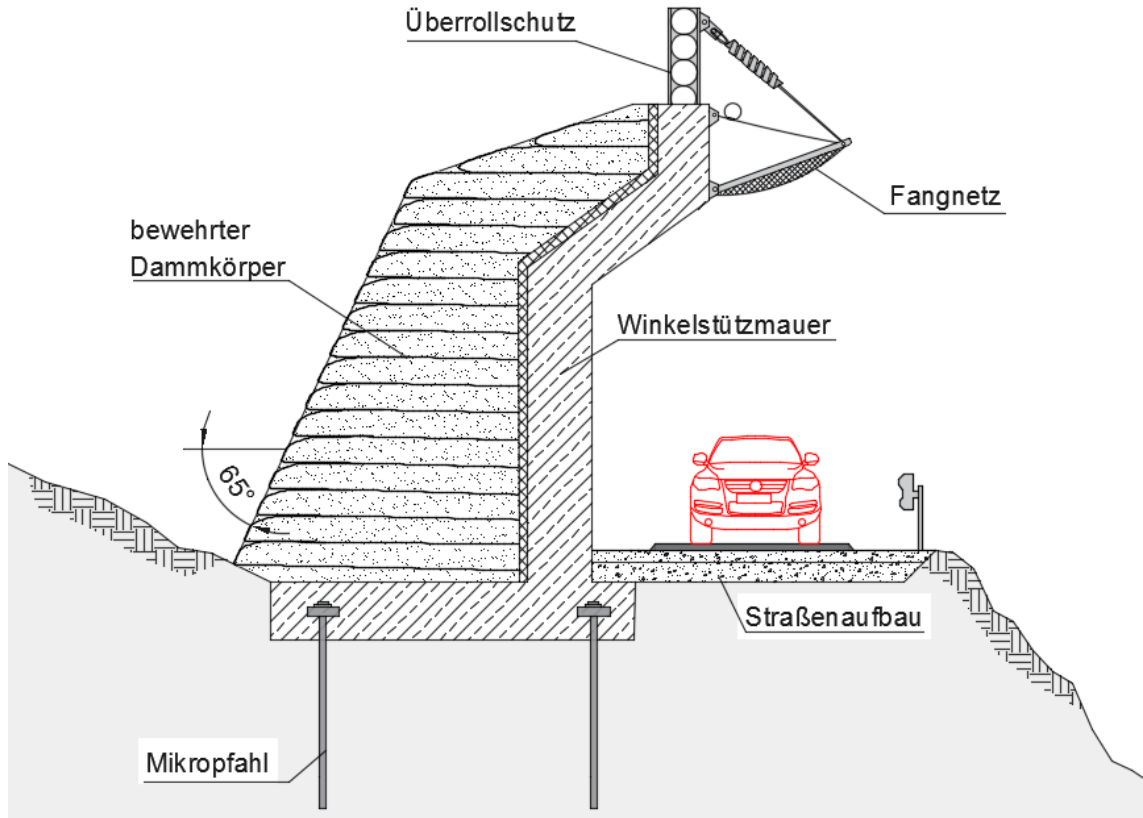


Abbildung 76: Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (einspurige Variante)

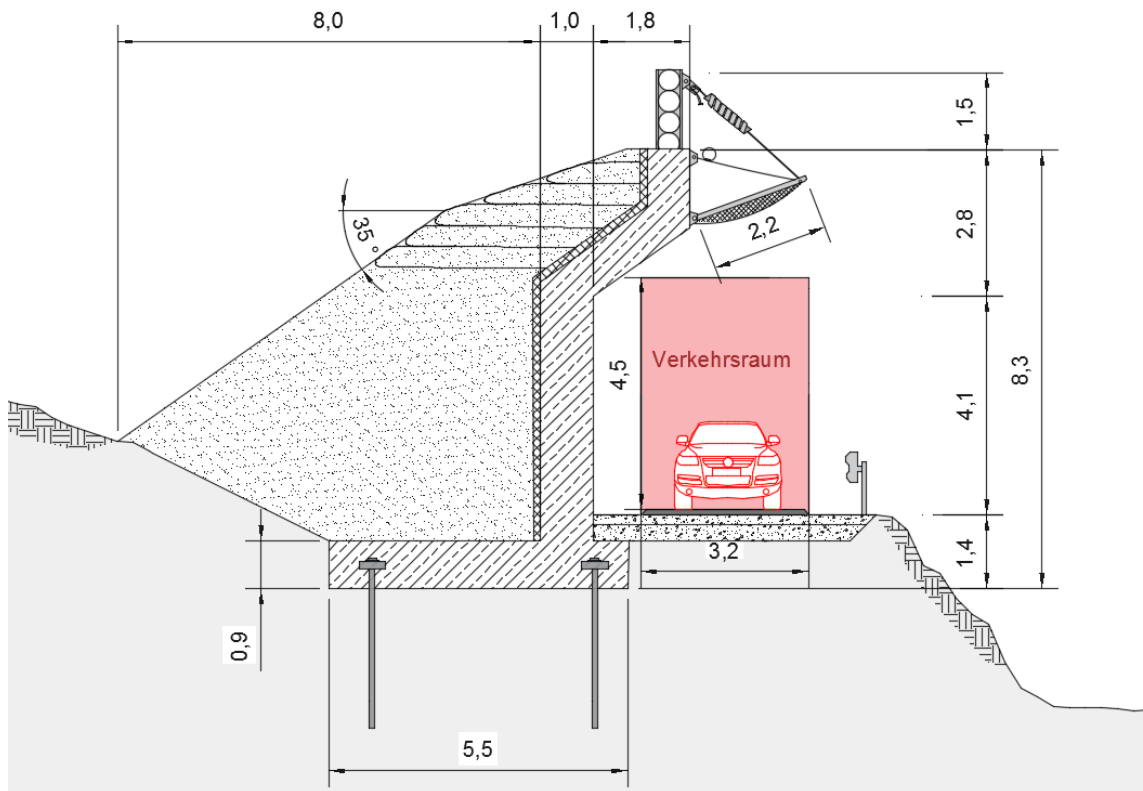


Abbildung 77: Dimensionen - Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (in Metern)

Die Stahlbetonstützwand wird mit einer schrägen Auskragung ausgeführt, um zumindest einen Teil der zu schützenden Straßenbreite auch durch die Dammkonstruktion hinsichtlich steil fallender Steinschlagkörper von oben zu schützen. Am oberen Ende der Stützwand befindet sich zudem eine aufgesetzte Holzbalkenwand, um ggf. überrollende Steinschlagkörper abzufangen und dient somit als Überrollschutz. Den Überrollschutz am Ende der Auskragung bilden Rundhölzer, die zwischen verschraubten I-Träger (IPE-Profil), gelagert sind. Diese Stahlstützen bieten zudem eine wichtige Funktion zur Abspannung der Fangnetzkonstruktion.

Das Steinschlagnetz wird dabei über die restliche zu schützende Fahrbahnbreite gespannt und ist auf einem gelenkig gelagerten Stahlprofil befestigt, um beim Einschlag die Konstruktion nicht mit dem auftretenden Biegemoment zu belasten. Angebrachte Dehnungsfedern und zusätzlich abgespannte Bremsselemente am Überrollschutz gewährleisten neben der Deformation des Netzes die nötige Energieabsorption im Ereignisfall. Die Länge des auskragenden Netzes beträgt bei der einspurigen Variante ca. 2,2 m, bei der zweispurigen rund 4 m. Die Neigung des Steinschlagnetzes beträgt zwischen 20° und 30° zur Horizontalen. Dadurch werden die maßgebenden hochenergetischen Steinschläge mit annähernd senkrechtem Einschlagswinkel zur Netzebene abgefangen (höchster Wirkungsgrad bezüglich der Energieabsorption). Das Schutznetz wird mehrlagig mit einer abgestuften Maschenweite ausgeführt um bestmöglich Schutz auch gegen kleine Steine zu gewährleisten.

Dieses Konzept kann in zwei Varianten bezüglich der Straßenbreite ausgeführt werden. Zum einen kann dieser Aufbau als einspurige Gegenverkehrsstrecke ausgeführt werden die möglicherweise auf Sicht befahren oder durch eine Ampelsteuerung geregelt wird (Abbildung 76). Ebenfalls kann eine zweispurige Streckenführung ausgeführt werden (Abbildung 78), wodurch jedoch die Auskragungslänge des Fangnetzes in etwa verdoppelt wird. Bei einer vergrößerten Aufprallfläche ist dahingehend von einem größeren Wartungsaufwand auszugehen. Mit größeren Auskragungslänge des Steinschlagnetzes ist des Weiteren die Ausführung einer leistungsfähigen Abspannung zunehmend schwieriger zu realisieren.



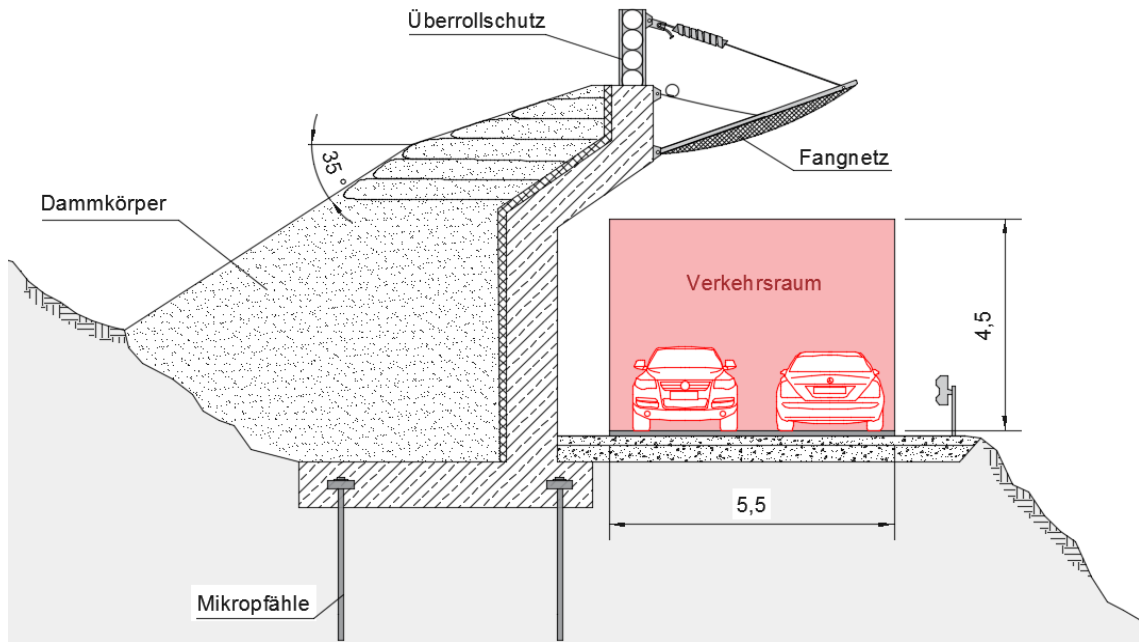


Abbildung 78: Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (zweispurige Variante)

#### Schutzfunktion / Restrisiko:

Durch die Kombination zweier Schutzsysteme werden die Eigenschaften beider Systeme in ein gemeinsames Konzept zusammengeführt. Der Dammkörper stellt eine massive seitliche Sicherung bezüglich rollender, springender und fallender Einschlagskörper dar. Durch die schräge Auskragung der Stützmauer mit dem darüber liegenden Dammmaterial kann auch eine gewisse überdeckende Schutzfunktion damit sichergestellt werden, die zudem vorteilhaft die Auskragungslänge des darauf installierten Fangnetzes verringert. Die Schutznetzüberdeckung dient dazu, die gesamte Straßenbreite von steil fallenden Körpern und jenen die den Damm überspringen zu schützen. Die allgemeine Energieaufnahmefähigkeit des Fangnetzes unter diesen Lagerungsbedingungen ist jedoch in weiteren Planungsstadien im Detail zu untersuchen (ggf. ist es nötig eine zusätzliche bergseitige Abspannung anzubringen). Desweiteren sei erwähnt, dass im Falle eines Bemessungsereignisses die Auslenkung des Schutznetzes einen Teil des Verkehrsraumes überschneidet. Dieses Restrisiko lässt sich bei allen beschriebenen Teilvarianten nicht verhindern ohne die gesamte Konstruktionshöhe deutlich zu vergrößern. Daher soll das aufgespannte Netzgewebe einen maximalen Energieeintrag von 2000 bis 3000 kJ aufweisen um die Auslenkung in Straßenrichtung zu verringern. Ein zusätzliches Risikoszenario liegt in der Bildung von Eiszapfen am auskragenden Fangnetz in den Wintermonaten, was jedoch bei einer flexiblen überdeckenden Netzkonstruktion nicht zu verhindern ist.

### Bauzeit / Arbeiterschutz:

Aufgrund des großen Stahlbetonquerschnitts, der in Ortbetonbauweise fertiggestellt werden soll, ist eine im Allgemeinen längere Bauzeit für dieses Konzept anzusetzen. Die ausführenden Arbeiter sind damit über einen verhältnismäßig langen Zeitraum im akuten Gefährdungsgebiet, wodurch besonders Augenmerk auf den Arbeiterschutz im Zuge dieses Konzeptes gelegt werden muss. Eventuell können mobile Überdeckungskonstruktionen aus Stahlplatten oder –gittern angewendet werden. Für den Arbeiterschutz sollte in weiteren Planungsphasen ein angemessenes Konzept ausgearbeitet werden

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Der Wartungsaufwand betrifft vordergründig die aufgesetzten Steinschlagschutznetze. Im Ereignisfall müssen die Fangnetze lokal ersetzt oder gewartet werden. Aufgrund der zu erwarteten häufigen kleinvolumigen Steinschläge, muss das Netz ggf. in gewissen Intervallen beräumt und gesäubert werden. Die Herstellungskosten sind aufgrund der großen Stahlbetonkubatur in Ortbetonbauweise mit einem hohen Bewehrungsgrad als mäßig bis hoch einzuordnen. Der gesetzliche Überwachungsaufwand umfasst im Allgemeinen Kontrollbegehungen und erfordert eine regelmäßige Begutachtung der bergseitigen Dammböschung.

