

Masterarbeit

Änderung der Disposition von Steinschlägen infolge der Klimaänderung und die Auswirkungen auf das Gefahrenpotential

Alice Zaugg
(15-919-632)

Master-Studiengang in Umweltnaturwissenschaften
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Referenten:

Peter Bebi
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)

Michael Bründl
WSL-Institut für Schnee und Lawinenforschung (SLF)

Bernhard Krummenacher
GEOTEST AG

14. September 2021

Zusammenfassung

Diverse Studien deuten darauf hin, dass sich die Disposition von Steinschlägen in der Schweiz aufgrund des Klimawandels verändert. Für ein nachhaltiges Risikomanagement ist es deshalb entscheidend, die Effekte der Klimaänderung in der Gefahrenbeurteilung zu berücksichtigen. Die vorliegende Arbeit untersucht die Auswirkungen des Klimawandels auf die Disposition von Steinschlägen in vier Untersuchungsgebieten in der Schweiz. Mithilfe Simulationen mit dem Software-Paket RAMMS::Rockfall werden die Auswirkungen der veränderten Disposition auf das Gefahrenpotential des nationalen Schienennetzes innerhalb der vier Untersuchungsgebiete evaluiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit dem Klimawandel je nach Jahreszeit eine deutliche Häufung oder Reduktion der Anzahl Ereignisse in den Untersuchungsgebieten erwartet wird. Der Klimawandel beeinflusst aber nicht nur die Frequenz der Ereignisse, sondern auch die Eigenschaften des Transitbereichs. Eine reduzierte Bestandesdichte und härtere Böden aufgrund der erhöhten Trockenheit führen zu mehr potentiellen Treffern im Gleisbereich und erhöhen damit das Gefahrenpotential.

Trotz den Veränderungen der Häufigkeit von Ereignissen zeigen die Gefahrenhinweiskarten, dass im Jahr 2085 die selben Streckenabschnitte des untersuchten Schienennetzes von Steinschlägen betroffen sind wie für die aktuelle Situation. Weiter bleiben die Intensitäten der Blöcke für alle Szenarien vergleichbar mit jenen der aktuellen Situation.

Schlagwörter: Steinschlag, Klimawandel, Gefahrenhinweiskarte

Abstract

Various studies indicate that the disposition of rockfalls in Switzerland is changing due to climate change. For a sustainable risk management it is therefore crucial to consider the effects of climate change in hazard assessments. This thesis investigates the effects of climate change on the disposition of rockfalls in four study areas within Switzerland. Using simulations with the RAMMS::Rockfall software package, the effect of the changing disposition on the hazard potential of the national railway network within the study areas is evaluated.

The results show that climate change will lead to an increase or decrease in the number of events in the study areas, depending on the season. Furthermore, climate change not only affects event frequency, but also the characteristics of the transit area. A reduced stand density and harder soils due to increased drought will lead to more blocks reaching the tracks and therefore increase the hazard potential.

Despite the changes in the frequency of events, the hazard maps of the current and future situation show that in 2085 the same sections of the investigated railway network are affected by rockfalls. Furthermore, the intensities of the blocks for all scenarios remain comparable to those of the current situation.

Keywords: rockfall, climate change, hazard map

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinen Betreuern, Michael Bründl, Peter Bebi und Bernhard Krummenacher für die gute Zusammenarbeit und Unterstützung bei der Erstellung vorliegender Arbeit bedanken. Ein besonderer Dank gebührt Sophia Maria Völkl für die tolle Unterstützung während des gesamten Prozesses, sowie Peter Mani für die hilfreichen Inputs und Diskussionen zu meiner Arbeit. Für die Unterstützung mit RAMMS möchte ich Marc Christen, Adrian Ringenbach und Andrin Caviezel herzlich danken. Ausserdem danke ich den Kantonsvertretern, Daniel Trüssel, Rieder Armin, Bernhard Roth, Sonja Stadlin und Calanca Nicola, sowie Martina Sättele von der RhB für die Bereitstellung der Bestandeskarten und Ereigniskataster. Weiter bedanke ich mich bei Andreas Fischer und Massimiliano Zappa für die Bereitstellung ihrer Daten, sowie meinen Eltern Martin und Simone Zaugg für die Unterstützung während meiner Arbeit.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	3
Tabellenverzeichnis	13
1 Einleitung	17
1.1 Naturgefahren in der Schweiz	17
1.2 Problemstellung	19
1.3 Zielsetzung	20
2 Grundlagen	21
2.1 Definition Prozess Steinschlag	21
2.2 Ursachen für Steinschläge	22
2.2.1 Geologische und topographische Disposition	22
2.2.2 Auslösungsmechanismen	23
2.3 Klimasensitivität	24
2.3.1 Klimaszenarien CH2018	26
3 Datengrundlage und Methoden	27
3.1 Untersuchungsgebiete	27
3.1.1 Perimeter Albula	29
3.1.2 Perimeter Biasca	33
3.1.3 Perimeter Gorges de Court	37
3.1.4 Perimeter Riginordlehne	41
3.2 Aktuelle Gefahrensituation	45
3.2.1 Digitales Terrainmodell	45
3.2.2 Anrisspunkte	45
3.2.3 Blockgrössen, -formen und Startpositionen	46
3.2.4 Bodenparameter	48

3.2.5	Wald	50
3.3	Zukünftige Gefahrensituation	52
3.3.1	Änderung der Häufigkeit von Steinschlagereignissen	52
3.3.2	Zukünftige Anrisspunkte	57
3.3.3	Blockgrößen, -formen und Startpositionen	58
3.3.4	Bodenparameter	58
3.3.5	Wald	58
3.4	Vorgehen bei der Evaluation der Resultate	64
4	Resultate	67
4.1	Perimeter Albula	67
4.1.1	Aktuelle Gefahrensituation	67
4.1.2	Zukünftige Gefahrensituation	70
4.2	Perimeter Biasca	73
4.2.1	Aktuelle Gefahrensituation	73
4.2.2	Zukünftige Gefahrensituation	75
4.3	Perimeter Gorges de Court	78
4.3.1	Aktuelle Gefahrensituation	78
4.3.2	Zukünftige Gefahrensituation	80
4.4	Perimeter Riginordlehne	83
4.4.1	Aktuelle Gefahrensituation	83
4.4.2	Zukünftige Gefahrensituation	85
5	Diskussion	89
5.1	Simulationen der heutigen Gefahrensituation	89
5.1.1	Plausibilität der Ergebnisse	89
5.1.2	Methodenkritik	91
5.2	Simulationen der zukünftigen Gefahrensituation	94
5.2.1	Plausibilität der Ergebnisse	94
5.2.2	Methodenkritik	99
6	Schlussfolgerungen	103
	Literaturverzeichnis	107
A	Bestimmung der Häufigkeit von Ereignissen	113
A.1	Lokalisation der aktuellen Anrisspunkte	114
A.2	Bodenbedeckung der Untersuchungsgebiete	115

A.3	Tabelle zur Bestimmung der Verwitterungsanfälligkeit	116
A.4	Verwitterungsanfälligkeit in den Untersuchungsgebieten	117
A.5	Veränderung der Anzahl Frostwechseltage	118
A.6	Entscheidungsdiagramm für nivale und pluviale Einzugsgebiete	130
A.7	Veränderung der Starkniederschläge	132
A.8	Veränderung der Schmelzwasserabflüsse	133
A.9	Resultierende Frequenzänderung	135
A.10	Lokalisation der zukünftigen Anrisspunkte	145
A.11	Frequenzänderung Variante 2	153
A.12	Einfluss der Anzahl Startorientierungen	159
B	Evaluation der Bestandesdichte	161
B.1	aktuelle Bestandesdichte	162
B.2	zukünftige Bestandesdichte	164
C	Auswertung der Simulationen	167
C.1	Modelbuilder Anzahl Treffer und Anprälle	168
C.2	Modelbuilder Kinetische Energie	168
C.3	Modelbuilder Gefahrenhinweiskarte	169
C.4	Sprunghöhen	170
D	Detaillierte Resultate der Simulationen	171
D.1	Veränderung der kinetischen Energie und Anzahl Treffer	171
D.2	Ergänzende Simulationsergebnisse	183
D.3	Gefahrenhinweiskarten für das 30-jährliche Ereignis	184

Dieses Dokument wurde mit der Vorlage IDSCreport erstellt (Ritter, Elbert & Onder, 2018).

