

Masterarbeit

**Wirkungsbeurteilung und Risikoanalyse von Steinschlag-
schutzwäldern am Beispiel Gschwendnerberg an der
A9 Pyhrn Autobahn**

*Hazard and risk assessment of rockfall protective forests by evaluating the case study of
Gschwendnerberg along the highway "A9 Pyhrn Autobahn"*

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom Ingenieur

am Institut für Alpine Naturgefahren

an der Universität für Bodenkultur Wien

vorgelegt von

Mag.rer.nat. Gerald M. MÜLLER

Betreuer

Dr.rer.nat Luuk DORREN

Institutsvorstand

Univ. Prof. DI Dr.nat.techn. Johannes HÜBL

Wien, August 2013

VERSICHERUNG

Ich erkläre hiermit, die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel verfasst zu haben. Alle Teile der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegt zu haben.

Mag. Gerald M. Müller

VORWORT

Im Zuge meiner beruflichen Tätigkeit für die 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH erhielt ich 2012 im Auftrag der ASFINAG Service GmbH die Gelegenheit zur Erstellung eines Naturgefahrenhinweisplans entlang der A9 Pyhrn Autobahn. Infolge dieser Bearbeitung entstand die Idee, anhand eines beispielhaften Untersuchungsgebietes die Schutzwirkung des Waldbestandes gegen Steinschlag zu untersuchen. Dabei richtet sich die Fragestellung der Diplomarbeit vor allem auf die Beurteilung der Risikoreduktion infolge der Waldwirkung entlang der Autobahn.

Ich bedanke mich daher bei der ASFINAG Service GmbH für die Erlaubnis durch Ing. Franz Zach zur Verwendung von Projekt- und Datengrundlagen entlang der A9 Pyhrn Autobahn.

Mein besonderer Dank gebührt natürlich Dr. Luuk Dorren, der mir durch seine geduldige und hilfreiche Betreuung den Abschluss meines Studiums ermöglichte und mich durch seinen fachlichen Rat und seinen großen persönlichen Einsatz jederzeit unterstützt hat. Außerdem bedanke ich mich beim gesamten Institut für Alpine Naturgefahren, stellvertretend allen voran Univ. Prof. DI Dr. Johannes HÜBL für eine interessante Studienzeit an der Universität für Bodenkultur Wien.

Es ist mir an dieser Stelle ein großes Anliegen mich bei meinem Arbeitgeber und den Kollegen der 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH zu bedanken, die es mir neben meiner Berufstätigkeit ermöglichten, mein Studium Mountain Risk Engineering am Institut für Alpine Naturgefahren abzuschließen. Dieser Dank gilt allen voran der Geschäftsführung unter Mag. Dr. Alfred Fasching und Mag. Dr. Arnold Steidl.

Ich möchte mich auch bei der Wildbach- und Lawinenverbauung und den Kollegen der Gebietsbauleitung Mittleres Mur- und Mürztal, insbesondere bei Gebietsbauleiter DI Martin Streit, sowie HR DI Wilhelm Machold für die interessanten Praktika im Rahmen meiner Mitarbeit 2012 bedanken.

Mein abschließender Dank ergeht selbstverständlich an meine Partnerin, sowie an Familie, Freunde und Studienkollegen, deren Unterstützung und Ablenkung ich wertzuschätzen weiß.

ZUSAMMENFASSUNG

Die österreichische Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) investiert Millionen Euro in die Planung, Errichtung und Instandhaltung technischer Schutzmaßnahmen gegen gravitative Naturgefahren wie Stein- und Blockschlag. Dabei ist der Schutzwirkung des Waldes eine immer größer werdende, kostengünstige Bedeutung der Gefahrenprävention zuzuschreiben. Momentan besteht jedoch kaum Kenntnis über die tatsächliche Schutzwirkung und Risikoreduktion.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Beschreibung der Abnahme der Steinschlaggefährdung und der Risikoreduktion infolge der Waldwirkung eines Untersuchungsgebietes an der A9 Pyhrn Autobahn. Es kommen unterschiedliche Methoden zur Gefahrenanalyse, Wirkungsbeurteilung und Risikoanalyse zur Anwendung.

Wesentlicher Inhalt sind Steinschlagsimulation mit Rockyfor3D zur Erstellung von Intensitätskarten, sowie die Wirkungsbeurteilung des aktuellen Waldbestandes zum Nachweis der Zuverlässigkeit des Waldbestandes und die Risikoanalyse zur Ermittlung der Risikoreduktion der Situationen „aktueller Waldbestand“ und „kein Wald“.

ABSTRACT

The Austrian highway operator "ASFINAG" is responsible for the planning, construction and maintenance of technical protection measures to minimise the rockfall danger along highways. Protective forests are generally low cost measures of risk prevention. The establishment of their protective function is practicable. Currently the knowledge about the hazard and risk reduction of forests is inconsistent.

The aim of this diploma thesis is to describe the decrease of rockfall danger and risk in consideration of the protective function of forests. The expectancy of risk reduction of the forest is analysed in a defined study area at the "A9" highway. Different methods for hazard and risk analysis are applied.

Rockfall simulations with Rockyfor3D are appropriate to create intensity maps to evaluate the reliability and protective effect of the current forest stand. Methods of hazard assessment and risk analysis are necessary to determine the risk reduction for the situations "current forest stand" and "no forest existence".

INHALTSVERZEICHNIS

VERSICHERUNG.....	I
VORWORT.....	II
ZUSAMMENFASSUNG.....	III
ABSTRACT.....	III
INHALTSVERZEICHNIS.....	IV
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	VII
TABELLENVERZEICHNIS.....	IX
1 EINLEITUNG.....	1
1.1 Ausgangslage.....	1
1.2 Problemstellung.....	2
1.3 Zielsetzung.....	3
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	5
2.1 Sturz- und Steinschlagprozesse.....	5
2.1.1 Definition und Begriffserklärung.....	5
2.1.2 Ursachen und Auslösung.....	7
2.1.3 Mechanik des Sturzprozesses.....	8
2.2 Kontaktreaktionen von Steinschlagprozessen.....	11
2.2.1 Topographie.....	12
2.2.2 Blockeigenschaften.....	13
2.2.3 Geotechnische Eigenschaften.....	14
2.2.4 Vegetationswirkung.....	14
2.3 Schutzwald.....	15
2.3.1 Waldwirkung.....	16
2.3.2 Anforderungsprofil Schutzwaldleistung.....	18
2.4 Modellierungsansätze.....	21
2.4.1 Geometrische Modelle.....	22
2.4.2 Prozessorientierte Felssturzmodelle.....	23
3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GSCHWENDNERBERG.....	25
3.1 Geographische Beschreibung.....	25
3.2 Klimatische Rahmenbedingungen.....	27
3.3 Regionalgeologischer Überblick.....	29
3.4 Beschreibung der Vegetation.....	31
3.4.1 Natürliche Waldgesellschaft.....	32
3.4.2 Aktuelle Waldgesellschaft.....	32

3.4.3	Windwurfflächen und Sturmschäden	34
3.4.4	Gefahrenzonenplan, Waldentwicklungsplan und Schutzwaldfunktion.....	35
3.5	Technische Schutzmaßnahmen.....	37
4	METHODEN ZUR ERFASSUNG DES GEFÄHRDUNGSPOTENTIALS	38
4.1	Feldaufnahmen.....	39
4.1.1	Bodenparameter.....	40
4.1.2	Waldbestand	42
4.1.3	Steinschlagaktivität und Stumme Zeugen.....	45
4.2	Gesteinseigenschaften.....	46
4.3	Pauschalgefällemethode zur Reichweitenermittlung	49
4.4	Steinschlagmodell Rockyfor3D	53
4.4.1	Modellkomponenten	53
4.4.2	Eingangsdaten des Modells.....	55
4.4.3	Initialeinstellungen bei Simulationsstart	57
4.4.4	Ausgabedaten des Modells	57
5	INTERPRETATION DES GEFAHRENPOTENTIALS	59
5.1	Gefahrenpotential	59
5.1.1	Ereignisdokumentation	59
5.1.2	Beurteilung des Gefahrenpotentials.....	60
5.1.3	Szenarien	61
5.2	Schadenspotential	61
5.3	Simulationsergebnisse und Modellvalidierung.....	62
5.3.1	Evaluierung der Eingangsdaten.....	63
5.3.2	Evaluierung der Simulationsergebnisse.....	66
5.4	Methoden zur Beurteilung der Waldwirkung.....	70
5.4.1	Grobbeurteilung.....	70
5.4.2	Nachweis der Schutzwirkung.....	71
5.4.2.1	Tragsicherheit.....	72
5.4.2.2	Gebrauchstauglichkeit	74
5.4.2.3	Dauerhaftigkeit.....	74
5.4.3	Wirkungsbeurteilung.....	75
5.4.3.1	Durchgangsfrequenz.....	76
5.4.3.2	Analyse der Waldwirkung	79
6	RISIKOANALYSE	81
6.1	Grundlagen der Risikoanalyse	81
6.1.1	Systemabgrenzung.....	82
6.1.2	Gefahrenanalyse	82
6.1.3	Expositionsanalyse.....	86
6.1.4	Konsequenzanalyse	88
6.2	Risikoberechnung	89
6.2.1	Risikoermittlung Direkttreffer	90

6.2.2	Risikoermittlung Auffahrunfall	91
6.2.3	Risikoermittlung Verschüttung	91
6.2.4	Risikoermittlung Verfügbarkeit	92
6.3	Interpretation der Risikoanalyse	93
6.3.1	Risikoermittlung	93
6.3.1.1	Risikozunahme bei zunehmender Ereignishäufigkeit (Ansatz 1)	94
6.3.1.2	Risikozunahme aufgrund der räumlichen Aufretenswahrscheinlichkeit (Ansatz 2).....	95
6.3.1.3	Risikozunahme nach Faktor (Ansatz 3).....	96
6.3.2	Risikoreduktion	98
7	DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG	101
8	LITERATURVERZEICHNIS	109
8.1	Projektunterlagen.....	109
8.2	Referenzen	111
9	ANHANG.....	119
10	ENGLISH SUMMARY	142
10.1	Introduction	142
10.2	Evaluation of the protective effect of forest.....	143
10.3	Hazard assessment	145
10.4	Risk assessment.....	148

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Gliederung (GSTEIGER 1989 in HEINIMANN et al. 1998, verändert).....	6
Abbildung 2: Haupttypen struktureologischer Versagensmechanismen: Blockgleiten (a), Keilgleiten durch Kombination zweier Trennflächen (b), Kippen (Toppling) von Blöcken (c), Rotationsanbruch bzw. Materialbruch (WYLLIE et al. 2004, verändert).....	8
Abbildung 3: Energieverlauf (MEISZL 1998 nach GERBER et al. 1995).....	10
Abbildung 4: Einflussfaktoren bei Steinschlagprozessen (FREHNER et al. 2005).....	12
Abbildung 5: 3 Hauptachsen des Sturzblockes (KAITNA 2008).....	13
Abbildung 6: Beziehung zwischen den Baumarten, des Brusthöhendurchmessers (<i>BHD</i>) und der maximalen Energieabsorption von Baumstämmen (BERGER & DORREN 2006).....	17
Abbildung 7: Überblick über das Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).....	25
Abbildung 8: Topographische Übersichtskarte des Projektgebietes (BEV 2012).....	26
Abbildung 9: Topographische Karte des Projektgebietes (BEV 2012).....	27
Abbildung 10: Klimadiagramm Windischgarsten (ZAMG 2013, verändert).....	28
Abbildung 11: Geologische Übersichtskarte (DORIS 2012, verändert).....	29
Abbildung 12: Repräsentativer Waldbestand (MÜLLER 2012).....	33
Abbildung 13: Waldbestand, Windwurfllächen und Kataster.....	33
Abbildung 14: Windwurfllächen im Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).....	35
Abbildung 15: Gefahrenzonenplan und WEP-Schutzwald gemäß ForstG 1975.....	36
Abbildung 16: Kartierung von Polygonen gleicher Eigenschaften (DORREN 2012).....	40
Abbildung 17: Erfassung der Oberflächenrauigkeit (DORREN 2012).....	41
Abbildung 18: Kartierung von Polygonen gleicher Eigenschaften (DORREN 2012).....	41
Abbildung 19: Kartierung der Waldpolygone (DORREN 2012).....	43
Abbildung 20: <i>BHD</i> -Messung und Auswahl der Probekreise (STIERLIN et al. 1994).....	43
Abbildung 21: Kartierung Waldpolygone und Stumme Zeugen (DORREN 2012).....	44
Abbildung 22: Datenerfassung Stumme Zeugen (DORREN 2012).....	45
Abbildung 23: Gefügediagrammdarstellung an den Positionen a) bis d) nach der Kartierung von Großklüften (<i>GK</i>), Klüften (<i>K</i>), Schichtflächen (<i>SS</i>), der Wandoberfläche (<i>W</i>) und Störungen (<i>ST</i>) (NEUBAUER ZT 2012).....	48
Abbildung 24: Felsaufschlüsse nach NEUBAUER ZT 2012.....	48
Abbildung 25: Felstufe und Ausbruch im Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).....	49
Abbildung 26: Unterscheidung des Pauschalgefälles (MEISZL 1998, verändert).....	51

Abbildung 27: Ermittlung von Fahrböschung (31°) und Schattenwinkel (27,5°).....	52
Abbildung 28: Reichweitenermittlung nach dem Schattengefälle (27,5°).....	52
Abbildung 29: Dokumentation von Einschlagmarken, und Sturzblöcken, sowie vorhandene Holzschlachtenwände (MÜLLER 2013).	64
Abbildung 30: Erfassung einheitlicher Geländeparameter und Abstraktion der Eingangsparameter zur Modellierung (MÜLLER 2013).	65
Abbildung 31: Stammzahlermittlung durch Auswertung von CIR-Orthophotos bei stufigem Waldbestand (BEV 2013, STIERLIN et al. 1994, verändert).	66
Abbildung 32: Simulationsergebnisse (3D) maximaler kinetischer Energie 30jähriger und 100jähriger Bemessungsereignisse bei aktuellem Waldbestand.	67
Abbildung 33: Simulationsergebnisse (2D) der Sprunghöhen eines 10jährigen Bemessungsereignisses bei aktuellem Waldbestand.	68
Abbildung 34: Vergleich der Simulationsergebnisse (3D) der Durchgangsfrequenz (Trajektorien) des häufigen (30jährigen) Bemessungsereignisses bei aktuellem Waldbestand (links) und ohne Wald (rechts).	69
Abbildung 35: Angepasste Grobbeurteilung Steinschlag (KALBERER 2011).....	70
Abbildung 36: Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Waldbestandes (KALBERER 2011).	72
Abbildung 37: Nachweis der Tragsicherheit – kumulierte Bestandesgrundflächen.....	73
Abbildung 38: Steinschlagaktivität – Durchgangswahrscheinlichkeit von Steinschlag bei einem häufigen Szenario unter der Annahme „kein Waldbestand“ (10-30jährig).....	77
Abbildung 39: Reduktion der Durchgangsfrequenz [%] durch den aktuellen Waldbestand bei häufigen Szenarien (10-30jährig).	77
Abbildung 40: Abweichung der maximalen kinetischen Energie und mittleren Sprunghöhe durch die Wirkung des Waldbestandes (30-100jährig).	79
Abbildung 41: Änderung der Durchgangsfrequenzen infolge des Waldbestandes bei seltenen Ereignissen (30-100jährig).	80
Abbildung 42: Schematische Darstellung des Perimeters (ASTRA 2009, verändert).	82
Abbildung 43: Jährlichkeit (a) und Häufigkeit (b) gemäß Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach BRÜNDLI 2009 (verändert).	83
Abbildung 44: Intensitätskarte des häufigen Ereignisses „ohne“ Waldbestand.....	85
Abbildung 45: Flussdiagramm zur Risikoanalyse bei aktuellem Waldbestand.....	96
Abbildung 46: Flussdiagramm zur Risikoanalyse „ohne“ Waldbestand.	97
Abbildung 47: Anteil der einzelnen Schadensbilder am kollektiven Risiko.	99
Abbildung 48: Verteilung der kollektiven Risiken (vgl. WINKLER et al 2009).	99

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1:	Differenzierung von Sturzprozessen (LATELTIN 2001).	6
Tabelle 2:	Anforderungsprofil Steinschlagschutzwald (FREHNER et al. 2005).	19
Tabelle 3:	Wirksame Mindestdurchmesser (FREHNER et al. 2005).	20
Tabelle 4:	Baumartenzusammensetzung des aktuellen Waldbestands.	32
Tabelle 5:	Bodenparameter (Oberflächenrauigkeit, Dämpfung).	42
Tabelle 6:	Kennwerte der Wald-Bestandeskartierung (u.a. Stammzahl, BHD).	44
Tabelle 7:	Bodenarten in Rockyfor3D und R_n -Werte (DORREN 2012b).	56
Tabelle 8:	Jährlichkeit und Bemessungsblöcke definierter Szenarien.	61
Tabelle 9:	ASFINAG Verkehrsstatistik A9 Km 31,148 (ASFINAG 2012).	62
Tabelle 10:	Dominierender Waldbestand des Untersuchungsgebietes	76
Tabelle 11:	Reduktion der Durchgangsfrequenz nach der Waldbestockung.	78
Tabelle 12:	Kategorisierung der Wiederkehrperioden (ASTRA 2009, verändert).	83
Tabelle 13:	Eintretenswahrscheinlichkeit bei definiertem Beobachtungszeitraum von 50 Jahren (HEINIMANN et al. 1998).	84
Tabelle 14:	Risikozunahme nach Anzahl der simulierten Ablagerungen.	97
Tabelle 15:	Kollektive Risiken.	98
Tabelle 16:	Risikoreduktion durch den Waldbestand.	100

1 EINLEITUNG

Eine Unterscheidung der Begriffe Gefahr und Risiko ist Voraussetzung zur Beurteilung von Naturgefahren. Als Gefahr ist u.a. nach KIENHOLZ et al 1998 eine naturräumliche Situation zu bezeichnen, dessen Zustand, Umstand oder Vorgang zu einer negativen Auswirkung, respektive einem Schaden führen kann. Der Begriff des Risikos wird in Anlehnung an KIENHOLZ et al 1998 allgemein als das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und dessen Konsequenz in Form eines potentiellen Schadensausmaßes bewertet.

1.1 Ausgangslage

Im Zusammenhang mit den weltweiten Folgen des Klimawandels werden auch die Auswirkungen auf den Alpenraum wissenschaftlich diskutiert. In Anbetracht beobachteter Trends und dokumentierter Ereignisse ist unter anderem eine Zunahme von Häufigkeit und Intensität alpiner Naturgefahren nicht auszuschließen. (PERZL et al. 2012, PLANAT 2013).

Die intensive, anthropogene Nutzung des alpinen Raumes und die fortschreitende Rauminanspruchnahme durch die Verkehrserschließung und den wachsenden Siedlungsdruck verstärken die Vulnerabilität gegenüber Naturkatastrophen in den Alpen. Das Risiko des Eintretens von Ereignissen mit Schadensfolge resultiert aus der Verschneidung natürlicher Prozessräume mit dem Siedlungsraum und der Infrastruktur. Das finanzielle Schadensausmaß von Naturkatastrophen nimmt zu. Eine nachhaltige Raumentwicklung und ein integrales Risikomanagement zur Verminderung des Schadenpotentials sind daher im Einflussbereich von Naturgefahren von großer Bedeutung (PLANAT 2013).

Trotz zahlreicher Investitionen in technische Schutzmaßnahmen können Auswirkungen durch Ereignisse nicht vollständig verhindert werden. Gemäß PLANAT 2013 scheint ein Paradigmenwechsel des gesellschaftlichen Bewusstseins hin zur Anpassung der menschlichen Lebensweise an die Bedrohung durch Naturgefahren stattzufinden. Durch die sich ändernde gesellschaftliche Wahrnehmung von Naturgefahren erfolgt auch eine zunehmende Akzeptanz der verbleibenden Risiken.

Der Einsatz passiver Schutzmaßnahmen als Strategie zur Gefahrenprävention erlangt zusehends an Bedeutung. Kosten-Nutzen Überlegungen und das Ziel einer

nachhaltigen Bewirtschaftung alpiner Ökosysteme stehen bei der Planung von Schutzmaßnahmen im Vordergrund (KÜHNE 2005).

In diesem Zusammenhang ist der dauerhaften Schutzwirkung von Wäldern besondere Bedeutung beizumessen. Zwar bieten auch Schutzwälder keinen hundertprozentigen Schutz, tragen aber insgesamt zu einer kostengünstigen Reduktion des Risikos bei. Zudem wirken Schutzwälder großflächig sowohl im Entstehungs-, Transit- als auch im Auslaufgebiet von Naturgefahren (PLANAT 2013).

1.2 Problemstellung

Im gesamten Alpenraum stellen gravitative Naturgefahren wie Stein- und Blockschlag potentielle Gefahren für das hochrangige Verkehrswegenetz dar. Infolge der naturräumlichen Exposition sind auch österreichische Autobahnen und Schnellstraßen exponiert. Das Felssturzereignis von Wald am Schoberpass im Juli 2012 zeugt vom Vorhandensein lokaler Gefahrenpotentiale (3G 2012).

Seitens der österreichischen Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) werden Investitionen in Millionenhöhe in die Planung, Errichtung und Instandhaltung technischer Schutzmaßnahmen gesteckt. Im Sinne des von PLANAT 2013 propagierten integralen Risikomanagements kommt zusätzlich zu den technischen Maßnahmen, der Schutzfunktion des Waldes eine immer größer werdende Bedeutung der Gefahrenprävention zu. Erfahrungswerte u.a. gemäß PLANAT 2013 verdeutlichen die kostengünstige Wirkung von Schutzwäldern als Maßnahme gegenüber Naturgefahren.

Die nachhaltige Waldbewirtschaftung stellt auch für die ASFINAG eine anzustrebende Schutzstrategie dar. Als Folge der zu erwartenden Risikoreduktion ist mit einer Verringerung der finanziellen Schadensfolge bei Ereignissen und insgesamt mit einer Verbesserung der Streckenverfügbarkeit zu rechnen. Momentan bestehen jedoch kaum Kenntnisse über die tatsächliche Schutzwirkung aktueller Waldbestände. Das Abschätzen der Risikoreduktion infolge der Waldwirkung als Schutzmaßnahme ist aber Voraussetzung für Kosten-Nutzen Analysen und die Umsetzung des integralen Risikomanagements und nachhaltiger Schutzstrategien.

1.3 Zielsetzung

In Anlehnung an PERZL et al. 2012 ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft die Beurteilung der Schutzwirkung eines Waldbestandes noch nicht mit hoher Sicherheit möglich. Anhand des Konzeptes „NaiS“, „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion“ nach FREHNER et al 2005 werden zusammenfassend Beurteilungskriterien zur Waldwirkung veröffentlicht.

Anhand des Projektes "Naturgefahren-Steinschlag, Gefahrenanalyse Protect Bio II, Fallbeispiel Steinschlag – Maßnahmenbeurteilung, Wirkungsbeurteilung und Maßnahmenbewertung von Steinschlagschutzwäldern“ nach KALBERER 2011 wird versucht, die Schutzwirkung des Waldes als biologische Maßnahme nach „Stand der Technik“ analog zu technischen Schutzmaßnahmen zu beurteilen.

Das Schweizer „RIKO“, „Risikokzept Naturgefahren Nationalstraßen – Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstraßen“ nach ASTRA 2009 konzentriert sich auf die Methoden zur Risikoermittlung und Gefahrenanalyse entlang von Verkehrswegen.

Diese Diplomarbeit baut auf diesen Konzepten auf und wendet die dort entwickelte Methodik anhand eines Untersuchungsgebietes an der A9 Pyhrn Autobahn an. Das wesentliche Ziel dieser Diplomarbeit ist die Bestimmung und Beschreibung der Risikoreduktion infolge der Schutzwirkung des aktuellen Waldbestandes. Dazu werden sowohl die Charakteristik des aktuellen Waldbestandes als auch die Gefahrendisposition des Steinschlags durch Feldaufnahmen erfasst und eine Gefahrenanalyse durchgeführt. In weiterer Folge sollen nachvollziehbare Bemessungsszenarien definiert und gefährdete Prozessräume hinsichtlich Eintretenswahrscheinlichkeit, Ausmaß und Intensität des Gefahrenprozesses und der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit ausgewertet werden.

Mit Hilfe der Software Rockyfor3D werden mittels Steinschlagsimulation Intensitätskarten zu den Steinschlagszenarien definiert. Zusätzlich wird die Wirkungsbeurteilung der Schutzfunktion des aktuellen Waldbestandes nach dem Konzept „Protect Bio II“ nach KALBERER 2011 umgesetzt. Die Simulationsergebnisse aus Rockyfor3D werden nach erfolgter Plausibilitätskontrolle zur Risikoermittlung herangezogen.

Zusammenfassend können aus der Zielsetzung der Diplomarbeit folgende Fragestellungen hervorgehoben werden:

- Kann nach Anwendung unterschiedlicher Methodik eine Steinschlaggefährdung für das Untersuchungsgebiet verifiziert werden?
- Wie plausibel sind die Simulationsergebnisse von Rockyfor3D unter Berücksichtigung des aktuellen Waldbestandes und welche Szenarien lassen sich ableiten?
- Kann nach dem Konzept „Protect Bio II“ die Schutzwirkung, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des aktuellen Waldbestandes nachgewiesen werden?
- Welche Häufigkeit, räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit und Intensität von Steinschlagereignissen sind für die Situationen „aktueller“ Waldbestand und „kein“ Wald zu erwarten?
- Wie kann die Schutzwirkung des Waldbestandes für die Situationen „aktueller“ Waldbestand und „kein“ Wald verglichen und quantifiziert werden?
- Welche Risikoreduktion ist durch die Schutzwirkung des aktuellen Waldbestandes zu erwarten?

2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN

2.1 Sturz- und Steinschlagprozesse

2.1.1 Definition und Begriffserklärung

Die Definition der Steinschlag- und Sturzprozesse, sowie die Begriffsbestimmungen dieses Kapitels basieren auf dem unveröffentlichten Skriptum der Universität für Bodenkultur Wien (KAITNA 2008), dem Handbuch für Naturgefahren (HÜBL et al. 2011), sowie den Unterlagen des Schweizer Bundesministeriums für Umwelt, Wald und Landschaft (KIENHOLZ et al. 1998 und HEINIMANN 1998). Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es je nach Fachliteratur verschiedene Ansätze zum Thema gibt vor allem über die hier zitierte Literatur hinaus und in der englischsprachigen Fachliteratur.

Sturz- und Rutschprozesse sind Massenbewegungen gravitativer Ursache, die im gesamten Alpenraum als charakteristische Prozesse vorkommen und alpine Naturgefahren darstellen können. Innerhalb dieser Gruppe der Sturzprozesse kann zwischen Steinschlag (Blocksturz), Felssturz und Bergsturz unterschieden werden.

Als Steinschlag, Block- und Felssturz wird prinzipiell der Verlagerungsprozess von isolierten Steinen und Blöcken verstanden. Dabei löst sich bei einem Felssturz ein größeres, mehr oder weniger fragmentiertes Gesteinspaket aus dem Gebirgsverband, das während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine weiter zerteilt werden kann. Ein Bergsturz beschreibt den Absturz sehr großer Felsmassen als Sturzstrom mit hohen Geschwindigkeiten.

Die Unterteilung des Sturzprozessraumes bzw. räumliche Gliederung erfolgt in HEINIMANN et al. 1998 nach GSTEIGER 1989 nach den 3 Teilbereichen (siehe Abbildung 1):

- An- bzw. Abbruchgebiet
- Transitstrecke (Sturzbahn)
- Ablagerungsgebiet

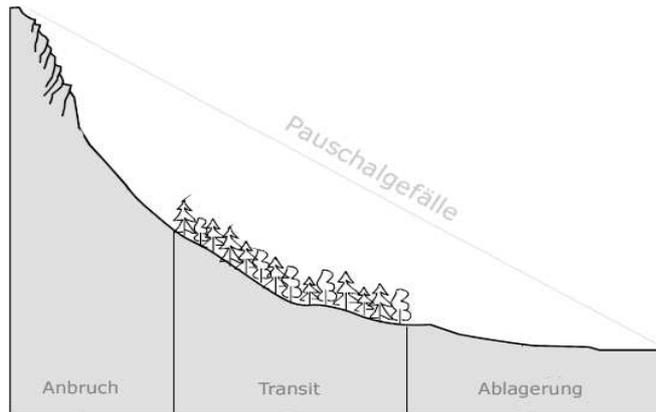


Abbildung 1: Gliederung (GSTEIGER 1989 in HEINIMANN et al. 1998, verändert).

Die Unterscheidung der Teilprozesse Steinschlag, Felssturz und Bergsturz erfolgt nach den Kriterien Durchmesser der Einzelkomponenten, nach dem Ausbruchsvolumen, der Ablagerungsfläche des Ereignisses und der Sturzgeschwindigkeit. Die im Zuge dieser Arbeit gewählten Kriterien zur Unterscheidung der einzelnen Prozesse werden in Tabelle 1 übersichtlich zusammengefasst.

	Durchmesser Einzelkomponenten [m]	Ausbruchsvolumen [m ³]	Ablagerungsfläche [ha]	Sturzgeschwindigkeit [m/s]
Steinschlag	$\varnothing < 0,5$	< 100	< 10	5 - 30
Blockschlag	$\varnothing > 0,5$	< 100	< 10	5 - 30
Felssturz	$\varnothing > 2$	100 - 100.000	< 10	10 - 40
Bergsturz	$\varnothing > 2$	> 100.000	> 10	> 40

Tabelle 1: Differenzierung von Sturzprozessen (LATELTIN 2001).

Die Definition der Durchmesser von Einzelkomponenten variiert je nach Wahl der Fachliteratur. Beispielsweise benennen DORREN et al. 2012a Kriterien zur Differenzierung von Sturzprozessen gemäß Schweizer Definition, die vor allem hinsichtlich der Ausbruchsvolumina von Fels- und Bergstürzen von der vorgestellten Einteilung abweichen.

Die gewählte Differenzierung nach LATELTIN 2001, unterscheidet sich zudem von der gängigen Klassifikation nach den Korngrößenkomponenten gemäß den geotechnischen Normen (u.a. ÖNORM EN ISO 14689-1). Die laut Norm festgelegte Grenze zwischen den Kornfraktionen Steine und Blöcke mineralischer Böden entspricht üblicherweise einem Korndurchmesser von 0,2 m.

Im Hinblick auf die Definition von Steinschlag bzw. Felssturz wird die Definition nach LATELTIN 2001 jedoch als zweckmäßig erachtet. Einen guten Überblick zur Begriffsdefinition bietet zudem der aktuelle Artikel von BOURRIER et al. 2013.

Bei den genannten Sturzprozessen handelt es sich nicht zwangsweise um Einzelergebnisse. Prinzipiell können sich an ein und derselben Stelle Ereignisse regelmäßig wiederholen. Im Auslaufbereich bilden sich oft Schutthalden oder Schuttkegel. Häufig befindet sich das Ablagerungsgebiet am Fuß einer Felswand und wird als Schutthalde bezeichnet, oder am unteren Ende einer Steinschlagrinne, die als Schuttkegel endet.

2.1.2 Ursachen und Auslösung

Als Herkunftsgebiet von Steinschlägen können neben Felswänden auch Lockergesteinsbereiche bestehend aus Sturzmaterial, Moränen, Gehängeschutt, etc. genannt werden. Das Auftreten von Sturzprozessen erfolgt abrupt, und ist alleine aufgrund des plötzlichen Auftretens schwierig zu prognostizieren (HÜBL et al. 2011).

Ob ein Felsverband oder Hangabschnitt zur Instabilität neigt und sich ein Steinschlag oder Felssturz lösen kann, hängt von verschiedenen Faktoren ab.

- Geologische Faktoren
- Klimatische Faktoren
- Vegetationsbedingte Faktoren
- Anthropogene Faktoren

Dazu kommen weitere Einflussgrößen bei Kontaktreaktion im Zuge von Sturzprozessen, die sich nach Auslösung und beim Ablauf (siehe Kapitel 2.2) nicht immer klar voneinander trennen lassen.

Als wichtigste Auslösemechanismen werden Frost-Tau Wechsel, wirksamer Kluftwasserdruck, Wurzeldruck, Kristallisationsdruck, Erschütterungen (Erdbeben, Sprengungen), Starkniederschläge, sowie sekundär Wind- und Sturmfolgen mit aufreißen der Bodenschicht und dem Herauslösen von Steinen, sowie destabilisierende Einwirkungen durch Mensch und Tier, wie Bauarbeiten, Waldarbeiten etc. (SPANG 1997, MEISZL 198, KAITNA 2008) genannt.

Mit zunehmender Hangneigung übersteigt die abwärts gerichtete „Hangabtriebskraft“ allmählich die „Haftreibungskraft“ und ein potentieller Sturzkörper kann sich in Bewegung setzen. In der Initialphase bei Auslösung und am Ende eines Stein-schlagprozesses steht zumeist eine Rutsch- bzw. Gleitbewegung der Sturzmasse (HEINIMANN et al. 1998). Welcher Bruchmechanismus infolge eines Festigkeitsverlustes und zum Versagen im Felsverband führt und eine Sturzbewegung einleitet, hängt nach MEISZL 1998 hauptsächlich vom Trennflächengefüge der zugrunde liegenden geologischen Verhältnisse ab. Einige häufige Bruchmechanismen sind unter anderem nach WYLLIE et al. 2004 das Gleiten (Felsrutschung), der Keilanbruch bzw. das Keilgleiten entlang zweier Trennflächen, das Kippen (engl. „Toppling“) bei steil abfallenden Trennflächen, sowie bei geringer Materialfestigkeit das Versagen ohne klare Struktur (Rotationsanbruch); dargestellt in Abbildung 2.

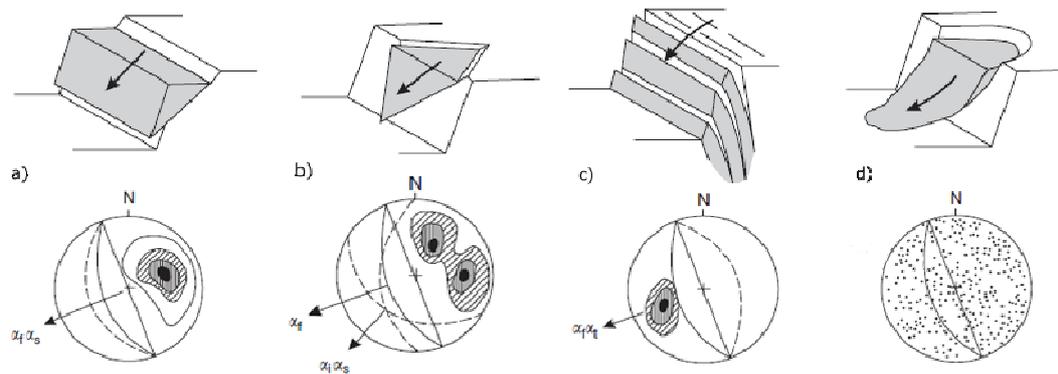


Abbildung 2: Haupttypen strukturgeologischer Versagensmechanismen: Blockgleiten (a), Keilgleiten durch Kombination zweier Trennflächen (b), Kippen (Toppling) von Blöcken (c), Rotationsanbruch bzw. Materialbruch (WYLLIE et al. 2004, verändert).

2.1.3 Mechanik des Sturzprozesses

Die potentielle Energie einer Sturzmasse ist abhängig von der Reliefenergie aufgrund des Höhenunterschiedes des Sturzraumes. Bei Loslösen einer Sturzmasse wirkt die kinetische Energie infolge der Bewegung der Sturzmassen in Abhängigkeit von der Masse (m) und der Geschwindigkeit (v). Sie entspricht der Arbeit, die aufgewendet werden muss, um das Objekt aus der Ruhe in die momentane Bewegung zu versetzen:

$$E_{trans} = \frac{mv^2}{2} \text{ [J]} \quad (\text{Formel 2.1})$$

Auf die Initialphase und das anfängliche Gleiten eines Sturzkörpers folgen in Abhängigkeit von den in Kapitel 2.2 erläuterten Einflussgrößen auf den weiteren Verlauf des Sturzprozesses, u.a. nach DORREN 2003, ERISMANN und ABELE 2001, sowie MEISZL 1998 die Bewegungsarten Gleiten, Fallen, Springen und Rollen. Diese Bewegungsarten treten normalerweise in Kombination und unter gegenseitiger Beeinflussung auf (AZZONI et al. 1991).

Beim Gleiten bewegt sich ein Block entlang einer Gleitfläche, wobei die Bewegung von der Haftreibung und der Hangneigung anhängig ist (MEISZL 1998).

Das Fallen („freier Fall“) findet naturgemäß nur an äußerst steilen Hängen statt. Der definierte Schwellenwert für das Einsetzen des Fallens wird in DORREN 2003 nach RITCHIE 1963 mit mehr als 70° Hangneigung angegeben. Je nach Fachliteratur unterscheiden sich diese Schwellenwerte geringfügig.

Sobald ein Sturzkörper mit der Geländeoberfläche kollidiert, ändert sich die Bewegungsart und geht je nach Blockgröße, Oberflächenbeschaffenheit und Hangneigung in einem Neigungsbereich zwischen 45° und 70° zum Springen über (DORREN 2003). Größere Blöcke neigen grundsätzlich eher zum Rollen als Kleine, springen über kürzere Distanzen hinweg und zerbrechen häufig nach größeren Sprüngen (MEISZL 1998).

Das Springen setzt sich aus dem Wechsel von Flugphasen entlang einer parabelförmigen Flugbahn und der Kollisionen mit dem Untergrund zusammen. Bei jedem Bodenkontakt wird Energie vernichtet und der Block erfährt in Abhängigkeit von Art und Winkel des Aufpralls eine Ablenkung (MEISZL 1998). Unabhängig ob ein Block beim ersten Bodenkontakt zerbricht oder nicht, erfährt er in der Regel eine Verminderung der aus der Initialphase wirksamen kinetischen Energie um bis zu 75-86 % (EVANS und HUNGR 1993). Sturzblöcke springen generell bei Hangneigungen zwischen 45°-70° (nach RITSCHIE 1963 in DORREN 2003).

Rollen ist definiert als die Rotation eines Sturzblockes um seine eigene Achse ohne Verlust des Bodenkontaktes. Bei mittleren Hangneigungen bis 45° stellt Rollen die dominierende Bewegungsart auf Sturzbahnen dar (DORREN 2003, MEISZL 1998).

Umso runder ein Block geformt ist und je näher sich sein Gravitationszentrum beim geometrischen Zentrum befindet, desto wahrscheinlicher ist das Rollen die dominierende Bewegungsart (ERISMANN und ABELE 2001). In der Praxis ist aufgrund von

Unregelmäßigkeiten der Blockform und Unebenheiten an der Geländeoberfläche ein reines Rollen kaum möglich. Ein Sturzblock beginnt zwangsläufig bei Verlust des permanenten Bodenkontakts zu springen.

Die Kombination zwischen Rollen und kurzen Sprüngen ist die energiegünstigste Fortbewegungsmethode (ERISMANN & ABELE 2001).

Die kinetische Energie (E_{kin}) einer Sturzbewegung resultiert gemäß DORREN 2003 zitiert nach AZZONI et al. 1995, sowie auch KAITNA 2008 aus Translations- (E_{trans}) und Rotationsbewegung (E_{rot}):

$$E_{kin} = E_{trans} + E_{rot} \quad (\text{Formel 2.2})$$

Der Anteil der Rotations- an der Gesamtenergie eines stürzenden Körpers ist in KÜHNE 2005 nach CHAU et al. 2002 in erster Linie neigungsabhängig. Als Richtgröße beträgt der Anteil der Rotationsenergie beim Rollen und Springen bei 20° etwa 10%, während sie bei 40° Hangneigung maximal noch 30% erreichen kann.

Verglichen nach MEISZL 1998 wirkt im Falle des Gleitens von Sturzkomponenten auf einer geneigten Ebene lediglich die Translationsenergie. Des Weiteren kann die Energie aus der Eigenrotation beim Fallen vernachlässigt werden. Der Energieverlauf einer Sturzbewegung wird in Abbildung 3 schematisch dargestellt:

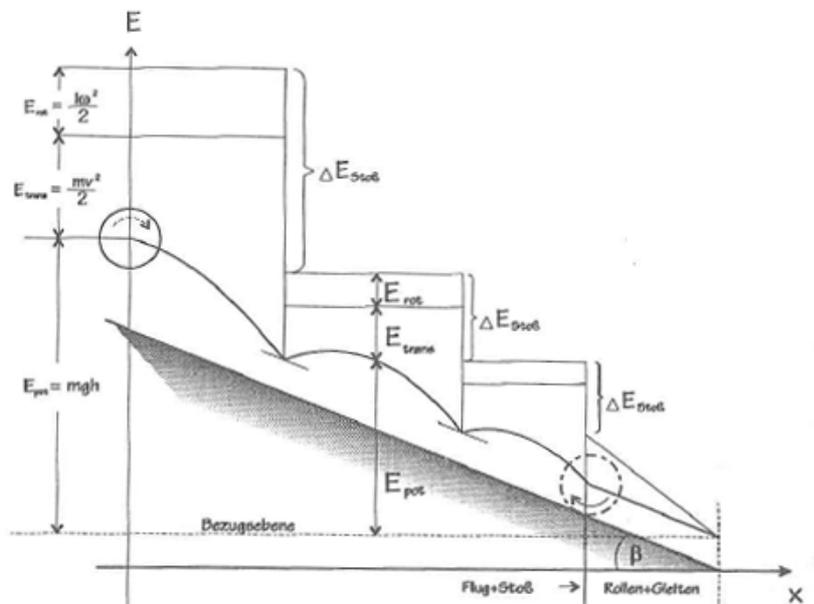


Abbildung 3: Energieverlauf (MEISZL 1998 nach GERBER et al. 1995)

Die Berechnung der Rotationsenergie erfolgt im Allgemeinen nach:

$$E_{rot} = \frac{I\omega^2}{2} \quad [\text{J}] \quad (\text{Formel 2.3})$$

Wobei I das Massenträgheitsmoment des Sturzkörpers und ω die Winkelgeschwindigkeit angibt.

$$I_{Kugel} = \frac{2}{5} m r^2 \quad (\text{Formel 2.4})$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (\text{Formel 2.5})$$

E_{kin}	kinetische Energie [J]	I_{Kugel}	Massenträgheitsmoment
E_{trans}	Translationsenergie [J]	ω	Winkelgeschwindigkeit
E_{rot}	Rotationsenergie [J]	r	Radius des Sturzblockes
m	Masse [kg]	v	Geschwindigkeit [m/s]

Die Winkelbeschleunigung eines rotierenden Körpers verringert die kinetische Energie eines Sturzkörpers verglichen mit der eines gleitenden Körpers (MEISZL 1998).

Weitere Berechnungsformeln zur Sturzmechanik unter Einbezug von Reibungswiderständen oder Sprungbewegungen sind dem Anhang Kapitel 9 zu entnehmen.

2.2 Kontaktreaktionen von Steinschlagprozessen

Faktoren für eine Auslösung, die Geschwindigkeit und die wirksame Energien bei Sturzbewegungen erfolgen in Abhängigkeit von zahlreichen Parametern und Einflussgrößen, die innerhalb des Prozessraumes wirken. Als maßgebliche Faktoren sind zu nennen:

- Topographie des Geländes (Relief, Hangneigung)
- Blockeigenschaften (Größe, Form, Masse, Rotationsfähigkeit)
- Geotechnische Eigenschaften des Untergrundes (Dämpfung, Rauigkeit)
- Vegetation (Schutzwirkung des Waldes)

Die nachfolgende Abbildung 4 ist eine schematische Darstellung von Einflussparametern auf den Steinschlagprozess, gemäß des Projektes "Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - NaiS"; ein Instrument für eine effiziente und nachhaltige Förderung der Schutzwirksamkeit des Waldes in der Schweiz.

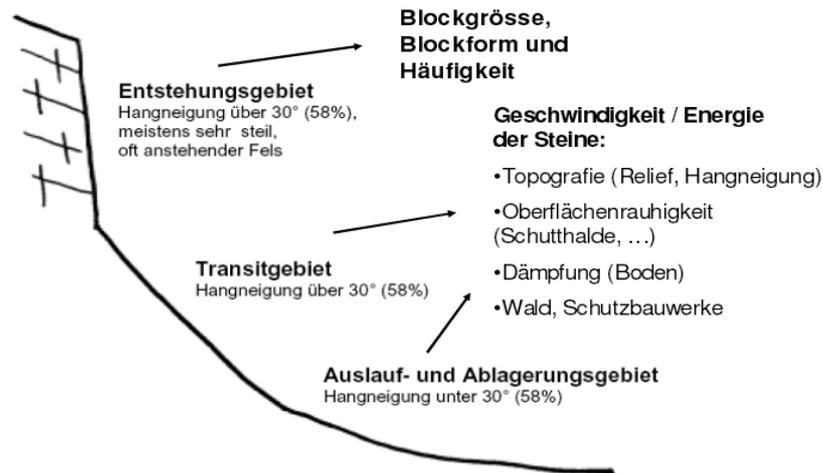


Abbildung 4: Einflussfaktoren bei Steinschlagprozessen (FREHNER et al. 2005).

2.2.1 Topographie

Die Disposition von Steinschlag wird maßgeblich durch topographische Faktoren bestimmt. Dazu zählen die absolute Höhendifferenz der gesamten Sturzbahn (Sturzhöhe), sowie die freie Fallhöhe von Blöcken, die Hangneigung und das Relief (MEISZL 1998).

Die direkt zur Normalkraft proportional wirkende Reibungskraft beeinflusst in Abhängigkeit von der Geländetopographie, welche Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit und Energie auf potentielle Sturzkörper wirkt (SPANG 1997, MEISZL 1998).

Entscheidend für den Bewegungsablauf des Sturzprozesses sind die wirksamen Beschleunigungs- und Verzögerungsstrecken, sowie die Ausprägung des Reliefs in Form von Geländeknicken, Hindernissen und der Wölbung bzw. Krümmung der Sturzbahn. Im Allgemeinen gilt, umso steiler ein Hang, desto geringer ist auch der Energieverlust bei Aufschlägen entlang der Sturzbahn (SPANG 1997, MEISZL 1998).

Unter anderem wird in HEINIMANN et al. 1998 nach GSTEIGER 1989 die kritische Hangneigung für das potentielle Einsetzen von Steinschlag als Schwellenwert zwischen 30-35° aufwärts definiert. Bei Unterschreiten einer Hangneigung von ca. 25-30°, kommen die Steine und Blöcke im Allgemeinen zu m Stillstand.

In SPANG 1997 wird festgehalten, dass kein absoluter Grenzwinkel für das Einsetzen von potentielltem Steinschlag existieren kann. Vielmehr bestimmen die Geomet-

rie des Steines und des Geländes (Geländestufen, Neigungssprünge), sowie die Oberflächenbeschaffenheit das vorherrschende Steinschlagpotential.

2.2.2 Blockeigenschaften

Die Blockform (vgl. Abbildung 5) wird durch die Länge der drei Hauptachsen und den Rundungsgrad beschrieben. Die Blockparameter definieren das Trägheitsmoment und die Rotationseigenschaften des stürzenden Blockes und sind in Kombination mit dem Relief entscheidend für die Bewegungsart (Rollen, Springen) und die Sturzbahn (HEINIMANN et al. 1998).

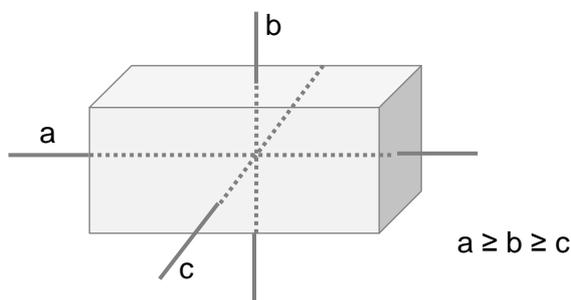


Abbildung 5: 3 Hauptachsen des Sturzblockes (KAITNA 2008).

Dabei tendieren rundere Blöcke vermehrt zum Rollen und Springen, während Steine mit mindestens einer oder mehreren abgeflachten Seiten überwiegend gleiten (ERISMANN et ABELE 2001, DORREN et al. 2006). Generell ist bei abgerundeten Blöcken neben der höheren Geschwindigkeit auch eine größere Beschleunigung und Reichweite als bei kantigen Blöcken zu erwarten (u.a. GERBER 1994, DORREN et al. 2006).

Bei kantigen, kubischen Blockformen wird der Energiegewinn eines stürzenden Blockes eher in Translationsenergie als in Rotationsenergie umgesetzt. Der Einfluss der lokalen Rauigkeit und der Oberflächeneigenschaften (Unebenheiten, kleine Hindernisse, Blöcke und Steine) ist höher als bei runden Blöcken (HEINIMANN et al. 1998).

Speziell plattige, scheibenförmige Steine tendieren dazu, sich vereinzelt wie ein Rad aufzustellen und rotieren bei sehr hoher Geschwindigkeit um ihre flache Seite. Blöcke dieser Art erreichen bei kleiner Reibung und geringer Baumtrefferwahrscheinlichkeit die höchsten Reichweiten (DORREN et al. 2006).

2.2.3 Geotechnische Eigenschaften

Oberflächenrauigkeit

Die Oberflächenbeschaffenheit entlang der Sturzbahn beeinflusst als Parameter der Rauigkeit den Reibungswiderstand im Ablauf des Sturzprozesses. Sie wird durch lokale Unebenheiten, Hindernisse, liegende Komponenten, Totholz oder Vegetation beeinflusst und vermindert gegebenenfalls die Energie des Sturzes. Dabei erreicht die Oberflächenbeschaffenheit die größte Bremswirkung, wenn die Unebenheiten die gleichen Maße wie die Hauptachsen der Sturzkomponenten haben. Ist das der Fall kann ein Stoppen des Sturzes innerhalb kurzer Strecken möglich sein (HEINIMANN et al. 1998).

Dämpfung des Untergrundes

Der Parameter der Dämpfung beschreibt die Eigenschaft des Untergrundes, bei Einschlag eines Sturzkörpers die kinetische Energie durch plastische Verformung bzw. Materialverdrängung zu reduzieren. In Abhängigkeit von den geotechnischen Eigenschaften und der lokalen Rauigkeit des Bodens können unterschiedliche Dämpfungseigenschaften beschrieben werden (HEINIMANN et al. 1998).

So wirken ein tiefgründiges Lockermaterial, Geröll oder lockerer Hangschutt als Bodenbedeckung dämpfender als anstehender Fels, größere Blöcke oder flachgründiges Lockermaterial (DORREN et al. 2004).

Die Parameter der Dämpfung müssen im Gelände oft generalisiert abgeschätzt werden, da häufig flächendeckende Kenntnisse über die geotechnischen Eigenschaften des Bodens fehlen.

2.2.4 Vegetationswirkung

Vegetation kann im Entstehungsgebiet von Steinschlag das Anbrechen von Steinschlag und Felsstürzen verhindern, aber auch mit verursachen. Im Transit- und Ablagerungsgebiet erfolgt unter Umständen über die Kontaktreaktion eines Sturzkörpers mit der Vegetationsbedeckung eine Reduktion der Bewegungsenergie (KÜHNE 2005, MEISZL 1998).

Gegebenenfalls vermögen die Vegetationsbedeckung und insbesondere das Wurzelwerk aufgelockerte Felsmassen zusammenzuhalten und die Bodenoberfläche zu

verfestigen, sodass „Sekundärstürze“ vor allem aus Lockergesteinsbereichen gehemmt werden können. Diese Wirkung bleibt zum Teil sogar über die Lebensdauer einer Pflanze hinaus erhalten (MEISZL 1998).

Weitere Einflussfaktoren der Vegetation stellen geminderten Temperaturschwankungen und eine abgeschwächte Temperaturverwitterung dar, sowie der Aufbau einer Streuschicht und somit eine sukzessive Bodenbildung mit einhergehender Hangstabilisierung (KÜHNE 2005).

