



Amt für Wald und Naturgefahren
Uffizi da guaud e privels da la natira
Ufficio foreste e pericoli naturali

Monetäre Bewertung von wildhuftierbedingten Verjüngungsproblemen im Schutzwald

Fallbeispiel Schwarzwald Chur



Mai 2021

Auftraggeber:

Amt für Wald und Naturgefahren Graubünden, Marco Vanoni, Ringstrasse 10, 7001 Chur

Auftragnehmer:

Gadola 
Naturgefahren Wald & Umwelt

Nora Zürcher-Gasser
Postfach 20
7172 Rabius



Monika Frehner
Sixerstrasse 9
7320 Sargans



Universität Lausanne
Christine Moos
1950 Sion 4



Berner Fachhochschule
Massimiliano Schwarz
3052 Zollikofen

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	3
2	Einleitung und Auftrag	3
3	Stand des Wissens	3
4	Methode	4
5	Untersuchungsgebiet	5
5.1	<i>Geschichte</i>	5
5.2	<i>Waldstandorte und heutiger Zustand</i>	7
5.3	<i>Verwendete Szenarien und Definition Wildeinflusstufen</i>	11
5.4	<i>Beschreibung der Szenarien</i>	12
6	Entwicklung Altbestand	14
7	Pflanzungen/Wildschadenverhütungsmassnahmen	14
7.1	<i>Methode und Annahmen</i>	14
7.2	<i>Resultate</i>	16
8	Schutzbauten	18
8.1	<i>Lawinenverbauungen</i>	18
8.1.1	<i>Methode und Annahmen</i>	18
8.1.2	<i>Resultate</i>	20
8.2	<i>Steinschlagverbauungen</i>	20
8.2.1	<i>Methode und Annahmen</i>	20
8.2.2	<i>Resultate</i>	22
9	Erhöhte Risiken durch Naturgefahren	24
9.1	<i>Methode und Annahmen</i>	24
9.1.1	<i>Rutschungen: Eintretenswahrscheinlichkeit vs Häufigkeit</i>	24
9.2	<i>Resultate Sturz</i>	24
9.3	<i>Resultate Rutschungen</i>	28
10	Zusammenfassung der Resultate und Diskussion	29
10.1	<i>Zusammenfassung der Resultate</i>	29
10.2	<i>Diskussion</i>	31
11	Schlussfolgerungen	33
	Literatur	36
	Beilage 1: Anpassung an den Klimawandel	37
	Beilage 2: Waldmodell	39
	Beilage 3: Annahmen für die Abschätzung der Kosten für Wildschadenverhütungsmassnahmen	44

Beilage 4: Abschätzung Sturzrisiken.....	45
Beilage 5: Methode zur Simulation der Rutschprozesse.....	56
Beilage 6: Verwendetes Schadenpotential	63



1 Zusammenfassung

Die vorliegende Studie zeigt am Fallbeispiel Schwarzwald (Stadt Chur) exemplarisch auf, welche ökonomischen Konsequenzen wilbedingte Verjüngungsprobleme im Schutzwald haben können. Dazu werden im vorliegenden Beispiel drei Aspekte untersucht und monetär bewertet: 1) Kosten für Wildschadenverhütungsmassnahmen zum Erhalt der Schutzwirksamkeit des Waldes, 2) Verzögerung/Verhinderung der Waldverjüngung und daraus entstehende Konsequenzen (Risikoanstieg, technische Schutzmassnahmen), 3) Kosten für Verjüngungseinleitung und -unterstützung, deren Ziele wilbedingt nicht erreicht werden können.

Die Abschätzung der Risikoreduktion für verschiedene Szenarien des Schutzwaldzustandes ermöglicht es, die Schutzleistung des Waldes zu beziffern und in ein Verhältnis zu den Kosten für waldbauliche Massnahmen zu setzen. Die vorliegende Fallstudie zeigt, dass anhaltend starker Verbissdruck im Schutzwald dazu führt, dass entweder a) erhöhte Risiken durch Naturgefahren in Kauf genommen werden müssen oder b) sehr grosse, bei weitem nicht effiziente Investitionen in Wildschadenverhütung zur Erhaltung der Schutzwirksamkeit getätigt werden müssen oder c) in Schutzbauten investiert werden muss, um die reduzierte Schutzwirksamkeit zu kompensieren. Je nachdem wie stark die klimabedingten Veränderungen ausfallen werden, werden diese Entwicklungen noch verstärkt.

2 Einleitung und Auftrag

Wilbedingte Verjüngungsprobleme können in Schutzwäldern erhebliche finanzielle Konsequenzen haben. Der Kanton Graubünden möchte dies anhand von konkreten Fallbeispielen untersuchen und quantifizieren. Dabei sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen:

- Investitionen in Bau und Unterhalt von Wildschadenverhütungsmassnahmen, um die Schutzwirksamkeit der Wälder mittel- und langfristig möglichst zu erhalten.
- Verzögerung/Verhinderung der Waldverjüngung und daraus entstehende Konsequenzen (Risikoanstieg durch erhöhtes Gefahrenpotential, technische Schutzmassnahmen für den Ersatz der Waldwirkung).
- Folgeinvestitionen in temporäre Schutzbauten, deren Ziele wilbedingt verfehlt werden und ersetzt werden müssen. Dieser Aspekt ist im Schwarzwald Chur nicht von Bedeutung, da keine temporären Schutzbauten vorhanden sind.
- Zu diesen Kosten, die aus volkswirtschaftlicher Sicht direkt anfallen, kommen Kosten für Eingriffe zur Einleitung und Unterstützung der Verjüngung, deren Ziele wilbedingt nicht erreicht werden können. Solche Eingriffe können als wilbedingte Fehlinvestitionen bezeichnet werden.

Diese finanziellen Konsequenzen werden im vorliegenden Bericht für das Gebiet Schwarzwald oberhalb von Chur abgeschätzt und monetär bewertet. Aufwand und Kosten für allfällige Massnahmen im Rahmen des Wildtiermanagements sind nicht Gegenstand des vorliegenden Gutachtens.

Mit Vertrag vom 17.12.2019 wurde das Büro Gadola, Rabiun, Monika Frehner, Sargans, Christine Moos, Universität Lausanne, und Massimiliano Schwarz, HAFL mit der Erarbeitung des vorliegenden Fallbeispiels Schwarzwald Chur beauftragt.

3 Stand des Wissens

Es existieren verschiedene Studien, die sich jeweils mit Teilaspekten der Fragestellung der vorliegenden Studie oder verwandten Themen beschäftigen.

Die Frage nach der Bewertung von Schalenwildeinfluss im Schutzwald ist eng verbunden mit der Frage der Bewertung der Schutzwirkung eines Waldes. Zu dieser Fragestellung gibt es einige Studien, welche die Wirkung von Schutzwäldern mit verschiedenen Ansätzen monetär bewerten. So bewertet z.B. (Salzburger Landesrechnungshof 2015) den Wert eines Schutzwaldes mit dem Ersatzkostenansatz, d.h. es wird berechnet, was es kosten würde, einen Schutzwald mit technischen Schutzmassnahmen zu ersetzen. In

(Olschewski et al. 2011) wird hingegen anhand der Zahlungsbereitschaft von direkten Nutznießern der Wert eines Lawinenschutzwaldes resp. dessen Pflege hergeleitet. In Teich and Bebi (2009) wird der Wert von Schutzwäldern anhand von Risikoabschätzungen für Lawinengefahren beurteilt. Moos et al. (2017) schlagen ein Vorgehen zur Berücksichtigung der Waldwirkung in Steinschlagschutzwäldern vor. Analog wurden für die Gefahr wegen Hangmuren und flachgründigen entlang Bahnstrecke von Schwarz et al. (2019) eine Risiko-basierter Ansatz verwendet. Die darin vorgeschlagene Methode kommt in der vorliegenden Studie zur Anwendung und werden erweitert.

Weiter gibt es einen engen Bezug zur Frage der Entwicklung der Schutzwirksamkeit von Wäldern unter verschiedenen Szenarien. Im Rahmen der Tagung 2014 der GWG (Schweizerische Gebirgswaldpflegegruppe) wurde dieser Thematik im Zusammenhang mit der Wirkung von Totholz nachgegangen und die erwarteten Entwicklungen wurden in einfachen Diagrammen dargestellt (Schwitter 2014).

Studien zur monetären Bewertung von Schalenwildeinfluss gibt es auch aus Frankreich (Boulangier and Rakotoarison 2015) und Baden-Württemberg (Suchant et al. 2011). Darin wird allerdings eine Bewertung bezüglich Holzproduktion und nicht bezüglich Schutzwirksamkeit vorgenommen.

Der vorliegenden Fragestellung am besten entspricht eine Studie an der Rigi Nordlehne, in welcher die Kosten waldbaulicher Massnahmen und Ersatzschutzbauten im Zusammenhang mit Schalenwildschäden abgeschätzt werden (Gasser et al. 2011). Nicht abgeschätzt werden dort der Risikoanstieg auf Grund veränderter Naturgefahren und wilbedingte Fehlinvestitionen. Das dort angewendete Vorgehen wurde im Rahmen von bisher 4 Fallstudien im Kanton Graubünden verfeinert und erweitert.

4 Methode

Die vorliegende Studie wird grundsätzlich nach demselben Vorgehen erarbeitet wie bereits die Studien Puzzag, Runfoppa, Mezzaselva/Putzerberg und Tinizong, alle im Auftrag des AWN GR. Details zum Vorgehen können in diesen Berichten nachgelesen werden.

In Abweichung zu den ersten Studien erfolgte im letzten Fallbeispiel Tinizong die Risikoabschätzung bezüglich Sturzprozessen für die verschiedenen Szenarien sehr viel detaillierter. In der vorliegenden Studie wurde das dort angewendete Vorgehen auf den Prozess Rutschungen erweitert. Die dabei angewendeten Methoden sind in der Beilage 4 (Sturz) und der Beilage 5 (Rutschungen) enthalten.

Ebenfalls in Abweichung zu den vorangehenden Studien wird im vorliegenden Projekt der Betrachtungszeitraum etwas anders verwendet. Eine der Hauptproblematiken der vorangehenden Beispiele war es, dass für den Erhalt der Schutzwirksamkeit des Waldes innerhalb des auf 50 Jahre festgelegten Betrachtungszeitraumes sehr hohe Kosten berechnet wurden, der Nutzen (nämlich die bessere Schutzwirksamkeit) aber ausserhalb des Betrachtungszeitraumes zu liegen kam. Umgekehrt verhält es sich mit den Schutzbauten/Risikoanstieg: dank der «Trägheit» des Schutzsystems Wald werden Veränderungen bezüglich Naturgefahrenrisiken resp. Investitionen in Schutzbauten häufig erst ausserhalb des gewählten Betrachtungszeitraumes von 50 Jahren sichtbar/wirksam resp. notwendig.

Aus diesem Grund wird im vorliegenden Fallbeispiel mit jährlichen Kosten gearbeitet: es wird angegeben, welche jährlichen Kosten in den nächsten 50 Jahren für Anpassung an Klimawandel und Wildschadenverhütungsmassnahmen aufgewendet werden müssen, um jährliche Veränderungen bezüglich Naturgefahrenrisiken resp. jährliche Kosten für Schutzbauten ab ca. 2069 (d.h. in 50 Jahren) zu verhindern. Durch diesen Vergleich können Kosten, die ab heute anfallen, mit Kosten, welche erst nach Ablauf der 50 Jahre anfallen, direkt verglichen werden.

Analog zum Projekt Tinizong wird darauf verzichtet, die Kosten zu diskontieren, und zwar mit der Hauptbegründung, dass es bei Entscheidungen, welche mehrere Generationen betreffen und/oder irreversibel sind, aus ethischen Gründen weder fair noch nachvollziehbar scheint, Kosten und Nutzen, welche künftige (und somit nicht in der Entscheidung beteiligte) Generationen zu tragen haben, weniger stark zu gewichten als heute anfallende Kosten und Nutzen (Oesten 1991; Price n.d.). Eine ausführliche Diskussion von Pro und Contra einer Diskontierung sind im Fallbeispiel Tinizong (2019) enthalten.

5 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet Schwarzwald liegt oberhalb der Stadt Chur (siehe Abb. 1). Die Waldungen erstrecken sich von 600 m ü. M. bis auf knapp 1350 m ü. M. und umfassen gut 67 ha.

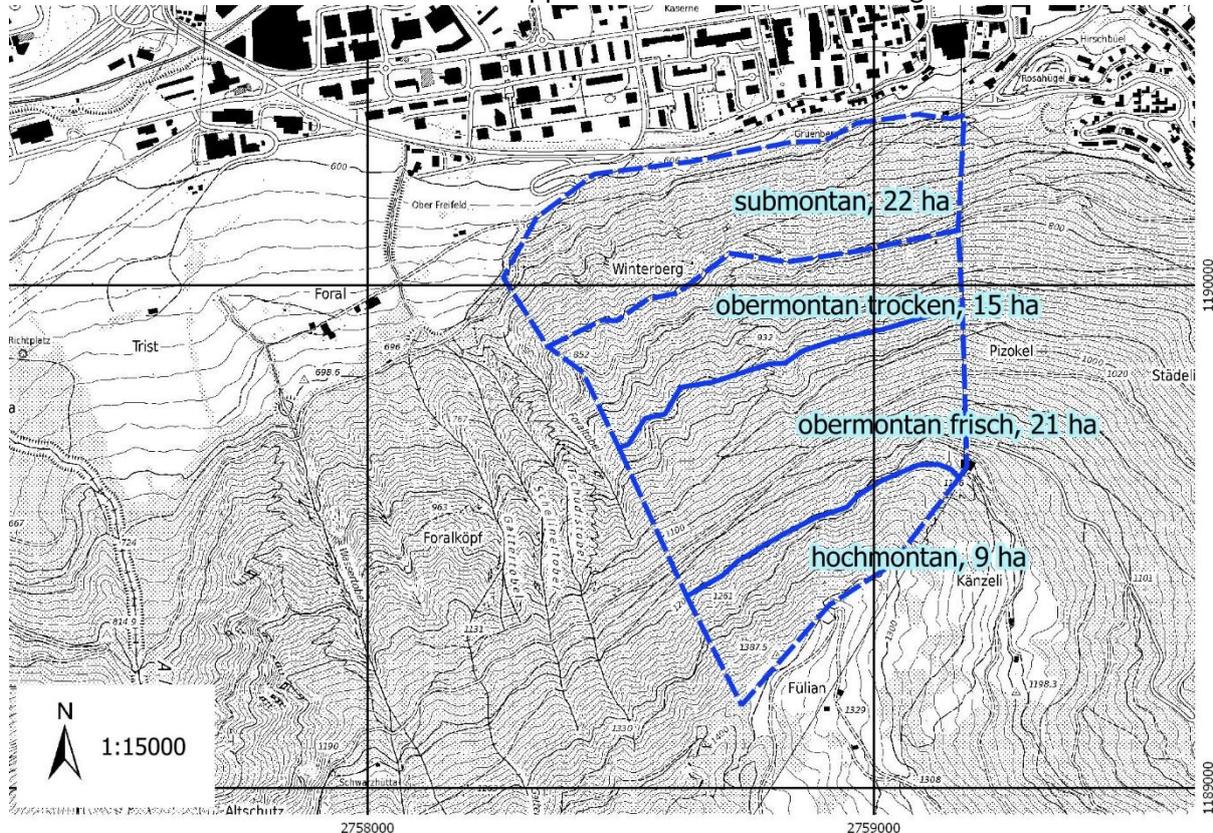


Abb. 1: Untersuchungsgebiet Schwarzwald Chur

5.1 Geschichte

Die Bedeutung der Schutzwälder oberhalb der Stadt Chur ist seit langem bekannt. Luftbilder aus den 1940er- und 1950er zeigen, dass grosse Abschnitte um die Jahrhundertwende unbewaldet gewesen sein müssen. Jahrringauszählungen an im Jahr 2020 gefällten Bäumen in den 1946 mit geringen Baumhöhen bestockten Bereichen ergaben Baumalter von 80-100 Jahren. In den übrigen Bereichen, ausser in den Schlagflächen, welche seit 1980 geschaffen wurden, sind die Bäume deutlich älter. In den späten 1980er-Jahren wurde, damals noch im Rahmen von Lauber-Projekten, mit der systematischen waldbaulichen Behandlung begonnen. Auf den Abb. 2 bis 4 ist das Untersuchungsgebiet zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.



Abb. 2: Luftbilddaufnahmen 1942 (Quelle: swisstopo)



Abb. 3: Luftbild von 1991 (Quelle: swisstopo). Rot: Seillinien aus den 1980er-Jahren



Abb. 4: Luftbild von 2019 (Quelle: swisstopo). Roter Pfeil: Eingriffsflächen 2018

5.2 Waldstandorte und heutiger Zustand

Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über drei Höhenstufen:

Submontan: Der unterste Bereich bis ca. 800 m ü. M. liegt in der submontanen Höhenstufe. Hier stocken hauptsächlich eher trockene Buchenwälder (v.a. 10a Lungenkraut/Platterbsen-Buchenwald). Wie bereits der Name sagt dominiert die Buche, diverse Laubbaumarten sowie die Waldföhre, Tanne und Fichte sind beigemischt. In diesem Bereich stockt vorwiegend mittleres Baumholz.

Der Trockensommer 2018 hat in diesem Bereich sehr deutliche Spuren hinterlassen. So sind zahlreiche Weisstannen, Buchen und Waldföhren ganz oder teilweise abgestorben (Abb. 5 unten).

In diesem Bereich ist zudem ein starker Befall der Weisstanne durch Misteln festzustellen, was Trockenstress unter Umständen noch verstärkt.

Insbesondere entlang der Wege, wo aufgrund der Nähe zur Stadt sehr viel Störung vorhanden ist, ist auf Flächen mit genügend Licht reichlich Verjüngung von verschiedenen Baumarten und in verschiedenen Höhenklassen vorhanden (beobachtet: Linde, Nussbaum, Kirsche, Esche, Eibe, Waldföhre). Die verbissemphindlichen Baumarten (Kirsche, Eibe) weisen teilweise deutliche Verbisspuren auf.

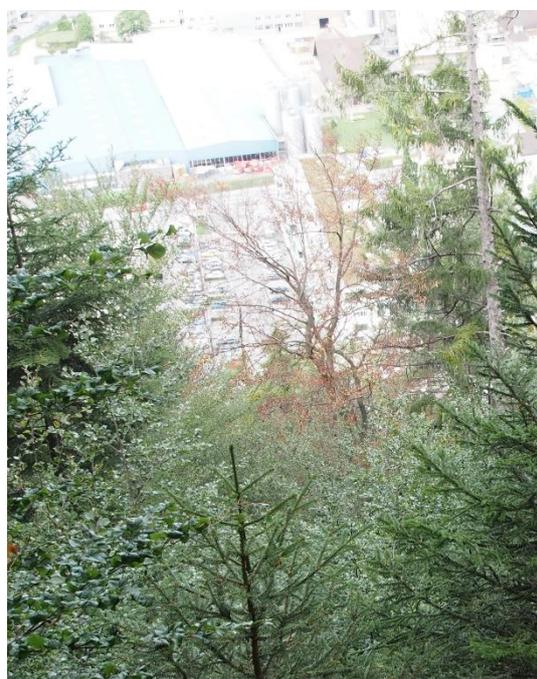


Abb. 5: oben: Drohnenaufnahme vom September 2019. Unten: dürre Weisstanne (links) und dürre Buche im Hintergrund (rechts). Foto: N. Zürcher, 2019.

Obermontan: Oberhalb von 800 bis ca. 1200 m ü. M. befinden wir uns in der obermontanen Stufe, wobei diese aufgrund der Vegetation in einen trockeneren (bis ca. 950 m ü. M.) und einen feuchteren Bereich (oberhalb 950 m ü. M. bis ca. 1200 m ü. M.) unterteilt wird. Im trockeneren Bereich stocken hauptsächlich Karbonat-Tannen-Buchenwälder mit Weisssegge (18*), im feuchteren oberen Bereich sind Typische Karbonat-Tannen-Buchenwälder zu finden (18M). Die Bestände bestehen ebenfalls vorwiegend aus mittlerem bis starkem Baumholz, weisen aber diverse Flächen auf, welche mit Jungwuchs bis schwachem Baumholz bestockt sind.

Bezüglich Verjüngung kann festgestellt werden, dass ungefähr bis auf die Höhe der Waldstrasse auf ca. 1'100 m ü. M. die Verjüngung der Buche gut funktioniert, diejenige sämtlicher übrigen Baumarten aufgrund des Verbisseinflusses stark verzögert resp. weitgehend unmöglich ist. Dies wird bestätigt durch mehrere Zaunflächen verschiedenen Alters. Die Fichtenverjüngung ist standortsbedingt eher schwierig, was die Fichte ebenfalls für Verbiss anfällig macht.

Hochmontan: Der oberste Bereich des Untersuchungsgebietes (> 1200 m ü. M.) ist der hochmontanen Stufe zuzuordnen und ist auf trockeneren Rippen mit Karbonat-Tannen-Fichtenwälder mit Weisssegge (52) und in

feuchteren Mulden und Hanglagen mit Karbonat-Tannen-Fichtenwälder mit Kahlem Alpendost (50*) bestockt.

In den verbreitet vorhandenen verjüngungsgünstigen Flächen ist viel Ansamung (v.a. Ta, B'Ah) vorhanden. Die Verjüngung der Fichte ist standortsbedingt eher schwierig. Anwuchs ist von allen Baumarten kaum zu finden. In den Öffnungen, welche seit den 1980er-Jahren geschaffen wurden, wurden gemäss T. Jäger (Revierförster) konsequent Fichtengruppen gepflanzt und während ca. 10 Jahren chemisch oder mittels Wildschutzzäunen geschützt. Dank diesen Massnahmen sind entsprechend in den Lücken stellenweise junge Fichten zu finden. In den ehemaligen oder noch bestehenden Zaunflächen konnten sich auch zahlreiche junge Weisstannen sowie verschiedene Laubbaumarten etablieren (Abb. 6 und Abb. 7). Abgesehen von diesen gepflanzten und/oder geschützten Bäumen sind kaum entwicklungsfähige Verjüngungsansätze im Lückenalter zu finden.



Abb. 6: Chemisch geschützte Fichtengruppen. Foto: N.Zürcher 2019



Abb. 7: Kleinzaun mit Fichten- und Tannenverjüngung (links) und in Zaun aufgewachsene Fichten-/Tannengruppe (ca. 20-25-jährig, rechts). Foto: N. Zürcher, 2019)

5.3 Verwendete Szenarien und Definition Wildeinflusstufen

Die Beurteilung erfolgt für die Szenarien in Tab. 1.

Dabei wird folgende Definition der Wildeinflusstufen verwendet:

- Verbiss tragbar: Naturverjüngung kann sich normal entwickeln, gepflanzte Nebenbaumarten können sich mit chemischem Schutz erwartungsgemäss entwickeln
- Verbiss kritisch: Naturverjüngung verbissunempfindlicher Hauptbaumarten entwickelt sich leicht verzögert, Naturverjüngung von verbissempfindlichen Baumarten fällt aus, gepflanzte/chemisch geschützte Baumarten fallen aus (Einteilung verbissempfindlich/verbissunempfindlich gemäss (Fehr et al. 2019)
- Verbiss untragbar: die Verjüngung sämtlicher Baumarten fällt weitgehend aus

Um Kosten für waldbauliche Massnahmen oder auch Veränderungen der Risiken durch Naturgefahrenprozesse bewerten zu können ist es wertvoll zu wissen, wieviel Risiko ein Waldkomplex im Vergleich zum unbewaldeten Zustand verhindert. Um eine solche Einschätzung vornehmen zu können wurde bei der Berechnung der Sturz- und Rutschungsrisiken zusätzlich ein Szenario «Ohne Wald» berechnet.

Aus Sicht des Autorenteam ist dieses Szenario allerdings nicht ein zu erwartendes Szenario in den nächsten Jahrzehnten, da realistischerweise

- a) an dieser Stelle mit grosser Wahrscheinlichkeit keine Siedlung wäre, wenn der Bereich oberhalb Chur nicht bewaldet resp. waldfähig wäre und
- b) ein Szenario ganz ohne Wald / Stöcke / liegendes Holz / Geländeunebenheiten in menschlich überblickbaren Zeiträumen auch unter Berücksichtigung sehr extremer Klima-/Wild- und anderer Störungsszenarien sehr unwahrscheinlich ist.
- c) Der Wald auch ohne jegliche menschliche Ansprüche existiert, und deshalb nicht Szenarien «Wald ja – nein» sondern verschiedene Waldzustände miteinander verglichen werden sollten.

Im Gebiet Schwarzwald sind zudem bereits heute starke Auswirkungen des Klimawandels sichtbar (trockenheitsbedingte Ausfälle im untersten Bereich). Je nach Klimaszenarien können diese Auswirkungen in den oberen Bereichen stärker oder weniger stark ausfallen. Um dies abzubilden, wurde zusätzlich zu den früheren Fallstudien ein Szenario 4 «starker Klimawandel» berücksichtigt. Dies entspricht gleichzeitig einem extremen Szenario bezüglich Vorratsrückgang. Dieser Vorratsrückgang könnte grundsätzlich auch aufgrund eines Extremereignisses erfolgen und entspricht dem Szenario «Extrem» im Fallbeispiel Tinizong.

Was die Szenariendefinition konkret für den Schwarzwald bedeutet, ist im folgenden Kapitel resp. in den Beilagen 1, 2 und 3 beschrieben.

Tab. 1: Szenariendefinition

Szenario	Verbiss	Klimawandel	Waldbauliche Massnahmen
SZ 1:	Tragbar	Mässiger Klimawandel	Anpassung an Klimawandel mit Pflanzung geeigneter Baumarten
SZ 2a:	Kritisch		Anpassung an Klimawandel mit Pflanzung geeigneter Baumarten
SZ 2b:			Anpassung an Klimawandel mit Pflanzung geeigneter Baumarten Wildschadenverhütungsmassnahmen zur Erreichung der Verjüngungsziele trotz Wildeinfluss
SZ 3a:			Untragbar
SZ 3b:	Anpassung an Klimawandel mit Pflanzung geeigneter Baumarten Wildschadenverhütungsmassnahmen zur Erreichung der Verjüngungsziele trotz Wildeinfluss		
SZ 4a:			Starker Klimawandel
SZ 4b:		Anpassung an Klimawandel mit Pflanzung geeigneter Baumarten Wildschadenverhütungsmassnahmen zur Erreichung der Verjüngungsziele trotz Wildeinfluss	

5.4 Beschreibung der Szenarien

Die Tab. 2 enthält eine Zusammenfassung der Annahmen bezüglich Entwicklung des Altbestandes, des Folgebestandes und des Risikos durch Sturz- und Rutschungsprozesse für die verschiedenen Szenarien. Die Begründungen dafür sind in der Beilage 1 enthalten.