Abbildungsverzeichnis

1.1	Veränderungen des Schaden- und Gefahrenpotential sollen das Sicherheitsniveau nicht negativ beeinflussen, aus BAFU (2016b).	18
2.1	Schematische Darstellung eines Sturzprozesses, aus BAFU (2016a), verändert nach Amanti et al. (1992).	21
3.1	Karte der Schweiz mit der Lokalisation der ausgewählten Untersuchungsgebiete. Kartengrundlage: BFS, ThemaKart, 2020; swisstopo, 2020	28
3.2	Oben: Lokalisation des Perimeters Albula (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Albula. Blick auf den Südwesthang Richtung Filisur. Bild: © Maxnar Technologies, Google Earth, 2021.	29
3.3	Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Albula mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und Klimaszenarien CH2018 (CH2018).	31
3.4	Oben: Lokalisation des Perimeters Biasca (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Biasca. Blick auf den Westhang und Biasca. Bild: © Google Earth, 2021.	33

-
- 3.5 Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Biasca mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018). 35
- 3.6 Oben: Lokalisation des Perimeters Gorges de Court (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Gorges de Court. Blick auf das südliche Ende der Gorges de Court mit Blick Richtung Moutier. Bild: © Google Earth, 2021 37
- 3.7 Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Gorges de Court mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018). 39
- 3.8 Lokalisation des Perimeters Riginordlehne (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020 41
- 3.9 3D-Ansicht des Perimeters Riginordlehne. Blick auf die Riginordlehne und die Stadt Arth am Zugersee. Image: © Google Earth, 2021 42
- 3.10 Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Riginordlehne mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018). 43
- 3.11 Darstellung der verwendeten Blockformen *Real Equant 1.2* und *Real Flat 1.6*. 48
- 3.12 Aktuelle Bestandesdichte des Waldes im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten). Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019 . . . 51

3.13	Schematische Darstellung der Variablen, welche zur Bestimmung der Änderung der Frequenz verwendet werden, in Anlehnung an das Vorgehen von Mani und Caduff (2015).	52
3.14	Bestandesdichten des Untersuchungsgebiets Biasca (roter Kasten) für (a) die aktuellen Szenarien und (b) die zukünftige Szenarien unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019	61
4.1	Kinetische Energie und Auslauflänge des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform Real Flat (a) und Real Equant (b) des Perimeters Albula (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.	68
4.2	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Albula für ein 300-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.	71
4.3	Kinetische Energie und Auslauflänge (a) des 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses des Perimeters Biasca (blauer Kasten) mit Blockform Real Equant 1.2. Die Eisenbahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.	74
4.4	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Biasca für ein 300-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.	76
4.5	Kinetische Energie und Auslauflänge des (a) 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform Real Equant des Perimeters Gorges de Court (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.	79
4.6	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Gorges de Court für ein 300-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.	82

4.7	Kinetische Energie und Auslauflänge des (a) 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform Real Equant 1.2 des Perimeters Riginordlehne (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.	84
4.8	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Riginordlehne für das 300-jährliche Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.	87
5.1	Veränderung der Anzahl Treffer bis ins Jahr 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für die vier Untersuchungsgebiete im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer, (d) Herbst. Die verschiedenen Szenarien (mit und ohne veränderte Bestandesdichten (abgekürzt als BD) und Bodenparameter) sind durch unterschiedliche Formen der Punkte dargestellt. Je weiter auseinander die Punkte liegen, desto grösser ist der Einfluss der Bestandesdichte bzw. der Bodenfeuchte. Die unterschiedlichen Farben definieren die Jährlichkeit der Ereignisse.	97
A.1	Anrisspunkte für die Simulationen der heutigen Gefahrensituation für die vier Untersuchungsgebiete. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben, die Systemgrenzen sind als schwarzer Rahmen gekennzeichnet. Hintergrundkarte: © swisstopo, Topomaps, 2021.	114
A.2	Bodenbedeckung der Untersuchungsgebiete (blaue Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Karte: © swisstopo, swissTLM-Regio, 2020; Copernicus Land Service, CORINE Land Cover, 2018.	115
A.3	Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine in den Untersuchungsgebieten. Klassifizierung nach Losey und Wehrli (2013, s. Anhang A.3). Datengrundlage: © swisstopo, GK500V1, 2014.	117
A.4	Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.	119
A.5	Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.	120

-
- A.6 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Biasca (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. 122
- A.7 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Biasca (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. 123
- A.8 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. . . . 125
- A.9 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. . . . 126
- A.10 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. 128
- A.11 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020. 129
- A.12 Entscheidungsdiagramm aus Aschwanden und Weingartner (1985) zur Bestimmung des Abflussregimetyps. Die Abflussregimetypen sind in Abbildung A.13 beschrieben. 130
- A.13 Beschreibung der Abflussregimetypen nach Aschwanden und Weingartner (1985). 131
- A.14 Die Daten zu den Schmelzwasserabflüssen für die Untersuchungsgebiete (roter Kasten) stammen aus den hellblau markierten Einzugsgebieten. Die Einzugsgebiete wurden von Brunner et al. (2019) definiert. 134

- A.15 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 135
- A.16 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 136
- A.17 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 137
- A.18 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 138
- A.19 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 140
- A.20 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 141

- A.21 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 143
- A.22 Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 144
- A.23 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. 145
- A.24 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. 146
- A.25 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. 147
- A.26 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. 148
- A.27 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. . 149
- A.28 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. . 150

- A.29 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. . . . 151
- A.30 Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021. . . . 152
- A.31 Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 154
- A.32 Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 155
- A.33 Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 157
- A.34 Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** während des ganzen Jahres. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019. 158
- B.1 Modelbuilder für die Berechnung der aktuellen Bestandesdichten in ArcMap. 162

B.2	Aktuelle Bestandesdichte für die Untersuchungsgebiete (a) Biasca, (b) Gorges de Court und (c) Riginordlehne. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.	163
B.3	Modelbuilder für die Berechnung der zukünftigen Bestandesdichten in ArcMap. Die Zufällige Auswahl der Zellen erfolgt in RStudio.	164
B.4	Zukünftige Bestandesdichte für die Untersuchungsgebiete (a) Albula, (b) Gorges de Court und (c) Riginordlehne. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.	165
C.1	Modelbuilder für die Berechnung der Anzahl Treffer und Anprälle in ArcMap. Dies wird für jede Simulation durchgeführt.	168
C.2	Modelbuilder für die Berechnung des Medians des 95%-Quantils der kinetischen Energie in ArcMap. Dies wird für jede Simulation durchgeführt.	168
C.3	Modelbuilder für die Erstellung der Gefahrenhinweiskarten in ArcMap. Dies wird sowohl für die heutige Situation als auch für die zukünftige Situation durchgeführt. Für die zukünftigen Gefahrenhinweiskarten werden beim Select Layer By Location die Kinetische Energie Raster aller Jahreszeiten und Szenarien verwendet (=worst case).	169
D.1	Auslauflängen und kinetische Energien für das aktuelle 30-jährliche Ereignis mit Blockform <i>Real Equant 1.2</i> im Untersuchungsgebiet Albula (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Swissimage, 2021.	183
D.2	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Albula (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.	184
D.3	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Biasca (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.	185
D.4	Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Gorges de Court (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.	186

- D.5 Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Riginordlehne (blauer Kasten)
für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b)
die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben.
Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020. 187

Tabellenverzeichnis

2.1	Klassifikation der Sturzprozesse anhand Durchmesser und Volumen, aus BAFU (2016a).	22
3.1	Anzahl Anrisspunkte pro Untersuchungsgebiet	46
3.2	Verwendete Blockgrößen für die 3 Jährlichkeiten	46
3.3	Zuteilung der Bodenbedeckungstypen der Untersuchungsgebiete in die vordefinierten Bodenklassen und deren mechanische Bodenfestigkeiten (M_e -Werte) und Widerstandswerte.	49
3.4	Verwendete Stammzahl und BHD-Verteilung in RAMMS::Rockfall für dichten, mitteldichten und offenen Wald.	50
3.5	Veränderung der Frequenz in Abhängigkeit der Materialverfügbarkeit und des Wasserzuflusses. Verändert nach Mani und Caduff (2015). . .	53
3.6	Veränderung der Materialverfügbarkeit in Abhängigkeit der Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins und der Veränderung der Anzahl Frostwechsellage. Verändert nach Mani und Caduff (2015).	54
3.7	Veränderung des Wasserzuflusses für die nivalen Einzugsgebiete Albula und Riginordlehne in Abhängigkeit der Änderung der Starkniederschläge und Schmelzwasserabflüsse. Verändert nach Mani und Caduff (2015).	56
3.8	Änderung des Wasserzuflusses (Variante 1) für die vier Untersuchungsgebiete pro Jahreszeit und Emissionsszenario.	57
3.9	Kriterien zur Bestimmung der Intensität anhand der kinetischen Energien nach BAFU (2016a).	64
4.1	Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform Real Equant und Real Flat für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Albula.	68

4.2	Median des 95%-Quantils der kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Albula.	69
4.3	Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Albula.	70
4.4	Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform Real Equant und Real Flat für das aktuelle 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Biasca.	73
4.5	Median des 95%-Quantils der kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des betroffenen Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Biasca.	74
4.6	Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.	75
4.7	Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform Real Equant und Real Flat für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.	78
4.8	Mediale kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.	79
4.9	Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.	80
4.10	Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform Real Equant und Real Flat für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.	83
4.11	Mediale kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.	85
4.12	Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.	85
A.1	Bestimmung der Verwitterungsanfälligkeit anhand der Lithologie des Gesteins. Verändert nach Losey und Wehrli (2013).	116