#### 5.6.4 Schutznetz auf Stahlkonstruktion

Im Nachfolgenden werden drei Maßnahmenvarianten im Sinne einer flexiblen Schutznetzlösung präsentiert. Das generelle Konzept basiert auf einer Schutznetzüberdeckung über die gesamte Straßenfläche, die auf einer Stahlkonstruktion angebracht ist. Die Varianten unterscheiden sich dabei hauptsächlich in Hinblick auf die Gestaltung der Stahl-Tragkonstruktion, wobei die Varianten nach dem Prinzip einer überdeckenden Stützrippenkonstruktion aufgebaut sind.

##### 5.6.4.1 Schutznetzüberdeckung auf auskragenden Stahlträgern

###### Aufbau / Konstruktion:

Diese Variante umfasst das Schutzkonzept eines bergseitig straßenüberdeckenden Steinschlagnetzes (Abbildung 79). Das Schutznetz wird auf gelenkig gelagerten, über die Straße auskragenden Stahlträgern (z.B. als I-Profil) angebracht. Die vorgefertigten Stahlträger werden auf einer Stahlbetonfundierung gelagert, die bspw. durch Baggerschlitze ausgeführt werden kann. Die vorstehenden Stahlelemente, mit denen das Netz vorgehängt wird, werden als verschraubte I-Profile ausgeführt, die am Hauptträger befestigt sind. Für den Abstand der Stahlträger in Straßenrichtung sind in etwa 6 bis 8 m angedacht. Gehalten wird die gelenkige Stützrippenkonstruktion über verankerte Abspannungen am unteren Bergfuß und über eine Verankerung seitlich des bergseitigen Straßenrandes. Die Abspannungen werden mit entsprechenden Bremsselementen ausgestattet, welche auf die dynamische Belastung im Bemessungsfall ausgelegt sind und auch bei konventionellen Steinschlagschutznetzen zum Einsatz kommen.

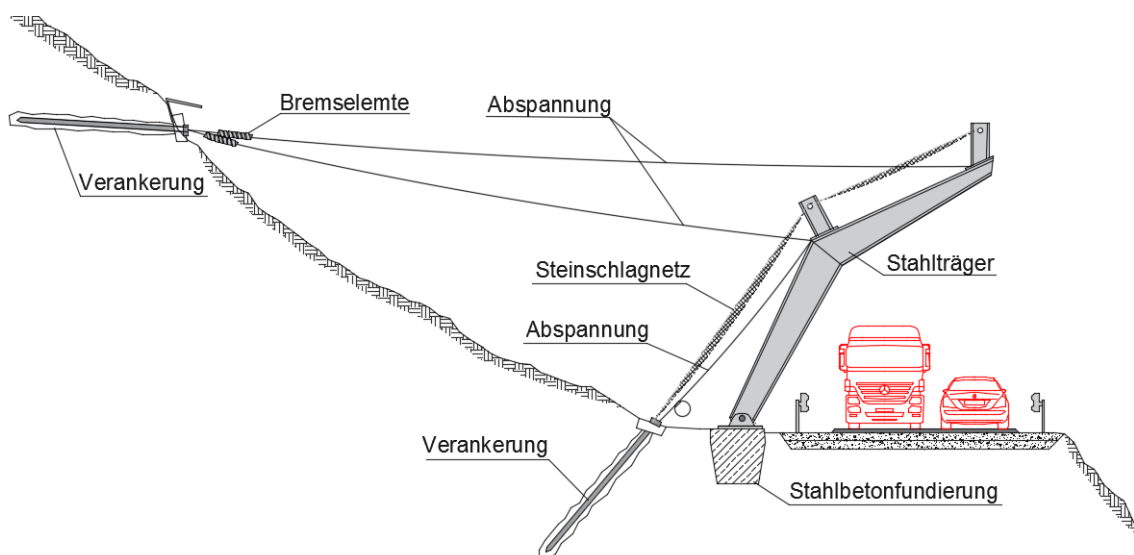


Abbildung 79: Konzept - Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz (zweispurige Ausführung)

Jeder Stahlträger dieser Stützrippenkonstruktion wird dabei doppelt durch jeweils zwei Verankerungspunkte, im Bereich des Bergfußes abgespannt. Am Ankerkopf soll ein flächiges und überdeckendes Stahlblech (z.B. als Winkelprofil) angebracht werden, um hinsichtlich möglicher Einschläge provisorischen Schutz zu gewährleisten. Eine zusätzlich bergseitige Verankerung am Straßenrand dient sowohl zur Abspannung des seitlichen Fangnetzes, als auch als Stahlseil-Rückhaltelager für den Fangnetzträger. In Abbildung 80 ist der schematische Aufbau der Schutzverbauung in der Draufsicht dargestellt. Die Trägerrippen werden dabei über zusätzliche Abspannungen in Straßenrichtung gesichert, um der Konstruktion in Richtung der Straßenachse die nötige Stabilität im Ereignisfall zu verleihen. Die schematische, doppelte Abspannung über jeweils zwei Verankerungspunkte pro Träger ist ebenfalls in dieser Ansicht ersichtlich.

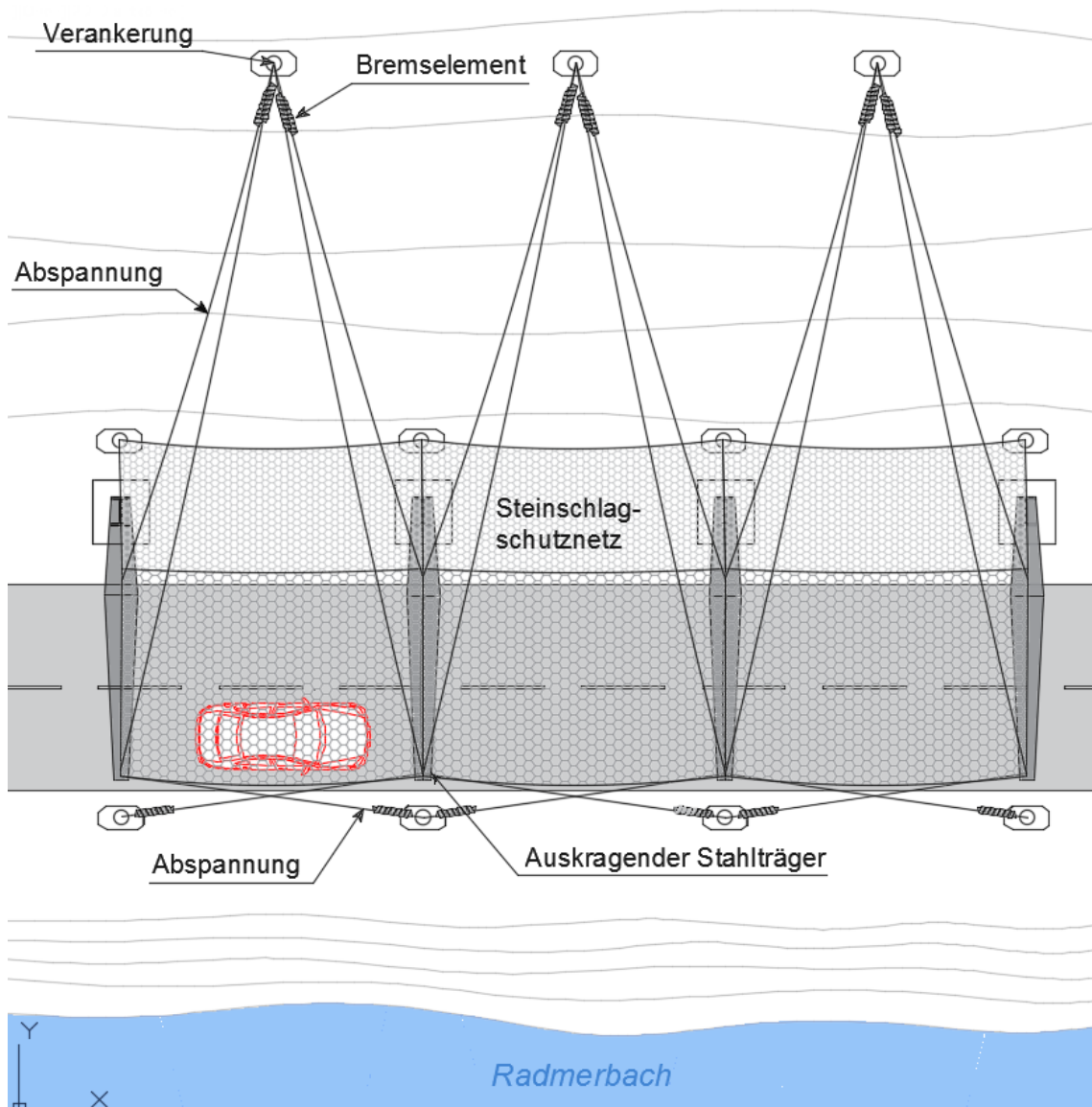


Abbildung 80: Schematische Draufsicht des straßenüberdeckenden Steinschlagnetzes

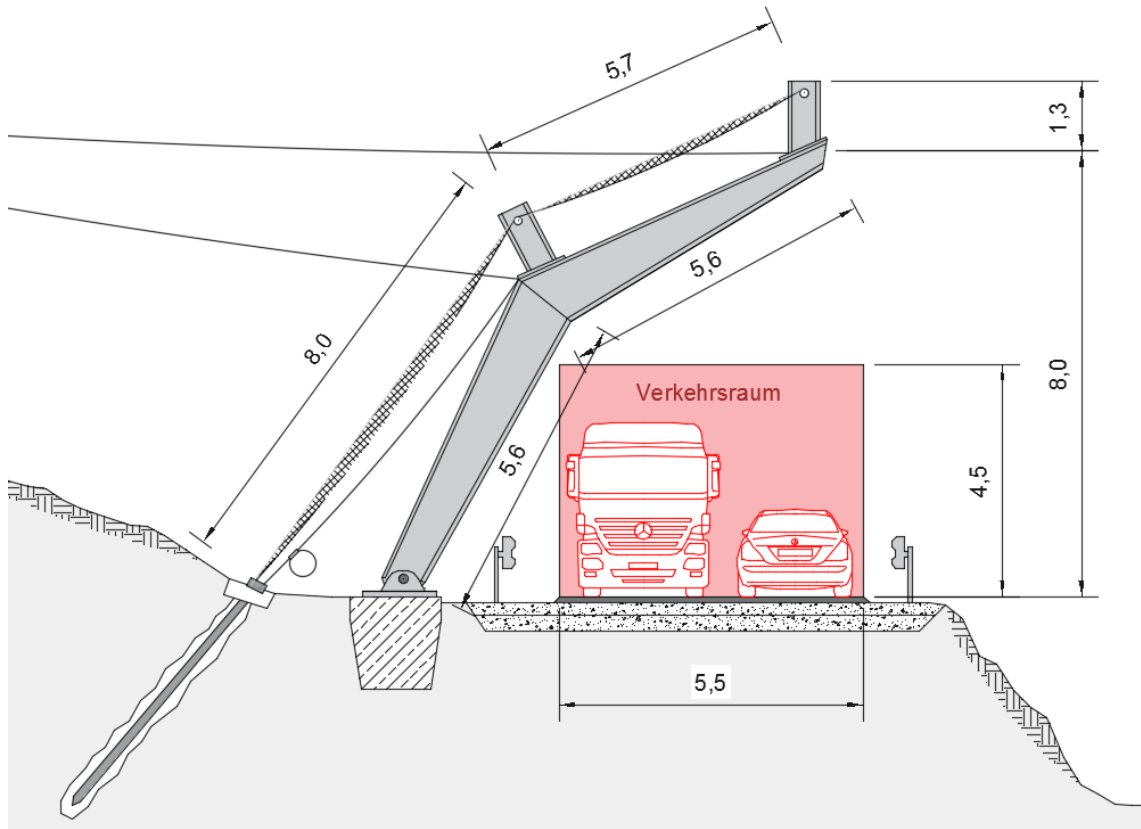


Abbildung 81: Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz - Grobe Dimensionen (in Metern)

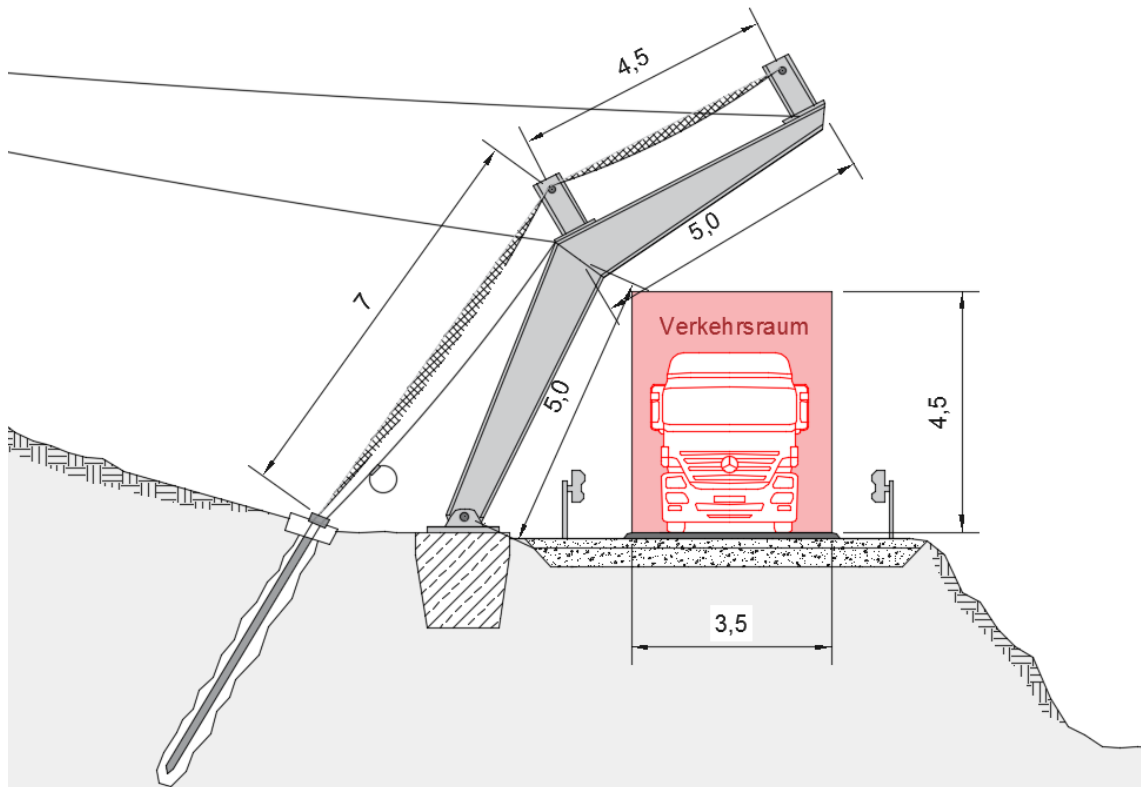


Abbildung 82: Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz (einspurige Ausführung)

Dieses Schutzkonzept ist ebenfalls als einspurige Gegenverkehrsanlage ausführbar und stellt eine alternative Ausführung dar (Abbildung 82). Dadurch können die Dimensionen des Stahlträgers und der Materialbedarf in Anbetracht der Schutznetze wirtschaftlich optimiert werden.