Die Beschreibungen und Details zu den Massnahmen (minimale/intensive waldbauliche Behandlung sowie die Wildschadenverhütungsmassnahmen), welche auch den Kostenberechnungen zu Grunde liegen, sind in Kap. 7 enthalten.

Details zur Umsetzung der Annahmen bezüglich Waldentwicklung im Waldmodell als Eingangsparameter für die Sturz- und Rutschungsmodellierungen sind in der Beilage 4 resp. 5 enthalten.

Die Beschreibung der zu erwartenden Veränderungen bezüglich Sturzrisiken sind in Kap. 8 enthalten.

Die Beschreibung der Massnahmen zur Kompensation der reduzierten Schutzwirksamkeit bezüglich Sturzgefährdung inkl. Kostenschätzungen sind in Kap. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** enthalten.

Aufgrund der Beurteilung im Wald wird davon ausgegangen, dass für das Untersuchungsgebiet bezüglich Wildeinfluss im oberen Bereich heute Szenario 3, bezüglich Massnahmen auf Teilflächen (d.h. in Flächen, wo intensiv Wildschadenverhütung betrieben wurde) Szenario 3b, auf dem Rest der Flächen Szenario 3a zutrifft. Im unteren Bereich trifft Szenario 2a resp. auf Teilflächen 2b zu.

Szenario	Ver-biss	Klima-wandel	Entwicklung Altbestand	Massnahmen	Verjüngung	Wildbedingte Kosten	
SZ 1:	Tragbar	Mässiger Klimawandel	Zuwachs: 5-7m ³ /ha (in Abhängigkeit der Höhenstufe) Abgänge: in % des Ausgangsbestandes von 2019 bis 2118 gemäss Waldmodell (Beilage 3)	Anpassung an Klimawandel: Pflanzung und chemischer Schutz	Verjüngung funktioniert		
SZ 2a:	Kritisch				Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich	Ausfall der verbissempfindlichen Haupt- und Nebenbaumarten	Differenz Risiko SZ 1 und SZ 2a
SZ 2b:					Anpassung an Klimawandel: Pflanzung, Einzelschütze, zusätzlich chemischer Schutz Naturverjüngung	Verjüngungsunterstützung/Verbisschutz für verbissempfindliche Haupt- und Nebenbaumarten	Chemischer Verbisschutz Naturverjüngung Differenz Einzelschütze – chemischer Verbisschutz für Pflanzungen
SZ 3a:					Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich	Ausfall der verbissempfindlichen Haupt- und Nebenbaumarten und der verbissunempfindlichen Haupt- und Nebenbaumarten, starke Verzögerung der verbissunempfindlichen Hauptbaumarten.	Differenz Risiko heute und SZ 3a Stärkere Steinschlagverbauungen
SZ 3b:					Anpassung an Klimawandel: Pflanzung und Kleinzäune, zusätzlich chemischer Schutz Naturverjüngung	Verjüngungsunterstützung/Verbisschutz für verbissempfindliche Haupt- und Nebenbaumarten	Chemischer Verbisschutz für Naturverjüngung Pflanzung Hauptbaumarten Kleinzäune minus chemischer Verbisschutz für Pflanzungen
SZ 4a:					Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich	Ausfall der der verbissempfindlichen Haupt- und Nebenbaumarten und der verbissunempfindlichen Haupt- und Nebenbaumarten, starke Verzögerung der verbissunempfindlichen Hauptbaumarten.	Differenz Risiko heute und SZ 4a Stärkere Steinschlagverbauungen
SZ 4b:	untragbar	Starker Klimawandel	Zuwachs: 5-7m ³ /ha (in Abhängigkeit der Höhenstufe) Abgänge: bis 70% des Ausgangsbestandes von 2019 bis 2118	Anpassung an Klimawandel: Pflanzung und Kleinzäune, zusätzlich chemischer Schutz Naturverjüngung	Verjüngungsunterstützung/Verbisschutz für verbissempfindliche Haupt- und Nebenbaumarten	Chemischer Verbisschutz für Naturverjüngung Pflanzung Hauptbaumarten Kleinzäune Minus chemischer Verbisschutz für Pflanzungen	

Tab. 2: Zusammenfassung/Überblick Entwicklungsszenarien für den Schwarzwald. Spalten Risiko Sturz/Rutschungen enthalten qualitative Abschätzungen der Risiken, welche in Kap. 8 konkretisiert werden.

6 Entwicklung Altbestand

Aufgrund der aktuell beobachtete Entwicklung des Altbestandes gehen wir davon aus, dass grundsätzlich in den nächsten 50 Jahre keine Eingriffe notwendig sind, um genügend verjüngungsgünstige Flächen bereitzustellen. Dies aus folgenden Gründen:

- In der hochmontanen Stufe bestehen aktuell viele und z.T. grosse Öffnungen, in welchen Verjüngung problemlos möglich sein sollte. Weitere Eingriffe in den nächsten ca. 30 Jahren würden die Schutzwirksamkeit stark reduzieren und sind nicht zu empfehlen, bevor nicht die bereits bestehenden Lücken wieder mit genügend mindestens zukunftsfähiger Verjüngung bestockt sind.
- Ab der obermontanen bis hinauf in die hochmontane Stufe ist aufgrund des teilweise sehr hohen Fichtenanteils sowohl bei mässigem wie vor allem auch starkem Klimawandel mit erheblichen Ausfällen durch Borkenkäfer zu rechnen. Dies bedeutet, dass in diesem Bereich durch Zwangsnutzen genügend weitere verjüngungsgünstige Flächen entstehen werden.
- In der submontanen Stufe sind bereits heute, nach dem Trockensommer 2018, zahlreiche Ausfälle zu verzeichnen. Zumindest auf den eher trockeneren Kuppen ist in den nächsten Jahren und Jahrzehnten mit weiteren umfangreichen klimawandelbedingten Ausfällen im Altbestand zu rechnen. Aus diesem Grund wird auch hier angenommen, dass auch ohne Eingriffe genügend verjüngungsgünstige Flächen entstehen werden.

Da diese zu erwartenden Zwangsnutzungen und die damit verbundenen Kosten unabhängig von den Szenarien «minimale waldbauliche Behandlung (a-Szenarien) und «intensive waldbauliche Massnahmen» (b-Szenarien) anfallen, wurden diese Kosten im vorliegenden Fallbeispiel nicht berechnet.

7 Pflanzungen/Wildschadenverhütungsmassnahmen

Eine Übersicht über die berücksichtigten Massnahmen pro Szenario und Höhenstufe ist in der Beilage 3 enthalten.

7.1 Methode und Annahmen

Definition

Abgeschätzt werden die zu erwartenden Kosten, falls die auf Grund des Schalenwildeinflusses ausfallende Verjüngung durch Pflanzungen resp. mit Wildschadenverhütungsmassnahmen sichergestellt werden soll.

Abschätzung der nötigen Verjüngung

Für die Abschätzung der nötigen Verjüngung wird davon ausgegangen, dass

- a. Junge Bäume 30-40 Jahre benötigen, um die Kluppschwelle (BHD > 8cm) zu erreichen.
- b. In den Altbeständen mit kleinen Verjüngungslückengrössen ca. 100 Bäume pro Hektar im Stangenholzalder ein realistischer Zielwert sind, in grösseren Lücken hingegen ca. 300 Bäume im Stangenholzalder vorhanden sein müssen, um eine nachhaltig schutzwirksame Bestockung zu erreichen.
- c. Die Stammzahlabnahme von Jungbäumen (Pflanzungen und Naturverjüngung) bis ins Stangenholz 75% beträgt (gemäss Bachofen 2009 in Plenterwäldern deutlich höher). Somit wird die Anzahl benötigter Jungbäume und damit die Kosten für Wildschadenverhütungsmassnahmen eher unterschätzt.
- d. Für die Kostenschätzungen wird stark vereinfachend davon ausgegangen, dass die Verjüngung nicht kontinuierlich und regelmässig, sondern geklumpt und in Schüben stattfindet. D.h. es wird nicht mit einer jährlichen, regelmässigen Verjüngung gerechnet, sondern mit Verjüngungszyklen im Abstand von 30-40 Jahren.

Baumartenmischung in der Verjüngung:

Auf Grund der in (Frehner et al. 2019) modellierten klimabedingten Veränderung der Höhenstufen muss im Schwarzwald von teilweise deutlichen Verschiebungen in der Baumartenzusammensetzung ausgegangen werden. Je nach Modell (zwei Szenarien) wird prognostiziert, dass bis 950 m ü. M. (je nach Modell sogar bis



1200 m ü. M.) die colline Stufe vorherrschen wird (d.h. buchenfreie Laubmischwälder). Oberhalb von 1200 m ü. M. wird unabhängig vom Modell die untermontane Stufe (d.h. Buchen-Mischwälder) erwartet. Aufgrund dieser Annahmen wird gemäss (Frehner et al. 2019) die Baumartenzusammensetzung in der Verjüngung gemäss Tab. 3 hergeleitet. Diese Baumartenzusammensetzung gilt für die Verjüngung, welche sich ab heute in den nächsten 30-40 Jahren etablieren wird (siehe auch Angaben zum Klimawandel in Beilage 1 und die Details zum Waldmodell in Beilage 2).

Ab dem oberen Bereich der obermontanen Stufe muss grundsätzlich mit Schneerutschen und Kleinlawinen gerechnet werden. Aus diesem Grund sowie zur Heranziehung stabiler laubholzdominierter Bestände ist ein gewisser Anteil an immergrünen Nadelbäumen auch in Zukunft sehr wünschenswert. Da angesichts des Klimawandels die Prognosen auf den im Untersuchungsgebiet vorhandenen Standorten grundsätzlich für die Tanne besser ist als für die Fichte (Buchdrucker), wird es für den oberen Bereich auch für die Zukunft als erstrebenswert beurteilt, einen gewissen Tannenanteil in der Verjüngung heranzuziehen. Dies wird bei der Herleitung der passiven Wildschadenverhütungsmassnahmen entsprechend berücksichtigt.

Für die Pflanzungen zur Anpassung an den Klimawandel wird davon ausgegangen, dass diese auch bei sehr geringem Verbissdruck stark verbissanfällig sind und deshalb chemisch geschützt werden müssen. Diese Aufwände werden nicht als wildbedingte Kosten bezeichnet.

Da die Pflanzungen zur Anpassung an den Klimawandel unter den Szenarien 2a und 3a trotz chemischem Verbisschutz mit grosser Wahrscheinlichkeit verbissbedingt ausfallen, ist eine Anpassung an den Klimawandel unter diesen Wildeinflussszenarien nicht möglich und die entsprechenden Kosten entfallen für diese Szenarien.

Tab. 3: Baumartenzusammensetzung der Naturverjüngung pro Höhenstufe (heute) in der Verjüngung (Herleitung gemäss (Frehner et al. 2019)) inkl. Verbissemphindlichkeit (gemäss (Fehr et al. 2019))

Submontan (< 800 m ü. M.)		Obermontan trocken (800 – 950 m ü. M.)		Obermontan frisch (950-1200 m ü. M.)		Hochmontan frisch (> 1200 m ü. M.)	
Naturverjüngung							
Linde	<i>Unempf.</i>	Buche	<i>Unempf.</i>	Buche	<i>Unempf.</i>	Fichte	<i>Unempf.</i>
Kirsche	<i>Empf.</i>	Weisstanne	<i>Empf.</i>	Weisstanne	<i>Empf.</i>	Weisstanne	<i>Empf.</i>
Waldföhre	<i>Unempf.</i>	Bergahorn	<i>Empf.</i>	Bergahorn	<i>Empf.</i>	Lärche	<i>Unempf.</i>
Eibe	<i>Empf.</i>					Bergahorn	<i>Empf.</i>
Nussbaum	<i>Unempf.</i>						
Pflanzungen zur Anpassung an den Klimawandel							
Traubeneiche	<i>Empf.</i>	Linde	<i>Unempf.</i>				
Spitzahorn	<i>Empf.</i>						
Feldahorn	<i>Empf.</i>						

Pflanzungen:

Pro zu pflanzenden Baum wird gemäss (AWN 2016) mit CHF 13.-/Stk gerechnet (Ansatz Topfpflanzen, inkl. Arbeit und Materialkosten).

Chemischer Verbisschutz:

Für den Verbisschutz mit chemischen Mitteln wird bei Pflanzungen von einer Erfolgsrate von 80% ausgegangen, d.h. es wird mit einem Zuschlag von 20% auf die oben hergeleitete notwendige Verjüngungsstammzahl gerechnet. Für Naturverjüngung wird von einer Erfolgsrate von 70% ausgegangen, da es sehr viel schwieriger ist, die Pflanzen über Jahre wieder aufzufinden. D.h. es wird für den Schutz von Naturverjüngung im SZ 2b von 40% zusätzlich zur Sollstammzahl zu schützenden Pflanzen ausgegangen. Da der Verbiss gemäss T. Jäger vorwiegend durch Gamswild erfolgt und weniger durch Rotwild wird weiter davon ausgegangen, dass es 10 Jahre dauert, bis die Pflanzen aus dem Äser sind (d.h. die Wuchshöhe

überschritten haben, bis zu welcher die Endknospe durch das Gamswild erreicht wird). Um der Stammzahlabnahme während dieser Periode Rechnung zu tragen, wird der chemische Verbisschutz nur für 87.5 % der zu schützenden Pflanzen eingerechnet.

Pro zu schützender Pflanze wird gemäss (AWN 2020) ein Kostenansatz von CHF -.50/Stk./Jahr eingesetzt.

Kleinzäune:

In den vergangenen Jahren haben sich im Gebiet Schwarzwald Kleinzäune mit einer Fläche von max. 20 x 20 m resp. einer Zaunlänge von ca. 80 m (in Hanglage) am ehesten bewährt. Auf Grund der topografischen Verhältnisse, der hohen Steinschlagaktivität und der Schneeverhältnisse muss von einer massiven Bauweise ausgegangen werden. Die Kosten hierfür belaufen sich erfahrungsgemäss auf CHF 100.- bis 150.-/m'. Für die Kostenschätzungen wird vom unteren Bereich, d.h. 100.-/m' resp. 8'000.- pro Kleinzäun ausgegangen. Aufgrund der Erfahrungen in anderen Gebieten wird mit 2% der Investitionskosten an jährlichen Unterhaltskosten inkl. Kontrollgänge und gemäss Awn 2016a mit einer Lebensdauer von 20 Jahren gerechnet. Es wird gerechnet, dass pro Kleinzäun 100 Pflanzen eingebracht werden.

Vereinfachend wird davon ausgegangen, dass mit Kleinzäunen und intensiver Kontrolle/Unterhalt die Verjüngung genügend effektiv geschützt werden kann, so dass die Verjüngung unverzögert aufkommen kann. Dabei ist nicht berücksichtigt, dass das Gelände nicht überall einen Zaunbau ermöglicht. Somit wird die Wirkung der Zäune überschätzt.

Grossflächiger Wildschutzaun

Wie bereits im Fallbeispiel Tinizong aufgeführt ist die Erstellung/Unterhalt eines Grosszaunes mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden (Lebensraumverlust, Dichthalten, Akzeptanz, etc.). Im Gebiet Schwarzwald wäre die Betreibung eines oder mehrerer Grosszäune aufgrund der starken Erholungsnutzung (viele Wanderwege, Biketrails, etc.) noch deutlich schwieriger. Somit wird diese Variante nicht weiterverfolgt. Die Kosten für zwei Grosszäune über 20 Jahre würden bei ca. CHF 1.2 Mio liegen.

7.2 Resultate

Die zu erwartenden Kosten pro Szenario sind in der Tab. 4 enthalten. Darin ist mit einem roten Rahmen bezeichnet, welches Szenario pro Höhenstufe die aktuelle Situation gemäss unserer Beurteilung im Feld am besten widerspiegelt.

Für die Anpassung an den Klimawandel ist in den nächsten 50 Jahren unabhängig vom Szenario bezüglich Wildverbiss mit jährlichen Kosten von gut CHF 370.- zu rechnen. Diese setzen sich zusammen aus den Kosten für Pflanzungen und chemischem Verbisschutz zur Einbringung zukunftsfähiger Samenbäume. Zudem fallen noch die hier nicht aufgeführten Kosten für die Zwangsnutzungen an.

Bei den Szenarien 2a und 3a ist wildbedingt mit einer geringeren Resilienz des Waldes im Bereich submontan und obermontan trocken zu rechnen, da die Pflanzungen zur Anpassung an den Klimawandel nicht ausgeführt werden können.

In den Szenarien 2b und 3b ist mit zusätzlichen jährlichen Kosten von gut CHF 24'000.- resp. gut 34'000.- zur Sicherstellung der Verjüngung mit Wildschadenverhütungsmassnahmen zu rechnen. Für die aktuelle Situation muss mit jährlichen Kosten im Bereich von gut CHF 16'000.- pro Jahr (rote Kästen in Tab. 4) gerechnet werden für die Erhaltung einer mengenmässig genügenden, standortgerechten Verjüngung und damit der langfristigen Gewährleistung der Stabilität und Resilienz des Schutzwaldes.

Tab. 4: Pflanzungen und Wildschadenverhütungsmassnahmen: Annahmen und Kostenschätzungen. Beträge in CHF. Rote Umrandung: aktueller Zustand pro Höhenstufe. Submontan wurden Massnahmen über 40 Jahre als notwendig erachtet und entsprechend einberechnet, für die übrigen Höhenstufen über 50 Jahre. Dies ergibt die Abweichung in den Totals pro Höhenstufe und dem Total über alle Höhenstufen.

	SZ1	SZ2a	SZ2b	SZ3a	SZ3b	SZ4a	SZ4b
Jährliche Kosten Anpassung an Klimawandel und Wildschadenverhütungsmassnahmen	372		22'156		32'746		34'445
davon wildbedingt			21'882		32'472		34'055
submontan	336		10'661		8'734		8'734
Anpassung Klimawandel: Pflanzungen	252		210		210		210
chemischer Schutz Pflanzungen Klimawandel	85						0
Einzelstütze Anpassung Klimawandel (Investition und Unterhalt)			9'030				
Chemischer Schutz verbisempfindliche Naturverjüngung			1'422				
Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung							
Einzelstütze für Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung							
Pflanzungen in Lücken und Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung					699		699
Kleinzäune für sämtliche Pflanzungen					7'826		7'826
obermontan trocken	103		3'761		7'367		7'991
Anpassung Klimawandel: Pflanzungen	77		64		64		68
chemischer Schutz Pflanzungen Klimawandel	26						
Einzelstütze Anpassung Klimawandel (Investition und Unterhalt)			2'763				
Chemischer Schutz verbisempfindliche Naturverjüngung			132				
Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			18				
Einzelstütze für Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			784				
Pflanzungen in Lücken und Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung					702		763
Kleinzäune für sämtliche Pflanzungen (Investition und Unterhalt)					6'601		7'160
obermontan frisch			6'154		12'375		13'450
Anpassung Klimawandel: Pflanzungen							112
chemischer Schutz Pflanzungen Klimawandel							
Einzelstütze Anpassung Klimawandel (Investition und Unterhalt)							
Chemischer Schutz verbisempfindliche Naturverjüngung			1'455				
Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			107				
Einzelstütze für Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			1'312				
Pflanzungen in Lücken und Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung					1'287		1'287
Kleinzäune für sämtliche Pflanzungen					11'088		12'051
hochmontan			3'712		6'017		6'017
Anpassung Klimawandel: Pflanzungen							
chemischer Schutz Pflanzungen Klimawandel							
Einzelstütze Anpassung Klimawandel (Investition und Unterhalt)							
Chemischer Schutz verbisempfindliche Naturverjüngung			767				
Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			67				
Einzelstütze für Pflanzungen in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung			2'878				
Pflanzungen in Lücken und Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung					626		626
Kleinzäune für sämtliche Pflanzungen					5'391		5'391
Gesamtkosten Anpassung an Klimawandel und Wildschadenverhütungsmassnahmen über 50 Jahre	18'591		1'107'800		1'637'292		1'722'250
davon wildbedingt			1'094'112		1'623'604		1'702'760

8 Schutzbauten

8.1 Lawinenverbauungen

8.1.1 Methode und Annahmen

Das Untersuchungsgebiet Schwarzwald liegt grösstenteils in einer Höhenlage, in welcher grundsätzlich mit Schneeprozessen gerechnet werden muss. Insbesondere bei Nassschneefällen muss mit der Entstehung von Schneerutschen und Kleinlawinen v.a. im Bereich der mehr oder weniger stark ausgeprägten Rinnen gerechnet werden. In den stark von der Buche dominierten Beständen unterhalb von 1100m bildet zudem das Buchenlaub eine ideale Gleitschicht, wodurch die Gleitprozesse zusätzlich verstärkt werden. Diese sind ein Faktor, welche die Verjüngung stark beeinträchtigt und stellenweise sogar verhindern kann. Dieser Problematik kann mit Gleitschneeverbau entgegengewirkt werden.

Zudem muss aufgrund der bereits heute bestehenden Lückengrössen im obersten Bereich bei nur geringfügigen weiteren Ausfällen im Altbestand mit der Entstehung von Anrisszonen für kleine bis mittlere Lawinen gerechnet werden. Solche Lawinen können in seltenen Fällen bis zum Schadenpotential reichen (Abb. 9). Dadurch ist allerdings nicht in erster Linie ein starker Anstieg der Risiken zu erwarten, sondern diese Prozesse führen zu Schäden am Schutzwald und in der Folge zu vergrösserten Anrissgebieten. Früher oder später ist auch ein Anstieg der Risiken zu erwarten, diese wurde in der vorliegenden Studie aber nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass analog zu anderen Beispielen im Kanton Graubünden Lawinenverbauungen zum Schutz/Erhalt des Schutzwaldes umgesetzt werden, falls dies als notwendig erachtet werden sollte.

Gemäss Beurteilung im Feld und Luftbild-/Geländeanalysen werden somit folgende Annahmen getroffen bezüglich in Zukunft notwendiger Lawinenverbauungen und Gleitschneeverbau:

- Es wird damit gerechnet, dass in den Szenarien 3a und 4a in zwei Flächen bereits heute existierende Lücken wildbedingt nicht einwachsen und sich vergrössern.
- In diesen Lücken ist aufgrund der grossen Hangneigung bei Starkschneefällen mit der Entstehung von Schneebewegungen und kleineren Lawine zu rechnen. Diese können aufgrund der zu erwartenden Intensitäten (vgl. Abb. 9) erhebliche Schäden an der Bestockung in der Sturzbahn verursachen.
- Dadurch werden Lawinenverbauungen notwendig, um die Schutzwirksamkeit der Bestockung zu erhalten und Schäden am Schutzwald zu verhindern. Die entsprechenden Verbauungsflächen sind in der Abb. 8 enthalten.
- Da in absehbarer Zeit aufgrund des Wildverbisses nicht damit gerechnet werden kann, dass die Wirkung von Verbauungen wieder durch eine Bestockung übernommen werden kann und die Wirkung von liegendem Holz, hohen Stöcken etc. lange vor Ende der Lebensdauer der Verbauungen gegen Null gehen wird, wird ein Vollverbau mit permanenten Lawinenverbauungen vorgesehen.
- In zwei weiteren Flächen wird davon ausgegangen, dass in Zukunft Gleitschneeschutz notwendig ist, damit Verjüngung aufkommen kann. Dieser wird in Form von Dreibeinböcken ausgeführt.

Herleitung notwendige Lawinerverbauungen	Anzahl	Laufmeter
durchschnittliche Hangneigung		38
durchschnittlicher Reihenabstand <i>Annahme: Dk 3m, tan φ = 0.55</i>	m'	20
Anzahl Reihen à 100m pro Hektar:		5.0
Laufmeter pro Hektare für Vollverbau	m'	500
Fläche A	ha	0.51
Fläche B	ha	0.82
Notwendige Verbaulänge	m'	665

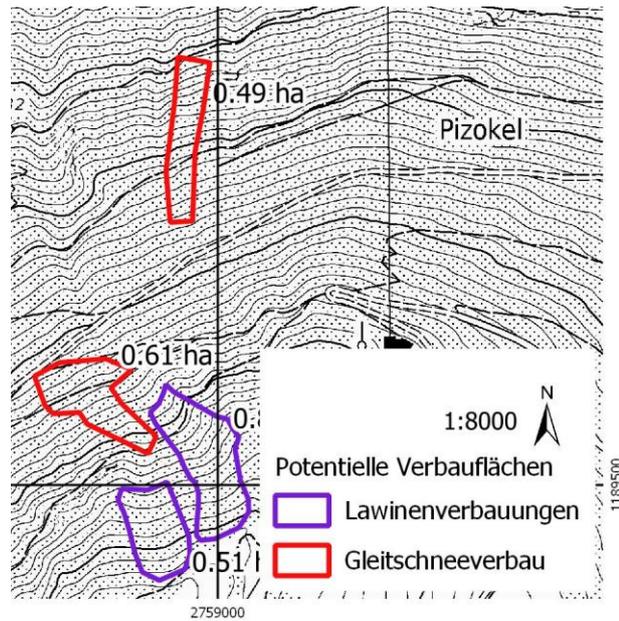


Abb. 8: Herleitung der notwendigen Anzahl Laufmeter Lawinerverbauungen für die Szenarien 3a und 4a (links, in Anlehnung an (Margreth 2007)), Ausscheidung der potentiellen Verbaulflächen (rechts).