A.2	Prozentuale Veränderung des 5-jährlichen Tagesniederschlags (Mittlere Schätzung) bis 2085 pro Untersuchungsgebiet und Jahreszeit basierend auf den Daten der CH2018 (2018).	132
A.3	Prozentuale Veränderung der Schmelzwasserabflüsse (Mittlere Schätzung) bis 2085 pro Jahreszeit für die Untersuchungsgebiete Albula und Riginordlehne basierend auf den Daten der PREVAH-Modellrechnungen von Brunner et al. (2019).	133
A.4	Prozentuale Veränderung der Anzahl Anrisspunkte für die Variante 1 und Variante 2 unter dem Emissionsszenario RCP8.5.	153
A.5	Median des 95%-Quantils der kinetischen Energie innerhalb des betroffenen Gleisbereichs für die aktuelle Gefahrensituation mit Blockform Real Equant 1.2. Es werden die Resultate der Simulationen mit 10 Startorientierungen mit jenen mit 100 Startorientierungen verglichen.	159
C.1	Median der Sprunghöhe der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für ein 300-jährliches Ereignis mit Blockform <i>Real Equant 1.2</i>	170
D.1	Prozentuale Veränderung der Anzahl direkter Treffer und Anprälle gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 für das Untersuchungsgebiet Albula	172
D.2	Mediale Veränderung des 95%-Quantils der kinetischen Energie der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Albula.	173
D.3	Prozentuale Veränderung der Anzahl direkter Treffer und Anprälle gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Biasca	175
D.4	Mediale Veränderung des 95%-Quantils der kinetischen Energie der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Biasca.	176

D.5	Prozentuale Veränderung der Anzahl direkter Treffer und Anprälle gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court.	178
D.6	Veränderung der medialen kinetischen Energie der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Gorge de Court.	179
D.7	Prozentuale Veränderung der Anzahl direkter Treffer und Anprälle gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne.	181
D.8	Veränderung der medialen kinetischen Energie der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne.	182

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Naturgefahren in der Schweiz

Die Schweiz ist auf Grund ihrer Topographie häufig von Naturgefahren wie Hochwasser, Lawinen, Sturzprozesse und Murgängen betroffen. Laut dem Bundesamt für Umwelt BAFU (BAFU, 2016b) belaufen sich die jährlichen Schäden im Durchschnitt auf 305 Mio. Franken, wobei besonders Hochwasserereignisse und Murgänge für die hohe Schadenssumme verantwortlich sind. Neben Hochwasserereignissen und Murgängen gehören auch Sturzprozesse zu den bedeutenden Naturgefahren der Schweiz. So ist der Untergrund auf 6% bis 8% der Fläche der Schweiz instabil (WSL, 2021). Weiter forderten Sturzprozesse seit 2002 insgesamt 16 Tote (BAFU, 2016b).

In Zukunft kommen weitere Herausforderungen im Umgang mit Naturgefahren hinzu. Einerseits wird aufgrund des Klimawandels eine Zunahme des Gefahrenpotentials erwartet. Dies ist mit dem in Zukunft häufigeren Auftreten von Ereignissen als auch mit der Zunahme der Intensität von Extremereignissen zu begründen (BAFU, 2012). Gleichzeitig wird ein Anstieg des Schadenpotentials erwartet, welches mit der Wertsteigerung der Infrastruktur und der Intensivierung der Raumnutzung begründet wird (BAFU, 2016b). Durch das steigende Gefahren- und Schadenpotentials, nimmt das Risiko durch Naturgefahren zu. Ein effektives Naturgefahrenmanagement ist deshalb essentiell und wird in Zukunft umso wichtiger.

In der Schweiz wird nach einem integralen Risikomanagement gehandelt, welches, trotz des steigenden Gefahren- und Schadenpotentials, die Erhaltung eines schweizweit konstanten Sicherheitsniveaus anstrebt (s. Abbildung 1.1, (BAFU, 2016b)). Dies soll unter anderem mit umfassenden Gefahren- und Risikoanalysen erreicht werden. Dazu gehört die Erarbeitung von Gefahren- und Intensitätskarten in Siedlungsgebieten und die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten ausserhalb der Siedlungsgebiete. Der Bund hat sich zudem verpflichtet, bis 2030 ausreichend auf den Klimawandel und die damit steigenden Naturgefahren vorbereitet zu sein (BAFU, 2016b). Deshalb sollen die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefahrendisposition in die Gefahrenanalyse einbezogen werden. Diese Arbeit nimmt sich diesem Anliegen an und untersucht die Effekte des Klimawandels auf die Gefahrendisposition und deren Auswirkungen auf das Gefahrenpotential. Dabei wird auf den Prozess Steinschlag fokussiert.

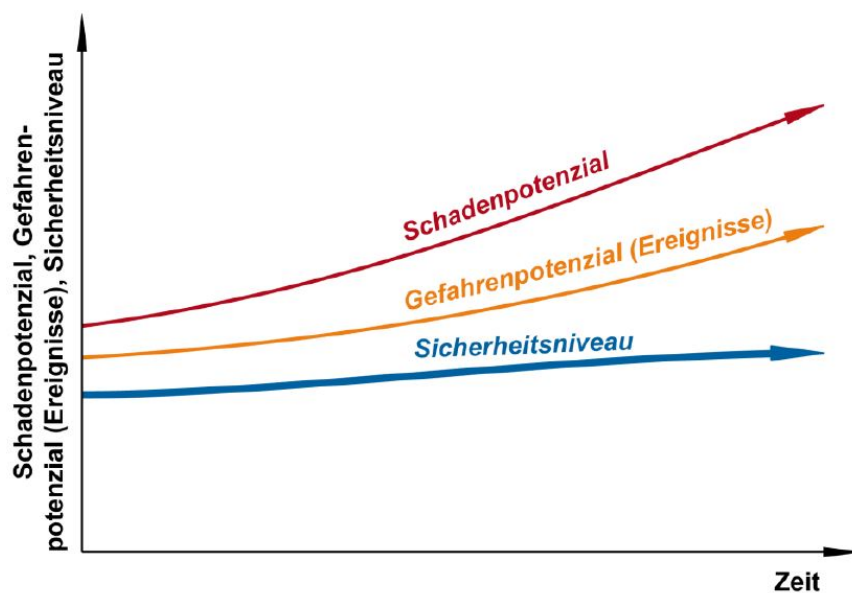


Abbildung 1.1: Veränderungen des Schaden- und Gefahrenpotential sollen das Sicherheitsniveau nicht negativ beeinflussen, aus BAFU (2016b).

1.2 Problemstellung

Die Gefahrenbeurteilung ist ein wichtiger Bestandteil des integralen Risikomanagements. Zur Gefahrenbeurteilung gehört die Erstellung von Gefahrenkarten. Sie enthalten detaillierte Angaben über die räumliche Ausdehnung, Intensität und Eintretenswahrscheinlichkeit von Naturgefahren (BAFU, 2016a). Die Gefahrenkarten sind aufgrund ihrer hohen Bearbeitungstiefe mit einem Massstab von in der Regel 1:2'000 bis 1:10'000 nicht flächendeckend verfügbar, sondern fokussieren auf Siedlungsgebiete. Ausserhalb der Siedlungsgebiete werden Gefahrenhinweiskarten erstellt. Sie weisen einen geringeren Detaillierungsgrad auf und sind in der Regel im Massstab 1:10'000 bis 1:50'000 verfasst. Sinn der Gefahrenhinweiskarten ist, die potentiellen Gefährdungsgebiete zu erkennen, jedoch ohne Angabe der Gefahrenstufe (BAFU, 2016a). Die Gefahrenhinweiskarten sind zwar weniger detailliert und können Unsicherheiten aufweisen, sind dafür aber flächendeckender realisierbar.

Für den Prozess Steinschlag ist jedoch noch keine schweizweit einheitliche und flächendeckende Gefahrenhinweiskarte verfügbar. Im Rahmen des Forschungsprogramms CCAMM (engl. Climate Change Impacts on Alpine Mass Movements) der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL wird, in Zusammenarbeit mit den Schweizerischen Bundesbahnen SBB, an einer solchen einheitlichen Gefahrenhinweiskarte für den Prozess Steinschlag gearbeitet. Dabei ist es wichtig die Effekte des Klimawandels auf die Gefahrendisposition durch Steinschläge zu beachten und in die Gefahrenbeurteilung zu integrieren. Deshalb wird in vorliegender Arbeit eine Methode erarbeitet, welche die Auswirkungen des Klimawandels auf die Gefahrendisposition durch Steinschläge bei der Gefahrenbeurteilung von mehreren Streckenabschnitten des nationalen Schienennetzes beachtet.