### Schutzfunktion / Restrisiko:

Die Schutzfunktion wird bei diesem Konzept vollständig vom Fangnetz übernommen. Es bietet aufgrund der großflächigen Überspannung Schutz vor seitlichen als auch steil fallenden Einschlägen. Das Steinschlagnetz soll auf ein Energieaufnahmevermögen von 2000 bis 3000 kJ ausgelegt werden, um durch die Überdimensionierung die Auslenkung des Netzes in Straßenrichtung beim Bemessungsereignis zu reduzieren. Das Schutznetz ist durch vorstehenden Stahlelemente vor dem Stahlträger vorgehängt. Dadurch wird der Stahlträger bis zu einem gewissen Grad vor Einschlägen über die Nutzungsdauer geschützt. Dies verhindert jedoch nicht, dass eine gewisse Vulnerabilität der Tragkonstruktion bei ungünstigen, direkten Treffern gegeben ist.

Die bergseitigen Abspannungen stellen bei dieser Schutzmaßnahme einen weiteren Nachteil hinsichtlich der allgemeinen Verletzbarkeit dar. Die Stahlseile können im ungünstigsten Fall durch Steinschläge beschädigt werden, wodurch ein zusätzlicher Wartungsaufwand im Gefährdungsgebiet entsteht. Die mehrfachen Abspannungen pro Trägerelement tragen jedoch vorteilhaft dazu bei, dass im Falle eines Ausfalls eines Stahlseils, der Träger dennoch von den restlichen angebrachten Abspannungen gehalten wird. Dadurch ist die Standsicherheit der Trägerrippenkonstruktion auch bei ungünstigen Einschlägen bestmöglich sichergestellt. Ein zusätzlicher straßenseitiger Kippschutz in Form eines kürzeren, an der Stahlbetonfundierung biegesteif verschraubten I-Trägers kann ggf. optional angebracht werden.

### Bauzeit / Arbeiterschutz:

Im Allgemeinen kann bei diesem Konzept von einer verhältnismäßig kürzeren Bauzeit ausgegangen werden. Die Vorfertigung der Trägerrippenkonstruktion sowie die schnelle Installation vor Ort, stellen hierbei einen der wesentlichen Vorteile dar. Dadurch ist der Aufenthaltszeitraum für Personen und Baugeräte in der Errichtungsphase im Gefährdungsgebiet kurz gehalten.

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Der Wartungsaufwand betrifft vordergründig die aufgesetzten Steinschlagschutznetze und die bergseitigen Abspannungen. Im Ereignisfall müssen die Fangnetze lokal ersetzt oder gewartet bzw. je nach Ereignisintensität beräumt werden. Durch die gezielte Überdimensionierung des Netzes werden die relevanten Sanierungsintervalle verringert. Die Abspannungen stellen aufgrund der Vulnerabilität ebenfalls einen Nachteil hinsichtlich des Wartungsaufwands dar. Bei einer Beschädigung der Stahlträger fallen möglicherweise zusätzliche Sanierungseinsätze an. Die Herstellungskosten für dieses Schutzkonzept sind im mittleren Bereich anzunehmen. Der gesetzliche Überwachungsaufwand umfasst im Allgemeinen regelmäßige Kontrollbegehungen.

## 5.6.4.2 Dreigelenksbogen mit Schutznetz- / Schaumglasüberdeckung

Aufbau / Konstruktion:

Aus zwei Stahlträgern zusammengesetzte Dreigelenksbögen bilden eine tragfähige Unterkonstruktion für die Schutznetz- und Schaumglasüberdeckung der Fahrbahn. Die spiegelsymmetrischen Einzelträger können vorgefertigt und vor Ort gelenkig zusammengesetzt werden. Das Fangnetz ist für den provisorischen Schutz der Stahlträger durch kurze verschraubte Stahlelemente über der Tragkonstruktion vorgehängt. Bergseitig wird der Straßenbereich durch eine seitliche Fangnetzabspannung geschützt. Auf das straßenüberdeckende Fangnetz wird Schaumglasschotterüberdeckung (in Geotextilsäcken, Bigbags) angebracht (Abbildung 83). Schaumglasbaustoffe (z.B. aus Recycling-Glas) werden beispielsweise bei Galerienüberdeckungen (siehe 5.1.3) verwendet, da es eine hohe Energieabsorption bei vergleichsweise geringem Eigengewicht gegenüber konventionellen Füllmaterialien (Rohdichte von ca.  $250 \text{ kg/m}^3$ ) gewährleistet. Umfassungsseile verbinden die einzelnen Module zu größeren Einheiten und halten diese beim Einschlag durch die Aktivierung der Zugkräfte zusammen. Da Schaumglas im Allgemeinen keine Kapillarporen enthält ist der Frostschutz diesbezüglich eher unproblematisch.

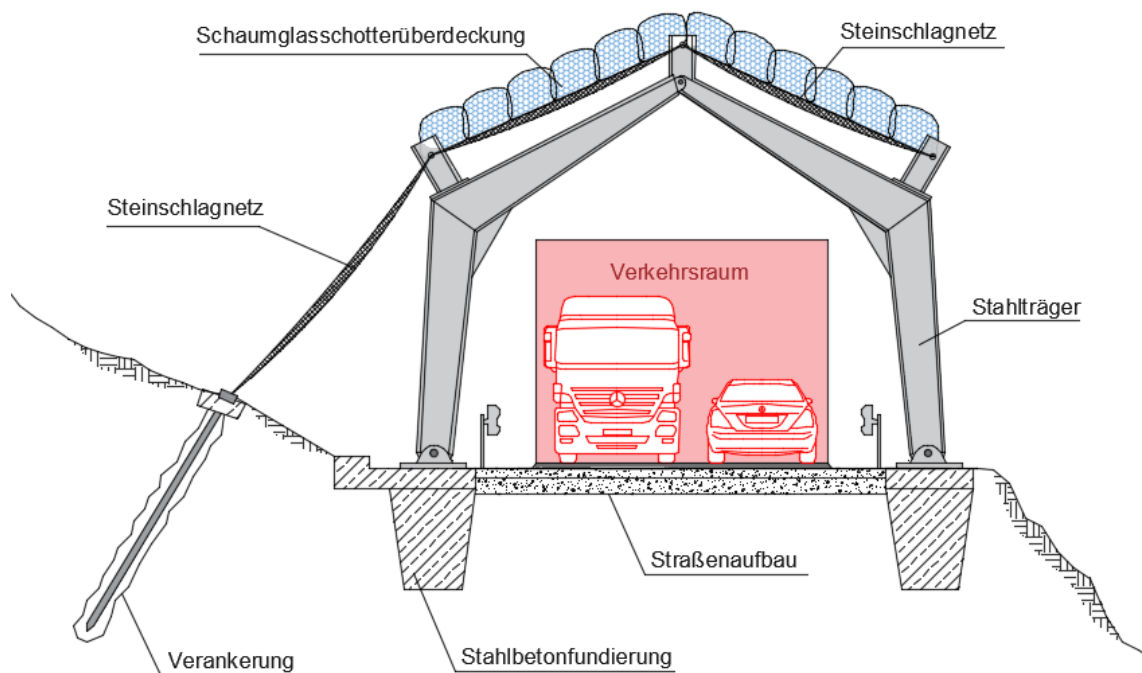


Abbildung 83: Dreigelenksbogen mit Schutznetz- und Schaumglasschotterüberdeckung



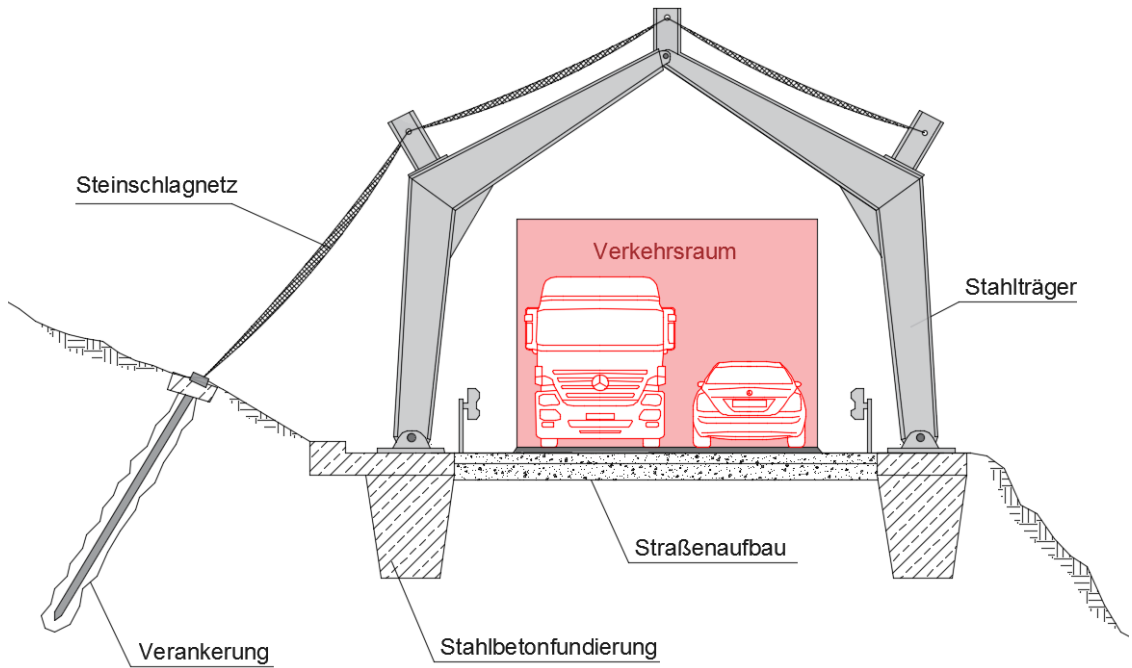


Abbildung 84: Dreigelenksbogen mit konventioneller (eventuell mehrlagiger) Schutznetzüberdeckung

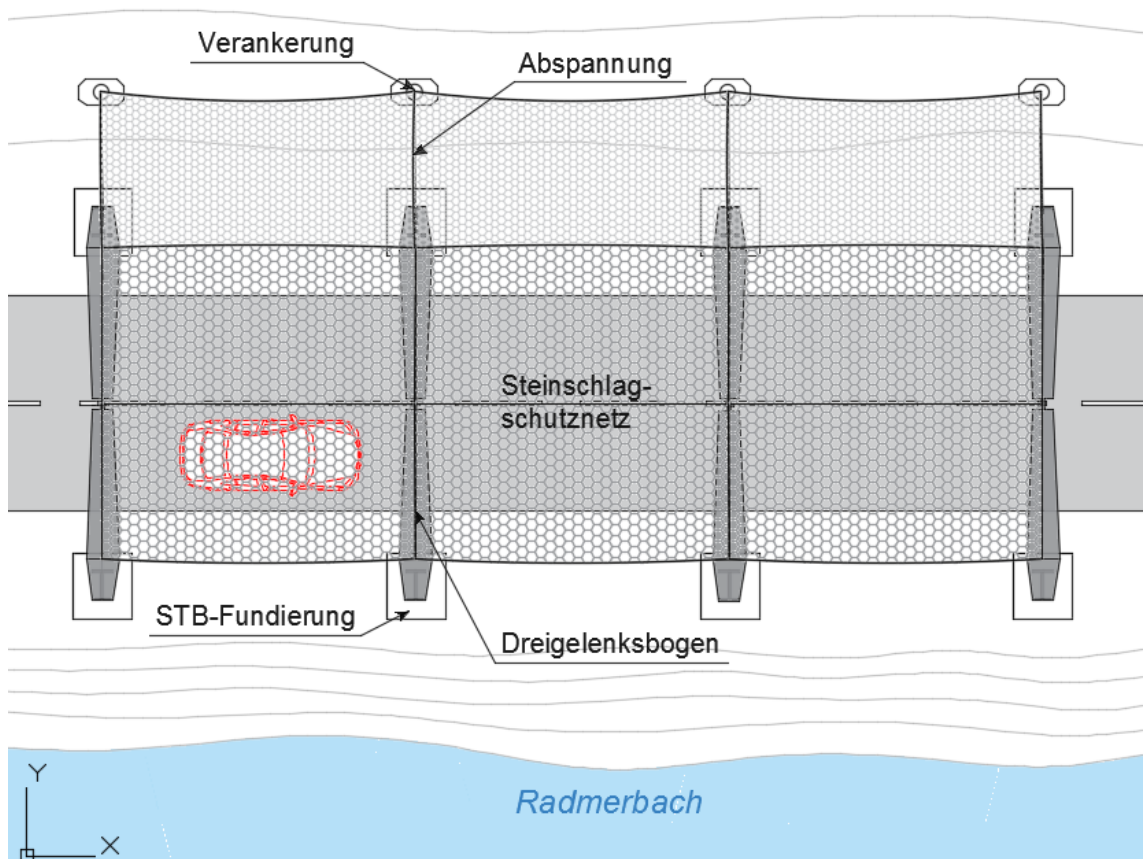


Abbildung 85: Schematische Draufsicht - Dreigelenksbogen mit Schutznetzüberdeckung

Ist die Problematik des Durchstanzens mit konventionellen Schutznetzen beherrschbar (obliegt der fachgerechten Beurteilung der Schutznetzhersteller), kann diese Schutzverbauung alternativ mit konventioneller (abgestufter und mehrlagiger oder auch doppelter) Schutznetzüberdeckung, wie bei den zuvor erläuterten Konzepten ausgeführt werden (Abbildung 84).