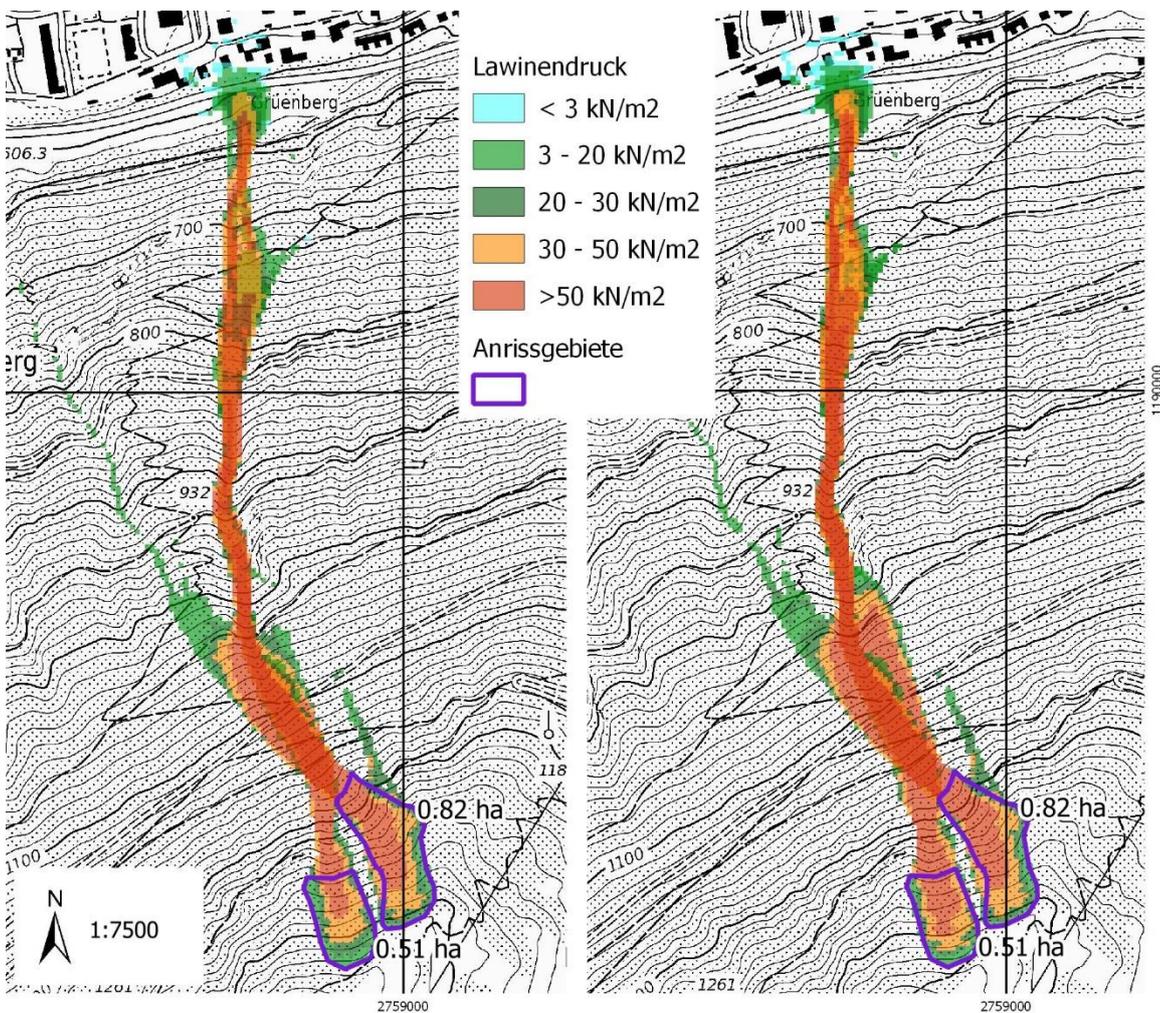


Abb. 9: Lawinensimulationen aus den beiden potentiellen Anrissgebieten für 30-jährliche (links) und 300-jährliche (rechts) Lawinen (Reibungsparameter tiny). Die Waldwirkung wurde nicht berücksichtigt. Das bedeutet, dass bei kleineren Ereignissen mit Reichweiten und entsprechend Schäden am Bestand bis auf ca. 1050 m ü. M. gerechnet werden muss. Bei deutlich abnehmender Bestockung in der Rinne muss langfristig mit Niedergängen bis zur Kantonsstrasse gerechnet werden.

8.1.2 Resultate

Für eine permanente Verbauung in den oben ausgeschiedenen Flächen muss mit jährlichen Kosten von gut CHF 37'000.- resp. Gesamtkosten (über die Lebensdauer von 80 Jahren) von knapp CHF 3 Mio. gerechnet werden.

Tab. 5: Kostenschätzung Lawinerverbauungen und Gleitschneeschutz unter den Szenarien 3a und 4a

Einbau permanente Lawinerverbauungen (SZ 3a und 4a)		
Total notwendige Anzahl Laufmeter	m'	665
Pauschalansatz	CHF/m'	2'500
Investitionskosten	CHF	1'662'500
Lebensdauer	Jahre	80
Jährliche Investitionskosten	CHF/Jahr	20'781
Jährliche Unterhaltskosten (1% der Investitionskosten)	CHF/Jahr	16'625
Gesamtkosten (über Lebensdauer)	CHF	2'992'500

Gleitschneeschutz (Dreibeinböcke)		
Zu verbauende Fläche gemäss Abbildung 8	ha	1.1
Anzahl Dreibeinböcke pro ha	Stk/ha	250
Kosten/Stk	CHF	600
Investitionskosten		165'000
Lebensdauer	Jahre	20
Jährliche Investitionskosten	CHF/Jahr	8'250
Jährliche Unterhaltskosten in Prozent der Investitionskosten	2	3'300
Gesamtkosten (über Lebensdauer)	CHF	231'000

8.2 Steinschlagverbauungen

8.2.1 Methode und Annahmen

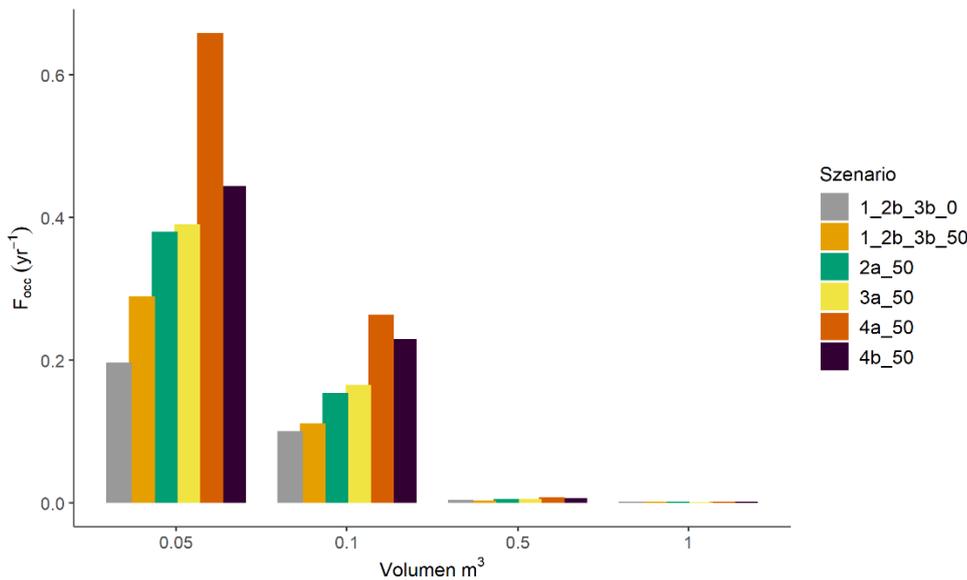
Am Hangfuss des Schwarzwaldes bestehen seit 1987 Steinschlagschutznetze (SSV Südumfahrung TBA). Diese weisen gemäss Schutzbautenkataster des AWN eine Höhe von 3m und die Energieklasse 100kJ auf. Heute vermögen diese Steinschlagschutznetze die Risiken, welche trotz des Waldes verbleiben, sehr effizient zu verringern, was dadurch bestätigt wird, dass seit dem Bau der Netze keine Ereignisse auf der Strasse verzeichnet wurden. Auch kleinere Rutschungen können durch die Netze aufgefangen werden.

Aus der Abb. 10 (unten) wird ersichtlich, dass sich gemäss Sturzsimulationen die Erreichenswahrscheinlichkeiten der 0.1m3-Blöcke in 50 Jahren und den Szenarien 2a und 3a im Vergleich zu heute fast verdoppeln, im Szenario 4a sogar verdreifachen. Gleichzeitig weisen sie für diese Szenarien im Bereich der Strasse höhere Energien auf. Daraus lässt sich ableiten, dass a) die Unterhaltskosten

aufgrund der erhöhten Anzahl Blöcke in den Netzen höher werden und dass b) stärkere Netze notwendig werden um die Sicherheit auf dem heutigen Stand zu erhalten.

Gemäss den Rutschungssimulationen muss im Bereich der Netze bereits heute an einigen Stellen selten bis sehr selten mit Rutschungsdrücken im Bereich von 160kN/m² gerechnet werden (IUAV 2017). Um diese Kräfte aufnehmen zu können wären Netze der Energieklasse von 2000kJ notwendig. D.h. es muss bereits heute mit Schäden an den Netzen durch seltene Rutschungsereignisse gerechnet werden. In den Szenarien 3a und 4a muss in 50 Jahren mit deutlich grösseren Schäden und deutlich längeren betroffenen Streckenabschnitten gerechnet werden (Abb. 13).

Aufgrund dieser Überlegungen wird davon ausgegangen, dass unter den Szenarien 3a und 4a die vorhandenen Netze mit Netzen der Energieklasse 2000kJ statt wieder mit der deutlich geringeren Energieklasse 100kJ (wie sie heute ausreicht um die häufigen Ereignisse zu sichern) ersetzt werden müssen, um das heute vorhandene Sicherheitsniveau zu erhalten. Zudem wird von einem deutlich höheren Aufwand für den Unterhalt ab Szenario 2a ausgegangen.



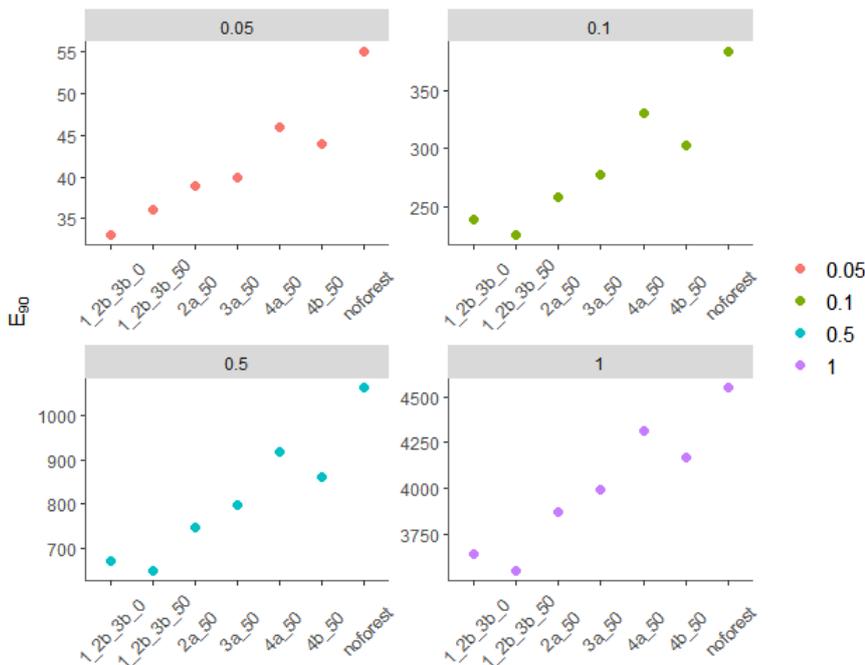


Abb. 10: Erreichenswahrscheinlichkeiten auf der Strasse (oben) und 90-Perzentil der Energien (kJ) auf der Strasse (unten) pro Szenario und Blockvolumen-Szenario (0.05 = 0.05-0.1 m³; 0.1 = 0.1-0.5 m³; 0.5=0.5-1.0 m³; 1 = 1.0-4.0 m³).

8.2.2 Resultate

Für den Ersatz der 100kJ-Netze mit Steinschlagschutznetzen der Energieklasse 2'000kJ muss mit zusätzlichen jährlichen Kosten von ungefähr CHF 9'600.- gerechnet werden (abgeschätzt aus Erfahrungswerten Kt. GR als Differenz zwischen Investitionskosten für geringe Energieklasse vs höhere Energieklasse, Tab. 6). Zudem wird gutachtlich davon ausgegangen, dass sich die Unterhaltskosten für das Szenario 3a verdoppeln im Vergleich zu den Werten gemäss EconoMe.

Mit diesen Kosten muss nur gerechnet werden, falls der Wildeinfluss in den unteren Bereichen deutlich stärker werden sollte, da unter der aktuellen Entwicklung nicht direkt mit höheren Risiken durch Rutschungen gerechnet werden muss (vgl. Tab. 8).

Tab. 6: Annahmen für die Kostenschätzungen der Steinschlagschutznetze unter den verschiedenen Szenarien

Ersatz der Steinschlagschutznetze mit höherer Energieklasse		
Total notwendige Anzahl Laufmeter	m'	400
Pauschalansatz (Differenz aktuelle/stärkere Netze) aktuell: Energieklasse 100kJ = CHF 1'000.-/m' zu ersetzen mit: Energieklasse = 2'000kJ = CHF 2'200.- /m'	CHF/m'	1'200
Jährliche Unterhaltskosten	% der Investitionskosten	1.00%
Jährliche Unterhaltskosten 2a	% der Investitionskosten	1.50%
Jährliche Unterhaltskosten 3a	% der Investitionskosten	2.00%
Jährliche Unterhaltskosten 4a	% der Investitionskosten	2.50%
Lebensdauer	Jahre	50
Zusätzliche Investitionskosten		480'000
Jährliche Unterhaltskosten 1_2b_3b		4'800
Jährliche Unterhaltskosten 2a		7'200
Jährliche Unterhaltskosten 3a		9'600
Jährliche Unterhaltskosten 4a		12'000
Zusätzliche jährliche Investitionskosten für SZ 3a und 4a		9'600

9 Erhöhte Risiken durch Naturgefahren

9.1 Methode und Annahmen

Für die Berechnung der Risiken durch Sturz und Rutschungen unter den verschiedenen Szenarien wurde ein einfaches Waldmodell entwickelt, in welchem, ausgehend vom heutigen Bestand, räumliche explizite Annahmen für die Entwicklung des Altbestandes sowie des Folgebestandes getroffen wurden. Anschliessend wurden unter Berücksichtigung der verschiedenen Waldbestände Sturz- und Rutschungssimulationen durchgeführt, aufgrund welcher schliesslich Personen- und Sachrisiken berechnet wurden.

Die für die Waldentwicklung verwendeten Annahmen sind in der Beilage 2 im Detail erläutert. Das Vorgehen für die Sturzsimulationen und die Risikoberechnungen sind in den Beilagen 4 und 5 beschrieben. Das verwendete Schadenpotential ist in Beilage 6 enthalten.

Wie in Kap. 5.3 erläutert, wurden die Sturzsimulationen und Risikoberechnungen zusätzlich zu den Szenarien 1 bis 4 für ein Szenario «Ohne Wald» durchgeführt.

Stark vereinfachend wird davon ausgegangen, dass die neuen Waldzustände nicht kontinuierlich, sondern zu einem bestimmten Zeitpunkt (nämlich gemäss Waldmodell 2069) eintreten. Das heisst es werden ein «Risikozustand heute» als Referenzzustand und Risikozustände für die verschiedenen Szenarien berechnet. Daraus werden die Risikoveränderungen für die verschiedenen Szenarien hergeleitet.

Ebenfalls vereinfachend resp. eher optimistisch wird davon ausgegangen, dass unter den Szenarien 2b, 3b und 4b mit Wildschadenverhütungsmassnahmen eine genügend gute Wirkung erreicht werden kann, um die Verjüngungsziele resp. die gleiche Verjüngungszahlen/-zusammensetzung zu erreichen wie unter Szenario 1. Aus diesem Grund wurden die Simulationen für die Szenarien 1, 2b und 3b zusammengefasst. Damit wird insbesondere in steilem, felsigen, von Sturzprozessen beeinflusstem Gelände und starkem Wildeinfluss die Wirkung von Wildschadenverhütungsmassnahmen sicher eher überschätzt.

9.1.1 Rutschungen: Eintretenswahrscheinlichkeit vs Häufigkeit

Als Eingangsdaten für die Risikoberechnungen mit EconoMe werden Intensitätskarten für bestimmte Jährlichkeiten (meistens 10-, 30-, 100- und 300-jährliche Ereignisse) verwendet. Dabei wird die Eintretenswahrscheinlichkeit als Funktion der Wiederkehrdauer definiert. Dies funktioniert gut für Prozesse, deren Disposition für Ereignisse unabhängig von bereits aufgetretenen Ereignissen ist (z.B. kann eine Lawine jedes Jahr kommen, wenn es genügend schneit, und ob es genügend schneit ist unabhängig davon, ob im Vorjahr eine Lawine niedergegangen ist oder nicht). Für Rutschungen ist die Situation etwas anders: eine bestimmte Rutschung kann eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit aufweisen, dass sie in den nächsten 1-2 Jahren niedergeht (d.h. sie kann eine *Eintretenswahrscheinlichkeit* von z.B. 0.5 aufweisen) – nach dem Niedergang wird sie aber mit ebenfalls sehr grosser Wahrscheinlichkeit für mehrere Jahrzehnte nicht mehr niedergehen (siehe z.B. (Runyan and D'odorico 2014)), da zuerst wieder Material akkumuliert werden muss (d.h. die Rutschung weist eine *Wiederkehrperiode* von deutlich grösser als 2 Jahren – z.B. 100 Jahre auf). Für das vorliegende Projekt wurde den einzelnen Rutschungen eine *Eintretenswahrscheinlichkeit* von 0.5 bis 1/300 zugeordnet, für die Risikoberechnungen wurden dann aber sämtlichen Ereignissen mit einer *Eintretenswahrscheinlichkeit* von $< 1/100$ eine *Wiederkehrdauer* von 100 Jahren zugeordnet. Damit kann vermieden werden, dass die Rutschungen als zu häufig klassiert und damit die Risiken überschätzt werden.

9.2 Resultate Sturz

In der Abb. 11 sind die jährlichen Risiken aufgrund von Sturzprozessen für die Szenarien 1 bis 4 sowie «ohne Wald» enthalten.

In der Abb. 12 sind die simulierten Erreichenswahrscheinlichkeiten sowie die Steinschlagrisiken (Personen- und Infrastrukturrisiken) für die Szenarien heute und 4a in 50 Jahren räumlich explizit dargestellt.

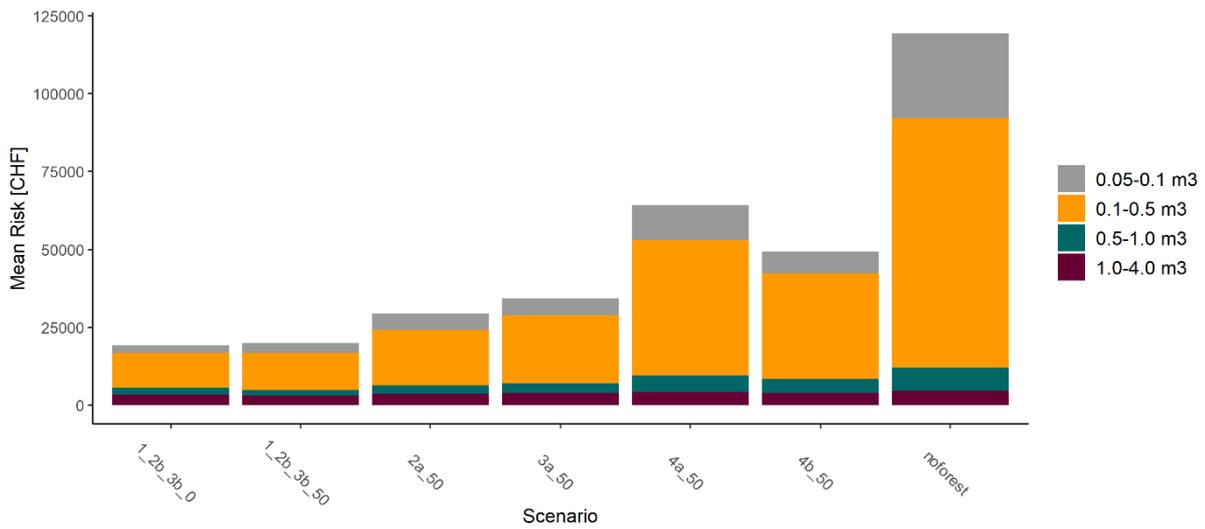
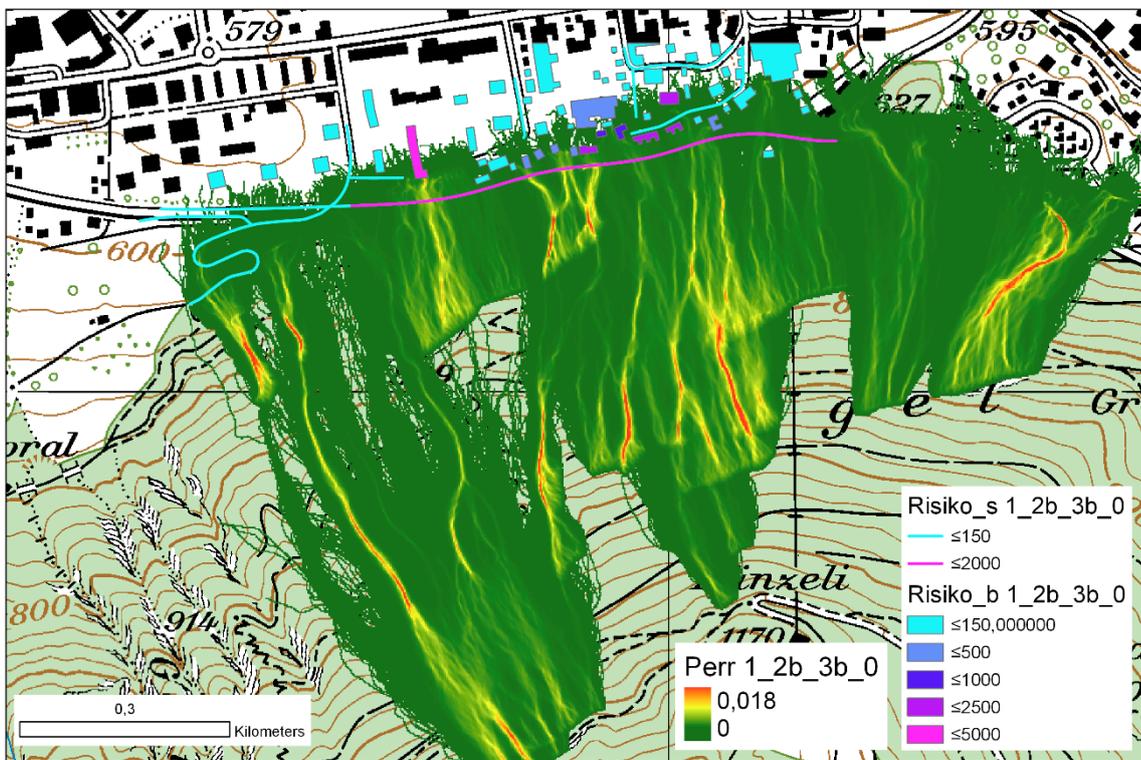


Abb. 11: Jährliches Steinschlagrisiko für das betrachtete Schadenpotenzial für die betrachteten Szenarien nach 50 Jahren (_50) sowie die Situation ohne Wald, aufgeteilt nach Blockgrößen-Szenarien.



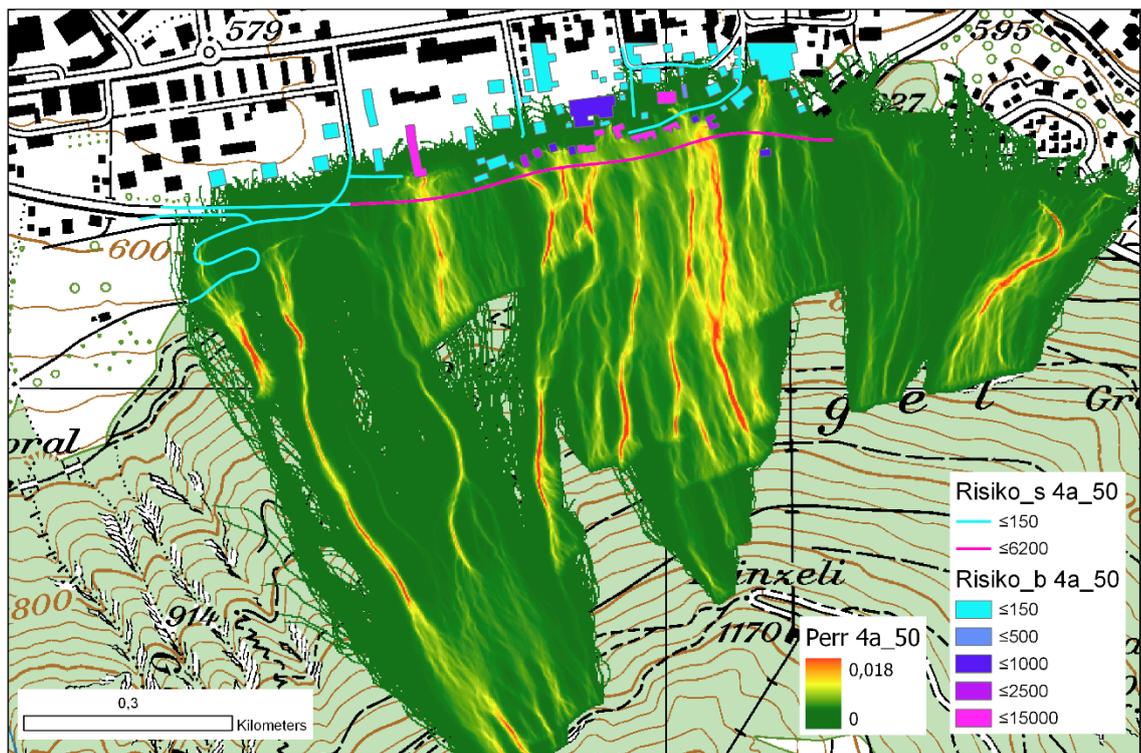


Abb. 12: Jährlich Risiken (CHF/Jahr) aufgrund von Sturzprozessen pro Gebäude und Strassenabschnitt für das Szenario 1_2b_3b_0 (d.h. heute, oben) und 4a_50 (d.h. SZ 4a in 50 Jahren, unten) sowie die entsprechenden simulierten Erreichenswahrscheinlichkeiten (Perr).

Aus der Abb. 11 wird folgendes ersichtlich:

- Ohne Wald müsste mit jährlichen Risiken von gut CHF 116'000.-/Jahr gerechnet werden. Das heisst ohne Wald wäre z.B. alle 5 Jahre mit Schäden von CHF 580'000.- an Gebäuden oder alle 57 Jahre mit einem Todesfall zu rechnen.
- Unter dem aktuellen Waldzustand muss von Risiken von gut CHF 16'000.-/Jahr ausgegangen werden, d.h. die heute vorhandenen Waldbestände reduzieren die Sturzrisiken auf ca. 14% des Ausgangsrisikos «ohne Wald».
- Bei tragbarem Verbissdruck (SZ 1) resp. mit je nach Szenario unterschiedlich intensiven Wildschadenverhütungsmassnahmen und unter der Annahme eines mässigen Klimawandels (SZ 2b, 3b) kann davon ausgegangen werden, dass das Risiko bis 2068 nur leicht zunimmt.
- Für die Szenarien 2a und 3a (d.h. es werden keine zusätzlichen Wildschadenverhütungsmassnahmen ergriffen) muss davon ausgegangen werden, dass sich die Risiken rund verdoppeln auf CHF 28'000.-/Jahr resp. 31'000.-/Jahr.
- Der Wald reduziert hauptsächlich die Risiken, welche aufgrund kleiner bis mittlerer Steine (<5m³) entstehen (grau/orange Säulen in Abb. 11, Reduktion um 90% zwischen heute/ohne Wald für die kleinsten Blöcke). Auf die Risiken aufgrund grosser Steine ist der Einfluss des Waldes deutlich geringer (dunkelrote Flächen in Abb. 11, Reduktion um 26% zwischen heute/ohne Wald).
- Die heute bestehenden Risiken entstehen hauptsächlich durch Steine aus den untersten Ausbruchgebieten. In den Szenarien 3a_50 und 4a_50 steigt der Anteil der Risiken durch Steine aus den oberen Entstehungsgebieten sehr deutlich an.