1.3 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss zukünftiger Klimaänderungen auf die Gefahren-disposition durch Steinschläge einzuschätzen. In vier Untersuchungsgebieten entlang Streckenabschnitte der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Rhätischen Bahn (RhB) wird eine grobe Abschätzung der aktuellen Gefahrensituation und der zukünftigen Gefahrensituation zwischen 2070 - 2099 (zukünftig als 2085 abgekürzt) durchgeführt. Diese Abschätzung findet im Massstab 1:25'000 statt und hat Gefahrenhinweischarakter. Die Veränderung der Gefahrendisposition durch Steinschläge soll anhand der erwarteten Änderung der Häufigkeit und der Änderung der Intensität der Ereignisse beurteilt werden. Dazu wird mit den aktuellen Klimaszenarien CH2018 (2018) eine Klimasensitivitätsanalyse inklusive Modellierungen mit dem Software-Paket RAMMS::Rockfall durchgeführt.

Es wird folgenden Forschungsfragen nachgegangen:

- Inwiefern verändert sich die Disposition von Steinschlägen aufgrund des Klimawandels und welche Auswirkungen haben diese Veränderungen auf das Gefahrenpotential der Eisenbahnlinie in den vier Untersuchungsgebieten?
- Welche Unsicherheiten treten bei der Bewertung der Steinschlaggefahr unter Anwendung vorliegender Methode auf?

Dabei werden folgende Hypothesen aufgestellt:

- Die Veränderung der Disposition von Steinschlägen ist stark von der Region und den damit verbunden unterschiedlichen klimatischen Bedingungen abhängig.
- Das Gefahrenpotential wird nicht nur durch die klimatisch bedingten Änderungen bei der Auslösung der Ereignisse bestimmt, sondern massgeblich auch durch die Veränderungen im Transitbereich, wie veränderte Bestandesdichten und Bodenfeuchte.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Definition Prozess Steinschlag

Vorliegende Arbeit fokussiert auf den Prozess Steinschlag. Steinschläge gehören zu den Sturzprozessen, welche über das Ablösen von Fest- und/oder Lockergestein in steilem Gelände definiert werden (BAFU, 2016a). Es handelt sich um schnelle Massenbewegungen mit freiem Fall und anschliessenden Sprung- und Rollprozessen (Abbildung 2.1).

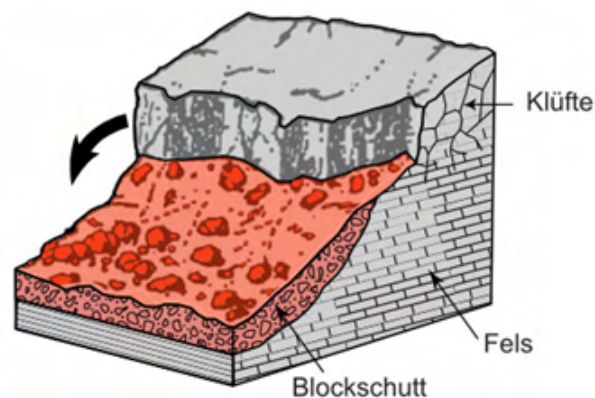


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung eines Sturzprozesses, aus BAFU (2016a), verändert nach Amanti et al. (1992).

Anhand der Blockgrößen und -volumen wird zwischen Steinschlägen, Blockschlägen, Felsstürzen und Bergstürzen unterschieden (Tabelle 2.1). Die Blockgröße und Form wird dabei massgeblich durch die Klüftung und Struktur des Gesteins bestimmt (BAFU, 2016a).

Tabelle 2.1: Klassifikation der Sturzprozesse anhand Durchmesser und Volumen, aus BAFU (2016a).

Prozess	Durchmesser	Volumen
Steinschlag	< 50 cm	-
Blockschlag	≥ 50 cm	< 100 m ³
Felssturz	-	> 100 m ³ und < 1 Mio m ³
Bergsturz	-	> 1 Mio m ³

Im Rahmen dieser Arbeit werden die Prozesse Steinschlag und Blockschlag zusammengefasst. Wird in vorliegender Arbeit von Steinschlägen gesprochen, sind Ereignisse mit einem Volumen von < 100 m³ gemeint, unabhängig derer Durchmesser.

2.2 Ursachen für Steinschläge

Das Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL (1998); heute BAFU) definiert die Ursache von Sturzprozessen als Kombination zwischen Disposition und auslösenden Prozessen. Die Disposition beschreibt die Anfälligkeit eines Systems gegenüber Sturzprozessen, wie zum Beispiel die geologischen und geomorphologischen Charakteristiken des Gesteins. Bei den auslösenden Prozessen handelt es sich um externe Systembelastungen, welche oft durch meteorologische Eigenschaften bestimmt werden. Ist die Systembelastung grösser als die Disposition, kommt es zu einer Auslösung des Ereignisses. Nachfolgend werden die Disposition und die auslösenden Prozesse näher beschrieben.

2.2.1 Geologische und topographische Disposition

Zum einen befinden sich Anrissgebiete von Sturzprozessen in Felsgebieten oder in steilen Lockergesteinszonen, weshalb die Topographie und das Relief wichtige Faktoren für die Bestimmung der Disposition von Steinschlägen sind (BAFU, 2015). Zum anderen beeinflussen geologische Eigenschaften des Gesteins, wie die Verwitterungsanfälligkeit, die Entstehung von Sturzprozessen. Dabei ist auch die Struktur des Gesteines, wie Klüfte und Schichtflächen massgebend, da Blöcke oft entlang solcher Trennflächen anrissen (BAFU, 2016a).

2.2.2 Auslösungsmechanismen

Bei gegebener Disposition können verschiedene Mechanismen zu einer Auslösung führen. Dabei sind verschiedene klimatische Faktoren massgebend, wie die Temperatur, der Wasserzufluss, Gefrier-Tau-Zyklen und diverse weitere Faktoren. Nachfolgend wird auf die wichtigsten Auslösungsmechanismen eingegangen.

Frostverwitterung

Die Frostverwitterung ist eine häufige Ursache von Steinschlägen, besonders im Winter und Frühling (Gruner, 2008). Kalte Temperaturen führen zur Öffnung von Klüften und Rissen infolge von Gesteinskontraktionen, während sich bei wärmeren Temperaturen die Klüfte wieder schliessen können (Gruner, 2008). Bei einem häufigen Wechsel von Gefrieren und Auftauen ist die Destabilisierung besonders gross (Gruner, 2008; Krähenbühl, 2004). Dabei spielt auch die Volumenexpansion von Wasser zu Eis eine wichtige Rolle. Durch das Gefrieren von Wasser in den Gesteinsporen und Klüften dehnt sich dieses um 9% aus und erzeugt damit einen hohen Druck (Hobbs, 1974). Ist dieser Druck gross genug, kommt es zu einer Entfestigung im Kluftbereich. Bei einer hohen Anzahl an Frost-Tau-Zyklen kann es schlussendlich zur Ermüdung bestehender Gesteinsbrücken und ähnlichen rückhaltenden Kräften kommen (Gruner, 2008).

Der Prozess ist abhängig von der Gesteinsart (Wegmann, 1998). Je fester das Gestein, desto höher der erforderliche Druck, um eine Verwitterung hervorzurufen. Zudem kann ein hoher Druck einfacher entstehen, je geringer die hydraulische Durchlässigkeit des Gesteins ist. Voraussetzung für die Frostsprengung durch Volumenexpansion ist zudem eine hohe Wassersättigung innerhalb der Poren (Wegmann, 1998).

Hydraulischer Druck

Wasser spielt aber nicht nur bei der Frostverwitterung eine entscheidende Rolle. Durch die Ansammlung von Wasser in den Klüften des Gesteins, kann ein hoher hydraulischer Druck entstehen, was zum Abbau von rückhaltenden Kräften führt (Gruner, 2008). Felspartien, welche bereits durch die Frostverwitterung destabilisiert wurden, sind dabei besonders anfällig. Deshalb sind vor allem die Wassereinträge im Frühjahr wie zum Beispiel erste intensive Niederschläge oder die Schneeschmelze relevant (Gruner, 2008).

Permafrostdegradation

Wasser bzw. Eis kann aber auch stabilisierend auf Felspartien wirken, was auf die Adhäsion zwischen Felsen und Eis zurückzuführen ist (Gruber & Häberli, 2007). Bei einer Erwärmung und insbesondere bei der Permafrostdegradation, werden diese stabilisierenden Kräfte reduziert (Harris, Davies & Etzelmüller, 2001).

Weitere Prozesse

Weiter ist der Oberflächenabfluss bei der Auslösung von Steinschlägen relevant. In steilen Felsflanken kann die durch Oberflächenabfluss induzierte Spülwirkung, Blöcke loslösen. So können abgelagerte Blöcke eines früheren Ereignis wieder in Bewegung kommen. Auch Erschütterungen, wie Erdbeben, können einen Auslöser darstellen. In einem geringeren Ausmass kann zudem der Wurzeldruck durch Bäume und Büsche relevant sein, sowie starke Winde, welche zu Wurzelbewegungen im Gestein führen können (BAFU, 2015).