Steinschlag- und felssturzfördernd wirken hingegen die Auswirkungen der Vegetation auf die biogene, physikalische und chemische Verwitterung. Das Wurzelwachstum, die Ausweitung von Gesteinsspalten, das Eindringen von Wasser, mechanische Beanspruchung, die chemische Zersetzung durch die Ausscheidung von Kohlensäure und organischen Säuren wirken sich hauptsächlich auf oberflächennahe Gesteinszonen aus (KÜHNE 2005, MEISZL 1998).

Die größte Vegetationswirkung auf Steinschlag und Blocksturz ist durch die Waldbestockung zu erwarten. Die Bestandesdichte, die Durchmesser- sowie offene vertikale Waldschneisen und quer liegende Bäume sind maßgebliche Parameter der Steinschlagaktivität (vgl. Kapitel 2.3.1; HEINIMANN et al. 1998).

2.3 Schutzwald

Das Österreichische Forstgesetz unterscheidet gemäß § 21 des BGBl.Nr.1 440/1975 idF BGBl. Nr.55/2007 (folglich ForstG) zwischen Standort- und Objektschutzwäldern.

Die Definition eines (Objekt-) Schutzwaldes besteht im Sinne des Bundesgesetzes dahingehend, Menschen, Sachwerte, sowie Infrastruktur gegen ein bestehendes Gefährdungspotential durch Naturgefahren (u.a. Steinschlag) zu schützen oder die damit verbundenen Risiken zu reduzieren. Ähnliches gilt auch nach Schweizer Definition (vgl. BAFU 2013, WEHRLI et al. 2007, FREHNER et al. 2005).

Die Bewirtschaftung von Schutzwäldern stellt eine effiziente, nachhaltige und kostengünstige Alternative zu technischen Schutzmaßnahmen gegen Steinschlag dar (u.a. DORREN et al. 2007, WEHRLI et al. 2007, FREHNER et al. 2005, DORREN et al 2005a, DORREN et al. 2005b, SCHWITTER et al. 1998, JAHN 1988).

Anhand einer Studie durch DORREN et al. 2005b wird belegt, dass an bewaldeten Steilhängen das Steinschlagrisiko um bis zu 63% gegenüber unbewaldeten Hängen verringert werden kann. In diesem Zusammenhang ist auch eine Reduktion der Geschwindigkeit um 26% und der Sprunghöhen um 33% festzustellen.

2.3.1 Waldwirkung

Die Wirkung des Waldes auf einen Sturzprozess ist entlang des Entstehungs-, Transit und Ablagerungsgebietes (vgl. Kapitel 2.1.1) unterschiedlich. Im Entstehungsgebiet kann sich der Waldbestand sowohl steinschlagfördernd als auch hemmend auf die Steinschlagaktivität auswirken. Einwirkungen auf die Steinschlagaktivität entstehen durch organisch-chemische Verwitterung und durch physikalisch-mechanische Einwirkung infolge von Spannungen vor allem durch das Wurzelsystem (u.a. FRENHNER et al. 2005, SCHWITTER et al. 1998, JAHN 1988).

Die Reichweite von Fels- und Blockstürzen wird in Wäldern maßgeblich von den Faktoren Blockgröße, kinetische Energie, Bestandsdichte (Stammzahl pro Fläche), Verteilung der mittleren Stammdurchmesser (Brusthöhendurchmesser - *BHD*), der Baumartenverteilung, sowie von offenen vertikalen Waldschneisen beeinflusst (DORREN et al. 2005b, SCHWITTER et al. 1998, HEINIMANN et al. 1998 nach GSTEIGER 1993).

Im Transitbereich einer Sturzstrecke erfolgt bei jeder Kontaktreaktion (vgl. Kapitel 2.2) eines Blockes mit einem Baum, eine teilweise Verringerung der kinetischen Energie, sowie der Geschwindigkeit und Sprunghöhe. Bei zunehmendem Volumen einer Sturzmasse (vgl. Felsstürze Kapitel 2.1.1), verringert sich jedoch die Schutzwirkung eines Waldbestandes (FRENHNER et al. 2005).

Für einen optimalen Steinschlagschutz sind nicht allein Bäume mit einem großen Stammdurchmesser erforderlich. Ein gut strukturierter Bestand mit einer breiten Verteilung der Stammdurchmesser, einer relativ hohen Stammzahl pro Fläche und dem Auftreten verschiedener Entwicklungsstufen (siehe Anhang Kapitel 9) erzielt mitunter die bestmögliche Schutzwirkung (DORREN et al. 2007, FRENHNER et al. 2005).

In Steinschlagversuchen von DORREN et al. 2005 wurde festgestellt, dass die Anzahl von Baumkontakten in der Regel wichtiger ist, als die Wirksamkeit der Energieabsorption eines einzigen Baumtreffers.

Liegendes Totholz im Transitgebiet erhöht die Oberflächenrauigkeit generell und steigert die Häufigkeit von Steinkontakten, wodurch wiederum die Steine abgebremst werden (FREHNER et al. 2005, SCHWITTER et al 1998).

Ein einzelner Baum reagiert auf verschiedene Weise auf Steinschlagtreffer. Dies geschieht durch Rotation und Translation des Wurzelsystems, Verformung und Schwingung des Baumstammes und durch lokale Einwirkung infolge Penetration des Stammes bis zum Stammbruch (DORREN et al. 2007, FOETZKI et al. 2004). Der wiederholte Kontakt mit Bäumen hat zur Folge, dass ein Stein kaum seine Maximalgeschwindigkeit erreicht und die kinetische Energie bei Sturzprozessen nicht vergrößert wird (SCHWITTER et al. 1998).

KALBERER 2006, BERGER & DORREN 2006, oder FOETZKI et al. 2004 untersuchen u.a. die mechanischen Stabilitätseigenschaften und die Energieabsorptionsfähigkeit von Einzelbäumen bei Steinschlagtreffern. Auch GERBER 1998 beschreibt statische und dynamische Versuche zur Bruchfestigkeit von Holz. Zusammenfassend veranschaulicht Abbildung 6 nach BERGER & DORREN 2006, die Beziehung verschiedener Baumarten und der maximalen kinetischen Energie, die durch einen Baum in Abhängigkeit vom Stammdurchmesser absorbiert werden kann. Generell ist die Widerstandsfähigkeit von Laubböhlern größer als die von Nadelhölzern. Die Absorptionsleistung einer Fichte mit einem Brusthöhendurchmesser von etwa 30 cm beträgt nach BERGER & DORREN 2006 etwa 180 kJ.

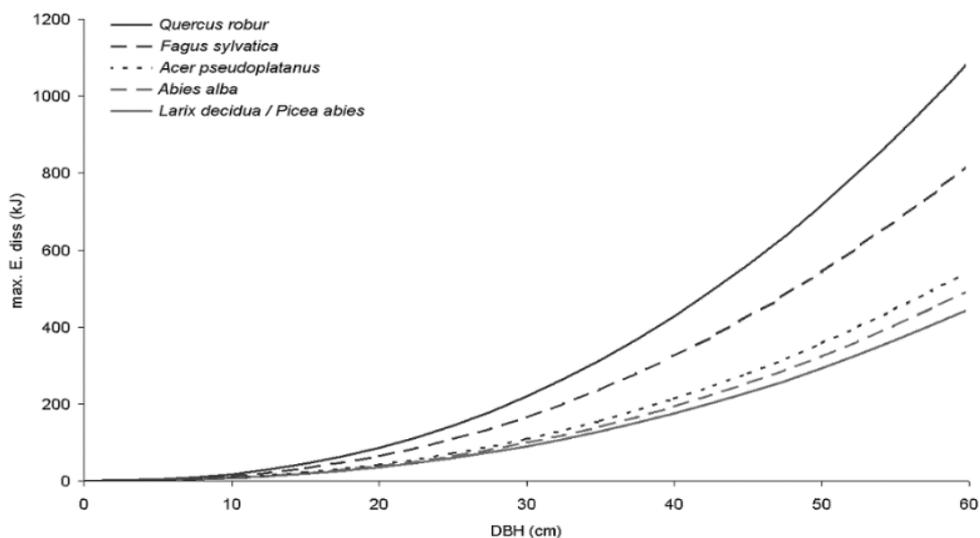


Abbildung 6: Beziehung zwischen den Baumarten, des Brusthöhendurchmessers (*BHD*) und der maximalen Energieabsorption von Baumstämmen (BERGER & DORREN 2006).

2.3.2 Anforderungsprofil Schutzwaldleistung

Allgemein gültige Anforderungen zur Optimierung der Schutzwaldleistung sind dem Schweizer Projekt „NaiS – Nachhaltigkeit und Kontrolle im Schutzwald“ (FREHNER et al. 2005) zu entnehmen. Die waldbaulichen Maßnahmen eines Schutzwaldes stützen sich auf der Annahme, dass es einen direkten Zusammenhang zwischen Risikominimierung und Waldzustand gibt. Das angestrebte Ziel der Schutzwaldpflege besteht darin, nach definierten Anforderungsprofilen einen stabilen und dauerhaften Waldzustand in Abhängigkeit der lokalen Standortverhältnisse zu etablieren. Anhand der Vorgaben von NaiS (vgl. Tabelle 2) kann die Zuverlässigkeit und damit die „Versagenswahrscheinlichkeit“ von Schutzwäldern qualitativ nachvollzogen werden.

Das Anforderungsprofil eines Schutzwaldes ist abhängig vom Schutzziel und setzt sich im Wesentlichen wie folgt aus den nach FREHNER et al. 2005 genannten Merkmalen zusammen:

- Baumartenzusammensetzung
- Gefüge horizontal und vertikal (u.a. Stammzahl, Altersstufen)
- Stabilitätsträger (Wuchsform, Zieldurchmesser)
- Verjüngung.

Nach FREHNER et al. 2005 ist eine minimale Länge von Transit- und/oder Ablageungsgebiet notwendig, damit eine Schutzfunktion des Waldes gegeben ist.

Eine Zusammenstellung des Anforderungsprofils zur Sicherstellung der Schutzwaldleistung gemäß NAI S (FREHNER et al 2005) ist Tabelle 2 zu entnehmen. Die vorgeschlagene Bestandsdichte ist unabhängig von der Größe und Energie des Steinschlags und wird mit bis zu 400 Bäumen pro Hektar (ha) bei einem BHD von mehr als 12 cm im Minimum angesetzt.

Ort	Potentieller Beitrag des Waldes	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr minimal	Anforderungen auf Grund der Naturgefahr ideal
Entstehungsgebiet	Mittel	Stabilitätsträger Keine instabilen, schweren Bäume	
Transitgebiet	Gross Steine bis 0,05 m ³ (Durchmesser etwa 40 cm)	Gefüge horizontal: Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	Gefüge horizontal: Mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		evt. auch Stockausschläge	
		Gefüge vertikal Zieldurchmesser ² angepasst	
	Steine 0,05 bis 0,20 m ³ (Durchmesser etwa 40 bis 60 cm)	Gefüge horizontal: Mind. 300 Bäume/ha mit BHD > 24 cm	Gefüge horizontal: Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 24 cm
	Gefüge vertikal Zieldurchmesser ² angepasst		
	Steine 0,20 bis 5,00 m ³ (Durchmesser etwa 60 bis 180 cm)	Gefüge horizontal: Mind. 150 Bäume/ha mit BHD > 36 cm	Gefüge horizontal: Mind. 200 Bäume/ha mit BHD > 36 cm
	Zusätzliche für alle Steingrößen:	Gefüge horizontal: Bei Öffnungen ¹ in der Falllinie Stammabstand < 20 m Liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen, falls keine Sturzgefahr	
		Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt
Auslauf- und Ablagerungsgebiet	Gross Der wirksame Mindestdurchmesser der Bäume ist deutlich geringer als im Transitgebiet und liegendes Holz ist immer wirksam	Gefüge horizontal Mind. 400 Bäume/ha mit BHD > 12 cm	Gefüge horizontal Mind. 600 Bäume/ha mit BHD > 12 cm
		Gefüge horizontal: Bei Öffnungen ¹ in der Falllinie Stammabstand < 20 m evt. auch Stockausschläge	
		Gefüge vertikal Zieldurchmesser angepasst liegendes Holz und hohe Stöcke: als Ergänzung zu stehenden Bäumen	
		Minimale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt	Ideale Anforderungen auf Grund des Standortstyps erfüllt

Tabelle 2: Anforderungsprofil Steinschlagschutzwald (FREHNER et al. 2005).

Durch gezielte Pflegemaßnahmen von Waldbeständen kann generell der Einsatz von technischen Verbauungen reduziert werden und zusätzlich die kalkulierten Einwirkungen aus Sprunghöhe und Energieeinwirkung zur Dimensionierung der technischen Verbauungsmaßnahmen minimiert werden (FREHNER et al. 2005).

Die nachhaltig mögliche Stammzahl eines Schutzwaldes wird aufgrund der Dynamik in den Entwicklungsphasen eines Bestandes beschränkt. In der Regel ist die Jugendphase durch eine hohe Stammzahl mit geringen Durchmessern gekennzeichnet, wogegen die Altersphase von wenigen, aber dicken Bäumen dominiert wird (FREHNER et al. 2006, DORREN et al 2005b).

Der Zieldurchmesser ist im Rahmen der Schutzwaldpflege an die erforderliche Stammzahl und dem wirksamen Mindestdurchmesser anzupassen. Das Bestimmen des wirksamen Mindestdurchmessers erfolgt u.a. nach der Faustregel von GSTEIGER 1998, wonach der mittlere BHD von Bäumen ungefähr einem Drittel der Größe des Bemessungsblockes zu entsprechen hat. Diese Faustregel wird durch Ergebnisse nach DORREN et. al. 2005b bestätigt. In SCHWITTER et al 1998 konn-

te davor die Gültigkeit der Faustregel weder bestätigt noch widerlegt werden. KALBERER 2007 stellt in seinen Untersuchungen zur Waldwirkung gegenüber Steinschlag ebenfalls fest, dass der Zieldurchmesser mit der Steingröße steigt.

Der wirksame Mindestdurchmesser ist von besonderer Bedeutung, da es vor allem bei großen wirksamen Mindestdurchmessern nicht immer möglich ist, eine nachhaltige Waldstruktur zur Erhaltung der Schutzwaldleistung umzusetzen. Im Auslauf- und Ablagerungsgebiet sowie bei kleinen Steinen auch im Transitgebiet sind schon Bäume ab 12 cm BHD wirksam (FREHNER et al. 2005).

Tabelle 3 zeigt in Abhängigkeit von Steingröße und –Volumen den minimalen Baumdurchmesser um Einfluss auf den Steinschlagprozess nehmen zu können.

Steingröße (m³)	Steingröße (Durchmesser)	Angenommener wirksamer Mindestdurchmesser
Bis 0.05 m³	Bis etwa 40 cm	Bis 20 cm BHD
0.05 m³ bis 0.20 m³	Etwa 40 cm bis 60 cm	20 - 35 cm BHD
0.20 m³ bis 5.00 m³	Über etwa 60 cm	Über 35 cm BHD

Tabelle 3: Wirksame Mindestdurchmesser (FREHNER et al. 2005).

Zur Beurteilung der Schutztauglichkeit von Waldbeständen wird u.a. in KALBERER 2006 nach GSTEIGER 1993 (vgl. DORREN et al. 2005a, DORREN et al. 2005b) aus der Bestandsdichte die mittlere baumfreie (hindernisfreie) Strecke (mbS) berechnet:

$$mbS = \frac{A_W}{StZ \cdot S_D + \sum BHD} \quad (\text{Formel 2.6})$$

<i>mbS</i>	<i>Mittlere baumfreie Strecke</i>	<i>S_D</i>	<i>Mittleren Steindurchmesser</i>
<i>A_W</i>	<i>Fläche</i>	<i>StZ</i>	<i>Stammzahl pro Fläche</i>
<i>BHD</i>	<i>Brusthöhendurchmesser</i>		

DORREN et al 2005 entwickelten dieses Konzept zur Beurteilung der Schutzwirkung eines Waldbestandes weiter. So ist nicht allein der mittlere Brusthöhendurchmesser eines Baumbestandes für die Schutzwirkung relevant, sondern auch die Grundfläche der Anzahl aller Baumstämme (G_{tot}):

$$mbS = \frac{A_W}{StZ \cdot (S_D + \sqrt{(4 \cdot G_{tot}) / (\pi \cdot StZ)})} \quad (\text{Formel 2.7})$$

<i>mbS</i>	<i>Mittlere baumfreie Strecke</i>	<i>S_D</i>	<i>Mittleren Steindurchmesser</i>
<i>A_W</i>	<i>Fläche</i>	<i>StZ</i>	<i>Stammzahl pro Fläche</i>
<i>G_{tot}</i>	<i>Grundfläche aller Stämme</i>		

Die Trefferwahrscheinlichkeit, dass ein Stein mit einem Baum entlang der Sturzbahn kollidiert, steigt je höher die Stammzahl und der mittlere BHD sind. Übersteigt nach diesem Konzept der baumfreie Abstand eine Strecke von maximal 40 m, ist in der Regel keine effektive Schutzwirkung mehr zu erwarten, da die Absorptionsleistung des Baumbestandes nicht ausreicht (DORREN et al. 2005).

In Anlehnung an die Richtwerte aus NAiS durch FREHNER et al. 2005 wird ein Limit der zulässigen, baumfreien Strecke von 20-40 m genannt.

SCHWITTER et al. 1998 verweist auf die bessere Widerstandsfähigkeit der Baumartenzusammensetzung von Tanne (*Abies alba*) und Lärche (*Larix europaea*) gegen Verletzungen durch Steinschlagtreffer als die Fichte (*Picea abies*). Laubgehölze wie der Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*) sind besonders widerstandsfähig.

2.4 Modellierungsansätze

Zur Modellierung von Sturzprozessen existieren verschiedene Modellierungsansätze. Einen Überblick und Vergleich von verschiedenen Ansätzen zur Sturzmechanik von Steinschlägen bietet DORREN 2003. In Anlehnung an HEINIMANN et al. 1998, bzw. MEISZL 1998 wird zwischen zwei grundlegenden Modelltypen unterschieden:

- Dispositionsmodelle
- Prozessmodelle.

Dispositionsmodelle sind demnach statische Modelle zur Erfassung potentieller Gefahrenquellen aufgrund der zugrunde liegenden Naturraumparameter. Indikatoren zur Klassifikationen von Auslösebereichen sind u.a. die Geologie, Hanginstabilitäten, Geländeform, Hangneigung, Bodenbedeckung etc.. Prozessmodelle (Verlagerungsmodelle) sind hingegen dynamische Modelle zur Beschreibung des Ablaufs eines Sturzprozesses. Sie dienen der Ermittlung möglicher Sturzbahnen (vgl. Trajektorienmodell), oder beschreiben Geschwindigkeit, kinetische Energie, Sprunghöhe oder die Reichweite von Sturzprozessen (HEINIMANN et al. 1998).

In Anlehnung an DORREN et al. 2012a sind die in der Praxis zum Einsatz kommenden Modellierungsansätze zur Sturzgefahrenbeurteilung:

- Geometrische Modelle (2D oder 3D)
- Prozessbasierte Felssturzmodelle (2D oder 3D)

Diese Arten der Modellierung werden als zweidimensionale (2D) oder dreidimensionale (3D) Modelle eingesetzt.

Aktuelle Programme zur Sturzmodellierung sind nach DORREN et al. 2012a u.a. CRSP, EBOUL, RocFall, Rockfall V7.1, RockFall Analyst, Rockyfor3D und Zingger+Geotest. ROVINA et al. 2011 vergleicht Vor- und Nachteile dieser Programme und veröffentlicht Empfehlungen für deren Umgang in der Sturzmodellierung.

Nach DORREN et al. 2012a treten bei gängigen Programmen zur Sturzmodellierung erhebliche Unterschiede in den Resultaten auf. Zwar werden Energie, Geschwindigkeit, Sprunghöhen und Auslaufdistancen anhand der gleichen physikalischen Grundlagen simuliert, jedoch sind die Ergebnisse jeder Simulation stark von der Kalibration einzelner Modellparameter abhängig. Ein Vergleich der Modellresultate mit der Realität unterliegt mitunter starken Abweichungen und eine entsprechende Plausibilitätskontrolle mit Erkenntnissen vor allem aus Geländebegehung (vgl. mit Stummen Zeugen) ist unumgänglich.

2.4.1 Geometrische Modelle

In DORREN 2003 werden geometrische Modelle als empirischer Modellierungsansatz bezeichnet, die einen statistischen Zusammenhang zwischen topographischen Faktoren, wie der Fallhöhe und Reichweite von Sturzprozessen herstellen.

Geometrische Modelle basieren u.a. nach DORREN et al. 2012a auf dem Prinzip des Pauschalgefälles nach HEIM 1932 (vgl. JABOYEDOFF & LABIOUSE 2011, DORREN 2003, HEINIMANN et.al. 1998, MEISZL 1998, GERBER 1994, EVANS und HUNGR 1993 und KÖRNER 1980).

Basierend auf Auswertungen von Sturzprozessräumen ergibt sich für ähnliche Sturzbewegungen ein charakteristischer Wertebereich eines Pauschalgefälles zwischen den Prozessbereichen Auslöseort, Transit- und Ablagerungsbereich (vgl. DORREN et al. 2012a, JABOYEDOFF & LABIOUSE 2011, HEINIMANN et.al. 1998, MEISZL 1998, GERBER 1994, EVANS und HUNGR 1993 und KÖRNER 1980).

Dabei markiert das Pauschalgefälle die kürzeste Verbindung zwischen dem Auslösebereich und Ablagerungsbereich einer Massenbewegung (vgl. Kapitel 2.1.1, Abbildung 1). Das Pauschalgefälle ist somit definiert als der Winkel α der Gesamtfallhöhe (h) dividiert durch die horizontale Reichweite (r) (vgl. KÖRNER 1980):

$$\text{Pauschalgefälle} = \frac{\text{Gesamtfallhöhe } h}{\text{Reichweite } r} = \tan \alpha \quad (\text{Formel 2.8})$$

Die Pauschalgefällemethode wird in der Praxis häufig als erste Näherung zur Abschätzung der maximalen Reichweite von potentiellen Massenbewegungen angewandt. Die Reichweitenermittlung nach der Methode ist Kapitel 4.3 zu entnehmen.

2.4.2 Prozessorientierte Felssturzmodelle

Trajektorienmodelle, Reichweitenmodelle bzw. Reibungsmodelle sind nach MEISZL 1998, HEINIMANN et al. 1998 prozessorientierte, dynamische Felssturzmodelle und dienen der Beschreibung der Kinematik von Sturzprozessen. Unter Berücksichtigung physikalischer Parameter wird versucht den natürlichen Prozessverlauf (Geschwindigkeit, Energie, Energieverluste, Sprunghöhen, Druckwirkungen, Auslaufstrecken usw.) so realitätsnah wie möglich nachzustellen (MELZNER & PREH 2012, HEINIMANN et al. 1998).

Ein signifikantes Kriterium zur Unterscheidung der verschiedenen Prozessmodelle stellt der jeweilige Berechnungsansatz und die Implementierung der Eingangsparameter (u.a. Blockeigenschaften, Dämpfung, Reibung, Rollwiderstand, etc.) dar (u.a. MELZNER & PREH 2012, VOLKWEIN et al. 2011, DORREN 2003, MEISZL 1998).

Der Sturzprozess wird zur Modellierung in seine physikalischen Komponenten zerlegt und eine Simulation solange fortgesetzt, bis ein definiertes Abbruchkriterium erfüllt ist und das Ende eines Sturzprozesses markiert. Solche Abbruchkriterien sind beispielsweise nach MEISZL 1998 das Unterschreiten kritischer Geschwindigkeiten bzw. kritischer kinetischer Sturzenergien. Bei empirischen Modellen wird häufig auch das Unterschreiten eines geometrischen Gefälles als Abbruchkriterium festgelegt (MEISZL 1998).

Trajektorienmodelle berechnen auf Basis eines Hangprofils (2D) oder digitalen Geländemodells (DGM, 3D) die Sturzbahnen einzelner Blöcke (Trajektorien), sowie Translations- und Rotationsenergie, Durchgangsfrequenz und Sprunghöhe der Einzelblöcke. Diese Parameter liefern notwendige Erkenntnisse vor allem zur Planung geeigneter Schutzmaßnahmen (DORREN et al. 2012a, VOLKWEIN 2011).

Für die Durchführung der Modellierung ist die Vorgabe potentieller Ausbruchsgebiete, der Blockgrößen und die für den Sturzprozess relevanten Geländeparameter er-

forderlich (ROVINA et al. 2011). Dämpfungs- und Rauigkeitseigenschaften entlang der Transitstrecke werden bei der Modellierung berücksichtigt.

Die Ermittlung von Sturzbahnen erfolgt nach verschiedenen, iterativen Pfadfindungsalgorithmen, die auf das gerasterte Geländemodell angewendet werden (vgl. 4.4). Je nach Algorithmus werden benachbarte Rasterzellen bei der Modellierung berücksichtigt und unterschieden als (vgl. MEISZL 1998):

- Single-Flow-Direction Verfahren oder
- Multiple-Flow-Direction Verfahren.

Verfahren nach dem Single-Flow-Direction Prinzip ermitteln einzelne Pfade in Falllinie entlang benachbarter Pixel des Rastermodells. Gemäß MEISZL 1998 ist die häufigste Methode nach JENSON & DOMINGUE 1988 „D8“. Ausgehend von einem Startpixel wird die Falllinie aus den umgebenden 8 Nachbarpixeln errechnet (MEISZL 1998).

Multiple-Flow-Direction Verfahren ermöglichen hingegen eine divergente Pfadfindung über mehrere, tieferliegende Rasterzellen des Geländemodells unabhängig von der Falllinie. Ein häufig zur Anwendung kommendes Verfahren ist „*Random Walk*“ u.a. gemäß JABOYEDOFF et al. 2011 nach GAMMA 2000. Nach diesem Ansatz erfolgt die Wahl der Nachfolgerzelle zufällig, jedoch unter Berücksichtigung der Hangneigung und der bisherigen Sturzrichtung des Prozesses (vgl. MEISZL 1998).

Der Vorteil von 3D-Modellen gegenüber zweidimensionalen Profilschnitten, resultiert aus der großflächigen Analyse von Geländeformen und dem Erkennen von Rinnen und Mulden, die bevorzugte Sturzbahnen (Trajektorien) von Sturzprozessen darstellen können (ROVINA et al. 2011).

3 UNTERSUCHUNGSGEBIET GSCHWENDNERBERG

3.1 Geographische Beschreibung

Das Projektgebiet befindet sich bei St.Pankraz an der A9 Pyhrn Autobahn, etwa 40 km südlich vom Autobahnknoten Voralpenkreuz und 75 km südlich von Linz. Das Gemeindegebiet von St.Pankraz ist dem politischen Bezirk Kirchberg a.d. Krems in Oberösterreich bzw. der Region Traunviertel zuzuordnen.

St.Pankraz befindet sich in Tallage auf einer Niederterrasse des Teichtals, etwa auf einer Seehöhe von 570 m. Die Teichl verläuft hier mäandrierend an der orographisch rechten Talseite und ist etwa 10 m tiefer in die Terrassenschotter des Talbodens eingeschnitten als der überwiegende Teil der Talsohle.

Nördlich wird das Teichtal durch das Sengsengebirge, südlich durch den Gschwendnerberg mit einer Seehöhe von 1063 m und den Schölmborg (Seehöhe 960 m) begrenzt. Dieser vorgelagerte Höhenzug ist räumlich den Salzkammergut-Voralpen als Teil der Nördlichen Kalkalpen zuzuordnen.

Das Untersuchungsgebiet ist an den nordöstlichen Abhängen des Gschwendnerberges situiert und bildet die orographisch linke Talflanke des Teichtals bei St.Pankraz. Nordwestlich des Gschwendnerberges befindet sich das Steyrtal; südöstlich der Schalchgraben. Entlang des Hangfußes zum Teichtal verläuft die A9 Pyhrn Autobahn; daran anschließend die Bundesstraße B138 und die Bahnstrecke Pyhrnbahn der ÖBB.

Abbildung 7 beinhaltet ein Überblicksfoto des Untersuchungsgebietes.



Abbildung 7: Überblick über das Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).

Die folgende Abbildung 8 zeigt die Lage des Untersuchungsgebietes anhand einer Übersichtskarte (AMAP Austria):

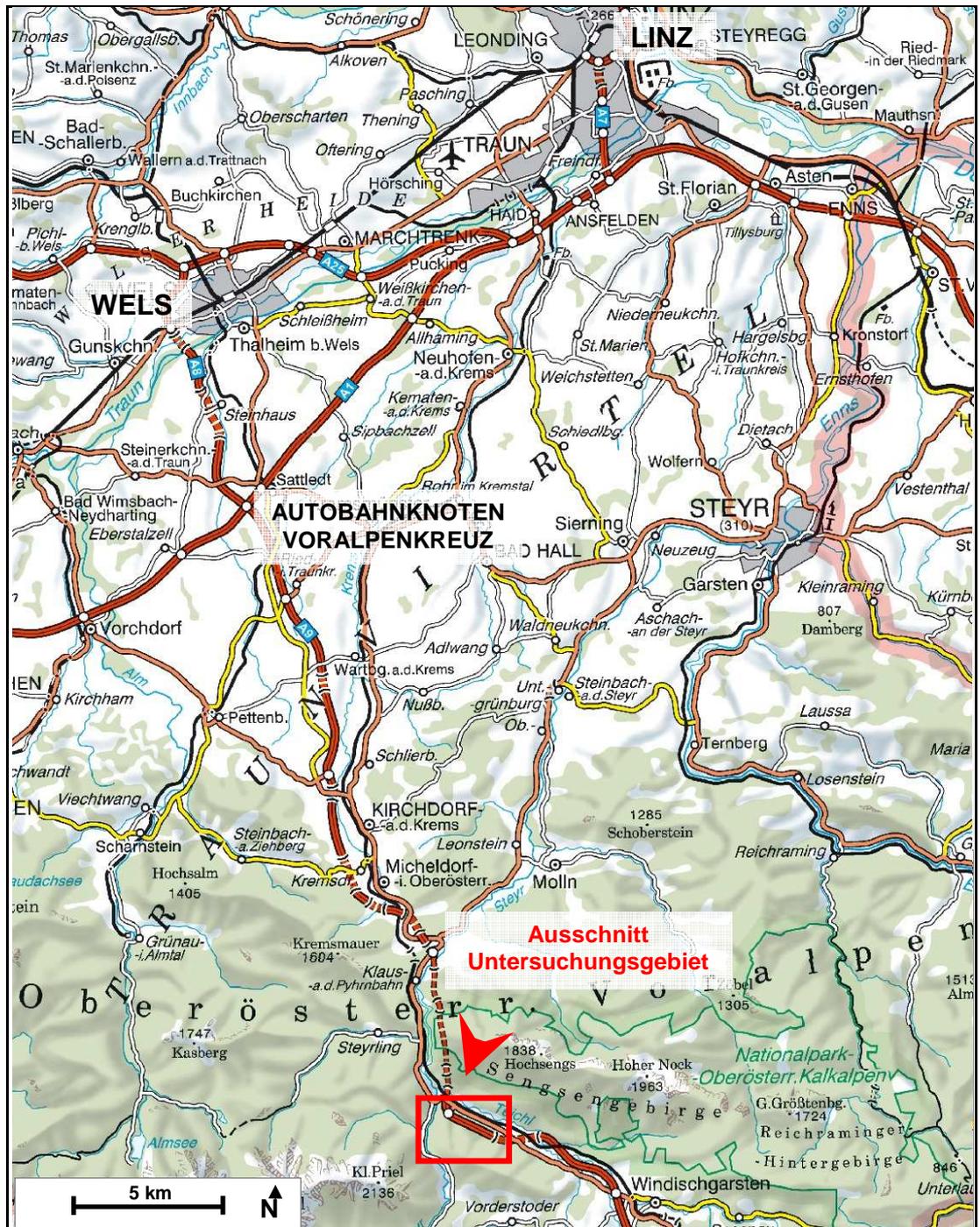


Abbildung 8: Topographische Übersichtskarte des Projektgebietes (BEV 2012).

Im Detail sind als Projekt- und Bearbeitungsgebiet die nordöstlichen Abhänge des Gschwendnerberges bis zur Trasse der A9 Pyhrn Autobahn anzusehen, von denen aufgrund der topographischen Rahmenbedingungen ein Steinschlagpotential erwart-

tet werden kann. Diese Diplomarbeit umfasst in Hinblick auf den aktuellen Waldbestand und die bereits existierenden Verbauungsmaßnahmen nur repräsentative Teile des insgesamt von Steinschlag gefährdeten Bereichs an der A9 Pyhrn Autobahn zwischen dem Tunnel St.Pankraz, zirka bei Autobahn km 38,500 bis zum Lainbergtunnel bei etwa km 39,835.

Die folgende Abbildung 9 zeigt rot schraffiert die Lage des Untersuchungsgebietes anhand einer Übersichtskarte (AMAP Austria):

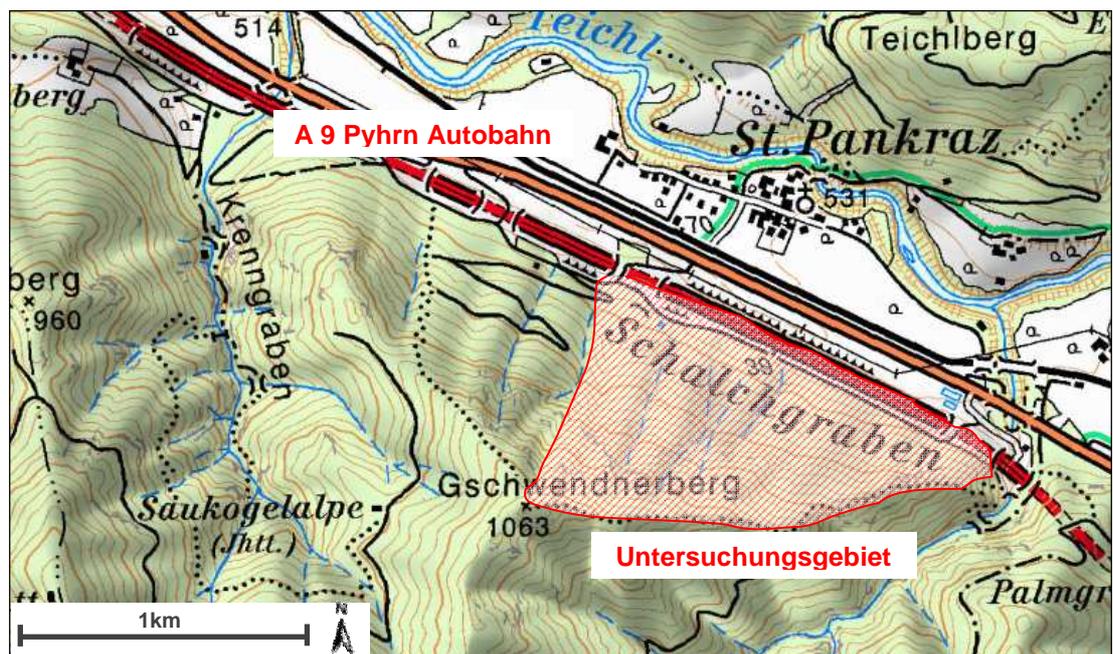


Abbildung 9: Topographische Karte des Projektgebietes (BEV 2012).

3.2 Klimatische Rahmenbedingungen

Die klimatischen Verhältnisse des Untersuchungsgebietes entsprechen gemäß den langjährigen Klimadaten von Österreich herausgegeben durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG 2013), sowie nach AUER (1998) und der Naturraumkartierung der OBERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG (2008), dem mitteleuropäischen Übergangsklima der warmgemäßigten Zone mit ausreichenden Niederschlägen zu allen Jahreszeiten, milden Sommern und mäßig kalten Wintern.

Die Beschreibung der Klimanormalwerte erfolgt anhand der Klimadaten von 1971-2000, gemessen an der nächstgelegene Klimastation der ZAMG in Windischgarsten

(Seehöhe 600 m.ü.A.), etwa 11 km vom Untersuchungsgebiet entfernt. Die Parameter Lufttemperatur und Niederschlag werden zusammengefasst als Klimadiagramm in Abbildung 10 dargestellt.

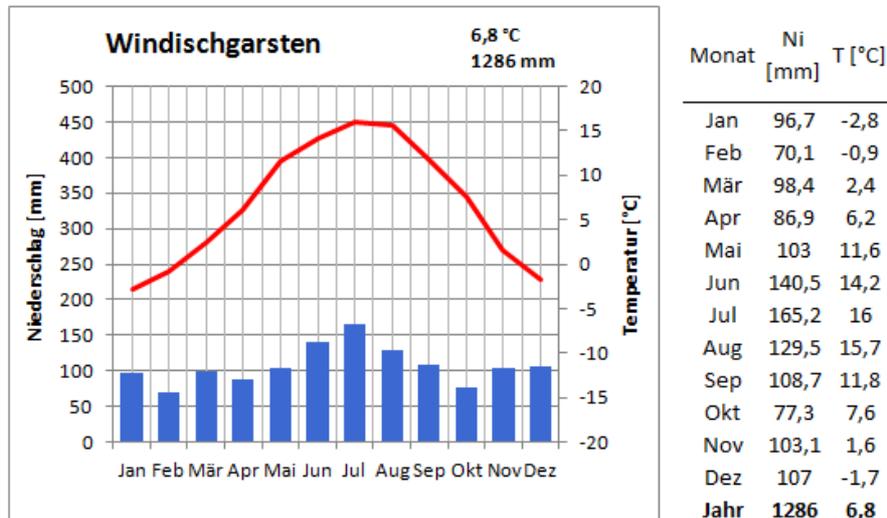


Abbildung 10: Klimadiagramm Windischgarsten (ZAMG 2013, verändert).

Die durchschnittliche Lufttemperatur von Windischgarsten beträgt 6,8°C. Das Monatsmittel im Juli und August beträgt 15,8°C, im Dezember und Januar -1,9°C. Etwa 37 Tage pro Jahr werden mit Temperaturen von über 25°C als Sommertage bezeichnet. Mit zunehmender Seehöhe nimmt die Lufttemperatur ab. Pro Jahr werden im Mittel eine Sonnenscheindauer von 1688 Stunden und eine relative Sonnenscheindauer von 42,4 Prozent erreicht.

Die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge beträgt an dieser Station 1286 mm. Im Allgemeinen herrscht ein humides Stauklima. Aufgrund der ausgeprägten Leelage südlich des Sengsengebirges wird jedoch die Gesamtniederschlagsmenge etwas abgemindert. Der durchschnittliche Jahrgang der Niederschlagsverteilung zeigt ein ausgeprägtes Niederschlagsmaximum mit Sommerregen von 165 mm im Juli, sowie einem sekundären Maximum von 107 mm im Dezember. Etwa ein Zehntel der Winterniederschläge tritt als Schneefall auf. Die Schneedecke kann von Mitte November bis Mitte April liegen bleiben. Die Zahl der Gewittertage pro Jahr beträgt durchschnittlich 16 Tage. Die relative Luftfeuchtigkeit schwankt im Jahresmittel zwischen 90,5 % morgens und 63 % mittags. An durchschnittlich 134 Tagen im Jahr herrscht Frost und an 26 Tagen liegt das Maximum der Tageshöchsttemperatur unter 0°C.

Das Monatsmittel der Windgeschwindigkeit erreicht etwa 1,2 m/s bei dominierenden Nordwestwinden entlang des Teichtals. Generell können lokale Windeinflüsse als maßgebend erachtet werden. Die stärksten Winde sind vor allem im Winter und Frühjahr zu erwarten. Besonders starke Winde sind im Winter neben talauswärts streichenden Luftbewegungen auch föhnartige Südwest- und Südostwinde zu erwarten. Im Allgemeinen nimmt mit zunehmender Seehöhe die Windstärke zu.

3.3 Regionalgeologischer Überblick

Das Projektgebiet bei St.Pankraz ist im Wesentlichen den Nördlichen Kalkalpen zuzuordnen. Das anstehende Gestein der Region ist in dessen Struktur und Tektonik nach den hier vorherrschenden Deckensystemen gegliedert und besteht gemäß MÖBUS (1997), sowie der geologisch-geotechnischen Beurteilung nach BRANDECKER (1972 und 1988) und BECHTOLD (2002) zumeist aus triassischen Dolomit bzw. Kalkstein (Hauptdolomit Einheit bzw. Dachsteinformation).

Im Allgemeinen wechseln sich Wetterstein Einheit (Kalk und Dolomit), Lunzer Schichten (Sandstein und Tonschiefer) und Werfener Schichten (Quarzit, Kalkstein, Schiefer) immer wieder ab, wie der geologische Überblick nach DORIS (2012), dem Digitalen Oberösterreichischen Raum-Informationssystem der Oberösterreichischen Landesregierung gemäß Abbildung 11 zeigt:

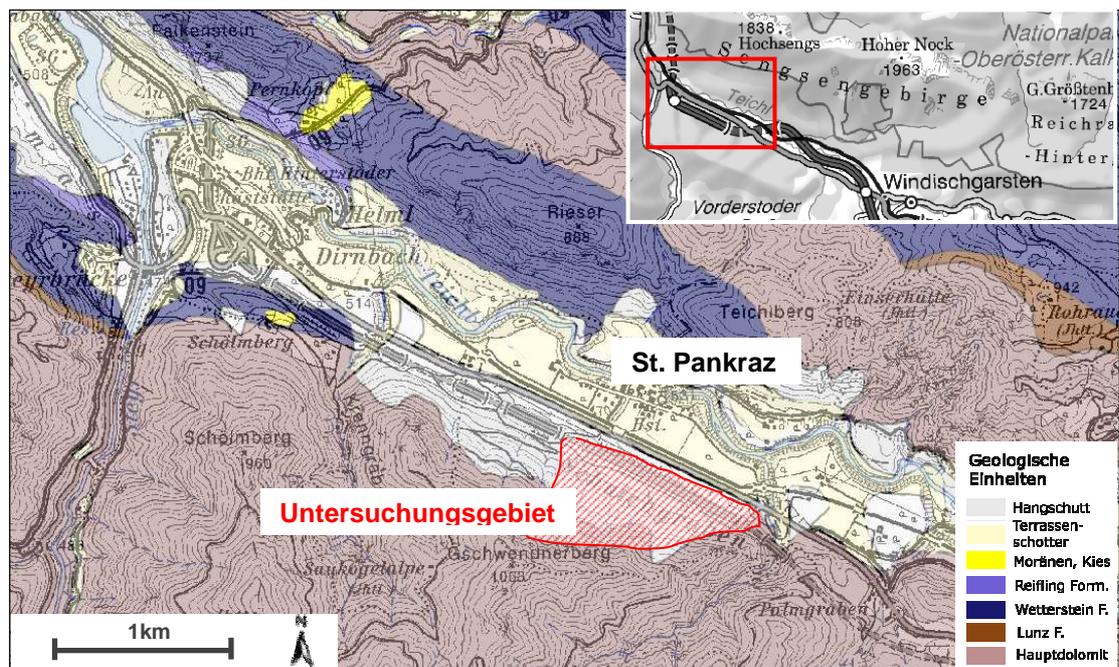


Abbildung 11: Geologische Übersichtskarte (DORIS 2012, verändert)

Das Teichtal folgt einer ausgeprägten und breiten, alttertiären Störungszone, die als „Windischgarstener Störungszone“ bezeichnet wird. Vor allem rund um Windischgarsten treten im Bereich der Störungszone an mehreren geologischen Fenstern, Sedimente der Flyschzone an die Oberfläche. Die westlichen Ausläufer des Sengengebirges bestehen überwiegend aus Wettersteinkalk. Die Staufenhöllengebirgs-Decke überlagert in diesem Bereich die Reichraminger Decke und prägt die Landschaft durch das Ausbilden von Felsmauern aus massivem Riffkalk, schroffen Felspartien und Schutthalden.

Entlang der Hauptstörungszone entwickelte die glaziale Ausschürfung während der Eiszeiten ein breites, trogförmiges Tal, das mit mächtigen quartären Ablagerungen verfüllt worden ist. Die Talfüllungen bestehen aus glazialen Ablagerungen und Sedimenten der Gosau, bei denen es sich meistens um flyschoide Abfolgen von Mergel, Sandstein und Konglomeraten handelt. Die quartären Talbodensedimente setzen sich in diesen Bereich aus einer zumeist uneinheitlichen Abfolge aus unterschiedlich plastischen Schluffen bzw. Tonen sowie wechselnd schluffigen bzw. kiesigen Sanden zusammen.

Das Untersuchungsgebiet am Gschwendnerberg kann gemäß Brandecker (1972 und 1988) grundsätzlich der Reichraminger Decke zugeordnet werden. Das anstehende Gestein setzt sich aus grauem, grobklüftigem und sehr erosionsanfälligem Hauptdolomit zusammen, der teilweise zwischen Schalch- und Krenngraben bis zu 70° steil talwärts einfällt. Die abwechslungsreiche Morphologie des Projektgebietes ist geprägt von den vorhandenen Dolomitrippen und daher stark felsig und schroff. Sowohl der Schalch-, als auch der Krenngraben sind Erosionsgräben, die sich tief entlang von bruchtektonischen Störungen quer zur „Windischgarstener Zone“ in den anstehenden Fels und die Überdeckung eingeschnitten haben.

Aufgrund von Erkundungsbohrungen im Zuge einer geologisch-geotechnischen Beurteilung im Rahmen des Bauvorhabens der A9 Pyhrn Autobahn kann der anstehende Fels (Hauptdolomit Formation) weiters als durchwegs mäßig bankiger, oft stark zerklüfteter Hauptdolomit bezeichnet werden. Die talseitig den anstehenden Fels überdeckenden fluvioglazialen Lockersedimente bestehen einerseits aus vorgelagertem, teilweise glazial geprägtem Dolomit- Hangschutt, sowie in tieferen Lagen aus mächtigen Terrassenschottern. Die Autobahntrasse verläuft entlang des Verzahnungsbereiches der fluvioglazialen Hangschuttmassen mit den Terrassenschottern und den Dolomit-Hangschuttmassen, sowie im Vorstoßbereich der

Schwemm- und Murenschuttfächer aus den Seitengräben. Der aus diesen Schottern aufgebaute Hangfuß ist im Bereich der Autobahntrasse stark verflacht und steilt bergseitig zusehends auf.

Hangaufwärts und entlang des Bergrückens sind wiederholt anstehende Felsköpfe des Hauptdolomits, die die Lockergesteinsbedeckung durchbrechen und teilweise kleinere, freistehende Felsköpfe und -rippen bis zu einer Höhe von etwa 10-15 m ausbilden. Die höchsten Wand- und Felsköpfe liegen außerhalb des Untersuchungsgebietes an den nordwestlichen Hangflanken des Gschwendnerberges. Sie erreichen Höhen bis etwa 40 m.

Örtlich sind insbesondere im mittleren Abschnitt des Gschwendnerberges bei Autobahn km 38,500 ein lokal seichtes Hangkriechen in den oberflächennahen Bodenschichten festzustellen. Im Übrigen ist die Kohäsion der grusigen Hangschuttmassen auch aufgrund der selten vorkommenden und geringen Hangsicht- und Sickerwässer beachtlich. Hangparallele Strömungsdrücke und eine Verringerung der Kohäsion treten kaum auf. Der Grundwasserspiegel innerhalb der Terrassenschotter ist tief liegend und korrespondiert vermutlich mit dem Wasserspiegel von Teichl und Steyr.

3.4 Beschreibung der Vegetation

Das Projektgebiet kann gemäß einer Zuordnung nach den forstlichen Wuchsgebieten Österreichs (vgl. KILIAN et al. 1994), dem östlichen Teil der Nördlichen Randalpen, Wuchsgebiet 4.2., beziehungsweise nach MAYER 1974, dem nördlichen randalpinen Fichten-Tannen-Buchenwaldgebiet, östlicher Wuchsbezirk zugewiesen werden. Das entspricht dem Verbreitungsgebiet der natürlichen Waldgesellschaft von Fichten-Tannen-Buchenwäldern der tief- bis mittelmontanen Stufe zwischen zirka 600 m und 1200 m Seehöhe.

Der Waldboden in diesem Bereich wird gemäß der Charakteristik von Kalk- und Dolomitböden vom Bodentyp der Rendsina dominiert, sowie durch Braun- und Kalkbraunerde ergänzt. Im Projektgebiet ist ein flachgründiger Boden vorherrschend, welcher grundsätzlich zwei Bodenhorizonte (Ah/C-Boden) aufweist und nur lokal auch einen B-Horizont, oder Verwitterungshorizont entwickelt. Der vorhandene Verwitterungslehm ist bereits dem C-Horizont und somit bodenkundlich dem Ausgangsgestein zuzuordnen.

3.4.1 Natürliche Waldgesellschaft

Die natürliche Waldgesellschaft eines Bergwaldes der tiefmontanen bis mittelmontanen Höhenstufe bietet nach KILIAN 1994 eine ausgeglichene Mischung der genannten Hauptbaumarten Fichte (*picea abies*), Tanne (*abies alba*) und Buche (*fagus sylvatica*) und zahlreichen Nebenbaumarten wie Bergahorn (*acer pseudoplatanus*), Esche (*fraxinus excelsior*), Waldkiefer bzw. Rotföhre (*pinus sylvestris*), Bergulme (*ulmus glabra*), sowie an klimatisch begünstigten Standorten auch Eiche (*quercus robur*). Gegenüber dem westlichen Wuchsgebiet 4.1, der Nördlichen Randalpen ist ein verstärktes Vorkommen von Rotföhrenwäldern auf Dolomit zu erwarten.

Die Vegetationseinheiten der Region werden auch durch den Endbericht der Naturraumkartierung Oberösterreichs gemäß der Biotopkartierung der Gemeinde St.Pankraz durch die OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG (2008) beschrieben. Der tatsächliche Bestand, die Struktur und die Baumartenzusammensetzung richten sich letztendlich nach den lokalklimatischen und geländebedingten Standortfaktoren, die im gegenständlichen Projektgebiet durch die nordöstliche Exposition und die zum Teil steilen, felsigen Hangpartien geprägt werden. Die Standortbedingungen können als ungünstig eingestuft werden.

3.4.2 Aktuelle Waldgesellschaft

Der aktuelle Waldbestand des Projektgebietes wurde im Zuge der Geländebegehungen zwischen Oktober und November 2012 in einer repräsentativen Bestandsaufnahme erfasst. Die Methodik und Ergebnisse dazu werden in Kapitel 4.1.2. beschrieben. Die ermittelte Baumartenverteilung wird prozentual zum Gesamtbestand in Tabelle 4 wiedergegeben. Beispiele für Ausprägungen der aktuellen Waldgesellschaft im örtlichen Wuchsbezirk werden in Abbildung 13 dargestellt.

Baumartenzusammensetzung		Fichte	Tanne	Buche	Esche	Ahorn	Erle	Lärche	Kiefer	% Nadelholz
		Fi	Ta	Bu	Es	Ah	Er	Lä	Ki	-
Jungwald	-	76%	0%	18%	6%	0%	0%	0%	0%	76%
Fichten-Tannen-Buchenwald	tiefmontan	24%	1%	50%	6%	4%	0%	13%	3%	40%
Fi-Ta-Bu-Wald mit Rotföhre	montan	20%	21%	14%	0%	11%	7%	9%	14%	64%
GESAMTBESTAND		22%	10%	34%	3%	7%	3%	11%	8%	51%

Tabelle 4: Baumartenzusammensetzung des aktuellen Waldbestands.



Abbildung 12: Repräsentativer Waldbestand (MÜLLER 2012).

Im Wesentlichen konnten alle Annahmen zur Baumartenzusammensetzung nach dem vorherrschenden Wuchsgebiet und gemäß der natürlichen Waldgesellschaft mit Fichten-Tannen-Buchenwäldern verifiziert werden (vgl. Kapitel 3.4 und 3.4.1).

Abbildung 13 veranschaulicht die aktuelle Baumartenzusammensetzung und Waldstruktur des Untersuchungsgebietes. Unterbrochen wird der geschlossene Waldbestand von Abschnitten mit Jungwald, kleineren Windwurfflächen, bestandsfreien Felsabstürzen, Rinnen und Runsen, sowie momentan forstwirtschaftlich genutzter Flächen.



Abbildung 13: Waldbestand, Windwurfflächen und Kataster.