Geht man – stark vereinfachend – davon aus, dass die neuen Risikozustände nicht schleichend, sondern zu einem bestimmten Zeitpunkt (nämlich gemäss Waldmodell 2068) eintreten, so resultieren ab 2069 veränderte jährliche Risiken wie sie in Tab. 7 aufgeführt werden.

Tab. 7: Jährliche Sturzrisiken ab 2069 resp. Veränderung der jährlichen Risiken ab 2069 im Vergleich zum heutigen Risikozustand.

	Jährliche Risiken	Veränderung jährliches Risiko (Differenz zu Szenario heute) [CHF/Jahr]
Heute	16'419	
1, 2b, 3b 50	17'483	1'064
2a 50	28'192	11'773
3a 50	31'405	14'986
4a 50	59'524	43'105
4b 50	46'031	29'612
Kein Wald	116'807	100'388

9.3 Resultate Rutschungen

In der Abb. 13 sind die 100- und 300-jährlichen Intensitätskarten für die Szenarien heute und 4a_50 dargestellt.

In der Abb. 14 sind die jährlichen Risiken aufgrund von Rutschungsprozessen für die Wiederkehrperioden 100 und 300 Jahre für die Szenarien enthalten.

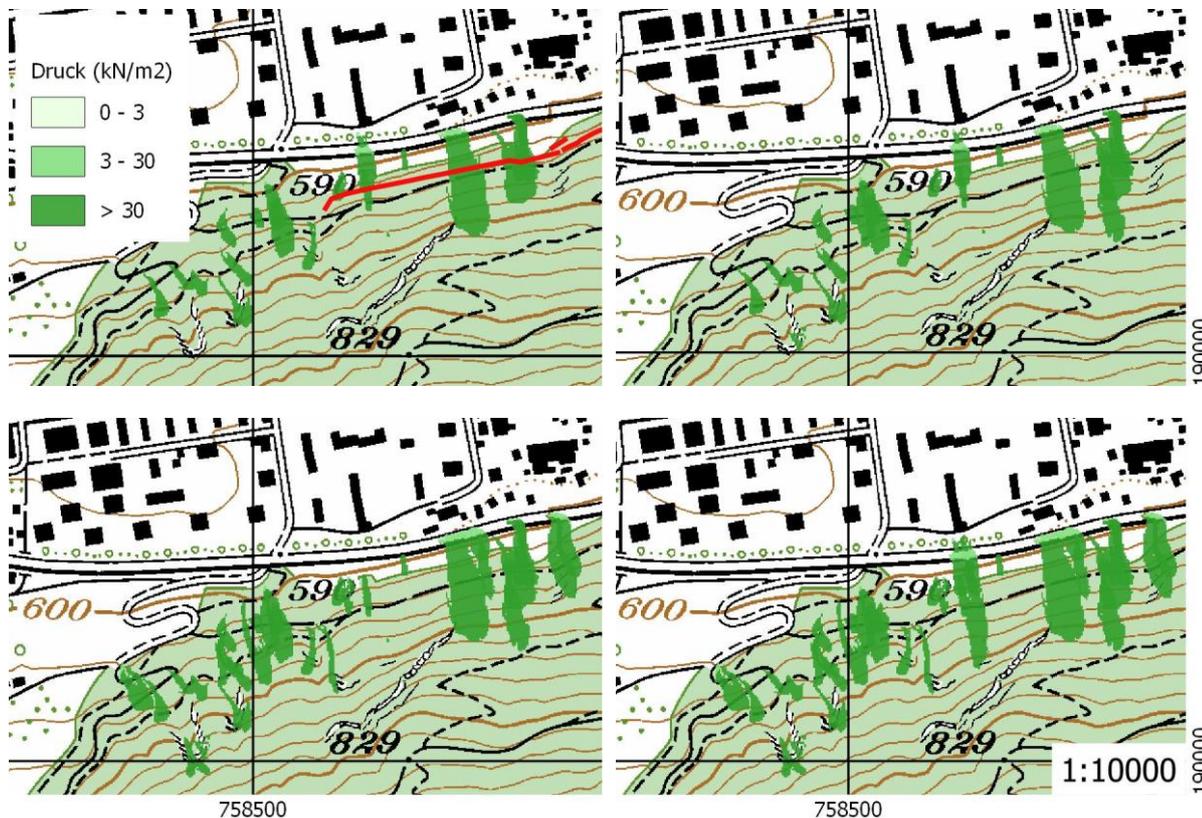


Abb. 13: Intensitätskarten Rutschungen für 100- (links) und 300- (rechts) jährliche Ereignisse für das Szenario heute (oben) und 4a_50 (unten). Die rote Linie zeigt die Position der vorhandene Steinschlagnetze.

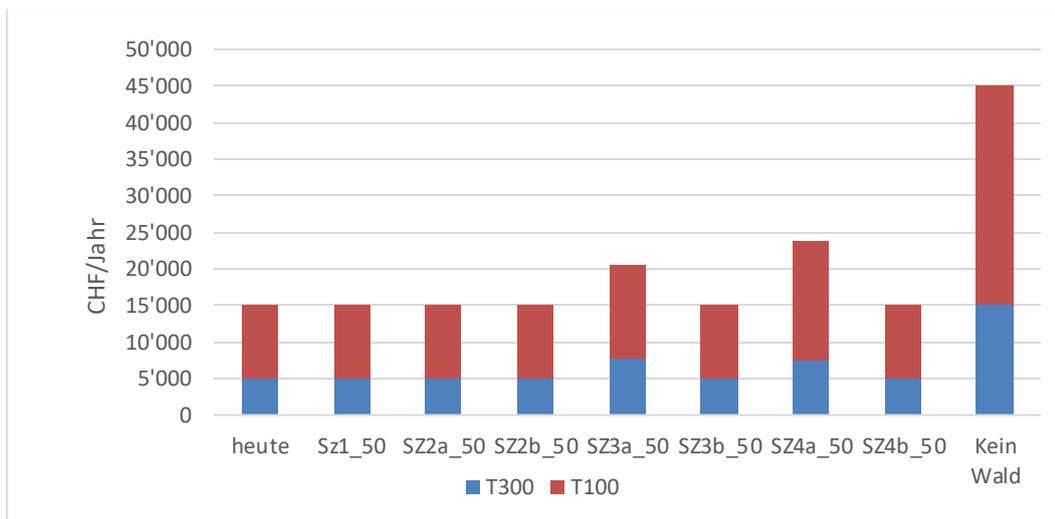


Abb. 14: Jährliches Rutschungsrisiko für das betrachtete Schadenpotenzial für heute und die betrachteten Szenarien nach 50 Jahren (_50) sowie die Situation ohne Wald, aufgeteilt auf die Jährlichkeiten 100 und 300.

Aus der Abb. 11 wird folgendes ersichtlich:

- Ohne Wald müsste ab ca. 2069 mit jährlichen Risiken von gut CHF 45'000.-/Jahr gerechnet werden.

- Unter dem aktuellen Waldzustand muss von jährlichen Risiken von gut CHF 15'000.-/Jahr ausgegangen werden, d.h. die heute vorhandenen Waldbestände reduzieren die Rutschungsrisiken auf ca. 33% des Ausgangsrisikos «ohne Wald».
- Bei tragbarem Verbissdruck (SZ 1) resp. mit je nach Szenario unterschiedlich intensiven Wildschadenverhütungsmassnahmen (SZ 2b, 3b und 4b) kann davon ausgegangen werden, dass das Risiko bis 2068 unverändert bleibt.
- Für die Szenarien 3a und 4a (d.h. es werden keine zusätzlichen Wildschadenverhütungsmassnahmen ergriffen) muss davon ausgegangen werden, dass sich die Risiken auf gut CHF 20'000.-/Jahr resp. knapp 24'000.-/Jahr erhöhen.

Geht man – wiederum stark vereinfachend – davon aus, dass die neuen Risikozustände nicht schleichend, sondern zu einem bestimmten Zeitpunkt (nämlich gemäss Waldmodell 2069) eintreten, so resultieren ab 2069 veränderte jährliche Risiken wie sie in Tab. 7 aufgeführt werden.

Tab. 8: Veränderung der jährlichen Risiken resp. der zu erwartenden Kosten/Einsparungen über 10 Jahre (2058 bis 2067) aufgrund der Risikoveränderungen im Vergleich zum heutigen Risikozustand.

	Total	Veränderung jährliches Risiko (Differenz zu Szenario heute) [CHF/Jahr]
heute	15'214	
Sz1_50	15'214	0
SZ2a_50	15'214	0
SZ2b_50	15'214	0
SZ3a_50	20'654	5'440
SZ3b_50	15'214	0
SZ4a_50	23'913	8'698
SZ4b_50	15'214	0
Kein Wald	45'122	29'908

10 Zusammenfassung der Resultate und Diskussion

10.1 Zusammenfassung der Resultate

In der Tab. 9 sind die zu erwartenden Kosten für waldbauliche und technische Massnahmen sowie sich verändernde Risiken für alle Szenarien aufgeführt. Gemäss unserer Beurteilung befinden wir uns im Schwarzwald Chur aktuell bezüglich Wildeinfluss im oberen Teil im Szenario 3 (d.h. der Verbissdruck ist untragbar, die Fichte kann ohne passive Wildschadenverhütungsmassnahmen nicht aufwachsen → rot umrandet in der Tab. 9). Im unteren Teil befinden wir uns im Szenario 2 (verbissempfindliche Baumarten fallen in der Verjüngung aus). Das bedeutet unter anderem, dass unter der aktuellen Entwicklung nicht direkt mit höheren Risiken durch Rutschungen und somit auch nicht mit höheren Investitionen in Steinschlagschutznetze gerechnet werden muss. Bezüglich Massnahmen befinden wir uns im oberen Bereich teilweise im Szenario 3b, d.h. es werden zwar Wildschadenverhütungsmassnahmen durchgeführt, aber nicht in dem Umfang, wie wir sie im Szenario 3b angenommen haben. Im unteren Teil befinden wir uns im Szenario 2a, das heisst, eine Anpassung an den Klimawandel durch Pflanzungen ist wildbedingt nicht möglich und verbissempfindliche Baumarten fallen aus. Das bedeutet, dass die Resistenz sowie die Resilienz des Schutzwaldes langfristig (vgl. Absatz 60 in Kap. 10.2) wildbedingt reduziert sein wird.

Tab. 9: Kostenzusammenstellung Schwarzwald Chur, in CHF/Jahr. Bei den Kosten für die waldbaulichen Massnahmen werden die Kosten pro Höhenstufe ausgewiesen, da in der sub- und obermontanen Höhenstufe die Verjüngungssituation aktuell als besser zu beurteilen ist als hochmontan.

		SZ1	SZ2a	SZ2b	SZ3a	SZ3b	SZ4a	SZ4b	
Jährliche Kosten Anpassung an Klimawandel und Wildschadenverhütungsmassnahmen		372		22'156		32'746		34'445	
<i>davon wildbedingt</i>				21'882		32'472		34'055	
<i>davon submontan</i>		336		10'661		8'734		8'734	
<i>davon obermontan trocken</i>		103		3'761		7'367		7'991	
<i>davon obermontan frisch</i>				6'154		12'375		13'450	
<i>davon hochmontan</i>				3'712		6'017		6'017	
Wildbedingte Kosten Schutzbauten			2'400		63'356		65'756		
Lawinenverbauungen									
<i>Zusätzliche jährliche Investitionskosten</i>					20'781		20'781		
<i>Zusätzliche jährliche Unterhaltskosten</i>					16'625		16'625		
Gleitschneeverbau									
<i>Zusätzliche jährliche Investitionskosten</i>					8'250		8'250		
<i>Zusätzliche jährliche Unterhaltskosten</i>					3'300		3'300		
Stärkere Steinschlagschutznetze									
<i>Zusätzliche jährliche Investitionskosten</i>					9'600		9'600		
<i>Zusätzliche jährliche Unterhaltskosten</i>			2'400		4'800		7'200		
Sturz- und Rutschungsrisiken	heute:	Sz 1_50	SZ2a_50	SZ2b_50	SZ3a_50	SZ3b_50	SZ4a_50	SZ4b_50	ohne Wald
Jährliche Sturzrisiken ab 2069	16'419	17'483	28'192	17'483	31'405	17'483	59'524	46'031	116'807
<i>Differenz zu 1_2b_3b_50</i>			10'708		13'921		42'041	28'548	99'323
<i>mit Wildschadenverhütungsmassnahmen verhinderte Zunahme der Risiken</i>				10'708		13'921		13'493	
Jährliche Rutschrisiken ab 2069	15'214	15'214	15'214	15'214	20'654	15'214	23'913	15'214	45'122
<i>Differenz zu 1_2b_3b_50</i>					5'440		8'698		29'908
<i>mit Wildschadenverhütungsmassnahmen verhinderte Zunahme der Risiken</i>						5'440		8'698	
Total jährliche Naturgefahrenrisiken	31'633	32'698	43'406	32'698	52'059	32'698	83'437	61'245	161'929
<i>Differenz zu 1_2b_3b_50</i>			10'708		19'361		50'739	28'548	129'232
<i>mit Wildschadenverhütungsmassnahmen verhinderte Zunahme der Risiken</i>				10'708		19'361		22'192	

Aus der Tab. 9 wird Folgendes ersichtlich:

- Der Schwarzwald verhindert jährliche Sturz- und Rutschungsrisiken im Bereich von CHF 130'000.- pro Jahr (bei jährlichen Restrisiken von aktuell gut CHF 31'000.-). Darin sind die Lawinenrisiken nicht enthalten.
- Unter tragbarem Verbisseinfluss können mit sehr geringfügigen Investitionen von jährlich gut 370.- (Pflanzungen zur Anpassung an den Klimawandel) die Risiken in den nächsten 50 Jahren auf ähnlichem Niveau erhalten bleiben. D.h. die Reduktion der Schutzwirksamkeit aufgrund der zu erwartenden Ausfälle kann unter tragbarem Verbisseinfluss und dadurch funktionierender Naturverjüngung mehr oder weniger kompensiert werden.
- Für die Szenarien mit kritischem resp. untragbarem Verbissdruck und starkem Klimawandel ist in ca. 50 Jahren mit einem deutlichen Anstieg der Risiken aufgrund von Naturgefahren zu rechnen. Der Anstieg der Risiken ist allerdings deutlich geringer als Wildschadenverhütungsmassnahmen kosten würden, um den Risikoanstieg zu verhindern. Dabei ist allerdings nicht enthalten, dass für

den Fall, dass der Schutzwald «aufgegeben» wird, weitere Risiken entstehen werden (Erosion, Murgang, weitere Lawinenanrisszonen, etc.).

- Der Einsatz von Schutzbauten kommt zukünftige Generationen gut 170-mal (!) teurer zu stehen als heute die Anpassung an den Klimawandel und somit der Erhalt der Schutzwirksamkeit des Waldes unter tragbarem Wildeinfluss.
- Der Einsatz von Schutzbauten zur Kompensation der in 50 Jahren verloren gegangenen Schutzwirksamkeit des Waldes ist auch deutlich teurer als der Einsatz von Wildschadenverhütungsmassnahmen zum Erhalt der Schutzwirksamkeit des Waldes unter untragbarem Verbissdruck.
- Unter Annahme von starkem Klimawandel wird es auch mit sehr grossen Investitionen in Wildschadenverhütungsmassnahmen nicht möglich sein, die Schutzwirksamkeit des Waldes auf ähnlichem Niveau zu erhalten.
- Der Einsatz von Wildschadenverhütungsmassnahmen kann auch unter kritischem Verbissdruck nicht mit der Verhinderung zukünftiger Risiken begründet werden.

10.2 Diskussion

Die vorliegende Studie beruht auf zahlreichen Annahmen, welche teilweise mit grossen Unsicherheiten behaftet sind. Diese sollen in der Folge diskutiert werden.

Waldmodell: Zentrale Eingangsgrösse für die Sturz- und Rutschungssimulationen ist ein sehr einfaches, räumliche explizites Waldmodell. Basis dafür sind Bäume, deren Position sowie Höhe resp. BHD aus einem Vegetationshöhenmodell abgeleitet und aufgrund terrestrischer Aufnahmen sowie den Daten aus der Waldinventur GR ergänzt resp. angepasst wurden. Aufgrund einer gutachterlichen Abschätzung wurde die Entwicklung des Altbestandes (Abgänge, Zuwachs) sowie der Verjüngung (Einwuchs) für zehn zehnjährige Schritte (d.h. über 100 Jahre) berechnet. Details zum Waldmodell sind der Beilage 2 zu entnehmen. Ein solches einfaches Waldmodell ist selbstverständlich mit grossen Unsicherheiten behaftet, insbesondere über so lange Zeiträume. Fragen wie «Wie entwickelt sich der Zuwachs unter mässigem resp. starkem Klimawandel» oder «wie schnell entwickelt sich die Verjüngung unter verschiedenen Verbissszenarien» müssen aber auch für aufwändigere Modelle weitgehend gutachterlich beantwortet werden. Gemäss unserer Beurteilung liegen die modellierten Entwicklungen von Vorrat und Stammzahlen in einem realistischen Bereich, zudem ist in der Beilage 2 deklariert, mit welchen Annahmen gerechnet wurde. Somit ist das Autorenteam in Absprache mit dem Auftraggeber der Meinung, dass für den Zweck dieser Studie das Waldmodell in ausreichender Genauigkeit die Waldentwicklung für die verschiedenen Szenarien abbildet.

Abschätzung Sturz- und Rutschungsrisiken: Die Abschätzung der Risiken aufgrund von Sturzprozessen erfolgte gemäss aktuellem Stand des Wissens (siehe Beilage 4). Simuliert werden für den aktuellen Zustand Ereignisse, welche problemlos von den vorhandenen Schutznetzen aufgehalten werden können. Dies entspricht auch den Beobachtungen und wird durch die aktuelle Gefahrenkarte bestätigt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Simulationen den Ist-Zustand gut abbilden und auch für die modellierten Waldszenarien in einem realistischen Bereich liegen. Dasselbe gilt für den Prozess Rutschungen. Diese werden insbesondere auch bestätigt durch die stummen Zeugen im Gelände: an zahlreichen Orten sind Anrisse von kleinen Rutschungen zu erkennen, welche aber nicht bis zum Schadenpotential gelangen. Dies wird für den aktuellen Waldzustand weitgehend so simuliert. Somit kann auch für die Rutschungen davon ausgegangen werden, dass die Abschätzungen auch für die modellierten Waldzustände in einem für diese Studie genügend genauen Bereich liegen.

Rutschungen im oberen Bereich des Untersuchungsgebietes: Simuliert wurden nur Rutschungen, welche das Schadenpotential tatsächlich erreichen und somit ein gewisses Risiko aufweisen. Die Prädisposition für

Rutschungen besteht allerdings im gesamten Untersuchungsgebiet in ähnlichem Umfang wie in diesem untersten Bereich, aus welchem die Rutschungen bis zum Schadenpotential gelangen. Das bedeutet, dass im gesamten Untersuchungsgebiet für die Szenarien 2a, 3a und 4a ab ca. 2068 mit deutlich häufigeren Rutschereignissen gerechnet werden muss. Dies wird zur Folge haben, dass in den bereits bestehenden Rinnen Material akkumuliert wird, woraus unter Umständen Murgänge entstehen können. Zudem können durch diese kleineren Rutschungen neue Rinnen entstehen, in welchen Folgeereignisse eine höhere Reichweite aufweisen können. Diese Prozesse wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt.

Erosion: Auch Erosionsprozesse wurden in der vorliegenden Studie nicht berücksichtigt. Wie sich in anderen Gebieten im Kanton Graubünden mit langjährigem starken Verbissdruck (z.B. Uaul Puzzastg, Gde. Sumvitg) zeigt, spielen diese neben Rutschungen ebenfalls eine wichtige Rolle. So ist auch im Schwarzwald zu beobachten, dass im Bereich von Rinnen und felsigen Partien mit zurückgehender Bestockung relativ bald Erosionsprozesse einsetzen, welche wiederum Potential für Rutschungen und allenfalls Murgänge bereitstellen. Insbesondere an flachgründigen Stellen hat Erosion – zudem relativ rasch zur Folge, dass der Boden wegerodiert und dadurch ehemals waldfähige Standorte nicht mehr waldfähig sind und somit eine Wiederbestockung äusserst schwierig wird. Diese Tendenz ist im obersten Bereich stellenweise bereits heute zu erkennen (Abb. 15).



Abb. 15: Erosion führt in flachgründigen und felsigen Partien dazu, dass die Wiederbestockung für lange Zeit schwierig wird (links) und/oder dass in Rinnen Material akkumuliert wird, welches zu Rutschungen oder Murgängen führen kann (rechts).

Betrachtungszeitraum: Im Gegensatz zu den vorangehenden Studien werden in der vorliegenden Studie nicht Gesamtkosten über 50 Jahre, sondern jährliche Kosten (zu unterschiedlichen Zeitpunkten) berechnet. Damit kann aus Sicht des Autorenteams das Problem zumindest entschärft werden, dass Massnahmenkosten (für passive Wildschadenverhütungsmassnahmen) ab heute, erhöhte Risiken aber erst in 50 Jahren anfallen und somit unterschiedlich gewichtet werden.

Nicht umgangen werden kann das Problem, dass die Unsicherheiten umso grösser werden, je weiter in der Zukunft die betrachteten Umstände liegen. So ist z.B. das Verkehrsaufkommen als Eingangsgrösse in die Risikoanalyse, welches wir für in 50 Jahren als gleich wie heute annehmen, mit grossen Unsicherheiten behaftet. Eine bessere Möglichkeit sehen wir momentan aber nicht, um die Konsequenzen von heute zu beobachtenden Entwicklungen über die im Schutzwald zwangsläufig langen Zeiträume abzuschätzen.

Gleichzeitig ist die Betrachtung der Risikozustände in 50 Jahren aus Sicht der Waldentwicklung deutlich zu kurzfristig: die Konsequenzen von starkem Wildverbiss erstrecken sich auf einen weit längeren Zeitraum als nur 50 Jahre. Somit wird mit der vorliegenden Abschätzung der Risiken die Problematik nur teilweise erfasst, und v.a. die Reduktion von Resistenz und Resilienz des Schutzwaldes wird nur ansatzweise bewertet.

11 Schlussfolgerungen

Unter Einbezug obiger Überlegungen kann aus der vorliegenden Studie folgendes Fazit gezogen werden:

- Der Schwarzwald Chur erbringt im heutigen Zustand eine grosse Schutzwirkung (Reduktion der jährlichen Risiken im Vergleich zum Szenario ohne Wald um CHF 160'000.-, ohne Berücksichtigung der Lawinenrisiken). Bei tragbarer Verbissbelastung (oder intensivem Einsatz von Wildschadenverhütungsmassnahmen) kann diese Wirkung bis 2068 mehr oder weniger erhalten bleiben. Die Waldbestände sind aber heute wahrscheinlich relativ nahe bei der langfristig und nachhaltig optimal möglichen Schutzwirksamkeit. Diese gute Schutzwirksamkeit gilt es grundsätzlich zu erhalten, um nicht eine Reduktion des Sicherheitsniveaus in Kauf nehmen zu müssen.
- Unter kritischem Verbissdruck (aktuell im unteren Bereich) findet zwar eine Entmischung statt, v.a. in der submontanen Stufe (d.h. im unteren Bereich des Untersuchungsgebietes) kann aber damit gerechnet werden, dass genügend verbissunempfindliche Baumarten vorhanden sind, welche die Ausfälle im Altbestand kompensieren können. Somit bleibt das Risiko bezüglich Rutschungen (welche ausschliesslich aus dem untersten Bereich das Schadenpotential erreichen) vorläufig mehr oder weniger konstant. Durch die geringere Baumartenvielfalt sinkt aber die Resilienz vom System Wald, das heisst, der Wald kann weniger gut auf Herausforderungen wie Störungen oder Krankheiten reagieren. Insbesondere die Tatsache, dass aktuell im unteren Bereich der obermontanen Stufe praktisch nur die Buche aufkommt, ist angesichts der Prognosen bezüglich Klimawandel alarmierend: sowohl bei mässigem wie auch starkem Klimawandel muss damit gerechnet werden, dass die Buche auf diesem Standort nicht mehr geeignet sein wird. Entsprechend muss die heute vorhandene Buchenverjüngung zumindest im Reinbestand als nicht zukunftsfähig bezeichnet werden. Somit wäre es angesichts des Klimawandels äusserst wichtig, dass der hier herrschende kritische Verbissdruck gesenkt werden könnte.
- Im oberen Bereich (Szenario 3) hingegen ist spätestens ab 2068 mit häufigeren und Rutschungen zu rechnen (vgl. Absatz 4 in Kap. 10.2), welche in dieser Studie nicht modelliert wurden. Diese können zu Materialakkumulation in den vorhandenen Gerinnen führen, welche früher oder später als Murgänge das Schadenpotential erreichen können. Zudem können sich verstärkt Erosionsflächen bilden, auf welchen eine Wiederbestockung stark erschwert wird. Diese Tendenz ist stellenweise bereits festzustellen, wurde aber in der aktuellen Studie nicht monetarisiert, da dies kaum verlässlich möglich ist.
- Dank der sehr langen Hanglänge und somit vielen Bäumen im Transitbereich von Sturzprozessen aus den oberen Ausbruchsstellen muss aktuell trotz grosser Öffnungen und schon sehr lange katastrophalem Verjüngungszustand in den oberen Bereichen nur mit relativ geringen Risiken aufgrund von Sturzprozessen gerechnet werden. Dies ist ein Zeichen für die «Stabilität» (positiv formuliert) des Waldes als Schutzsystem, und es erklärt auch, warum trotz grosser Verjüngungsprobleme an verschiedenen Orten im Kanton bisher und auch mittelfristig keine massiven Probleme auftreten.
- Wie die Sturzsimulationen für die Szenarien 3a und 4a deutlich zeigen, erhöhen sich die Sturzrisiken stark im Fall, dass die Verjüngung auch im mittleren und unteren Bereich nicht funktioniert und/oder auch im mittleren Bereich grosse Ausfälle im Altbestand (z.B. aufgrund des Klimawandels) zu verzeichnen sind. In diesem Fall ist es nicht möglich, die Ausfälle innert weniger Jahre wieder mit Verjüngung zu ersetzen. Dies zeigt, dass im sehr «trägen» (aber wie oben erwähnt auch stabilen) Schutzwald es im Sinn des Vorsorgeprinzipes, auf welchem auch NaiS weitgehend basiert, äusserst wichtig wäre, die heute bestehenden Lücken in den oberen Bereichen so rasch wie möglich zu bestocken, damit zum Zeitpunkt der bereits heute absehbaren Ausfälle unten in den mittleren und oberen Bereichen eine genügend hohe Stammzahl vorhanden ist.