2.3 Klimasensitivität

Viele Auslösemechanismen von Steinschlägen sind durch meteorologische Charakteristika bestimmt (siehe Kapitel 2.2) und deshalb sensitiv gegenüber Klimaveränderungen. Ob sich die Anzahl an Sturzereignissen in den letzten Jahren infolge des Klimawandels verändert hat, ist jedoch schwierig zu beantworten (Gruner, 2004). Grund dafür ist die vermehrte Dokumentation von Ereignissen im Verlaufe des 20. Jahrhunderts. Einerseits wurden aufgrund der intensiveren Nutzung und des steigenden Schadenpotentials Ereignisse dokumentiert, welche früher unerkannt blieben. Andererseits führte die Sensibilisierung der Bevölkerung für Naturgefahren zu einer vollständigeren Dokumentation von Ereignissen (Gruner, 2004).

Gruner (2004) verwendet deshalb einen anderen Ansatz, zur Beantwortung der Frage, ob eine Häufung aufgrund klimabedingter Veränderungen zu beobachten ist. Er wertet rund 800 Sturzereignisse auf der Alpennordseite der letzten 500 Jahren aus und untersucht die anteilmässigen Veränderungen von Sturzereignissen pro Jahreszeit. Die Studie zeigt, dass in der kalten Klimaperiode zwischen 1951 und 1980 ein höherer Anteil an Winter- und Frühlingsereignissen zu verzeichnen ist, als in den wärmeren Perioden (1901-1950 und 1981-2004). Dies ist womöglich auf die intensivere Frostverwitterung zurückzuführen. Des Weiteren ist seit 1981 eine Zunahme an Sommerstürzen zu beobachten, was mit den erhöhten Starkniederschlägen erklärt

wird. Gruner (2004) schlussfolgert, dass infolge der Erwärmung tendenziell mit einer Abnahme von Winterereignissen, gleichbleibender Anzahl an Frühlingsereignissen und einer Zunahme von Sommer- und Herbstereignissen zu rechnen sei.

Die Studie von Sass und Oberlechner (2012) unterstreicht diese Erkenntnisse: Die Analyse von über 250 Steinschlagereignissen zwischen 1900 und 2010 in Nicht-Permafrostgebieten in Österreich zeigt eine Verschiebung der Ereignisse vom Frühjahr in den Sommer. Sass und Oberlechner nennen die wärmeren Winter als Grund für die abnehmenden Frühlingsereignisse.

Auch Mani und Caduff (2015) versuchen in ihrer Studie zur Klimasensitivität von Naturgefahren die zukünftige Entwicklung von Sturzereignissen einzuschätzen. Basierend auf der Entwicklung der Materialverfügbarkeit und des Wasserzuflusses mit dem Klimawandel wird die mögliche Veränderung der Frequenz und Magnitude von Sturzprozessen eruiert. Mani und Caduff (2015) schlussfolgern, dass die Frequenz im Jura, in den Tälern der Voralpen und Alpen sowie auf der Alpensüdseite aufgrund der abnehmenden Materialverfügbarkeit abnehmen, während in den alpinen Hochlagen die Steinschlagfrequenz aufgrund der erhöhten Materialverfügbarkeit und Wasserzuflüsse zunehmen wird. Die Magnitude der Ereignisse nimmt laut Mani und Caduff (2015) grösstenteils ab, da durch die häufigeren Ereignisse weniger Material angesammelt wird.

Gruber und Häberli (2007) erwarten hingegen in den Hochalpen eine Zunahme der Blockgrößen aufgrund der Permafrostdegradation. Auch Stoffel und Huggel (2012) schätzen die alpinen Regionen als besonders sensitiv gegenüber der Klimaänderung ein.

2.3.1 Klimaszenarien CH2018

Das National Center for Climate Services (NCCS) hat in Zusammenarbeit mit mehreren Schweizer Institutionen 2018 die aktuellsten Informationen über die Änderungen des Klimas in der Schweiz herausgegeben, die sogenannten CH2018 Szenarien. Die Szenarien beruhen auf den neuesten globalen und regionalen Klimamodellen, qualitativ hochwertigen Messreihen, sowie Erkenntnissen aus anderen Studien (CH2018, 2018). Die Szenarien beinhalten die Veränderungen diverser Klimaindikatoren in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Auflösung. Dabei werden sowohl die Änderungen von Mittelwerten, aber auch die Änderungen von Extremereignissen und deren Unsicherheiten adressiert. Die Änderungen der einzelnen Klimaindikatoren werden unter drei verschiedenen Emissionsszenarien modelliert. Das optimistische Szenario RCP2.6, geht von stark reduzierten Emissionen aus, sodass der globale Temperaturanstieg weniger als 2°C beträgt. Das Emissionsszenario RCP4.5 geht von Emissionen aus, mit welchen das Ziel, den globalen Temperaturanstieg auf 2°C zu limitieren, bereits nicht mehr erreicht werden kann. Das Emissionsszenario RCP8.5 geht noch weiter und nimmt keine Reduktion der Emissionen gegenüber heute an (CH2018, 2018).

Unter den modellierten Klimaindikatoren befinden sich welche, die bei der Auslösung von Steinschlägen von grosser Bedeutung sind, wie z. B. die Veränderung der Starkniederschläge und der Anzahl Frostwechseltage. Die vorliegende Arbeit verwendet die in den Szenarien angegebenen mittleren Veränderungen der einzelnen Klimavariablen bis ins Jahr 2085 (Zeithorizont 2070 - 2099). Die Veränderungen beziehen sich dabei auf die Referenzperiode von 1981 - 2010. Die zukünftige Gefahrensituation der Untersuchungsgebiete wird sowohl anhand des optimistischen Emissionsszenario RCP2.6 als auch anhand des starken Emissionsszenario RCP8.5 eingeschätzt.

Kapitel 3

Datengrundlage und Methoden

3.1 Untersuchungsgebiete

Im Rahmen dieser Arbeit werden vier Untersuchungsgebiete entlang des Schienennetzes der SBB und RhB ausgewählt, in welchen die Entwicklung der Disposition von Steinschlägen und deren Auswirkung auf das Gefahrenpotential mit dem Klimawandel untersucht wird. Bei der Auswahl der Untersuchungsgebiete werden folgende Kriterien angewendet:

Aktuelle Steinschlaggefahr

Die Untersuchungsgebiete sollen Streckenabschnitte abdecken, welche aktuell einer Steinschlaggefahr ausgesetzt sind. Wenn möglich sollen vergangene Ereignisse gut dokumentiert (z.B. in der Storme-Datenbank) und untersucht worden sein. Damit wird eine gute Datengrundlage für die Analyse sowie eine hohe Relevanz für die SBB und RhB gewährleistet.

Gesteinseigenschaften

Die ausgewählten Untersuchungsgebiete sollen unterschiedliche Lithologien aufweisen und damit einen grossen Gradienten an Gesteinseigenschaften und insbesondere an Verwitterungsanfälligkeiten abdecken. Deshalb sollen möglichst viele geologische Einheiten der Schweiz (Falten- und Tafeljura, Molassebecken, Helvetikum und Kristalline Gesteine) abgebildet werden.

Klimagradient

Die Untersuchungsgebiete sollen neben verschiedenen Gesteinseigenschaften auch einen grossen Klimagradienten abdecken. Dies wird erreicht, indem sie sich bezüglich Region, Höhenlage, sowie Temperatur- und Niederschlagsregime unterscheiden.

Aufgrund dieser Kriterien werden folgende Untersuchungsgebiete ausgewählt:

- Perimeter Albula
- Perimeter Biasca
- Perimeter Gorges de Court
- Perimeter Riginordlehne

Die Untersuchungsgebiete sind in Abbildung 3.1 lokalisiert und in den folgenden Kapiteln 3.1.1 bis 3.1.4 charakterisiert.



Abbildung 3.1: Karte der Schweiz mit der Lokalisation der ausgewählten Untersuchungsgebiete. Kartengrundlage: BFS, ThemaKart, 2020; swisstopo, 2020

3.1.1 Perimeter Albula

Allgemein

Das Untersuchungsgebiet Albula liegt in den östlichen Alpen in der Gemeinde Bergün Filisur (GR). Der Perimeter weist eine Fläche von 8.4 km² auf und erstreckt sich von Greifenstein bei Filisur bis nach Stuls (Abbildung 3.2). Mit einer Höhenlage von 1000 bis fast 2600 m ü. M. ist der Perimeter Albula das höchstgelegene Untersuchungsgebiet. Die Bahnlinie der RhB verläuft entlang des Südwesthanges auf einer Höhe von ca. 1200 m ü. M. Damit liegt der Streckenabschnitt im Transitbereich mehrerer Steinschlag-Anrissgebiete.