### Schutzfunktion / Restrisiko:

Das Gesamtkonzept bietet eine Schutzfunktion im Sinne einer flexiblen Galerieüberdeckung. Die Straßenfahrbahn ist hinsichtlich aller relevanten Flugrichtungen der Steinschlagkörper durch Fangnetze und durch Schaumglas geschützt. Die Dreigelenksbögen bilden dabei eine tragfähige Unterkonstruktion, wodurch die Abspannungen im Gefährdungsbereich entfallen und eine Schaumglasschotterüberdeckung angebracht werden kann. Die Stahlträger des Dreigelenksbogens sind jedoch besonders bei größeren Einschlägen bezüglich Beschädigungen und Verformungen gefährdet. Die geringere kinematische Flexibilität der Unterkonstruktion bezüglich dynamischer Belastungen stellt jedoch tendenziell ein größeres Schadenspotenzial für das Tragsystem dar. Durch die Schaumglas-Dämpfungsschicht auf den Schutznetzen wird dieser Aspekt jedoch entschärft.

### Bauzeit / Arbeiterschutz:

Es ist bei dieser Lösungsvariante von einer kürzeren Bauzeit auszugehen. Eine verhältnismäßig schnelle Installation der vorgefertigten Stahlträger sowie ausbleibenden Verankerungen und Abspannungen am Bergfuß stellen einen der wesentlichen Vorteile bezüglich der Bauzeit dar. Dadurch ist der Aufenthaltszeitraum für Personen und Baugeräte in der Errichtungsphase im Gefährdungsgebiet möglichst kurz gehalten.

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Der Wartungsaufwand betrifft vordergründig die Ausführung mit konventionellen Steinschlagschutznetzen. Im Ereignisfall müssen die Fangnetze lokal ersetzt oder gewartet bzw. je nach Ereignisintensität beräumt werden. Bei der Ausführung mit einer Schaumglasschotterüberdeckung ist im Allgemeinen mit größeren Wartungsintervallen zu rechnen. Die Herstellungskosten für dieses Schutzkonzept sind qualitativ als gering bis mäßig einzuschätzen. Der gesetzliche Überwachungsaufwand umfasst im Allgemeinen regelmäßige Kontrollbegehungen.

## 5.6.4.3 Schutznetzüberdeckung auf Pendelstützen

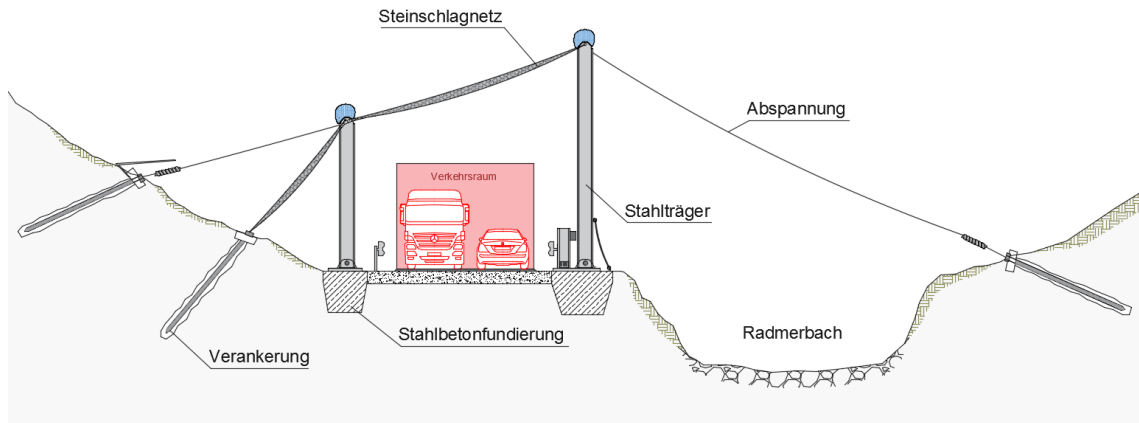
Aufbau / Konstruktion:

Abbildung 86: Konzept - Abgespannte Pendelstützen

Das straßenüberdeckende Steinschlagnetz wird bei dieser Teilvariante auf Pendelstützen gelagert. Die Ansicht im Querschnitt ist in Abbildung 86 dargestellt. Die vertikalen Stahlstützen verlaufen dabei parallel zur Landesstraße im Abstand von etwa 8 m. Eine gelenkige Lagerung der Pendelstützen an der Stahlbetonfundierung gewährleistet eine kinematische Beweglichkeit des Tragsystems. Dabei soll ebenfalls eine gewisse Bewegungsfreiheit orthogonal zur Gelenksachse sichergestellt werden, um im Ereignisfall eine ausreichende Auslenkung der Stützen in Straßenrichtung zu ermöglichen. Die Pendelstützen werden dabei mit Hilfe von verankerten Abspannungen sowie durch die Schutznetzaufhängung in alle Richtungen rückgehalten. Jede Pendelstütze wird dabei doppelt über zwei Verankerungspunkte gesichert. Die Abspannung in Richtung der Straßenachse erfolgt jeweils über die Lagerungsfundierung der benachbarten Pendelstütze. Das Abspannungskonzept ist in der Draufsicht in Abbildung 87 schematisch dargestellt. Die Pendelstützen werden als I-Profile ausgeführt und haben bergseitig eine Länge von ca. 6 m, bachseitig in etwa 9 m. Durch die Längendifferenz der Stützen wird ein optimaler Neigungswinkel des Schutznetzes bezüglich der Energieabsorption gewährleistet. Auf das obere Ende der Stütze soll ein Schutzelement aufgesetzt werden (z.B. Schaumglaschotter in Geotextilsäcken oder ein schützendes Blechelement), um bei einem direkten Treffer das Schadensausmaß auf die Unterkonstruktion zu reduzieren. Die bergseitige Netzabhängung wird an unteren vorgesetzten Lagerungspunkt angebracht, um die Pendelstütze bei seitlichen Einschlägen besser zu schützen und somit die Verletzbarkeit der Tragkonstruktion zu minimieren.

Die rückverankerten Abspannungen werden mit entsprechenden Bremsen-elementen ausgeführt um im Ereignisfall die auftretenden Kräfte und Spannungen aufzunehmen somit zur effektiven Energieabsorption beizutragen.

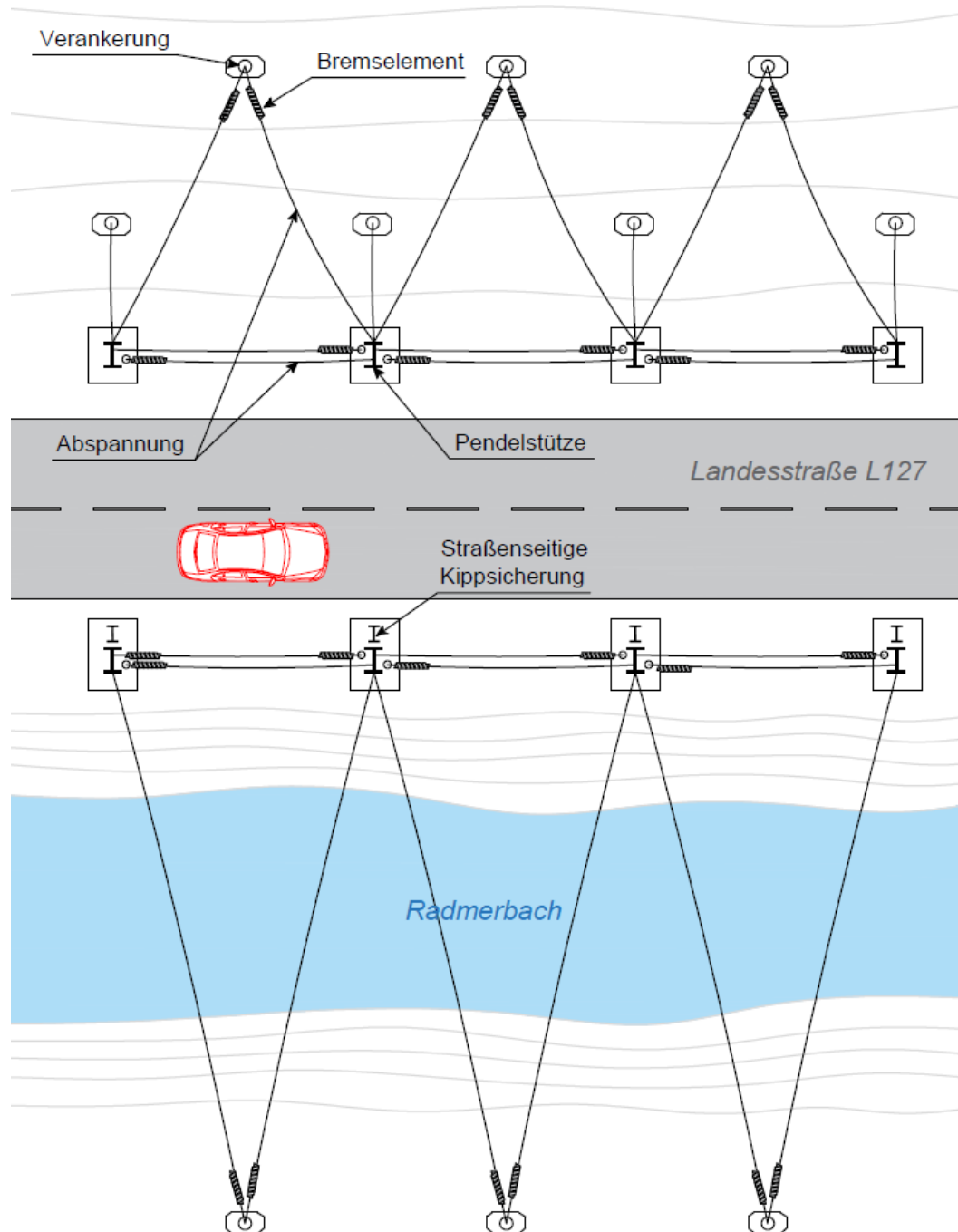


Abbildung 87: Schematische Draufsicht – Abspannungen des Pendelstützenkonzeptes ohne Schutznetz

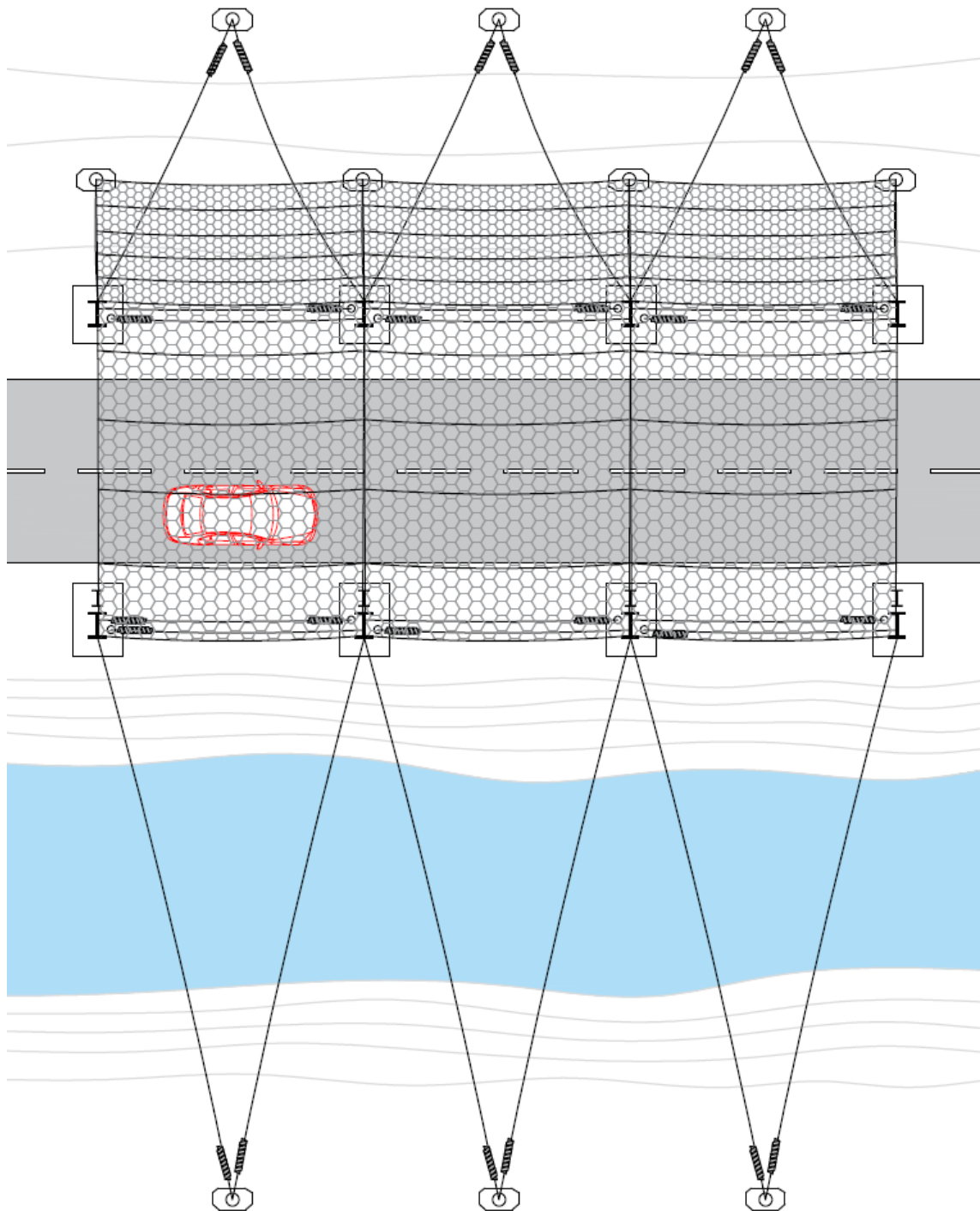


Abbildung 88: Schematische Draufsicht – Abspannungen des Pendelstützenkonzeptes mit Schutznetz