In Anlehnung an den Endbericht zur Naturraumkartierung Oberösterreich durch die OBERÖSTERREICHISCHE LANDESREGIERUNG (2008) wird an forstwirtschaft-

lich genutzten Flächen und Kahlschlägen eine Bepflanzung von überwiegend Lärche (*larix decidua*) und Fichte (*picea abies*) beobachtet. Buche und Tanne wachsen aus der Naturverjüngung nach und werden belassen. Die forstwirtschaftlich genutzten Flächen sind kleinflächig verteilt und deuten die vorherrschenden, klein parzellierten Besitzverhältnisse an. Auf den Hangschuttflächen und unter den Felsabstürzen wird der natürliche Waldbestand durch das vereinzelte Vorkommen von Grünerle (*alnus viridis*) neben den bereits genannten Nebenbaumarten (vgl. Kapitel 3.4.1) ergänzt. Das Vorkommen von Eiche (*quercus robur*) konnte im Zuge der Geländebegehungen nicht festgestellt werden.

In den besser zugänglichen, mäßig steilen und wenig gegliederten Hangbereichen ist der Waldbestand überwiegend als einschichtig und hallenartig zu beschreiben. Hangaufwärts mit zunehmender Steilheit sind die Gehölze im Fels durchsetzten Gelände etwas stärker geschichtet und entwickeln ein stufigeres Kronendach. Die Zusammensetzung der Entwicklungsstufen nach Altersklassen wird geprägt von Stangen- sowie schwachem Baumholz. Aufgrund des geschlossenen Kronendachs entwickelt sich die Kraut- und Strauchschicht am Boden nur spärlich. Lediglich in steilen, felsigen Hangpartien, sowie bei Rinnen und Runsen, auf Schlägen, Windwurf- flächen und nahe am Waldrand kann bei aufgelockertem Bestand ein vermehrter Bodenbewuchs festgestellt werden.

3.4.3 Windwurfflächen und Sturmschäden

Die bereits aufgearbeiteten und vom liegenden Schadholz befreiten Windwurf- flächen am Gschwendnerberg sind mit großer Wahrscheinlichkeit auf die orkanartigen Stürme „Paula“ und „Emma“ aus dem Jahr 2008 zurückzuführen. Dies kann aus dem Sachverständigengutachten PRODINGER 2008 abgeleitet werden. Windwurf- flächen von 2008 befinden sich vereinzelt im Untersuchungsgebiet, vor allem aber am nordwestlichen Rand des Gschwendnerberges und somit außerhalb des derzeitigen Interessensbereiches (vgl. Abbildung 8 in Kapitel 3.4.3). Weitere im Zuge der Geländebegehungen kartierte Windwurfschäden weisen zum Zeitpunkt der Bearbeitung einen verbliebenen Schadholzanteil mit zahlreichen querliegenden Stämmen, gekippten Wurzelstöcken und mit aufgerissener Bodenbedeckung auf.

Das Untersuchungsgebiet wird nicht vom Forststraßennetz am Gschwendnerberg erschlossen. Eine zeitnahe Aufarbeitung der Windwurfschäden erscheint in Anbet-

racht der Zugänglichkeit schwierig. Abbildung 14 veranschaulicht vorkommende Windwurfflächen im Untersuchungsgebiet.



Abbildung 14: Windwurfflächen im Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).

3.4.4 Gefahrenzonenplan, Waldentwicklungsplan und Schutzwaldfunktion

Gemäß Forstgesetz (BGBl.Nr.1 440/1975 idF BGBl. Nr.55/2007, folglich ForstG) werden die Erhaltung des Waldes und des Waldbodens, sowie die Sicherstellung der Schutzwirkung des Waldes und einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung festgelegt. Zusätzlich definieren die Verordnungen über den Waldentwicklungsplan (BGBl.Nr.582/1997, WEP) und über den Gefahrenzonenplan (BGBl.Nr.436/1976, GZP), sowie die Richtlinien zum Waldentwicklungsplan (vgl. BMFLUW 2012) und zur Gefahrenzonenplanung (vgl. BMFLUW 2011) die Aufgaben und den Umfang, sowie die gesetzlichen Vorgaben zur forstlichen Raumplanung. Diese Aufgaben umfassen im Wesentlichen die Darstellung und vorausschauende Planung der Waldverhältnisse zum Erreichen der Schutzwirkung vor Naturgefahren und zur Erhaltung der Standorteigenschaften.

Abbildung 15 veranschaulicht die derzeit gültige Gefahrenzonenplanung gemäß des FORSTTECHNISCHEN DIENSTES FÜR WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2012) der Gemeinde St.Pankraz. Die im Bereich der A9 Pyhrn Autobahn definierte braune Zone verweist auf eine im Allgemeinen mögliche Gefährdung durch Steinschlagereignisse für diesen Bereich. Darüber hinaus besteht am Gschwendnerberg im Bereich des Untersuchungsgebiets ein Standort- und Objektschutzwald gemäß Waldentwicklungsplan (WEP).

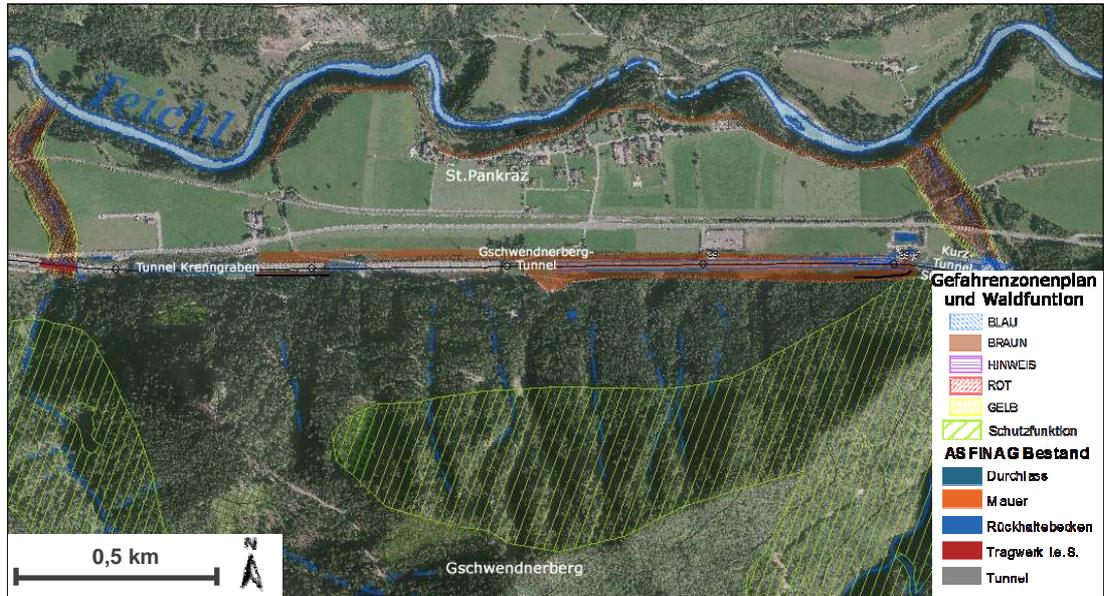


Abbildung 15: Gefahrenzonenplan und WEP-Schutzwald gemäß ForstG 1975.

Die Schutzfunktion des Waldbestandes im Untersuchungsgebiet besteht gemäß Waldentwicklungsplan aufgrund besonderen öffentlichen Interesses und wird als Leitfunktion mit hoher Wertigkeit eingestuft (OBERÖSTER. LANDESREGIERUNG 2012). Der restliche Waldbestand am Gschwendnerberg erreicht in Bezug auf eine Bewertung der Schutzfunktion geringe bis mittlere Wertigkeit, bei erhöhtem öffentlichem Interesse. An diesen Standorten kann keine besondere Leitfunktion festgestellt werden. Daher wird automatisch die Nutzungsfunktion als vorrangig angesehen.

Die Zuweisung der Schutzwaldfunktion erfolgt hier sowohl auf Basis eines Standort-, als auch Objektschutzwaldes und begründet sich einerseits in den zur Verkarstung neigenden geologischen Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 3.3). Darüber hinaus werden weitere Kriterien eines Standortschutzwaldes wie auffälliger Humuschwund, vielfach anstehender Fels und überwiegend seicht gründige Böden und Humuskarbonatböden erfüllt.

Andererseits ergibt sich die Definition der Schutzwaldfunktion mit Objektschutzwirkung aus dem Steinschlagpotential am Gschwendnerberg und aus dem besonderen öffentlichen Interesse an der Objektschutzwirkung des Waldes in Bezug auf die A9 Pyhrn Autobahn als Objekt der höchsten Kategorie (öffentliche Straße).

Ein Bannwald gemäß der Definition im ForstG 1975 § 27, als Wald mit Objektschutzwirkung, ist im Untersuchungsgebiet nicht ausgewiesen.

Langfristiges Ziel von Funktionsflächen mit einer hohen Schutzfunktion ist die Erhöhung der Stabilität des Bestandes, die Behebung der Verjüngungsdefizite und die Ausweitung stufiger, gemischter Bestände mit höchstmöglicher permanenter Schutzwirkung. Folglich dürfen Eingriffe in den Schutzwald keinesfalls zu einer Verschlechterung der Stabilität, der Naturnähe und der Mischungsverhältnisse führen, sondern muss die Qualität dieser Faktoren erhalten bzw. laufend verbessert werden. Dies geht auch aus den Funktionsflächenbeschreibungen hervor.

3.5 Technische Schutzmaßnahmen

Derzeit bestehen im Untersuchungsgebiet ausschließlich Holzschlachtenwände als Schutzverbauungen gegenüber Steinschlag. Diese sind jeweils bergseitig an beiden Portalen des Waldnerbergtunnels bei Autobahn Km 39,500 und 39,750 plziert. Die Länge der Holzschlachtenwände beträgt etwa 20 m östlich im Bereich des Tunnelportals und etwa 100 m in westlicher Richtung. Die Bauwerkshöhe erreicht etwa 1 bis 1,5 m.

Der Trassenverlauf der A9 Pyhrn Autobahn durch den Waldnerberg mit etwa 250 m Länge kann ohnehin als steinschlagsicher angesehen werden. Weiters befindet sich das südliche Portal des Kurztunnels St.Pankraz am Rand des Untersuchungsgebietes bei Autobahn Km 38,600.

Weitere technische Schutzverbauungen sind nicht zu nennen. Außerhalb des Untersuchungsgebietes befinden sich nordwestlich am Gschwendnerberg zur Sicherung der A9 Pyhrn Autobahn im Bereich des Krenngrabentunnels bei Autobahn Km 34,700 Steinschlagschutzzäune. Diese sind 2012 infolge der bergseitigen Sturmschäden und der erhöhten Steinschlaggefährdung in diesem Abschnitt erweitert worden.

4 **METHODEN ZUR ERFASSUNG DES GEFÄHRDUNGSPOTENTIALS**

Die Beurteilung des Gefährdungspotentials und die Erfassung der Datengrundlagen basieren im gegenständlichen Projekt zum Teil auf der Ausfertigung des Naturgefahrenhinweisplans durch die 3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH (3G 2012).

Die im Folgenden aufgelisteten Informationen sind zur Bearbeitung und Beurteilung des Gefährdungspotentials anhand des Naturgefahrenhinweisplans herangezogen worden:

- Kenntnisstand über bekannte Gefahren und Schutzbauwerke der ASFINAG anhand von Begehungen gemeinsam mit Mitarbeitern des Streckendienstes der ABM Ardning, sowie durch Rücksprache mit der ASFINAG Service GmbH.
- Erhebung und Interpretation der Gefahrenzonenpläne, sowie Wildbachaufnahmeblätter und Gefahrenkarten der Gebietsbauleitung Steyr- Ennsgebiet der Wildbach- und Lawinenverbauung für die Gemeinde St.Pankraz an der A 9 Pyhrn Autobahn.
- Anfrage an den Landesgeologen Oberösterreich zu geogenen Gefahrenstellen entlang der A9 Pyhrn Autobahn.
- Schutz- und Bannwälder, sowie ISDW-Schutzwälder der Landesforstdirektion Oberösterreich.
- Auswertung von digitalen Geländemodellen (DGM) aus ALS-Daten (Airborne Laserscan) zur Erfassung der Geländeoberfläche und Beschaffenheit, sowie Interpretation auffälliger Geländeformen und Erfassung der Ausbruchsgebiete.
- Beurteilung der Grunddisposition anhand Geologischer Karten (DORIS Oberösterreich).
- Bericht zum Naturgefahrenhinweisplan der A9 Pyhrn Autobahn (3G 2012).
- Bericht zu geologisch-hydrogeologischen Voruntersuchungen zum Ausbau der Tunnelkette der A9 Pyhrn Autobahn (BECHTOLD 2002).
- Geologisch-Geotechnischer Bericht zum Bauvorhaben der A9 Pyhrn Autobahn (BRANDECKER (1973)).
- Geologisch-Geotechnische Beurteilung zum Bauvorhaben der A9 Pyhrn Autobahn (BRANDECKER 1988).
- Geologisch-Geotechnisches Gutachten (NEUBAUER 2012).

- Bewertung des Gefahrenpotentials (PRODINGER 2008).
- Abschätzung der Schutzwaldleistungsfähigkeit im Bereich der Falkensteinwand (WEINMEISTER et al. 1997).

Als weitere Grundlage wurden die von der ASFINAG zur Verfügung gestellten digitalen Plangrundlagen, Bestandsdaten und die Daten der BEV verwendet.

Ergänzend zu den vorhandenen Unterlagen wurden im Zuge der Erhebungen regelmäßige Gespräche mit zuständigen Mitarbeitern des Auftraggebers geführt (ASFINAG Service GmbH - DI (FH) Berghold, Mag. Koch, ASFINAG Experte Geologie).

4.1 Feldaufnahmen

Grundlage zur Beurteilung des Gefährdungspotentials durch Sturzprozesse im Untersuchungsgebiet sind Feldaufnahmen und Kartierungen aus den Geländebegehungen. Ausgehend von den Erkenntnissen der Geländebegehungen wird die Grunddisposition des aktuellen Steinschlagpotentials abgeschätzt.

Die ersten Begehungen zur Datenerfassung erfolgten in diesem Abschnitt der A9 Pyhrn Autobahn bereits im Herbst 2012 gemeinsam mit Mitarbeitern des Streckendienstes der ASFINAG der Autobahnmeistereien (ABM) Arding. Insgesamt wurden vier Begehungen zur Datenerfassung durchgeführt:

- Begehung mit einem Mitarbeiter der ABM Arding (ASFINAG) am 08.10.2012.
- Begehung mit Feldaufnahmen am 03.11.2012.
- Begehung mit Feldaufnahmen am 09.11.2012.
- Begehung mit Feldaufnahmen am 01.12.2012.

Im Zuge der Erfassung und Beurteilung des Naturgefahrenhinweisplans wurde darüber hinaus versucht, die Einschätzung des Gefährdungspotentials durch Auskünfte und in Abstimmungen mit behördlichen Sachverständigen und diversen geologischen und geotechnischen Gutachten und Berichten zu vervollständigen. Eine detaillierte Auflistung aller ergänzenden Unterlagen ist den Projektunterlagen im Literaturverzeichnis unter Kapitel 8.1 ersichtlich.

Die Erkenntnisse der Geländebegehungen dienen der qualitativen Beschreibung des aktuellen Waldbestandes und Waldstruktur, der Festlegung von Ausbruchgebieten, der Bestimmung der geologischen Verhältnisse, sowie der Erfassung von

Oberflächeneigenschaften entlang der Transitstrecke des Sturzbahn (Oberflächenrauigkeit, Dämpfung) und schließlich der räumlichen Gliederung der Sturzbahn vom Ausbruchs- bis hin zum Ablagerungsgebiet.

Die Daten fließen sowohl in die Bildung von Gefährdungsszenarien und Bemessungsereignissen ein, sowie in die Analyse der Wirkung des Schutzwaldes, die Steinschlagmodellierung, sowie in die Gefahrenbeurteilung und Risikoanalyse.

Auf Basis der Feldaufnahmen und Datenrecherchen werden alle relevanten Blockgrößen, deren Form, sowie die zu erwartende, totale Ausbruchmasse und deren Jährlichkeit definiert. Die Methodik der Feldaufnahmen basiert im Wesentlichen auf den Arbeiten von DORREN et al 2004.

4.1.1 Bodenparameter

Die Erfassung der Eingabeparameter zur Steinschlagsimulation erfolgt im Feld nach DORREN et al 2004 anhand homogener, morphologischer Einheiten, die als „Polygone gleicher Eigenschaften“ kartiert werden. Die jeweils zusammengefassten Polygone repräsentieren Flächen nach Art der Bodenbedeckung (Dämpfung) und einheitlicher Oberflächenrauigkeit (vgl. Abbildung 16), die anhand der R_n und R_g -Werte ausgedrückt werden (vgl. Kapitel 4.4.1 und 4.4.2). Das vollständige Feldaufnahmeblatt für die Steinschlagsimulation mit Rockyfor3D ist dem Anhang Kapitel 9 zu entnehmen.

2. Boden- / Untergrundart im Polygon								
Material, aus dem der Untergrund beschaffen ist	<input type="checkbox"/> Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand- / Kiesgemisch im Tal	<input type="checkbox"/> Geröll (Ø < ~10 cm); mittelkompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen / Forststraße	<input type="checkbox"/> Talus (Ø > ~10 cm) / kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	<input type="checkbox"/> Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Bodendecke	<input type="checkbox"/> Anstehendes Gestein	<input type="checkbox"/> Asphaltstraße
(soiltype) von Rockyfor3D benötigte Werte	0	1	2	3	4	5	6	7
3. Oberflächenrauheit im Polygon								
MOH : typische Hindernishöhe normal zur Hangoberfläche (m), auf die der Block in 70 %, 20 % und 10 % der Fälle während eines Kontakts an der Hangoberfläche trifft. Muss im Feld hangabwärts blickend festgelegt werden!				MOH für 70% des Probegebiets (rg70)	0 - 100 (m)			
				MOH für 20% des Probegebiets (rg20)	0 - 100 (m)			
				MOH für 10% des Probegebiets (rg10)	0 - 100 (m)			
Liegende Baumstämme*	Mittlere Größe m	Größe =		Bedecktes Gebiet = %				

Abbildung 16: Kartierung von Polygonen gleicher Eigenschaften (DORREN 2012).

Die Erfassung der Oberflächenrauigkeit erfolgt nicht wie beschrieben hangabwärts blickend (vgl. Punkt 3 in Abbildung 18), sondern aufgrund der übersichtlicheren Durchführung von der Seite (vgl. Abbildung 17).

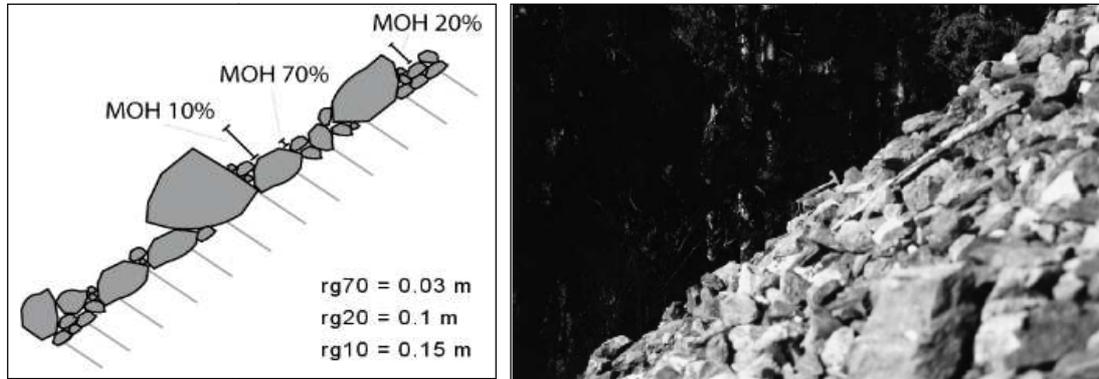


Abbildung 17: Erfassung der Oberflächenrauigkeit (DORREN 2012).

Die Zuteilung der Bodenparameter und die Bodenbedeckung ist nach den Polygonen gemäß Abbildung 18 zu entnehmen. Alle braunen Flächen repräsentieren potentielle Ausbruchsgebiete von Steinschlagereignissen.

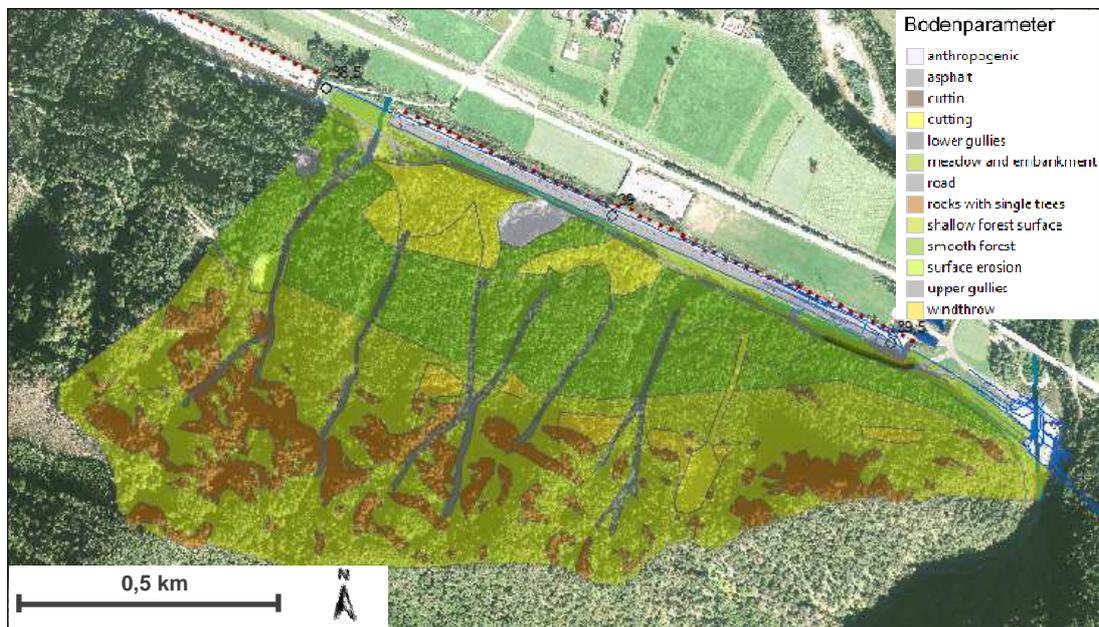


Abbildung 18: Kartierung von Polygonen gleicher Eigenschaften (DORREN 2012).

Tabelle 5 veranschaulicht die definierten Bodenparameterwerte, die aufgrund der Geländeaufnahmen für das Untersuchungsgebiet bei bestehendem Waldbestand Gültigkeit erlangen. Die R_n -Werte beschreiben die Elastizität des Untergrunds (vgl.

normaler Restitutionskoeffizient, Kapitel 4.4.1). Die R_g -Werte definieren die Oberflächenrauigkeit des Hanges (vgl. Kapitel 4.4.1).

Zusätzlich beinhaltet Tabelle 5 auch Angaben zu Hindernishöhe infolge liegender Baumstämme und stehender Strünke (*LTREE_H*) innerhalb der Polygone. Die Angaben erfolgen nach Häufigkeit des Vorkommens (*LTREE_perc*). Die gemäß Tabelle 5 definierten Bodenparameter unterscheiden sich für die Ist-Situation mit Waldbestand geringfügig gegenüber der Annahme-Situation „kein Wald“, da in diesem Fall liegende Baumstämme und Strünke nicht weiter berücksichtigt werden. Die entsprechenden Tabellen aller Bodenparameter sind dem Anhang Kapitel 9 zu entnehmen.

SURFACE	SOIL	SOILTYPE	MOH_rg70	MOH_rg20	MOH_rg10	Rn	LTREE_H	LTREE_perc
anthropogenic	scree and medium soil	3	0,03	0,03	0,05	0,32	0,00	0,00
surface erosion	scree and medium soil	3	0,05	0,10	0,15	0,35	0,00	0,00
road	scree and medium soil	3	0,03	0,03	0,03	0,35	0,00	0,00
asphalt	asphalt	7	0,01	0,01	0,01	0,35	0,00	0,00
rocks with single trees	bedrock	6	0,05	0,05	0,05	0,53	0,20	1,00
upper gullies	scree and medium soil	3	0,05	0,08	0,10	0,35	0,25	5,00
lower gullies	scree and medium soil	3	0,01	0,02	0,03	0,33	0,00	0,00
shallow forest surface	bedrock covered	5	0,03	0,05	0,10	0,43	0,40	3,00
cutting	bedrock covered	5	0,05	0,08	0,10	0,43	0,75	35,00
cutting	scree and medium soil	3	0,03	0,05	0,10	0,30	0,20	5,00
cutting	fine soil	2	0,03	0,03	0,03	0,25	0,20	10,00
cutting	fine soil	2	0,03	0,03	0,03	0,25	0,20	5,00
smooth forest	scree and medium soil	3	0,03	0,03	0,03	0,30	0,20	1,00
smooth forest	fine soil	2	0,03	0,03	0,03	0,25	0,05	1,00
cutting	scree and medium soil	3	0,03	0,03	0,03	0,30	0,20	5,00
windthrow	bedrock covered	5	0,03	0,05	0,10	0,43	1,75	60,00
meadow and embankment	grass, embankment	2	0,03	0,03	0,03	0,28	0,00	0,00

Tabelle 5: Bodenparameter (Oberflächenrauigkeit, Dämpfung).

4.1.2 Waldbestand

Die Kartierung der Waldbestände im Untersuchungsgebiet erfolgt ähnlich den Bodenparametern (vgl. Kapitel 4.1.1). Zur Ausscheidung von Waldpolygenen mit gleichen Eigenschaften wird die Bestandeskartierung in Anlehnung an die Methodik der Forstinventur nach STIERLIN et al. 1988 durchgeführt.

Anhand von Testkreisen werden für einheitliche Waldpolygone die Baumarten, die Verteilung der Bruthöhendurchmesser (*BHD*), sowie die Stammzahlen pro Hektar ermittelt und entsprechend den Polygonen auf das gesamte Untersuchungsgebiet interpoliert (vgl. Abbildung 19).

4. Wald*			
Repräsentative Untersuchungsfläche: m m			
* BHD: Brusthöhendurchmesser (bergseitig, 1,3 m über der Erde gemessen)			
BHD# (cm)	Aufzeichnung aller BHD ≥ 5 cm gemessen im Untersuchungsgebiet: z. B. 8, 31, 17, 13, ...		
Stämme / ha			
Durchschnittliche BHD (cm)		Nadelbäume (%)	
Standardabweichung BHD (cm)			
Arten*			

Abbildung 19: Kartierung der Waldpolygone (DORREN 2012).

Die Messung der Brusthöhendurchmesser erfolgt gemäß Abbildung 21 in 1,3 m Stammhöhe. Dabei ist bei der Messung die Lage und Form Stammes nach STIERLIN et al. 1994 zu beachten.

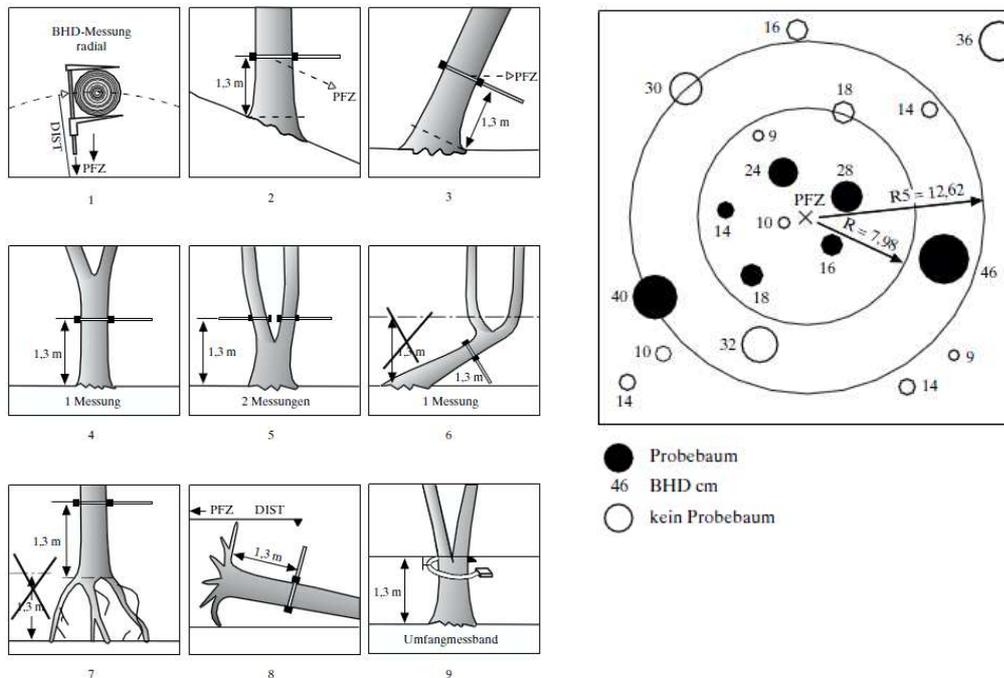


Abbildung 20: BHD-Messung und Auswahl der Probekreise (STIERLIN et al. 1994).

In Ermangelung einer Kluppe erfolgten alle Messungen mithilfe eines Maßbandes. Es werden ausschließlich Stämme bei der Inventur berücksichtigt, deren Stammmitelpunkt sich innerhalb des Probekreises befindet (vgl. Abbildung 21).

Im Unterschied zur Methodik nach STIERLIN et al. 1994 umfassen die Probekreise im Gelände einen Radius von 8,5 bis 9,5 m mit durchschnittlich $> 250 \text{ m}^2$ Aufnahme-fläche. Die Kreisradien und Probenahmeflächen werden gemäß der jeweiligen Hangneigung ihres Standortes korrigiert und auf die horizontale Ebene projiziert. Das Resultat des projizierten Probekreises entspricht einer Ellipse, deren kürzere

Halbachse sich dem Kosinus der Hangneigung und dem Kreisradius in Falllinie errechnet:

$$a_p = \cos \alpha \cdot r \tag{Formel 4.1}$$

r Radius des Probekreises in Falllinie α Hangneigung
 a_p Projizierter Radius entspricht der kürzeren Halbachse der Ellipse in der Horizontalen

Die Stammzahlen der Probekreise in Tabelle 6 beziehen sich auf diese korrigierten, vereinheitlichten Ellipsenflächen und sind daher besser vergleichbar. Weitere Kennwerte sind der Brusthöhendurchmesser (BHD), die Standardabweichung des BHD, der Anteil der Nadelhölzer am Gesamtbestand und die Bestandesgrundfläche. Diese wird aus der Summe der Kreisflächen aller Bäume (BHD) je Hektar gebildet und ist eine Kennzahl der Bestandesdichte.

Standort	W01	W02	W03	W04	W05	W06	W01 Schlag	W02 Schlag 1	W02 Schlag 2	W03	Gebüsch	kein Wald
Stammzahl [Stk./ha]	1050	1560	1630	690	900	3400	150	200	500	550	-	-
Brusthöhendurchmesser BHD [cm]	24	18	21	26	28	6	24	18	18	21	-	-
Standardabweichung BHD [cm]	9	10	10	10	9	2	9	10	10	10	-	-
Anteil Nadelhölzer [%]	33,0	24,0	62,0	68,0	74,0	90,0	37,0	24,0	24,0	62,0	-	-
Bestandesgrundfläche [m ²]	47,5	39,7	56,5	36,6	55,4	9,6	6,8	5,1	12,7	19,0	-	-

Tabelle 6: Kennwerte der Wald-Bestandeskartierung (u.a. Stammzahl, BHD).

Die Lage der Probekreise im Untersuchungsgebiet, sowie weitere Standorte zur Überprüfung der Zuordnung der Waldpolygone ist in Abbildung 21 dargestellt.

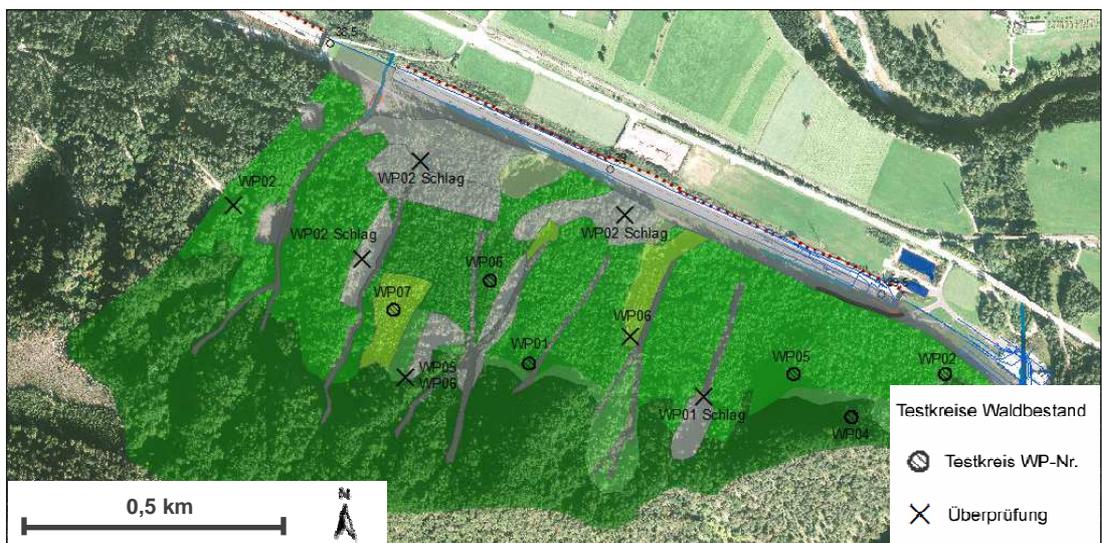


Abbildung 21: Kartierung Waldpolygone und Stumme Zeugen (DORREN 2012).

Eine detaillierte Beschreibung des aktuellen Waldbestandes erfolgt in Kapitel 3.4.2. Die Aufnahmeblätter und Ergänzungen zur Methodik der Bestandeskartierung nach STIERLIN et al. 1994 zur Definition von Baumschäden, sowie die Dokumentation der Aufnahmen im gegenständlichen Projekt sind dem Anhang zu entnehmen.

4.1.3 Steinschlagaktivität und Stumme Zeugen

Stumme Zeugen sind nach KIENHOLZ et al. 1998 Spuren im Gelände, die Rückschlüsse auf rezente Prozesse der Steinschlagaktivität zulassen. Die besten Interpretationsergebnisse für eine rückwärtsgerichtete Indikation des Gefährdungspotentials nach HEINIMANN et al. 1998 lassen sich durch eine Kombination von historischen Ereignissen (vgl. Kapitel 5.1.1) und geomorphologischen Anzeichen im Gelände erzielen.

Aufgrund des Vorhandenseins von Sturzblöcken unterschiedlicher Größe im Transit- und Ablagerungsgebiet des Untersuchungsgebietes kann eine latente Steinschlagaktivität abgeleitet werden.

Die Erfassung der geomorphologischen Indikatoren erfolgt im Zuge der Geländebegehungen nach dem Muster in Abbildung 22 gemäß DORREN 2012 bzw. DORREN 2007. Die Steinschlagaktivität des Untersuchungsgebietes wird beschrieben anhand:

- Stichprobenartiger Messung von abgelagerten Blockgrößen
- Linienzahlanalyse
- Stumme Zeugen der Steinschlagaktivität (u.a. Baumtreffer).

1. Vorherrschender Stein (abgelagert im Polygon oder potentiell aus der Steinschlagquelle fallend)				
Blockform	1. rechteckig	2. ellipsoid	3. kugelförmig	4. scheibenförmig
Abmessungen des Blocks (d1, d2, d3): (m) x (m) x (m)				
Gesteinsdichte (kg m ⁻³):				
5. Indikatoren zur Steinschlagaktivität / Stumme Zeugen *				
Mittlere Anzahl der Baumanpralle durch Steinschlag*		Höhe(n) der Baumanpralle durch Steinschlag (m) *		
Tiefe der Einschlagkrater (m) *		kürzlich abgelagerte Steine im Polygon*	Ja / Nein	

Abbildung 22: Datenerfassung Stumme Zeugen (DORREN 2012).

Zusätzlich können Häufigkeit und Intensität der Steinschlagaktivität, sowie präferentielle Trajektorien anhand der abgelagerten Steine, der Größe und Form etwaiger

Schutthalden, aber auch anhand des Bewuchses und der Spuren in der Bodenbedeckung entlang der Sturzbahn abgeschätzt werden (vgl. u.a. KALBERER 2006, GSTEIGER 1993).

Stichprobenartige Messung der abgelagerten Blockgrößen in den Probekreisen zur Waldkartierung (vgl. Kapitel 4.1.2) und die Durchführung einer Linienzahlanalyse entlang einer potentiellen Sturzbahn fließen unter Berücksichtigung der felsmechanischen Beurteilung (vgl. Kapitel 4.2) in die Definition von Bemessungsblockgrößen ein (vgl. Kapitel 5.1.3). Die Linienzahlanalyse wird in Anlehnung an DORREN et al 2007 durchgeführt („Scan-Line-Method“). Dabei werden in einer Linie entlang der Sturzbahn alle vorkommenden Blockgrößen ermittelt.

Als stumme Zeugen gelten auch Einschlagmarken und steinschlagbedingte Baumschäden. Die Anzahl und Höhe der Treffer, sowie der geschätzte Zeitpunkt der Treffer in Anbetracht des Baumalters ermöglichen eine Abschätzung der Steinschlaghäufigkeit, sowie der Sprunghöhen. Die Interpretation der Steinschlagwunden an den Stämmen wird aber durch verstärktes Wachstum, Überwallungen und Ausbuchtungen der Rinde im Zuge der Verheilung erschwert. Eine Identifikation der Steinschlagwunden und deren Anzahl sind vielfach nicht exakt möglich. Zur exakten Bestimmung erfordert es daher den Einsatz dendrochronologischer Methoden, um verdeckte Steinschlagmarken zu erkennen (vgl. KALBERER 2006, KÜHNE 2005, GSTEIGER 1993).

Die Erkenntnisse der geomorphologischen Indikatoren, sowie der Einschlagmarken und Baumschäden werden im Zuge einer Modellvalidierung in Kapitel 5.3 und im Hinblick auf die Gefahrenbeurteilung (siehe Kapitel 5) berücksichtigt.

4.2 Gesteinseigenschaften

Infolge erheblicher Sturmschäden mit Windwurf im Jahr 2008 wurde im Bereich der A9 Pyhrn Autobahn, bergseitig des Krenngrabentunnels bei Km 37,250, seitens der ASFINAG Bau Management GmbH eine geologisch-geotechnische Beurteilung zur Steinschlaggefährdung veranlasst (NEUBAUER ZT 2012).

Obwohl dieser Bereich sich knapp 1 km außerhalb des Untersuchungsgebietes befindet, können die Aufschlussbeschreibungen zu den Gesteinseigenschaften dieses Berichts nach NEUBAUER ZT 2012 zur Ergänzung der Beurteilung des Gefahren-

potentials herangezogen werden. Eine eigenständige Aufschlusskartierung wurde nicht weiter als notwendig erachtet.

Im Zuge des geologisch-geotechnischen Gutachtens sind die vorherrschenden Gesteins- und Gebirgseigenschaften an repräsentativen Aufschlüssen der bis zu 60 m hohen Fels- und Wandstufen untersucht worden. Die Analysen beinhalten Gefügemessungen des Trennflächensystems, sowie Beurteilungen zu Verbandsfestigkeit, Verwitterungsgrad, Trennflächenabstand, Öffnungsweiten, Durchtrennungsgrad und Kluftkörpergrößen etc. (NEUBAUER ZT 2012).

In Anlehnung an die regionalgeologische Beschreibung (Kapitel 3.3) bilden triassischer Hauptdolomite sowie untergeordnet Wettersteinkalke und –Dolomite die hangenden Gesteinsserien am Gschwendnerberg aus. Diese setzen sich aus hellgrau, massig bis gebankten Kalken- und Dolomiten zusammen. Die dolomitischen Bereiche sind durch grusige bis kleinstückelige Verwitterung gekennzeichnet. Die Schichten der Festgesteinsabfolgen fallen weitestgehend mittelsteil von Nord bis Südost ein. Die Haupttrennflächenscharen sind mittelsteil bis steil stehende und Richtung Nordwest bzw. Südost fallende, sowie mittelsteil bis steil stehende in Richtung Nordost fallende und steil stehende in Richtung West fallende Flächen. Damit entspricht das Trennflächensystem morphologisch den ausgebildeten Wandfluchten (vgl. Abbildung 23).

Die Verbandsfestigkeit wird nach NEUBAUER ZT 2012 generell als mäßig aufgelockert beschrieben. Die einaxialen Gesteinsdruckfestigkeiten sind gemäß einer groben Abschätzung im Gelände nach ÖNORM EN ISO 14689-1 als mäßig bis hoch bei 25 bis 100 MPa einzustufen. Nach NEUBAUER ZT 2012 wird ein GSI-Faktor von 65 zur Beschreibung der Gesteinsdruckfestigkeit angegeben.

Störungen konnten nach NEUBAUER ZT 2012 unmittelbar keine kartiert werden. Stellenweise sind an den Forststrassen kleinere Kataklasitzonen aufgeschlossen.

Die Konstellation der maßgeblichen Trennflächenscharen ergeben gemäß NEUBAUER ZT 2012 stellenweise ungünstige Raumstellungen zu den frei stehenden Wandfluchten. Aus dem Verschnitt der steilen wandparallelen und mittelsteil hangauswärts fallenden Trennflächen mit den mittelsteil hangauswärts fallenden Schichtflächen kann Gleiten als übergeordneter Versagensmechanismus festgestellt werden. Untergeordnet tritt an einzelnen Kluftkörpern ein Keilversagen auf (vgl. Abbildung 23).

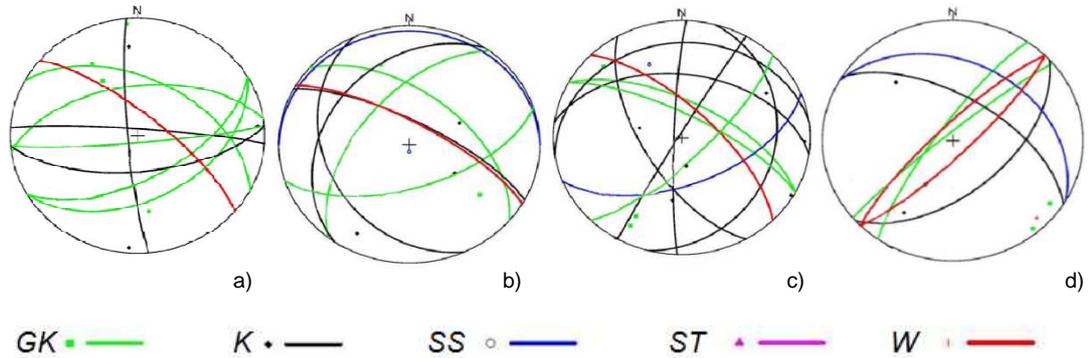


Abbildung 23: Gefügediagrammdarstellung an den Positionen a) bis d) nach der Kartierung von Großklüften (GK), Klüften (K), Schichtflächen (SS), der Wandoberfläche (W) und Störungen (ST) (NEUBAUER ZT 2012).

Das potentielle Versagensvolumen einzelner Blöcke erreicht häufig Kantenlänge der b-Achse um 0,3 m. Vereinzelt sind Wandteile großblockig aufgelockert mit potentiellen Ausbruchsvolumina von 3 - 200 m³.

Abbildung 24 zeigt Beispiele der Felsaufschlüsse nach NEUBAUER ZT 2012 zu den Gefügediagrammen aus Abbildung 23.



Abbildung 24: Felsaufschlüsse nach NEUBAUER ZT 2012.

Weitere Felsaufschlüsse aus dem Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 25 dargestellt. Teilweise konnten „frische“ Ausbruchsnischen festgestellt werden.



Abbildung 25: Felstufe und Ausbruch im Untersuchungsgebiet (MÜLLER 2012).

4.3 Pauschalgefällemethode zur Reichweitenermittlung

Der Ansatz der Pauschalgefällemethode wird in der Praxis häufig zur allgemeinen Abschätzung der maximalen Reichweite von potentiellen Sturzereignissen angewandt. Die Veröffentlichungen nach EVANS und HUNGR 1993, GERBER 1994, MEISZL 1998, HEINIMANN et.al. 1998 sowie DORREN 2003 bilden die Grundlage der Analyse nach diesem Ansatz. Theoretische Grundlagen zu Geometrischen Modellen sind in dieser Arbeit auch Kapitel 2.4.1 zu entnehmen.

Als Pauschalgefälle wird die mittlere Neigung zwischen zwei Punkten im Gelände bezeichnet. Basierend auf Auswertungen von Sturzprozessräumen gemäß der genannten Fachliteratur, ergibt sich für ähnliche Sturzbewegungen ein charakteristischer Wertebereich des Pauschalgefälles zwischen den Prozessbereichen Auslöseort, Transit- und Ablagerungsbereich. (vgl. Kapitel 2.1.1, Abbildung 1).

Die Ermittlung der Reichweite eines Sturzprozesses kann als geometrisches Pauschalgefälle (engl. „geometric angle“), Fahrböschung (engl. „travel angle“), oder Schattenwinkel (engl. „shadow angle“) ausgedrückt werden.

Nach MEISZL ist das „Geometrische Gefälle“ (β) definiert als der Winkel der die horizontalen Entfernung (Grundrisslänge) und die Verbindungsgerade zwischen der

obersten Abrisskante eines Felssturzes bis zu dem Block maximaler Reichweite der Ablagerung einschließt.

In DORREN 2003, erstmals nach HEIM 1932, ist die Fahrböschung (β) der Fallwinkel, der sich aus der Neigung der Fahrböschungsgeraden zwischen dem obersten Abrissrand und der fernsten Ablagerung ergibt. Im Unterschied zum Geometrischen Gefälle ist der Winkel meist flacher, da als Grundrisslänge die Fahrböschungsstrecke bzw. tatsächliche Sturzstrecke und nicht die kürzeste Verbindungslinie zwischen dem obersten Abrissrand und dem fernsten Endpunkt herangezogen wird.

Der Schattenwinkel (γ) ist nach LIED 1977 in DORREN 2003 bzw. nach EVANS und HUNGR 1993 jener Winkel, den die horizontale Grundrisslänge mit der Verbindungsgeraden zwischen dem Block maximaler Reichweite und der oberen Begrenzung des Ablagerungsbereiches einschließt. Die Einführung des Schattenwinkels nach EVANS und HUNGR 1993 beruht im Gegensatz zur Fahrböschung auf der Annahme, dass die Reichweite von stürzenden Blöcken unabhängig von ihrer Fallhöhe ist und keinen weiteren Einfluss auf den weiteren Verlauf des Sturzprozesses hat. Bei Schutthalde oder -kegeln wird demnach der größte Teil der Energie bereits beim Aufprall aus dem freien Fall am Fuß von Steilstufen oder Felswänden vernichtet.

Typische Wertebereiche des Pauschalgefälles bewegen sich beispielsweise nach GERBER 1994 zwischen 30 bis 38°. In DORREN 2003 wird anhand eines Vergleiches mehrerer Studien der mögliche Wertebereich für den Schattenwinkel von 22° bis 30° angegeben. Gemäß einer Auswertung von Schutthalde nach EVANS und HUNGR 1993, wird ein Schattenwinkel von 27,5° nur selten unterschritten. Generell korrespondiert speziell der Schattenwinkel mit dem charakteristischen Reibungswinkel jeder Schutthalde. Nach GERBER 1994 wirken sich Rauigkeits- und Dämpfungseigenschaften, sowie die Blockgröße auf die Wahl des richtigen Pauschalgefälles aus. Da aber alle Einflussfaktoren eines Sturzprozesses maximal stark generalisiert berücksichtigt werden können, sind die ermittelten Reichweiten stets als stark vereinfachte Abschätzung zu verstehen.

Zur Erstabschätzung der Reichweite werden die Ergebnisse der vorgestellten Methoden verglichen. Aufgrund der direkten Orientierung der Auslösebereiche in Richtung des Auslaufbereichs wird festgestellt, dass sich das Geometrische Gefälle

und die Fahrböschung annähernd gleichen. In Abbildung 26 ist daher der Winkel Beta (β) für das Geometrische Gefälle und die Fahrböschung gleich.

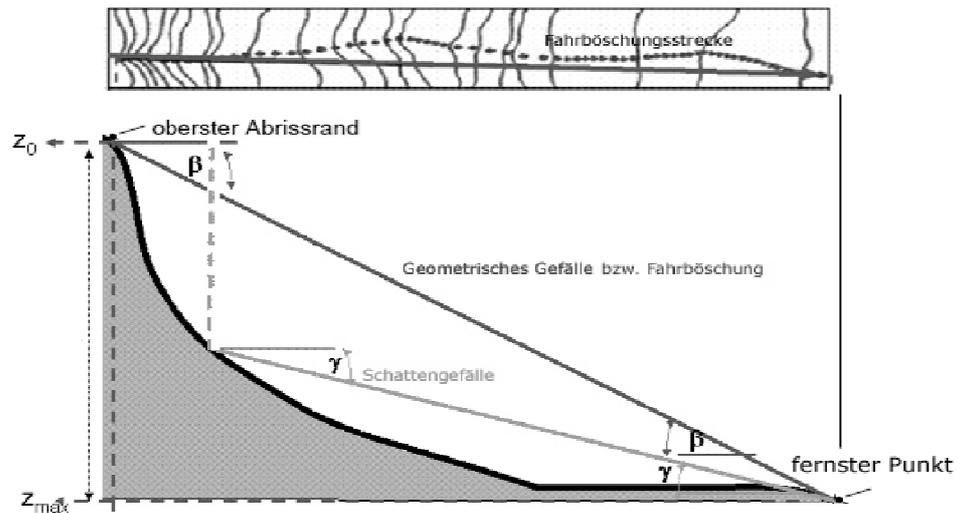


Abbildung 26: Unterscheidung des Pauschalgefälles (MEISZL 1998, verändert).

Die Modellierungsergebnisse beider Methoden zur Reichweitenermittlung ergeben für das Untersuchungsgebiet ähnliche Ergebnisse. Das Verfahren der Fahrböschung basiert auf einem gewählten Pauschalwinkel von 31° , der Schattenwinkel beträgt $27,5^\circ$. Die Anwendung der Methode des Schattengefälles wird in dieser Diplomarbeit bevorzugt. Aufgrund der abgestuften Morphologie des Projektgebietes sind die obersten Abrissränder von Ausbruchsbereichen schwer festzulegen. Des Weiteren wird auch aufgrund der Eindrücke aus den Geländebegehungen vermutet, dass gerade häufige Ereignisse (vgl. Kapitel 5.1.3) nicht zwingend den Ausbruchsbereichen entstammen, sondern viele Sturzblöcke im abgestuften Gelände zwischenzeitlich zum Stillstand kommen können.

Die Modellierung nach der Pauschalgefällemethode wurde mit Hilfe der Standard-GIS-Funktion „Viewshed-Analyse“ und des Spatial Analyst im ArcGIS 9.3 durchgeführt. Die Rasteranalyse ermittelt alle Zellen, die von definierten „Observer points“, bei festgelegtem Vertikal- und Horizontalwinkel aus „gesehen“ werden. Die wichtigsten Parameter der Funktion sind die gewählten Parameter des Vertikalwinkels (VERT1, VERT2) entsprechend dem definierten Pauschalwinkel, sowie die horizontale Ausbreitung (AZIMUTH1, AZIMUTH2) in Abhängigkeit von der Exposition als maximale Breite des Streuwinkels.