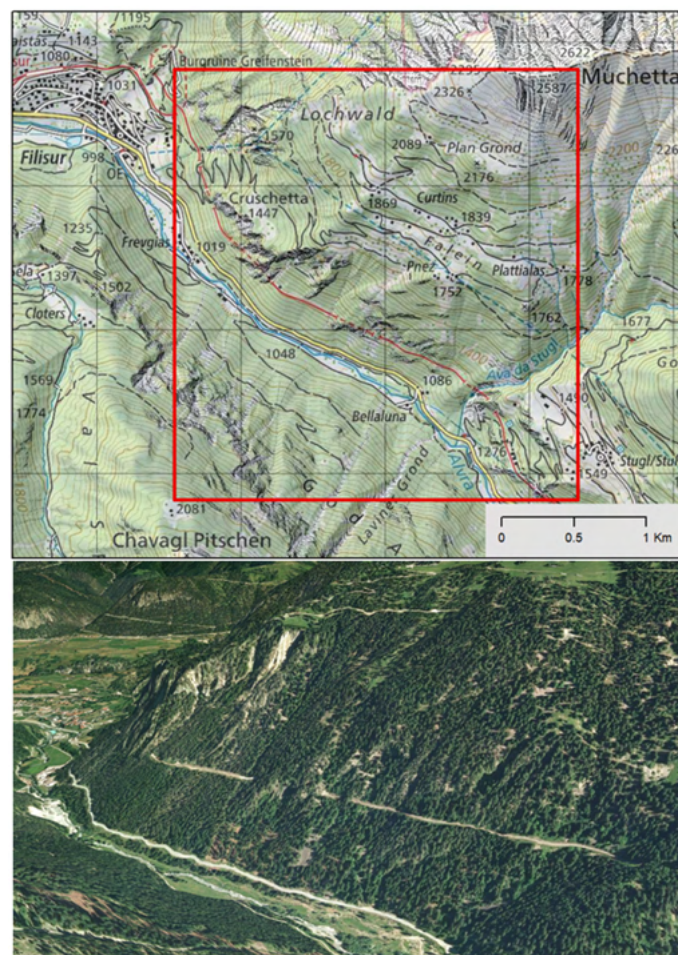


Abbildung 3.2: Oben: Lokalisation des Perimeters Albula (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Albula. Blick auf den Südwesthang Richtung Filisur. Bild: © Maxnar Technologies, Google Earth, 2021.

Bekannte Steinschlagereignisse

Auf dem Streckenabschnitt der RhB zwischen Filisur und Stuls wurden im Naturereigniskataster StorMe (BAFU, 2021) und im Ereigniskataster der RhB zahlreiche Ereignisse dokumentiert. Im Ereigniskataster der RhB sind in den Jahren 2000 bis 2017, 57 Steinschlagereignisse aufgelistet, wobei die meisten Ereignisse 2010, 2011 und 2015 auftraten. Bei über der Hälfte der Ereignisse entstanden Schäden an der Infrastruktur, einige mit einer Schadenshöhe von mehreren tausend Franken.

Auf Orthophotos ist zu erkennen, dass im Schmelziwald und im Gebiet Surmin Steinschlagnetze die Fahrbahn schützen. Auch im Gebiet Cruschetta sind Verbauungen vorhanden.

Geologie

Die Geologie innerhalb des Untersuchungsgebiets ist divers. Dies zeigt der Ausschnitt der Geotechnischen Karte im Massstab 1:500'000 des Bundesamtes für Landestopografie swisstopo (swisstopo, 2021a). Im südöstlichen Teil des Untersuchungsgebiets nahe Stuls sind kristalline Gesteine aufgeschlossen. Auf der Höhe der Eisenbahn von Stuls bis zum Schmelziwald handelt es sich vorwiegend um Rhyolithe und Dazite. Rhyolithe bestehen hauptsächlich aus Quarz und Alkalifeldspat und sind somit mineralogisch gesehen die vulkanischen äquivalente zu Granit (Streckeisen et al., 2002). Dazite weisen einen höheren Anteil an Plagioklas als Rhyolithe auf und sind etwas weniger sauer (Streckeisen et al., 2002). Weiter hangaufwärts sind Gneise mit reichlich Feldspat aufgeschlossen. Talauswärts Richtung Filisur werden die kristallinen Gesteine von Sedimentgesteinen abgelöst. Hier wechseln sich Konglomerate, Brekzien und Kalksteine mit Dolomiteinlagen ab. Im Gebiet Greifenstein oberhalb Filisur dominieren Dolomitgesteine mit Kalklagen, während im Talboden unterhalb der Eisenbahn Kiese und Sande aus alluvialen Sedimenten vorherrschen (swisstopo, 2021a).

Klima

Laut den interpolierten Klima-Normwerten der Jahre 1981 bis 2010 (MeteoSchweiz, 2021) beträgt die mittlere Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet Albula ca. 4° C. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei ungefähr 1000 mm. Das Klimadiagramm in Abbildung 3.3 zeigt zudem die monatliche Verteilung des Niederschlags, sowie die mittleren Monatstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass der meiste Niederschlag in den Sommermonaten fällt, wobei der maximale Monatsmittelwert um die 125 mm

beträgt (August). Auch die Wintermonate sind mit ca. 50 mm Niederschlag pro Monat eher trocken. Die mittlere Temperatur beträgt in den Wintermonaten ca. -4°C , während im Sommer die mittleren Temperaturen auf knapp 12°C ansteigen (MeteoSchweiz, 2021).

Mit dem Klimawandel wird sich die mittlere Jahrestemperatur bis 2085 in den Alpen um 1.5°C (RCP2.6) bzw. 5°C (RCP8.5) erwärmen, während der mittlere Jahresniederschlag ungefähr konstant bleibt (CH2018, 2018). Wie in Abbildung 3.3 zu sehen ist, gibt es aber merkbare Veränderungen in der Verteilung des Niederschlags innerhalb des Jahres. So wird es in den Sommer- und Herbstmonaten tendenziell trockener, während im Winter und Frühling mehr Niederschlag fällt (CH2018, 2018).

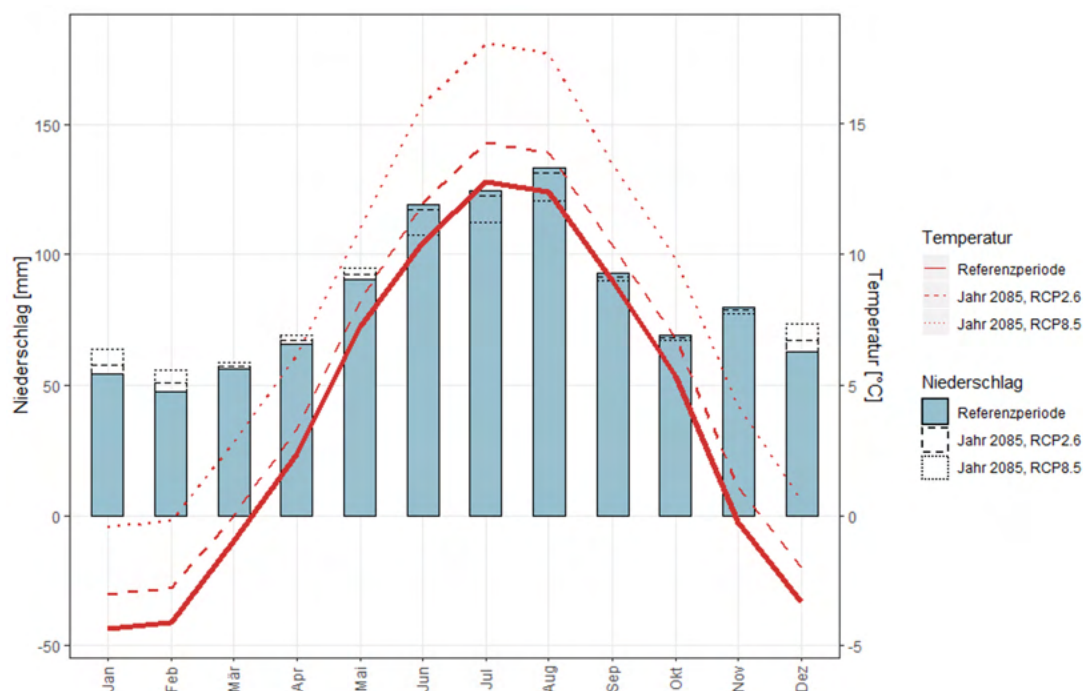


Abbildung 3.3: Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Albula mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und Klimaszenarien CH2018 (CH2018).