- Um die reduzierte Schutzwirksamkeit, wie sie bei untragbarem Verbissdruck zu erwarten ist und wie es sich aufgrund der Entwicklung im oberen Teil aktuell abzeichnet, zu kompensieren, werden Investitionen in Schutzbauten (v.a. Lawine nverbauungen) in Millionenhöhe notwendig sein.
- Die Studie zeigt eine der grossen Herausforderungen der Schwarzwaldbewirtschaftung generell: die grosse zeitliche Differenz zwischen Eintreten des Schadens (heutiger Verbiss) und den daraus entstehenden Konsequenzen (Risikoanstieg in 50-100 Jahren) erfordern Früherkennung und frühzeitiges Handeln. Gemäss Waldentwicklungsplan WEP2018+ verpflichtet sich der Kanton Graubünden dem Prinzip der Nachhaltigkeit. Somit müssen diese langfristigen Entwicklungen bei Entscheidungen miteingezogen werden und es kann keine Option sein, die Schäden auf kommende Generationen abzuschieben.
- Gemäss (BAFU 2010) werden in Gebieten mit besonderer wildökologischer Bedeutung auch passive Wildschadenverhütungsmassnahmen (d.h. chemischer Verbisschutz, Zäune, etc.) durch den Bund subventioniert. Die vorliegende Studie zeigt auf, dass mit der heutigen Wildbelastung (analog Szenario 3) die Kosten für solche Massnahmen äusserst hoch sind (CHF 1-1.6 Mio in 50 Jahren), resp. dass Wildschadenverhütungsmassnahmen im in den letzten Jahren resp. Jahrzehnten umgesetzten Umfang bei weitem nicht ausreichen, um die gemäss NaiS im Schwarzwald geforderte Verjüngung zu sichern. Bestenfalls gelingen damit punktuelle Verjüngungskegel. Ein Einsatz von Wildschadenverhütungsmassnahmen im hergeleiteten Umfang ist in der Praxis sehr wahrscheinlich nicht realistisch und vor allem auch nicht effizient: aufgrund der Schutzwirkung resp. der Risikoverminderung sind sie aus ökonomischer Sicht nicht zu begründen. Nun kann argumentiert werden, dass die zur Verfügung stehenden forstlichen Gelder statt in andere waldbauliche Massnahmen (z.B. Einleitung der Verjüngung, welche unter den v.a. im oberen Teil des Schwarzwaldes herrschenden Verbissbedingungen nicht mehr sinnvoll ist) in Wildschadenverhütungsmassnahmen investiert werden sollen. Dies ist aus Sicht der Forstbetriebe sinnvoll, aus Sicht eines Steuerzahlers aber höchst problematisch, da dieser Einsatz von Steuergeldern wie oben hergeleitet nicht effizient ist (d.h. Kosten > Nutzen). Hier liegt es aus unserer Sicht in der Verantwortung der Waldeigentümer sowie der kantonalen Verwaltungen, diese letztendlich politisch zu führende Diskussion zumindest anzuregen und sich ihr zu stellen.
- Unter Annahme starker klimatischer Veränderungen und damit verbundenen sehr raschen, starken Ausfällen in den Altbeständen könnten allenfalls grosse Investitionen in Wildschadenverhütungsmassnahmen mit den zukünftig verhinderbaren Risiken knapp begründet werden. Die Frage stellt sich allerdings, ob aufgrund der «Trägheit» des Schutzsystems Wald in diesem Fall überhaupt genügend schnell reagiert werden *kann*. Dies zeigt, dass unabhängig von Verbissproblemen der Klimawandel zu grossen Herausforderungen im Schwarzwald führen kann.
- Kann – aus welchen Gründen auch immer – der Verbiss nicht auf ein tragbares Mass reduziert werden, stellt sich die Frage, ob die Variante 2a resp. 3a gewählt werden soll, d.h. auf Wildschadenverhütungsmassnahmen wird verzichtet, der Schwarzwald wird sich selbst überlassen und die verloren gegangene Schutzwirkung wird zu gegebener Zeit mit technischen Schutzmassnahmen kompensiert. Dies hätte zur Folge, dass Schutzbauten in Millionenhöhe finanziert werden müssten, was offensichtlich ökonomisch nicht begründbar wäre angesichts der damit verhinderten Risiken (Kosten >>> Nutzen), und somit kaum umgesetzt würde. Dies hätte zur Folge, dass kommende Generationen grössere Risiken in Kauf nehmen müssten. Dies widerspricht sehr grundsätzlich dem Prinzip der nachhaltigen Waldbewirtschaftung, welchem sich der Kt. GR wie bereits oben erwähnt verpflichtet und wonach auch die kommenden Generationen von den Schutzleistungen des Schwarzwaldes profitieren können sollen. Zudem können weitere Risiken aufgrund von Murgang, Rutschungen und Lawinen aus dem mittleren und oberen Teil auftreten, die hier nicht analysiert wurden, und ebenso wird die Wirkung auf weitere Waldleistungen vernachlässigt.

Aus dieser Überlegung ist abzuleiten, dass unter der aktuellen Verbissbelastung das Schutzsystem Schwarzwald Chur **NICHT NACHHALTIG BETRIEBEN WERDEN KANN**. Aus Sicht einer nachhaltigen

Schutzwaldbewirtschaftung und aus Sicht eines Steuerzahlers, welcher seine Gelder effizient eingesetzt wissen möchte, ist somit die einzige Lösung, den Verbissdruck deutlich zu senken, um eine dauerhafte Erhaltung der Schutzwirksamkeit zu gewährleisten.

Vergleicht man das Fallbeispiel Schwarzwald Chur mit anderen Beispielen aus dem Kanton Graubünden ist festzustellen, dass man im Schwarzwald Chur zum heutigen Zeitpunkt noch die Möglichkeit hätte, das Ruder herumzureissen und mit sehr einschneidenden Massnahmen die dauerhafte Bereitstellung der Schutzleistungen sicherzustellen (im Gegensatz zu z.B. dem Gebiet Uaul Puzastg (Gde. Surrein), wo bereits ein deutlicher wildbedingter Rückgang der Schutzwirksamkeit festzustellen ist).

Auf eine Herleitung von Kosten für eine Senkung des Verbissdruckes auf ein Mass, bei welchem zumindest verbissunempfindliche Baumarten aufkommen (d.h. Szenario 2) wird in dieser Studie in Absprache mit dem Auftraggeber verzichtet. Die Verfasserinnen sind allerdings überzeugt, dass a) durch - u.U. intensive - jagdliche Massnahmen eine deutliche Verbesserung der Verbiss- resp. Verjüngungssituation erreicht werden kann und b) jagdliche Massnahmen nicht nur effektiv, sondern auch effizient sind (Gasser et al 2011). Auch Wolf und Luchs können unter Umständen einen positiven Einfluss auf die Verjüngungssituation haben, wobei es fraglich ist, ob in naher Zukunft und in der dicht besiedelten Schweiz die dafür notwendige Wolfsdichte realistisch ist (Kupferschmid and Bollmann 2016).

Rabius/Sargans/Sion/Zollikofen, Mai 2021

Nora Zürcher-Gasser

Monika Frehner

Christine Moos

Massimiliano Schwarz

Literatur

- AWN, 2020. Projektvorschriften für Sammelprojekte Waldbau ab 2020 - Handbuch Grüner Bereich.
- AWN, 2016. Projektvorschriften für Sammelprojekte Waldbau ab 2017. Handbuch grüner Bereich.
- BAFU, 2010. Wald und Wild - Grundlagen für die Praxis. Umwelt-Wissen.
- Boulanger, V., Rakotoarison, H., 2015. Assessing economic impacts of deer browsing on forestry Fir-Spruce stands in the Vosges (France) as a case study.
- Fehr, M., Gasser, N.Z., Schneider, O., Burger, T., Kupferschmid, A.D., 2019. Gutachtliche Beurteilung des Wildeinflusses auf die Waldverjüngung (Essay). Schweizerische Zeitschrift für Forstwes. 170. doi:10.3188/szf.2019.0135
- Frehner, M., Huber, B., Gubelmann, P., Zürcher-Gasser, N., Zimmermann, N.E., Braun, S., Scherler, M., Zischg, A., Burnand, J., Carraro, G., Bugmann, H., Psomas, A., 2019. Schlussbericht des Projektes «Adaptierte Ökogramme» im Forschungsprogramm «Wald und Klimawandel.
- Gasser, N., Frehner, M., Zinggeler, J., Olschewski, R., 2011. Economic consequences of browsing problems on Rigi-nordlehne . Schweizerische Zeitschrift für Forstwes. 162. doi:10.3188/szf.2011.0364
- Kupferschmid, A.D., Bollmann, K., 2016. Direkte, indirekte und kombinierte Effekte von Wölfen auf die Waldverjüngung. Schweizerische Zeitschrift für Forstwes. 167. doi:10.3188/szf.2016.0003
- Margreth, S., 2007. Lawinerverbau im Anbruchgebiet.
- Moos, C., Fehlmann, M., Trappmann, D., Stoffel, M., Dorren, L., 2017. Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis – Two case studies in Switzerland. Int. J. Disaster Risk Reduct. 32. doi:10.1016/j.ijdr.2017.09.036
- Oesten, G., 1991. Gedanken zur Wahl der Zinsrate in der Waldbewertung. Forst und Holz 19.
- Olschewski, R., Bebi, P., Teich, M., Hayek, U.W., Grêt-Regamey, A., 2011. Lawinenschutz durch Wälder - Methodik und Resultate einer Zahlungsbereitschaftsanalyse. Schweizerische Zeitschrift für Forstwes. 162. doi:10.3188/szf.2011.0389
- Price, C., n.d. Time, Discounting and Value.
- Runyan, C.W., D'odorico, P., 2014. Bistable dynamics between forest removal and landslide occurrence. Water Resour. Res. 50(2), 1112-1130.
- Salzburger Landesrechnungshof, 2015. Bericht des Rechnungshofes. Salzburg.
- Schwitler, R., 2014. Dokumentation der 30. Arbeitstagung der Schweizerischen Gebirgswaldpflegegruppe GWG.
- Suchant, R., Burghardt, F., Calabro, S., 2011. Beurteilung von Wildverbiss in Naturverjüngungen. FVA-einblick.
- Teich, M., Bebi, P., 2009. Evaluating the benefit of avalanche protection forest with GIS-based risk analyses—A case study in Switzerland. For. Ecol. Manage. 257.

Beilage 1: Anpassung an den Klimawandel

Für das Untersuchungsgebiet muss gemäss (Frehner et al. 2019) mit erheblichen Verschiebungen der Höhenstufen gerechnet werden (Abb. 16). Dies hat zur Folge, dass auch von starken Veränderungen der Baumartenzusammensetzung ausgegangen werden muss. In der Tab. 10 sind die aktuell vorhandenen und potentielle zukünftige Standortstypen aufgeführt. Wie dieser zu entnehmen ist, ist insbesondere damit zu rechnen, dass unabhängig von der Stärke des Klimawandels bis auf ca. 950 m ü. M. die Buche nicht mehr eine dominierende Rolle spielen wird (colline Einheiten). Ebenfalls unabhängig von der Stärke des Klimawandels muss mit einer weniger dominanten Rolle der Fichte bis in die obersten Bereiche des Untersuchungsgebietes gerechnet werden.

Angesichts dieser Entwicklung werden folgende Massnahmen als mögliche Anpassungen an den Klimawandel hergeleitet:

- Einbringen zukunftsfähiger Baumarten als Samenbäume gem. Tab. 3 in Kap. 7.1 in der submontanen und unteren obermontanen Stufe
- Erhalt eines gewissen Anteils an Mischbaumarten in der Verjüngung zur «Risikoverteilung» resp. zur Erhöhung der Resilienz der Bestände
- Erhalt eines gewissen Weisstannen-Anteils in der Verjüngung, da ein gewisser Anteil an immergrünen Nadelbäumen für die Schutzwirkung gegen Schneebewegungen sowie zur «Erziehung» der Laubbäume im Schutzwald sehr erwünscht ist und die Weisstanne bezüglich Klimawandel bessere Prognosen gestellt werden als der Fichte, da sie nicht vom Buchdrucker befallen wird.

In der oberen obermontanen und hochmontanen Stufe ist aktuell die Pflanzung zukunftsfähiger Baumarten erst sehr bedingt möglich

Tab. 10: Mögliche zukünftige Waldstandortstypen im Untersuchungsgebiet für die Szenarien Klimawandel mässig und stark gemäss (Frehner et al. 2019).

heute		Klimawandel mässig	Klimawandel stark
Submontan < 800 m ü. M.	10a Lungenkraut/Platterbsen- Buchenwald	10a collin	10a collin
Obermontan trocken 800-950 m ü. M.	18* Karbonat-Tannen- Buchenwälder mit Weissegge	14 collin	14 collin
Obermontan frisch 950-1200 m ü. M.	18M Typische Karbonat- Tannen-Buchenwälder zu finden	9a Typischer Lungenkraut-/ Platterbsen-Buchenwald	9a collin
Hochmontan > 1200 m ü. M.	50* Karbonat-Tannen- Fichtenwald mit Kahlem Alpendost	12a Typischer Binkelkraut-/ Zahnwurz-Buchenwald	50* collin

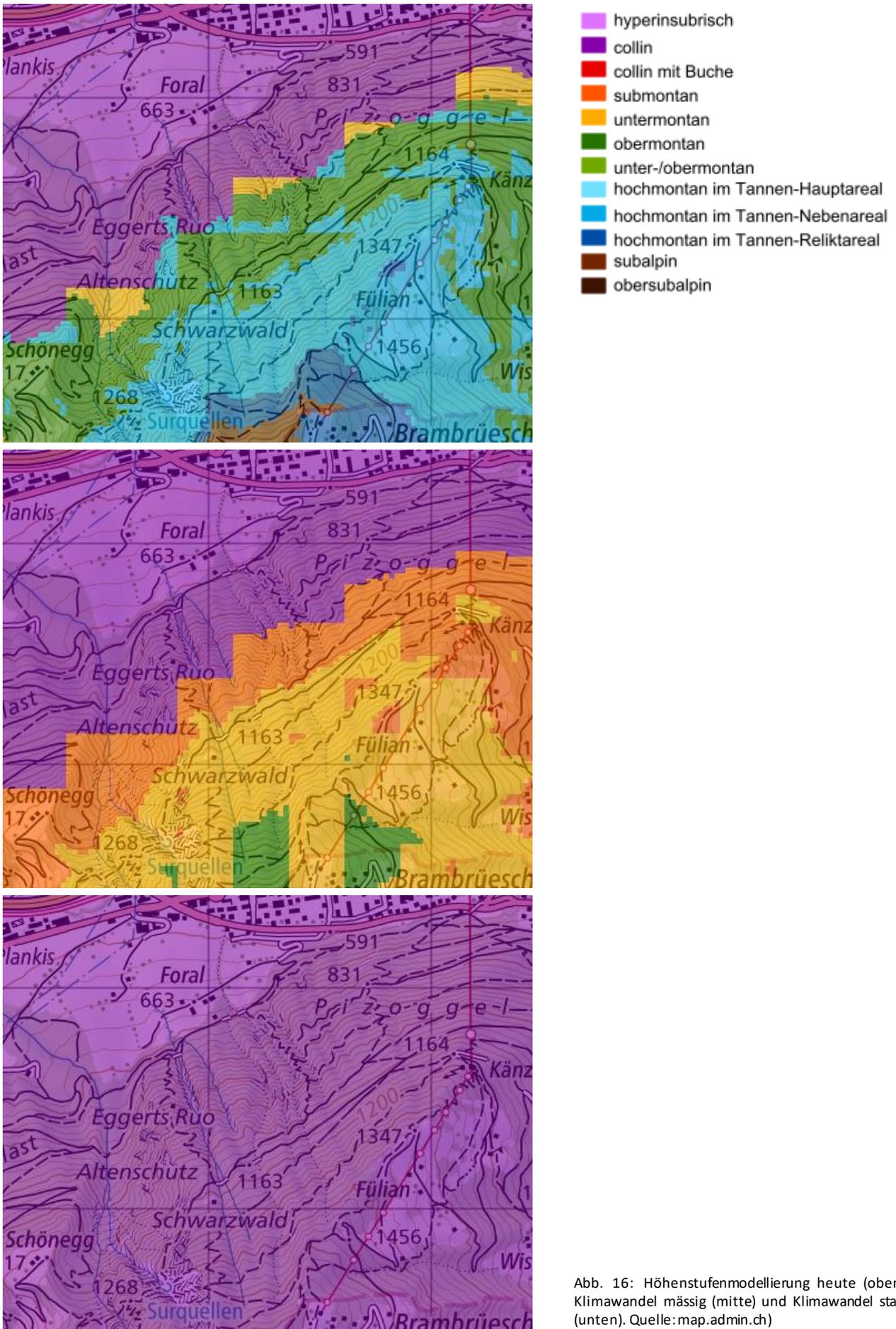


Abb. 16: Höhenstufenmodellierung heute (oben), Klimawandel mässig (mitte) und Klimawandel stark (unten). Quelle: map.admin.ch)

Beilage 2: Waldmodell

Für die Berücksichtigung der Waldwirkung resp. der unterschiedlichen Waldzustände unter den verschiedenen Szenarien wurde folgendermassen vorgegangen:

Herleitung Ausgangsbestand

- Basierend auf Drohnenbildern wurde ein Vegetationshöhenmodell hergeleitet (eBee), mit welchem eine «Waldmaske» mit einer minimalen Vegetationshöhe von 3m abgeleitet wurde (d.h. Lückenflächen wurden nicht als Wald ausgeschieden). Weiter wurden mit einem Vergleich alter und aktueller Luftbilder Lückenflächen ausgeschieden, welche seit mindestens 1991 resp. 2018 bestehen. Diese Lücken wurden ebenfalls – wo nicht bereits durch das Vegetationshöhenmodell erfasst – in die Waldmaske integriert. Aus dem Vegetationshöhenmodell wurden mit der Software FINT Baumspitzen detektiert. Daraus wurde aufgrund der Baumhöhe ein Durchmesser zugewiesen (Standard Durchmesser-Höhen-Beziehung in FINT). Daraus resultierte ein Treefile, welches die räumliche Struktur des aktuellen Bestandes abbildet.
- Anhand des aktuellen Luftbildes und der Bestandekartierung wurden das Untersuchungsgebiet in 13 bezüglich Waldaufbau mehr oder weniger homogene Flächen eingeteilt.
- Anschliessend wurden die Fernerkundungsdaten mittels Daten aus 15 Stichprobenaufnahmen auf jeweils 20x20m, der Bestandekarte und den Daten der Waldinventur GR angepasst. Da ein Vergleich der in FINT hergeleiteten BHD's und der BHD-Verteilung in den Stichproben auf eine Überschätzung der BHD's in FINT hindeutete, wurden diese mittels einer linearen Regression zwischen den FINT-BHD's in den Plots und den gemessenen BHD's angepasst. Anschliessend wurde für die 13 Flächen Zielvorräte festgelegt und der Vorrat innerhalb der Waldmaske gemäss der Durchmesser-Verteilung aus FINT auf die Zielvorräte erhöht.

Mit diesem Vorgehen kann die räumliche Struktur der Bestände erhalten werden und gleichzeitig dem Problem begegnet werden, dass durch die Fernerkundungsdaten die Stammzahl und Vorräte unterschätzt werden.

Die Abb. 17 enthält die Flächeneinteilung ab Luftbild, Lückenausscheidung ab Luftbild, und Lage der Stichproben 1-15.

Modell für die Anpassung des Ausgangsbestandes unter den verschiedenen Szenarien

Für die Herleitung der Waldzustände unter den verschiedenen Szenarien wurden gutachtliche Einschätzungen des Einwuchses in den Lückenflächen, des Vorratsrückgangs im Altbestand aufgrund von Zwangsnutzungen, der «normalen» Mortalität im Altbestand, des Zuwachses und des Einwuchses im Altbestand sowie auf den Lückenflächen getroffen. Die Annahmen sind in der Tab. 11 für alle Szenarien aufgeführt.

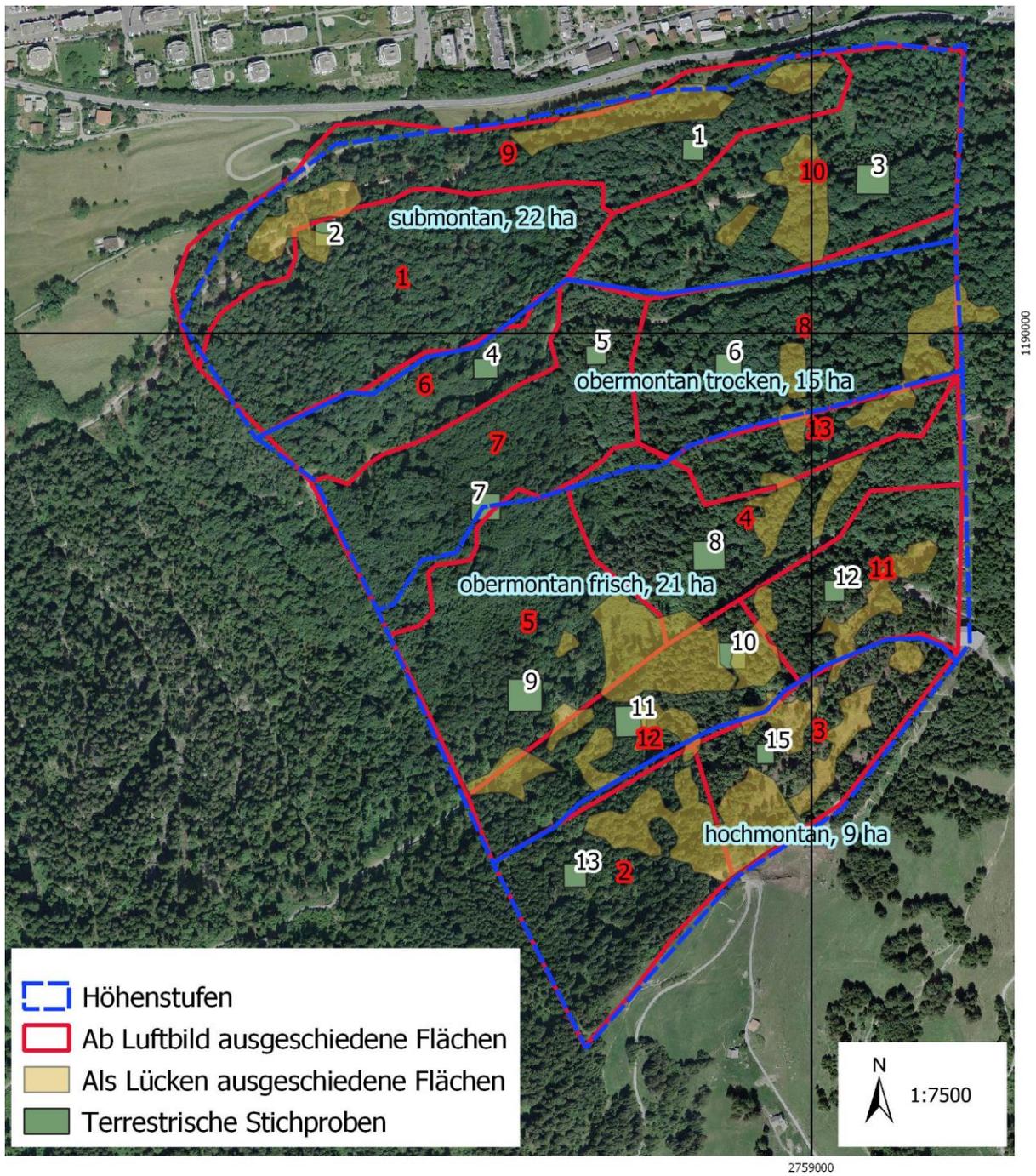


Abb. 17: Untersuchungsgebiet mit Flächeneinteilung ab Luftbild, Lückenausscheidung ab Luftbild und Lage der Stichproben 1-15

Tab. 11: Annahmen Waldmodell

Submontan (< 800 m ü. M.)				
Generelle Annahmen:				
<ul style="list-style-type: none"> - Klimabedingt starker Rückgang im Altbestand in den nächsten ca. 40 Jahren bei folgenden Baumarten: Ta, Bu, Fi, Lä, B'Ah - Zuwachs geht bei starkem Klimawandel deutlich zurück - Verjüngung: bereits heute sind grössere Ausfälle im Altbestand zu beobachten, deshalb genügend verjüngungsgünstige Standorte vorhanden → bereits ab heute relativ hohe Stammzahl in Verjüngung zu erwarten. 				
Szenario	Ausfälle Altbestand	Zuwachs Altbestand	Einwuchs Lücken	Einwuchs Altbestand
1, 2b, 3b	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Bu, Fi, Lä, B'Ah: Bis 2029: 20% Bis 2039: 40% Bis 2049: 40% Bis 2059: 10%	5m ³ /ha/Jahr	Ab 2060 ca. 300 Stk/ha Naturverjüngung total 270 Stk Linde, Ki, W'Fö, Eibe, Nussbaum, Bi. Pflanzung für Samenbäume T'Ei, S'Ah, F'Ah (je 10 Stk/ha) Nach jeweils weiteren 30 Jahren: 100 Stk/ha in gesamtem Bestand	
2a			Ab 2060 ca. 300 Stk/ha Naturverjüngung total 270 Stk Linde, Nussbaum, Bi. Nach jeweils weiteren 30 Jahren: 100 Stk/ha in gesamtem Bestand	
3a			Ab 2090 ca. 300 Stk/ha Naturverjüngung total 270 Stk Linde, Nussbaum, Bi.	
4a	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	Bis 2040: 5m ³ /ha/Jahr	Ab 2090 ca. 300 Stk/ha Naturverjüngung total 270 Stk Linde, Nussbaum, Bi.	
4b	BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Bu, Fi, Lä, B'Ah: Bis 2029: 40% Bis 2039: 70% Bis 2049: 70% Bis 2059: 40%	Bis 2060: 4m ³ /ha/Jahr Bis 2120: 3m ³ /ha/Jahr	Ab 2060 ca. 300 Stk/ha Naturverjüngung total 270 Stk Linde, Ki, W'Fö, Eibe, Nussbaum, Bi. Pflanzung für Samenbäume T'Ei, S'Ah, F'Ah (je 10 Stk/ha) Nach jeweils weiteren 30 Jahren: 100Stk/ha in gesamtem Bestand	
Obermontan trocken (800 - 950 m ü. M.)				
Generelle Annahmen				
<ul style="list-style-type: none"> - Klimabedingt starker Rückgang im Altbestand in den nächsten ca. 60 Jahren bei folgenden Baumarten: Ta, Bu, Fi - Bei starkem Klimawandel praktisch kompletter Ausfall der Fichte im Altbestand aufgrund von Borkenkäfer ab ca. 2070 - Naturverjüngung von heute der Baumarten Ta, Bu, Fi bekommt in ca. 70 Jahren klimabedingt ebenfalls Probleme - Zuwachs geht bei starkem Klimawandel deutlich zurück - Verjüngung: ab dem Zeitpunkt, zu welchem grössere Ausfälle im Altbestand zu erwarten sind (d.h. ab ca. 2049), kann sich die Verjüngung innerhalb von 40 Jahren grossflächig etablieren. 				
Szenario	Ausfälle Altbestand	Zuwachs Altbestand	Einwuchs Lücken	Einwuchs Altbestand
1, 2b, 3b	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	5m ³ /ha/Jahr	Ab 2050 300 Stk/ha, Ta, Bu, B'Ah	Ab 2060 ca. 100 Stk/ha, Bu, Ta, B'Ah gemäss aktuellem Verhältnis, Pflanzung für Samenbäume Li (10 Stk/ha) Ab 2090 200 Stk/ha, Li, Ki, Bi, Nussbaum (je ein Viertel)

2a	BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Bu, Fi, Lä, B'Ah: Bis 2050: 20% Bis 2060: 30%		Ab 2050 300 Stk/ha, Ab 2090 300 Stk/ha, Li, Bi, Nussbaum	Ab 2050 100 Stk/ha, nur Bu, Pflanzung für Samenbäume Li (10 Stk/ha) 2089 200 Stk/ha, Li, Nussbaum, Bi (je ein Drittel)
3a	Bis 2070: 30% Bis 2080: 20% Bis 2090: 90%		Ab 2080 300 Stk/ha, nur Bu, Pflanzung für Samenbäume Li (10 Stk/ha)	Ab 2080 100 Stk/ha, nur Bu, Pflanzung für Samenbäume Li (10 Stk/ha)
4a	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	Bis 2040: 5m3/ha/Jahr	Ab 2100 100 Stk/ha Bi	
4b	BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Bu, Fi, Lä, B'Ah: Bis 2030: 20% Bis 2040: 50% Bis 2050: 50% Bis 2060: 30% Bis 2070: 90% (nur Fi)	Bis 2060: 4m3/ha/Jahr Bis 2120: 3m3/ha/Jahr	Ab 2060 300 Stk/ha, gepflanzte Ki, Li, T'Ei, F'Ah (50 Stk/ha) + 100 Bi	Ab 2060 100 Stk/ha, gepflanzte Ki, Li, T'Ei, F'Ah (50 Stk/ha) + 100 Bi Ab 2070: 100 Stk/ha, gepflanzte Ki, Li, T'Ei, F'Ah (50 Stk/ha) + 100 Bi

Obermontan frisch (950 - 1200 m ü. M.)
Generelle Annahmen

- Klimabedingt starker Rückgang im Altbestand in den nächsten ca. 60 Jahren bei der Fichte
- Zuwachs geht bei starkem Klimawandel nur leicht zurück
- Verjüngung: ab dem Zeitpunkt, zu welchem grössere Ausfälle im Altbestand zu erwarten sind (d.h. ab ca. 2050) kann sich die Verjüngung innerhalb von 40 Jahren grossflächig etablieren.