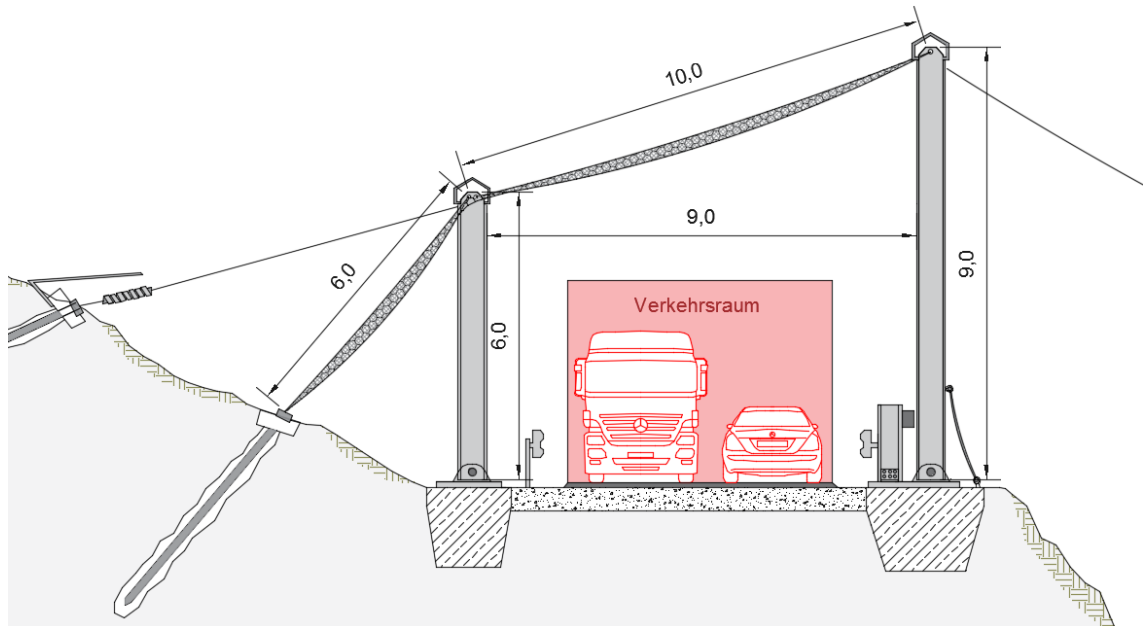


Abbildung 89: Dimensionen - Abgespannte Pendelstützen

Die vorläufig abgeschätzten Dimensionen der Tragkonstruktion sowie Spannweiten der Schutznetze im Querschnitt sind in Abbildung 89 dargestellt. Im Falle eines Ausfalls der bachseitigen Abspannung wird an der Stützenlagerung ein zusätzlicher biegesteifer I-Träger angebracht, um das Kippen der Pendelstütze auf die Fahrbahnseite zu unterbinden. Die Installation einer Schaumglasüberdeckung auf das straßenüberdeckende Schutznetz zwischen den Pendelstützen ist im Hinblick auf die mögliche Problematik des Durchschlagens ebenfalls denkbar. Alternativ kann diesbezüglich auch ein doppeltes Netzsystem über der Fahrbahn angebracht werden, um im Falle eines Durchstanzversagens der oberen Netzschicht, den Verkehrsraum durch ein zweites Fangnetz zu schützen.

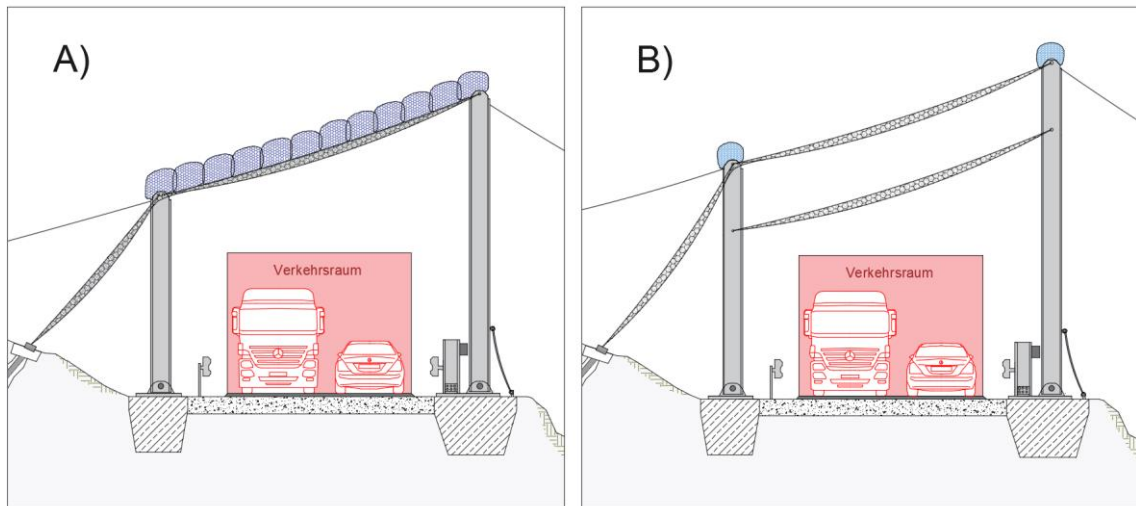


Abbildung 90: Teilkonzept mit Schaumglasüberdeckung (A) und doppelter Schutznetzüberdeckung (B)

#### Schutzwirkung / Restrisiko:

Die Straßenfahrbahn wird in allen relevanten Richtungen von Steinschlagnetzen geschützt und wird daher vor seitlichen und steil fallenden Einschlägen abgeschirmt. Die Pendelstützen bieten aufgrund der vertikalen Ausrichtung eine verhältnismäßig kleine Aufschlagsfläche bezüglich direkter Treffer auf die Tragkonstruktion. Dennoch werden zur Schadensminimierung Schaumglasmodule oder ein Schutzblechkonstrukt (Abbildung 89) auf die Spitze der Stütze aufgesetzt. Die hauptsächliche Verletzbarkeit des Systems betrifft die Abspannungen der Pendelstützen, die sowohl berg- als auch bachseitig angeordnet sind. Jede Stütze wird jedoch doppelt über einen Verankerungspunkt abgespannt, so dass im Falle des Ausfalls eines der Rückhalteseile, die Stahlstütze jeweils vom benachbarten Verankerungspunkt gehalten wird. Für die bachseitige Pendelstütze wird dennoch eine Hilfskonstruktion an der Stahlbetonfundierung angebracht, um das Kippen der Stütze auf die Straße beim Ausfall beider Seilabspannungen zu unterbinden. Die bergseitige Stütze stellt über ein Stahlseil durch die Verbindung zum seitlichen Schutznetz die zusätzliche Absicherung hinsichtlich eines straßenseitigen Kippens dar. Die Teilvarianten mit einer optionalen Schaumglasüberdeckung bzw. doppeltem Fangnetz bieten Lösungsmöglichkeiten im Hinblick auf die mögliche Gefährdung eines Durchschlags der Steinschlagnetznetze.

#### Bauzeit:

Bei diesem Schutzkonzept kann von einer verhältnismäßig kürzeren Bauzeit ausgegangen werden. Die Vorfertigung der Pendelstützen sowie die schnelle Installation vor Ort,

stellen hierbei einen der wesentlichen Vorteile dar. Dadurch ist der Aufenthaltszeitraum für Personen in der Errichtungsphase im Gefährdungsgebiet kurz gehalten.

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Der Wartungsaufwand betrifft vordergründig die aufgesetzten Steinschlagschutznetze und die bergseitigen Abspannungen. Im Ereignisfall müssen die Fangnetze lokal ersetzt oder gewartet bzw. je nach Ereignisintensität beräumt werden. Durch die gezielte Überdimensionierung des Netzes werden die relevanten Sanierungsintervalle verringert. Die Abspannungen stellen aufgrund der Vulnerabilität einen Nachteil hinsichtlich des Wartungsaufwands dar. Die Herstellungskosten für dieses Schutzkonzept sind verhältnismäßig niedrig bis mäßig. Der gesetzliche Überwachungsaufwand umfasst im Allgemeinen regelmäßige Kontrollbegehungen.



## 5.6.5 Steinschlaggalerie

Aufbau / Konstruktion:

Eine massive Stahlbetonkonstruktion überdeckt die Landesstraße auf der ursprünglichen Streckenführung. Die Stahlbetonkonstruktion wird dabei in Ortbetonbauweise und teilweise im Verbundbau gefertigt. Bergseitig wird eine massive vollflächige Stahlbetonwand ausgeführt, während auf der gegenüberliegende Seite die Galeriedecke auf Stahlbetonstützen gelagert wird. Um den Stahlbeton vor den dynamischen Einschlägen zu schützen, ist es notwendig die Konstruktion mit Eindeckungsmaterial bergseitig anzuschütten und zu überdecken. Als Eindeckungsmaterial wird wie bei dem vorgeschlagenen Dammkörper grobkörniger Hangschutt aus den umliegenden Schutthalden verwendet werden. Die Neigung der seitlichen Anschüttung sollte im Bereich von kleiner  $35^\circ$  liegen, da so auf die Verwendung von Geogittern zur Stabilisierung verzichtet werden kann. Alternativ kann die Galerie, zur Reduzierung des Stahlbetonquerschnitts der Decke, mit Schaumglasschotter oder Altreifen überdeckt werden. Das geringe Eigengewicht und die guten energetischen Absorptionseigenschaften dieser alternativen Überdeckung stellen die wesentlichen Vorteile dar.

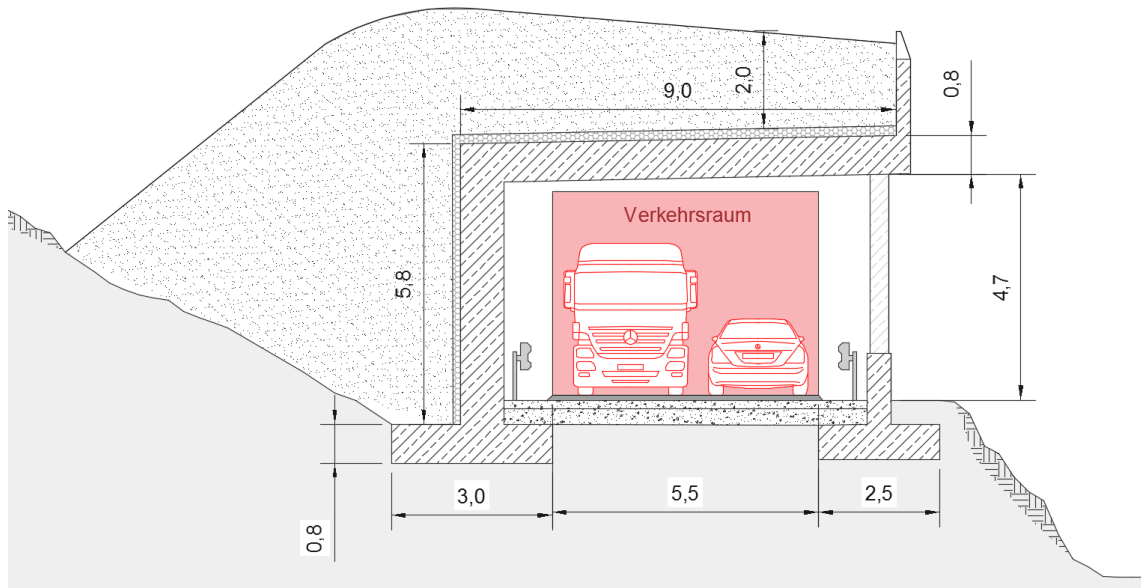


Abbildung 91: Konzept Steinschlaggalerie

Hinsichtlich der hohen einzuleitenden vertikalen Lasten in den Untergrund kann es zudem notwendig sein geotechnische Maßnahmen im Sinne von Tiefen Gründung auszu-

führen. Dies kann beispielsweise über eine Pfahlösung sichergestellt werden. Des Weiteren müssen durch installierte Drainageleitungen die anfallenden Wassermengen aus dem Überdeckungsmaterial abgeführt werden.

### Schutzfunktion / Restrisiko:

Die Stahlbetonkonstruktion samt der aufgetragenen Überdeckung bietet einen massiven Schutz bezüglich der zu erwartenden Steinschläge. Das Restrisiko ist bei dieser Ausführung auf einem sehr geringen Niveau im Vergleich zu den anderen beschriebenen Schutzverbauungen.

### Bauzeit / Arbeiterschutz:

Die Errichtung einer Galerie ist mit einer sehr langen Bauzeit verbunden. Die große Stahlbetonkubatur im Querschnitt in Ortbetonbauweise sowie eventuell erforderliche Tiefengründungen sind ein wesentlicher Nachteil für den kritischen Aspekt der Errichtungsdauer. Die Arbeiter vor Ort sind damit über einen sehr langen Zeitraum im akuten Gefährdungsgebiet.