Wald

Der Wald auf dem Südhang des Untersuchungsgebietes Albula reicht von 1020 m ü. M. bis auf fast 2230 m ü. M. Damit sind Waldgesellschaften der hochmontanen bis obersubalpinen Stufe vertreten. Das Untersuchungsgebiet liegt an der Grenze zwischen den nördlichen Zwischenalpen und den kontinentalen Hochalpen. In den nördlichen Zwischenalpen auf hochmontaner Stufe sind Tannen-Fichtenwälder dominant, in den kontinentalen Hochalpen kommt die Tanne nicht mehr vor, dafür sind vermehrt Waldföhren anzutreffen. Letzteres trifft auf das Untersuchungsgebiet besser zu, wie die Bestandeskarte der Region (1998/1999) zeigt. Zwischen 1020 m ü. M. und 2000 m ü. M. dominieren Fichtenwälder. Dabei sind auf über der Hälfte der Waldfläche die Bestände mit mindestens 50% Fichte bestockt. Auf dem Südhang nahe Filisur kommen vermehrt Waldföhrenbestände vor, während oberhalb von 2000 m ü. M. Bergföhren- sowie Lärchen-Arvenwälder die Fichtenwälder ablösen. Zum Aufnahmezeitpunkt der Bestandeskarte 1998/1999 waren das schwache und mittlere Baumholz (31 – 40 cm BHD bzw. 41 – 50 cm BHD) am häufigsten vertreten. Jungwuchsbestände waren selten (ca. 3% der Waldfläche). Der Schlussgrad war auf 30% der Waldfläche normal bis locker und auf weiteren 25% der Waldfläche lückig. Nur auf 13% der Waldfläche war der Schlussgrad gedrängt, während auf den restlichen 32% eine aufgelöste oder Einzelbestockung vorlag. Diese Zahlen des Schlussgrades und der Entwicklungsstufe sind jedoch mit Vorsicht auf den heutigen Zustand zu übertragen, da die Erhebung der Bestandeskarte bereits vor über 20 Jahre durchgeführt wurde.

3.1.2 Perimeter Biasca

Allgemein

Das Untersuchungsgebiet liegt auf der Alpensüdseite in der Gemeinde Biasca (TI) und weist eine Fläche von 3.5 km² auf. Der Perimeter beinhaltet den Westhang des Masnàn östlich der Stadt Biasca, an dessen Hangfuss sich die Eisenbahnlinie und ein Güterbahnhof befindet (Abbildung 3.4). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über knapp 1700 Höhenmeter von Biasca im Talboden auf 281 m ü. M. bis zum Grat Spiancri unterhalb des Masnàngipfels.

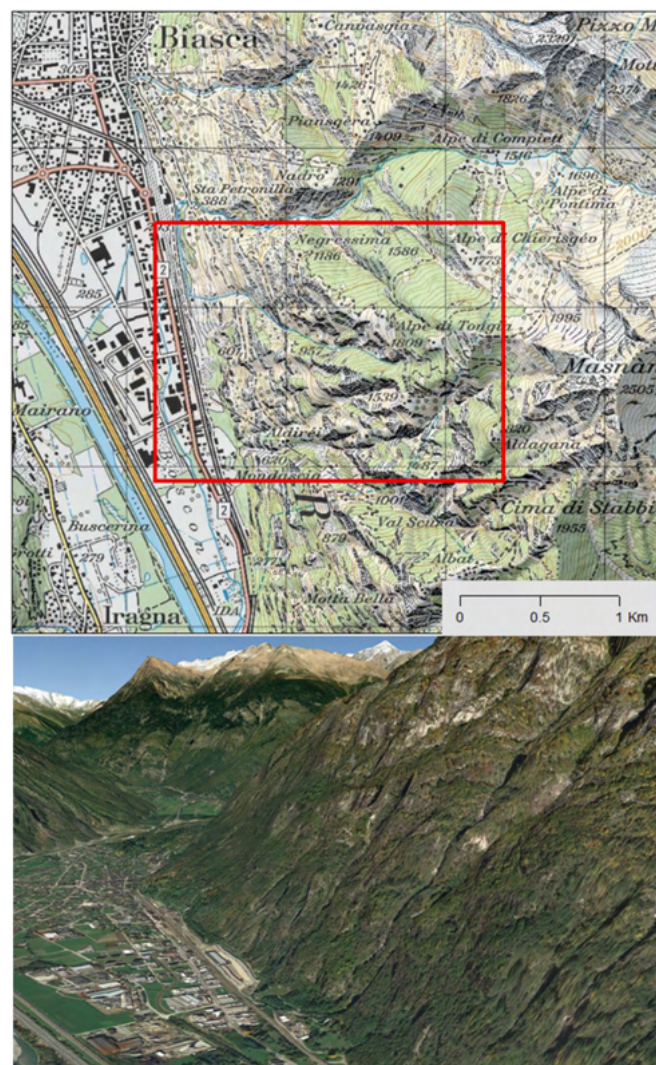


Abbildung 3.4: Oben: Lokalisation des Perimeters Biasca (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Biasca. Blick auf den Westhang und Biasca. Bild: © Google Earth, 2021.

Bekannte Steinschlagereignisse

Die Eisenbahnlinie und der Güterbahnhof der SBB liegen in einem Ablagerungsgebiet mehrerer Steinschlag-Anrissgebiete. Deshalb wird der Hang intensiv überwacht. Ein Laserscanner, sowie ein interferometrisches Radar messen Deformationen des Gesteins und können so Abbrüche frühzeitig erkennen (Geoprevent AG, 2019). Im Naturereigniskataster des Bundes wurden in der Region erst ab 2009 Ereignisse eingetragen. Die Anzahl an dokumentierten und zur Verfügung stehenden Ereignissen innerhalb des Perimeters ist deshalb gering. Es kann davon ausgegangen werden, dass v.a. Ereignisse, welche keine Schäden verursacht haben, nicht im Ereigniskataster dokumentiert wurden. Diese Annahme bestätigt die Tatsache, dass alle eingetragenen Ereignisse, Schäden an der Infrastruktur verursacht haben.

Auf den Orthophotos ist zu erkennen, dass einzelne Verbauungen zum Schutz gegen Steinschlag vorhanden sind. Auf der Höhe des Güterbahnhofs befindet sich zusätzlich eine Schutzmauer sowie kleinere Dämme.

Geologie

Die Geologie innerhalb des Untersuchungsgebietes ist deutlich homogener als beim Perimeter Albula. Der gesamte Westhang besteht aus kristallinem Gestein. Es handelt sich dabei um feldspatreiche Zweiglimmer- und Biotitgneise, grösstenteils in homogener Ausbildung. Sie entstanden während des Paläozoikums unter starker Metamorphose aus magmatischen Gesteinen. Der Talboden setzt sich aus Sedimenten wie Kiese und Sande zusammen (swisstopo, 2021a).

Klima

Laut den interpolierten Klima-Normwerten der Jahre 1981 bis 2010 (MeteoSchweiz, 2021) beträgt die mittlere Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet Biasca ca. 7° C. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei ungefähr 1700 mm. Das Klimadiagramm in Abbildung 3.5 zeigt zudem die monatliche Verteilung des Niederschlags, sowie die mittleren Monatstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass der meiste Niederschlag im Sommerhalbjahr fällt, wobei der maximale Monatsmittelwert über 200 mm beträgt (Mai und September). Die Wintermonate sind mit knapp 60 bis 100 mm deutlich trockener. Die mittleren Temperaturen betragen in den Wintermonaten knapp unter 0° C, während sie im Juli auf über 15° C ansteigen (MeteoSchweiz, 2021).

Mit dem Klimawandel wird sich die mittlere Jahrestemperatur bis 2085 auf der Alpensüdseite um ca. 1.5°C (RPC2.6) bzw. 4.5°C (RCP8.5) erwärmen, während der mittlere Jahresniederschlag ungefähr konstant bleibt (CH2018, 2018). Wie in Abbildung 3.5 zu sehen ist, gibt es aber merkliche Veränderungen in der Verteilung des Niederschlags innerhalb des Jahres. So wird es in den Sommermonaten deutlich trockener, während im Winter mehr Niederschlag fällt (CH2018, 2018).