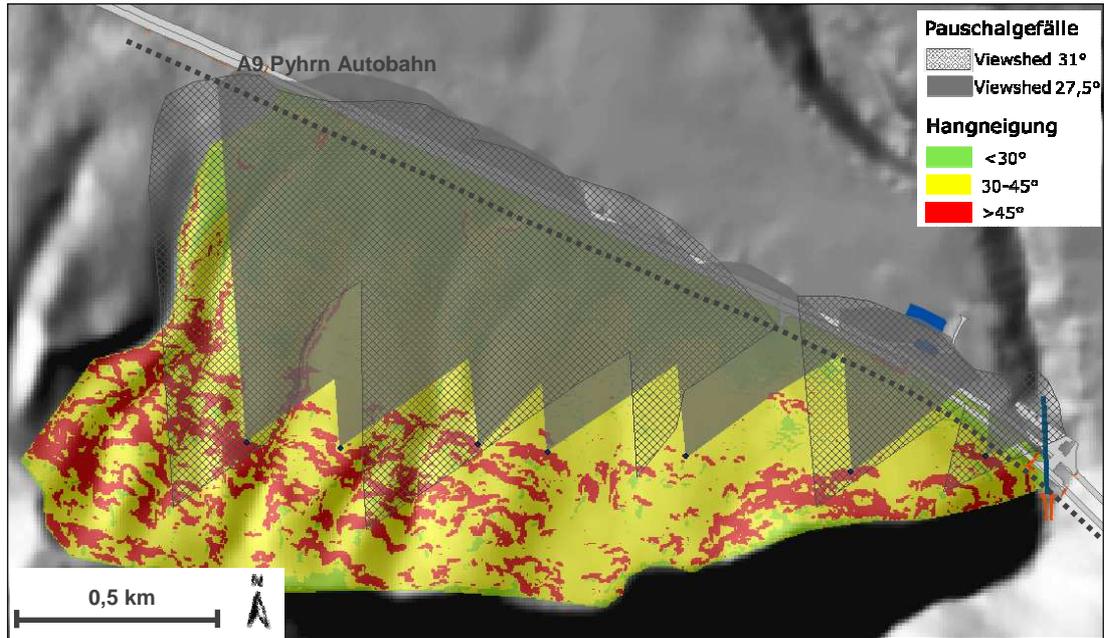


Abbildung 27: Ermittlung von Fahrböschung (31°) und Schattenwinkel ($27,5^\circ$).

Der Streuwinkel beschreibt die seitliche Abgrenzung des Wirkungsbereiches von Steinschlagereignissen (HÜBL et.al. 2011). Dieser wird im Modell mit etwa 30° beidseitig der Sturzbahn festgelegt. Die Ergebnisse der Reichweitenermittlung sind in der Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt.

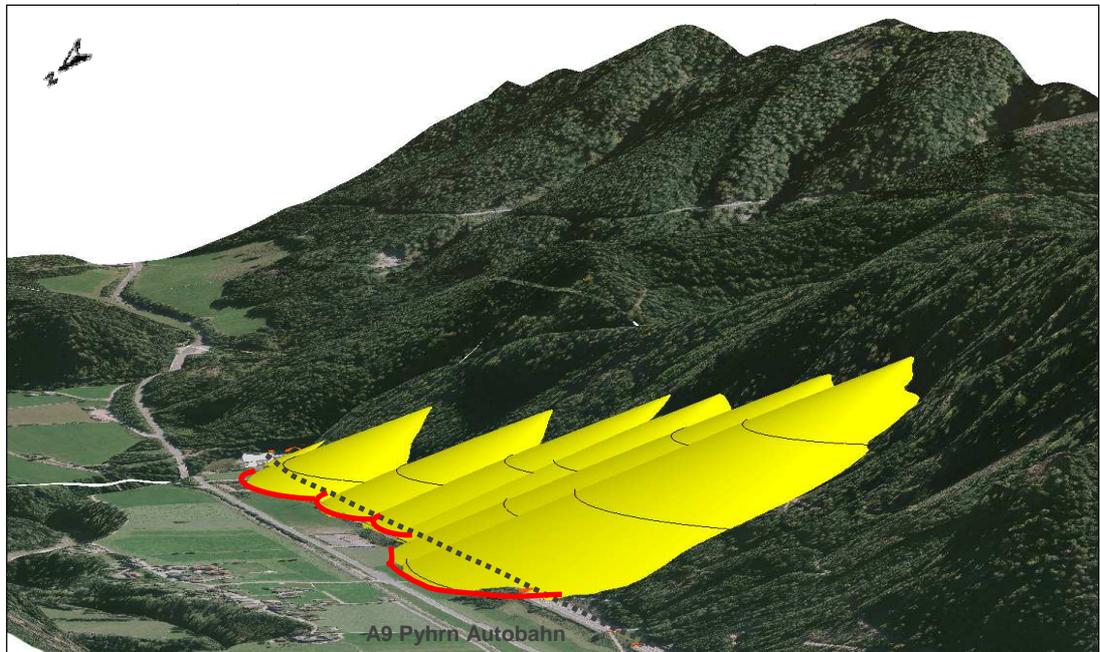


Abbildung 28: Reichweitenermittlung nach dem Schattengefälle ($27,5^\circ$)

Anhand der angewandten Pauschalgefällemethode kann für das Untersuchungsgebiet ein Gefährdungspotential für die A9 Pyhrn Autobahn abgeleitet werden.

4.4 Steinschlagmodell Rockyfor3D

Rockyfor3D ist ein probabilistisches, prozessbasiertes, GIS-gestütztes 3D-Simulationsmodell, das individuelle Trajektorien einzelner Steine berechnet. Das Modell basiert auf einer MATLAB-Programmierung und simuliert rasterbasiert die Bewegung von Sturzmassen für einzelne Rasterzellen unter Berücksichtigung allfälliger Kontaktreaktionen mit dem Waldbestand (DORREN 2012b). Eine umfassende Beschreibung des Steinschlagmodells ist DORREN 2012b zu entnehmen.

4.4.1 Modellkomponenten

Nach DORREN et al. 2006 und DORREN et al. 2004b berechnet Rockyfor3D nachfolgend aufgelistete Komponenten des Sturzprozesses (vgl. Kapitel 2):

- Reichweite und Trajektorien auf bewaldeten und nicht-bewaldeten Flächen
- Geschwindigkeit der stürzenden Blöcke
- Translations- und Rotationsenergie
- Energieverlust durch Baumtreffer.

Anhand des digitalen Geländemodells werden Hangneigung und divergente Sturzbahnen (Trajektorien, vgl. Kapitel 2.4.2) nach dem Prinzip eines Multiple-Flow Algorithmus berechnet (vgl. Kapitel 2.4.2).

Die Geschwindigkeit der Sturzblöcke wird auf Basis eines gleichmäßig beschleunigten, parabolischen freien Falls kalkuliert. Der in Rockyfor3D dazu eingesetzte Algorithmus berechnet in abgewandelter Form gemäß DORREN et al. 2004b nach PFEIFFER und BOWEN 1989 unter Einbezug der Energiebilanz infolge von Bodenkontakten, die Position und Geschwindigkeit entlang der Sturzbahn.

Die Geschwindigkeit wird in eine normale und tangential, hangparallele Komponente aufgeteilt und ist abhängig von der Topographie und den Oberflächeneigenschaften (siehe Kapitel 2.1 und 2.2). Die Mikrotopographie des Geländes wird beim simulierten Aufprall im Modell durch zufällige Variation der Abweichung des lokalen Neigungswinkels an der jeweiligen Zelle berücksichtigt (DORREN et al. 2004b).

Weitere Faktoren sind Die Rotationsgeschwindigkeit nach einem Anprall, sowie die Eindringtiefe bei Bodenkontakt (DORREN 2012b).

Der Energieverlust wird bei Kontakt mit der Hangoberfläche durch die Dämpfung (Elastizität) des Bodenmaterials (normaler Restitutionskoeffizient – r_n) und die Oberflächenrauigkeit (tangentialer Restitutionskoeffizient – r_t) bestimmt. Der tangentielle Restitutionskoeffizient ist auch abhängig von der Blockgröße, da die effektive Rauigkeit mit zunehmender Blockgröße abnimmt (DORREN 2012b, DORREN et al. 2006):

$$r_t = \frac{1}{1 + \left(\frac{MOH + D_p}{R}\right)} \quad (\text{Formel 4.2})$$

MOH	Maximale Hindernishöhe des Oberflächenmaterials [m]	R	Radius des Sturzblocks
D_p	Eindringtiefe [m]	r_t	Tangentialer Restitutionskoeffizient

Im Modell wird die Variabilität der Größenverteilung des Oberflächenmaterials (r_t) berücksichtigt und nach dem Zurückprallen zufällig um +/-10% angepasst. Sowohl die Oberflächenrauigkeit als auch die Elastizität des Untergrundes werden anhand von Feldkartierungen definiert.

Das Modell Rockyfor3D simuliert auch die Energiereduktion infolge von Baumtreffern (vgl. Kapitel 2.3.1). Anhand der Trajektorien, dem Steindurchmesser, dem BHD und der Anzahl und Verteilung der Bäume pro Zelle kann eine Trefferwahrscheinlichkeit kalkuliert werden. Bei einem Kontakt wird der Energieverlust in Abhängigkeit von der relativen Position des Steines zur Stammmitte nach den Erkenntnissen aus Steinschlagexperimenten in DORREN et al. 2006 berechnet:

$$\Delta E = -0,046 + \frac{0,98 + 0,046}{1 + 10^{(0,58 - \left(\frac{d}{0,5 \cdot BHD}\right) \cdot (-8))}} \quad (\text{Formel 4.3})$$

ΔE	Energieverlust infolge Baumtreffer [-]	d	Horizontaldistanz zwischen Treffer und Vertikalachse des Baumes [m]
BHD	Brusthöhendurchmesser [m]		

Die maximale Energieabsorptionsfähigkeit eines Einzelbaumes (*max.E.diss.* – *maximum energy dissipation*) wird in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (BHD) berechnet (DORREN et al. 2006):

$$\text{max. E. diss.} = 38,7 \cdot BHD^{2,31} \quad [\text{kJ}] \quad (\text{Formel 4.4})$$

4.4.2 Eingangsdaten des Modells

Die erforderlichen Eingabedaten zur Simulation sind als ASCII-Rasterdaten aufzubereiten und umfassen (DORREN 2012b):

- ein gerastertes digitales Höhenmodell (DHM) zur Darstellung der Topographie - *dem.asc*
- eine Rasterkarte mit der Gesteinsdichte in jeder Quell- oder Startzelle - *rock-density.asc*
- drei Rasterkarten zur Definition von Höhe, Breite und Länge des Bemessungsblocks in jeder Quellzelle – *d1.asc*, *d2.asc*, *d3.asc*
- eine Rasterkarte zur Festlegung der Form des fallenden Blocks – *blshape.asc*
- drei Rasterkarten zur Definition der Oberflächenrauigkeit – *rgmean.asc*
- eine Rasterkarte zur Definition der Elastizität des Untergrundes – *soiltype.asc*

Die Festlegung von Startzellen potentiellen Steinschlags geschieht über die Ausscheidung von Polygonen aus geomorphologischen Feldkartierungen und/oder Karten- und Luftbildauswertungen. Die Attributwerte wie Steinschlagaktivität, Bemessungsblockgröße und Ausbruchshöhe werden als Initialeinstellungen festgelegt. Durch Umwandeln der Attributwerte in ein Daten-Raster werden diese Ausgangseinstellungen in Rockyfor3D überführt (DORREN 2012b).

In Anhängigkeit der geologischen Verhältnisse wird die Gesteinsdichte (kg/m^3) für alle Startzellen definiert. Die Wahl der Bemessungsblockgröße richtet sich nach der Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses. Die Blockgrößen entsprechen einer uniform verteilten Zufallsvariablen mit einer vordefinierten prozentuellen Abweichung der Blockabmessungen. Die Schwankungsbreite der Volumenänderung der Blockgrößen kann in der Eingabemaske bei Simulationsstart gewählt werden. Die Blockform kann rechteckig, ellipsoid, kugelförmig oder scheibenförmig sein (DORREN 2012b).

Die Rasterkarten zur Berücksichtigung der Oberflächenrauigkeit beschreiben Hindernisse entlang der Sturzbahn. Die Bestimmung der Rauigkeit erfolgt anhand von Feldkartierungen (vgl. 4.1). Dabei werden homogene Bereiche als Polygone mit gleicher Oberflächenrauigkeit durch die Größenwahrscheinlichkeitsklassen *rg70*, *rg20* und *rg10* ausgeschieden. Die Klassen entsprechen den Höhen repräsentativer Hin-

dernisse (MOH) in Metern, die in 70 %, 20 % und 10 % der Fälle während eines Kontakts im definierten Polygon anzutreffen sind (DORREN 2012b).

Die Rauigkeitswerte des tangentialen und normalen Restitutionskoeffizienten können zwischen $r_{tn}=0$ (glatte Oberfläche) bis $r_{tn}=1$ (vollständige Energieabsorption) streuen. Beide Werte werden zwischen 0,1 und 0,99 beschränkt. (DORREN 2012b).

Eine Liste aller R_n -Werte (normale Restitutionskoeffizienten) ist Tabelle 7 zu entnehmen (DORREN 2012b):

Bodenart	Allgemeine Beschreibung des Untergrunds	Mittlerer R_n -Wert	Wertebereich R_n
0	Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	0	0
1	Feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	0,23	0,21 - 0,25
2	Feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand/Kiesgemisch im Tal	0,28	0,25 - 0,31
3	Geröll ($\varnothing < 10$ cm); oder mittlerer kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen; oder Forststraße	0,33	0,30 - 0,36
4	Talus ($\varnothing > 10$ cm); kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	0,38	0,34 - 0,42
5	Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Bodendecke	0,43	0,39 - 0,47
6	Anstehendes Gestein	0,53	0,48 - 0,58
7	Asphaltstraße	0,35	0,32 - 0,39

Tabelle 7: Bodenarten in Rockyfor3D und R_n -Werte (DORREN 2012b).

Zur Simulation unter Berücksichtigung des Waldbestandes stehen in Rockyfor3D zwei Optionen zur Verfügung.

- Baumdatei – *treefile.txt*
- Waldbestand – *nrtrees.asc, dbhmean.asc, dbhstd.asc, conif_percent.asc*

Bei der ersten Option handelt es sich um eine Einzelbaumdarstellung. Die zweite Variante repräsentiert anhand der vier Rasterdatensätze die Anzahl der Baumstämme pro Hektar, die mittleren Brusthöhendurchmesser (BHD), die Standardabweichung der BHD, sowie der mittlere Prozentsatz an Nadelbäumen am Gesamtbestand in jeder Zelle (DORREN 2012b).

Das Einbeziehen des Waldbestandes erfolgt in die Simulation anhand der zweiten Methode. Anhand der vier Raster werden nach dem Zufallsprinzip eine bestimmte Anzahl von Bäumen mit vorgegebenen Durchmessern in jedem Pixel plaziert und somit eine Datei erstellt, die x- und y-Koordinaten aller Bäume sowie deren BHD enthält (*treefile.txt*).

4.4.3 Initialeinstellungen bei Simulationsstart

Mithilfe der Benutzeroberfläche von Rockyfor3D sind die Voreinstellungen zur Simulation bei Simulationsstart über die grafische Benutzeroberfläche von Rockyfor3D zu definieren:

- Anzahl der Simulationen pro Quellzelle
- Variierung des Blockvolumens in Prozent
- zusätzliche Anfangsfallhöhe über der DHM-Oberfläche [m] zur Steigerung der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit
- Berücksichtigung von Wald
- Berücksichtigung von Steinschlagschutzmaßnahmen

Die Blockgrößen variieren in der Simulation gemäß den Starteinstellungen um +/- 10 %. Eine zusätzliche initiale Sturzhöhe wird nicht definiert. Das Geländemodell hat eine Auflösung von 2 m. Pro Startzelle sind 100 Anbrüche simuliert worden. Der Waldbestand wird über die Auswahl entsprechender „Waldraster“ (vgl. Eingangsdaten Kapitel 4.4.2) bei den Simulationseinstellungen berücksichtigt.

4.4.4 Ausgabedaten des Modells

Das Ergebnis der Steinschlagmodellierung in Rockyfor3D ist ebenfalls rasterbasiert und nimmt den gleichen Umfang, Zellengröße und Zellenformat wie das Eingaberaster an. Die Simulation speichert für jede Rasterzelle das Maximum der verschiedenen in dieser Zelle simulierten Variablen (vgl. Kapitel 4.4.1). Die von Rockyfor3D erzeugten Ausgaberraster sind gemäß DORREN 2012b:

- *E_mean.asc* - der Mittelwert der max. kinetischen Energiewerte aller simulierten Blöcke (Translations- und Rotationsenergie in [kJ]).
- *E_50.asc*, *E_90.asc*, *E_95.asc*, *E_98.asc*, *E_99.asc* - der Median, sowie die 90, 95, 98 und 99 Perzentile der kinetischen Energiewerte in [kJ] jeder Zelle.
- *E_95Cl.asc* - das 95% Konfidenzintervall (KI) als maximale Energiewerte.
- *Ph_mean.asc* - der Mittelwert der maximalen Sprunghöhe von Blöcken [m].
- *Ph_50.asc*, *Ph_90.asc*, *Ph_95.asc*, *Ph_98.asc*, *Ph_99.asc* - der Median, sowie die 90, 95, 98 und 99 Perzentile der Sprunghöhen [m].
- *Ph_95Cl.asc* - 95% KI aller maximalen Sprunghöhenwerte [m].
- *Nr_passages.asc* - die Zahl der Blöcke, die jede Zelle passieren.

- *Nr_sourcecells.asc* - die Zahl der Quellzellen pro Zelle.
- *EL_angles.asc* – die minimal berechneten Fahrböschungswinkel pro Zelle.
- *Traj_time.asc* - minimale Zeit der Sturzdauer ausgehend vom Quellgebiet [s].
- *V_max.asc* - absolute maximale simulierte Geschwindigkeit pro Zelle [m/s].
- *Tree_impact_heights.asc* - max. Anprallhöhe am Baum pro Rasterzelle [m].
- *Nr_tree_impacts.asc* - Anprallanzahl pro Rasterzelle [-].

Aus den Startzellen werden jeweils 100 Ausbrüche simuliert. Daraus werden pro Berechnungsdurchgang rund 2.654.700 Steine simuliert. Aufgrund der großen Anzahl an Steinen und dem feinmaschigen Geländemodell können hochauflösende Resultate erzielt werden, welche auch Aussagen zu Wahrscheinlichkeiten zulassen. Die Ergebnisse und Log-Dateien sind dem Anhang Kapitel 9 zu entnehmen. Eine Interpretation der Resultate und Validierung bzw. Plausibilitätskontrolle des Modells und der Simulationsergebnisse erfolgt in Kapitel 5.3.

5 INTERPRETATION DES GEFAHRENPOTENTIALS

5.1 Gefahrenpotential

5.1.1 Ereignisdokumentation

Für das Untersuchungsgebiet gibt es keine verfügbaren Aufzeichnungen über die Steinschlagaktivität oder bekannte Ereignisse. Es wurden sowohl Vertreter der Autobahnmeisterei (ABM) Ardning, als auch der Landesstraßenverwaltung der Bezirkshauptmannschaft (BH) Kirchdorf, sowie Vertreter der Bezirksforstinspektion und der Amtsleiter der Gemeinde St.Pankraz bezüglich verfügbarer Chroniken befragt.

Seitens des Amtsleiters der Gemeinde St.Pankraz wird darauf hingewiesen, dass eine Dokumentation von Ereignissen im Bereich des Gschwendnerberges bis dato nicht erforderlich war, da sich das Siedlungsgebiet nicht bis unmittelbar an den Gschwendnerberg erstreckt und somit kein Interesse an einer Dokumentation besteht. Eine Kontaktaufnahme mit ortsansässigen Personen mit Kenntnis über Steinschlagereignisse verlief nicht erfolgreich.

Seit der etwa 10 jährigen Fertigstellung des Vollausbaus der A9 Pyhrn Autobahn in diesem Abschnitt sind laut Auskunft des Streckendienstes der ABM Ardning noch keine besonderen Ereignisse aufgezeichnet oder beobachtet worden.

Hinweise zur Steinschlagaktivität des Untersuchungsgebietes liefern unter anderem das Projekt zur Abschätzung der Schutzleistungsfähigkeit des Waldes und Schutzwaldsanierung an der Falkensteinwand (WEINMEISTER et al. 1997), oder auch das Gutachten zur Befundaufnahme und Bewertung des Gefahrenpotentials nach Windwurffolgen im Bereich des Krenngrabentunnels am Geschwendnerberg (PRODINGER 2008), sowie das geologisch-geotechnische Gutachten zur Steinschlagsicherung im Bereich des Krenngrabentunnels bei St.Pankraz (NEUBAUER ZT 2012).

Der Falkenstein befindet sich zirka 2,5 km nordwestlich des Gschwendnerberges. An den Südwestabhängen des Falkensteins treten wiederholt Felsstürze und Steinschläge auf und gefährden die naheliegende Bahntrasse der ÖBB. Dokumentiert wurden hauptsächlich größere Ereignisse unter anderem in den Jahren 1954/56,

1979 und 1997, sowie 8 Ereignisse in den Jahren 1972 bis 1992. Bei dem Ereignis 1997 wurde eine Schutzverbauung durchschlagen und der Bahnkörper von einem Stein der Größe 50x40x40 cm getroffen. Die Vergleichbarkeit des Falkensteins zum Gschwendnerberg ist aufgrund der geologischen Verschiedenheit jedoch nur bedingt sinnvoll. Der Falkenstein besteht überwiegend aus Wettersteinkalk und Reiflinger Kalk (vgl. Kapitel 3.1).

Sowohl das Geologisch-Geotechnische Gutachten von NEUBAUER ZT GmbH als auch die Befundaufnahme zu den Windwürfen des Gschwendnerberges nach PRODINGER 2008 verweisen zwar auf das Steinschlagpotential der Region, erbringen aber letztendlich keine direkten Hinweise zur Festlegung von Intensität, sowie Eintretenswahrscheinlichkeit zur Bemessung von Ereignissen.

5.1.2 Beurteilung des Gefahrenpotentials

Die Beurteilung des Gefahrenpotentials stützt sich vor allem auf die Beschreibung des Untersuchungsgebietes am Gschwendnerberg (Kapitel 3), sowie auf die angewandten Methoden zur Erfassung des Gefährdungspotentials (Kapitel 4) und die Interpretation der Simulationsergebnisse (Kapitel 5.3).

Infolge der Erkenntnisse aus den entsprechenden Kapiteln kann somit ein Gefährdungspotential für Steinschlagereignisse festgestellt werden.

Zahlreiche Spuren von frisch abgelagerten Sturzblöcken und beschädigter Bäume zeugen von der Steinschlagaktivität am Gschwendnerberg. Berechnungen der potentiellen Reichweite von Steinschlagereignissen nach der Pauschalgefällemethode, sowie die Simulationsergebnisse nach Rockyfor3D bestätigen die Annahmen im Zuge der Geländebegehungen.

Die Identifikation relevanter Prozessquellen ergibt gemäß Kapitel 4.1.3, Kapitel 4.2 und den Startzellen der Simulation in Kapitel 4.4.2, zahlreiche Ausbruchsmöglichkeiten und Sturzbahnen in Richtung der Autobahn. Gemäß ASTRA 2009 werden als Prozessquelle diejenigen Areale zusammengefasst, die über eine einheitliche Disposition zur Gefahrenentstehung verfügen.

5.1.3 Szenarien

Sturzprozesse und ihre Einwirkungen werden durch die Größe der Sturzkörper charakterisiert. Dabei sind Sturzprozesse mit kleineren Komponenten häufiger als Blockschläge oder Felsstürze. Mit unterschiedlichen Szenarien bei der Gefahrenanalyse wird diesem Umstand Rechnung getragen. Für das Untersuchungsgebiet wurden aufgrund der Felsstrukturen und der abgelagerten Blöcke im Gelände folgende Szenarien festgelegt:

Steinschlag Szenario (Jährlichkeit)	Steine [m³]	Durchmesser [m]	Geometrie [m]	Gewicht
sehr häufiges Ereignis (1-10)	0,01	0,24	0,34 x 0,24 x 0,13	30 kg
häufiges Ereignis (10-30)	0,03	0,30	0,42 x 0,30 x 0,20	71 kg
seltene Ereignis (30-100)	1,45	1,10	1,65 x 1,10 x 0,80	4,1 t
sehr seltenes Ereignis (100-300)	9,00	2,00	3,00 x 2,00 x 1,50	25,2 t

Tabelle 8: Jährlichkeit und Bemessungsblöcke definierter Szenarien.

Für Risikobetrachtungen entlang von Straßen sind einzelne, extrem seltene Großblöcke nicht relevant.

5.2 Schadenspotential

Der Projektperimeter umfasst beide Richtungsfahrbahnen der A9 Pyhrn Autobahn zwischen Autobahn Kilometer Km 38,500 bis etwa Km 39,835 Die Länge des Projektperimeter beträgt etwa 1.335 m.

Das Hauptaugenmerk der Risikoanalyse wird auf die beiden Richtungsfahrbahnen der Pyhrn Autobahn gelegt. Die durchschnittliche Tagesverkehrsfrequenz (*DTV*) der A9 Pyhrn Autobahn beträgt in diesem Abschnitt von Montag bis Sonntag etwa 14.708 Kfz pro Tag (Jänner-Minimum) bzw. bis zu 21.519 Kfz pro Tag (Juli-Maximum). Die Angaben der Verkehrsstatistik der ASFINAG 2012, beziehen sich auf eine Auswertung des Jahres 2012. Die Messstelle befindet sich bei Km 31,148. Die Zusammenfassung der Daten ist Tabelle 9 zu entnehmen.

Die Daten der durchschnittlichen Tagesverkehrsfrequenz der Monate November und Dezember sind infolge von Messfehlern nicht zu verwenden. Die zulässige Höchstgeschwindigkeit im gesamten Abschnitt ist mit einer Geschwindigkeit von 100 km/h begrenzt.

Richtung Fahrzeugklasse		DTVMS Mo-So Kfz/24h		DTVMF Mo-Fr Kfz/24h		DTVMO Mo Kfz/24h		DTVDD Di-Do Kfz/24h		DTVFR Fr Kfz/24h		DTVSA Sa Kfz/24h		DTVSF Sonn- und Feiertag Kfz/24h	
S	Kfz	7.008	11.773	7.635	11.066	6.543	9.625	7.678	10.235	9.268	15.570	6.811	16.746	4.946	10.905
S	Kfz > 3,5t hzG	1.348	1.635	1.757	2.087	1.467	1.825	1.820	2.176	1.968	2.124	941	944	189	200
S	Kfz <= 3,5t hzG	5.660	10.138	5.878	8.980	5.076	7.800	5.858	8.059	7.300	13.447	5.870	15.802	4.757	10.705
N	Kfz	7.700	9.746	7.748	9.300	8.712	9.626	7.495	8.860	7.241	10.321	7.033	10.488	7.974	11.114
N	Kfz > 3,5t hzG	1.371	1.565	1.876	2.065	2.246	2.525	1.830	2.063	1.463	1.496	489	415	191	283
N	Kfz <= 3,5t hzG	6.329	8.181	5.872	7.235	6.465	7.101	5.665	6.797	5.778	8.826	6.544	10.073	7.783	10.832
GESAMT	Kfz	14.708	21.519	15.383	20.366	15.255	19.251	15.173	19.095	16.509	25.891	13.844	27.234	12.920	22.019
GESAMT	Kfz > 3,5t hzG	2.719	3.200	3.633	4.152	3.713	4.350	3.649	4.239	3.431	3.619	1.430	1.359	380	483
GESAMT	Kfz <= 3,5t hzG	11.989	18.319	11.750	16.215	11.541	14.901	11.523	14.856	13.078	22.273	12.414	25.875	12.540	21.537
		MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)	MIN (Jan)	MAX (Juli)

Tabelle 9: ASFINAG Verkehrsstatistik A9 Km 31,148 (ASFINAG 2012).

S	<i>Klaus-St.Pankraz</i>	Kfz	<i>Kraftfahrzeug</i>
N	<i>St.Pankraz-Klaus</i>	hzG	<i>Höchst zulässiges Gesamtgewicht</i>
t	<i>Tonnen</i>	DTV	<i>Durchschnittliche Tagesverkehrsfrequenz</i>

Im Projektperimeter sind zudem mehrere Unterflurtrassen bzw. Tunnelbauwerke (St.Pankraz-Tunnel, Gschwendnerbergtunnel), ein Brückenbauwerk bzw. ein Durchlass des Schalchgrabens, sowie Gewässerschutzanlagen und Betriebsgebäude bzw. Silos der Straßenerhaltung.

Im Bereich der Tunnelportale bestehen technische Schutzmaßnahmen. Diese sind in Kapitel 3.5 näher beschrieben. Im Zuge der Maßnahmenbeurteilung und Risikoanalyse werden die bestehende Schutzbauwerke und Teile des Schadenpotentials nicht berücksichtigt.

5.3 Simulationsergebnisse und Modellvalidierung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Resultate der einzelnen Parameter der Steinschlagsimulation nach Rockyfor3D dargestellt und interpretiert. Die Evaluierung der Simulationsergebnisse konzentriert sich im Wesentlichen auf die Ergebnisse der maximalen kinetischen Energie, die Anzahl der Trajektorien sowie die mittleren Sprunghöhen. Zudem werden die Ablagerungen und zu erwartende Reichweite von Steinschlagereignissen berücksichtigt. Eine Analyse der Durchgangsfrequenz wird in Kapitel 5.4.3.2 näher erläutert.

Wesentlicher Bestandteil der Evaluierung des Steinschlagpotentials ist die Modellvalidierung und Plausibilitätskontrolle der Simulationsergebnisse. Ziel dieser Evaluierung ist das Beschreiben allfälliger Übereinstimmungen bzw. Ungenauigkeiten des zugrunde liegenden Modells und der Simulationsergebnisse mit der Realität. Die Evaluierung des Steinschlagpotentials des gegenständlichen Projektes umfasst eine qualitative Analyse der Modellparameter und Simulationsergebnisse.

Die Grundlagen zu den Modellparametern sind den Kapiteln 4.1 bis 4.4 zu entnehmen. Die Ausgabedaten der Steinschlagsimulation werden in Kapitel 4.4.4 beschrieben. Umfang der Evaluierung sind die Komponenten:

- Steinschlagaktivität
- Bemessungsblöcke
- Bodenparameter
- Waldbestand
- Geländemodell
- Ergebnisse der Steinschlagsimulation.

5.3.1 Evaluierung der Eingangsdaten

Die Evaluierung der Steinschlagaktivität (vgl. Kapitel 3 bis 5) basiert auf den Hinweisen verfügbarer Gutachten und Berichte, der braunen Hinweisbereiche der Gefahrenzonenplanung der Gemeinde St.Pankraz und der dokumentierten Ereignisse im Umfeld des Untersuchungsgebietes. Die Erkenntnisse der Unterlagenrecherche können infolge sichtbarer Anzeichen der Steinschlagaktivität („Stumme Zeugen“) durch Ablagerungen und Schlagmarken entlang der Sturzbahnen und am Baumbestand infolge der Geländebegehungen bestätigt werden. Zusammenfassend kann somit unter Berücksichtigung der Steilheit des Geländes und der potentiellen Anbrüche aus dem Felsverband (vgl. Kapitel 3.1 und 4.2) eine latente Steinschlaggefährdung für das Untersuchungsgebiet verifiziert werden.

Die Definition der Bemessungsblöcke und Gesteinseigenschaften zur Parametrisierung der Steinschlagmodellierung erfolgt durch Verifikation der Angaben gemäß Gutachten und Berichte im Abgleich mit eigenen Geländebeobachtungen (vgl. Kapitel 4.2 und 5.1.3). Die Evaluierung der Bemessungsblöcke richtet sich nach der Häufigkeiten auftretender Blockgrößen im Untersuchungsgebiet. Die Festlegung von Eintretenswahrscheinlichkeit und Jährlichkeit von Szenarien unterliegt aufgrund fehlender Vergleichsdaten oder langjährigen Dokumentation von Ereignissen einer möglichen Schwankungsbreite. Somit sind die Angaben vorrangig als probabilistische Berechnungsgrundlage zur Risikoermittlung zu verstehen (vgl. Kapitel 6.2). Nach HÜBL et al. 2011 ist die Festlegung insbesondere der seltenen und sehr seltenen Ereignisse kritisch zu hinterfragen. Generell gilt, je mehr Beobachtungen eines Ereignisses vorliegen und je längere Beobachtungsreihen zur Verfügung stehen, desto zutreffender sind Aussagen über Häufigkeit und Eintretenswahrschein-

lichkeit. Gemäß Abbildung 29 konnten Einschlagmarken am Baumbestand bis in Höhen von etwa 2 m und vorhandene Sturzblöcke dokumentiert werden.



Abbildung 29: Dokumentation von Einschlagmarken, und Sturzblöcken, sowie vorhandene Holzschlachtenwände (MÜLLER 2013).

Die Evaluierung der Bodenparameter (Oberflächenrauigkeit, Dämpfung) ist an das Ausweisen von Polygonen gleicher Eigenschaften im Zuge der Geländebegehungen geknüpft (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Präzisierung und Plausibilitätskontrolle zutreffender Parameterwerte geschieht in Anlehnung an Beispieltabellen üblicher Wertebereiche vergleichbarer Bodenarten und Oberflächen (vgl. DORREN 2012b). Je nach Wahl der Parameterwerte sind abweichende Ergebnisse der Steinschlagmodellierung nicht auszuschließen. Die Abgrenzung von Polygonen gleicher Eigenschaften kann in unterschiedlicher Genauigkeit erfolgen und entspricht im Modell nicht unbedingt den tatsächlichen Einheiten (vgl. Abbildung 30).

Das Geländemodell (DHM vgl. Kapitel 4.4.2) stellt eine Abstraktion des tatsächlichen Geländes in der Auflösung von 2 m dar. Eine detailliertere Abstufung des Reliefs und der Topographie wird bei der Simulation nicht berücksichtigt. Alle wesentlichen Oberflächenformen wie Gräben, Mulden oder Rinnen kommen dennoch als potentielle Sturzbahnen zur Geltung. Einzelne Details des Untersuchungsgebietes, wie vorhandene Holzschlachtenwände, Wildschutzzäune oder ALU-Leitplanken entlang der Autobahn, wie in Abbildung 29 und Abbildung 30 dargestellt, gehen nicht in die Simulation ein. Ihre Auswirkung auf den Verlauf der Sturzprozesse ist bei seltenen Ereignissen zu vernachlässigen. Bei häufigen Ereignissen hängt die Wirkung von den zu erwartenden Sturzenergien ab und wird demnach gegebenenfalls berücksichtigt.



Abbildung 30: Erfassung einheitlicher Geländeparameter und Abstraktion der Eingangsparemeter zur Modellierung (MÜLLER 2013).

Der Bestimmung der Brusthöhendurchmesser und Stammzahl pro Hektar ist auf die flächendeckende Interpolation von repräsentativ erfassten Teststandorten zurückzuführen (vgl. Kapitel 4.1.2). Die Ausscheidung der Waldpolygone ist zwar durch qualitative Beobachtungen im Gelände fundiert, aber als Folge der flächigen Interpolation mit einem anzunehmenden Informationsverlust behaftet. Auch die Methodik zur Messung von Brusthöhendurchmesser und Stammzahlen kann Ungenauigkeiten unterliegen. Zur Plausibilitätskontrolle sollten daher Stammzählungen mittels Luftbildauswertung (CIR-Orthophotos, „Color Infrared“) durchgeführt werden. Diese Methode wird bei Anwendungen der Vegetationskartierung bevorzugt eingesetzt, da das nahe Infrarot eine hohe Lichtreflexion an Pflanzenoberflächen aufweist und Unterschiede der Struktur deutlich hervortreten. Der Einsatz dieser Methode erwies sich allerdings als ungeeignet, da die teilweise unterständige Bestandsstruktur des Waldes im Orthophoto nicht klar ersichtlich ist und somit unzureichende Ergebnisse erbringen würde (vgl. Abbildung 31).

Insbesondere die Festlegung geeigneter Parameterwerte im Bereich von Windwurf- flächen wird durch unregelmäßige Hindernishöhen auf engstem Raum gekennzeichnet (vgl. Abbildung 14, Kapitel 3.4.3). Querliegende Stämme und Strünke gehen nicht als separater Datensatz in die Modellierung ein, sondern werden als Hindernisse in Form erhöhter Oberflächenrauigkeit in der Modellierung berücksichtigt (vgl. Kapitel 4.1.1). Dementsprechend ist mit größeren Abweichungen der Simulationsergebnisse zu rechnen.

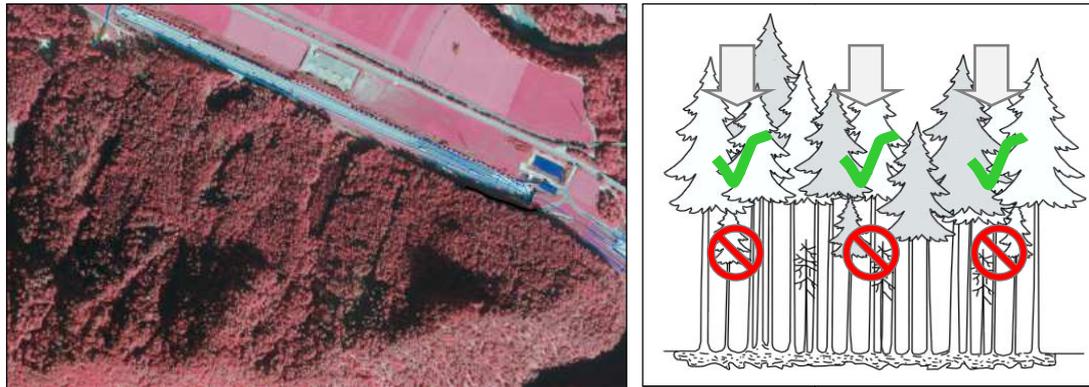


Abbildung 31: Stammzahlermittlung durch Auswertung von CIR-Orthophotos bei stufigem Waldbestand (BEV 2013, STIERLIN et al. 1994, verändert).

5.3.2 Evaluierung der Simulationsergebnisse

Im Wesentlichen kann anhand der Simulationen mit Rockyfor3D die Wirkung des Waldes gegenüber Steinschlagereignissen nachvollzogen werden. Dazu wird die Simulation für Steinschlagereignisse sowohl für den aktuellen Waldbestand durchgeführt und anschließend mit den Simulationsergebnissen für den fiktiven Extremzustand „kein Waldbestand vorhanden“ verglichen.

Der Simulation liegen vier Szenarien zugrunde. Diese basieren auf den entsprechenden Bemessungsblockgrößen entsprechender Jährlichkeit (vgl. Kapitel 5.1.3). Daraus resultieren acht Simulationsergebnisse unterschiedlicher Szenarien. Alle Simulationsergebnisse sind dem Anhang zu entnehmen. Die Resultate werden in diesem Kapitel nur überblicksmäßig zusammengefasst.

Die Simulationsergebnisse der maximalen kinetischen Energie variieren je nach Jährlichkeit des Szenarios stark (vgl. Abbildung 32 bzw. Anhang Kapitel 9). Dies ist vor allem auf die unterschiedliche Blockgröße und weniger auf den jeweiligen Waldzustand zurückzuführen. Die maximalen Energien beruhen auf der Darstellung des 95%-Quantil der simulierten Blöcke. Das Resultat verdeutlicht für häufige Ereignisse die Vermutung, dass Blockgrößen bis etwa 25 cm unabhängig vom Waldbestand nicht bis zur A9 Pyhrn Autobahn vordringen (vgl. Abbildung 32 und Anhang Kapitel 9). Eine Ausnahme stellt der östliche Bereich des Untersuchungsgebietes beim Portal des Waldnerbergtunnels dar. Hier ist ein Eintreten sehr häufiger und häufiger Ereignisse (bis 30jährig) im Bereich der Tunnelportale nicht gänzlich auszuschließen. Die maximalen Energien überschreiten am Ende der Sturzbahnen jedoch kaum 10 kJ. Die Sicherung der Tunnelportale durch die vorhandenen Holzschlach-

tenwände (vgl. Kapitel 3.5) kann daher als ausreichender Schutz der Autobahn gegenüber Ereignissen dieser Größenordnung angesehen werden, da auch die zu erwartenden Sprunghöhen die Hindernisse kaum überwinden können (Abbildung 33).

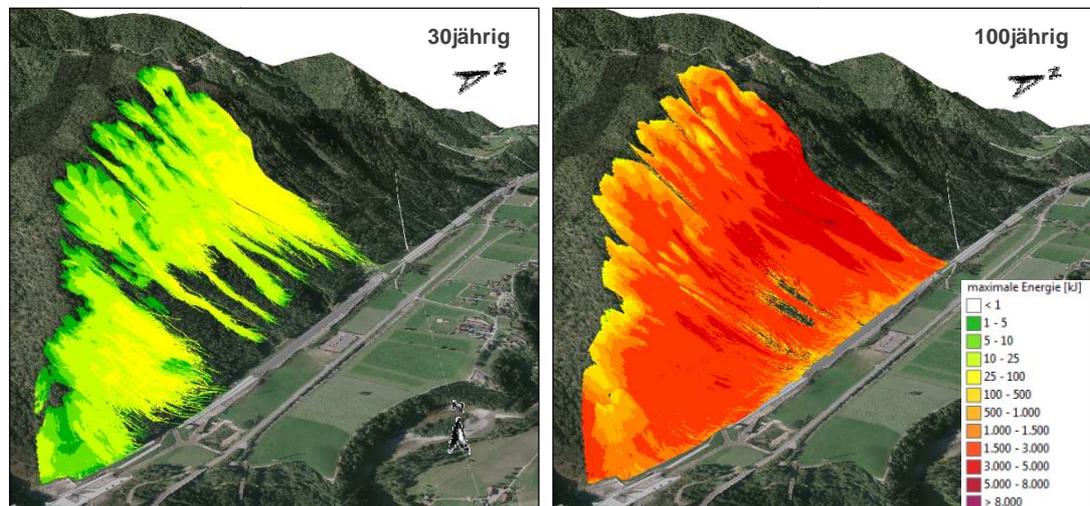


Abbildung 32: Simulationsergebnisse (3D) maximaler kinetischer Energie 30jähriger und 100jähriger Bemessungsereignisse bei aktuellem Waldbestand.

Bei häufigen Ereignissen mit Gesteinsdurchmessern von etwa 30 cm sind Energien von 25 kJ möglich. Die maximale Energie seltener Ereignisse nimmt deutlich zu, wie in Abbildung 32 ersichtlich. Bei aktuellem Waldbestand kann bei einem 100jährigen Ereignis entlang der gesamten Autobahn im Untersuchungsgebiet mit Steinschlag gerechnet werden. Steine eines seltenen Ereignisses mit einem Durchmesser bis 1,10 m erreichen bereits maximale Energien bis 1500 kJ. Das theoretische Simulationsergebnis der sehr seltenen 300jährigen Ereignisse dient vor allem als probabilistische Berechnungsgrundlage zur Risikoermittlung. Das Abschätzen eines solchen Ereignisses unterliegt starken Unsicherheiten. Die Berechnung der maximalen Energie endet entlang des Mittelstreifens der Autobahn.

Bei optimierten Waldbestand nach den Vorgaben gemäß den Anforderungen zur Schutzwaldleistung nach FREHNER et al. 2005 in Kapitel 2.3.2 ist anzunehmen, dass durch gezielte Pflegeeingriffe eine Verbesserung der Schutzwaldleistung erzielt werden kann. Die Steinschlaggefährdung kann zwar nicht vollständig verhindert werden, aber die maximale Energie, sowie die Reichweite und Sprunghöhe von Steinschlagereignissen wird deutlich reduziert.

Bei der Interpretation der mittleren Sprunghöhen gemäß Abbildung 33 sind lokale Maxima im Bereich von Steilstufen plausibel. Die stellenweise geringen Sprung-

höhen im Bereich der oberen Hangabschnitte ist vermutlich auf die anfängliche Bewegungsform des Rollen und Gleitens bei den potentiellen Auslösebereichen zurückzuführen. Die ermittelten Sprunghöhen häufiger Ereignisse erscheinen bei Vergleich mit den in Kapitel 4.1.3 beschriebenen Einschlagmarken an Baumstämmen realistisch. Mit abnehmender, seltener Jährlichkeit der Ereignisse nehmen erwartungsgemäß die mittleren Sprunghöhen auch in unteren Hangpassagen deutlich zu (vgl. Anhang).

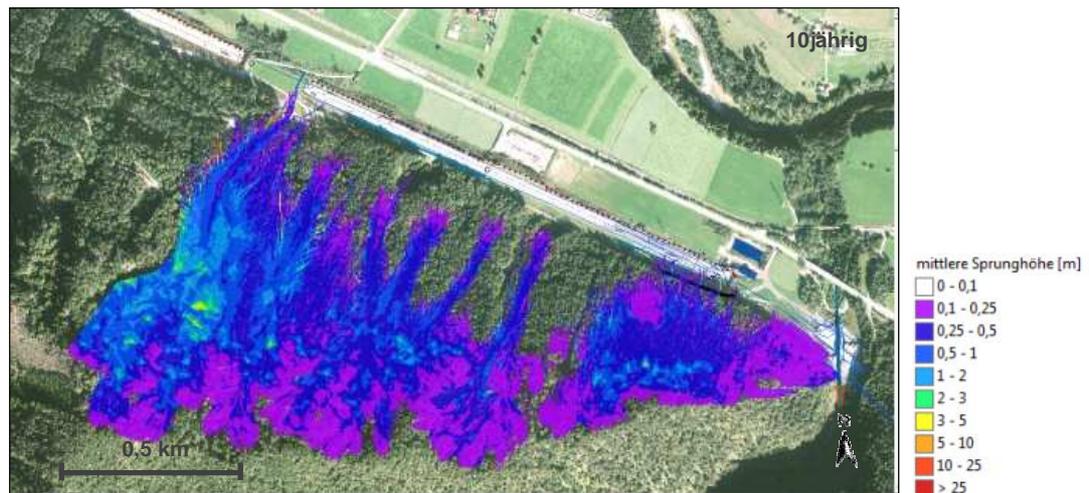


Abbildung 33: Simulationsergebnisse (2D) der Sprunghöhen eines 10jährigen Bemessungsereignisses bei aktuellem Waldbestand.

Bei Betrachtung des Geländemodells kann das simulierte Verteilungsmuster der Sturzbahnen bzw. Durchgangsfrequenzen verifiziert werden. Es tritt deutlich das Vorhandensein präferentielle Sturzbahnen entlang von Gräben und Runsen vor allem im westlichen Bereich des Untersuchungsgebietes hervor. Die dort häufiger wirksamen Prozesse infolge von Steinschlag und Schneekriechen verhindern längerfristig das Baumwachstum (vgl. DORREN 2003). Durch das Fehlen von größeren Hohlformen im östlichen Bereich des Untersuchungsgebietes sind die simulierten Trajektorien erwartungsgemäß flächiger und gleichmäßiger verteilt. Zudem ist die Reichweite der simulierten Steinschlagereignisse deutlich näher an der Autobahn. Sowohl der Höhenunterschied, als auch der Abstand zwischen Auslöse- und Ablagerungsbereich ist hier geringer (vgl. Abbildung 34).

Anhand der Durchgangsfrequenz (Trajektorien) wird auch die Schutzwirkung des aktuellen Waldbestandes veranschaulicht (vgl. Abbildung 34). Bei Vergleich eines 10jährigen Bemessungsereignisses mit und ohne Waldbestand ist eindeutig eine erwartungsgemäße Zunahme der Anzahl der Sturzbahnen und Reichweite von

Steinschlagereignissen ersichtlich. Das Gefährdungspotential entlang der Autobahn würde bei fehlender Schutzwirkung des Waldbestandes ansteigen (vgl. Abbildung 34). Umgekehrt kann mit gezielten Pflegeeingriffen die Schutzwirkung des Waldbestandes verbessert werden.

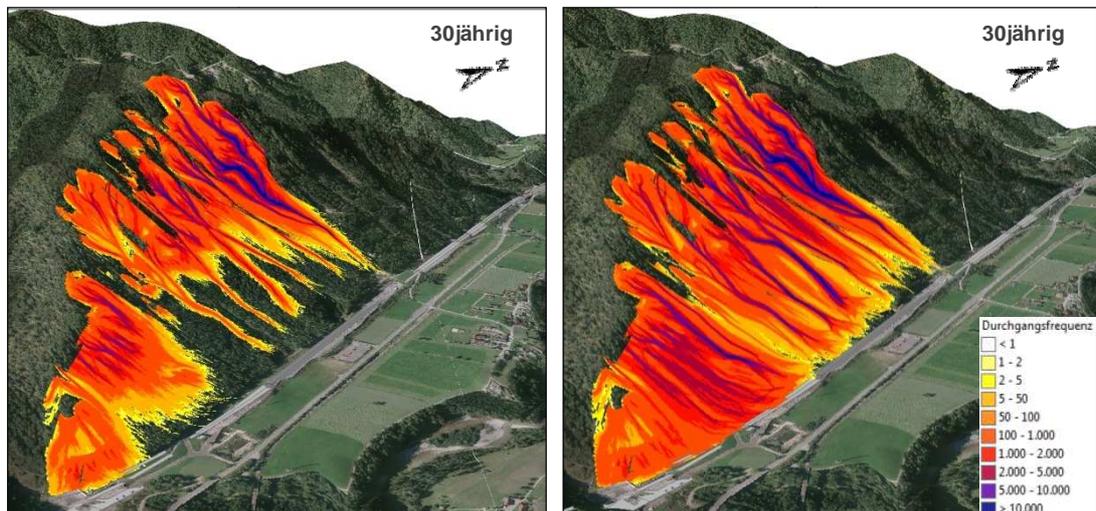


Abbildung 34: Vergleich der Simulationsergebnisse (3D) der Durchgangsfrequenz (Trajektorien) des häufigen (30jährigen) Bemessungsereignisses bei aktuellem Waldbestand (links) und ohne Wald (rechts).

Im Untersuchungsgebiet sind keine größeren Schuttakkumulationen ersichtlich. Bei sehr häufigen Ereignissen erfolgt die Ablagerung von Steinschlägen oft unmittelbar unterhalb des Auslösebereiches. Die Reichweite erstreckt sich kaum weiter hangabwärts. Erst bei einer Größenordnung von häufigen Ereignissen (etwa 30jährig) ist mit Ablagerungen am unteren Ende der Runsen und Gräben zu rechnen (siehe Abbildung 34). Das entspricht der beobachteten Situation im Gelände. Umso seltener ein Ereignis eintritt, desto weiter hangabwärts erfolgt auch die Ablagerung.

Die „maximale“ Reichweite von Steinschlagereignissen am Gschwendnerberg in der Größenordnung von seltenen Ereignissen konnte im Gelände leider nicht verifiziert werden. Infolge des Autobahnbaus vor etwa 10 Jahren sind wahrscheinlich Anzeichen vergangener Ablagerungen von Sturzereignissen durch die Anschüttung der Dammböschung unkenntlich gemacht worden. Es wird zwar vermutet, dass zahlreiche Ablagerungen vor allem von seltenen Ereignissen (<100jährig) auch entlang des Begleitgrabens der Autobahn zu liegen gekommen sind, aber seit Bestehen der Autobahn ist kein derartiges Ereignis bekannt.

5.4 Methoden zur Beurteilung der Waldwirkung

5.4.1 Grobbeurteilung

Im Zuge der Grobbeurteilung wird anhand eines einfachen Schemas eine erste Abschätzung zur Relevanz der Schutzwirkung von Waldbeständen im Prozessraum durchgeführt (siehe Abbildung 35). Diese Phase der Beurteilung berücksichtigt die Parameter Steingröße, Länge der bewaldeten Transitstrecke und Waldzustand. Voraussetzung zur Grobbeurteilung ist, dass nur Wälder als relevant hinsichtlich ihrer Schutzwirkung beurteilt werden dürfen, wo stürzende Steine oder Blöcke das Schadenpotential erreichen könnten (vgl. KALBERER 2011):

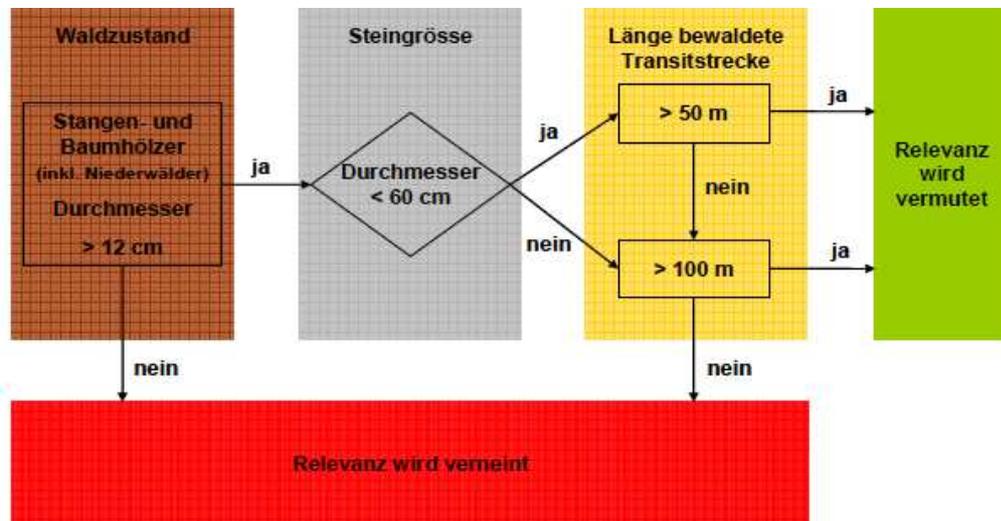


Abbildung 35: Angepasste Grobbeurteilung Steinschlag (KALBERER 2011).