Szenario	Ausfälle Altbestand	Zuwachs Altbestand	Einwuchs Lücken	Einwuchs Altbestand
1, 2b, 3b	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall BHD > 24cm Ausfall bei Fi	7m3/ha/Jahr	Ab 2050 ca. 300 Stk/ha, Ta, Bu, Fi, B'Ah ab 2090 300 Stk/ha, Ta, Bu, B'Ah, keine Fichte mehr	Ab 2050 100 Stk/ha, Ta, Bu, Fi B'Ah Ab 2090 200 Stk/ha, Ta, Bu, B'Ah keine Fichte mehr
2a	Bis 2049: 20% Bis 2059: 30% Bis 2069: 20%		Ab 2050 ca. 300 Stk/ha,	Ab 2050 100 Stk/ha, nur Bu Ab 2090 200 Stk/ha, nur Bu
3a			Ab 2080 60 300 Stk/ha, Bu	Ab 2080 100 Stk/ha, Bu
4a	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	Bis 2040: 7m3/ha/Jahr	Ab 2100 ca. 300 Stk/ha Bu, Bi	Ab 2100 100 Stk/ha Bu
4b	BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Bu, Fi: Bis 2050: 20% Bis 2050: 30% Bis 20560 30% Bis 2070: 30% Bis 2080: 20% Bis 2090: 10%	Ab 2040 6m3/ha/Jahr	Ab 2070 300 Stk/ha Ta, Bu, Bi	Ab 2070 300 Stk/ha Ta, Bu Ab 2090 150 Stk/ha, Ta, Bu

Hochmontan (> 1200 m ü. M.)


Generelle Annahmen

- Je nach Stärke des Klimawandels sind die Änderungen in der Baumartenzusammensetzung nicht sehr stark (Klimawandel mässig) bis sehr radikal (Klimawandel stark) → die Unsicherheiten sind also sehr gross
- Bei mässigem Klimawandel wäre keine Anpassung notwendig, und aktuell sind noch keine Baumarten, welche unter starkem Klimawandel als zukunftsfähig erwartet werden, wachstumsfähig auf dieser Höhe, somit sind die Möglichkeiten für eine Anpassung noch sehr eingeschränkt
- Die Fichte bekommt in beiden Szenarien verstärkt Probleme aufgrund von Borkenkäfer, in Szenario 4 sind auch bei Buche und Tanne Ausfälle zu erwarten.

Szenario	Ausfälle Altbestand	Zuwachs Altbestand	Einwuchs Lücken	Einwuchs Altbestand
1, 2b, 3b	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	6m ³ /ha/Jahr	Ab 2050 300 Stk/ha, Fi-Anteil halbiert	Ab 2050 150 Stk/ha, Fi, Ta, Lä, B'Ah Ab 2090 150 Stk/ha, Fi-Anteil halbiert
2a	BHD > 24cm Ausfall nur bei Fi Bis 2049: 10% Bis 2059: 30%		Ab 2050 300 Stk/ha, Fi-Anteil halbiert, Rest Lä	Ab 2050 150 Stk/ha, Fi, Lä Ab 2089 200 Stk/ha, Fi-Anteil halbiert, Rest Lä
3a	Bis 2069: 20%		Ab 2080 300 Stk/ha, Fi, Lä	Ab 2080 150 Stk/ha, Fi, Lä
4a	BHD < 24cm: pro Klassenwechsel 20% Ausfall	Bis 2039: 6m ³ /ha/Jahr	Ab 2100 300 Stk/ha, Bi	Ab 2100 150 Stk/ha, Bi
4b	BHD > 24cm Ausfall bei Ta, Lä, Fi: Bis 2050: 20% Bis 2060: 30% Bis 2070: 30% Bis 2080: 20%	Ab 2040 5m ³ /ha/Jahr	Ab 2050 300 Stk/ha B'Ah, Bi, Vb, Mehlbeere (je ein Viertel)	Ab 2050 150 Stk/ha, B'Ah, Bi, Vb (je 30%), Mehlbeere (10Stk/ha) 2090 150 Stk/ha, B'Ah, Bi, Vb, Mehlbeere (je ein Viertel)

Beilage 3: Annahmen für die Abschätzung der Kosten für Wildschadenverhütungsmassnahmen

Tab. 12: Annahmen für die Abschätzung der Kosten für Wildschadenverhütungsmassnahmen

Szenario	Generell	submontan	obermontan trocken	obermontan frisch	hochmontan
SZ 1	- Pflanzungen Anpassung Klimawandel	- 30 Stk/ha, resp. + 20% wegen Ausfall trotz chem. Schutz	- 10 Stk/ha Linde, resp. + 20% wegen Ausfall trotz chem. Schutz	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich
	- alle eingebrachten BA werden chemisch geschützt	- 36 Stk/ha (30*1.2) - davon nur 75% wegen Stammzahlabnahme - während 10 Jahren	- 12 Stk/ha (10*1.2) - davon nur 75% wegen Stammzahlabnahme - während 10 Jahren		
SZ 2a	Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich				
SZ 2b	- Pflanzungen Anpassung Klimawandel	- 30 Stk/ha T'Ei, S'Ah, F'Ah	- 10 Stk/ha Linde	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich
	- Pflanzungen werden mit Einzelschützen geschützt	- Einzelschütze für Pflanzungen	- Einzelschütze für Pflanzungen		
	- Naturverjüngung der verbissempfindlichen (und zukunftsfähigen) HBA und NBA werden überall chemisch geschützt	- Verbissemmpfindliche Naturverjüngung: - Eibe - Kirsche --> 2 von 5 BA (je gleiche Anteile) - Zielstammzahl: 270Stk nach 40 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 1080, + 40% wegen chem. Schutz = 1512 Stk/ha, über 10 Jahre -12.5%, davon 2/5 = 529	- Verbissemmpfindliche Naturverjüngung: - Ki, Linde, Mehlbeere, Eibe 10% - Altbestand: Zielstammzahl 100Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 400, + 40% wegen chem. Schutz = 560 Stk/ha, - 12.5% über 10 Jahre, davon 10% = 49 Stk - Lücken: Zielstammzahl 300Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 1200, + 40% wegen chem. Schutz = 1680 Stk/ha, davon 10% = 147 Stk	- Verbissemmpfindliche Naturverjüngung: - Ta 59% - B'Ah 1% - Altbestand: Zielstammzahl 100Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 400, + 40% wegen chem. Schutz = 560 Stk/ha, - 12.5% über 10 Jahre, davon 60% = 294 Stk - Lücken: Zielstammzahl 300Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 1200, + 40% wegen chem. Schutz = 1680 Stk/ha, - 12.5% über 10 Jahre davon 60% = 882 Stk	- Verbissemmpfindliche Naturverjüngung: - Ta 64% - B'Ah 1% - Altbestand: Zielstammzahl 100Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 400, + 40% wegen chem. Schutz = 560 Stk/ha, - 12.5% über 10 Jahre, davon 65% = 319 Stk - Lücken: Zielstammzahl 300Stk nach 30 Jahren, STZ-Abnahme 75% = 1200, + 40% wegen chem. Schutz = 1680 Stk/ha, - 12.5% über 10 Jahre, davon 65% = 956 Stk
	- Vereinzelt Pflanzungen von HBA in Lücken wegen fehlender Vorverjüngung (Ta wegen Verbiss, Bu wegen wenig Samenbäumen und deshalb Verbiss)	- keine "Lücken" (Auflösung einzelbaumweise) (obwohl in GIS eingezeichnet!)	- "vereinzelt" = 5% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren, d.h. 1200 im Jungwuchs), d.h. total 60 Stk/ha	- "vereinzelt" = 5% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren, d.h. 1200 im Jungwuchs, d.h. total 60 Stk/ha)	- "vereinzelt" = 5% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren, d.h. 1200 im Jungwuchs, d.h. total 60 Stk/ha)
	- Einzelschütze für Pflanzungen in Lücken	-keine	60 Stk/ha	60 Stk/ha	60 Stk/ha
SZ 3a	Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich				
	Etappe 1	70 Jahre --> 50 Jahre rechnen	60 Jahre --> 50 Jahre rechnen	60 Jahre --> 50 Jahre rechnen	60 Jahre --> 50 Jahre rechnen
	Etappe 2	0 Jahre	20 Jahre	20 Jahre	20 Jahre
SZ 3b	- Pflanzungen Anpassung Klimawandel	- 30 Stk/ha	- 10 Stk/ha Linde	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich	Noch keine Anpassung an Klimawandel möglich
	- Pflanzungen von HBA in Lücken und im Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung	- keine "Lücken" (Auflösung einzelbaumweise), 100Stk/ha im Altbestand	- 100% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren), d.h. total 300 Stk/ha auf Lückenfläche, 100Stk/ha im Altbestand		
	-Kleinzäune für alle BA				
SZ 4a	Anpassung an Klimawandel verbissbedingt nicht möglich				Anpassung an Klimawandel aktuell nicht möglich
SZ 4b	- Pflanzungen Anpassung Klimawandel	- 30 Stk/ha Traubeneiche, Spitzahorn, Feldahorn	- 10 Stk/ha Linde	- 10 Stk/ha Linde, Kirsche	Aktuell keine Massnahmen zur Anpassung an Klimawandel möglich
	- Pflanzungen von HBA in Lücken und im Altbestand wegen fehlender Vorverjüngung	- keine "Lücken" (Auflösung einzelbaumweise), 100Stk/ha im Altbestand	- 100% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren), d.h. total 300 Stk/ha auf Lückenfläche, 100Stk/ha im Altbestand	- 100% der Zielstammzahl (300 Stk nach 30 Jahren), d.h. total 300 Stk/ha auf Lückenfläche, 100Stk/ha im Altbestand	
	-Kleinzäune für alle gepflanzten Bäume				



Beilage 4: Abschätzung Sturzrisiken

1. Risikoreduktion

Die Schutzwirkung der verschiedenen Waldszenarien wurde basierend auf ihrer Reduktion des Steinschlagrisikos quantifiziert (d.h. als vermiedene Kosten). Die Risikoreduktion entspricht dabei der Differenz zwischen dem Risiko ohne und dem Risiko mit Wald. Das Steinschlagrisiko ist definiert als die jährlich erwarteten Schäden aller möglicher Schadensereignisse (Agliardi et al. 2009; Bründl. 2009). In der Realität variieren die durch Steinschlag verursachten Schäden stark von Jahr zu Jahr. Der jährlich erwartete Schaden ist jedoch ein nützlicher Indikator für eine längerfristige Betrachtung. Das Risiko wurde gemäss der von Moos et al. (2018) vorgeschlagenen Methode für Gebäude und Strassen unterhalb des Pizogelwaldes berechnet. Für ein spezifisches Objekt / eine Person i (nachfolgend als «Objekt i » bezeichnet) und eine Blockgrösse j wird das Risiko $R_{i,j}$ definiert als Produkt der *Ausbruchshäufigkeit* der Blockgrösse j ($P_{aus,j}$), der Wahrscheinlichkeit, dass der Block j das Objekt i erreicht (*Erreichenswahrscheinlichkeit* $P_{err,i,j}$), dem Wert W_i des Objekts, seiner *Präsenzwahrscheinlichkeit* $P_{prä,s,i}$ und seiner *Vulnerabilität* $V(I)_{i,j}$ (auch als Schadenempfindlichkeit oder Letalität bei Personen bezeichnet). Die Vulnerabilität ist abhängig von der *Intensität* des Aufpralls (quantifiziert als kinetische Energie). Das Risiko wird schliesslich über alle möglichen Blockaufprälle $n_{i,j}$ der Blockgrösse j gemittelt:

$$R_{i,j} = P_{aus,j} \times P_{err,i,j} \times W_i \times P_{prä,s,i} \times \frac{1}{n_{i,j}} \sum_{n_{i,j}} V(I)_{i,j} \quad \text{Eq. 1}$$

Das gesamte Risiko R ist die Summe der Risiken über alle Objekte i (gesamtes Schadenpotential (sp)) und über alle erwarteten Blockgrössen j (bg):

$$R = \sum_{i=1}^{sp} \sum_{j=1}^{bg} R_{i,j} \quad \text{Eq. 2}$$

Der Wald kann einerseits die Erreichenswahrscheinlichkeit ($P_{err,i,j}$) und andererseits die Energie und damit die Intensität (I) eines Blockes reduzieren. Diese beiden Effekte wurden mit Steinschlagsimulationen quantifiziert.

1.1. Ablösegebiet

Beim betrachteten Ablösegebiet handelt es sich um Mesozoischen Bündnerschiefer. Es besteht aus Wechsellagerungen von dünnbankigen Sandkalken, tonigen Kalkschiefern, Tonschiefern und Kieselkalken. Die Schieferungsflächen fallen mässig steil gegen SE bis SSE ein (Baugeologie, 2016; Swisstopo, 2020). Die Prozessquelle wird nicht durch eine homogene Felswand, sondern mehrere kleine, über den Hang verteilte Felsbänder gebildet (Abb. 1 & 2).

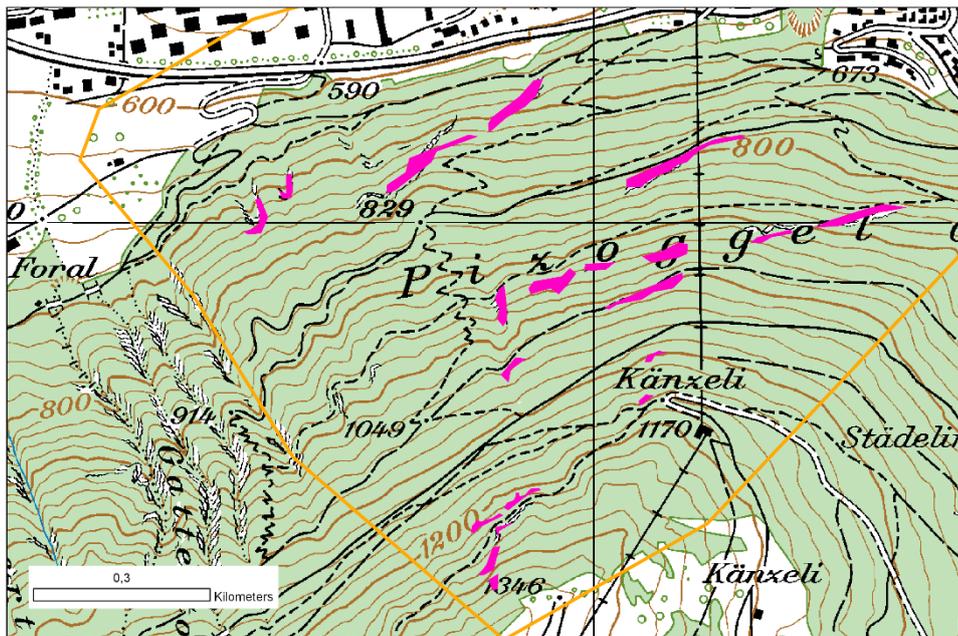


Abb. 1: Betrachtetes Ablösegebiet (pink) im Pizogelwald.



Abb. 2: Beispiel eines Felsbandes im Pizogelwald.

1.2. Ausbruchsszenarien (Ausbruchshäufigkeit)

Es wurden vier Ausbruchsszenarien mit Wiederkehrperioden (WP) von 10, 30, 100 und 300 Jahren festgelegt (Szenarienwahrscheinlichkeit P_{sz} ; Tab. 2). Die jeweiligen Blockgrößen wurden basierend auf StorMe-Ereignissen (Tab. 1), kartierten Blöcken im Feld («stumme Zeugen»; Abb. 3) und in Anlehnung an die Szenarien der Gefahrenkarte (Tab. 3; Baugeologie 2016) festgelegt. Da kleine Steine ($<0.5 \text{ m}^3$) mehrmals jährlich auf den Forststrassen vorgefunden werden, wird davon ausgegangen, dass die sich jährlich mehrere kleine Blöcke ablösen. Entsprechend wurde für die häufigeren Szenarien eine variierende Anzahl Blöcke angenommen («Ereignistyp» ET; Tab.



2), welche in der Risikoberechnung probabilistisch mittels einer Monte-Carlo-Simulation berücksichtigt wurde. Ein $ET > 1$ muss nicht unbedingt bedeuten, dass die Blöcke gleichzeitig, sondern innerhalb des Szenarien-Zeitraums (z.B. 40 Blöcke innerhalb von 10 Jahren) ausbrechen. Die Risikoberechnung wurde jeweils 50 Mal wiederholt und bei jeder Wiederholung wurde die Anzahl ausbrechender Blöcke zufällig gezogen. Anschliessend wurde für jedes Szenario das mittlere Risiko der 50 Simulationen berechnet. Durch die Variation der Anzahl ausbrechender Blöcke soll die Unsicherheit bezüglich der Ausbruchswahrscheinlichkeit zumindest teilweise abgebildet werden. Die Ausbruchshäufigkeit $P_{aus,j}$ einer Blockgrösse j berechnet sich entsprechend als Produkt der Szenarienwahrscheinlichkeit $P_{sz,j}$ und des Ereignistyps ET_j :

$$P_{aus,j} = P_{sz,j} \times ET_j$$

Die Anzahl Blöcke (ET_i) wurde gutachterlich bestimmt und die resultierende Häufigkeitsverteilung («power law») (Abb. 3) mit Daten aus der Literatur für vergleichbare Steinschlag-Ausbruchsgebiete validiert. Mit dem angenommenen Modell haben Blöcke $< 0.5 \text{ m}^3$ eine Ausbruchshäufigkeit von $3-5 \text{ a}^{-1}$ und Blöcke $> 3 \text{ m}^3$ von ca. $1/1000 \text{ a}^{-1}$.

Tab. 1: Ereignisse aus der StorMe-Datenbank. Aus: Baugologie, 2016 (nicht veröffentlicht).

Sturzmasse	Abrissgebiet	Ablagerungsort	Zeitraum	Betroffene EB	Quelle
Stein, $< 0.5 \text{ m}$	unbekannt	Kantonsstrasse	2015	2016 Stadt Chur	S. Flütsch, TBA GR
Mehrere Steine, $< 0.5 \text{ m}$	unbekannt	sämtliche Forststrassen	hauptsächlich jeweils im Frühling	2016 Stadt Chur	T. Jäger, Revierförster
Mehrere Steine, $< 0.5 \text{ m}$	unbekannt	Steinschlag-schutznetz	1987 - 2004	2016 Stadt Chur	[1.2.8]

Tab. 2: In der Risikoanalyse berücksichtigte Ausbruchsszenarien. Die Anzahl Blöcke pro Ereignis wurde in der Risikoanalyse variiert.

Wiederkehrperiode WP [J.]	Szenarienwahrscheinlichkeit $P_{sz} [\text{a}^{-1}]$	Blockvolumen-Klasse [m ³]	Anzahl Blöcke pro Ereignis (Ereginistyp ET)
10	0.067	0.05-0.1	30-50
30	0.023	0.1-0.5	10-40
100	0.007	0.5-1.0	1-3
300	0.003	1.0-4.0	1



Abb. 3: Beispiele von Stummenzeugen.

Tab. 3: In der Gefahrenkarte berücksichtigte Szenarien. Aus: Baugeologie, 2016 (nicht veröffentlicht).

Homogenbereich	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis	>300-jährliches Ereignis
1	--	0.3 x 0.2 x 0.2 m ≈ 0.01 m ³	0.7 x 0.5 x 0.3 m ≈ 0.1 m ³	1.2 x 1.0 x 0.8 m ≈ 1.0 m ³
2	0.6 x 0.4 x 0.2 m ≈ 0.05 m ³	0.7 x 0.5 x 0.3 m ≈ 0.1 m ³	0.8 x 0.7 x 0.4 m ≈ 0.2 m ³	1.2 x 1.0 x 0.8 m ≈ 1.0 m ³
3	0.6 x 0.4 x 0.2 m ≈ 0.05 m ³	0.8 x 0.7 x 0.4 m ≈ 0.2 m ³	1.4 x 0.7 x 0.5 m ≈ 0.5 m ³	4.0 x 1.0 x 1.0 m ≈ 4.0 m ³

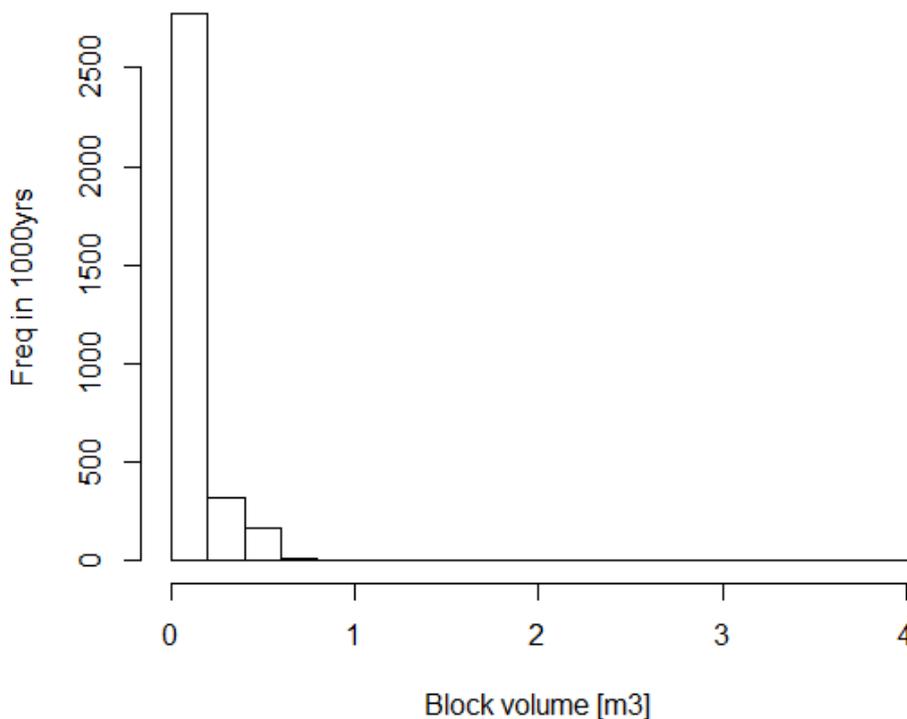


Abb. 4: Simulierte Ausbruchshäufigkeit in 1000 Jahren für die berücksichtigten Blockvolumen (4 Szenarien: 0.05-0.1 m³, 0.1-0.5 m³, 0.5-1.0 m³, 1.0-4.0 m³).



1.3. Steinschlagsimulationen

Steinschlag-Trajektorien wurden mit dem dreidimensionalen Modell RockyFor3D (Dorren, 2015) durchgeführt. Es handelt sich dabei um ein sogenanntes probabilistisch prozess-basiertes Modell, welches Blöcke fliegend, hüpfend und rollend in Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit, des Bodentyps und stehender oder liegender Bäume simuliert. Der Bodentyp und die Oberflächenrauigkeit wurden im Gelände für homogene Gebiete kartiert (Abb. 5 & 6). Dabei wird zwischen sieben verschiedenen Bodentypen unterschieden (Tab. 3). Die Oberflächenrauigkeit wird als mittlere Hindernishöhe, die ein Block in 70%, 20% und 10% der Aufprälle antrifft, quantifiziert. Bäume werden räumlich explizit berücksichtigt und die Ablenkung sowie der Energieverlust eines Blockes nach einem Baumaufprall wird basierend auf dem BHD und einem empirischen, artenspezifischen «Baumfaktor» berechnet. Für den aktuellen Waldbestand sowie die Waldszenarien wurden «Treefiles» mit zufälligen Baumpositionen innerhalb des bewaldeten Gebietes generiert (Beilage 3).