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Die Herstellungskosten sind bei einer Galerielösung die mit Abstand höchsten im Vergleich zu allen bisher beschriebenen Schutzmaßnahmen. Der Wartungsaufwand sowie die vorgeschriebenen Überwachungsmaßnahmen für Galerien bzw. Tunnel, stellen für den Straßenbetreiber zudem nicht unerhebliche Kosten über die Nutzungsdauer dar. Der durch Steinschläge verursachte Wartungsaufwand ist bei einer Galerie mit einer konventionell grobkörnigen Überdeckungsschicht im Allgemeinen jedoch als gering einzuschätzen. Der gesetzliche Überwachungsaufwand umfasst im Allgemeinen regelmäßige Kontrollbegehungen.

### 5.6.6 Straßenverlegung

Die Verlegung der Landesstraße auf die orographisch linke Bachseite mit ergänzenden bergseitigen Schutzmaßnahmen ist eine weitere mögliche Maßnahmenvariante. Dieses Konzept ist auf der Überlegung begründet, die Straßenführung aus dem Haupteinschlagsbereich der Felswand zu verlagern und so die Steinschlaghäufigkeit hinsichtlich der betroffenen Felswand zu minimieren. Die Landesstraße wird dabei um rund 25 m in Richtung des Gegenhangs verlegt. Die versetzte Straßenführung ist ca. 350 m lang und umfährt das Gefährdungsgebiet der zentralen Felswand vollständig (Abbildung 92). Die Straße muss aufgrund der Bachverlaufs an zwei Stellen, jeweils vor und nach dem Gefährdungsabschnitt über Straßenbrücken auf den Gegenhang geführt werden. Im Zuge dieser Maßnahme ist somit die Errichtung von zwei Straßenbrücken nötig. Die Straßenbrücken befinden sich z.B. an der Straßenkilometrierung 3,15 und 3,4.

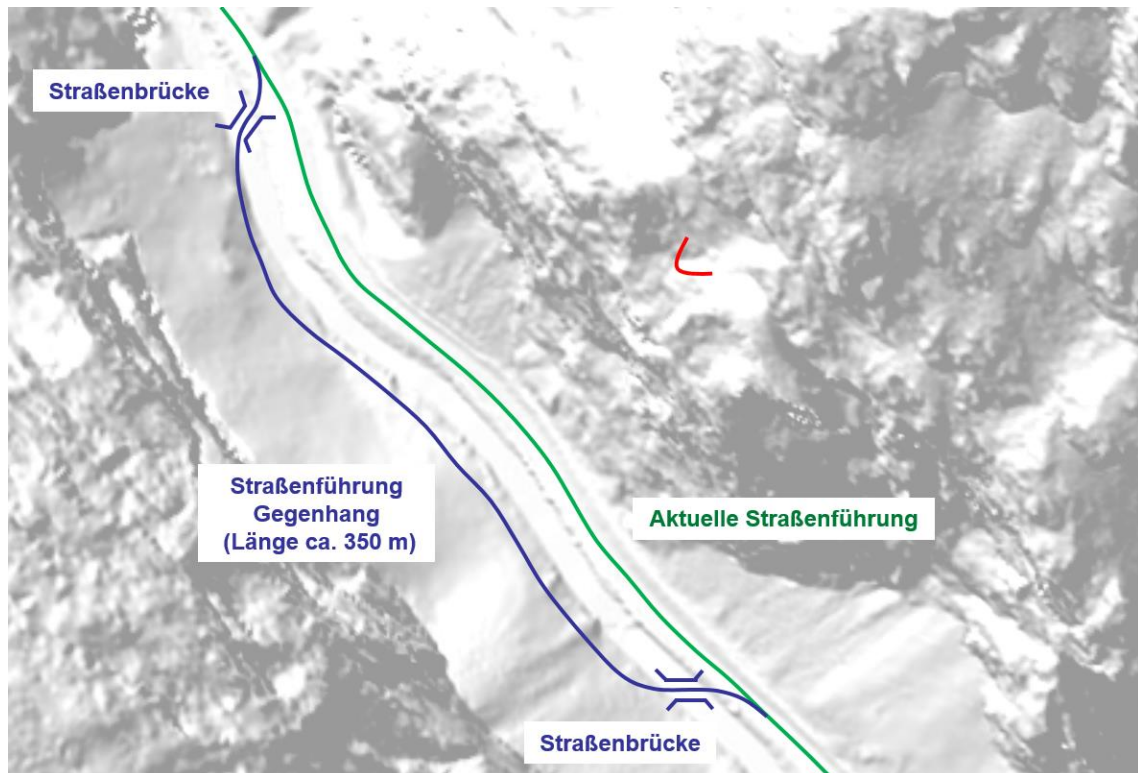


Abbildung 92: Straßenführung am Gegenhang

#### Aufbau / Konstruktion:

Auf der orographisch linken Talseite müsste die Landestraße für einen vollkommenen Schutz beidseitig durch ein seitliches Fangnetz geschützt werden, da die Reichweiten der Steinschläge vom Gegenhang den umgelegten Straßenverlauf erreichen können

(siehe 4.3.4). Aus geotechnischen Erfordernissen ist es notwendig den Geländeeinschnitt durch eine Winkelstützmauer zu sichern. Die Stützmauer kann in Ortbetonbauweise aus Stahlbeton ausgeführt werden. Das Steinschlagschutznetz wird über Abspannungen mit Bremsen zurückgehalten. Das Steinschlagnetz weist eine Höhe von ca. 6 m auf und ist auf eine maximale Energieaufnahmefähigkeit von 1000 kJ ausgelegt.

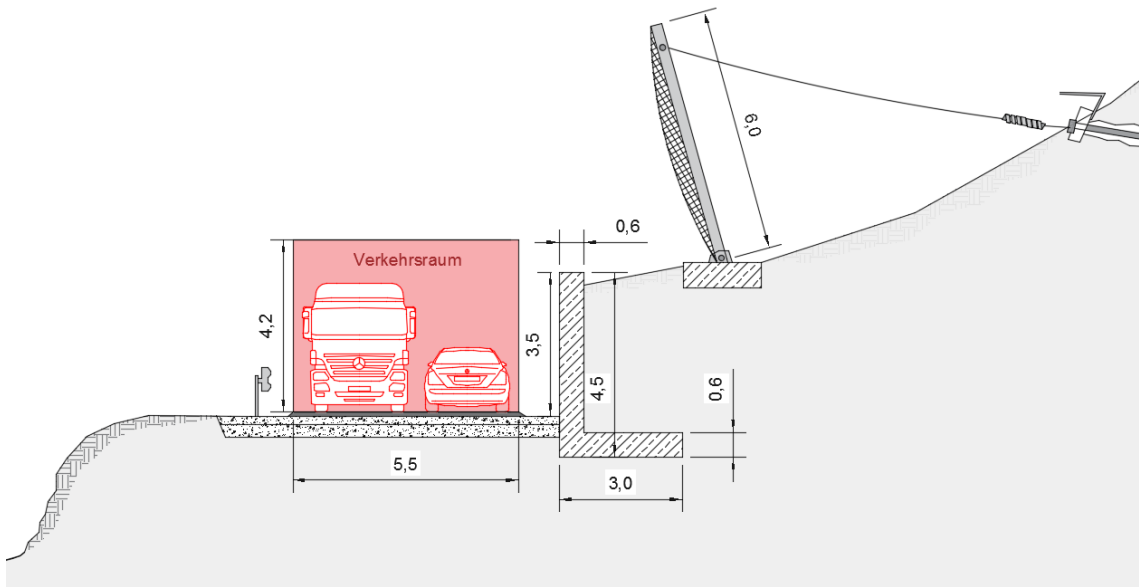


Abbildung 93: Straßenverlegung auf die orographisch linke Bachseite

#### Schutzfunktion / Restrisiko:

Die Straßenführung wird durch jenen Talbereich geführt, welcher nach den Steinschlagsimulationen, statistisch betrachtet die geringsten normierten Häufigkeiten an Steinschlägen aufweist. Steinschlagkörper von der zentralen angrenzenden Felswand kommen bei rollenden bis leicht springenden Sturzverhalten im Bachbett zu Liegen. Im ungünstigsten Fall können Blöcke beim Auftreten der maximalen Sprungweiten (4.3.4) jedoch diesen Bereich auch mit nahezu vertikalen Einschlägen erreichen. Die Installation eines bachseitigen Schutznetzes ist daher unwirtschaftlich, da flache seitliche Einschläge statistisch äußerst gering sind (mit zudem einem niedrigem Schadenspotenzial) und vor vertikalen Einschlägen ohnehin durch konventionelle vertikale Ausrichtung der Netze kein Schutz gewährt werden kann. Bezüglich der Steinschlaggefährdung vom Gegenhang (Westhang) ist ein Schutznetz im Hinblick auf rollende bis springende Blöcke hingegen vertretbar, da die Mehrzahl der Steinschlagkörper diesen Bereich in dieser

Bewegungsform erreicht (rund 75%, siehe 4.3.4). Steinschläge vom Gegenhang (Westhang) mit maximalen Reichweiten (steil fallend) tragen ebenfalls zum Restrisiko dieser Variante bei.

Dieses Maßnahmenkonzept stellt somit eine Variante dar, bei der ein insgesamt höheres Maß an Restrisiko in Kauf genommen wird, da eine straßenüberdeckende Abschirmung hier nicht vorhanden ist, welche den Schutz vor hochenergetischen Einschlägen bieten würde.

### Bauzeit / Arbeiterschutz:

Die Straßenverlegung samt der Errichtung der Brücken und Stützmauer hat eine insgesamt lange Bauzeit zufolge. Da sich der hauptsächliche Arbeitsbereich jedoch am Gegenhang befindet, ist die statistische Einschlagsquote hierbei minimiert, was sich diesbezüglich vorteilhaft auf den Arbeiterschutz auswirkt.

### Herstellungskosten / Wartungsaufwand:

Der Wartungsaufwand entsteht durch das seitlich zur Straße angebrachte Steinschlag-schutznetz. Die Wartungsintervalle sind infolge der zu erwartend geringeren Einschlagsquote durch die Verlegung in größeren Abständen im Vergleich zu den anderen Varianten zu erwarten. Im Ereignisfall müssen die Fangnetze lokal ersetzt oder gewartet werden. Dieses Bauvorhaben verursacht hohe Errichtungskosten.

## 5.7 Vergleichende Bewertung der Schutzkonzepte

Die Schutzkonzepte sollen abschließend einer qualitativen Gegenüberstellung unterzogen werden. Um die einzelnen Varianten bezüglich der aufgestellten Bewertungskriterien übersichtlich zu vergleichen, dient hierfür die folgende Bewertungsmatrix. Die maßgebenden Bewertungskriterien beinhalten: Bauzeit (Arbeiterschutz), Errichtungskosten, gesetzlichen Überwachungsaufwand, Wartungs- und Sanierungsaufwand durch Steinschläge, Vulnerabilität der Tragkonstruktion und das allgemeine verbleibende Restrisiko. Bietet die jeweilige Schutzverbauung verhältnismäßig vorteilhafte Aspekte hinsichtlich eines Bewertungskriteriums, wird dies durch ein Plus-Symbol gekennzeichnet. Im Falle nachteiliger Eigenschaften kommt dem Kriterium ein Minus-Symbol zu. Die Ziffer Null steht für eine neutrale Bewertung. Diese qualitative Übersicht ist in der nachfolgenden Bewertungsmatrix dargestellt.

Tabelle 9: Variantenvergleich - Qualitative Bewertungsmatrix

	Schutznetzüberdeckung auf			Schüttdamm / aufgesetztes Schutznetz	Galerie / Tunnel	Straßenver- legung / seitliches Schutznetz
	abgespannten, auskragenden Trägerrippen	Dreigelenks- bögen mit Schaumglas- überdeckung	abgespannten Pendelstützen			
Bauzeit	++	++	++	-	---	---
Kosten	+	+	+	0	---	-
Gesetzlicher Überwachungs- aufwand	0	0	0	-	---	0
Wartungs- und Sanierungsauf- wand	-	0	-	0	++	-
Vulnerabilität (Tragsystem)	-	-	0	+	++	0
Restrisiko	0	0	0	+	++	-

Die Sicherste und zuverlässigste Schutzmaßnahme für die beschriebene Steinschlagproblematik bietet die Konstruktion einer Galerie bzw. eines Tunnels über den zu sichernden Straßenabschnitt. Da beide Varianten bezüglich ihrer Schutzwirkung keine signifikanten Unterschiede aufweisen, können beide Maßnahmen in derselben Kategorie betrachtet werden. Das mögliche Schadenspotenzial wäre im Bemessungsfall somit auf ein sehr niedriges Niveau herabgesenkt.

Die Errichtung einer Steinschlaggalerie ist jedoch extrem kostenintensiv und über die Nutzungsdauer mit den zusätzlich verbundenen Überwachungsaufwand im Sinne der gesetzlichen Vorschriften für die Instandhaltung von Galerien, eine große finanzielle Belastung für den Straßenbetreiber. Der Wartungs- und Sanierungsaufwand hinsichtlich der Steinschlagereignisse ist aufgrund der massiven Konstruktion und großen Überdeckungsschicht hingegen als äußerst gering einzustufen. Die sehr lange Bauphase mit dem damit verbundenen Arbeiterschutz ist zudem ein weiterer kennzeichnender Nachteil dieser Variante.

Die im Übrigen vorgestellten Schutzbaukonzepte bieten dabei im Allgemeinen einen ausgeglichenen Kompromiss aus wirtschaftlichen und sicherheitstechnischen Bewertungskriterien.