Grundvoraussetzung ist das Vorhandensein eines Steinschlagpotentials. Dieses wird im gegenständlichen Projekt als gegeben eingestuft (siehe Kapitel 4.3). Nach KALBERER 2011 sollte das geometrische Pauschalgefälle $> 28^\circ$ sein, um ein Gefährdungspotential erwarten zu können. Da bereits kleine Sturzmassen ausreichend Energievernichtungsvermögen entwickeln um beispielsweise einen Jungwaldbestand zu schädigen, wird in dieser Beurteilungsphase nach KALBERER 2011 die relevante Schutzwirkung gegenüber Steinschlag ab einem Brusthöhendurchmesser von 12 cm (Stangen- und Baumhölzer) vermutet.

Die Festlegung der minimal erforderlichen, bewaldeten Transitstrecken erfolgt in Anhängigkeit der zu erwartenden Steingrößen (KALBERER 2011). Dabei ist die bewaldete Transitstrecke als kumulierte bewaldete Länge in Falllinie zwischen Aus-

und Ablagerungsgebiet zu verstehen, deren Öffnungsweiten weniger als 20 m betragen dürfen (KALBERER 2011).

In Anlehnung an die Methodik nach KALBERER 2011 wird für Steindurchmesser unter 60 cm eine relevante Schutzwirkung des Waldbestandes ab einer bewaldeten Transitstrecke von 50 m vermutet. Bei Steinen ab 60 cm aufwärts beträgt die Anforderung an die bewaldete Transitstrecke 100 m. Der Steindurchmesser von 60 cm übersteigt die Größenordnung eines häufigen Ereignisses und entspricht eher einem seltenen Ereignis (vgl. Kapitel 5.1.3). Somit wird diejenige Steingröße zur Beurteilung herangezogen, die das größte Schadenspotential erwarten lässt.

Der Untersuchungsraum des Gschwendnerberges besteht überwiegend aus schwachen Baumhölzern und Stangenholz mit Brusthöhendurchmessern von weniger als < 30 cm. Die bewaldeten Transitstrecken betragen überwiegend mehr als 100 m. Eine Relevanz der Schutzwirkung des Waldbestandes wird vermutet und die Anwendung der Maßnahmen- und Wirkungsbeurteilung nach dem Schema zur Maßnahmen- und Wirkungsbeurteilung gemäß KALBERER 2011 (vgl. Kapitel 5.4) kann daher als sinnvoll erachtet werden. Es wird ausdrücklich festgestellt, dass trotz nachgewiesener Relevanz der Waldwirkung eine Steinschlaggefährdung vor allem bei seltenen Ereignissen besteht.

Die zahlreichen Runsen am Gschwendnerberg sind überwiegend unbestockt und ein Aufkommen eines Bestandes dauerhaft nicht zu erwarten. Allerdings sind die Runsen nicht bis zum Untersuchungsperimeters der A9 Pyhrn Autobahn durchgehend. Zumeist bleibt eine bewaldete Transitstrecke von einigen 10er Metern bestehen. Daher finden im Zuge des Nachweises der Schutzwirkung des Waldbestandes (Kapitel 5.4.2 und 5.4.3) die Runsen keine gesonderte Beurteilung.

5.4.2 Nachweis der Schutzwirkung

Ziel des Nachweises ist die Bestimmung der Zuverlässigkeit der Schutzwirkung des Waldbestandes auf den betrachteten Gefahrenprozess. Diese Beurteilung erfolgt anhand der definierten Bemessungsszenarien und den Interaktionen während des Sturzprozesses hinsichtlich Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Waldbestandes. Dieses Vorgehen ist grundsätzlich ähnlich der Beurteilung technischer Schutzmaßnahmen (vgl. KALBERER 2011). Das Schema der Vorgehensweise ist Abbildung 36 zu entnehmen.

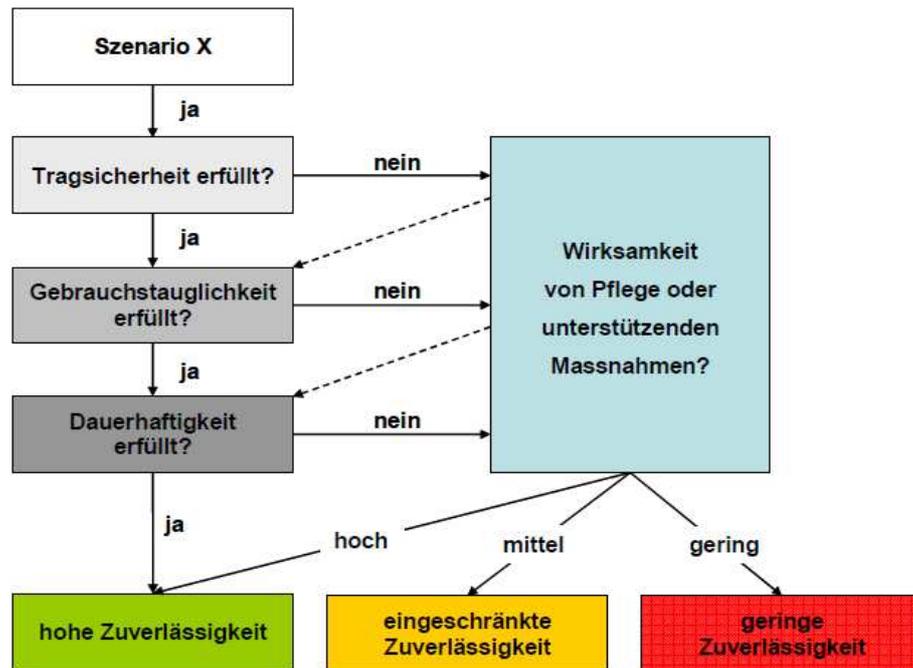


Abbildung 36: Beurteilung von Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit des Waldbestandes (KALBERER 2011).

Je nachdem, ob alle Kriterien im Zuge der Maßnahmenbeurteilung erfüllt sind, kann von einer hohen Zuverlässigkeit des Schutzwaldes ausgegangen werden. Ansonsten besteht eine eingeschränkte oder geringe Zuverlässigkeit, die durch Schutzwaldpflegemaßnahmen oder andere ergänzende Maßnahmen unter Umständen verbessert werden kann (KALBERER 2011).

5.4.2.1 Tragsicherheit

Nach KALBERER 2011 ist die Tragsicherheit erfüllt, wenn alle Einwirkungen die Tragfähigkeit des Waldbestandes nicht übersteigen. Dabei sind folgende Einwirkungen bzw. Kriterien zur Beurteilung ausschlaggebend:

- kumulierte Grundflächen der Bestände
- Gesteinsgröße und Sturzenergie
- Baumart

Die kumulierte Bestandesgrundfläche bringt das Energievernichtungsvermögen eines Waldbestandes zum Ausdruck. Sie wird aus der Grundfläche der Stammzahl pro Hektar entlang der Transitstrecke der Sturzbahn errechnet. Die Grundfläche pro Hektar wird durch 100 dividiert und mit der bewaldeten Transitstrecke multipliziert. Die Vorschläge zur Beurteilung der Tragfähigkeit sind nach KALBERER 2011 aktu-

eller Forschungsgegenstand. Die Grenzwerte zur Tragfähigkeit der kumulierten Bestandesgrundfläche sind:

- <5 - Tragsicherheit ungenügend
- 5-10 - Tragsicherheit mäßig, für Steine <60 cm Tragsicherheit erfüllt
- 10-30 - Tragsicherheit gut, auch für Steine >60 cm Tragsicherheit erfüllt
- >30 - Tragsicherheit sehr gut

Zum Nachweis der Tragsicherheit werden auf Basis von repräsentativen Hangprofilen die Länge der bewaldeten Transitstrecke und die kumulierten Bestandesgrundflächen ermittelt. Die Profile sind Abbildung 37 zu entnehmen.

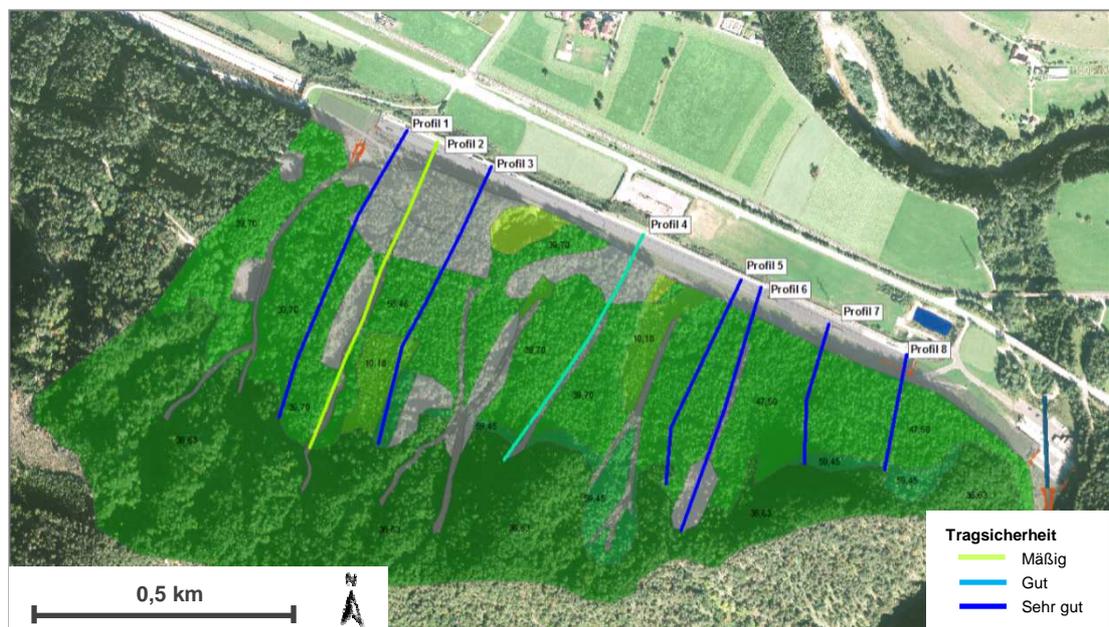


Abbildung 37: Nachweis der Tragsicherheit – kumulierte Bestandesgrundflächen.

Profile 1,3,5-8 Tragsicherheit sehr gut (kumulierte Bestandesgrundfläche > 30)

Profil 2 Tragsicherheit gut (kumulierte Bestandesgrundfläche > 10 <30)

Profil 4 Tragsicherheit mäßig (kumulierte Bestandesgrundfläche >5<10)

Die Auswertung ergibt für die meisten Hangprofile eine „sehr gute“ Tragsicherheit des aktuellen Waldbestandes. Das Profil 2 ist entlang einer unbestockten Runse angelegt und endet hangabwärts in einem Schlag mit stark reduzierter Stammzahl. Die Tragsicherheit dieses Profils ist nur als „mäßig“ einzustufen und gerade für Steindurchmesser bis <60 cm ausreichend. Die Tragsicherheit von Profil 4 wird als „gut“ beurteilt. Erwartungsgemäß ist entlang von kaum bestockten Runsen und bei kürzeren Transitstrecken mit kleineren kumulierten Bestandesgrundflächen und letztendlich einer verringerten Tragsicherheit zu rechnen.

Zusammenfassend kann die Tragsicherheit des aktuellen Waldbestandes vor allem bei häufigen Ereignissen als erfüllt betrachtet werden. Bei seltenen Ereignissen wird dem aktuellen Waldbestand zwar eine Relevanz zur Schutzwirkung zugesprochen, jedoch ist nicht von einer allgemein ausreichenden Tragsicherheit auszugehen.

5.4.2.2 Gebrauchstauglichkeit

Die Funktionstüchtigkeit des Waldbestandes hinsichtlich seiner Schutzwirkung wird als Gebrauchstauglichkeit bezeichnet (KALBERER 2011). Folgende Strukturanforderungen des Gesamtbestandes sind dabei zu berücksichtigen:

- Länge bewaldete Transitstrecke
- Lückengröße nach (vgl. Kapitel 2.3.2 nach FREHNER et al. 2005)
- keine durchgehenden Runsen

Zusätzlich zur bewaldeten Länge einer Transitstrecke sind auch Lücken und nicht bewaldete Rinnen oder Steinschlagrunsen in die Beurteilung mit einzubeziehen.

Die Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit gemäß KALBERER 2012 kann aufgrund des derzeitigen Waldbestandes für häufige Steinschlagereignisse als gegeben erachtet werden. Die erforderlichen Anforderungen an die Struktur des Waldbestandes wie der minimalen Länge von 50 m bzw. 100 m (vgl. Kapitel 5.4.1) von bewaldeten Transitstrecken ist gegeben (siehe Abbildung 23). Lücken im Bestand sind teilweise entlang der Gräben und Runsen vorhanden. Kleinere Bestandeslücken infolge von Sturmschäden (vgl. Kapitel 3.4.3) weisen als Kompensation der reduzierten Gebrauchstauglichkeit einen hohen Anteil liegender Querstämmen und verbliebener Strünke als zusätzliche Hindernisse gegenüber Steinschlagereignissen auf.

Die Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich seltener und sehr seltener Ereignisse ist als nicht ausreichend zu beurteilen. Der derzeitige Waldbestand erfüllt die optimalen Anforderungen zur Schutzwaldleistung nach FREHNER et al. 2005 nicht (vgl. Kapitel 2.3.2). Die Stammzahlen sind zwar relativ hoch, die erforderlichen Brusthöhen-durchmesser für den Rückhalt seltener Ereignisse aber nicht ausreichend.

5.4.2.3 Dauerhaftigkeit

Gemäß KALBERER 2011 sollten die Anforderungen an die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit permanent und nachhaltig verfügbar sein. Daher werden der ak-

tuelle Waldzustand und dessen wahrscheinliche Entwicklung auf Jahre hinaus berücksichtigt (beispielsweise Zeitraum von 50 Jahren). Die notwendigen Kriterien dafür sind nach KALBERER 2011 und in Anlehnung an FREHNER et al. 2005 (Kapitel 2.3.2):

- Anforderungen an die Verjüngung
- Nachhaltigkeit des Bestandes
- Kenntnis der Gefährdungsbilder

Sowohl die Verjüngung als auch der nachhaltige Aufbau des Waldbestandes sind wesentliche Faktoren zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit der Schutzfunktion. Mögliche Gefährdungsbilder einer dynamischen Waldentwicklung sind rechtzeitig abzuschätzen und notwendige Pflegeeingriffe zur Regulierung und Verbesserung des Bestandes erforderlichenfalls umzusetzen (KALBERER 2011). Da diverse Pflegemaßnahmen zwischenzeitlich auch zu einer Verringerung der Schutzfunktion führen können, ist durch unterstützende Maßnahmen die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Schutzwäldern zu verbessern. Dazu zählen beispielsweise das Belassen von liegenden Stämmen und Ästen, oder das Belassen von Baumstrünken (KALBERER 2011).

Die Erfüllung der mittel- und langfristigen Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit der Schutzwirkung des aktuellen Waldbestandes gegenüber häufigen Steinschlagereignissen ist gegeben. Bei seltenen und sehr seltenen Ereignissen ist keine ausreichende Schutzwirkung gegeben und eine Dauerhaftigkeit unwahrscheinlich. Zur Verbesserung der Schutzwirkung sind daher waldbauliche Maßnahmen und Pflegeeingriffe anzustreben, um insgesamt die Stammzahlen zu senken und die Entwicklung des mittleren bis starken Baumholzes zu fördern. Derzeit ist dem aktuellen Waldbestand eine eingeschränkte Zuverlässigkeit nach KALBERER 2011 zuzusprechen.

5.4.3 Wirkungsbeurteilung

Die Wirkungsbeurteilung beruht im Wesentlichen auf den Steinschlagsimulationen durch Rockyfor3D (vgl. Kapitel 4.4).

Die Wirkungsbeurteilung quantifiziert den Einfluss des Waldbestandes auf den Prozessablauf unter Berücksichtigung der Zuverlässigkeit nach dem Nachweis der Schutzwirkung des Waldbestandes. Dabei werden für die definierten Szenarien in

Abhängigkeit der zu erwartenden Intensität und Wahrscheinlichkeit für Steinschlagereignisse die Grundlagen für die weitere Risikoanalyse geschaffen.

Tabelle 10 veranschaulicht wesentliche Kennzahlen des dominierenden Waldbestandes innerhalb des Untersuchungsgebietes am Geschwendnerberg.

Standort	Entwicklungsstufe	Schlussgrad	Stz./ha Stamzahl	BHD [cm]	G[m ²]/ha
W01	Stangenholz	normal bis stufig	1050	24	47,5
W02	Stangenholz	gedrängt bis stufig	1560	18	39,7
W03	Stangenholz	gedrängt bis stufig	1630	21	56,5
W04	Stangenholz und schwaches Baumholz	locker	690	26	36,6
W05	Stangenholz und schwaches Baumholz	normal bis locker	900	28	55,4
W06	Jungwuchs	gedrängt	3400	6	9,6

Tabelle 10: Dominierender Waldbestand des Untersuchungsgebietes

BHD *Brusthöhendurchmesser* *G/ha* *Bestandesgrundfläche pro Hektar [m²]*

Die Angaben zu Entwicklungsstufe und Schlussgrad des Waldbestandes beziehen sich auf Definitionen nach STIERLIN et al. 1994.

5.4.3.1 Durchgangsfrequenz

In Anlehnung an die Methodik nach KALBERER 2011 charakterisiert die Anzahl der simulierten Blockdurchgänge die Durchgangsfrequenz von Steinschlag. In Abhängigkeit von der jeweiligen Anzahl der Ausbruchsstellen kann diese als Wahrscheinlichkeit ausgedrückt werden.

Abbildung 38 zeigt die berechnete Wahrscheinlichkeit von häufigen Steinschlagereignissen unter der Annahme, dass „kein Waldbestand“ vorhanden wäre. Die dunkel gefärbten Bereiche markieren eine erhöhte Durchgangswahrscheinlichkeit von Steinschlag vor allem im Nahbereich der Ausbruchsstellen. Erwartungsgemäß besteht eine erhöhte Durchgangswahrscheinlichkeit aber auch bei erhöhter Durchgangsfrequenz aufgrund des Reliefs entlang von präferentiellen Sturzbahnen (vgl. Kapitel 5.3.2 bzw. siehe Anhang Kapitel 9). Insgesamt verringert sich aufgrund der Streuung potentieller Sturzbahnen und der frühzeitigen Ablagerung die Durchgangswahrscheinlichkeit hangabwärts.

Durch den aktuellen Waldbestand wird die Durchgangsfrequenz von Steinschlag reduziert. Diese Annahme wird durch die Simulationsergebnisse bestätigt (vgl. Anhang Kapitel 9).

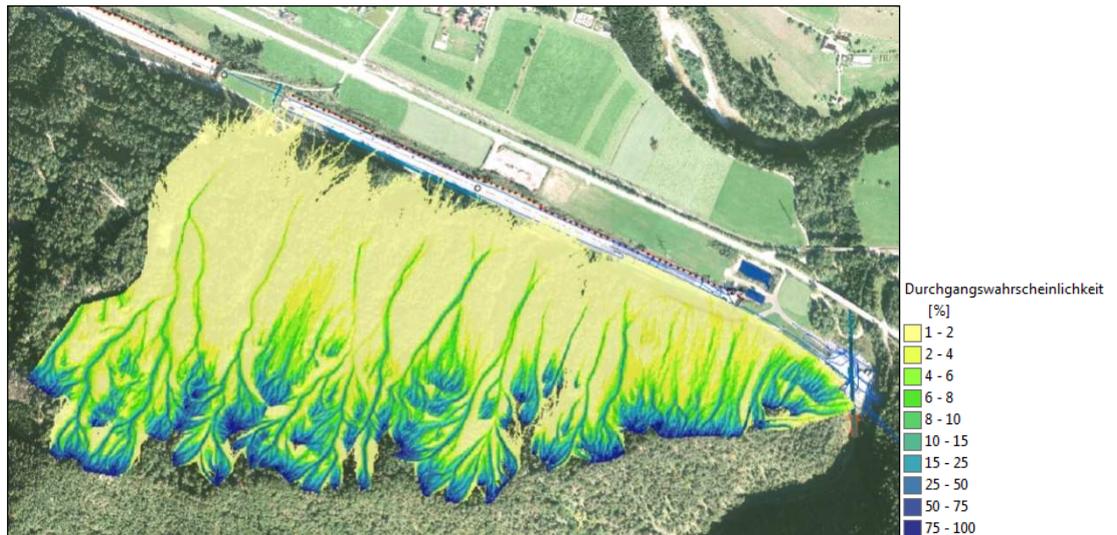


Abbildung 38: Steinschlagaktivität – Durchgangswahrscheinlichkeit von Steinschlag bei einem häufigen Szenario unter der Annahme „kein Waldbestand“ (10-30jährig).

Die Reduktion der Durchgangsfrequenz aufgrund des aktuellen Waldbestandes bei einem häufigen Szenario (10-30jährig) ist Abbildung 39 zu entnehmen.

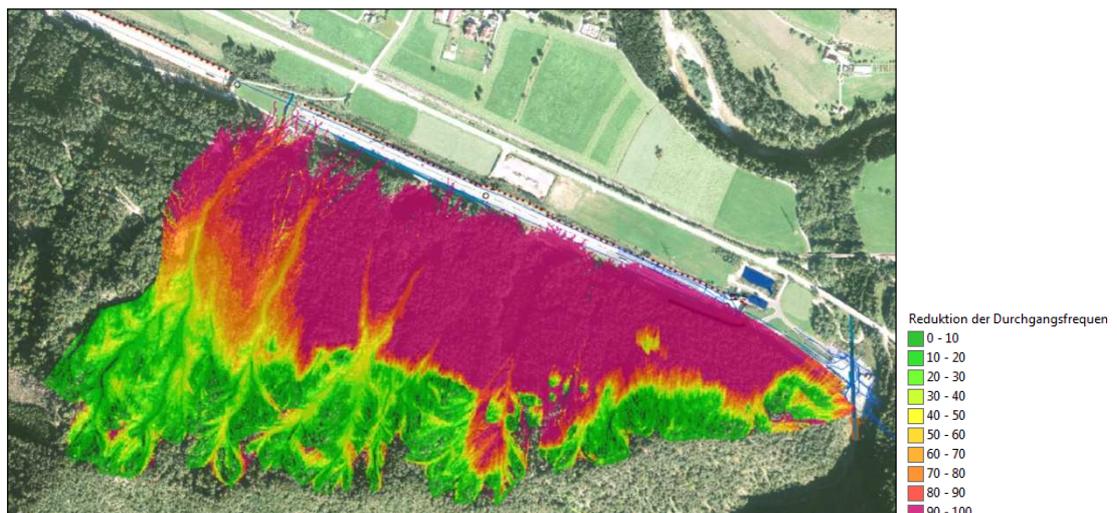


Abbildung 39: Reduktion der Durchgangsfrequenz [%] durch den aktuellen Waldbestand bei häufigen Szenarien (10-30jährig).

Nach KALBERER 2011 beziffert die Differenz zwischen den bewaldeten und unbewaldeten Durchgangsfrequenzen den durch Waldbestand zurückgehaltenen Anteil an Sturzblöcken. Die Reduktion der Durchgangsfrequenz aufgrund des aktuellen Waldbestandes wird in Prozent zu den modellierten Durchgangsfrequenzen ohne Wald angegeben. Bei Analyse der Reduktion der Durchgangsfrequenz eines bewal-

deten gegenüber unbewaldeten Szenarios ist der wirksame Waldeinfluss ersichtlich (vgl. Abbildung 39). Aufgrund des aktuellen Waldbestandes können bei einem 10-30 jährigen Szenario > 90 % (violett) aller durchgehenden Sturzkörper entlang der hangabwärts befindlichen Transitstrecke abgefangen werden.

Aufgrund des Waldwiderstandes werden vor allem die Geschwindigkeiten und Sprunghöhen vieler Sturzblöcke reduziert. Infolgedessen können auch natürliche Hindernisse des Geländes weiter abmindernd auf den Sturzprozess einwirken. Vor allem bei häufigen Ereignissen kann auch eine deutliche Verringerung der Reichweite erzielt werden. Bei seltenen Ereignissen nimmt bei Steigerung der maximalen Sturzenergie die Wirkung des Waldbestandes tendenziell ab. Eine wirksame Reduktion der Durchgangsfrequenz bleibt in geringem Umfang aufrecht. Nach Umsetzung waldbaulicher Maßnahmen zur Verbesserung der Schutzwirkung des Waldbestandes nach Kapitel 2.3.2 ist vermutlich eine weitere Reduktion der Durchgangsfrequenz zu erwarten.

In der nachfolgenden Tabelle 11 wird in Anlehnung an KALBERER 2011 der Einfluss der Waldbestockung auf die Reduktion der Durchgangsfrequenz analysiert. Es wird der prozentuelle Rückhalt von Sturzblöcken pro Laufmeter Wald zusammengefasst. Aufgrund der geringen Datendichte ist eine stochastische Auswertung und Korrelation des vermuteten Zusammenhangs zwischen der Reduktion der Durchgangsfrequenz unter Berücksichtigung der kumulierten Bestandesdichte nicht möglich. Grundsätzlich ist nach KALBERER 2011 eine Zunahme der Wirkung des Waldes mit der kumulierten Grundfläche anzunehmen.

Standort	Entwicklungsstufe	aktueller Schlussgrad	Neigung [°]	aktueller Waldzustand [%]			
				0-10	10-30	30-100	100-300
W01	Stangenholz	normal bis stufig	32,9	89,7	89,7	75,4	54,7
W02	Stangenholz	gedrängt bis stufig	32,9	84,8	83,3	59,0	55,6
W03	Stangenholz	gedrängt bis stufig	32,2	96,9	95,8	57,1	46,1
W04	Stangenholz und schwaches Baumholz	locker	44,1	24,0	19,1	11,8	12,2
W05	Stangenholz und schwaches Baumholz	normal bis locker	40,6	60,1	54,6	38,9	31,9
W06	Jungwuchs	gedrängt bis stufig	31,6	89,4	86,9	59,5	51,2
W-	Intensive Hiebs- bzw. Verjüngungsmaßnahmen	nicht relevant	32,4	83,7	84,3	29,8	25,6
Mittelwert			35,2	75,5	73,4	47,3	39,6

Tabelle 11: Reduktion der Durchgangsfrequenz nach der Waldbestockung.

Generell sind neben der Waldbestockung auch das Relief, die Hangneigung und die Bemessungsszenarien entscheidende Einflussfaktoren auf die Reduktion der Durchgangsfrequenz. Die Ablagerung erfolgt grundsätzlich bei geringer werdender

Hangneigung. Je steiler das Gelände, umso geringer ist die Waldwirkung zur Reduktion der Durchgangsfrequenz. Der aktuelle Waldbestand trägt vor allem bei häufigeren Ereignissen und kleineren Blockgrößen zur deutlichen Reduktion der Durchgangsfrequenz bei. Je dichter der Schlussgrad des Waldbestandes ist, umso stärker wirkt sich der Waldbestand auf die frühzeitige Ablagerung von Sturzblöcken aus.

5.4.3.2 Analyse der Waldwirkung

Die Analyse der Waldwirkung erfolgt in Anlehnung an die Profile zum Nachweis der Tragsicherheit des Waldbestandes nach KALBERER 2011 (Kapitel 5.4.2.1). Die Wirkung des Waldes wird beispielhaft am Verlauf von Profil 3 analysiert und veranschaulicht. Das Ergebnis ist im Wesentlichen auch für alle anderen Profile gültig.

In Abbildung 40 werden die Simulationsergebnisse der maximalen kinetischen Energie und der mittleren Sprunghöhe eines seltenen Ereignisses (30-100jährig) bei aktuellem Waldbestand in Relation zu den Ergebnissen „ohne Wald“ gesetzt. Nach Analyse der Profile ist keine zwingende Reduktion der maximalen kinetischen Energie und der mittleren Sprunghöhe zu erwarten. Fallweise kann die Waldwirkung auch nur in einer geringfügigen, oder umgekehrt auch in einer deutlichen Reduktion resultieren, wie in Abbildung 40 am Beispiel von Profil 3 ersichtlich.

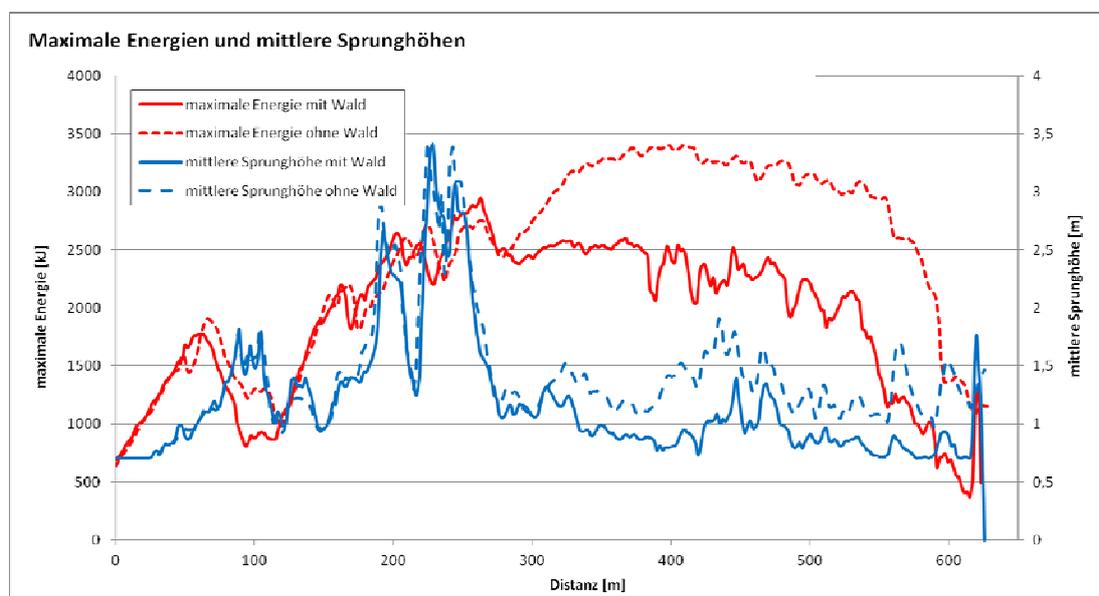


Abbildung 40: Abweichung der maximalen kinetischen Energie und mittleren Sprunghöhe durch die Wirkung des Waldbestandes (30-100jährig).

Die nachfolgende Abbildung 41 zeigt die Durchgangsfrequenz bzw. Anzahl der modellierten Sturzkörper entlang des Hangverlaufes bei Profil 3 (vgl. Kapitel 5.4.2.1).

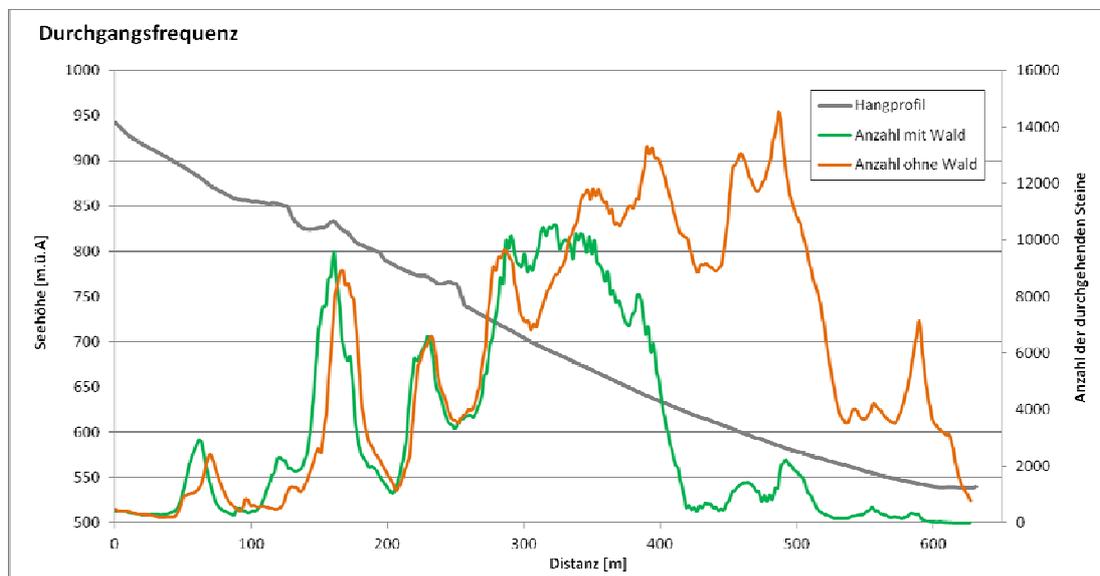


Abbildung 41: Änderung der Durchgangsfrequenzen infolge des Waldbestandes bei seltenen Ereignissen (30-100jährig).

Die Reduktion der Durchgangsfrequenz ist auf die zunehmende Ablagerung hangabwärts entlang der Sturzbahn zurückzuführen. Die maximale Reichweite von Steinschlagereignissen wird hingegen kaum verkürzt. Der Unterschied des Simulationsergebnisses zwischen den Situationen „mit“ und „ohne“ Wald tritt deutlich hervor. Im Auslösebereich und entlang der oberen Transitstrecke ist aber auch die nicht vorhandene Schutzwirkung des aktuellen Waldbestandes aufgrund der äquivalenten Anzahl der durchgehenden Sturzkörper klar zu entnehmen. In Anbetracht an die notwendigen Anforderungen an die Schutzwaldleistung (Kapitel 2.3.1 und 2.3.2) und der Größe der Bemessungsblöcke eines seltenen Ereignisses (vgl. Kapitel 5.1.3) erscheint das plausibel. Durch gezielte Pflegeeingriffe nach den Anforderungen an die Schutzwaldleistung gemäß Kapitel 2.3.2 kann die Schutzwirkung des Waldes darüber hinaus noch weiter verbessert werden. Dies geht auch aus den Analysen nach KALBERER 2011 hervor.

6 RISIKOANALYSE

6.1 Grundlagen der Risikoanalyse

Allgemein definiert sich der Begriff Risiko als die Möglichkeit, dass aus einer wirksamen Gefährdung durch ein Ereignis eine negative Auswirkung eintreten kann (u.a. BRÜNDLI 2009). Nach KIENHOLZ et al 1998 wird das Risiko als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit (p_S) eines Ereignisses und dessen Konsequenz in Form eines potentiellen Schadenausmaßes (S) bewertet (siehe Formel 6.9).

Zur qualitativen und quantitativen Beschreibung eines Risikos, werden die Einwirkungen des wirksamen Gefahrenprozesses abgeschätzt. Das Risiko wird hinsichtlich der Häufigkeit des Eintretens eines gefährlichen Ereignisses (Jährlichkeit, Eintretenswahrscheinlichkeit) und des möglichen Schadenausmaßes (Intensität) beurteilt. Die Risikobeurteilung erfolgt einerseits anhand von Szenarien früherer Ereignisse, die im Sinne einer rückwärtsgerichteten Indikation mittels Auswertung von Dokumenten, Aussagen und Geländeanalysen („stumme Zeugen“) abgeleitet werden können. Das Abschätzen künftiger Gefahrenwirkungen ohne Bezug zur Vergangenheit entspricht einer vorwärtsgerichteten Indikation mittels geomorphologischer und allgemeiner Geländeanalyse, sowie mittels Modellversuchen und -rechnungen (BORTER 1999, HEINIMANN et al. 1998).

Einem Risiko können generell Personen oder Objekte (Sachwerte, Infrastruktur) ausgesetzt sein. Die möglichen Schadensbilder eines Ereignisses sind direkte oder indirekte Schäden. Zu den indirekten Schäden zählen unter anderem Umfahrungskosten infolge gesperrter Verkehrswege (Verfügbarkeit). Direkte Schäden umfassen die gefährdeten Personen und Objekte (ASTRA 2009).

Die Risikobestimmung erfolgt aus verschiedenen Blickwinkeln (BORTER 1999):

- Objektrisiko – Ausmaß eines Risikos für ein Objekt (Bsp. ein gefährdeter Streckenabschnitt einer Verkehrsachse)
- Kollektivrisiko - Ausmaß eines Risikos für ein Kollektiv (bsp. Gesellschaft)
- Individualrisiko - Ausmaß eines Risikos für den Einzelnen

Aufgrund unterschiedlicher Schadensempfindlichkeiten der gefährdeten Objekte bestehen bei gleicher Gefährdung häufig jedoch unterschiedliche Risiken (BRÜNDLI 2009, HEINIMANN et al. 1998).

6.1.1 Systemabgrenzung

Im Zuge der Systemabgrenzung ist eine Zieldefinition der Risikoanalyse erforderlich, sowie eine geographische (räumliche Ausdehnung) und inhaltliche (Gefahrenquellen, Objekte, Art der Schäden) Beschreibung und Abgrenzung des Untersuchungsgebietes vorzunehmen. Die Abgrenzung des Untersuchungsraumes wird unterschieden in „Perimeter Schadenspotential“ und „Perimeter Gefahrenbeurteilung“, wobei sich Erstgenannter auf relevante Personen und Objekte im Untersuchungsraum bezieht, während der Perimeter Gefahrenbeurteilung auf die Prozessquellen eingeht, die auf die untersuchten Objekte einwirken (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 5.1.2).



Abbildung 42: Schematische Darstellung des Perimeters (ASTRA 2009, verändert).

6.1.2 Gefahrenanalyse

Im Rahmen der Gefahrenanalyse wird gemäß BRÜNDL 2009 bzw. ASTRA 2009 die Relation zwischen dem Ausmaß (Intensität) und der Häufigkeit von Naturgefahren untersucht. Dabei unterscheidet man zwischen der Ereignis- und Wirkungsanalyse (BRÜNDL 2009).

Die Ereignisanalyse dient der konkreten Gefahrenerkennung und definiert die maßgebenden Szenarien in Hinblick auf ihre Eintretenswahrscheinlichkeit, oder Jährlichkeit. Anhand der Interpretation verschiedener Datenquellen (siehe Kapitel 4) werden Ereignisszenarien für den Untersuchungsperimeter festgelegt (vgl. Kapitel 5.1.3).

Abbildung 43 (a) zeigt anhand der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion, dass ein Ereignis mit einer bestimmten Jährlichkeit alle (T) Jahre eintritt oder überschritten wird bzw. die Häufigkeit (b) als Differenz der jeweils angrenzenden Jährlichkeiten zu verstehen ist (BRÜNDL 2009).

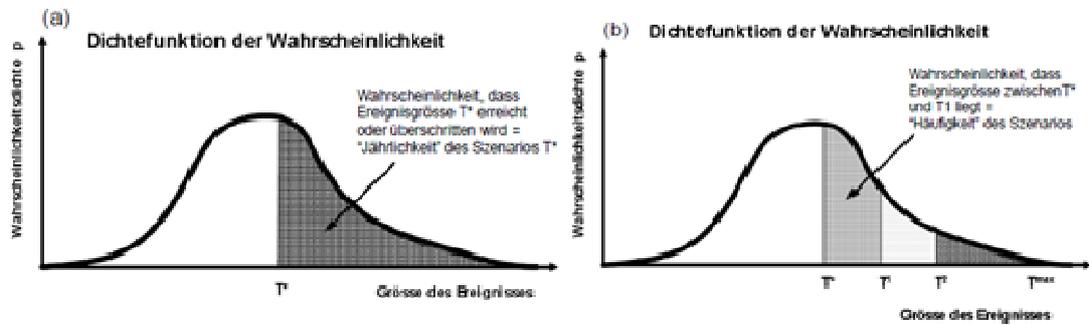


Abbildung 43: Jährlichkeit (a) und Häufigkeit (b) gemäß Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach BRÜNDL 2009 (verändert).

Die Wiederkehrperiode oder Eintretenswahrscheinlichkeit möglicher Ereignisse wird als Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Szenarios und einer bestimmten Jährlichkeit T kategorisiert und in Klassen nach BRÜNDL 2009 eingeteilt (vgl. Tabelle 12):

Wahrscheinlichkeit	Auftreten	Wiederkehrperiode / Jährlichkeit	pJ	
sehr hoch	sehr häufig	> 0 bis und mit 10 Jahre	1/J-1/10	0,0667
hoch	häufig	> 10 bis und mit 30 Jahre	1/10-1/30	0,0233
mittel	selten	> 30 bis und mit 100 Jahre	1/30-1/100	0,0067
gering	sehr selten	> 100 bis und mit 300 Jahre	1/100-1/300	0,0033
sehr gering	extrem selten	> 300 Jahre	-	-

Tabelle 12: Kategorisierung der Wiederkehrperioden (ASTRA 2009, verändert).

In der Praxis ist die Angabe von Jährlichkeiten mit Unsicherheiten behaftet. Unter der Voraussetzung eines einheitlichen Betrachtungszeitraumes kann die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit zu erwartender Schadensfolge anhand der mittleren Wiederkehrdauer angegeben werden (HEINIMANN et al 1998):

$$p = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n \tag{Formel 6.1}$$

n Betrachtungszeitraum p Eintretenswahrscheinlichkeit
 T Wiederkehrperiode

Tabelle 13 verdeutlicht nach HEINIMANN et al. 1998, dass für einen bestimmten Betrachtungszeitraum (beispielsweise 50 Jahre) auch bei einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren immer noch eine Eintretenswahrscheinlichkeit von 16 % errechnet

werden kann. Ereignisse, die mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten, werden als Restgefährdung eingestuft.

Wahrscheinlichkeit		Wiederkehrperiode	
<i>Eintretenswahrscheinlichkeit in 50 Jahren</i>		<i>Wiederkehrperiode in Jahren</i>	
hoch	<i>100 bis 82 %</i>	häufig	<i>1 bis 30 Jahre</i>
mittel	<i>82 bis 40 %</i>	mittel	<i>30 bis 100 Jahre</i>
gering	<i>40 bis 16 %</i>	selten	<i>100 bis 300 Jahre</i>

Tabelle 13: Eintretenswahrscheinlichkeit bei definiertem Beobachtungszeitraum von 50 Jahren (HEINIMANN et al. 1998).

In der Regel wird die Eintretenswahrscheinlichkeit eines bestimmten Ereignisses für die Zeitspanne eines Jahres errechnet. Allgemein ist die Wahrscheinlichkeit p_J eines Szenarios mit der Wiederkehrperiode J die Wahrscheinlichkeit, dass der Wert der Wiederkehrperiode J erreicht oder überschritten wird, aber die Wiederkehrperiode $J+1$ nicht übersteigt (ASTRA 2009):

$$p_J = h_J - h_{J+1} \quad (\text{Formel 6.2})$$

Eine Anpassung der Eintretenswahrscheinlichkeit und Jährlichkeit infolge einer möglichen Häufung von Steinschlagereignissen bei Vergleich der Situationen „aktueller Waldbestand“ und „kein Wald“ ist in Anbetracht fehlender Literaturangaben nicht zweckmäßig. Zwar bestehen Auswirkungen des Waldbestandes auf die Steinschlagaktivität (vgl. Kapitel 2.1.2), doch sind diese nicht unmittelbar zu quantifizieren. Im Allgemeinen wird festgehalten, dass die Wahrscheinlichkeit und Jährlichkeit von Ausbrüchen und Steinschlagereignissen als Folge von Verwitterungsprozessen und nicht auf den Waldbestand zurückzuführen sind.

Art, Ausdehnung und Intensität eines gefährlichen Prozesses werden im Zuge der Wirkungsanalyse bestimmt und üblicherweise mittels Intensitätskarten zur erwartenden Wirkung eines Szenarios dargestellt (ASTRA 2009). Die Intensitätskarten basieren auf den Simulationsergebnisse durch Rockyfor3D gemäß Kapitel 4.4 und sind dem Anhang in Kapitel 9 zu entnehmen.

Die Abstufung unterschiedlicher Intensitäten erfolgt üblicherweise anhand der Einteilung nach Intensitätsklassen (BRÜNDL 2009).

Als maßgebendes Kriterium zur Klassifizierung und somit zur Gefahrenbeurteilung bei Massenbewegungen dient nach BRÜNDL 2009, bzw. LATELTIN 2001 die Auf-

prallenergie im gefährdeten Bereich (vgl. Translations- und Rotationskomponente, Kapitel 2.1.3). Die Klassen der Intensität werden folglich unterschieden als:

- starke Intensität $E > 300 \text{ kJ}$
- mittlere Intensität $30 < E < 300 \text{ kJ}$
- schwache Intensität $E < 30 \text{ kJ}$

Wesentliche Grundlage der Risikoanalyse sind daher die Intensitätskarten der Szenarien (vgl. Anhang Kapitel 9). Abbildung 44 veranschaulicht diese Intensität entlang der Autobahn bei häufigen Ereignissen für die Situation „ohne“ Wald.

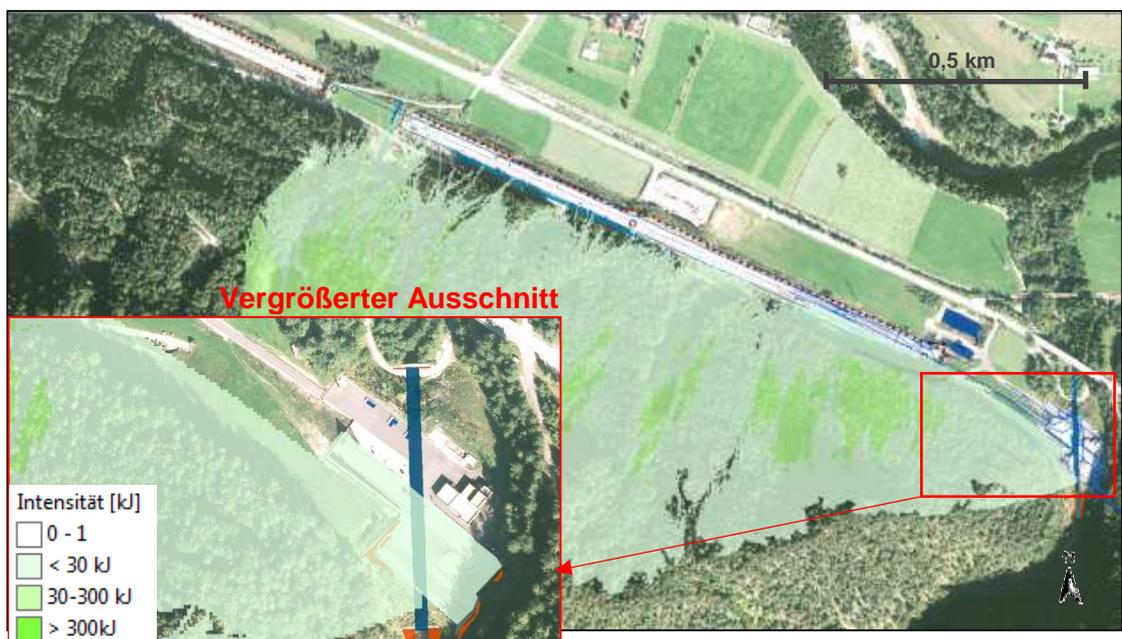


Abbildung 44: Intensitätskarte des häufigen Ereignisses „ohne“ Waldbestand.

Anhand der Intensitätskarten und der Durchgangswahrscheinlichkeit (vgl. Anhang Kapitel 9) werden die gefährdeten Abschnittsbreiten des Prozessraumes definiert.

Die Gefahrenbeurteilung und Wirkungsanalyse erfolgt jeweils für jede Prozessquelle des Untersuchungsperimeters. Nach ASTRA 2009 sind Prozessquellen als Areale einheitlicher Gefahrendisposition zu verstehen (vgl. Definition Kapitel 5.1.2). Unter Berücksichtigung aller zur Verfügung stehenden Arbeitsunterlagen werden pro Prozessquelle und Szenario das Ausmaß und die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit möglicher Ereignisse definiert. Die Beurteilung erfolgt in allen Phasen der Risikoanalyse gemäß der aktuellen Situation (aktueller Waldbestand), als auch für die fiktive Situation „kein Wald“ vorhanden. Vereinzelt technische Schutzmaßnahmen

gemäß Kapitel 3.5 werden zur Quantifizierung der Schutzwaldleistung nicht berücksichtigt (vgl. Kapitel 0).

Entgegen der Empfehlung nach ASTRA 2009 wird im Rahmen der Wirkungsanalyse nicht im Detail unterschieden, ob die ganze Fahrbahnbreite, der Fahrstreifen einer Richtungsfahrbahn oder nur der Randbereich der Fahrbahn (Standstreifen) von einem Ereignis betroffen ist. Die Simulation endet in der Mitte beider Richtungsfahrbahnen, sodass das Gefahrenpotential für die Richtungsfahrbahn Nord nur interpretiert werden kann (vgl. Kapitel 4.4).

6.1.3 Expositionsanalyse

Aufgabe der Expositions- oder Schadenspotentialanalyse ist die Identifikation nach Art und Auftreten potentiell durch einen Prozess gefährdeter Personen und Objekte im Beurteilungssperimeter. Objekte werden grundsätzlich als ortsfest (Infrastruktur, Gebäude), oder zeitlich und örtlich variabel (Fahrzeuge, mobile Einrichtungen) angesehen (ASTRA 2009, BRÜNDL 2009).

Im Zuge der Risikoanalyse werden folgende Schadensbilder nach ASTRA 2009 berücksichtigt:

- Direkttreffer
- Auffahrunfall
- Verschüttung
- Verfügbarkeit

Die Schadensbilder der direkten Schäden „Direkttreffer“ und „Auffahrunfall“ beschäftigen sich mit Personen in variablen Objekten (Fahrzeugen), die sich temporär innerhalb des Untersuchungssperimeters aufhalten (BRÜNDL 2009). Indirekte Folgen an der Infrastruktur (Verschüttung, Verfügbarkeit) werden im Zuge der Risikoanalyse ebenfalls berücksichtigt.

Die Grundsituation einer Exposition nach BRÜNDL 2009 beschreibt eine Normalsituation der Verkehrslage mit einer konstanten Anzahl von Personen über einen längeren Zeitraum. Eine Sondersituation tritt beispielsweise ein, wenn es zu einem Stau kommt. Somit schwankt die Anzahl potentiell gefährdeter Personen kurzfristig.

Demnach werden die beiden Expositionssituationen p_{Stau} als „Stausituation“ und p_{Norm} als „Normalsituation“ nach ASTRA 2009 unterschieden:

$$p_{Stau} = \left(\frac{\text{Anzahl Staus pro Jahr}}{365} \right) \cdot \left(\frac{\text{Durchschnittliche Dauer pro Stau [h]}}{24} \right) \quad (\text{Formel 6.3})$$

$$p_{Norm} = 1 - p_{Stau} \quad (\text{Formel 6.4})$$

In Anbetracht der vordefinierten Situation werden zusätzliche charakteristische Werte zur Risikoberechnung ermittelt:

- Durchschnittlich tägliche Verkehrsfrequenz (DTV_k)
- Besetzungsgrad der Fahrzeuge (β_k)
- Geschwindigkeit der Fahrzeuge im gefährdeten Streckenabschnitt (v).

Folglich kann nach ASTRA 2009 die Anzahl sich bei Normalverkehr und in Stausituationen im Prozessraum aufhaltender Fahrzeuge N_F für das Szenario „Direkttreffer“ berechnet werden.