Das Ausbruchsgebiet wurde basierend auf der Hangneigung ($\geq 50^\circ$) und dem in der Gefahrenkarte berücksichtigten Ausbruchsgebiet festgelegt und im Feld verifiziert. Die Blockgrösse wurde für jede Startzelle in der jeweiligen Blockgrößen-Klasse der Ausbruchsszenarien zufällig gezogen. Es wurden 100 Simulationen pro Startzelle durchgeführt (total 507'200 Simulationen pro Blockgrösse). Die Blöcke wurden mit einer rechteckigen Form mit gleichen Kantenlängen simuliert (sh. dazu Vergleich in Anhang 1.1). Gebäude wurden als «Steinschlagnetze» mit einer Energieaufnahmekapazität von 600 kJ und einer Höhe von 8 m berücksichtigt.

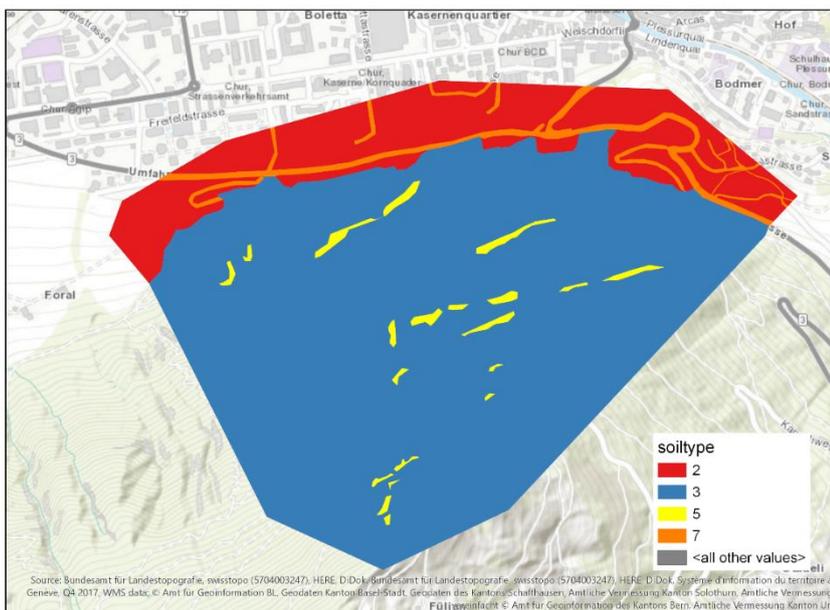


Abb. 5: Verwendete Bodentypen in den RockyFor3D-Simulationen.



Abb. 6: Rauigkeit in 10% der Fläche. Für die gleiche Fläche wurden Rauigkeiten von 0.05 m in 20% und 0 m in 70% der Fläche angenommen.

Bodentyp	Beschreibung Untergrund
0	Fluss, Sumpf oder Material, in welches Block komplett eindringen kann
1	Feines Bodenmaterial (Tiefe > ~1m)
2	Feines Bodenmaterial (Tiefe < 1m) oder Sand-/ Kiesgemisch im Tal
3	Geröll ($\varnothing < \sim 10$ cm); oder mittlerer kompakter Boden mit kleinen Gesteinsteilen; oder Forststrasse
4	Talus ($\varnothing > \sim 10$ cm): kompakter Boden mit grossen Gesteinsteilen
5	Anstehendes Gestein mit dünnem, verwittertem Material oder Bodendecke
6	Anstehendes Gestein
7	Asphaltstrasse

Tab. 3: Die von RockyFor3D verwendeten Bodentypen (nach Dorren, 2016).

1.4. Technische Schutzmassnahmen

Am Hangfuss, oberhalb der Südumfahrung Chur, befindet sich ein ca. 440 m langes und 3 m hohes Steinschlagschutznetz. Seine Energieaufnahmekapazität wird auf 100 kJ geschätzt (Baugeologie, 2016). In dieser Studie wurde die Schutzwirkung des Netzes nicht berücksichtigt.

1.5. Eintretenswahrscheinlichkeit



Basierend auf der Ausbruchswahrscheinlichkeit und der Erreichenswahrscheinlichkeit lässt sich die Eintretenswahrscheinlichkeit der berücksichtigten Blockgrössenszenarien an einem Objekt bestimmen. Bei der Kantonsstrasse beträgt sie zwischen 0.2 a-1 für Volumen zwischen 0.05 und 0.1 m³ (Abb. 6) und 0.002 a-1 (Volumen 1.0-4.0 m³). Somit haben Blöcke < 0.5 m³ auf der Kantonsstrasse eine Wiederkehrperiode von 5-10 Jahren. Dies erscheint plausibel, da 2015 ein Block auf der Strasse gelandet ist und seit 1987 mehrere Blöcke im Steinschlagnetz lagen (Netz in dieser Studie nicht berücksichtigt). Bei der obersten Häuserzeile unterhalb der Strasse ist die Eintretenswahrscheinlichkeit deutlich tiefer (Wiederkehrperiode zwischen 150 und 500 Jahren).

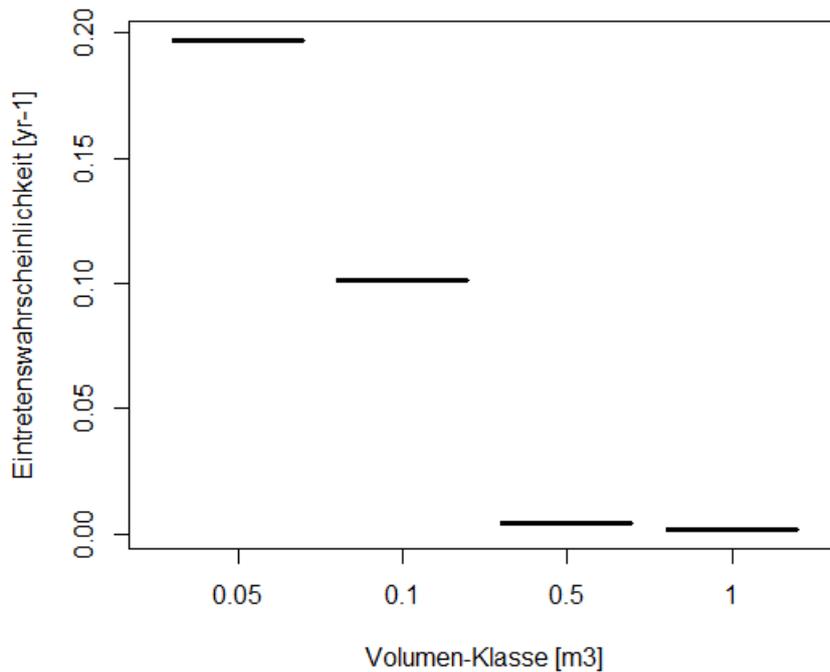


Abb. 7: Eintretenswahrscheinlichkeit auf der Kantonsstrasse pro Blockvolumenklasse.

1.6. Schadenpotenzial

Als Schadenpotenzial wurden die Kantonsstrasse sowie kleinere Gemeindestrassen und die Gebäude unterhalb des Hanges berücksichtigt. Die Objektkategorie und die Belegung wurden basierend auf Daten des Bundesamts für Statistik (BFS, 2018) bestimmt und in einer Feldbegehung validiert. Drei Mehrfamilienhäuser wurden basierend auf der neusten topographischen Karte (1:25'000) ergänzt. Objektwerte sowie Vulnerabilitäten der Objekte und Personen für die verschiedenen Intensitätsklassen wurden basierend auf EconoMe-Standardwerten (EconoMe, 2020) festgelegt (Tab. A2.1 & A2.3). Die Wahrscheinlichkeit, dass es im Fall einer Strassenverschüttung zu einem Auffahrunfall kommt (P_{auffahr}), wurde als 0.15 angenommen (ASTRA, 2012). Die Dauer einer Sperrung wurde ebenfalls gemäss ASTRA (2012) in Abhängigkeit der Intensität bestimmt (Tab. A2.2). Die Kosten einer Sperrung wurden anhand von Umfahrungskosten mittels Google Maps hergeleitet (Methode gemäss EconoMe 3.0).

2. Resultate Risikoanalyse

2.1. Eintretenswahrscheinlichkeit

Die Eintretenswahrscheinlichkeit auf der Kantonsstrasse nimmt für alle Szenarien in 50 Jahren insbesondere für die kleinen Blockvolumen (< 0.5 m³) zu (Abb. 8). Die stärkste Zunahme ist beim Szenario 4a_50 zu beobachten: Die Wiederkehrperiode eines Blockes von 0.05-0.1 m³ verringert sich von ca. 5-10 Jahren im Szenario 1_2b_3b_0 auf ca. 1 Jahr im Szenario 4a_40.

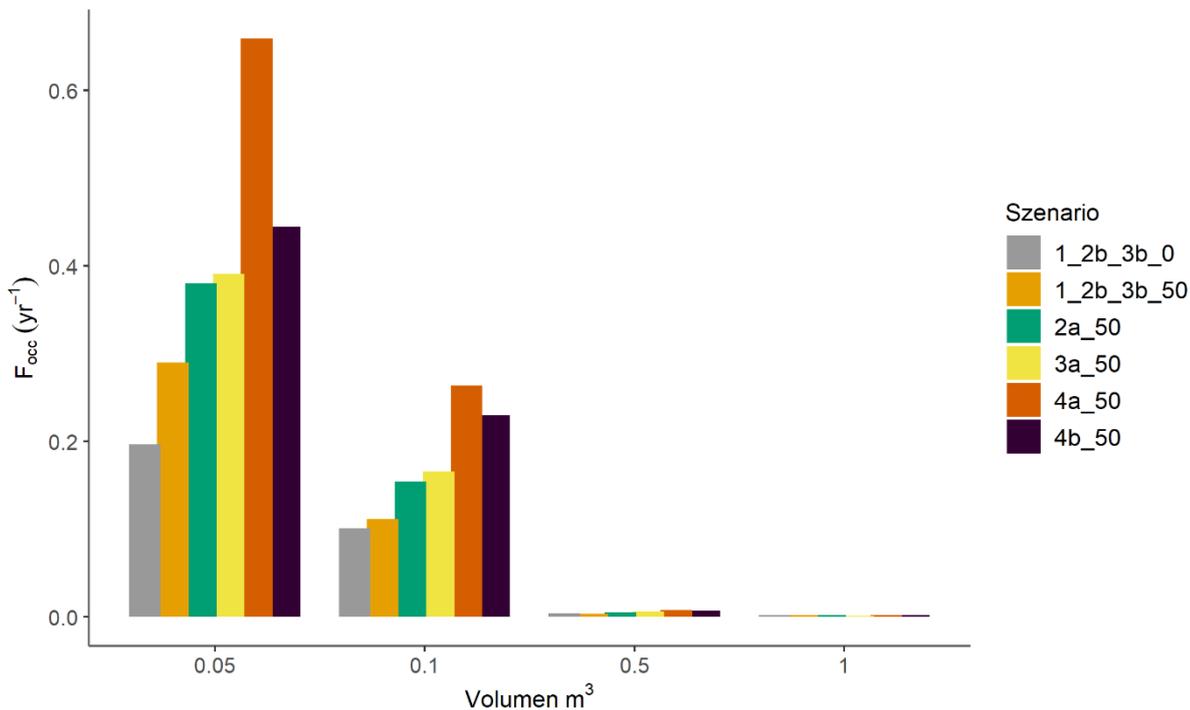


Abb. 8: Eintretenswahrscheinlichkeit auf der Kantonsstrasse pro Waldszenario und Blockvolumenklasse.

2.2. Risiko

Mit dem heutigen Waldbestand (1_2b_3b_0) beträgt das Steinschlagrisiko für Siedlung und Strasse rund 16'400 CHFa⁻¹ (Abb. 9 & Abb. 11). Zu einem Grossteil wird es durch Personen- und Infrastrukturschäden an Gebäuden und auf der Strasse verursacht (Abb. 10). Bei tragbarem Verbiss beziehungsweise starkem Schutz vor Verbiss verändert sich das Risiko in 50 Jahren kaum (1_2b_3b_50). Ohne Schutz steigt das Risiko bei mässigem Klimawandel (2a_50 / 3a_50) um ca. 12'000 bzw. 15'000 CHFa⁻¹ an. Bei starkem Klimawandel und ohne Schutz (4a_50) verdreifacht sich das Risiko auf rund 59'500 CHFa⁻¹ (Abb. 9 und Abb. 12). Ohne Wald beträgt das Risiko ca. 116'800 CHFa⁻¹.



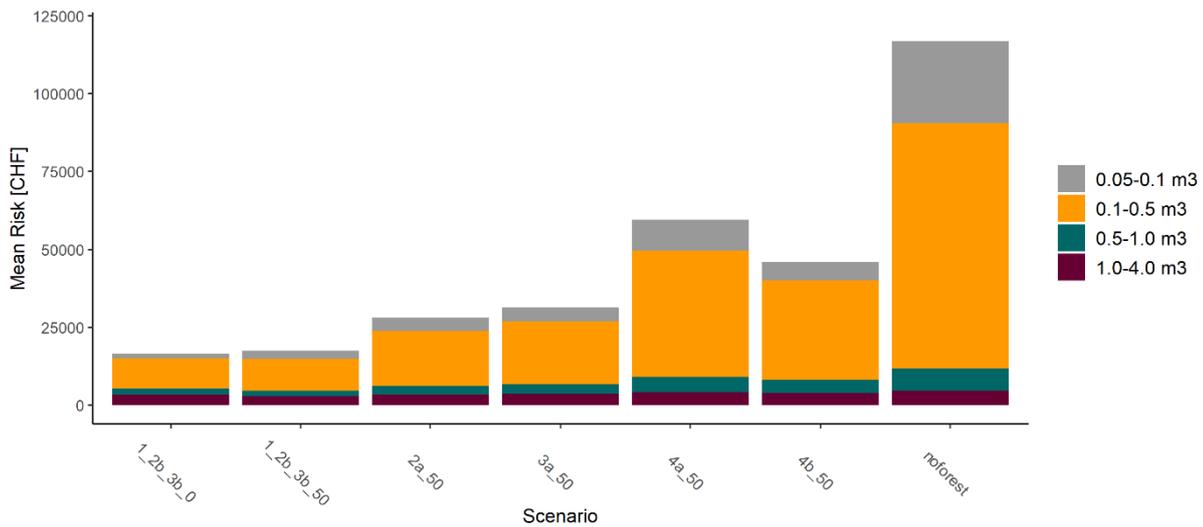


Abb. 9: Jährliches Steinschlagrisiko für das betrachtete Schadenpotenzial für die betrachteten Szenarien nach 50 Jahren (_50) sowie die Situation ohne Wald, aufgeteilt nach Blockgrößen-Szenarien.

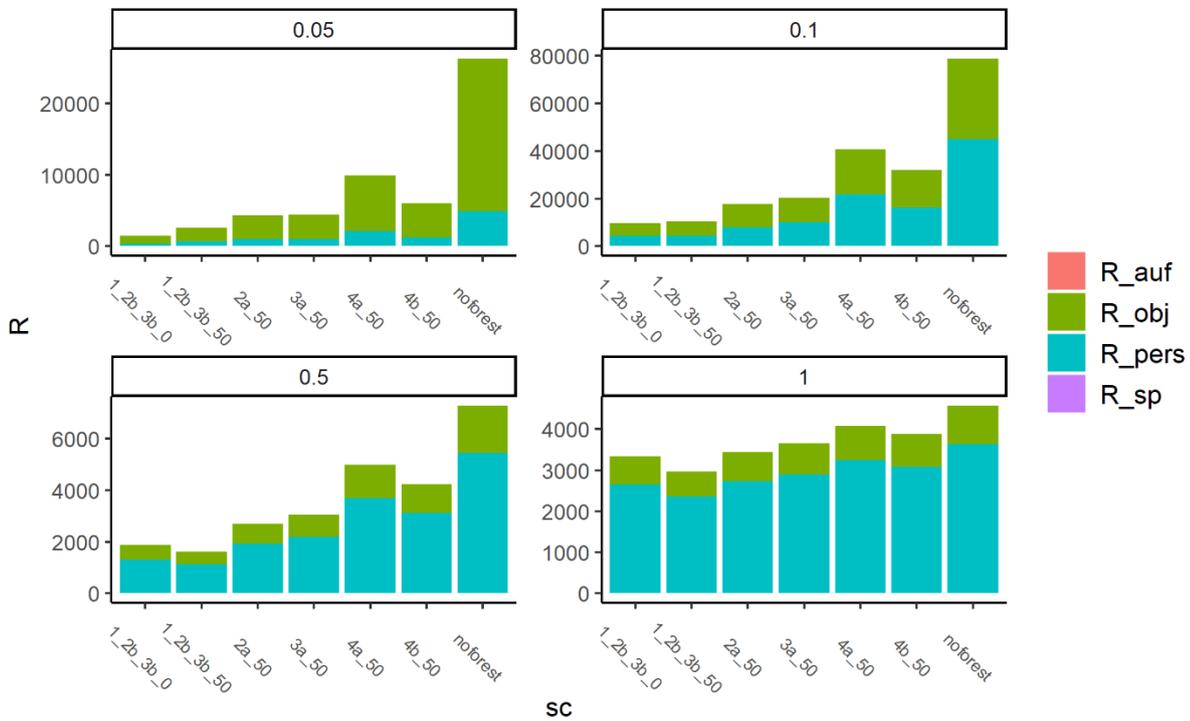


Abb. 10: Risiko (R) pro Blockvolumen-Szenario und Waldszenario, aufgeteilt nach Schadensbild. R_auf= Auffahrnfall; R_obj= Objektschäden; R_pers= Personenschäden; R_sp= Sperrung nach Ereignis.

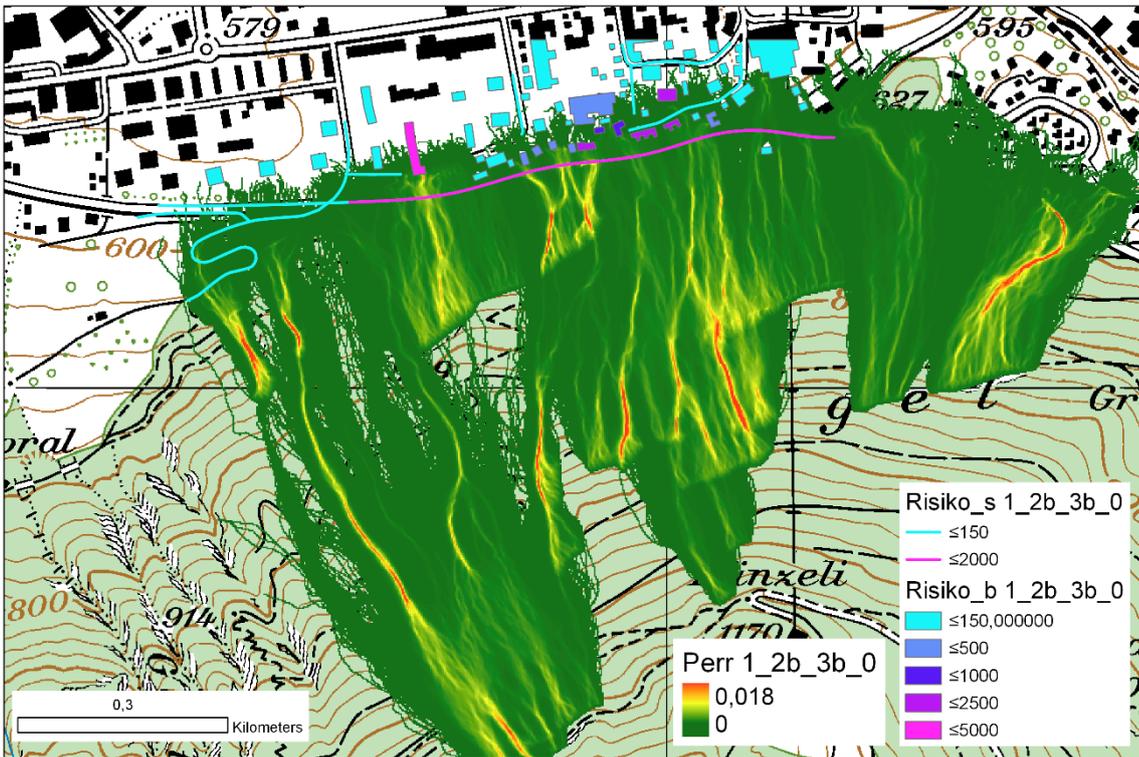


Abb. 11: Jährliches Risiko (CHF/Jahr) pro Gebäude und Strassenabschnitt für das Szenario 1_2b_3b_0.

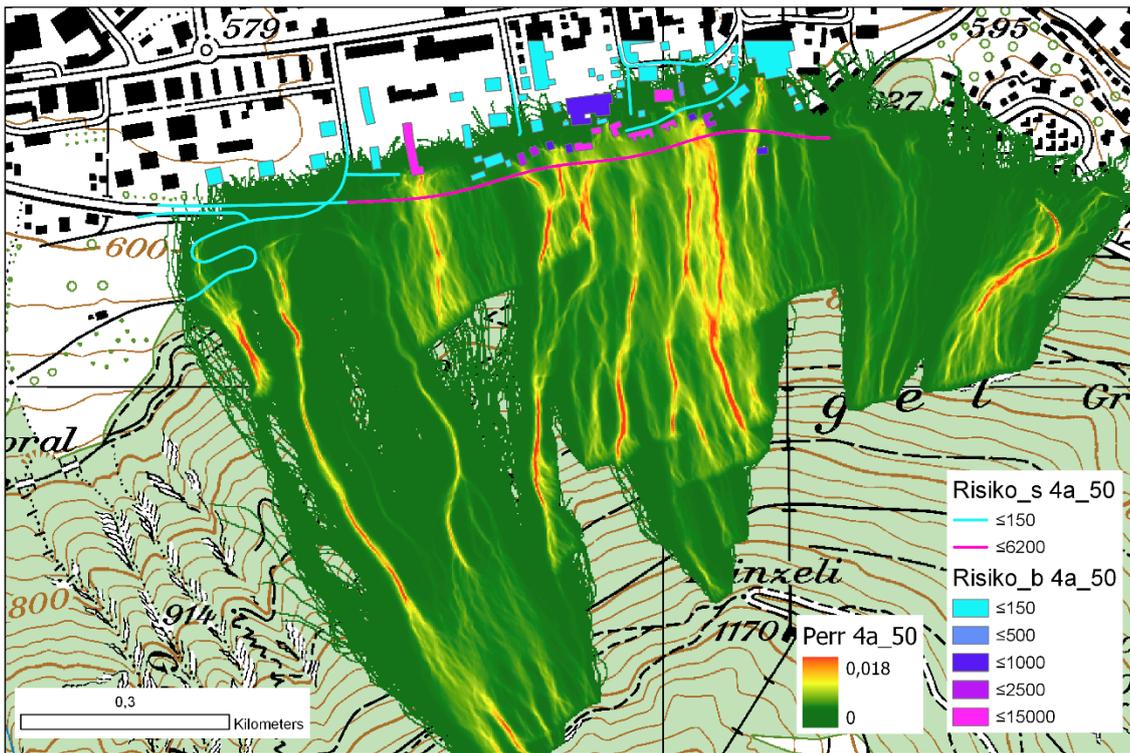


Abb. 12: Jährliches Risiko (CHF/Jahr) pro Gebäude und Strassenabschnitt für das Szenario 4a_50.



3. Literatur

- Agliardi F, Crosta GB, Frattini P. 2009. *Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques*. Natural Hazards and Earth System Science 9: 1059–1073.
- ASTRA 2012. *Naturgefahren auf den Nationalstrassen: Risikokonzept*. Bundesamt für Strassen ASTRA. Bern.
- Baugeologie und Geo-Bau-Labor AG 2016. *Überarbeitung der Gefahrenkarte Sturz – Stadt Chur, Gebiet Pizokel*. Amt für Wald und Naturgefahren, Tamins. Nicht veröffentlicht.
- BFS 2018. *Gebäude- und Wohnungstatistik (seit 2009)*. Bundesamt für Statistik, Neuchâtel
- Bründl M (ed). 2009. *Risikokonzept für Naturgefahren - Leitfaden*. Nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT: Bern.
- Bründl M, Ettl B, Burkard A, Oggier N, Dolf F, Gutwein P. 2015. *EconoMe - Wirksamkeit und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren*. Formelsammlung. Bundesamt für Umwelt, BAFU. Überarbeitete Version Stand 2020.
- Dorren, L. 2012. *Rockyfor3D (V5.1) enthüllt – Transparente Beschreibung des kompletten 3D-Steinschlagmodells*. ecorisQ Paper (www.ecorisq.org). 32 S.
- EconoMe 2020. EconoMe Objektparameter. Stand 15.09.2020. EconoMe 5.0 – Wirkung und Wirtschaftlichkeit von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, BAFU.
- Moos C, Fehlmann M, Trappmann D, Stoffel M, Dorren L. 2017. *Integrating the mitigating effect of forests into quantitative rockfall risk analysis – Two case studies in Switzerland*. International Journal of Disaster Risk Reduction.
- Swisstopo, 2020. *GeoCover Karte, Blatt 1195 Reichenau* (www.map.geo.admin.ch). Bundesamt für Landestopographie Swisstopo, Wabern.

Beilage 5: Methode zur Simulation der Rutschprozesse

Hangneigung

Um die Hangneigung zu berechnen, wurde ein DHM aus dem Jahr 2013 benutzt mit einer Auflösung von 2 m (swissALTI3D). Gemäss der Vollzugshilfe des Bundes für das Gefahrenmanagement von Hangmuren (BAFU, 2016), ist eine Prozessauslösung von Hangmuren generell ab einem kritischen Hangneigungswinkel von ca. 20° möglich; eine erhöhte Disposition für die Prozessauslösung besteht bei Hangneigungen von 33° bis 38°.

Stumme Zeugen

An den Moräneabhängen in der näheren und weiteren Umgebung des Untersuchungsgebiets gibt es einige stumme Zeugen von ehemaligen Hangmurenereignissen. Einige undeutlich ausgeprägte muldenartige Geländeformen können als ehemalige Ausbruchstelle von Hangmuren interpretiert werden (Abb. 7 links), vor allem in Gerinneabhängen. Im Gebiet gibt es stellenweise untiefe Abschürfungen und Erosionsangriffspunkte, welche ebenfalls als alte Ausbruchstellen gedeutet werden können. Ablagerungen von kürzlichen Ereignissen sind hinter beschädigten Baumstämmen erkennbar (Abb. 7 rechts).