Insbesondere das Konzept einer flexiblen Galerieüberdeckung durch aufgesetzte Steinschlagnetze auf einer der vorgeschlagenen Stahlunterkonstruktion, weist allgemein ein ausgewogeneres Kosten-Nutzen-Verhältnis auf. Eine geringere finanzielle Belastung in Kombination mit der Gewährleistung der allseitigen Schutzvorgaben schafft ein sinnvolles Gleichgewicht bezüglich wichtiger Bewertungsmerkmale. Auch im Sinne der verhältnismäßig kürzeren Bauzeit fällt diesem Schutzkonzept ein wichtiger Beurteilungsvorteil zu. Eine gewisse Vulnerabilität der Tragkonstruktion, der Wartungsaufwand und eventuelle Sanierungsbedarf der Fangnetze und Abspannungen, ist hierbei hingegen als tendenzieller Nachteil zu deklarieren. Der gesetzliche vorgeschriebene Überwachungsaufwand ist andererseits durch Begehungen zur Begutachtung des Netzzustandes und der Tragkonstruktion im Vergleich zur Galerielösung überschaubar.

Die Ausführung einer Schutznetzüberdeckung auf Grundlage des Dreigelenksbogens mit einer möglichen Glasschaumüberdeckung reduziert zum Teil den Umfang der ereignisbezogenen Wartungsintensität aufgrund der wartungsarmen Schaumglas-Dämpfungsmodule auf dem Netzüberspannung sowie der ausbleibenden bergseitigen Abspannung im Gefährdungsbereich. Die geringe Flexibilität der Unterkonstruktion kann jedoch das Ausmaß der Folgeschäden durch ungünstige Steinschlagtreffer erhöhen.

Das Konzept auf Basis der Pendelstützen bietet dahingegen eine allgemein geringere Vulnerabilität der Tragkonstruktion der Schutznetzaufhängung. Durch die vertikale Ausrichtung der Stützen beschränken sich die kritischen Einschläge auf den verhältnismäßig kleinen Kopfbereich der Pendelstützen. Lediglich die Abspannungen der Stützen können bei diesem System durch ungünstige Seiltreffer gelegentlich zusätzliche Instandhaltungsarbeiten verursachen. Dies gilt auch für Schutzkonzept der auskragenden Trägerrippenkonstruktion, da die bergseitig Rückhalteabspannungen wartungstechnisch nachteilig einzustufen sind, zumal diesbezüglich die Sanierungsarbeiten im Gefährdungsbereich auszuführen sind.

Der Schutzdamm, mit aufgesetztem Steinschlagnetz, weist dahingegen eine geringere Anfälligkeit hinsichtlich wartungsrelevanter Beschädigungen auf. Daher sind die Vulnerabilität, der langfristige Wartungsaufwand sowie das Restrisiko hierbei generell als vorteilhaft einzuschätzen. Durch das auskragende Fangnetz, zur Überdeckung der gesamten Fahrbahnbreite, wird jedoch der geringere Wartungsaufwand insgesamt wieder neutralisiert. Die verhältnismäßig lange Bauzeit stellt einen negativen Bewertungsaspekt dieser Variante dar. Die gesetzliche vorgeschriebene Überwachung beinhaltet beispielsweise Kontrollen hinsichtlich Erosionstendenzen, Verformungen und Risse im Dammkörper, beschädigter Geogitter oder störenden Bewuchs. Diese Kontrollbeurteilungen sind lediglich über die Einsicht der bergseitigen Dammböschung möglich, wodurch sich das Überwachungspersonal regelmäßig ins Gefährdungsgebiet begeben muss. Die Bauzeit ist aufgrund der großen Stahlbetonkubatur mit hohem Bewehrungsgrad in Ort-betonbauweise ebenfalls als tendenzieller Nachteil zu benennen. Die Errichtungskosten für dieses Konzept sind im Vergleich zur Maßnahmenvariante der Steinschlaggalerie oder Straßenverlegung dennoch geringer einzustufen.

Die Verlegung der Straßenführung auf den Gegenhang weist im Vergleich zu den bisher beurteilten Schutzmaßnahmen übergreifend Nachteile auf. Die lange Bauzeit in Kombination mit hohen Errichtungskosten auch aufgrund zweier Brückenbauwerke, in Kombination mit dem verbleibenden Restrisiko aufgrund der großen Reichweiten der Steinschläge, stellt im Allgemeinen verhältnismäßig eine nachteilhafte Gesamtbilanz.



## 6. Zusammenfassung und Fazit

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass im Zuge dieser Arbeit die entscheidenden Fragestellungen beantwortet und die festgesetzten Bearbeitungsziele in dieser einleitenden Projektphase erreicht werden konnten. Auf Grundlage der erstellten Steinschlagsimulationen sind die maßgebenden kinetischen Energien und Aufprallgeschwindigkeiten der Steinschläge am gefährdeten Straßenabschnitt statistisch ausgewertet. Durch die räumlichen Untersuchungen der Steinschlagprozesse sind die maßgebenden Sturztrajektorien, Sprungweiten, Fallwinkel und die Verteilung der Aufschlagpunkte ermittelt worden.

Aufbauend auf diesen Kriterien, sind die relevanten projektspezifischen Randbedingungen und Bemessungsparameter erfasst. Diesbezüglich bieten die entwickelten Schutzkonzepte angepasste Lösungsvarianten, um das Schadenspotenzial am aktuellen Gefahrenbereich langfristig auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

Um die aus den ermittelten Randbedingungen abgeleiteten, teils unkonventionellen Schutzanforderungen zu erfüllen, sind auch Schutzverbauungen konzipiert worden, die sich in ihrem Systemaufbau und der allgemeinen Form von geläufigen Steinschlagenschutzsystem unterscheiden. Besonders die pragmatische Gestaltungsweise einer flexiblen Galerielösung durch ein straßenüberdeckendes Steinschlagnetz auf einer Stahltragkonstruktion weist einen ausgewogenen Kompromiss aus den festgesetzten Bewertungskriterien für dieses Steinschlagprojekt. Die verhältnismäßig kurze Bauzeit im Sinne des Arbeiterschutzes und geringeren Herstellungskosten in Kombination mit der ganzheitlichen Gewährleistung der definierten Schutzanforderung stellt ein passendes und vorteilhaftes Kosten-Nutzen-Verhältnis auf.

Auch auf Basis der weiteren vorgestellten Schutzkonzepte und der vergleichenden Gegenüberstellung im Hinblick auf die projektspezifischen Beurteilungsaspekte ist abschließend eine zweckmäßige Entscheidungsgrundlage für die konkrete Wahl des auszuführenden Schutzkonzeptes gegeben. Dadurch sind in Folge einer internen Gewichtung der Bewertungskriterien durch die verantwortliche Fachabteilung, abschließend die grundlegenden Aspekte zur Wahlfindung des künftigen Schutzkonzeptes vorbereitet.

---

## Projektunterlagen, Dokumentationen und Gutachten

- [1] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: FA18C 55 L 127/3-2011-1, Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250 Sachverhalts Darstellung nach der Befliegung am 15.01.2011 von 10:20-10:40 Uhr und örtlichen Begehung auf der L127, weitere Vorgangsweise, A.V., 15.01.2011.
- [2] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 15.01.2011
- [3] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: FA18C 55 L 127/3-2011-3, Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250 Sachverhalts Darstellung nach der Befliegung und Beräumung am 16.01.2011, weitere Vorgangsweise, A.V., 16.01.2011.
- [4] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, Beräumung, 16.01.2011
- [5] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 17.01.2011
- [6] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: FA18C 55 L 127/3-2011-8, Ggst: L 127 Radmerstraße, Felssturz vom 14.01.2011 bei km 3,250 und gesperrter Bereich der RFB Hieflau von km 3,239 bis km 3,292 Sachverhalts Darstellung-18.01.2011, weitere Vorgangsweise, A.V., 18.01.2011.
- [7] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 18.01.2011
- [8] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: FA18C 55 L 127/3-2011-9, Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250 Begehung am 27.01.11, A.V., 28.01.2011.
- [9] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 28.01.2011
- [10] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: FA18C 55 L 127/6-2012, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,221 bis

km 3,290 Schneebeaufschlagung und Gefährdung der L 127 im ggst. Bereich Sofortmaßnahmen STED A.V., 29.02.2012.

- [11] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-3, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,000 bis km 3,400, Begehungsprotokoll vom 09.06.2015 und weitere Vorgangsweise, Sofortmaßnahmen Straßenerhaltungsdienst/A16, A.V., 09.06.2015.
- [12] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 09.06.2015
- [13] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-4, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,000 bis km 3,400, Begehungsprotokoll vom 10.06.2015 und weitere Vorgangsweise, Sofortmaßnahmen Straßenerhaltungsdienst/A16, A.V., 10.06.2015.
- [14] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: Ggst: L 127 Felssturz bei km 3,250, interne Fotodokumentation, 10.06.2015
- [15] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-5, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,000 bis km 3,400, Begehungsprotokoll vom 11.06.2015 und weitere Vorgangsweise, Sofortmaßnahmen Straßenerhaltungsdienst/A16, A.V., 11.06.2015.
- [16] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-6, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,150 bis km 3,300, Begehungsprotokoll vom 12.06.2015, A.V., 12.06.2015.
- [17] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-7, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,150 bis km 3,330, Begehungsprotokoll vom 12.06.2015- Gedächtnisprotokoll, A.V., 12.06.2015.
- [18] Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Fachabteilung Straßenerhaltungsdienst: GZ: ABT16 VT SE 09-5/2015-8, Ggst: L 127 Radmerstraße von km 3,150 bis km 3,330, Begehungsprotokoll vom 15.06.2015- Gedächtnisprotokoll, A.V., 16.06.2015

- [19] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften: Radmer 3-D Model (June 2016 Flight) Processing Report datiert mit 03. Juli 2016, übermittelt per Email im pdf-Format am 07.07.2016
- [20] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften: Digitales 3D-Oberflächenmodell des Projektgebiets der L127: Aufnahme eines hochauflösenden digitalen Oberflächenmodells mit Hilfe eines UAV (Unmanned Aerial Vehicle), im ASCII-Format, Prof. Scott Kiefer und MSc. Maja Bitenc, 07.07.2016
- [21] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften: Blöcke Einzelsicherung Radmer, übermittelt per Email im pdf-Format am 14.11.2016
- [22] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften: Abschlussbericht geotechnische Auswertung einer hochauflösenden digitalen 3D-Punktwolke, Ggst.: Steinschlag, Sofortmaßnahmen, L127 von km 3,000 bis km 3,400, SM Leoben, BBL OO, 2015, Bruck; noch nicht ausgefertigt (mündl. Mitteilung Markus Kaspar 23.11.2016, 26.01.2017 bzw. Email 27.01.2017).
- [23] Geologische Karte der Steiermark, 1:200.000, GBA, Wien, 1984
- [24] Technische Universität Graz, Institut für Angewandte Geowissenschaften: Fotodokumentation aus Projektbegehung und Befliegung der L 127 von km 3,000 bis km 3,400, Fotografiert durch Prof. Scott Kiefer und MSc. Maja Bitenc, 13.04.2016
- [25] Loizenbauer, J., Preiß, P.: Geologisch-geotechnisches Gutachten - Projekt Stein- und Blockschlaggefährdung an der L127 Radmerstraße von km 3,0 bis km 3,4, Erarbeitet im Auftrag des Amts der Steiermärkischen Landesregierung Abteilung 16 – Verkehr und Landeshochbau Referat für Straßenbau- und Geotechnik, Graz, 30 S., Manuskript, unveröffentlicht
- [26] Amt der steiermärkischen Landesregierung, A17 Landes- und Regionalentwicklung, Digitales 3D-Geländemodell des Projektgebiets im ASCII-Format, Auflösung: 1,0 Meter, 06.07.2016

## Literaturverzeichnis

- [27] Austrian Standards Institute, Österreichische Norm-Regel ONR 24810: Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung, 2016, Wien
- [28] BUWAL – Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft: Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, 1997, Bern
- [29] DORREN, L., 2003: A review of rockfall mechanics and modelling approaches, Progress in Physical Geography 27 (1), Institute for Biodiversity and Ecosystem Dynamics, University of Amsterdam
- [30] WYLLIE, D. C., 2015: Rock Fall Engineering, 1. Auflage, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida
- [31] HOFMANN, R., MÖLK, M., VOLLMERT, L.; Steinschlagschutzdämme – Bemessungsvorschlag für verschiedene Bautypen, Geotechnik, Ausgabe Mai 2016, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [32] HOFMANN, R., MÖLK, M., Bemessungsvorschlag für Steinschlagschutzdämme, Geotechnik, Ausgabe März 2012, Ernst & Sohn Verlag, Berlin
- [33] Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Straßen ASTRA, Einwirkungen infolge Steinschlags auf Schutzgalerien, Richtlinie Ausgabe 2008 V2.03, Bern
- [34] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft; Wildbach- und Lawinenverbauung: Technischer Steinschlagschutz - Handbuch zur Durchführung einer Bauwerkskontrolle, Fassung: 15.10.2013, Wien.
- [35] HOEK, E., 2007: Practical Rock Engineering, Rocscience Inc, Toronto
- [36] STOCKINGER, G., 2014: Prozessraumanalyse eines Steinschlaggebietes Staatsstraße 2077 Josefthal – Spitzingsee, unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie, Technische Universität München