Normalsituation:

$$N_{FNorm} = \frac{(DTV \cdot g)}{(v \cdot 24000)} \quad (\text{Formel 6.5})$$

Stausituation:

$$N_{FStau} = \frac{(\rho_{max} \cdot g)}{1000} \quad (\text{Formel 6.6})$$

DTV_k	Durchschnittliche tägliche Verkehrsfrequenz	v	Geschwindigkeit der Fahrzeuge im gefährdeten Streckenabschnitt
G	Länge des gefährdeten Abschnittes pro Intensitätszone	ρ_{max}	Maximale Fahrzeugdichte in Stausituationen (140 Fzg. pro km und Fahrstreifen)

Im nächsten Schritt wird mit Hilfe des durchschnittlichen Besetzungsgrades β_k die Anzahl gefährdeter Personen N_P berechnet:

$$N_P = N_F \cdot \beta \quad (\text{Formel 6.7})$$

N_P	Anzahl betroffener Personen	β_k	Besetzungsgrad der Fahrzeuge
N_F	Anzahl betroffener Fahrzeuge		

Die Wahrscheinlichkeit der Situation „Auffahrunfall“ oder $p_{Auffahr}$ ist gemäß ASTRA 2009 für einen bestimmten Streckenabschnitt mittels äußerer Einflussfaktoren wie Sichtweite, Fahrgeschwindigkeit, Verkehrsdichte und Streckenführung abzuschätzen. Die Auffahrwahrscheinlichkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit ob ein

Fahrzeug infolge eines Ereignisses mit Ablagerungen, Schäden an der Fahrbahn oder mit bereits verunfallten Fahrzeugen kollidiert. Ein „Auffahrunfall“ ist außerdem nur bei „Normalverkehr“ größeren Bemessungsblockgrößen relevant (ASTRA 2009).

6.1.4 Konsequenzanalyse

Die Konsequenzanalyse beschreibt die Folgenabschätzung von Ereignisszenarien in Abhängigkeit der zu erwartenden Auswirkungen der Ereignisse auf Personen (Personenrisiken) oder Objekte (Sachrisiken) aufgrund der wirksamen Prozessintensität. Dabei sind folgende Faktoren zu berücksichtigen (ASTRA 2009, BRÜNDL 2009):

- Schadensempfindlichkeit (Vulnerabilität) bzw. Letalität bei Personen
- Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit
- Präsenzwahrscheinlichkeit

Die Schadensempfindlichkeit charakterisiert nach BRÜNDL 2009 das Ausmaß der Beeinträchtigungen auf Personen oder Objekte infolge von Prozesseinwirkungen. Die Schadensempfindlichkeit wird abhängig von Prozessart und Intensitätsstufe (schwach, mittel, stark) mit einem Wert zwischen 0 (keine Beeinträchtigung) bis 1 (totale Beeinträchtigung = Totalschaden bzw. Letalität) quantifiziert und als Schadensausmaß ausgedrückt (siehe Kapitel 6.2).

Vor allem aufgrund fehlender Erfahrungswerte werden im Zuge von Risikoanalysen bei Naturgefahren hinsichtlich der zu erwartenden Personenschäden ausschließlich Unfälle mit Todesfolge berücksichtigt (ASTRA 2009).

Die Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass bei Eintritt eines Gefahrenprozesses ein bestimmter Punkt des Untersuchungsgebietes erreicht wird. Da üblicherweise nicht der gesamte Perimeter bei Eintritt eines Ereignisses von einem Prozess betroffen ist, wird die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit, bezogen auf den untersuchten Perimeter (=flächiges, linienförmiges oder punkartiges Raumelement) angegeben (BRÜNDL 2009).

Speziell nach KALBERER 2011 berechnet sich bei Steinschlagprozessen die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$ aus der Anzahl des Schadenpotentials treffender Steine $n(St)$, deren Durchmesser $d(St)$ und der Breite des Prozessraumes $b(Pr)$.

$$p(rA)_J = n(St)_J \cdot \frac{d(St)_J}{b(Pr)_J} \quad (\text{Formel 6.8})$$

$p(rA)$	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	$d(St)$	Steindurchmesser (Bemessungsblock)
$n(St)$	Anzahl treffender Steine	$b(Pr)$	Breite des Prozessraumes

Die Präsenzwahrscheinlichkeit $p(pr)$ resultiert aus der durchschnittlichen Dauer der Anwesenheit einer Person oder eines Objektes im gefährdeten Bereich. Aufgrund der Tatsache, dass die betrachteten Personen den Perimeter der A9 Pyhrn Autobahn durchfahren und sich daher nur kurzfristig im Gefahrenbereich aufhalten, wirkt sich die Präsenzwahrscheinlichkeit reduzierend auf die Eintretenswahrscheinlichkeit eines Schadens aus (vgl. BRÜNDL 2009).

Auch die Ermittlung des Schadenausmaßes von Sachrisiken ist nach ASTRA 2009 wegen oft fehlender Beurteilungsgrundlagen kritisch zu hinterfragen. Die Schadensbilder „Verschüttung“ und „Verfügbarkeit“ werden zur Bestimmung des möglichen Schadenausmaßes anhand der aufgestellten Beziehung zwischen Sperrungswahrscheinlichkeit p_{Sp} und der Sperrhäufigkeit h_{Sp} abgeschätzt. Dabei wird unterschieden zwischen den Situationen „Sperrung nach Ereignis“ und „vorsorgliche Sperrung“. Infolge der zusätzlichen Fahrzeit bei erforderlicher Umfahrung der Autobahn ergeben sich erhöhte Zeitverluste und Kosten, die durch den Staukostenansatz monetär bewertet werden können (ASTRA 2009). Alle Angaben hierzu sind den Tabellen zur Risikoermittlung dem Anhang in Kapitel 9 zu entnehmen.

6.2 Risikoberechnung

In Anlehnung an ASTRA 2009 bzw. BRÜNDL 2009 erfolgt die Risikoberechnung pro Prozessquelle, Eintretenswahrscheinlichkeit des Szenarios und Schadensbild nach der allgemein gültigen Formel:

$$R_{i,J} = p_{S_{i,J}} \cdot S_{i,J} \quad (\text{Formel 6.9})$$

$R_{i,J}$	Risiko des Objektes i bei Szenario J	$S_{i,J}$	Schadenausmaß des Objektes i aufgrund Szenario J
$p_{S_{i,J}}$	Schadenswahrscheinlichkeit bei Objekt i aufgrund von Szenario J		

Das Risiko eines bestimmten Szenarios ($R_{i,J}$) setzt sich aus der Häufigkeit p_J bzw. aus der Schadenswahrscheinlichkeit $p_{S_{i,J}}$ und dem wahrscheinlichen Schadenausmaß $S_{i,J}$ zusammen (vgl. KALBERER 2011, ASTRA 2009).

Wie bereits in Kapitel 6.1 festgestellt, kann ein Risiko qualitativ und quantitativ bestimmt werden. Im Falle der qualitativen Bestimmung ist das Risiko einheitslos. Erst im Zuge der quantitativen Bewertung wird in weiterer Folge zwischen dem Personen- und dem Sachrisiko einerseits und zwischen kollektiven und individuellen Risiken andererseits unterschieden (ASTRA 2009).

Nach BRÜNDL 2009 bzw. ASTRA 2009 wird das Sachrisiko als jährlicher statistischer Schadenserwartungswert berechnet und in Euro pro Jahr angegeben. Das Personenrisiko wird als Risiko pro Jahr angegeben und drückt die Anzahl der jährlichen Todesfälle aus. Infolgedessen kann die Häufigkeit von Todesfällen abgeschätzt werden. Zur Vergleichbarkeit des Personenrisikos mit dem Sachrisiko muss das Personenrisiko „monetarisiert“ werden. Dafür können nach die sogenannten „Grenzkosten“ für einen Todesfall heran gezogen werden, Diese betragen pro Todesopfer 4,1 Millionen Euro. Die Grenzkosten sind nicht als „Wert“ eines Menschenlebens zu verstehen, sondern als Kriterium der Kosten, welche die Gesellschaft zur Verhinderung eines Todesfalls bereit ist auszugeben.

Die Formeln zur Risikoermittlung werden gemäß ASTRA 2009 folgendermaßen in den Kapiteln 6.2.1 bis 6.2.4 eingesetzt.

6.2.1 Risikoermittlung Direkttreffer

Das Schadensbild für „Direkttreffer“ wird ausschließlich pro Fahrbahn berechnet nach:

Stausituation:

$$p_{SDFahrbahnStau} = p_J \cdot (1 - p_{Sp}) \cdot (1 - p_{GSp}) \cdot p_{Stau} \quad (\text{Formel 6.10})$$

Normalsituation:

$$p_{SDFahrbahnNorm} = p_J \cdot (1 - p_{Sp}) \cdot (1 - p_{GSp}) \cdot p_{Norm} \quad (\text{Formel 6.11})$$

p_J	Wahrscheinlichkeit des Szenarions J	p_{Stau}	Wahrscheinlichkeit der Stausituation
p_{Sp}	Wahrscheinlichkeit der vorsorglichen Sperrung	p_{Norm}	Wahrscheinlichkeit der Normalsituation
p_{GSp}	Sperrungswahrscheinlichkeit infolge gleichzeitiger Ereignisse		

Das Schadensausmaß berechnet sich entsprechend:

$$S_{DFahrbahn} = N_P \cdot \lambda \cdot p_{rA} \cdot f_F \quad (\text{Formel 6.12})$$

N_P	Anzahl betroffene Personen pro Szenario	λ	Letalität im Ereignisfall
p_{rA}	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit	f_F	Fahrbahnfaktor

Daraus resultiert das Risiko (Formel 6.13):

$$R_{DFahrbahn Q,i} = (S_{DFahrbahnStau} \cdot p_{SDFahrbahnStau}) + (S_{DFahrbahnNorm} \cdot p_{SDFahrbahnNorm})$$

6.2.2 Risikoermittlung Auffahrunfall

Die Ermittlung der Schadenswahrscheinlichkeit „Auffahrunfall“ errechnet sich folgendermaßen:

$$p_{SAuffahr} = p_J \cdot (1 - p_{Sp}) \cdot (1 - p_{GSp}) \cdot p_{Auffahr} \cdot f_F \cdot (1 - p_{Stau}) \quad (\text{Formel 6.14})$$

p_J	Wahrscheinlichkeit des Szenarios J	f_F	Fahrbahnfaktor
p_{Sp}	Wahrscheinlichkeit der vorsorglichen Sperrung	p_{Stau}	Wahrscheinlichkeit der Stausituation
p_{GSp}	Sperrungswahrscheinlichkeit infolge gleichzeitiger Ereignisse	$p_{Auffahr}$	Wahrscheinlichkeit für einen Auffahrunfall

Das Schadensausmaß berechnet sich weiter wie folgt:

$$S_{Auffahr} = N_P \cdot \lambda \quad (\text{Formel 6.15})$$

N_P	Anzahl betroffene Personen pro Szenario	λ	Letalität im Ereignisfall
-------	---	-----------	---------------------------

Somit kann das Risiko $R_{Auffahr Q,i}$ von Personen auf der Fahrbahn für das Auffahren auf Hindernisse wie folgt berechnet werden:

$$R_{Auffahr Q,i} = (S_{Auffahr} \cdot p_{SAuffahr}) \quad (\text{Formel 6.16})$$

p_J	Wahrscheinlichkeit des Szenarios J	f_F	Fahrbahnfaktor
p_{Sp}	Wahrscheinlichkeit der vorsorglichen Sperrung	p_{Stau}	Wahrscheinlichkeit der Stausituation

6.2.3 Risikoermittlung Verschüttung

Die Schadenswahrscheinlichkeit „Verschüttung“ errechnet sich aus:

$$p_{SVerschüttung} = p_J \quad (\text{Formel 6.17})$$

p_J	Wahrscheinlichkeit des Szenarios J
-------	------------------------------------

Das Schadensausmaß ist in weiterer Folge:

$$S_{Verschüttung} = g \cdot W \cdot SE \cdot p_{rA} \cdot f_F \quad (\text{Formel 6.18})$$

G	Länge des effektiv betroffenen Abschnitts	p_{rA}	Räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit
W	Basiswert eines Objektes	F_F	Fahrbahnfaktor
SE	Schadensempfindlichkeit eines Objektes		

Infolgedessen kann das Risiko $R_{\text{Verschüttung } Q,i}$ für Räumung und Wiederherstellung berechnet werden:

$$R_{\text{Verschüttung } Q,i} = (S_{\text{Verschüttung}} \cdot p_{S_{\text{Verschüttung}}}) \quad (\text{Formel 6.19})$$

6.2.4 Risikoermittlung Verfügbarkeit

Entsprechend Kapitel 6.1.4 wird hinsichtlich Verfügbarkeit unterschieden in die Schadensbilder „Sperrung nach Ereignis“ und „vorsorgliche Sperrung“. Diese Schadensbilder beschreiben die Verfügbarkeit der Fahrbahn und ermitteln das Risiko für Sperrungs- und Umfahungskosten. Das Schadensbild „vorsorgliche Sperrung“ wird jedoch für Sturzereignisse als nicht relevant eingestuft und daher nicht berechnet.

Die Schadenswahrscheinlichkeit für Sturzprozesse lässt sich ermitteln aus:

$$p_{S_{\text{VerfügE}}} = p_J \quad (\text{Formel 6.20})$$

p_J Wahrscheinlichkeit des Szenarios J

Das Schadensausmaß im Falle der „Sperrung nach Ereignis“ ist:

$$S_{\text{VerfügE}} = d_{SpE} \cdot DTV \cdot K_{\text{Stau}} \cdot \sum(d_{\text{Umfahr}}) \quad (\text{Formel 6.21})$$

d_{SpE}	Dauer der Sperrung infolge Ereignis	K_{Stau}	Staukostenansatz
DTV	Durchschnittliche tägliche Verkehrsfrequenz	P_{Umfahr}	Zusätzlich benötigte Fahrzeit pro Fahrzeug infolge Sperrung

Der durchschnittliche Stau-Kostenansatz K_{Stau} setzt sich aus den einzelnen Kostenfaktoren aufgrund der Umfahrung zusammen und wird pro Fahrzeug und Stunde mit € 17,20 kalkuliert. Damit errechnet sich das Risiko $R_{\text{VerfügE}}$ aus:

$$R_{\text{VerfügE } Q,i} = (S_{\text{VerfügE}} \cdot p_{S_{\text{VerfügE}}}) \quad (\text{Formel 6.22})$$

6.3 Interpretation der Risikoanalyse

6.3.1 Risikoermittlung

Die angewandte Risikoanalyse basiert vor allem auf dem Leitfaden Risikokonzept für Naturgefahren – RIKO nach BRÜNDL 2009 und auf dem Risikokonzept Naturgefahren Nationalstraßen gemäß ASTRA 2009. Erkenntnisse aus den Expertendiskussionen mit Luuk Dorren fließen in die Bewertung mit ein (DORREN 2013).

Das Ziel dieses Kapitels ist die Bewertung und Interpretation der wesentlichen Analyseergebnisse zur Quantifizierung der Schutzwirkung des Waldbestandes bei Steinschlagereignissen. Berücksichtigt werden die Schadenspotentiale von Personenschäden mit Todesfolge in Fahrzeugen durch Direkttreffer bei normaler Verkehrslage, in Stausituationen, bei Auffahrunfällen, sowie Sachschäden an der Fahrbahn (Verschüttung) und die Verfügbarkeit der Autobahn (vgl. Kapitel 6.1). Alle Berechnungsschritte, Parameter zur Risikoermittlung und sämtliche Ergebnisse der Risikoanalyse sind dem Anhang in Kapitel 9 zu entnehmen.

Wie in Kapitel 6.2 bereits festgehalten setzt sich das Risiko eines Szenarios ($R_{i,J}$) aus der Häufigkeit p_J bzw. aus der Schadenswahrscheinlichkeit $ps_{i,J}$ und dem wahrscheinlichen Schadensausmaß $S_{i,J}$ zusammen (vgl. Formel 6.23). Das Gesamtrisiko resultiert somit aus der Summe der einzelnen Risiken. Anhand der Differenz der berechneten Risiken bei aktuellem Waldbestand und „ohne“ Wald kann die Risikoreduktion aus der Schutzwirkung des Waldes ermittelt werden (vgl. KALBERER 2011, ASTRA 2009).

$$R_{i,J} = \sum_J R_J = \sum_J ps_{i,J} \cdot S_{i,J} \quad (\text{Formel 6.23})$$

$R_{i,J}$	<i>Risiko des Objektes i bei Szenario J</i>	$S_{i,J}$	<i>Schadensausmaß des Objektes i aufgrund Szenario J</i>
$ps_{i,J}$	<i>Schadenswahrscheinlichkeit bei Objekt i aufgrund von Szenario J</i>		

Bei sehr häufigen Ereignissen besteht entlang der Autobahn nach derzeitigem Kenntnisstand und unabhängig vom Waldbestand keine Gefährdung und somit keine Risikorelevanz. Des Weiteren sind die potentiell häufigen Ereignisse zwischen Waldnerberg- und Lainbergtunnel kaum risikorelevant. Die dort bestehenden Schutzmaßnahmen in Form von Holzschlachtenwänden werden als ausreichend gegen vereinzelte Steinschlagereignisse angesehen (vgl. simulierte Energieeinwirkung und Sprunghöhen Kapitel 5.3.2). Die Intensität beträgt unabhängig vom Wald-

bestand dort < 30 kJ (vgl. Intensitätskarten Anhang Kapitel 9). Die Risikoermittlung für 10-30jährige Ereignisse erfolgt daher unter der Annahme, dass diese Schutzmaßnahmen nicht vorhanden wären, um speziell die Rolle der Schutzwirkung des Waldbestandes zu analysieren.

Voraussetzung einer Risikozunahme oder Abnahme ist eine entsprechende Änderung der Eintretenswahrscheinlichkeit von Steinschlagereignissen. Im Allgemeinen kann bei Verminderung oder Verlust des Waldbestandes von einer Zunahme der Ereignishäufigkeit entlang der Autobahn ausgegangen werden (DORREN 2013).

Gemäß DORREN 2013 kann zur Quantifizierung der Häufigkeit und Risiken unter Berücksichtigung der Schutzwirkung des Waldbestandes zwischen den folgenden drei, grundlegenden Ansätzen unterschieden werden:

- Ansatz 1 - Berechnung der Risikozunahme bei unveränderter Ausbruchswahrscheinlichkeit, aber bei zunehmender Ereignishäufigkeit durch Verminderung oder Verlust des Waldbestandes.
- Ansatz 2 - Berechnung der Risikozunahme infolge der zunehmenden räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit bei aktuellem Waldbestand gegenüber der Situation „ohne“ Waldbestand.
- Ansatz 3 - Berechnung der Risikozunahme für die Situation „ohne“ Waldbestand gegenüber aktuellem Waldbestand durch Anwendung eines allgemeinen „Faktors“. Dieser Faktor berechnet die Risikozunahme basierend auf der Anzahl simulierter Blöcke, die je nach Situation des Waldbestandes („mit“ und „ohne“ Wald) die Autobahn erreichen.

6.3.1.1 Risikozunahme bei zunehmender Ereignishäufigkeit (Ansatz 1)

Die Ereignishäufigkeit von Steinschlagereignissen ist einerseits abhängig von der Ausbruchswahrscheinlichkeit von Steinschlagereignissen, aber auch vom Einfluss durch den jeweiligen Waldbestand. Die Zunahme der Eintretenswahrscheinlichkeit von Steinschlagereignissen ist gleichbedeutend mit einer Zunahme der Ereignishäufigkeit bzw. Jährlichkeit und infolgedessen mit einer Risikozunahme entlang der Autobahn. Dabei kann bei gleichbleibender Ausbruchswahrscheinlichkeit am Ursprungsort des Steinschlagereignisses die Zunahme auf eine Reduktion des Waldbestandes zurückgeführt werden.

Beispielsweise ereignet sich das Szenario eines Steinschlagereignisses bei aktuellem Waldbestand 1 Mal in 30 Jahren. Bei verringertem Waldbestand und Annahme der Situation „ohne“ Wald nimmt die Ereignishäufigkeit entsprechend zu und das Ereignis findet nunmehr 2 Mal oder öfters in 30 Jahren statt und erreicht die Autobahn. Folglich kann aus der sich ändernden Eintretenswahrscheinlichkeit und aufgrund der Zunahme der Häufigkeit dieses Ereignisses auch eine Zunahme der Jährlichkeit interpretiert werden. Ein bisher 30jähriges Ereignis entspräche daher bei verringertem Waldbestand bzw. „ohne“ Wald nur mehr der Jährlichkeit eines 10, oder 15jährigen Ereignisses. Das Ereignis würde etwa doppelt so häufig eintreten.

Die Verfügbarkeit von langjährigen Beobachtungsreihen zur Ermittlung der Ereignishäufigkeit von Steinschlägen ist oftmals jedoch nicht in ausreichender Form gegeben (vgl. Ereignisdokumentationen Kapitel 5.1.1). Folglich ist das Festlegen von Wahrscheinlichkeiten bei Steinschlagereignissen kaum mit Hilfe stochastischer Methoden plausibel nachzuvollziehen. Um daher die Zunahme der Ereignishäufigkeit von Steinschlägen bei Verlust des Waldbestandes nachzuweisen, werden in der vorliegenden Diplomarbeit vorrangig der Ansatz 2 zur räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 6.3.1.2) und Ansatz 3 anhand der Simulationsergebnisse zur Summe der Ablagerungen gemäß Rockyfor3D (vgl. Kapitel 6.3.1.3) und herangezogen.

6.3.1.2 Risikozunahme aufgrund der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit (Ansatz 2)

Die Risikoermittlung bei aktuellem Waldbestand erfolgt für alle Szenarien nach dem Prinzip der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$, aber unter Berücksichtigung der jeweiligen Ereignishäufigkeit. Die Berechnung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$ resultiert aus den Intensitätskarten und setzt sich aus der Anzahl des Schadenpotential treffender Steine $n(St)$ gemäß Kapitel 6.1, deren Durchmesser $d(St)$ und der Breite des Prozessraumes $b(Pr)$ zusammen. Nehmen diese Faktoren zu – beispielsweise durch Verminderung des Waldbestandes – steigt die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit.

Abbildung 45 veranschaulicht den Ablauf der Risikoanalyse für die Szenarien bei aktuellem Waldbestand. Zur Risikoermittlung bei aktuellem Waldbestand wird in der vorliegenden Arbeit die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit herangezogen.

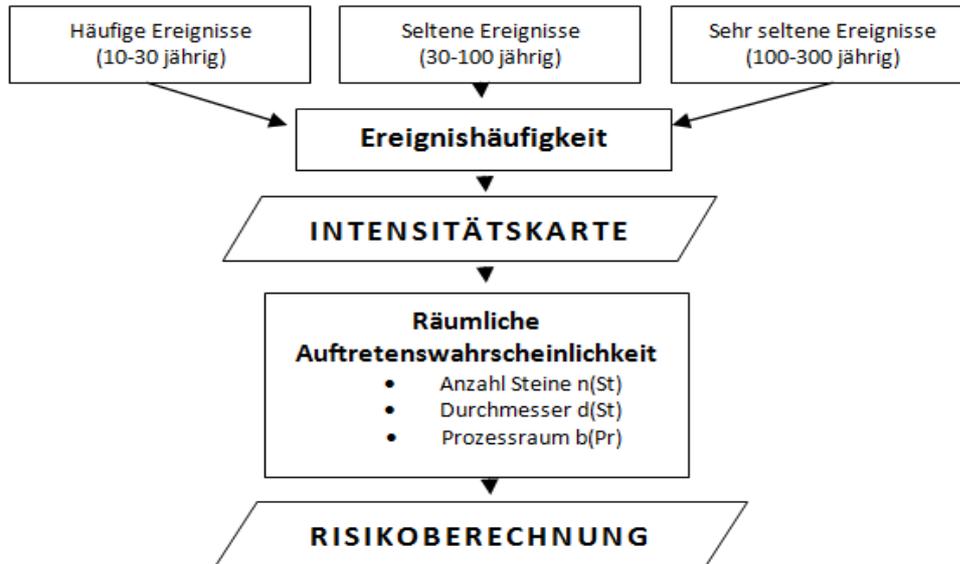


Abbildung 45: Flussdiagramm zur Risikoanalyse bei aktuellem Waldbestand.

Angenommen ein Steinschlagszenario ereignet sich bei aktuellem Waldbestand 1 Mal in 30 Jahren. Im Gegensatz zu Ansatz 1 zerbricht jedoch der Sturzblock bei gleicher Ausbruchswahrscheinlichkeit und Ereignishäufigkeit entlang seiner Sturzbahn in 5 Teile. Bei aktuellem Waldbestand erreicht gegebenenfalls nur ein Sturzblock den relevanten Prozessraum. Alle anderen werden durch den Waldbestand zurückgehalten. Bei verringertem Waldbestand bzw. „ohne“ Waldbestand könnten theoretisch jedoch alle 5 Teilblöcke in separaten Sturzbahnen die Autobahn erreichen. Statt einem von fünf Teilblöcken ($1/5$) würden plötzlich drei, oder mehr ($3/5$ oder $5/5$) Blöcke die Autobahn erreichen. Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit würde folglich bereits alleine aufgrund der steigenden Anzahl von Steinen $n(St)$ zunehmen. Eine Vergrößerung der Durchmesser $d(St)$ oder der Breite des Prozessraumes $b(Pr)$ ist dabei nicht zwingend erforderlich. Theoretisch könnten die Sturzblöcke auch dieselbe Sturzbahn nehmen.

Die Ergebnisse der Risikoermittlung werden in Kapitel 6.3.2 zusammengefasst.

6.3.1.3 Risikozunahme nach Faktor (Ansatz 3)

Die Risikoermittlung für die Situation ohne Wald erfolgt nur für häufige Ereignisse anhand der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit. Das Risiko von seltenen und sehr seltenen Ereignissen wird für die Situation „ohne“ Wald mit Hilfe eines Faktors ermittelt. Dieser Faktor errechnet die prozentuelle Zunahme der simulierten mittleren Durchgangsfrequenzen oder die Summe der Ablagerungen von Sturzblöcken

gemäß den Simulationsergebnissen mittels Rockyfor3D (vgl. Kapitel 5.3). Der Anteil der Ablagerung von Sturzblöcken entlang der Autobahn steht dabei im Verhältnis zur Anzahl der simulierten Sturzblöcke aus den Auslösebereichen und kann prozentual als Faktor angegeben werden. Dieses Verhältnisses ist abhängig von den Situationen bei aktuellem Waldbestand und „ohne“ Waldbestand. Jede prozentuale Zunahme der Durchgangsfrequenzen oder Ablagerungen ist gleichbedeutend mit einer Risikozunahme. Daher kann dieser Faktor unmittelbar auf die Risikoermittlung umgelegt werden.

Abbildung 46 vermittelt anhand eines Flussdiagramms den Ablauf der Risikoanalyse für die Situation „ohne“ Waldbestand.

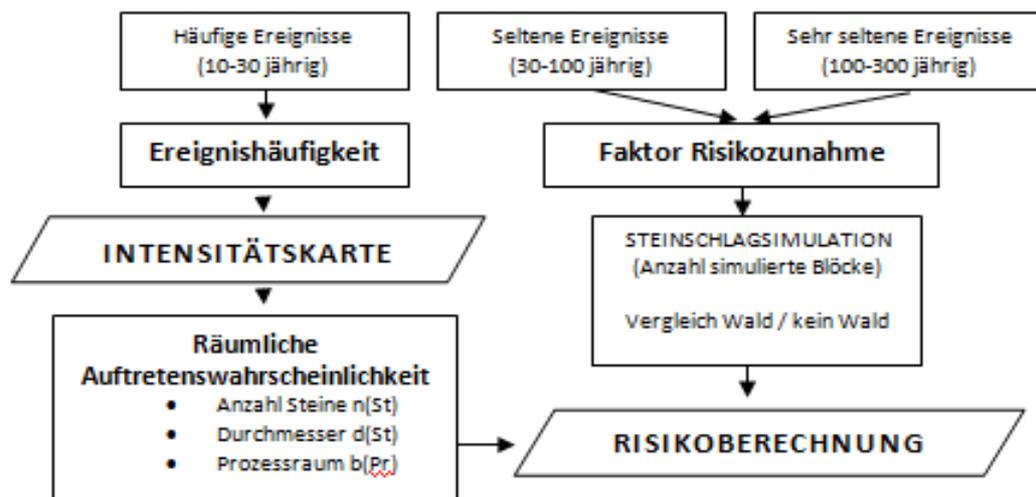


Abbildung 46: Flussdiagramm zur Risikoanalyse „ohne“ Waldbestand.

Die Risikozunahme seltener Ereignisse beträgt nach Tabelle 14 etwa 24 %; die der sehr seltenen Ereignisse etwa 20 %. Die sehr häufigen Ereignisse sind bereits in Kapitel 5.3.2 als nicht risikorelevant beschrieben worden. Die häufigen Ereignisse werden unter Annahme bestimmter Voraussetzungen nach der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit beurteilt. Die Ergebnisse der Risikoermittlung werden in Kapitel 6.3.2 zusammengefasst.

Szenarien	aktueller Wald	ohne Wald	aktueller Wald	ohne Wald	Risikozunahme
	Steine	Steine	[%]	[%]	
Jährlichkeit					
30-100	139875	782716	5,27%	29,48%	24,22%
100-300	418937	956513	15,78%	36,03%	20,25%
nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations)					2654700

Tabelle 14: Risikozunahme nach Anzahl der simulierten Ablagerungen.

6.3.2 Risikoreduktion

Zur Ermittlung der individuellen und kollektiven Risiken, sowie der Risikoreduktion werden die beiden Risikosituationen des aktuellen Waldbestandes und „ohne“ Wald für alle Schadensbilder nach Kapitel 6.2 ausgewertet und miteinander verglichen. Anhand der Verknüpfung des kalkulierten Schadensausmaßes der Schadensbilder kann für die häufigen bis sehr seltenen Szenarien das kollektive Risiko gemäß Tabelle 15 ausgedrückt werden. Erwartungsgemäß ist das kollektive Risiko jeweils „ohne“ Wald bei allen Schadensbildern höher.

Die Summe der kollektiven Risiken bei aktuellem Waldzustand betragen € 115.907. Die Summe der kollektiven Risiken bei Annahme der Situation „ohne“ Wald betragen € 192.051. Das kollektive Risiko ist aufgrund der Schutzwirkung des Waldes bei aktuellem Waldzustand annähernd halbiert. Ähnliches gilt laut Tabelle 15 auch für die Summe der Risiken der angewandten Schadensbilder Direkttreffer, Auffahrunfall, Verschüttung und Verfügbarkeit. Die Anteile der Risikoreduktion sind Tabelle 16 zu entnehmen.

Risikoermittlung										
	Aktueller Waldzustand					Ohne Wald				
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	SUMME	1-10	10-30	30-100	100-300	SUMME
Risiko Direkttreffer (pro Jahr)		€ 39	€ 37	€ 19	€ 95		€ 196	€ 46	€ 23	€ 265
Risiko Auffahrunfall (pro Jahr)		€ 667	€ 21.768	€ 6.803	€ 29.238		€ 1.048	€ 27.040	€ 8.450	€ 36.537
Risiko Verschüttung (pro Jahr)		€ 13.633	€ 14.282	€ 12.983	€ 40.898		€ 68.163	€ 17.740	€ 16.127	€ 102.030
Risiko Verfügbarkeit (pro Jahr)		€ 14.534	€ 20.762	€ 10.381	€ 45.677		€ 14.534	€ 25.790	€ 12.895	€ 53.219
kollektives Risiko (pro Jahr)		€ 28.872	€ 56.849	€ 30.186	€ 115.907		€ 83.940	€ 70.616	€ 37.495	€ 192.051

Tabelle 15: Kollektive Risiken.

Bei sehr häufigen Ereignissen besteht kein Risiko. Die Summe der Risiken ist jeweils bei aktuellem Waldbestand geringer als „ohne“ Wald. Demnach wird das kollektive Risiko durch den aktuellen Waldbestand bei Direkttreffern von € 265,- auf < € 100,- verringert; bei Auffahrunfällen beträgt die Risikoreduktion € 7.299,-; die Risikoreduktion für das Schadensbild Verschüttung beträgt € 61.132 und für das Schadensbild Verfügbarkeit € 7.543,-.

Durch das Umsetzen diverser waldbaulicher Pflegemaßnahmen und einer Optimierung der Schutzfunktion des Waldbestandes im Untersuchungsgebiet könnte die derzeitige Risikominimierung gegebenenfalls verstärkt werden (vgl. Kapitel 2.3). Das Erarbeiten entsprechender Pflegemaßnahmen ist jedoch nicht Gegenstand dieser Diplomarbeit. Ansätze dazu sind Kapitel 2.3.2 zu entnehmen. Abbildung 47 zeigt die

Anteile der einzelnen Schadensbilder bei aktuellem Waldbestand und „ohne“ Wald am Gesamtrisiko. Das Risiko von Direkttreffern ist annähernd 0 %. Direkttreffer sind demnach äußerst unwahrscheinlich. 75 % bzw. 81 % des Gesamtrisikos entfallen jeweils auf Sachwerte und nur 25 % und 19 % auf Personenrisiken.

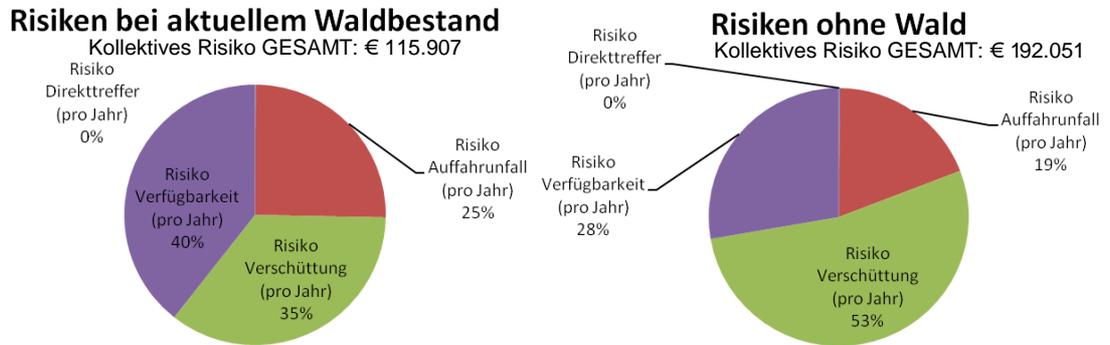


Abbildung 47: Anteil der einzelnen Schadensbilder am kollektiven Risiko.

Abbildung 48 veranschaulicht die Summe der kollektiven Risiken aller Szenarien (vgl. Tabelle 15), bei aktuellem Waldbestand und die Situation „ohne“ Waldbestand.

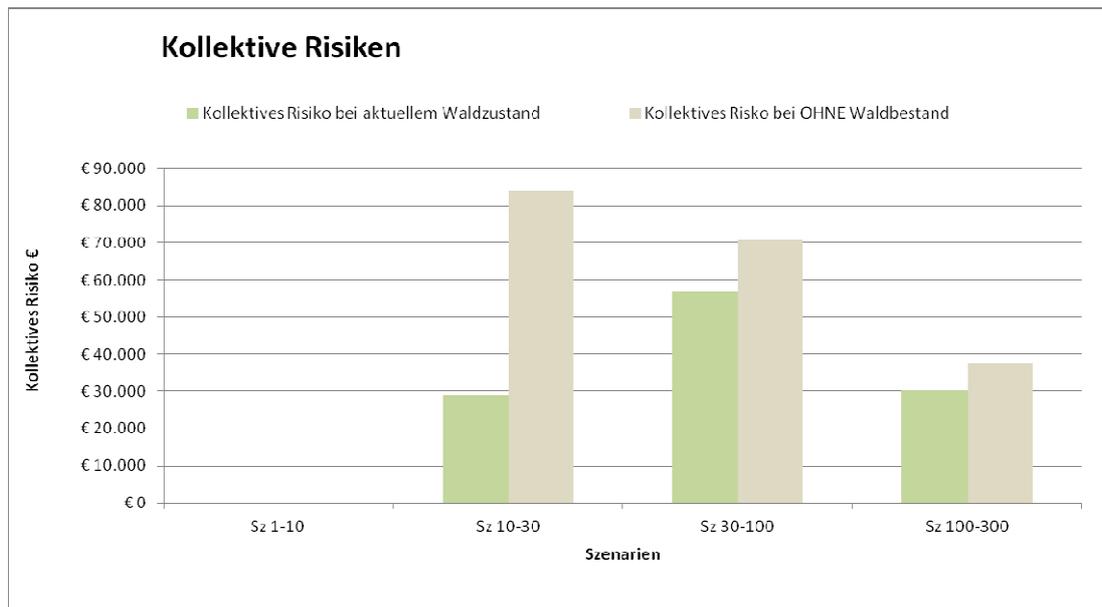


Abbildung 48: Verteilung der kollektiven Risiken (vgl. WINKLER et al 2009).

In Anbetracht der Simulationsergebnisse nach Kapitel 5.3 (vgl. Anhang Kapitel 9) und der kollektiven Risiken bei aktuellem Waldbestand sind für das Untersuchungsgebiet am Gschwendnerberg vor allem die seltenen Ereignisse als risikorelevant für die A9 Pyhrn Autobahn einzustufen. Die größte Risikoreduktion durch den Waldbestand wäre ohne der bestehenden Schutzbauwerke bei häufigen Ereignissen zu er-

warten. Die nachfolgende Tabelle 16 stellt die wesentlichen Ergebnisse der Risikoreduktion durch den aktuellen Waldbestand dar.

Risikoreduktion								
Szenarien	Reduktion €				Reduktion %			
	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Risiko Direkttreffer (pro Jahr)		€ 157	€ 9	€ 5		0,0%	19,5%	19,5%
Risiko Auffahrunfall (pro Jahr)		€ 381	€ 5.271	€ 1.647		36,4%	19,5%	19,5%
SUMME Personenrisiko (pro Jahr)		€ 538	€ 5.280	€ 1.652		43,2%	19,5%	19,5%
		€ 7.470				20,3%		
Risiko Verfügbarkeit (pro Jahr)		€ 0	€ 5.028	€ 2.514		0,0%	19,5%	19,5%
Risiko Verschüttung (pro Jahr)		€ 54.530	€ 3.458	€ 3.144		80,0%	19,5%	19,5%
Kollektives Risiko (pro Jahr)		€ 55.068	€ 13.766	€ 7.310		65,6%	19,5%	19,5%
		€ 76.143				39,6%		

Tabelle 16: Risikoreduktion durch den Waldbestand.

Der positive Einfluss des Schutzwaldes auf das Steinschlagrisiko ist anhand aller Teilergebnisse abzulesen. Der heutige Waldzustand vermag nach der Risikoermittlung das Steinschlagrisiko insgesamt um zirka 40 % zu verringern. Das entspricht einer Risikoreduktion um € 76.143.

Letztendlich vermag der Waldbestand das Erreichen von Steinschlagereignissen bis zur Autobahn nicht vollständig zu verhindern, reduziert aber deutlich die Durchgangswahrscheinlichkeit, die mittleren Sprunghöhen und die maximale Energieeinwirkung (vgl. Simulationsergebnisse im Anhang Kapitel 9).

Das individuelle Risiko für einen Todesfall als Folge eines Ereignisses wird für den gesamten Streckenabschnitt betrachtet, die ein durchschnittlicher Pendler zwei Mal täglich befährt. Die Berechnung des individuellen Todesfallrisikos $r_{ind Q,i}$ berechnet sich nach ASTRA 2009 gemäß:

$$r_{ind Q,i} = \frac{(2 \cdot R_{DFahrbahn Q,i} + 2 \cdot R_{Auffahr Q,i})}{(DTV \cdot \beta)} \quad (\text{Formel 6.24})$$

Das individuelle Risiko kann für den aktuellen Waldbestand mit $5,2 \cdot 10^{-7}$ bzw. mit $1,9 \cdot 10^{-8}$ für die Situation „ohne“ Wald angegeben werden. Anders ausgedrückt könnten sich nach derzeitigem Kenntnisstand bei aktuellem Waldbestand entlang des Untersuchungsbereiches der A9 Pyhrn Autobahn etwa alle 140 Jahre ein statistischer Todesfall ereignen. Bei der Annahme „ohne“ Wald ereignet sich bereits etwa alle 111 Jahre ein statistischer Todesfall.

7 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der systematischen Quantifizierung der Schutzwirkung des Waldbestandes in einem ausgewählten Untersuchungsgebiet an der A9 Pyhrn Autobahn. Das wesentliche Ziel war die Bestimmung und Beschreibung der Risikoreduktion infolge der Schutzwirkung durch den aktuellen Waldbestand im Vergleich zur Situation „ohne“ Waldbestand.

Zur Ermittlung der Risikoreduktion und Quantifizierung der Schutzwirkung sind wesentliche Arbeitsschritte im Zuge der Diplomarbeit hervorzuheben:

- Charakteristik des aktuellen Waldbestandes
- Erfassung des Gefährdungspotentials durch Steinschlag
- Wirkungsbeurteilung des Waldbestandes
- Steinschlagsimulation Rockyfor3D
- Definition von Bemessungsszenarien
- Risikoanalyse

Die Definition zur Schutzfunktion des Waldes besteht im Sinne des Österreichischen Forstgesetzes gemäß § 21 des BGBl.Nr.1 440/1975 idF BGBl. Nr.55/2007 dahingehend, Menschen, Sachwerte, sowie Infrastruktur gegen ein bestehendes Gefährdungspotential durch Naturgefahren (u.a. Steinschlag) zu schützen oder die damit verbundenen Risiken zu reduzieren. In ähnlicher Weise gilt das auch nach Schweizer Definition (vgl. BAFU 2013, WEHRLI et al. 2007, FREHNER et al. 2005).

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde auf die effiziente, nachhaltige und kostengünstige Schutzfunktion des Waldbestandes als Ergänzung zu technischen Schutzmaßnahmen gegen Steinschlag verwiesen (u.a. DORREN et al. 2007, WEHRLI et al. 2007, FREHNER et al. 2005, DORREN et al 2005a, DORREN et al. 2005b, SCHWITTER et al. 1998, JAHN 1988). Anhand einer Studie wird belegt, dass an bewaldeten Steilhängen das Steinschlagrisiko um bis zu 63% gegenüber nichtbewaldeten Hängen verringert werden kann (DORREN et al. 2005b).

Die Quantifizierung der Schutzwirkung von Waldbeständen ist jedoch aktueller Forschungsgegenstand (u.a. DORREN 2013, PERZL et al. 2012). Die Beurteilung der Schutzwirkung des Waldbestandes und die Risikoanalyse der vorliegenden Diplom-

arbeit basieren auf mehreren Konzeptvorlagen. Anhand des Konzeptes „NaiS“, „Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion“ nach FREHNER et al 2005 werden Beurteilungskriterien zur Waldwirkung berücksichtigt. Anhand des Projektes "Naturgefahren-Steinschlag, Gefahrenanalyse Protect Bio II, Fallbeispiel Steinschlag – Maßnahmenbeurteilung, Wirkungsbeurteilung und Maßnahmenbewertung von Steinschlagschutzwäldern“ nach KALBERER 2011 wird versucht, die Schutzwirkung des Waldes als biologische Maßnahme nach „Stand der Technik“ analog zu technischen Schutzmaßnahmen zu beurteilen. Das Schweizer „RIKO“, „Risikokzept Naturgefahren Nationalstraßen – Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstraßen“ nach ASTRA 2009 konzentriert sich auf die Methoden zur Risikoermittlung und Gefahrenanalyse entlang von Verkehrswegen. Ergänzend dazu fließen zahlreiche Erkenntnisse aus den Expertendiskussionen mit Luuk Dorren zur Steinschlagsimulationen mittels Rockyfor3D und zur Risikoanalyse mit ein. (DORREN 2013).

Zur Diskussion stehen in diesem Kapitel vorrangig die Methoden und Ergebnisse der Wirkungsbeurteilung des Waldbestandes (Kapitel 5.4), der Steinschlagsimulation (Kapitel 5.3), sowie der Risikoanalyse und Risikoreduktion (Kapitel 6).

Die Methodik zum Nachweis der Schutzwirkung und Wirkungsbeurteilung des aktuellen Waldbestandes nach KALBERER 2011 beinhaltet die Verknüpfung der Kriterien Tragsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit mit den Anforderungsprofilen zur Schutzwaldleistung gemäß dem Projekt „NaiS – Nachhaltigkeit und Kontrolle im Schutzwald“ (FREHNER et al. 2005). Die Nachweisführung zur Schutzwirkung und Wirkungsbeurteilung ist simpel und rasch durchführbar. Das Beurteilungsschema ist systematisch und eine Anpassung an spezifische Bemessungsszenarien einzelner Projekte nicht im Detail vorgesehen. Der Einsatz dieses Beurteilungsschemas ist ein Versuch die Beurteilung der Schutzwirkung des Waldbestandes an ein allgemein gültiges, technisches Beurteilungsschema zu knüpfen (vgl. KALBERER 2011).

In Anlehnung an KALBERER 2011 erfolgt der Nachweis der Tragsicherheit anhand der kumulierten Grundfläche der Bestände entlang der bewaldeten Transitstrecken. Dadurch können wesentliche Kriterien eines Waldbestandes wie Stammdurchmesser, Stammzahl pro Hektar und die Länge der bewaldeten Transitstrecke miteinander verknüpft werden. Restriktionen in Bezug auf Lücken im Bestand oder Runsen

als präferentielle Sturzbahnen sind beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit zu berücksichtigen. Dabei ist nach KALBERER 2011 nicht nur die Größe und Anzahl von Bestandslücken für die Gefährdung des Schadenpotentials entscheidend, sondern auch deren Lage und Ausbreitung im Transitgebiet.

Eine kritische Überprüfung der Ergebnisse und ein Vergleich mit den Ergebnissen der Steinschlagsimulation sind empfehlenswert. Derzeit ist nur eine weitere Anwendung der Methodik zum Nachweis der Schutzwirkung und Wirkungsbeurteilung in KALBERER 2011 bekannt. Die Interpretation der Zuverlässigkeit der Schutzwirkung sollte unter Berücksichtigung des Anforderungsprofils zur Schutzwaldleistung (FREHNER et al. 2005) und den Simulationsergebnissen mit Rockyfor3D erfolgen.

Anhand der Methodik zur Wirkungsbeurteilung des Waldbestandes kann ein bestehendes Gefährdungspotential durch Steinschlag für das Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Eine Relevanz der Schutzwirkung des Waldbestandes, sowie der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit, Dauerhaftigkeit und Zuverlässigkeit des aktuellen Waldbestandes konnte nachgewiesen werden. Das Fazit lautet, dass durch gezielte waldbauliche Pflegemaßnahmen eine zusätzliche Optimierung der Schutzfunktion des Waldbestandes nach FREHNER et al. 2005 erreicht werden könnte.

Die Wirkungsbeurteilung basiert auf den Steinschlagsimulationen unterschiedlicher Szenarien für die Situationen aktueller Waldbestand und „ohne“ Wald. Das Steinschlagmodell Rockyfor3D ist gemäß DORREN 2012b eines der ersten Steinschlagmodelle, welches Baumkontakte explizit und realistisch berücksichtigt und modelliert. Dabei handelt es sich bei Rockyfor3D um ein probabilistisches, prozessbasiertes, räumliches Simulationsmodell, welches permanent auf Basis von neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen und Erfahrungen weiterentwickelt wird. Derzeit konzentriert sich die Verbesserung des Modells nach DORREN 2012b auf die Berechnung des Bodenaufpralls von Sturzblöcken und die Entwicklung eines Moduls zur Berücksichtigung querliegender Bäume in der Modellrechnung. Die Simulationsergebnisse sind hochauflösend und bieten zahlreiche Auswertemöglichkeiten. Im Zuge der Modellvalidierung in Kapitel 5.3 werden die Eingangsdaten und Simulationsergebnisse evaluiert. Ziel dieser Evaluierung ist das Beschreiben allfälliger Übereinstimmungen bzw. Ungenauigkeiten des zugrunde liegenden Modells und der Simulationsergebnisse mit der Realität. Die Evaluierung des Steinschlagpotentials umfasst eine qualitative Analyse der Modellparameter und Simulationsergebnisse (vgl. MEISZL 1998). Bei der Bestimmung der Eingangsdaten und dem Plausibilisie-

ren der Resultate kommt dem Anwender von Sturzmodellen wie Rockyfor3D eine entscheidende Bedeutung zu (DORREN et al. 2012).

Das Fazit der Steinschlagsimulation lautet, dass die Sturzmodellierung alleine nicht ausreichend zur Beurteilung des Gefahrenpotentials ist. Ergänzungen durch Feldbeobachtungen und eine kritische Interpretation der probabilistischen Resultate liefern aufschlussreiche Erkenntnisse und helfen die Simulationsergebnisse hinsichtlich ihrer Plausibilität einzuordnen (DORREN et al. 2012).

Nach BRÜNDLI 2009 besteht das Ziel einer Risikoanalyse darin, eine objektive Ermittlung relevanter Risikogrößen für ein konkretes Schadensereignis, ein spezifisches Objekt oder ein gefährdetes Gebiet zu erbringen. Das Risiko bezeichnet die Möglichkeit des Eintretens eines unerwünschten Ereignisses mit Schadensfolge. Das Risiko setzt sich aus der Häufigkeit oder Jährlichkeit eines gefährlichen Ereignisses und dem Schadensausmaß zusammen, das aufgrund der Präsenzwahrscheinlichkeit und Schadensempfindlichkeit von Personen oder Sachwerten zum Zeitpunkt des Eintretens eines Ereignisses bestimmt wird (vgl. u.a. ASTRA 2009, BORTER 1999, HEINIMANN et al. 1998).

Eine Zunahme der Häufigkeit oder Jährlichkeit von Steinschlagereignissen wird bei Verlust des Waldbestandes vorausgesetzt (DORREN 2013). Die Definition von Häufigkeiten oder Jährlichkeiten von Steinschlagereignissen ist mit starken Unsicherheiten behaftet und Bedarf Erfahrung bei der Wahl plausibler Bemessungsgrößen (DORREN 2013). Aufzeichnungen über lange Beobachtungszeiträume wie beispielsweise die Pegelständen von Fließgewässern, oder Niederschläge an meteorologischen Stationen existieren bei Steinschlagereignissen in der Regel nicht. In den meisten Fällen fehlen daher plausible Anhaltspunkte oder aufschlussreiche Ereignisdokumentationen zur Anwendung stochastischer Auswerteverfahren. (DORREN 2013). In der vorliegenden Diplomarbeit stellt die begrenzte Verfügbarkeit von Ereignisdokumentationen eine wesentliche Limitation der Gültigkeit aller angegebenen Jährlichkeiten oder Häufigkeiten von Szenarien dar. Folglich ist auch die Prognose von Häufigkeiten für die fiktive Situation „ohne“ Wald theoretisch und stützt sich auf Erfahrungswerte aus der Beurteilung von Steinschlaggefahren (DORREN 2013). Um dieser Problematik entgegenzuwirken basieren die definierten die Bemessungsereignisse auf den Geländebegehungen und Simulationsergebnissen mit Rockyfor3D. Die Angabe von Bemessungsblockgrößen und deren Häufigkeit oder Jährlichkeit bei aktuellem Waldbestand beruht hauptsächlich auf den po-

tentiellen Ausbruchsvolumina und den vorgefundenen Ablagerungen im Gelände. Somit können plausibel erscheinende Szenarien der Steinschlaggefährdung definiert werden.

Die Auswirkungen je nach Wahl der Bemessungsereignisse sind bei der Interpretation der Ergebnisse der Risikoanalyse und bei der Ermittlung der Risikoreduktion zu berücksichtigen.