Abbildung 7: Zwei alte Anrisszonen in Gebiet



Abbildung 8: Zwei Stellen wo der flachgründige Boden und die basale Wirkung der Wurzeln deutlich erscheint.



Geologie, Hydrogeologie und Bodeneigenschaften

Der Untersuchungsperimeter im Schwarzwald befindet sich in der Sedimentformation der penninischen Decke mit einem Bündnerschiefer (Malm-Kreide) als Gestein. In vielen steilen Gerinneabhängungen und auf Kuppen ist der Fels sichtbar. Hänge und Mulden sind grösstenteils mit Ablagerungen bedeckt.

Der Boden weist eine mittlere Entwicklung mit Merkmalen von schwacher chemischer Verwitterung im Unterboden (Bv-Horizont) und Anreicherung organischer Substanzen im Oberboden (Ah-Horizont) auf. Die basischen Bedingungen (pH ~ 7), gegeben durch das Gestein sowie die Qualität des Streumaterials, bedingen eine gute biologische Aktivität und damit eine gute Strukturierung des Oberbodens. Der Unterboden ist skelettreich (> 40%), meistens mit Dimensionen < 5 cm. Bis in eine Tiefe von ca. 1 m sind keine Vernässungsmerkmale und keine Tonverlagerung vorhanden. Die Böden sind als Braunerde klassifiziert.

Aus Sicht der Gefahrenbeurteilung ist somit eine gute Durchlässigkeit des gesamten Profils und ein erhöhter Reibungswinkel des Materials im Unterboden (B-C Horizonte) zu erwarten.

Das geologische Substratum hat viele Risse, welche eine gute Durchlässigkeit erlauben. Damit ist die Bildung von Porenwasserdruck auf potentielle Gleitfläche durch 3 Hauptmechanismen zu erwarten:

- Präferenzialer lateraler Abfluss im Bereich des C-Horizontes, dort wo die biologische Aktivität (Wurzel, Bakterien, etc.) stark reduziert ist und die Dichte des Bodens Werte von 1.5-1.6 g/cm³ erreicht.
- Konzentrierter Abfluss an der Oberfläche zwischen Boden und Festgestein
- Exfiltration von Wasser aus Kluftsystemem des Substratum.

Bodenmächtigkeit

Der Boden im Untersuchungsgebiet ist flachgründig (meistens < 2m Mächtigkeit), in Mulden und Hängen steiler als ca. 30° sind deutliche Spuren von Oberflächenerosion zu finden. Gemäß Modellierung sind potentielle Scherflächen von Hangmuren bis 1.6 m Tiefe zu erwarten, abnehmend mit zunehmender Hangneigung. Ab ca. 45° Hangneigung ist die Bodenmächtigkeit < 0.5 m und damit sind keine Hangmuren zu erwarten.

Bodenphysikalische Eigenschaften

Zwei Proben von Bodenmaterial aus dem C-Horizont (potentielle Rutschfläche) wurden im Labor analysiert, um die Textur zu definieren. Das Bodenmaterial wurde als „siltiger Kies mit Sand“ (GM) (effektive Phi=36°, kalibrierte effektive Kohäsion: 1 kPa) klassifiziert. Abbildung 8 zeigt die Resultate der Korngrössenanalyse der zwei Bodenproben. Die Bodenproben wurden auf ca. 760 und 960 m.ü.M und aus einer Tiefe von ca. 1 m entnommen. Beide Proben weisen eine kleine Tonfraktion auf, womit eine niedrige Bodenkohäsion zu erwarten ist.



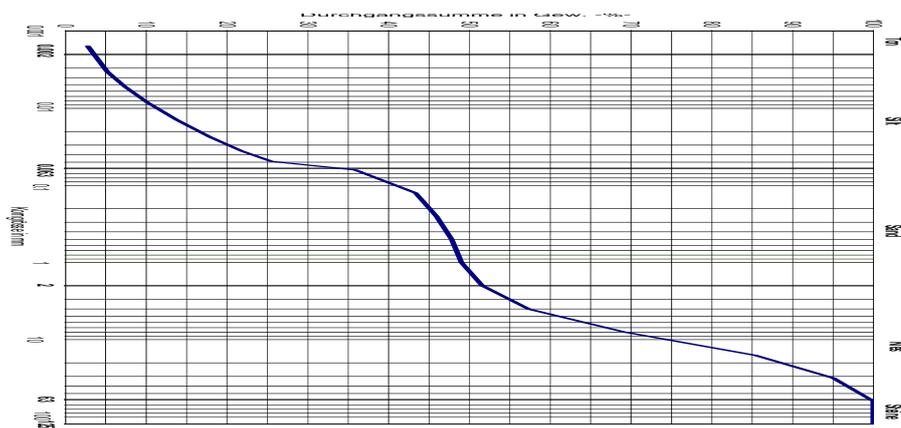


Abbildung 8: Korngrößenverteilung der 2 Bodenproben aus dem B-C-Horizont im Schwarzwald bei Chur.

Die Fließgrenze von 55% zeigt, dass dieser Boden bei diesem Wassergehalt die scheinbare Kohäsion (c_u) verliert. Dieser Wert entspricht der Feldkapazität des Bodens (ab diesem Wassergehalt wird das Wasser in wenigen Stunden vertikal oder lateral drainiert). Die Plastizitätszahl von ca. 20 ist so zu interpretieren, dass sich der Boden plastisch unter dem Einfluss des Wassers in einem relativ grossen Bereich des Wassergehalts (zwischen 35 und 55 %) verhält. Wenn der Wassergehalt unter die Ausrollgrenze (35%) fällt, gibt es auch keine scheinbare Kohäsion. Abbildung 9 zeigt die Klassifikation des Bodenmaterials aufgrund die Konsistenzgrenzen als Funktion des Wassergehalts und der Plastizitätszahl (siehe roter Punkt). Das Material ist als hoch plastisch klassifiziert (MH).

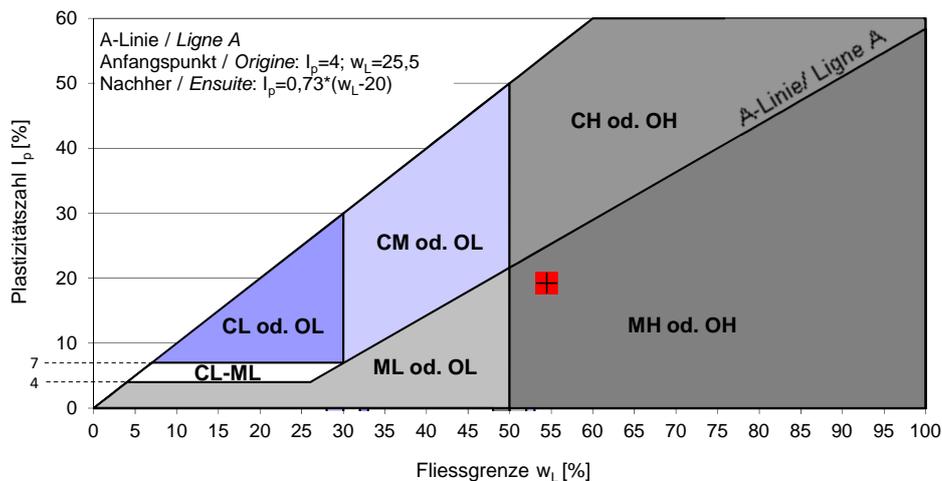


Abbildung 9: Diagramm der Plastizitätszahl

Die scheinbare Kohäsion des Bodens wird im Rutschungssimulationsprogramm SOSlope als Funktion des Wassergehalts nach dem Ansatz von Lu et al. (2010) berechnet. Die Parameter für die Anwendung dieses Ansatzes sind aus der Bodenklassifikation zu eruieren. Abbildung 10 zeigt, gemäß der Klassifikation, welche Werte verwendet werden.



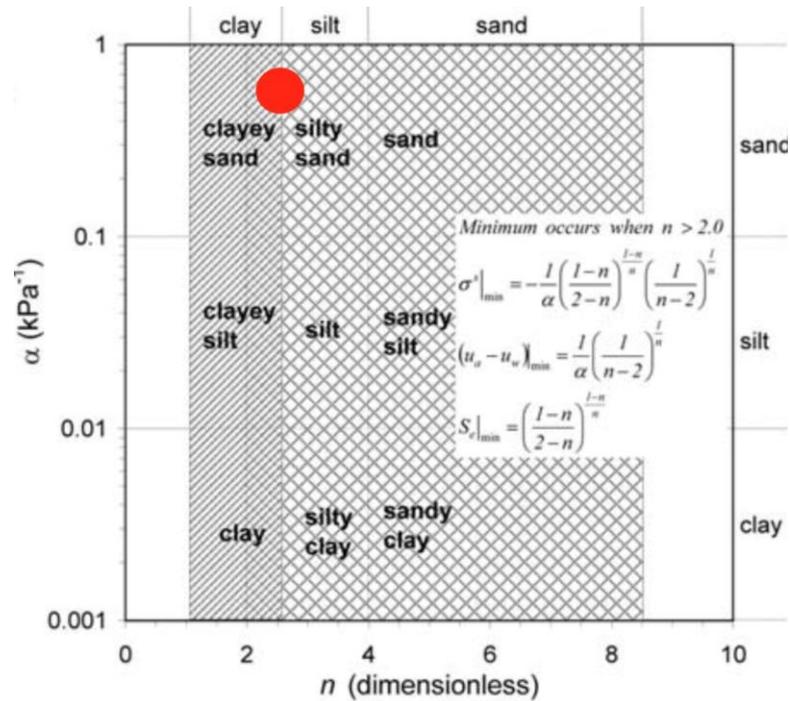


Abbildung 10: Schätzung der Parameter ($\alpha = 0.51$ $1/\text{kPa}$ und $n = 2.6$) für die Modellierung der Saugspannung nach Lu et al. (2010). Der rote Punkt zeigt die Klassifikation des Bodens.

Hydrologie: Niederschlag und Vorfeuchte

Für jede Wiederkehrdauer wurde ein Szenario für eine Niederschlagsdauer-Intensität von 1 Stunde Dauer angenommen, und eine hohe Vorfeuchtigkeit des Bodens (25% Wassergehalt).

Die Niederschlagsintensität für 1 Stunde Dauer und eine 100-jährliche Wiederkehrdauer beträgt 50 mm/h (HADES) und entspricht dem Szenario eines Gewitters in den Sommermonaten, wo die Vorfeuchte durchschnittlich niedrig ist. Die Wahrscheinlichkeit, dass die gleiche Intensität während Perioden mit langandauernden Regen stattfindet, ist als klein einzuschätzen. Dieses Niederschlagsszenario verursacht einen raschen Anstieg des Porenwasserdrucks in den Makroporen im Boden, ist aber zu kurz, um die scheinbare Kohäsion in bindigen Böden zu reduzieren.

Die Niederschlagsintensität für 24 Stunden Dauer und 100jährige Wiederkehrdauer beträgt 5 mm/h (HADES). Dieses Niederschlagsszenario ist kritisch für Böden, wo die Abnahme der scheinbaren Kohäsion in Kombination mit einem Anstieg des Porenwasserdruckes eine wichtige Rolle spielt.

Auf Grund der Vorfeuchte und der Niederschlagsintensität wurden in SOSlope die räumliche Verteilung des maximalen Porenwasserdrucks und der niedrigsten Saugspannung (analog zu Kapillarkräften) an der Rutschfläche berechnet. Die Saugspannung wird im Modell benutzt, um die scheinbare Kohäsion des Bodens zu berechnen. Wiederum, das Porenwasserdruck reduziert die Stabilität des Hanges. Abbildung 11 zeigt die Verteilung des Porenwasserdrucks bei einem pessimistischen Szenario (Vorfeuchte = 35% Wassergehalt und Niederschlagsintensität = 80 mm/h).

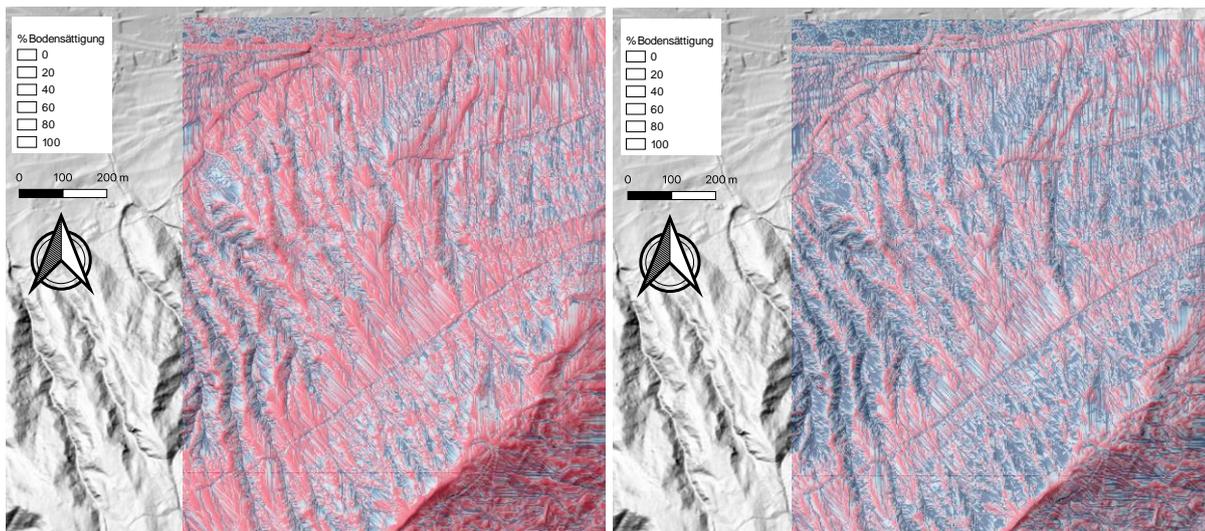


Abbildung 11: Berechnete Prozentuale der gesättigte Bodenmächtigkeit, benutzt für die Berechnung der Porenwasserdruck. Links sind die Resultate für eine 20 mm/Stunde Niederschlagsintensität, was ein 2 J Wiederkehrsdauer für 1 Stunde Niederschlagsdauer entspricht. Rechts sind die Resultate für eine 60 mm/Stunde Niederschlagsintensität. Das Wassergehalt des Boden vor die Niederschlagsereignis ist angenommen nahe zu Feldkapazität.

Berechnung Ausbruch- und Auslaufszenerien

Mit dem Rutschungssimulationsprogramm SOSlope wurden Abbruchflächen modelliert. Dafür wurden die Parameter gemäss Tabelle 11 verwendet. Aus der manuellen Auswertung der Resultate von SOSlope wurden die Abbruchflächen der flachgründigen Rutschungen definiert. Diejenigen Flächen, welche deutlich im Gerinne liegen und damit von fluviatilen Prozessen beeinflusst sind, wurden ausgeschlossen.

Tabelle 1: Parameter / Eingangsdaten Modellierung SOSlope

Schwarzwald bei Chur (GR)	
Reibungswinkel des Bodens (Φ')	36°
Effective Kohäsion (c')	1 [kPa]
Van Genuchten Parameter Alpha	0.51
Van Genuchten Parameter n	2.6
Gesättigte Bodendichte	2 [t/m ³]
Porosität des Bodens	0.3

Es wurden 58 potentielle Ausbruchstellen sind identifiziert, welche sich oft in Gerinneabhängungen befinden. Der Auslauf findet oft in relativ breiten Gerinnen statt.

Der Einfluss von Förderfaktoren (Oberflächenwasserzufluss; Durchlässigkeitskontraste; Geländeform, Geländebeschaffenheit/Landnutzung; hydrologisch-hydrogeologisches Einzugsgebiet; anthropogene Einflüsse wie z.B. Strassenwasser, Drainagen, etc.) wurden ebenfalls im Feld beurteilt.

Für alle simulierten Rutschungen/Hangmuren wurde eine Anrissstiefe gemäss den kalkulierten Ergebnissen aus SOSlope verwendet. Es wurden 200 Simulationen pro Anrissfläche gerechnet. So wurden zum Beispiel für das Szenario 4a_50 und für eine Wiederkehrperiode von 300J insgesamt 34 modellierte Anrissgebiete respektive 6800 Auslauf-Simulationen gerechnet. Die min. Fließhöhe, d. h. die Fließhöhe, bei welcher eine Masse in einer Zelle nicht weitersimuliert wird (gilt also als Abbruchkriterium), wurde auf 0.1 m festgelegt. Die probabilistische Grenze wurde auf 50% gelegt, um eine modellierte Zelle in die Resultate zu integrieren. Die Massenverteilung in SlideForce basiert auf einem sogenannten «Multiple-Flow Direction» Algorithmus. Dieser wird auf Basis der Gradienten zwischen einer Zelle und all ihren benachbarten tiefer gelegenen Zellen im digitalen Geländemodell (DGM) berechnet. Für das Untersuchungsgebiet wurde ein digitales Geländemodell mit einer Auflösung von 2 m x 2 m verwendet. SlideForce verwendet 4 Bodentypen, je nach Flüssigkeit und innerer Kohäsion. Gemäss Bodenprobe wurde der Boden im Untersuchungsgebiet als «Sehr



flüssig mit wenig Kohäsion» simuliert (Klassentyp 3 definiert innerhalb der Software SlideForce (Albaba et al., 2020)¹.

In SlideForce wird der Druck P der Hangmure gemäss Scheidegger² (1975) wie folgt berechnet:

$$P = \rho * g * (h + V^2/(2*g)) \text{ [in Pa]}$$

wobei:

$\rho = 2000 \text{ kg.m}^{-3}$
 $g = \text{Gravitationsfeldstärke [9.81 N.kg}^{-1}\text{]}$
 $h = \text{Fliesshöhe (m)}$
 $V = \text{Flie遟geschwindigkeit (A * MD_ratio * (1 - eB) + (V_{\text{ein}}^2 * eB)0.5 \text{ [in m.s}^{-1}\text{] nach Perla}^3$
 berechnet

wobei:

$A = g * (\sin(\beta) - \mu * \cos(\beta))$
 $\beta = \text{Hanggradient [in } ^\circ \text{; wird aus dem DGM berechnet]}$
 $\mu = 0.2 \text{ (Reibungsparameter)}$
 $\text{MD_ratio} = 40 \text{ ("mass-to-drag ratio")}$
 $B = -2 * L / \text{MD_ratio}$
 $L = \text{Segmentlänge [in m; wird aus dem DGM berechnet]}$
 $V_{\text{ein}} = \text{Geschwindigkeit am Anfang vom Hangsegment [in m.s}^{-1}\text{]}$

Die benötigten Eingangsdaten sind das DGM sowie ein Raster mit den Anrissgebieten. Daneben müssen die Anrisstiefe, die min. Fliesshöhe und die Dichte des Rutschmaterials definiert werden. Der Reibungsparameter und das Mass-to-drag ratio sind in SlideForce für jede Bodentypen definiert.

Die Ausgangsdaten beinhalten die folgenden vier Raster: 1) max. Ablagerungshöhe pro Zelle; 2) Erreichwahrscheinlichkeit pro Zelle; 3) max. simulierter Druck pro Zelle und 4) max. simulierte Flie遟geschwindigkeit pro Zelle. Abbildung 16 zeigt die Resultate für eine 300J Szenario für Fliesshöhe und Druck.

¹ Albaba, A., Günter, M., Hollard, N., May, D., Schaller, C., Schwarz, M., Stampfi, A., van Zadelho_, F., Dorren, L. Analyse et modélisation de l'arrachement et de la propagation des coulées de boues de versant. Développement de modèles pour la pratique basé sur des expérimentations et des événements historiques. Rapport final du projet SlideForce. BFH - HAFL, Zollikofen / Office fédéral de l'environnement OFEV, Berne (2020), 143 p.

² Scheidegger, A.E. (1975). Physical aspects of natural catastrophes. Elsevier Publishing Company.

³ Perla, R., Cheng, T., and McClung, D. M. A two parameter model of snow avalanche motion. Journal of Glaciology 26, 94 (1980), 197-207.

Fließhöhe in m; Szenario 300 Jahre Wiederkehrperiode ohne Wald



Druck in kPa; Szenario 300 Jahre Wiederkehrperiode ohne Wald

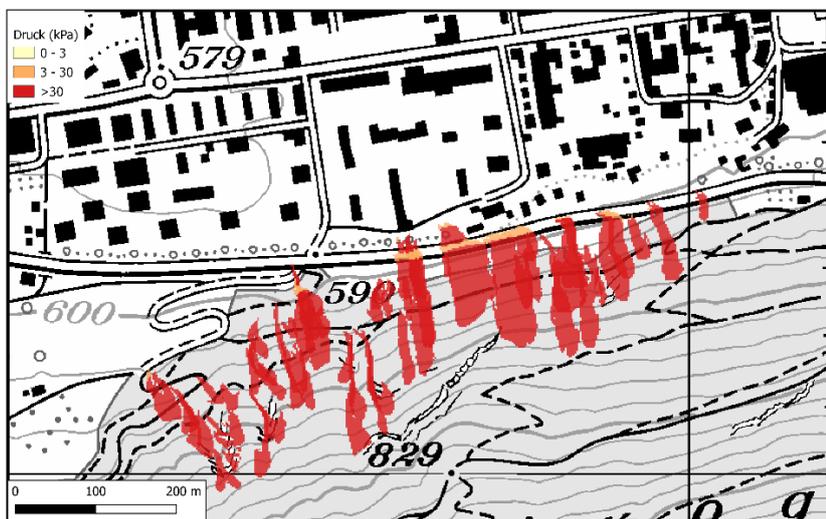


Abb. 18: Objektkategorien und Strasseneinteilung gemäss DTV in verschiedene Kategorien. Die entsprechenden Basiswerte für die Objektkategorien sind in Tab. A2.1, die Verkehrsparameter sind in Tab. A2.2 und die Vulnerabilitätswerte in Tab. A2.3 zu finden.

Beilage 6: Verwendetes Schadenpotential

In der 17 und der Tab. 13 sind die getroffenen Annahmen bezüglich Schadenpotential enthalten. Sämtliche Parameter bezüglich Lethalität, Schadensempfindlichkeit etc. wurden gemäss EconoMe verwendet.

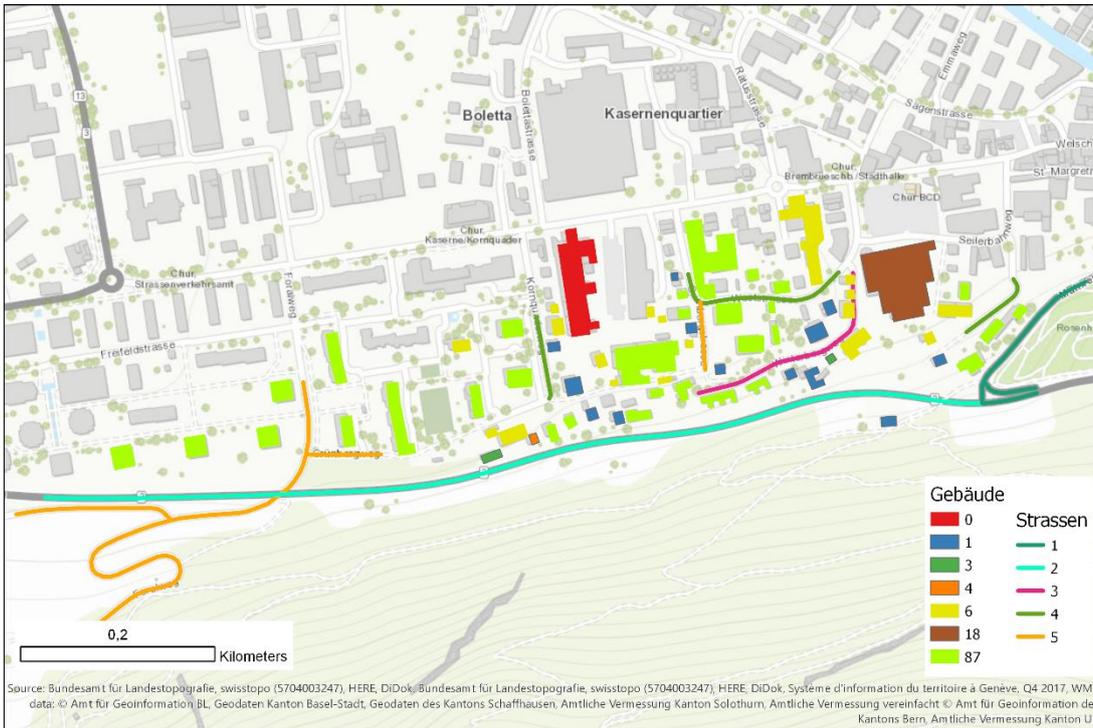


Abb. 19: Objektkategorien und Strasseneinteilung gemäss DTV in verschiedene Kategorien. Die entsprechenden Basiswerte für die Objektkategorien sind in Tab. A2.1, die Verkehrsparameter sind in Tab. A2.2 und die Vulnerabilitätswerte in Tab. A2.3 zu finden.

Tab. 13: Verkehrsparameter für die verschiedenen Strassenkategorien, die zur Berechnung der Präsenzwahrscheinlichkeit verwendet wurden. Der DTV der Kantonsstrasse basiert auf Daten aus der Verkerszählung des ASTRA und der DTV der kleineren Strassen wurde aufgrund von Orthophotos, Google maps, Street View und einer Feldbeehung geschätzt.

DTV_ID	EID	Typ	DTV [d ⁻¹]	v [kmh ⁻¹]	Quelle	Sperrungskosten (CHF)
1	25	Kantonsstrasse	5877	50	Astra, Jahresergebnisse 2017	92562.75**
2	25	Kantonsstrasse	4000	75*	Schätzung	
3	26	Gemeindestrasse	20	50	Schätzung (~Anz. Häuser, pro Haus 2 Fahrten täglich)	
4	26	Gemeindestrasse	10	50	Schätzung (~Anz. Häuser, pro Haus 2 Fahrten täglich)	
5	26 / 56	Gemeindestrasse	0	50	Schätzung	

* Annahme: 20 Tage pro Jahr mit Stau (15 km/h), restliche Tage 80 km/h

** Basierend auf Schätzung der zusätzlichen Fahrdauer für Umfahrung (Chur-Malix via Tamins-Thusis-Tiefencastel) mit GoogleMaps (69.8 km, 1h13min); Chur-Malix direkt: 12min, 6.8km: $K_{sp} = 63\text{km} * 5877 * 0.5\text{CHF/km} = 92562.75 \text{ CHF}$ (Version 3 EconoMe)