## PDF-Dokumente und Internetquellen

- [37] RocFall Rocscience: Risk Analysis of Falling Rocks On Steep Slopes, User's Guide, <https://www.rocscience.com/downloads/rocfall/RocFall%20Tutorial.pdf>, aufgerufen am 12.01.2017
- [38] Rockfall User Manual v1.6: A numerical model for rockfall in research and practice, [http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS\\_ROCK\\_Manual.pdf](http://ramms.slf.ch/ramms/downloads/RAMMS_ROCK_Manual.pdf), aufgerufen am 13.01.2017
- [39] Wendeler C., Volkwein A., Biedermann, B.: Eine flexible Steinschlaggalerie im Hochenergiebereich als Variante zu einer Betongalerie oder Tunnellösung, <http://www.wsl.ch/wsl/info/mitarbeitende/volkwein/pdf/12663.pdf> aufgerufen am 12.12.2016
- [40] GIS-Steiermark, 2016: Digitaler Atlas Steiermark, Basiskarten & Bilder, [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(cgypteuk1mhj1bmwdz3ke4l\)\)/init.aspx?karte=basis\\_bilder&ks=das&cms=da&massstab=800000&t=636234869359760405](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(cgypteuk1mhj1bmwdz3ke4l))/init.aspx?karte=basis_bilder&ks=das&cms=da&massstab=800000&t=636234869359760405), aufgerufen am: 11.10.2016
- [41] GIS-Steiermark, 2016: Digitaler Atlas Steiermark, Geologie & Geotechnik, [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(xr43obowdv52dxhzv1xooyt\)\)/init.aspx?karte=erdwiss&ks=das&cms=da&redliningid=wapwicldyozokpbjhkutzsep&box=314185;5133064.66666667;655815;5326316.33333333&srs=32633](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(xr43obowdv52dxhzv1xooyt))/init.aspx?karte=erdwiss&ks=das&cms=da&redliningid=wapwicldyozokpbjhkutzsep&box=314185;5133064.66666667;655815;5326316.33333333&srs=32633), aufgerufen am: 13.10.2016
- [42] GIS-Steiermark, 2016: Digitaler Atlas Steiermark, Planung und Kataster, [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(swdqmb2n1yj0xk0gjo1ri5vy\)\)/init.aspx?ks=das&cms=da&karte=kat](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(swdqmb2n1yj0xk0gjo1ri5vy))/init.aspx?ks=das&cms=da&karte=kat), aufgerufen am: 13.10.2016
- [43] GIS-Steiermark, 2016: Digitaler Atlas Steiermark, Verkehr & Transport, [http://gis2.stmk.gv.at/atlas/\(S\(nidx0jw3eefr1q32dzaqizru\)\)/init.aspx?karte=verkehrtransport&ks=das&cms=da&redliningid=alby2xvoqzy0ebxmixmil1mn&box=314185;5133064.66666667;655815;5326316.33333333&srs=32633](http://gis2.stmk.gv.at/atlas/(S(nidx0jw3eefr1q32dzaqizru))/init.aspx?karte=verkehrtransport&ks=das&cms=da&redliningid=alby2xvoqzy0ebxmixmil1mn&box=314185;5133064.66666667;655815;5326316.33333333&srs=32633), aufgerufen am: 13.10.2016
- [44] Misapor AG, <http://www.misapor.ch/DE/News/ID/98.html#>, aufgerufen am 22.01.17

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Lageübersicht, Maßstab 1:200.000 (GIS-Steiermark, Grundkarte [40])...	14
Abbildung 2: Kilometrierung der Landesstraße L127 und Lage des Gefährdungsgebiets rund um km 3,25 (roter Markierungspunkt), Maßstab 1:25.000 (GIS-Steiermark, Amtliche Karte [40]) .....	15
Abbildung 3: Relief und Höhenschichtlinien der Felswand, Maßstab 1:2000 (GIS-Steiermark, Schummerung – Relief [41]) .....	16
Abbildung 4: Befliegung im Bereich der „Zwischemmäuer“ – Orographisch östliche Talseite, nördliche Blickrichtung [24].....	17
Abbildung 5: Gefährdungszone im Straßenbereich und Rinnenstruktur im digitalen Oberflächenmodell [20].....	18
Abbildung 6: Zentraler Bereich der Felswand aus der Vogelperspektive [24] .....	19
Abbildung 7: Morphologische Rinnenstruktur im 3D-Modell (RAMMS::ROCKFALL)....	20
Abbildung 8: Beräumte kleinvolumige Steine am Straßenrand infolge von Steinschlagereignissen.....	21
Abbildung 9: Durch Steinschlag verursachte Straßenschäden am Asphaltbelag der L127 bei km 3,24 (a) und km 3,28 (b).....	22
Abbildung 10: Aktuelle Sicherungsmaßnahmen in Form von Steinschlagschutznetzen entlang der L127, Blickrichtung SO .....	23
Abbildung 11: Bewegungsformen von Steinschlagprozessen [29].....	25
Abbildung 12: Übersichtskarte – Projektgebiet (grün) und Bearbeitungsgebiet (rot) (GIS-Steiermark, Verkehr und Transport [43]).....	26
Abbildung 13: Geologische Karte des gegenständlichen Untersuchungsgebietes (GIS-Steiermark Geologie & Geotechnik [41]).....	28
Abbildung 14: Polpunktdarstellung der Gefügedaten im Schmidt'schen Netz [25] .....	30
Abbildung 15: Überblick auf das Projektareal [25] .....	32
Abbildung 16: Karsthohlräume im südlichen Projektareal [25] .....	32
Abbildung 17: Ablagerungsgebiet Schuttfächer Nord [25].....	34
Abbildung 18: Detailaufnahme Bewaldeter Schuttfächer Mitte mit Kleinstlöcken [25] ..	35
Abbildung 19: Detailaufnahme Bewaldeter Schuttfächer Mitte [25].....	36



Abbildung 20: Detailaufnahme Schuttfächer Mitte (Maßstab 20 cm) [25].....	36
Abbildung 21: Detailaufnahme Schuttfächer Süd, Maßstab 20 cm. [25] .....	37
Abbildung 22: Detailaufnahme Schuttfächer Süd, Maßstab 60 cm. [25] .....	38
Abbildung 23: Detailaufnahme Schuttfächer Mitte. Maßstab 200 cm durch rote Linie markiert [25] .....	38
Abbildung 24: Detailaufnahme Schutthalde Süd mit Kornfraktionierung im Ablagerungsraum [25] .....	40
Abbildung 25: Detailaufnahme Einzugsgebiet Schutthalde Nord [25] .....	42
Abbildung 26: Lage des Geländequerschnitts im zentralen Rinnenbereich als Basis die 2D-Simulation (DOM-Modell).....	50
Abbildung 27: Geländeprofil im Rinnenbereich der zentralen Felswand im 2D-Schnitt (Rocscience Rocfall).....	51
Abbildung 28: Sturztrajektorien im Straßenbereich (magentafarbene Linien) und Datenkollektor (schwarze Linie), Rocfall 2D-Simulation .....	54
Abbildung 29: Histogramm – Verteilung der kinetischen Energien im Straßenbereich.	55
Abbildung 30: Kumulative Verteilung - Kinetische Energien im Straßenbereich.....	56
Abbildung 31: Kinetische Energien im Sturzverlauf über das Geländeprofil.....	56
Abbildung 32: Kumulative Verteilung - Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich .	57
Abbildung 33: Histogramm –Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich.....	57
Abbildung 34: Statistische Verteilung der Aufschlagpunkte im Fußbereich der Felswand .....	59
Abbildung 35: Verteilung der Aufschlagpunkte bei Differenzierung der Ablösebereiche .....	60
Abbildung 36: Fallneigung der Steinschlagkörper mit den höchsten kinetischen Energien .....	61
Abbildung 37: Sturztrajektorien – Gegenhang (2D) .....	62
Abbildung 38: Reichweiten der Steinschläge am Gegenhang (2D).....	63
Abbildung 39: Kumulative Verteilung der kinetischen Energien an möglicher Straßenposition am Gegenhang .....	64
Abbildung 40: Digitales Geländemodell (Relief links, Orthofoto rechts) .....	65

Abbildung 41: Kartierungen im 3D-Modell – Berücksichtige Bewaldung (links) und Hangschutt (rechts) .....	66
Abbildung 42: Relevante Aufschlagsfläche im Straßenbereich (Modellierung eines Moorgewässers) .....	67
Abbildung 43: Auslösefläche für den Simulationsszenario „Großflächiger Ablösebereich“ (grün markiert) .....	68
Abbildung 44: Hauptsturzpfade (großflächiger Ablösebereich über der Rinnenstruktur) .....	69
Abbildung 45: Volumenabhängige Sturzverläufe für einen Ablösebereich oberhalb der Rinne, Farbgebung skaliert auf 200 Blöcke .....	70
Abbildung 46: Sturztrajektorien mit Ablösebereich unmittelbar oberhalb der Rinnenstruktur .....	71
Abbildung 47: Ablösebereich unterhalb der Zwischenstufe (links) und oberhalb (rechts) .....	72
Abbildung 48: Sprunghöhenverteilung - Ablösebereich Oben (links) und Unten (rechts) .....	73
Abbildung 49: Kinetische Energieverteilung - Ablösebereich Oben (links) und Unten (rechts) .....	74
Abbildung 50: Vergleich der Aufschlagpunkte - Ablösebereich Oben und Unten .....	75
Abbildung 51: Aufschlagpunkte aus dem unteren südlichen Ablösebereich .....	76
Abbildung 52: Bemessungsblock in RAMMS ROCKFALL .....	77
Abbildung 53: Großflächiger Ablösebereich für den Bemessungsblock .....	78
Abbildung 54: Kinetische Energie der Sturztrajektorien .....	79
Abbildung 55: Statistische Auswertung der kinetischen Energie über den Straßenverlauf .....	80
Abbildung 56: Kinetische Energieverteilung über das Straßenprofil der L127 .....	81
Abbildung 57: Statistische Auswertung der Impaktgeschwindigkeit über den Straßenverlauf .....	82
Abbildung 58: Zentrale Ablösefläche an der Felswand .....	83
Abbildung 59: Kinetische Energie im Sturzverlauf im zentralen Ablösebereich .....	84

Abbildung 60: Kinetische Energien im Verlauf der Landstraße bei zentralen Ablösebereich.....	84
Abbildung 61: Statistische Auswertung der kinetischen Energien im Straßenverlauf ...	85
Abbildung 62: Räumliche Fallgeschwindigkeiten aus dem Ablösebereich (99%-Fraktile) .....	86
Abbildung 63: Statische Auswertung der Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenverlauf der L127 .....	86
Abbildung 64: Ablösebereich (grün) auf der orographisch linken Talseite (Gegenhang) .....	87
Abbildung 65: Kinetische Energien am Gegenhang.....	88
Abbildung 66: Aufschlagpunkte durch Steinschlagereignisse am Gegenhang .....	89
Abbildung 67: Energieabhängige Anwendungsbereiche von Schutzsystemen gegen Steinschlag [30].....	93
Abbildung 68: Systematische Komponenten eines Steinschlagnetzes [30] .....	95
Abbildung 69: Installiertes Schutznetzsystem, Val d'Anniviers im Wallis/Schweiz [39]	96
Abbildung 70: Schutznetzüberdeckung im Bereich des Tunnelportals, Val d'Anniviers im Wallis / Schweiz [39].....	97
Abbildung 71: Komponenten eines bewehrten Dammkörpers zum Schutz vor Steinschlägen [30].....	98
Abbildung 72: Steinschlaggalerie in Gabi, Schweiz (Simplon-Galerie) [44].....	100
Abbildung 73: Schaumglass-Dämpfungsmodule der Simplon-Galerie [44] .....	101
Abbildung 74: Oberste Überdeckungsschicht der Simplon-Galerie [44].....	101
Abbildung 75: Lage und empfohlene Mindestlänge der Schutzverbauung im zentralen Wandbereich im DOM .....	108
Abbildung 76: Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (einspurige Variante) .....	111
Abbildung 77: Dimensionen - Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (in Metern).....	111
Abbildung 78: Schutzdamm mit aufgesetztem Steinschlagnetz (zweispurige Variante) .....	113

Abbildung 79: Konzept - Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz (zweispurige Ausführung).....	115
Abbildung 80: Schematische Draufsicht des straßenüberdeckenden Steinschlagnetzes .....	116
Abbildung 81: Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz - Grobe Dimensionen (in Metern) .....	117
Abbildung 82: Straßenüberdeckendes Steinschlagnetz (einspurige Ausführung) .....	117
Abbildung 83: Dreigelenksbogen mit Schutznetz-und Schaumglasschotterüberdeckung .....	120
Abbildung 84: Dreigelenksbogen mit konventioneller (eventuell mehrlagiger) Schutznetzüberdeckung .....	121
Abbildung 85: Schematische Draufsicht - Dreigelenksbogen mit Schutznetzüberdeckung .....	121
Abbildung 86: Konzept - Abgespannte Pendelstützen .....	123
Abbildung 87: Schematische Draufsicht – Abspannungen des Pendelstützenkonzeptes ohne Schutznetz.....	124
Abbildung 88: Schematische Draufsicht – Abspannungen des Pendelstützenkonzeptes mit Schutznetz.....	125
Abbildung 89: Dimensionen - Abgespannte Pendelstützen .....	126
Abbildung 90: Teilkonzept mit Schaumglasüberdeckung (A) und doppelter Schutznetzüberdeckung (B) .....	127
Abbildung 91: Konzept Steinschlaggalerie .....	129
Abbildung 92: Straßenführung am Gegenhang .....	131
Abbildung 93: Straßenverlegung auf die orographisch linke Bachseite.....	132

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkehrsbelastung L127 ermittelt für die Jahre 2011, 2012 und 2014 - (GIS-Steiermark, Durchschnittlicher täglicher Verkehr [43]) .....	24
Tabelle 2: Blockgrößenklassen Schutthalde Mitte [25] .....	40
Tabelle 3: Blockgrößenklassen Schutthalde Süd [25].....	40
Tabelle 4: Blockgrößenklassen Bearbeitungsbereich [25] .....	46
Tabelle 5: Projektspezifische Energierückgabekoeffizient $R_N$ und $R_T$ in Rocfall (2D-Modellierung).....	52
Tabelle 6: Koordinaten des digitalen 3D-Geländemodells (GK M31) .....	65
Tabelle 7: Zusammenfassung der kinetischen Energien im Straßenbereich.....	90
Tabelle 8: Zusammenfassung der Aufprallgeschwindigkeiten im Straßenbereich.....	91
Tabelle 9: Variantenvergleich - Qualitative Bewertungsmatrix .....	134

# Anhang

## 1. Übersichtskarte – Gebietsabgrenzungen (aus [25])