Zur Ermittlung der Risikoreduktion des Waldbestandes stehen mehrere wahrscheinlichkeitstheoretische Ansätze zu Verfügung (vgl. Kapitel 6.3.1, DORREN 2013):

- Ansatz 1 - Berechnung der Risikozunahme bei unveränderter Ausbruchswahrscheinlichkeit, aber bei zunehmender Ereignishäufigkeit durch Verminderung oder Verlust des Waldbestandes.
- Ansatz 2 - Berechnung der Risikozunahme infolge der zunehmenden räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit bei aktuellem Waldbestand gegenüber der Situation „ohne“ Waldbestand.
- Ansatz 3 - Berechnung der Risikozunahme für die Situation „ohne“ Waldbestand gegenüber aktuellem Waldbestand durch Anwendung eines allgemeinen „Faktors“. Dieser Faktor berechnet die Risikozunahme basierend auf der Anzahl simulierter Blöcke, die je nach Situation des Waldbestandes („mit“ und „ohne“ Wald) die Autobahn erreichen.

Eine Risikozunahme oder Abnahme resultiert aus der Änderung der Eintretenswahrscheinlichkeit und Häufigkeit von Steinschlagereignissen. Im Allgemeinen kann bei Verminderung oder Verlust des Waldbestandes von einer Zunahme der Ereignishäufigkeit entlang der Autobahn ausgegangen werden. Die Ereignishäufigkeit von Steinschlagereignissen ist sowohl abhängig von der Ausbruchswahrscheinlichkeit, aber auch vom Einfluss durch den jeweiligen Waldbestand. Die Zunahme der Eintretenswahrscheinlichkeit gleichbedeutend mit einer Zunahme der Ereignishäufigkeit bzw. Jährlichkeit und infolgedessen mit einer Risikozunahme entlang der Autobahn. Bei gleichbleibender Ausbruchswahrscheinlichkeit am Ursprungsort des Steinschlagereignisses kann die Zunahme auf eine Reduktion des Waldbestandes zurückgeführt werden.

Beispielsweise ereignet sich das Szenario eines Steinschlagereignisses bei aktuellem Waldbestand 1 Mal in 30 Jahren. Bei verringertem Waldbestand und Annahme der Situation „ohne“ Wald nimmt die Ereignishäufigkeit entsprechend zu und das

Ereignis findet nunmehr 2 Mal oder öfters in 30 Jahren statt und erreicht die Autobahn. Folglich kann aus der sich ändernden Eintretenswahrscheinlichkeit und aufgrund der Zunahme der Häufigkeit dieses Ereignisses auch eine Zunahme der Jährlichkeit interpretiert werden. Ein bisher 30jähriges Ereignis entspräche daher bei verringertem Waldbestand bzw. „ohne“ Wald nur mehr der Jährlichkeit eines 10, oder 15jährigen Ereignisses. Das Ereignis würde etwa doppelt so häufig eintreten.

Die Verfügbarkeit von langjährigen Beobachtungsreihen zur Ermittlung der Ereignishäufigkeit von Steinschlägen ist oftmals jedoch nicht möglich (vgl. Ereignisdokumentationen Kapitel 5.1.1). Folglich ist das Festlegen von Wahrscheinlichkeiten bei Steinschlagereignissen kaum mit Hilfe stochastischer Methoden plausibel nachzuvollziehen. Dies trifft auch auf die vorliegende Diplomarbeit zu. Daher wird die Zunahme der Ereignishäufigkeit von Steinschlägen anhand Ansatz 2 und mit Hilfe der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit (vgl. Kapitel 6.3.1.2) und Ansatz 3 anhand der Simulationsergebnisse zur Summe der Ablagerungen gemäß Rockyfor3D (vgl. Kapitel 6.3.1.3) ausgewertet.

Die Risikoermittlung nach dem Prinzip der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$ erfolgt bei aktuellem Waldbestand für alle Szenarien und unter Berücksichtigung der jeweiligen Ereignishäufigkeit. Die Berechnung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit $p(rA)$ resultiert aus den Intensitätskarten und setzt sich aus der Anzahl des Schadenpotential treffender Steine $n(St)$ gemäß Kapitel 6.1, deren Durchmesser $d(St)$ und der Breite des Prozessraumes $b(Pr)$ zusammen. Nehmen diese Faktoren zu – beispielsweise durch Verminderung des Waldbestandes – steigt die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit.

Angenommen ein Steinschlagszenario ereignet sich bei aktuellem Waldbestand 1 Mal in 30 Jahren. Im Gegensatz zu Ansatz 1 zerbricht jedoch der Sturzblock bei gleicher Ausbruchswahrscheinlichkeit und Ereignishäufigkeit entlang seiner Sturzbahn in 5 Teile. Bei aktuellem Waldbestand erreicht gegebenenfalls nur ein Sturzblock den relevanten Prozessraum. Alle anderen werden durch den Waldbestand zurückgehalten. Bei verringertem Waldbestand bzw. „ohne“ Waldbestand könnten theoretisch jedoch alle 5 Teilblöcke in separaten Sturzbahnen die Autobahn erreichen. Statt einem von fünf Teilblöcken ($1/5$) würden plötzlich drei, oder mehr ($3/5$ oder $5/5$) Blöcke die Autobahn erreichen. Die räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit würde folglich bereits alleine aufgrund der steigenden Anzahl von Steinen $n(St)$ zunehmen. Eine Vergrößerung der Durchmesser $d(St)$ oder der Breite des Prozess-

raumes $b(Pr)$ ist dabei nicht zwingend erforderlich. Theoretisch könnten die Sturzblöcke auch dieselbe Sturzbahn nehmen.

Die Risikoermittlung für die Situation „ohne“ Wald erfolgt nur für häufige Ereignisse anhand der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit. Das Risiko von seltenen und sehr seltenen Ereignissen wird für die Situation „ohne“ Wald mit Hilfe eines Faktors ermittelt. Dieser Faktor errechnet die prozentuelle Zunahme der simulierten mittleren Durchgangsfrequenzen oder die Summe der Ablagerungen von Sturzblöcken gemäß den Simulationsergebnissen mittels Rockyfor3D (vgl. Kapitel 5.3). Der Anteil der Ablagerung von Sturzblöcken entlang der Autobahn steht dabei im Verhältnis zur Anzahl der simulierten Sturzblöcke aus den Auslösebereichen und kann prozentual als Faktor angegeben werden. Dieses Verhältnisses ist abhängig von den Situationen bei aktuellem Waldbestand und „ohne“ Waldbestand. Jede prozentuelle Zunahme der Durchgangsfrequenzen oder Ablagerungen ist gleichbedeutend mit einer Risikozunahme. Daher kann dieser Faktor unmittelbar auf die Risikoermittlung umgelegt werden. Das Ergebnis der Simulation ist jedoch ein probabilistischer Ansatz und die tatsächliche Anzahl der Sturzblöcke sowie die Zunahme der Durchgangsfrequenzen deutlich begrenzt.

Die Anwendung der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit ist für seltene und sehr seltene Ereignisse bei der Situation „ohne“ Wald ungeeignet, da keine plausible Prognose der betroffenen Abschnittsbreiten, oder der Anzahl von Sturzblöcken und deren Sturzbahnen möglich ist. Daraus wird für die vorliegende Risikoanalyse der Schluss gezogen, dass die Anwendung des Ansatzes nach der räumlichen Auftretenswahrscheinlichkeit zwar für alle Szenarien bei aktuellem Waldbestand und das Szenario häufiger Ereignisse „ohne“ Waldbestand sinnvoll nachvollziehbar ist, jedoch nicht für den Vergleich für die Situation „ohne“ Wald bei seltenen und sehr seltenen Ereignissen.

Die Risikoreduktion durch den aktuellen Waldbestand beträgt nach den Berechnungen insgesamt etwa 40 % oder etwa € 76.143 (vgl. Kapitel 6.3.2).

Zusammenfassend kann anhand der Erkenntnisse aus der Wirkungsbeurteilung des aktuellen Waldzustandes und der Ergebnisse der Risikoanalyse eine Schutzwirkung des Waldbestandes für das Untersuchungsgebiet festgestellt werden. Die Risikoreduktion durch den Waldbestand ist auf eine deutliche Reduktion der Durchgangsfrequenzen von Steinschlägen zurückzuführen (vgl. Kapitel 5.3.2). Das Ergebnis der

Risikoreduktion ist sowohl in der Wirkungsbeurteilung des Waldbestandes ersichtlich (vgl. Kapitel 6.3.2), als auch im Zuge der Interpretation der Risikoanalyse (vgl. Kapitel 0).

8 LITERATURVERZEICHNIS

8.1 Projektunterlagen

Geländebegehungen

3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH, Begehung der Gefahrenstellen und Schutzbauwerke mit einem Mitarbeiter des Streckendienstes der ABM Ardnig, Bereich Kirchdorf am 08.10.2012.

3G Gruppe Geotechnik Graz ZT GmbH, Begehung der Gefahrenstellen und Schutzbauwerke mit einem Mitarbeiter des Streckendienstes der ABM Ardnig, Bereich Spital/Pyhrn am 10.10.2012.

MÜLLER G.: Geländebegehung und Datenaufnahme am Gschwendnerberg am 03.11.2012, 09.11.2012 und 01.12.2012.

Digitale Kartengrundlagen

ASFINAG Bestandsmanagement, GIS Technik: Bestandsdaten der ASFINAG (Punkt-, Linien- und Flächeninformation), Kilometrierung, Trassenachse, erhalten von Herrn MSc Pöttschachter, ASFINAG Bestandsmanagement, GIS Technik per FTP-Datenübertragung im August 2012.

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2013): Austrian Map Online, Abteilung Marketing und Vertrieb, Wien, Zugriff 10.01.2013, www.austrianmap.at

BEV - Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (2012): Digitale Katastralmappe (DKM), ÖK 50, Höhenschichtlinien, Orthophotos; erhalten von Herrn MSc Pöttschachter, ASFINAG Bestandsmanagement, GIS Technik per FTP-Datenübertragung im August 2012.

DORIS - Digitales Oberösterreichisches Raum-Informationssystem (2012): Digitaler Atlas von Oberösterreich, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Presseabteilung, letzter Zugriff am 10.01.2013; www.doris.ooe.gv.at

AMT DER OBERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG (2012): Laserscandaten; Daten übermittelt am 20.9.2012, Direktion Straßenbau und Verkehr – Ab-

teilung Geoinformation und Liegenschaft, DORISLBD – Digitales Oberösterreichisches Rauminformationssystem, Stabsstelle Geoinformation (GZ Geol-AB-560000/114-2012-KC).

Unterlagen und Auskunft der Behörden

AMT DER OBERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG (2012): Waldentwicklungsplan und Bannwälder, Information und Daten erhalten durch die Direktion für Landesplanung, wirtschaftliche und ländliche Entwicklung, Abteilung Land- und Forstwirtschaft, von Herrn DI Aschauer im August 2012.

FORSTTECHNISCHER DIENST FÜR WILDBACH- UND LAWINENVERBAUUNG (2012): Gefahrenzonenplan der Gemeinde Sankt Pankraz; Textausführung und Planausführung, sowie Gefahrenkarten und Wildbachaufnahmeblätter, erhoben bei der Gebietsbauleitung Steyr-Enns Gebiet im Juli 2012

Weitere Aktenvermerke, Berichte, Gutachten und Stellungnahmen

3G GRUPPE GEOTECHNIK GRAZ ZT GMBH (2012): Bericht - Naturgefahrenhinweisplan; ABM Ardning und ABM Kalwang, A9 Pyhrn Autobahn, ASFINAG Service GmbH, Graz.

BECHTOLD D. (2002): Die geologisch-hydrogeologischen Voruntersuchungen zum Ausbau der Tunnelkette der A9 Pyhrnautobahn – In: Baugeologisches Seminar, Reihe: Mitteilungen Institut für Angewandte Geowissenschaften, Universität für Bodenkultur Wien, Vorträge 2000/01, Herausgeber Schweighofer B., Schneider J.F., Wien, S 1-22.

BRANDECKER H. (1973): Gutachten - Geologisch Geotechnischer Bericht – Pyhrn Autobahn Scheitelstrecke Oberösterreich – Steiermark, Windischgarsten-Spital/P-Liezen-BZW Ardning-Selzthal, Salzburg, BVFS Bautechnische Versuchs und Forschungsanstalt Salzburg, Salzburg.

BRANDECKER H. (1988): Gutachten – Geologisch-Geotechnische Beurteilung – Bauvorhaben: A 9 – Pyhrnautobahn Abschnitt AS Hinterstoder – AS Windischgarsten – Streckenabschnitt: AS Hinterstoder – Nordportal Lainbergtunnel, BVFS Bautechnische Versuchs und Forschungsanstalt Salzburg, Salzburg.

MAG.ERHARD NEUBAUER ZT GMBH (2012): Geologisch-Geotechnisches Gutachten – A9 Pyhrn Autobahn, Steinschlagsicherung Bereich KG St.Pankratz, Grundstücke 110/1 und 110/2, Graz.

PRODINGER W. (2008): Bewertung des Gefahrenpotentials – Empfehlung zur dauerhaften Sicherung der Verkehrswege; Sachverständigengutachten zur Befundaufnahme, Geländebegehung vom 14.05.2008, Graz.

WEINMEISTER H.W., HÖSLE B., WAIBEL M. (1997): Falkensteinwand - Abschätzung der Schutzwaldleistungsfähigkeit des Waldes und Schutzwaldsanierung; Auftraggeber Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Oberösterreich, Ausführung Institut für Wildbach- und Lawinenschutz, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.

8.2 Referenzen

AMT DER OBERÖSTERREICHISCHEN LANDESREGIERUNG (2008): Naturraumkartierung Oberösterreich – Biotopkartierung Gemeinde St.Pankraz, Endbericht, (Hrsg.) Amt der Oberösterreichischen Landesregierung Direktion für Landesplanung, wirtschaftliche und ländliche Entwicklung, Abteilung Naturschutz, Naturraumkartierung OÖ, Kirchdorf an der Krems.

ANDRECS P. OBERNDORFER S. (2008): Beurteilung von Naturgefahren - Gefahr, Risiko und Vulnerabilität, BFW-Praxisinformation 15, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien, S 5f.

ASFINAG SERVICE GMBH (2013): Streckenverfügbarkeit – Freie Fahrt im Netz der ASFiNAG; Monatsberichte zur Streckenverfügbarkeit, Jänner bis Dezember 2012, Verkehrsmanagement, Verkehrsstatistik, Wien, Zugriff am 30.3.2013; www.asfinag.at/unterwegs/streckenverfuegbarkeit

AUER I., BÖHM R., DOBESCH H., HAMMER N., KOCH E., LIPA W., NOHNL H., POTZMANN R., RETITZKY Ch., RUDEL E., SVABIK O. (1998): Klimatographie und Klimaatlas von Oberösterreich – Band 2 Klimatographie, Band 3 Klimaatlas, Beitrag Landeskunde Oberösterreich II, naturwissenschaftliche Reihe, 2: S 1-565, 3: 1-5 und 46 Karten.

- AZZONI A., ROSSI P.P., DRIGO E., GIANI. G.P., ZANINETTI A. (1991): In situ observation of rockfall parameters - Landslides. Bell, Rotterdam.
- BERGER F. & DORREN L.K.A. (2006): Rockfor.NET - a new efficient tool for quantifying the residual rockfall hazard of a forested slope; In: Marui, H. et al. (Eds), Disaster mitigation of debris flows, slope failures and landslides, Universal Academy Press, Inc., Tokyo, Japan: pp. 229-235.
- BORTER P. (1999): Risikoanalysen bei gravitativen Naturgefahren – Methode; Umweltmaterialien Nr.107/I, Bundesamt für Umwelt,Wald und Landschaft, BUWAL (Hrsg.), Bern.
- BOURRIER F., DORREN L., HUNGR O. (2013): The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation – Earth surface processes and landforms, Vol.38, Issue 4, 435-440.
- BRÜNDL M. (Hrsg.) (2009): Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden; Nationale Plattform für Naturgefahren, PLANAT, Bern.
- BUNDESAMT FÜR STRASSEN ASTRA (Hrsg.) (2009): Risikokzept Naturgefahren Nationalstrassen – Methodik für eine risikobasierte Beurteilung, Prävention und Bewältigung von gravitativen Naturgefahren auf Nationalstrassen; Dokumentation, Ausgabe 2009 V1.30, Schweizerische Eidgenossenschaft, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK, Bundesamt für Strassen ASTRA (Hrsg.), Abteilung Strassennetze, Bern.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT – BAFU (2013): Naturgefahren – Schweizerische Eidgenossenschaft, Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Umwelt; www.bafu.admin.ch/naturgefahren, Stand: 10.03.2013.
- DORREN L.K.A. (2013): Expertengespräch – Bundesamt für Umwelt BAFU, Spezialist für Steinschlag und Schutzwald, Sektion Rutschungen, Lawinen und Schutzwald, Bern.
- DORREN L.K.A. LOUP B., RAETZO H. (2012a): Einsatz von Modellen in der Schweizer Sturzgefahrenbeurteilung - Journal für Wildbach-, Lawinen, Erosions- und Steinschlagschutz 169.

- DORREN L.K.A. (2012b): Rockyfor3D (V5.1) enthüllt – Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells; ecorisQ Paper, www.ecorisq.org, Stand: 20.03.2013.
- DORREN L.K.A., BERGER F., JONNISON M., KRAUTBLATTER M., MOELK M., STOFFEL M. & WEHRLI A. (2007): State of the art in rockfall - forest interactions. - Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 158(6): 128-141.
- DORREN L.K.A., BERGER F. and PUTTERS, U.S. (2006): Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes – Natural Hazards and Earth System Sciences 6: 145-153.
- DORREN L.K.A., BERGER F. & MAIER B. (2005a): Der Schutzwald als Steinschlagnetz - LWF Aktuell 50: 25-27.
- DORREN L.K.A., BERGER F., LE HIR C., MERMIN E. AAND TARDIF P. (2005b): Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests - Forest Ecology and Management 215 (1–3), 183–195.
- DORREN L.K.A., HEUVELINK G. (2004a): Effect of support size on the accuracy of a distributed rockfall model - International Journal of Geographical Information Science 18, 595-609.
- DORREN L.K.A., MAIER B., PUTTERS U.S., SEIJMONSBERGERN A.C. (2004b): Combining field and modelling techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps - Geomorphology 57, 151–167.
- DORREN L.K.A., BERGER F., IMESON A.C., MAIER B., REY F. (2004c) Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps - Forst Ecology and Management 195: 165–176.
- DORREN L.K.A. (2003): A review of rockfall mechanics and modelling approaches – In: Progress in Physical Geography 27 (1), 69– 87.
- EVANS S.G., HUNGR O. (1993): The assessment of rock fall hazards at the base of talus slopes. – In: Canadian Geotechnical Journal, 30 (4): 620-636, Ottawa (Nat. Res. Council of Canada).
- ERISMANN T., ABELE G. (2001): Dynamics of Rockslides and Rockfalls. Springer, Berlin.

- FOETZKI A., JONSSON M., KALBERER M., SIMON H., MAYER A.C., LUNDSTRÖM T., STÖCKLI V., AMMAN W.J. (2004): Die mechanische Stabilität von Bäumen - Das Projekt Baumstabilität des FB Naturgefahren. In: Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.), 2004: Forum für Wissen 2004. Schutzwald und Naturgefahren, 35-42.
- FREHNER, M.; WASSER, B.; SCHWITTER, R. (2005): Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald - Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion; Vollzug Umwelt, Hrsg. BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- GERBER W. (1998): Waldwirkung und Steinschlag - In: Dokumentation der 14. Arbeitstagung Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe mit der FAN 1998, Grafenort/Engelberg, pp1-15.
- GERBER W. (1994): Beurteilung des Prozesses Steinschlag - Kursunterlagen der Forstlichen Arbeitsgruppe Naturgefahren, Poschiavo. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft (WSL), Birmensdorf.
- GSTEIGER P. (1993): Steinschlagschutzwald – Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung; Zeitschr. f. Forstwesen, 144.Jg., Zürich, 115-132.
- HEIM A. (1932): Bergsturz und Menschenleben - Beiblatt zur Vierteljahrschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zürich 77, pp218.
- HEINIMANN H.R., HOLLENSTEIN K., KIENHOLZ H., KRUMMENACHER B., MANI P. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren -Umwelt-Materialien Nr. 85, Naturgefahren, Hrsg. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- HÜBL J., HOCHSCHWARZER M., SEREINIG N., WÖHRER-ALGE M. (Hrsg.) (2011): Alpine Naturgefahren - Ein Handbuch für Praktiker, Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung, Sektion Vorarlberg, Wien.
- JABOYEDOFF M., LABIOUSE V. (2011): Technical Note - Preliminary estimation of rockfall runout zones; Natural Hazards and Earth System Sciences 11: 819-828.

- KAITNA R. (2008): Naturgefahren – Kapitel 6, Massenverlagerungen außerhalb des Gerinnes; Skriptum zur Vorlesung, Institut für alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, Wien.
- KALBERER M. (2011): Naturgefahren-Steinschlag, Gefahrenanalyse Protect Bio II, Fallbeispiel Steinschlag – Maßnahmenbeurteilung, Wirkungsbeurteilung und Maßnahmenbewertung von Steinschlagschutzwäldern dargestellt am Beispiel Gruobenwald, Klosters; Schlussfassung, tur gmbh, Davos.
- KALBERER M. (2006) : Quantifizierung und Optimierung der Schutzwaldleistung gegenüber Steinschlag – Dissertation, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg.
- KIENHOLZ H., ZEILSTRA P., HOLLENSTEIN K. (1998): Begriffsdefinitionen zu den Themen Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko – Arbeitspapier der Eidgenössischen Forstdirektion, Hrsg. BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- KILIAN W., MÜLLER F., STARLINGER F. (1994): Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs – Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten; Forstliche Bundesversuchsanstalt, Waldforschungszentrum, Wien.
- KÖRNER H.J. (1980): Modelle zur Berechnung der Bergsturz und Lawinenbewegung - Proc. Interpraevent, Symposium 1980. Bad Ischl. Band 2: 15-55.
- KÜHNE R. (2005): Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern – Validierung und Anwendung eines 3D Modells zur Quantifizierung der Schutzwirkung von Wald, Diplomarbeit der Philosophisch-naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Bern, Geographisches Institut, Bern.
- LATELTIN O. (2001): Naturgefahren – Empfehlungen 1997 – Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten, Hrsg. BRP - Bundesamt für Raumplanung, BWW – Bundesamt für Wasserwirtschaft, BUWAL - Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Version PDF, Bern.
- LIED K. (1977): Rockfall problems in Norway - ISMES Publication no. 90, Bergamo, 51–53.

- MAYER H. (1992): Gebirgswaldbau, Schutzwaldpflege – Ein waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz; 2.Auflage, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, Jena, New York.
- MAYER H. (1974): Wälder des Ostalpenraumes – Standort, Aufbau und waldbauliche Bedeutung der wichtigsten Waldgesellschaften in den Ostalpen samt Vorland; Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- MEISZL G. (1998): Modellierung der Reichweite von Felsstürzen - Fallbeispiele zur GIS-gestützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayrischen und Tiroler Alpenraum; Innsbrucker Geografische Studien 28. Ph.D. Thesis, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- MELZNER S., PREH A. (2012): Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis – Verein der Diplomingenieure der Wildbach und Lawinenverbauung Österreichs, Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz, Heft Nr. 169, Wien.
- MÖBUS G. (1997): Geologie der Alpen – Eine Einführung in die regional-geologischen Einheiten zwischen Genf und Wien; Verlag Loga, Köln.
- PLANAT (2013): Nationale Plattform Naturgefahren, Bundesamt für Umwelt – BAFU, Schweizerische Eidgenossenschaft, Bern, Zugriff am 15.04.2013, www.planat.ch.
- ONR 24810 (Entwurf 2011): Technischer Steinschlagschutz – Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung.
- ÖNORM EN ISO 14689-1 (2004): Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Fels - Teil 1: Benennung und Beschreibung.
- ÖSTERREICHISCHES FORSTGESETZ (1975/2007): Bundesgesetzblatt BGBl.Nr.440/1975 idF BGBl.Nr.231/1977, BGBl.Nr.142/1978, BGBl.Nr.576/1987, BGBl.Nr.257/1993, BGBl.Nr.970/1993, BGBl.Nr.532/1995, BGBl.Nr.419/1996, BGBl.Nr.158/1998, BGBl.Nr.108/2001, BGBl.Nr.59/2002, BGBl.Nr.65/2002, 78/2003, 83/2004, 87/2005 und 55/2007.

- PERZL F., MAIER, B., WALTER, D. (2012): Klimawandel, Naturgefahren und Schutzwald. BFW-Praxisinformation 30, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Wien, 24 – 26.
- ROVINA H., LINIGER M., JORDAN P., GRUNER U., BOLLINGER D. (2011): Empfehlungen für den Umgang mit Sturzmodellierungen - Swiss Bull. Angew. Geologie (16/1): 57-79.
- SCHWITTER R (2000): Waldwirkung und Steinschlag - Zusammenfassung und Schlussfolgerungen, GWG/FAN Tagung 1998, Fachstelle für Gebirgswaldpflege, Maienfeld. www.gebirgswald.ch (Stand 12.05.2005).
- SPANG R.M. (1997): Geologisch-Geotechnische Grundlagen des Steinschlagschutzes, Bündner Wald 4/97, Chur.
- STIERLIN H.-R., BRÄNDLI U.-B., HEROLD A., ZINGGELER J. (1994): Schweizerisches Landesforstinventar – Anleitung für die Feldaufnahme der Erhebung 1993-1995. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.), Birmensdorf.
- VOLKWEIN A., SCHELLENBERG K., LABIOUSE V., AGLIARDI F., BERGER F., BOURRIER F., DORREN L.K.A., GERBER W., JABOYEDOFF M. (2011): Rockfall characterisation and structural protection – a review; Natural Hazards Earth System Sciences, 11: 2617-2651.
- WEHRLI, A., BRANG, P. MAIER, B., DUC, P., BINDER, F., LINGUA, E., ZIEGNER, K., DORREN, L.K.A. & KLEEMAYR, K. (2007): Schutzwaldmanagement in den Alpen - eine Übersicht; Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 158(6): 142-156.
- WEINMEISTER H.W., HÖSLE B., WAIBEL M. (1997): Falkensteinwand - Abschätzung der Schutzleistungsfähigkeit des Waldes und Schutzwaldsanierung, Auftraggeber Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung, Sektion Oberösterreich, Bearbeitung Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Wildbach- und Lawinenschutz, Wien.
- WINKLER C., BURCHARD U., BRÜNDL M. (2009): Risikokzept für Naturgefahren – Leitfaden, Teil B: Anwendung des Risikokzeptes: Prozess Sturz; Nationale Plattform für Naturgefahren, PLANAT, Bern.

WYLLIE D.C., MAH C.W. (2004): Rock Slope Engineering – Civil and mining, 4th edition, published by the institute of Mining and Metallurgy, Oxon.

ZAMG – Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (2013): Klimadaten von Österreich 1971-2000 – Abteilung für Klimatologie, Wien, Zugriff am 13.1.2013; www.zamg.ac.at

9 ANHANG

STURZMECHANIK

Gleiten

Gleiten findet gemäß MEISZL 1998 während der Initialphase und am Ende des Sturzprozesses statt. Beim Gleiten bewegt sich ein Block entlang einer Gleitfläche, wobei die Bewegung von der Haftreibung und dem Tangens der Hangneigung anhängig ist. Nach Bewegungsbeginn bestimmt der Gleitreibungskoeffizient den Energieverlust des bewegten Körpers.

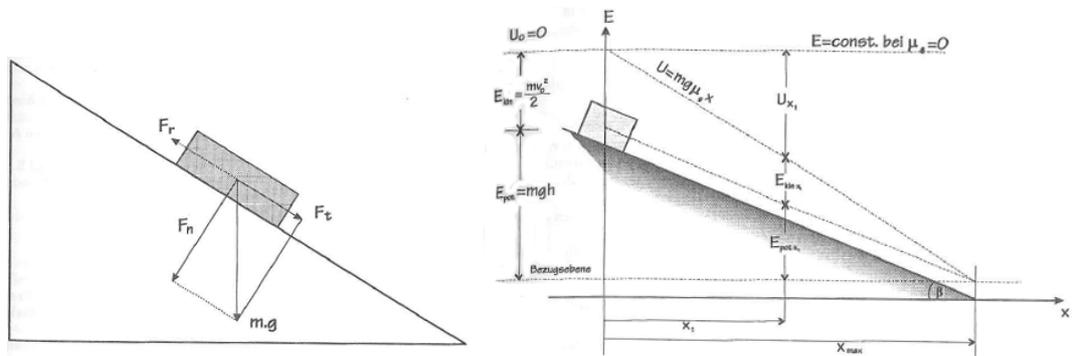


Abbildung Gleiten eines Körpers auf einer schiefen Ebene (MEISZL 1998)

Die Energie setzt sich am Beginn des Sturzprozesses aus der potentiellen und kinetischen Energie zusammen.

$$E_{pot} + E_{kin} = m \cdot g \cdot h_{AB} + \frac{m \cdot v_A^2}{2} \quad (\text{Formel 9.1})$$

Die Reibungskraft F_{reib} beträgt unter Voraussetzung der Coulomb'schen Reibung:

$$F_{reib} = \mu_g \cdot F_n = \mu_g \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta_{AB} \quad (\text{Formel 9.2})$$

Es gilt folgende Energiebedingung an einem Punkt der Sturzbahn:

$$E_{reib} = F_{reib} \cdot s_A = \mu_g \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta_{AB} \cdot s_{AB} \quad (\text{Formel 9.3})$$

Nach dem Energieerhaltungssatz können die beiden Energiebedingungen gleichgesetzt werden und das resultiert in der Geschwindigkeit an einem Punkt der Sturzbahn:

$$v_B = \sqrt{v_A^2 + 2 \cdot g \cdot (h_{AB} - \mu_g \cdot D_{AB})} \quad (\text{Formel 9.4})$$

F_{reib}	Reibungskraft [N]	g	Erdbeschleunigung [m/s]
F_n	Normalkraft [N]	μ_g	Gleitreibungskoeffizient []
E_{pot}	potentielle Energie [J]	h_{AB}	Höhendifferenz zwischen Punkt A und B [m]
E_{kin}	kinetische Energie [J]	D_{AB}	Horizontaldistanz zwischen Punkt A und B [m]
E_{reib}	Reibungsenergie [J]	S_{AB}	Hanglänge zwischen Punkt A und B [m]
v_A	Geschwindigkeit in Punkt A [m/s]	β_{AB}	Hangneigung zwischen A und B [rad]
v_B	Geschwindigkeit in Punkt B [m/s]	r	Radius des Sturzblockes
m	Sturzmasse [kg]	v	Geschwindigkeit [m/s]

Bei Eintreten der folgenden Gleichung endet der Sturzvorgang und der Block kommt zum Stillstand:

$$v_A^2 \leq 2 \cdot g \cdot (\mu_g \cdot D_{AB} - h_{AB}) \quad (\text{Formel 9.5})$$

Fallen

Geschwindigkeit und kinetische Energie während des Fallvorgangs können unter Vernachlässigungen des Luftwiderstandes wie folgt berechnet werden (MEISZL1998 bzw. GERBER 1994):

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad [\text{m/s}] \quad (\text{Formel 9.6})$$

$$E_{kin} = \frac{mv^2}{2} \quad [\text{J}] \quad (\text{Formel 9.7})$$

v	Geschwindigkeit [m/s]	E_{kin}	kinetische Energie [J]
g	Erdbeschleunigung [m/s]	m	Masse [kg]
h	Fallhöhe [m]		

Springen

Beim Springen wechseln sich Flugphasen entlang einer parabelförmigen Flugbahn und Kollisionen mit dem Hang einander ab. Dabei kann die Flugbahn der Sprungparabel nach dem Gesetz des schiefen Wurfes beschrieben werden:

$$x(t) = v_0 \cdot t \cdot \cos \delta \quad (\text{Formel 9.8})$$

$$y(t) = v_0 \cdot t \cdot \sin \delta - \frac{g \cdot t^2}{2} \quad (\text{Formel 9.9})$$

Daraus abgeleitete Parabelgleichung:

$$y = x \cdot \tan \delta - \frac{x^2 \cdot g}{2 \cdot v_0^2 \cdot \cos^2 \delta} \quad (\text{Formel 9.10})$$

Scheitelhöhe:

$$H = \frac{v_0^2 \cdot \sin \delta}{2} \cdot \left(\frac{\sin \delta}{g} + \cos \delta \cdot \tan \beta \right) \quad (\text{Formel 9.11})$$

Sprungweite:

$$W = \frac{2 \cdot v_0^2}{g} \cdot (\sin \delta \cdot \cos \delta + \tan \beta \cdot \cos^2 \delta) \quad (\text{Formel 9.12})$$

Geschwindigkeit:

$$v_x = v_0 \cdot \cos \delta = \text{const.} \quad (\text{Formel 9.13})$$

$$v_y = v_0 \cdot \sin \delta - g \cdot t \quad (\text{Formel 9.14})$$

v_0 Absprunggeschwindigkeit [m/s]

g Erdbeschleunigung [m/s²]

β Hangneigung

x Horizontaldistanz [m]

δ Absprungwinkel

y Vertikaldistanz [m]

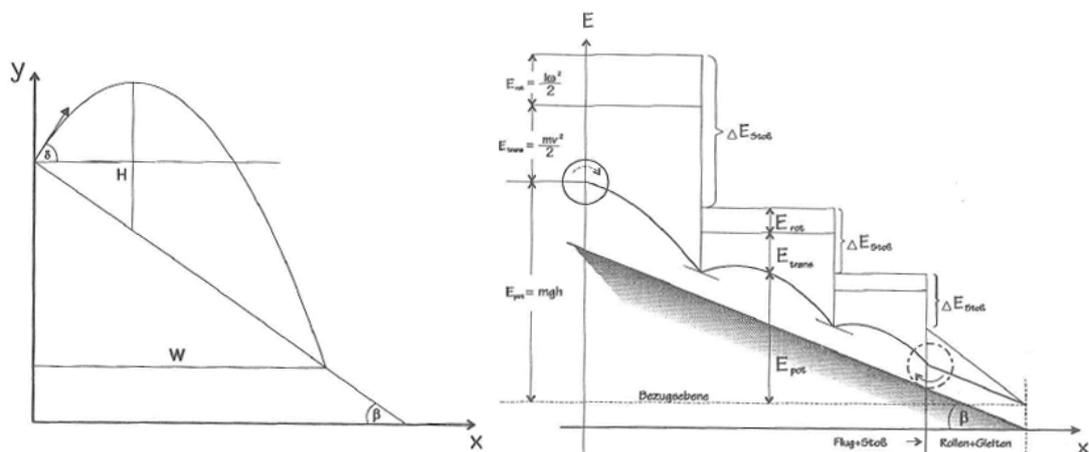


Abbildung Sprungparabel und Energieverlauf einer Sprungbewegung (MEISZL 1998 nach GERBER 1995)

Rollen

Die kinetische Energie eines rollenden Blockes setzt sich aus Translations- und Rotationsenergie zusammen:

$$E_{kin} = E_{trans} + E_{rot} = \frac{mv^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} \quad (\text{Formel 9.15})$$

Wobei I das Massenträgheitsmoment des Sturzkörpers und ω die Winkelgeschwindigkeit angibt.

$$I_{Kugel} = \frac{2}{5} m r^2 \quad (\text{Formel 9.16})$$

$$\omega = \frac{v}{r} \quad (\text{Formel 9.17})$$

An einem Punkt der Sturzbahn gilt folgende Energiebedingung:

$$E_{kin} + E_{reib} = \frac{7 \cdot m \cdot v_B^2}{10} + \mu_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \beta_{AB} \cdot S_{AB} \quad (\text{Formel 9.18})$$

Nach Gleichsetzen der beiden Energiebedingungen erhält man für die Geschwindigkeit an diesem Punkt B :

$$v_B = \sqrt{v_A^2 + \frac{10}{7} \cdot g \cdot (h_{AB} - \mu_r \cdot D_{AB})} \quad (\text{Formel 9.19})$$

E_{kin}	kinetische Energie [J]	I_{Kugel}	Massenträgheitsmoment
E_{pot}	potentielle Energie [J]	ω	Winkelgeschwindigkeit
E_{rot}	Rotationsenergie [J]	r	Radius des Sturzblockes
m	Masse [kg]	v	Geschwindigkeit [m/s]
F_{reib}	Reibungskraft [N]	g	Erdbeschleunigung [m/s]
F_n	Normalkraft [N]	μ_g	Gleitreibungskoeffizient []
E_{reib}	Reibungsenergie [J]	h_{AB}	Höhendifferenz zwischen Punkt A und B [m]
v_A	Geschwindigkeit in Punkt A [m/s]	D_{AB}	Horizontaldistanz zwischen Punkt A und B [m]
v_B	Geschwindigkeit in Punkt B [m/s]	S_{AB}	Hanglänge zwischen Punkt A und B [m]
m	Sturzmasse [kg]	β_{AB}	Hangneigung zwischen A und B [rad]
		r	Radius des Sturzblockes

Die Winkelbeschleunigung eines rotierenden Körpers verringert die kinetische Energie eines Sturzkörpers verglichen mit der eines gleitenden Körpers (MEISZL 1998).

AUFNAHMEPROTOKOLL ROCKYFOR3D

Allgemein								
Datum*		Nr. Polygon [#]		[#] jedes Polygon bildet eine homogene Einheit; die Größe hängt von der Kartengröße ab				
Ort*		Neigungswinkel*	(° / %)					
Name*		Zone*	Start / Quelle	Transit	Abgelagert			
Eigenschaften des Polygons								
1. Vorherrschender Stein (abgelagert im Polygon oder potentiell aus der Steinschlagquelle fallend)								
Blockform	1. rechteckig	2. ellipsoid	3. kugelförmig	4. scheibenförmig				
Abmessungen des Blocks (d1, d2, d3): (m) x (m) x (m)								
Gesteinsdichte (kg m ⁻³):								
2. Boden- / Untergrundart im Polygon								
Material, aus dem der Untergrund beschaffen ist	<input type="checkbox"/> Fluss, Sumpf oder Material, in das ein Stein komplett eindringen kann.	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> feines Bodenmaterial (Tiefe < ~100 cm) oder Sand- / Kiesgemisch im Tal	<input type="checkbox"/> Geröll (Ø < ~10 cm); mittel-kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen / Forststraße	<input type="checkbox"/> Talus (Ø > ~10 cm) / kompakter Boden mit großen Gesteinsteilen	<input type="checkbox"/> Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Boden-decke	<input type="checkbox"/> Anstehendes Gestein	<input type="checkbox"/> Asphaltstraße
(soiltype) <small>von Rockyfor3D benötigte Werte</small>	0	1	2	3	4	5	6	7
3. Oberflächenrauheit im Polygon								
MOH : typische Hindernishöhe normal zur Hangoberfläche (m), auf die der Block in 70 %, 20 % und 10 % der Fälle während eines Kontakts an der Hangoberfläche trifft. Muss im Feld hangabwärts blickend festgelegt werden!				MOH für 70% des Probegebiets (rg70)	0 - 100 (m)			
				MOH für 20% des Probegebiets (rg20)	0 - 100 (m)			
				MOH für 10% des Probegebiets (rg10)	0 - 100 (m)			
Liegende Baumstämme*	Mittlere Größe m	=		Bedecktes Gebiet =	%			
4. Wald*								
Repräsentative Untersuchungsfläche: m m								
BHD [#] (cm)	[#] BHD: Brusthöhendurchmesser (bergseitig, 1,3 m über der Erde gemessen)							
Aufzeichnung aller BHD ≥ 5 cm gemessen im Untersuchungsgebiet: z. B. 8, 31, 17, 13, ...								
Stämme / ha								
Durchschnittliche BHD (cm)		Nadelbäume (%)						
Standardabweichung BHD (cm)								
Arten*								
5. Indikatoren zur Steinschlagaktivität / Stumme Zeugen *								
Mittlere Anzahl der Baumanpralle durch Steinschlag*		Höhe(n) der Baumanpralle durch Steinschlag (m) *						
Tiefe der Einschlagkrater (m) *		kürzlich abgelagerte Steine im Polygon*		Ja / Nein				
6. Bemerkungen / Entwurf*								

* optionale Felder; diese sind nicht erforderlich für Rockyfor3D

Aufnahmeprotokoll gemäß Rockyfor3D (DORREN L.K.A. (2012b)).

AUFNAHMEPROTOKOLL TESTKREIS WALDBESTAND

TESTKREIS	Nr.			Foto	Nr.		
Neigung:		°		Bemerkungen: 			
Radius 2 Aren:		m					
Position auf Karte:	ja	nein					
Koordinaten:		x					
		y					
		z					
A: Baumdaten							
Anzahl Bäume: <input style="width: 50px;" type="text"/>							
Baum Nr.	BHD	Hwirk	S. Zahl	S. Grösse	Höhe max	Höhe mean	Foto Nr.
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
26							
27							
28							
29							
30							
31							
32							
33							
34							
35							

EINGANGSDATEN ROCKYFOR3D

nrtrees	dbhmean	dbhstd	conif_perc	TYP	AREA
150	24,00	9,00	37	W01 Schlag	0,48
690	26,00	10,00	68	W04	26,66
150	24,00	9,00	37	W01 Schlag	0,57
1560	18,00	10,00	24	W02	5,16
3400	6,00	2,00	90	W06	0,93
200	21,00	10,00	62	W03 Schlag	0,51
1050	24,00	9,00	33	W01	0,06
0	0,00	0,00	0	Geb ³ sch	0,59
1630	21,00	10,00	62	W03	2,94
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,28
1560	18,00	10,00	24	W02	2,63
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,16
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,72
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,24
900	29,00	9,00	73	W05	0,69
3400	6,00	2,00	90	W06	0,84
200	21,00	10,00	62	W03 Schlag	0,46
250	18,00	10,00	24	W02 Schlag	1,63
3400	6,00	2,00	90	W06	0,14
250	18,00	10,00	24	W02 Schlag	1,31
250	18,00	10,00	24	W02 Schlag	1,16
1560	18,00	10,00	24	W02	0,62
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,51
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,34
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,44
900	29,00	9,00	73	W05	0,06
900	29,00	9,00	73	W05	0,22
900	29,00	9,00	73	W05	1,03
1050	24,00	9,00	33	W01	9,43
1560	18,00	10,00	24	W02	3,99
900	29,00	9,00	73	W05	0,35
0	0,00	0,00	0	kein Wald	5,26
0	0,00	0,00	0	Geb ³ sch	0,10
0	0,00	0,00	0	kein Wald	0,23
900	29,00	9,00	73	W05	0,11

Tabelle Parameter Wald

EINGANGSDATEN ROCKYFOR3D

ROCDENSITY	BLSHAPE	D1	D2	D3	RG70	RG20	RG10	SOILTYPE
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,05000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,10000000	0,15000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,01000000	0,01000000	0,01000000	7
2800	1	1,65000000	1,10000000	0,80000000	0,05000000	0,05000000	0,08000000	6
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,07500000	0,12500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,01000000	0,02000000	0,03500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,05000000	0,15000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,20000000	0,30000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,05000000	0,15000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,10000000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,04000000	0,10000000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,08000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,06000000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,03000000	0,12000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,10000000	0,25000000	0,80000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,03000000	2

Tabelle Bodenparameter bei aktuellem Waldbestand

ROCDENSITY	BLSHAPE	D1	D2	D3	RG70	RG20	RG10	SOILTYPE
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,05000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,10000000	0,15000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,01000000	0,01000000	0,01000000	7
2800	1	1,65000000	1,10000000	0,80000000	0,05000000	0,05000000	0,05000000	6
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,07500000	0,10000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,01000000	0,02000000	0,02500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,05000000	0,10000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,05000000	0,08000000	0,10000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,05000000	0,10000000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,02500000	2
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,03000000	0,02500000	3
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,05000000	0,10000000	5
0	0	0,00000000	0,00000000	0,00000000	0,02500000	0,02500000	0,03000000	2

Tabelle Bodenparameter bei fehlendem Waldbestand

EINSTELLUNG STEINSCHLAGSIMULATION ROCKYFOR3D

AKTUELLER -Waldbestand – Szenario Jährlichkeit 1-10:

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation with forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 0.010000 m³
 - mean = 0.011000 m³
 - max = 0.012000 m³
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 36.600000 kj
 - maximum energy value = 40.600000 kj

AKTUELLER-Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 10-30:

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation with forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 0.020000 m³
 - mean = 0.030000 m³
 - max = 0.030000 m³
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 90.900000 kj
 - maximum energy value = 149.000000 kj

AKTUELLER -Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 30-100:

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation with forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 1.300000 m³
 - mean = 1.500000 m³
 - max = 1.600000 m³
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 3617.500000 kj
 - maximum energy value = 30565.400000 kj

AKTUELLER -Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 100-300:

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation with forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 0.010000 m³
 - mean = 0.011000 m³
 - max = 0.012000 m³
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 20.600000 kj
 - maximum energy value = 37.900000 kj

OHNE-Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 1-10

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation without forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 0.010000 m3
 - mean = 0.011000 m3
 - max = 0.012000 m3
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 25.400000 kj
 - maximum energy value = 42.400000 kj

OHNE -Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 10-30

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation without forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 0.020000 m3
 - mean = 0.030000 m3
 - max = 0.030000 m3
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 48.200000 kj
 - maximum energy value = 218.700000 kj

OHNE -Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 30-100

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation without forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 1.300000 m3
 - mean = 1.500000 m3
 - max = 1.600000 m3
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 3148.800000 kj
 - maximum energy value = 16635.400000 kj

OHNE -Waldbestand - Szenario Jährlichkeit 100-300

- simulation settings:
 - rock volume variation = +/- 10
 - nr. of simulations per source cell = 100
 - nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 2654700
 - additional initial fallheight = 0.000000 m
 - Simulation without forest and without nets
- Overall simulated block volumes:
 - min = 8.200000 m3
 - mean = 9.500000 m3
 - max = 9.900000 m3
- Overall simulated energy values:
 - maximum of the mean energy values = 21234.900000 kj
 - maximum energy value = 63866.900000 kj

SIMULATIONSERGEBNISSE ROCKYFOR3D

Maximale kinetische Energie	
<p>maximale Energie [kJ]</p> <ul style="list-style-type: none"> < 1 1 - 5 5 - 10 10 - 25 25 - 100 100 - 500 500 - 1.000 1.000 - 1.500 1.500 - 3.000 3.000 - 5.000 5.000 - 8.000 > 8.000 	<p>Die kinetische Energie setzt sich aus Translations- und Rotationsenergie zusammen und wird als das 95%-Quantil aller Modellergebnisse angegeben.</p>
Durchgangsfrequenz	
<p>Durchgangsfrequenz</p> <ul style="list-style-type: none"> < 1 1 - 2 2 - 5 5 - 50 50 - 100 100 - 1.000 1.000 - 2.000 2.000 - 5.000 5.000 - 10.000 > 10.000 	<p>Die Durchgangsfrequenz die Anzahl der modellierten Steine pro Zelle.</p>
Mittlere Sprunghöhe	
<p>mittlere Sprunghöhe [m]</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 - 0,1 0,1 - 0,25 0,25 - 0,5 0,5 - 1 1 - 2 2 - 3 3 - 5 5 - 10 10 - 25 > 25 	<p>Die mittlere Sprunghöhe veranschaulicht die zu erwartenden Sprünge von Sturzblöcken.</p>

Tabelle Legende Simulationsergebnisse

SIMULATIONSERGEBNISSE ROCKYFOR3D

Durchgangswahrscheinlichkeit	
<p>Durchgangswahrscheinlichkeit [%]</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - 2 2 - 4 4 - 6 6 - 8 8 - 10 10 - 15 15 - 25 25 - 50 50 - 75 75 - 100 	<p>Die Durchgangswahrscheinlichkeit errechnet sich aus den Anzahl modellierter Steine pro Zelle dividiert durch die Anzahl der Steine aus dem definierten Auslösegebiet.</p>
Reduktion der Durchgangsfrequenz	
<p>Reduktion der Durchgangsfrequenz [%]</p> <ul style="list-style-type: none"> 1 - 10 10,00000001 - 20 20,00000001 - 30 30,00000001 - 40 40,00000001 - 50 50,00000001 - 60 60,00000001 - 70 70,00000001 - 80 80,00000001 - 90 90,00000001 - 100 	<p>Die Reduktion der Durchgangsfrequenz durch erbringt den prozentuellen Vergleich des aktuellen Waldbestandes zur unbewaldeten Situation.</p>
Intensitätskarten	
<p>Intensität [kJ]</p> <ul style="list-style-type: none"> 0 - 1 < 30 kJ 30-300 kJ > 300kJ 	<p>Das Maß für die Intensität ist die kinetische Energie. Die Angabe erfolgt in den angegebenen Intensitätsklassen.</p>

Tabelle Legende Simulationsergebnisse

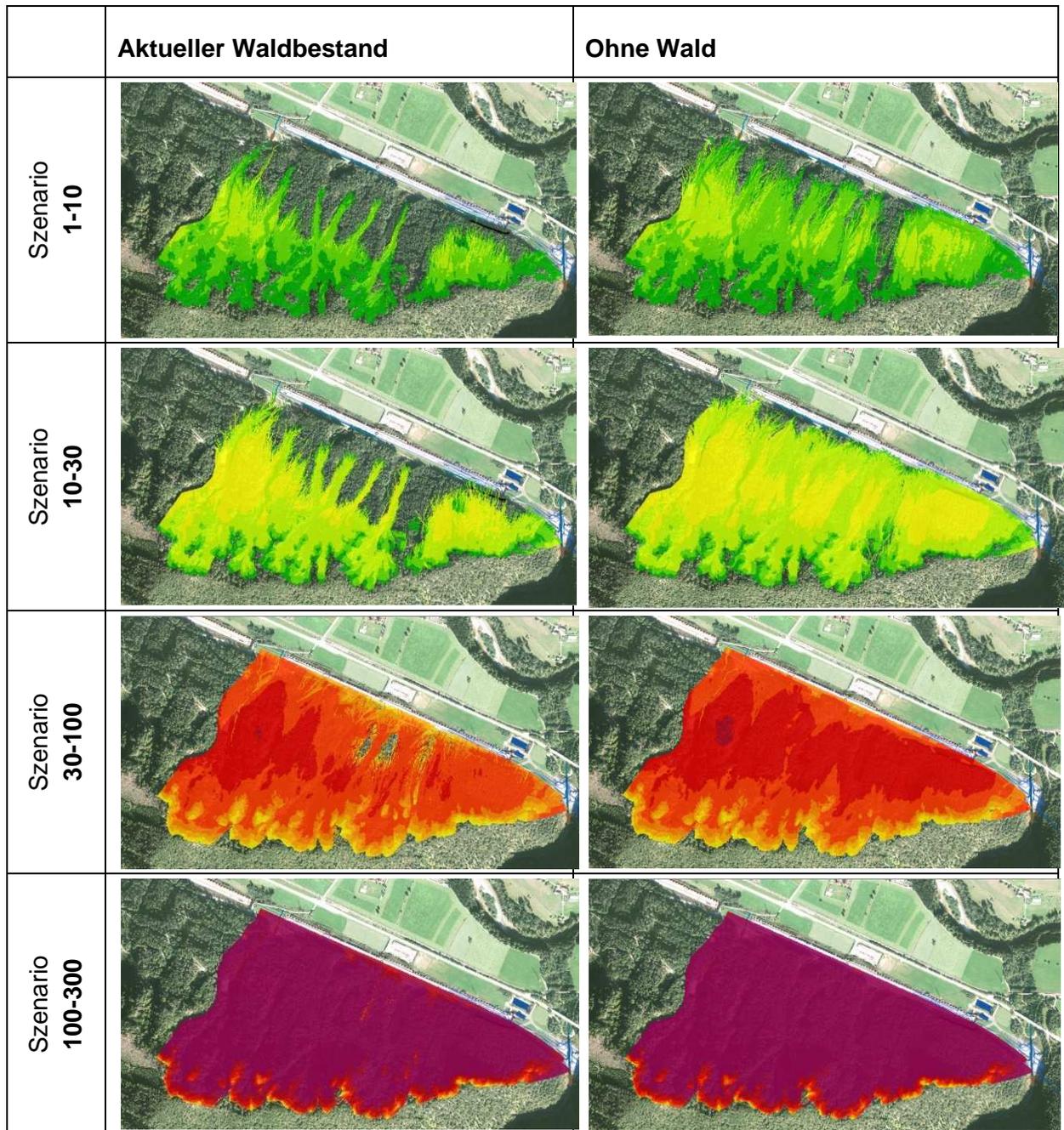
MAXIMALE KINETISCHE ENERGIE

Tabelle Simulationsergebnisse maximale kinetische Energie

DURCHGANGSFREQUENZ

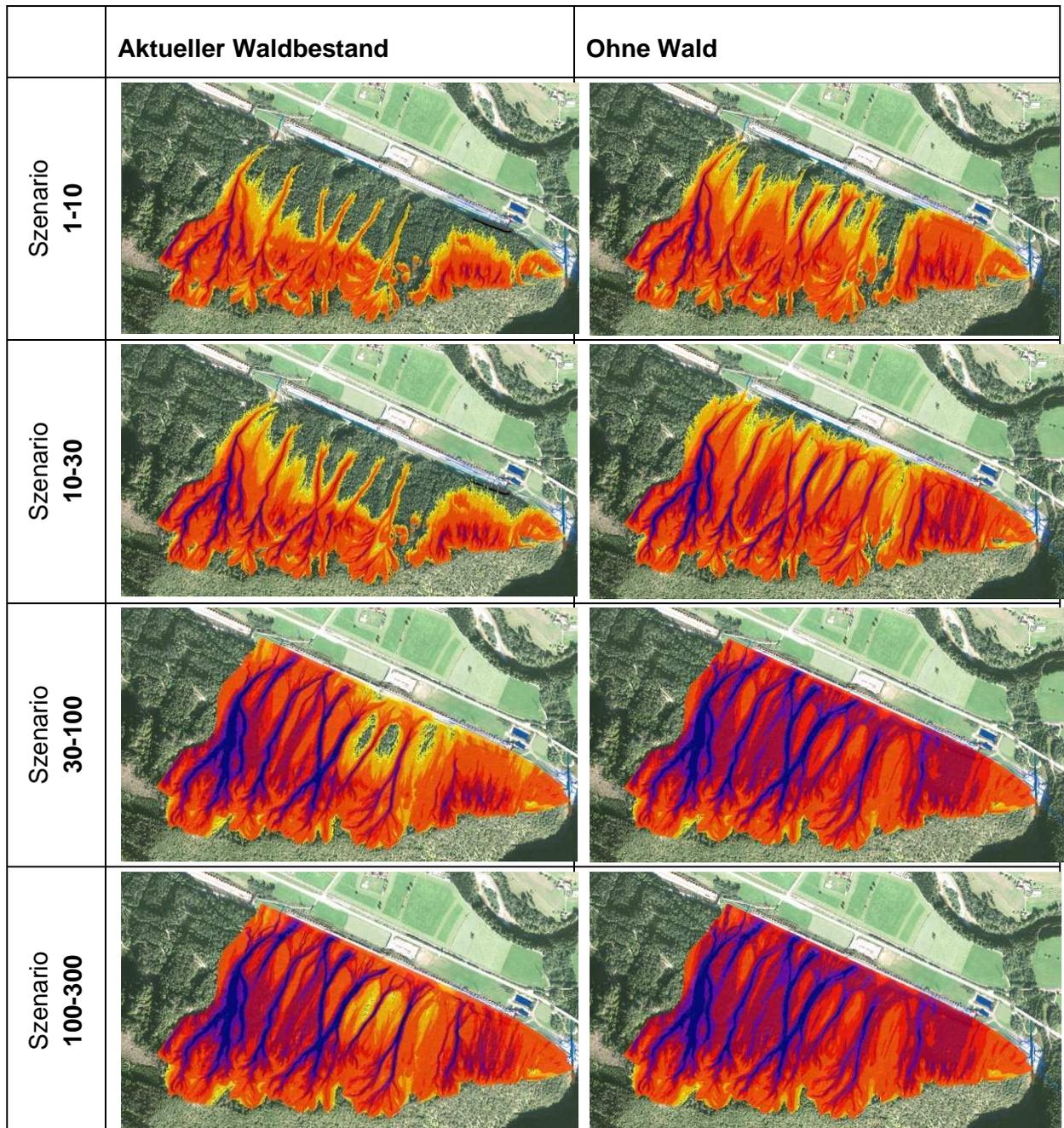


Tabelle Simulationsergebnisse Durchgangsfrequenz

MITTLERE SPRUNGHÖHE

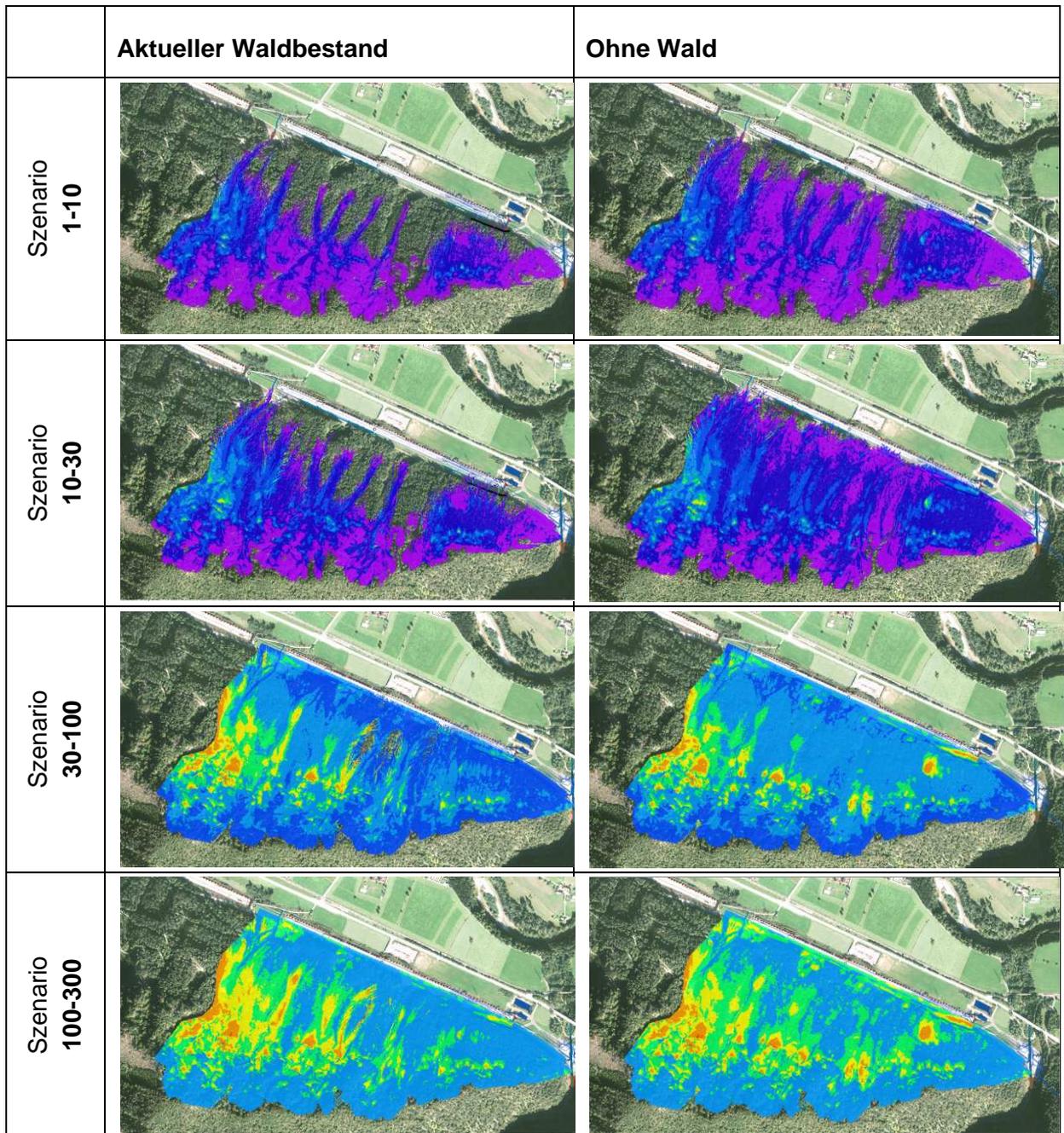


Tabelle Simulationsergebnisse mittlere Sprunghöhe

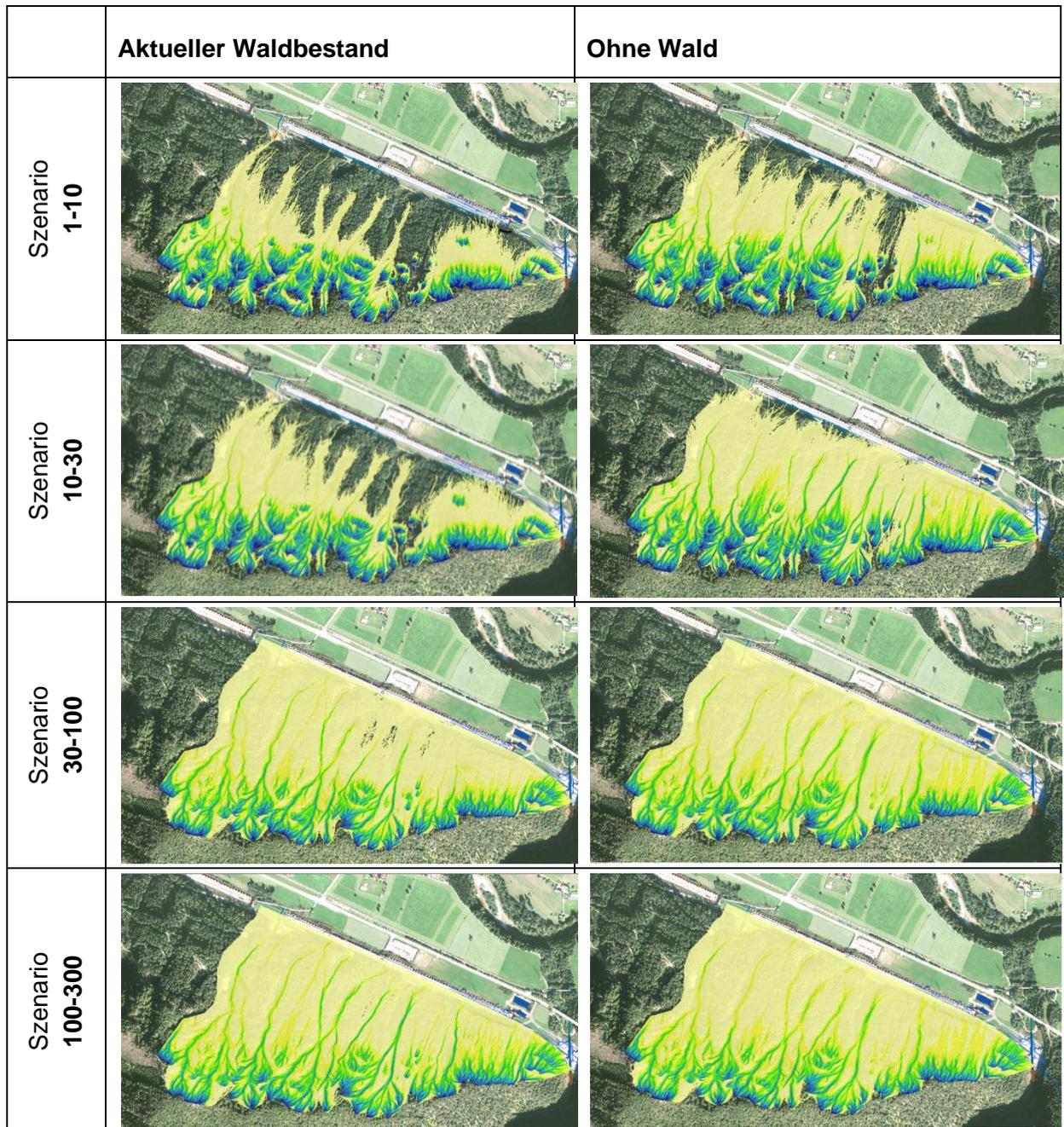
DURCHGANGSWAHRSCHEINLICHKEIT

Tabelle Simulationsergebnisse Durchgangswahrscheinlichkeit

REDUKTION DER DURCHGANGSFREQUENZ

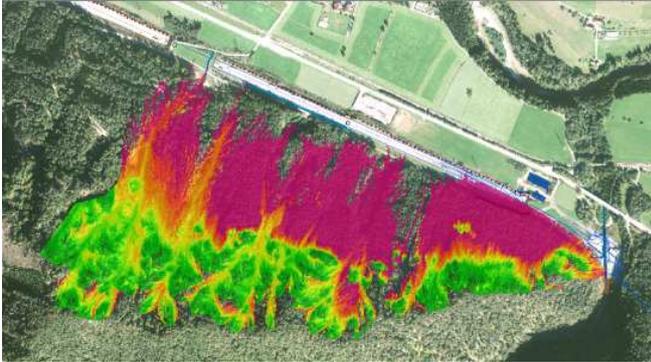
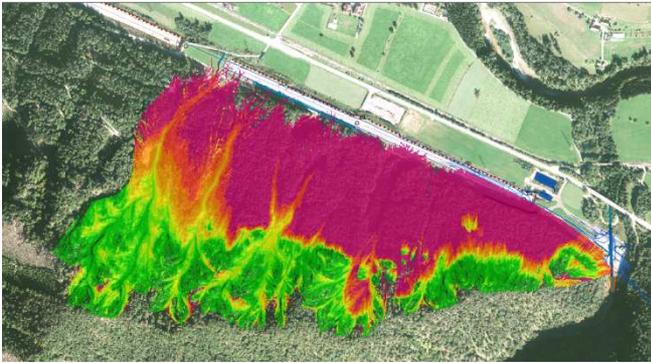
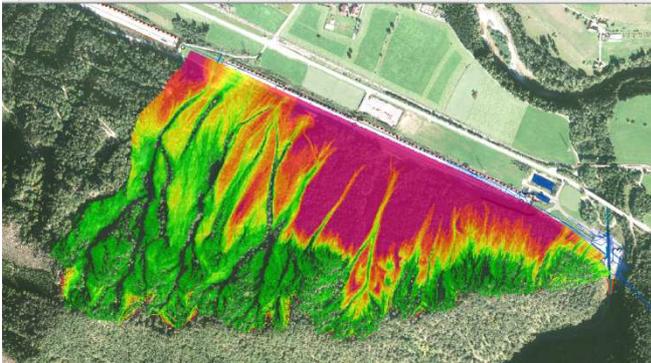
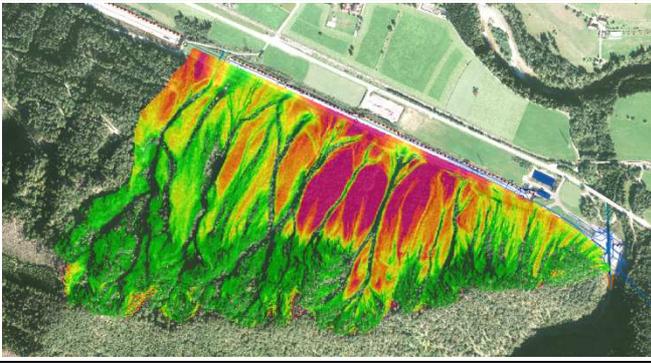
	Aktueller Waldbestand im Vergleich zu OHNE Wald
Szenario 1-10	
Szenario 10-30	
Szenario 30-100	
Szenario 100-300	

Tabelle Simulationsergebnisse Reduktion der Durchgangsfrequenz des aktuellen Waldbestandes gegenüber der Situation OHNE Wald.

INTENSITÄTSKARTEN

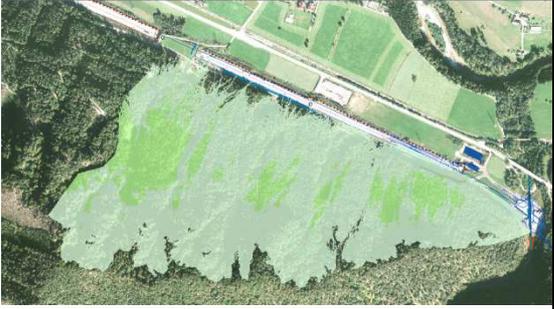
	Aktueller Waldbestand	Ohne Wald
Szenario 1-10		
Szenario 10-30		
Szenario 30-100		
Szenario 100-300	Siehe Ergebnis Szenario 30-100. Starke Intensität entlang der gesamten Autobahn zu erwarten.	

Tabelle Simulationsergebnisse Intensität

RISIKOANALYSE

Risikoanalyse									
	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald				
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300	
Blockdurchmesser [m]	0,24	0,30	1,10	2,00	0,24	0,30	1,10	2,00	
Eintretenswahrscheinlichkeit in 30 Jahren p(I)	0,9576	0,6383	0,2603	0,0953	0,9576	0,6383	0,2603	0,0953	
Häufigkeit p(J)	0,0667	0,0233	0,0067	0,0033	0,0667	0,0233	0,0067	0,0033	
Expositionssituationen									
Expositionssituation Normalverkehr p(Norm)	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	0,9992	
Expositionssituation Stau p(Stau)	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	
Intensitätskarte Abschnittsbreiten b(Pr)									
SUMME [m]	keine	70	1000	1000	keine	110	24%	20%	
schwach		70	0	0		110			
mittel		0	200	0		0			
stark		0	800	1000		0			
Bemerkung Angabe der Abschnittsbreite nur dann möglich, wenn ein Szenario mit entsprechender Intensitätsstufe die Autobahn betrifft. Ansonsten leere Zelle.									
Summe der simulierten Ablagerungen entlang der Autobahn									
Summe der Ablagerungen entlang A9 bei 2654700 Simulationen	keine Risikorelevanz	1722	139875	418937	keine Risikorelevanz	43751	782716	956513	
Anzahl Steine auf Straße ET									
Abschätzung in Anlehnung an Faktor Zunahme		1	1	1		5	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%	
mittlere räumliche Auftretenswahrscheinlichkeit p(rA)									
GESAMT		0,0043	0,0011	0,0020		0,0136			
schwach	0,0043			0,0136					
mittel		0,0055							
stark			0,0014	0,0020					
Bemerkung Räumliches Auftreten nur möglich, wenn Reichweite eines Szenarios die Autobahn erreicht und die jeweilige Intensitätsstufe auftritt.									
Fahrbahnfaktor ff									
Direkttreffer	ganze Fahrbahn	1	Fahrstreifen	0,5	Standstreifen	0,25			
Auffahrunfall	ganze Fahrbahn	1	Fahrstreifen	0,5	Standstreifen	0,25			
Verschüttung	ganze Fahrbahn	1	Fahrstreifen	0,5	Standstreifen	0,25			
Verfügbarkeit Sperrung nach Ereignis	Zusätzliche Umfahrungszeit und durchschnittliche Sperrdauer								
Verfügbarkeit vorsorgliche Sperrung	kein Einfluss auf das Schadensausmaß								
Bemerkung									

Präsenzwahrscheinlichkeit								
Gefährdete Objekte oder Personen								
DTV - durchschnittliche tägliche Verkehrsfrequenz	18114	FZG/Tag (beide Fahrtrichtungen GESAMT)						
g - Länge des gefährdeten Streckenabschnittes pro Intensitätszone	siehe Abschnittsbreiten p(Pr)							
v - signalisierte oder durchschnittliche Geschwindigkeit der FZG	100	km/h						
λ - Letalitätsfaktor	schwach	0,1	mittel	0,8	stark	1		
p - Maximale Fahrzeugdichte in Stausituationen	140	Fahrzeuge/km maximale Fahrzeugdichte Stau = 0,14 FZG / m pro Fahrstreifen (140 FZG / km)						
β - durchschnittlicher Besetzungsgrad der Fahrzeuge (FZG)	1,76	Personen/Fahrzeug						
	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Präsenzwahrscheinlichkeit								
Bemerkung Annahme Stau nur auf einer Fahrbahn bzw. 2 Fahrstreifen.								
Normalsituation Anzahl Fahrzeuge im Prozessraum N(F)Norm								
schwach	keine Risikorelevanz	1	0	0	keine Risikorelevanz	1	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		0	2	0		0		
stark		0	6	8		0		
Stausituation Anzahl Fahrzeuge im Prozessraum N(F)Stau								
schwach	20	0	0	31				
mittel	0	56	0	0				
stark	0	224	280	0				
Normalsituation Anzahl gefährdeter Personen N(P)								
schwach	1	0	0	1				
mittel	0	3	0	0				
stark	0	11	13	0				
Stausituation Anzahl gefährdeter Personen N(P)								
schwach	34	0	0	54				
mittel	0	99	0	0				
stark	0	394	493	0				
Wahrscheinlichkeit Auffahrunfall p(Auffahr)	0,15	Personen/Fahrzeug						
Bemerkung								

Risikoermittlung - Verfügbarkeit								
Szenarien	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Schadensbild Verfügbarkeit - Sperrung nach Ereignis								
Sperrungswahrscheinlichkeit p(Sp)	0,0	nicht wahrscheinlich		0,1	wenig wahrscheinlich		0,5	wahrscheinlich
Sperrhäufigkeit hSp	0,0	nicht wahrscheinlich		1,0	wenig wahrscheinlich		2,0	wahrscheinlich
Reduktionsfaktor Sperrungswahrscheinlichkeit (a)	0,75	Reduktionsfaktor (a)						
durchschnittliche Sperrung nach Ereignis dSp(E) [Tage]	schwach	0,04167	mittel	1	stark	5	(Schätzung)	
Sperrungswahrscheinlichkeit gleichzeitiger Ereignisse pGSp	0,0000	Bei Sturzprozessen Faktor 0.						
Schadenswahrscheinlichkeit ps(VerfüGE)		0,0233	0,0067	0,0033		0,0233		
Umfahrungsmöglichkeit								
Fahrdauer d(Umfahrung)	0,1833	h						
zusätzliche Fahrdauer d(Umfahrung)	0,0833	h						
Verfügbarkeit Umfahrung p(Umfahrung)	1	unabhängig von Ereignissen						
Staukostenansatz								
durchschnittliche Stau-Kostensatz pro Fahrzeug und Stunde K(Stau)	412,80	€/Tag	17,20	€/h				
Schadensausmaß Sperrung nach Ereignis €								
Schadensausmaß S(VerfüGE)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 25.953	€ 25.953	€ 25.953		€ 25.953	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		€ 25.953	€ 622.872	€ 622.872		€ 25.953		
stark		€ 622.872	€ 3.114.362	€ 3.114.362		€ 622.872		
Risiko Sperrung nach Ereignis €								
R(VerfüGE;Qj)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 606	€ 173	€ 87		€ 606		
mittel		€ 606	€ 4.152	€ 2.076		€ 606		
stark		€ 14.534	€ 20.762	€ 10.381		€ 14.534		
SUMME Risiko Verfügbarkeit €		€ 14.534	€ 20.762	€ 10.381	€ 14.534			
Bemerkung	Szenarien mit schwacher Intensität und sehr häufigem Auftreten betreffen die Autobahn streng genommen bei vorhandenem Waldbestand nicht. Die Holzschlachtenwände sind lokal als Schutz ausreichend. Daher wird speziell das sehr häufige Ereignis							

Risikoermittlung - Direkttreffer								
Szenarien	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Schadensbild Direkttreffer								
Schadenswahrscheinlichkeit Stausituation psD(Fahrbahn Stau)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		0,000018	0,000005	0,000001		0,000018	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		0,000018	0,000005	0,000001		0,000018		
stark		0,000018	0,000005	0,000001		0,000018		
Schadenswahrscheinlichkeit Normalsituation psD(Fahrbahn Norm)								
schwach	0,0233	0,0060	0,0017	0,0233	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%		
mittel	0,0233	0,0060	0,0017	0,0233				
stark	0,0233	0,0060	0,0017	0,0233				
Schadensausmaß Direkttreffer								
SD(Fahrbahn Stau)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		0,0148	0,0000	0,0000		0,0739		
mittel		0,0000	0,0108	0,0000		0,0000		
stark		0,0000	0,0434	0,0986		0,0000		
SD(Fahrbahn Norm)								
schwach	0,0004	0,0000	0,0000	0,0020	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%		
mittel	0,0000	0,0003	0,0000	0,0000				
stark	0,0000	0,0012	0,0027	0,0000				
monetarisiertes Schadensausmaß Direkttreffer €								
Grenzkostenprinzip für kollektives Risiko	€ 4.100.000	€/Person						
SD(Fahrbahn Stau)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 60.614	€ 0	€ 0		€ 303.072		
mittel		€ 0	€ 44.451	€ 0		€ 0		
stark		€ 0	€ 177.802	€ 404.096		€ 0		
SD(Fahrbahn Norm)								
schwach	€ 1.634	€ 0	€ 0	€ 8.169	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%		
mittel	€ 0	€ 1.198	€ 0	€ 0				
stark	€ 0	€ 4.793	€ 10.893	€ 0				
Risiko Direkttreffer								
RD(Fahrbahn;Qj)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		9,6E-06	0,0E+00	0,0E+00		4,8E-05		
mittel		0,0E+00	1,8E-06	0,0E+00		0,0E+00		
stark		0,0E+00	7,2E-06	4,6E-06		0,0E+00		
monetarisiertes Risiko Direkttreffer €								
Grenzkostenprinzip für kollektives Risiko	€ 4.100.000	€/Person						
RD(Fahrbahn;Qj)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 39	€ 0	€ 0		€ 196		
mittel		€ 0	€ 7	€ 0		€ 0		
stark		€ 0	€ 30	€ 19		€ 0		
SUMME Risiko Direkttreffer €		€ 39	€ 37	€ 19	€ 196	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%	
Bemerkung	Risiko von Direkttreffern nur bei zugrunde liegender Auftretenswahrscheinlichkeit möglich.							

Risikoermittlung - Auffahrunfall								
	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Schadensbild Auffahrunfall								
Schadenswahrscheinlichkeit ps(Auffahr)		1,7E-03	5,0E-04	1,2E-04		1,7E-03		
Schadensausmaß S(Auffahr)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		0,0930	0,0000	0,0000		0,1461	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		0,0000	2,1254	0,0000		0,0000		
stark		0,0000	10,6269	13,2836		0,0000		
monetarisiertes Schadensausmaß Auffahrunfall €								
Grenzkostenprinzip für kollektives Risiko	€ 4.100.000	€/Person						
S(Auffahr)	keine				keine			
schwach		€ 381.239	€ 0	€ 0		€ 599.090	24%	20%
mittel		€ 0	€ 8.714.042	€ 0		€ 0		
stark		€ 0	€ 43.570.208	€ 54.462.760		€ 0		
Risiko Personen Auffahrunfall								
R(Auffahr;Q _j)	keine				keine			
schwach		1,6E-04	0,0E+00	0,0E+00		2,6E-04	24%	20%
mittel		0,0E+00	1,1E-03	0,0E+00		0,0E+00		
stark		0,0E+00	5,3E-03	1,7E-03		0,0E+00		
monetarisiertes Risiko Auffahrunfall €								
Grenzkostenprinzip für kollektives Risiko	€ 4.100.000	€/Person						
R(Auffahr;Q _j)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 667	€ 0	€ 0		€ 1.048	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		€ 0	€ 4.354	€ 0		€ 0		
stark		€ 0	€ 21.768	€ 6.803		€ 0		
SUMME Risiko Auffahrunfall €	€ 667	€ 21.768	€ 6.803	€ 1.048				
Bemerkung								

Risikoermittlung - Verschüttung								
	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Schadensbild Verschüttung								
Basiswert Schadensempfindlichkeit Fahrbahn 4spurig, richtungsgetre	7790	€/m						
Schadensempfindlichkeit Linienobjekte SE	schwach	500	mittel	1900	stark	4750	€/m	
Anteil Schadensempfindlichkeit Linienobjekte SE	schwach	0,05	mittel	0,2	stark	0,5	%	
Schadenswahrscheinlichkeit ps(Verschütt)		0,0233	0,0067	0,0033		0,0233		
monetarisiertes Schadensausmaß Verschüttung der Fahrbahn €								
Schadensausmaß S(Verschütt) - Fahrstreifen	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		€ 584.250	€ 0	€ 0		€ 2.921.250	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		€ 0	€ 428.450	€ 0		€ 0		
stark		€ 0	€ 1.713.800	€ 3.895.000		€ 0		
monetarisiertes Risiko Verschüttung €								
R(Verschütt;Q _j)	keine Risikorelevanz				keine Risikorelevanz			
schwach		13632,5	0	0		68162,5	Risikozunahme um 24%	Risikozunahme um 20%
mittel		0	2856,333333	0		0		
stark		0	11425,333333	12983,333333		0		
SUMME Risiko Verschüttung €	€ 13.633	€ 14.282	€ 12.983	€ 68.163				
Bemerkung	Sturzblöcke betreffen in der Regel nicht die gesamte Fahrbahn.							

Summe der Risiken								
	Aktueller Waldzustand				Ohne Wald			
Szenarien	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
RISIKOZUNAHME Faktor 30-300J [%]						24%	20%	
SUMME Risiko Verfügbarkeit (pro Jahr)	keine Risikorelevanz	€ 14.534	€ 20.762	€ 10.381	keine Risikorelevanz	€ 14.534	€ 25.790	€ 12.895
		€ 45.677				€ 53.219		
SUMME Risiko Direkttreffer (pro Jahr)		€ 39	€ 37	€ 19		€ 196	€ 46	€ 23
		€ 95				€ 265		
SUMME Risiko Auffahrunfall (pro Jahr)		€ 667	€ 21.768	€ 6.803		€ 1.048	€ 27.040	€ 8.450
	€ 29.238			€ 36.537				
SUMME Risiko Verschüttung (pro Jahr)	€ 13.633	€ 14.282	€ 12.983	€ 68.163	€ 17.740	€ 16.127		
	€ 40.898			€ 102.030				
Individuelles Todesfallrisiko []		1,1E-08	4,0E-07	1,0E-07		1,9E-08	0,0E+00	0,0E+00
		5,2E-07				1,9E-08		
Statistischer Todesfall []	Alle	140	Jahre	Alle	111	Jahre		
Personenrisiko pro Jahr [€]		€ 706	€ 21.805	€ 6.821		€ 1.244	€ 27.085	€ 8.473
		€ 29.332				€ 36.802		
Kollektives Risiko pro Jahr [€]		€ 115.907				€ 192.051		
RISIKOREDUKTION 1-30J	Risikoreduktion pro Jahr durch den aktuellen Waldbestand					€ 55.068		
	Risikoreduktion durch den aktuellen Waldbestand					66%		
RISIKOREDUKTION DURCH WALD GESAMT	Risikoreduktion pro Jahr durch den aktuellen Waldbestand					€ 76.143		
	Risikoreduktion durch den aktuellen Waldbestand					40%		

10 ENGLISH SUMMARY

10.1 Introduction

The frequency and intensity of natural hazards in alpine regions have seemed to increase during the last decades. The role of climate change is not yet elucidated in this context (PERZL et al. 2012, PLANAT 2013).

Consequently the intensive anthropogenic expansion within alpine regions by settlement growth and space utilisation is leading to rising conflicts of land use and the intersection of hazard zones. Regional planning institutions are asked to reduce the residual risk by sustainable development of alpine regions. The need for protective measures against natural hazards becomes increasingly important. Technical protection measures are expensive and only provide small scale protection. A cost-effective and sustainable method is to integrate forests to the protective functions by combining different concepts of protection measures (PLANAT 2013).

Austria is generally prone to natural hazards such as rockfall. As a consequence the Austrian highway network is frequently exposed to the occurrence of natural hazards. A recent example is the rockfall event at Wald/Schoberpass that occurred in April 2012 (3G 2012).

The cost-effective advantage of protective forests against natural hazards includes the equally distributed effectiveness in the source area, transition area and deposition area of rockfall trajectories. Commonly risk reduction, the reduction of hazard impacts, damages and financial losses are generally reduced. Consequently the Austrian highway operator "ASFINAG" is interested in regarding the protective forest functions to improve the overall highway availability.

Currently the knowledge about the protective effect of forests is low. The aim of this diploma thesis is to investigate the risk reduction of a current forest stand against rockfall at a defined study area along the Austrian highway network.

The aim of this diploma thesis is also to quantify the risk reduction by investigating the effect of a current forest stand for the test site nearby the Austrian highway "A9".

The following figure is representing an overview of the study area.



Figure: Overview of the study area (MÜLLER 2012).

10.2 Evaluation of the protective effect of forest

The natural forest stand within the project area offers by KILIAN 1994 a balanced mixture of the tree species spruce (*picea abies*), fir (*abies alba*) and beech (*fagus sylvatica*) and numerous secondary tree species such as maple (*acer pseudoplatanus*), ash (*fraxinus excelsior*), or pine (*pinus sylvestris*), elm (*ulmus glabra*), as well as oak (*quercus robur*).

The current forest inventory of the project area was recorded in a representative taking mapping during autumn 2012. It documents the natural ...by the natural forest stand. A small part of the study area shows storm damages.

The stand density of a forest, the distribution of tree diameter, gaps in the forest stand, fallen trees as well as the block size and the kinetic energy are key parameters of the rockfall activity and resistance (HEINIMANN et al. 1998). Based on a study by DORREN et al 2005b forested slopes can reduce the probability of through falling rocks by up to 63 % compared to non-forested slopes. In this context, a reduction of the maximum speed by 26 % and the average jump height by 33% is observed.

The best characteristics of protective forests are trees with a large diameter, but also various structured forest stands with widely distributed tree diameters, a relatively high number of stems per unit area and different stages of development (DORREN et al. 2007 FREHNER et al 2005). The summarised requirements of protective forests are mentioned referring to FREHNER et al. 2005 below:

- Tree species composition
- Horizontal and vertical structure (number of trees, diversity, age of trees)

- Stability factors (growth form, target protection diameter)
- Regeneration of forest stands

According to FREHNER et al. 2005, respectively KALBERER 2011, a minimum falling distance through a forest stand is necessary for developing the maximum protective function. The minimum length is investigated by evaluating the usability, load-bearing capacity and durability of the forest stand. The proposed population density is independent of the size and energy of the falling rocks and should achieve up to 400 trees per hectare (ha) with a breast height diameter (BHD) of more than 12 cm at minimum (FREHNER et al 2005). Gaps within the forest stand should be less than 20 m (KALBERER 2011).

Based on the methodology of KALBERER 2011 the minimum required transition length through a wooded area is 50 m to achieve a protective function for stone diameter of less than 60 cm. If the stone diameter is more than 60 cm, the transition length must be at least 100 m. The project area of "Gschwendnerberg" mainly consists of trees with less than < 30 cm BHD, however the wooded transition routes achieve more than 100 m in length. Therefore the current stand is evaluated as useful protective forest function.

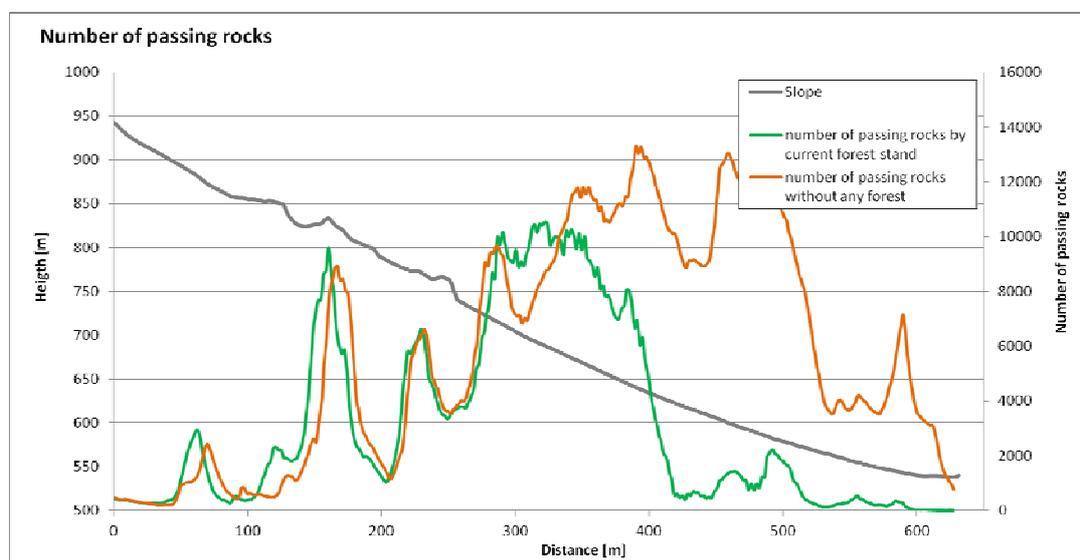


Figure: Reduction of the frequency of rockfall trajectories.

10.3 Hazard assessment

This diploma thesis applies the methodology of different available concepts for sustainability and monitoring research of protective forests and concepts of risk-based assessment, prevention and management (ASTRA 2009, BRÜNDLI 2009, BORTER 1999, FREHNER et al. 2005, KALBERER 2011).

The evaluation of the rockfall hazard potential in the study area is based on field recordings and mappings. The basic data acquisition is necessary to define different hazard scenarios and the assessment of design blocks, as well as the input data for rockfall modelling, risk assessment and analysis. The definition of the input parameters for the rockfall simulation is performed in the field by DORREN et al 2004. Therefore homogeneous morphological units called "polygons with the same characteristics" are defined and mapped. Each combined polygon represents various areas of land cover type (attenuation) and of uniform surface roughness.

The mapping of the current forest stand in the study area is similar to the mapping of the surface roughness and land cover. The definition of forest polygons with the same characteristics and the mapping is based on the methodology of forest inventory by STIERLIN et al. 1988. The tree species, the distribution of the diameter at breast height (DBH), and the stem numbers per hectare are calculated using test circuits for single forest polygons and the polygons are finally interpolated to the entire study area.

Referring to the geological and geotechnical report by NEUBAUER ZT 2012, the predominant rocks have been investigated at representative outcrops of high rockwalls. The rock association strength is described as moderately considered. Partially there are relatively fresh outbreaks of rocks and depositions everywhere downwards the slopes of the study area.

by using the geometric angle, the travel angle or the shadow angle different approaches are used to predefine the general range of potential rockfall events. The publications by EVANS and HUNGR 1993, GERBER 1994, MEISZL 1998, HEINIMANN et. al. 1998 and DORREN 2003 are forming the necessary basics of objective analysis following this approach.

The hazard assessment of the study area is completed by calculating different scenarios of rockfall hazard events under consideration of the current forest stand and

in comparison to the assumption of the theoretical situation that no forest would be available. The creation of intensity maps is one of the main outputs of the rockfall simulations with Rockyfor3D.

Rockyfor3D is a simulation model by DORREN 2012 to calculate trajectories of single, individually falling rocks in three dimensions (3D). The model combines physically-based, deterministic algorithms with stochastic approaches. Therefore Rockyfor3D is a probabilistic process-based rockfall trajectory model and is used for regional, local and slope scale rockfall simulations.

Rockyfor3D calculates the following listed components of the rockfall process (DORREN et al. 2006 and DORREN et al. 2004b):

- The range and trajectories on forested and non-forested areas
- The speed of the falling blocks
- The translational and rotational energy
- The energy loss by tree hits

According to the digital terrain model tracks and trajectories are calculated following the principle of a multiple flow algorithm.

For the present study area, there are almost no available records of the rockfall activity or known events. Silent witnesses of freshly deposited blocks and damaged trees are the only available evidence of rockfall activity on Gschwendnerberg. Hence the risk assessment is primarily based on the field work and description of the study area and on the applied methods for detection the potential hazards by interpreting the simulation results of Rockyfor3D.

In general rockfall processes and their effects are characterised by the size of design blocks and their annuality of their occurrence. For the study area the rock structures and the deposited blocks in the terrain were determined and design blocks for different scenarios are specified as shown in the table below.

Rockfall scenario (return period)	rocks [m ³]	diameter [m]	geometry [m]	weigh [kg]
< 10 year	0,01	0,01	0,34 x 0,24 x 0,13	30 kg
10-30 years	0,03	0,03	0,42 x 0,30 x 0,20	71 kg
30-100 years	1,45	1,45	1,65 x 1,10 x 0,80	4,1 t
100-300 years	9,00	9,00	3,00 x 2,00 x 1,50	25,2 t

Table: Return period and size of different design blocks.

The evaluation of the rockfall potential is done by model validation and plausibility check of all the input data and simulation results. The simulation of rockfall events is performed for the current forest stand and for the theoretical situation of "no forest availability". Therefore the simulation is based on four scenarios with different return periods. All simulation results are given in the Appendix in Chapter 9.

The simulation results of the maximum kinetic energy are depending on the different block sizes of each scenario. The maximum energies are based on the representation of the 95% quantile of all simulated blocks. The results of very frequent events verify the assumption that block sizes up to a diameter of about 25 cm do not advance the A9 motorway. This assumption is regardless to the current forest stand. Exceptionally the Eastern tunnels within the study area are prone to rockfall events. The hazard potential is quite low. However, the maximum energies exceed only 10 kJ for very high frequent events and just 30 kJ for frequent events. The existing mitigation measures above the tunnels made of wooden fences are definitely sufficient to protect the highway. Compared to the possible event magnitude and the expected jump heights an exceed of the obstacles is very unlikely.

Frequent events with stone diameters of about 30 cm are reaching maximum kinetic energies of 25 kJ. The maximum energy of rare events increases significantly. According to the current forest stand and a 100-year return period, rockfall can be expected all over the study area. Rocks with a diameter of up to 1.10 m already reach maximum energies up to 1500 kJ. The theoretical simulation result of the very rare 300-year events is primarily a probabilistic calculation to use for risk assessment.

The following figures are representing the difference of the simulation results with Rockyfor3D due to the maximum kinetic energies. The protective effect of the current forest stand is illustrated by the increase of the simulated energies.

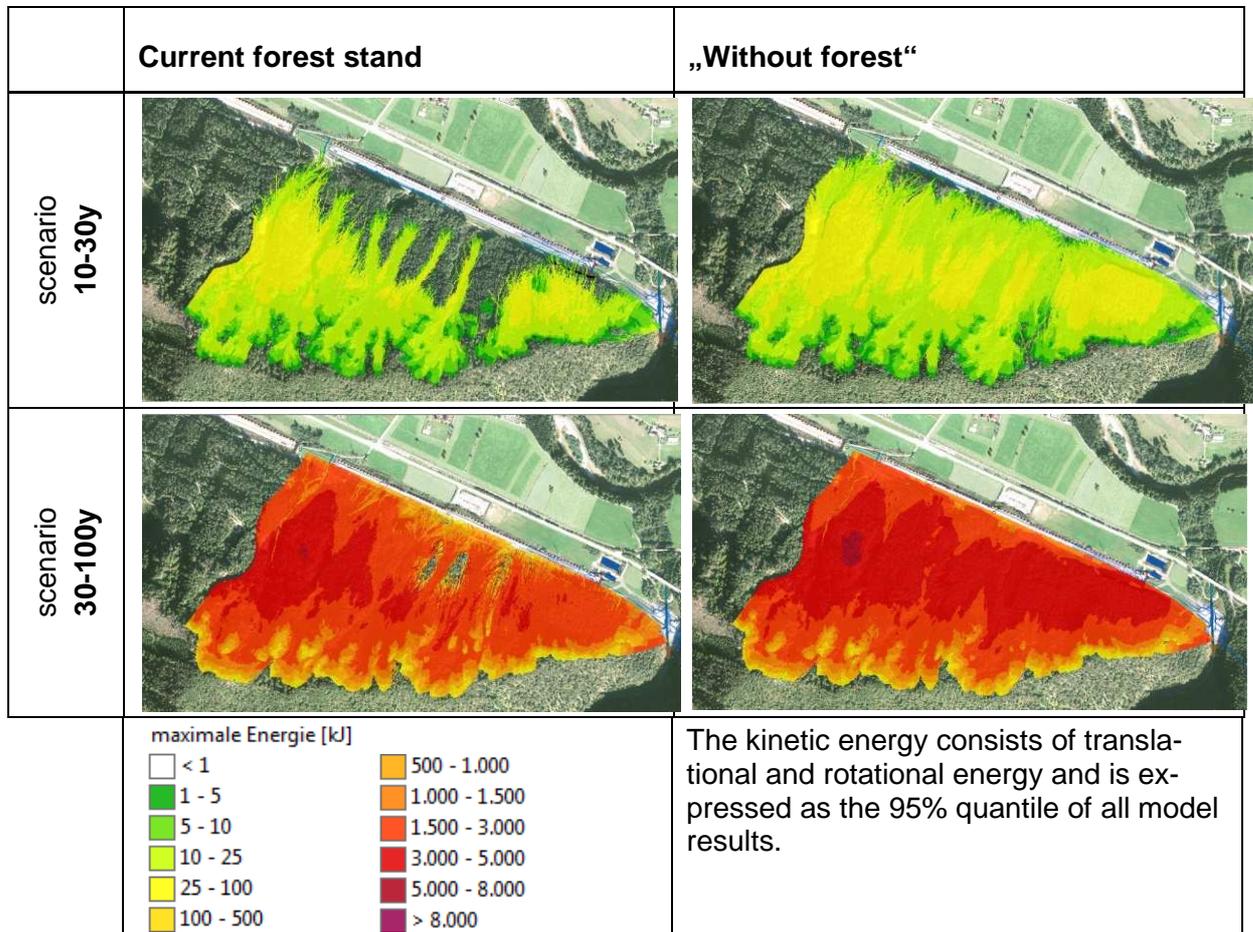


Figure: simulation results of the maximum kinetic energy.

10.4 Risk assessment

Risk is the probability that exposure to a hazard and will certainly lead to a negative consequence. Risk ($R_{i,j}$) is assessed as the arithmetic product of the factors probability of occurrence (p_{Si}), value at risk (A_{Rj}), vulnerability of the objects ($v_{Oj,Si}$) and the probability of presence of the objects for a scenario (i) (BRÜNDLI 2009, KIENHOLZ et al 1998).

$$R_{i,j} = f(p_{Si}, p_{Oj}, S_i, A_{Oj}, v_{Oj}, S_i)$$

$R_{i,j}$ Risiko des Objektes i bei Szenario J

$S_{i,j}$ Schadensausmaß des Objektes i aufgrund Szenario J

$p_{Si,j}$ Schadenswahrscheinlichkeit bei Objekt i aufgrund von Szenario J

Thus, a hazard poses no risk if there is not an exposure to that hazard existing. Generally people or objects (physical assets, infrastructure) can be exposed to risks (ASTRA 2009).

The risk assessment is carried out for (BORTER 1999):

- Object risks - the extent of the risk to an object
- Collective risk - the extent of risk for a collective (e.g. the society in general)
- Individual risk - the extent of risk for an individual person

Due to different vulnerability of objects different risks can occur for the same hazard potential (BRÜNDLI 2009 HEINIMANN et al. 1998). The normative criterion to classify different intensities of hazard potential is the maximum kinetic energy impact.

The classes of intensity are therefore distinguished as (ASTRA 2009):

- strong intensity $E > 300 \text{ kJ}$
- medium intensity $30 < E < 300 \text{ kJ}$
- weak intensity $E < 30 \text{ kJ}$

The aim of the risk analysis is to quantify the risk reduction effect of the current forest stand. All steps of calculation and all parameters for the risk identification as well as the results of the risk analysis are given in the Appendix in Chapter 9. To determine the risk reduction of the current forest stand the following three basic approaches are fundamental (DORREN 2013):

- Calculation of the risk reduction by comparing the simulated number of frequent trajectories or the total sum of rockfall deposits along the highway.
- Calculation of the risk reduction by investigating the frequency and return period of rockfall events due to the effect of forest protective effects.
- Calculation of the risk reduction as a result of the variable spatial occurrence probability depending on the intensity of rockfall events.

Regardless of the forest stand for very frequent events, no risk can be expected along the highway. Furthermore, frequent events are hardly important. Partially existing protection measures in the form of wooden walls are considered to be sufficient due to simulated maximum impact energies and jump heights, to protect the highway of falling rocks. The risk assessment for frequent events is done by assum-

ing, that these protective measures are theoretically not available. Thus the protective effect of the current forest stand can be analysed.

Consequently different approaches for calculating the risk are applied within this diploma thesis. All approaches have advantages and disadvantages and are the subject of current research. In general, the definition of return periods for rockfall events is depending on specific uncertainties (DORREN 2013). The lack of rockfall documentation complicates the plausible evaluation and specification of statistical frequencies (DORREN 2013).

The total sum of collective risks at the current forest stand is to be € 115,907. The sum of the collective risks due to the situation "without" forest is € 192,051. Eventually the collective risk due to the protective effect of the current forest stand is much lower compared to the situation "without" forest. The following table represents the different collective risk potentials for both forest situations according to the return period of the chosen scenarios.

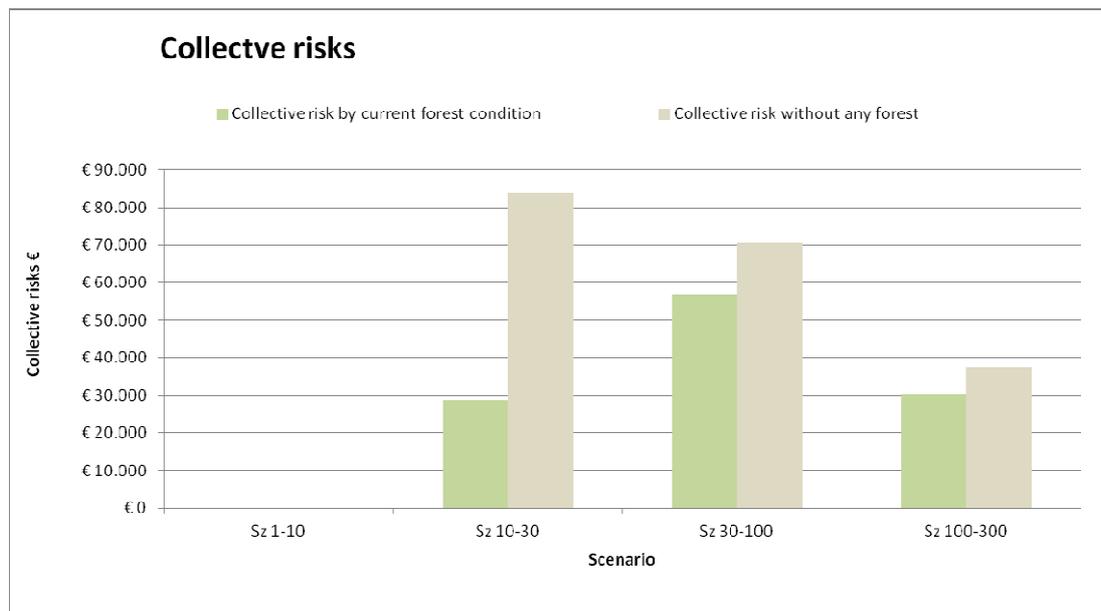


Figure 45: Distribution of collective risks.

The following table below presents the main results of the calculated risk reduction by the current forest stand.

Scenario	Reduction €				Reduction %			
	1-10	10-30	30-100	100-300	1-10	10-30	30-100	100-300
Risk of direct hits (per year)		€ 157	€ 9	€ 5		0,0%	19,5%	19,5%
Collision risk (per year)		€ 381	€ 5.271	€ 1.647		36,4%	19,5%	19,5%
SUM of personal risks (per year)		€ 538	€ 5.280	€ 1.652		43,2%	19,5%	19,5%
		€ 7.470				20,3%		
Availability risk (per year)		€ 0	€ 5.028	€ 2.514		0,0%	19,5%	19,5%
Risk of pillage (per year)		€ 54.530	€ 3.458	€ 3.144		80,0%	19,5%	19,5%
Collective risk (per year)		€ 55.068	€ 13.766	€ 7.310		65,6%	19,5%	19,5%
		€ 76.143				39,6%		

Table: Risk reduction as a consequence of the protective forest function.

The positive influence of the protective function of the current forest stand is clearly obtained by the rockfall risk reduction of nearly 40%. This result corresponds to a risk reduction of € 76,143. The current forest stand is not entirely preventing the highway of rockfall events, but it significantly reduces the likelihood of rockfall passages, the mean jump heights and the maximum energy exposure (comparison to the simulation results in Appendix Chapter 9).

The individual risk of fatalities along the highway is based on the consideration, that on average a commuter is traveling daily twice through the area prone to rockfall. The calculation of the individual risk is calculated according to ASTRA 2009. The individual risk for the situation of the current forest stand is respectively to the calculations, that every 140 years an event with one fatality has to be expected. By assuming /adapting the situation "no forest" every 111 years fatalities could occur.