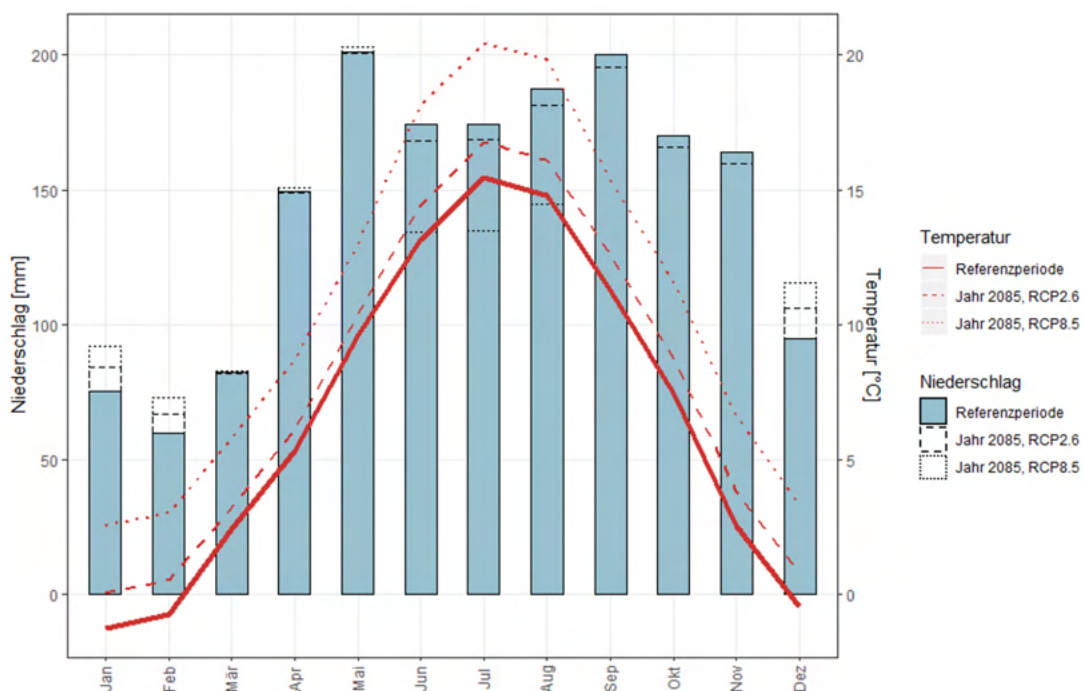


Abbildung 3.5: Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Biasca mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018).

Wald

Der Wald im Untersuchungsgebiet Biasca reicht vom Talboden auf ca. 280 m ü. M. bis auf ca. 1980 m ü. M., wo sich die Waldgrenze aber auch die Grenze des Untersuchungsgebietes befindet. Damit sind Waldgesellschaften der kollinen bis subalpinen Stufe der südlichen Randalpen mit Fichte vertreten. Laut der Waldvegetationskarte der Region (Erfassung in den 1990er Jahre) sind in der kollinen Stufe v.a. Pionierbaumarten und einzelne Kastanienwälder vorhanden. In der montanen Stufe dominieren Nadelhölzer wie Fichten und Tannen, während in den höchsten Lagen vermehrt Lärchen vorkommen. Aus der Bestandeskarte von 2015 geht hervor, dass auf knapp 75% der Waldfläche Nadelhölzer dominieren. Weiter zeigt die Bestandeskarte den Deckungsgrad der Bestände auf. Dabei weisen nur ca. 26% der Waldfläche einen Deckungsgrad von über 50% auf. Für die meisten Bestände liegt der Deckungsgrad zwischen 30 und 40%.

3.1.3 Perimeter Gorges de Court

Allgemein

Das Untersuchungsgebiet Gorges de Court befindet sich im Berner Jura zwischen Moutier und Court. Der Perimeter weist eine Fläche von 6.3 km² auf und erstreckt sich vom nördlichen bis zum südlichen Eingang der Klus Gorges de Court (Abbildung 3.6). Der nördliche Eingang der Klus ist mit 580 m ü. M. der tiefste Punkt des Untersuchungsgebiets. Der höchste Punkt mit knapp 1200 m ü. M. liegt im Osten des Perimeters auf dem Rücken des Graitery.

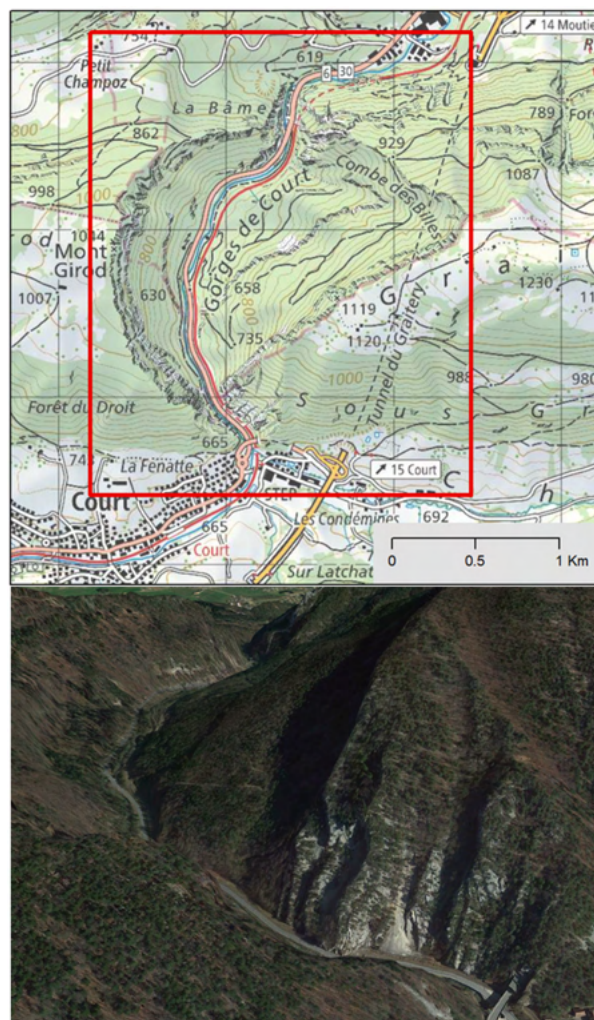


Abbildung 3.6: Oben: Lokalisation des Perimeters Gorges de Court (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020; unten: 3D-Ansicht des Perimeters Gorges de Court. Blick auf das südliche Ende der Gorges de Court mit Blick Richtung Moutier. Bild: © Google Earth, 2021

Bekannte Steinschlagereignisse

Die Bahnlinie auf der Strecke zwischen Moutier und Court ist von Steinschlagereignissen betroffen. So hat die SBB 2019 eine Studie in Auftrag gegeben, um die Steinschlaggefahr und die Schutzwirkung des Waldes im nördlichen Teil der Gorges de Court zu untersuchen. Besagte Studie der geoformer igp AG (Scherer, Oggier & Steffen, 2019) berichtet über zwei dokumentierte Steinschlagsereignisse (1996 und 2011), wovon eines die Bahnlinie traf. Generell seien viele abgelagerte Sturzkörper oberhalb der Bahnlinie zu finden, was darauf hindeutet, dass viele Ereignisse nicht dokumentiert wurden. Im Naturereigniskataster des Bundes sind weitere Ereignisse eingetragen, wie zum Beispiel das Ereignis von 2010 am südlichen Ende der Gorges de Court, bei welchem ein Sturzblock von ca. 5 m³ Grösse auf der Bahnlinie landete.

Auf Orthophotos sind einzelne Verbauungen beim südlichen Tunneleingang Roche des Nans ersichtlich. Zudem befindet sich beim südlichen Ende der Gorges de Court eine Galerie, welche die Fahrbahn vor Steinschlägen schützt.

Geologie

Die Gorges de Court ist eine Klus im Faltenjura durch die Antiklinale Graiterie (Pfirter, 1997). Die Antiklinale Graiterie wird von mehreren Schichten gebildet. Bei der Gorges de Court sind die Birmenstorfer-, Effinger-, Günsberg-, Oolithe Rouse und Reuchenette-Schichten aufgeschlossen (Pfirter et al., 1996). Die Reuchenette-Formation bildet die oberste Schicht und ist deshalb an den Flanken der Antiklinale Graiterie und somit am nördlichen und südlichen Eingang der Gorges de Court aufgeschlossen. Die Birmenstorfer-Formation befindet sich zu unterst und ist nur in wenigen Gebieten ersichtlich (Pfirter et al., 1996). Die Schichten bestehen hauptsächlich aus Kalksteinen mit mergeligen Zwischenlagen, wobei sie sich im Anteil an Allochemen (z.B. Ooide, Pelloide und Biogene) unterscheiden (Pfirter, 1997).

Klima

Laut den interpolierten Klima-Normwerten der Jahre 1981 bis 2010 (MeteoSchweiz, 2021) beträgt die mittlere Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet Gorges de Court ca. 7° C. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei ungefähr 1500 mm. Das Klimadiagramm in Abbildung 3.7 zeigt die monatliche Verteilung des Niederschlags, sowie die mittleren Monatstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass der Niederschlag mehr oder weniger gleichmässig übers Jahr verteilt ist. Die mittlere Temperatur be-

trägt in den Wintermonaten knapp unter 0°C , während im Sommer die mittleren Temperaturen auf über 15°C ansteigen (MeteoSchweiz, 2021).

Mit dem Klimawandel wird sich die mittlere Jahrestemperatur bis 2085 im Jura um ca. 1°C (RCP2.6) bzw. 4°C (RCP8.5) erwärmen, während der mittlere Jahresniederschlag ungefähr konstant bleibt (CH2018, 2018). Wie in Abbildung 3.7 zu sehen ist, gibt es aber merkbare Veränderungen in der Verteilung des Niederschlags innerhalb des Jahres. So wird es v.a. in den Sommermonaten deutlich trockener, während im Winter und Frühling mehr Niederschlag fällt (CH2018, 2018).

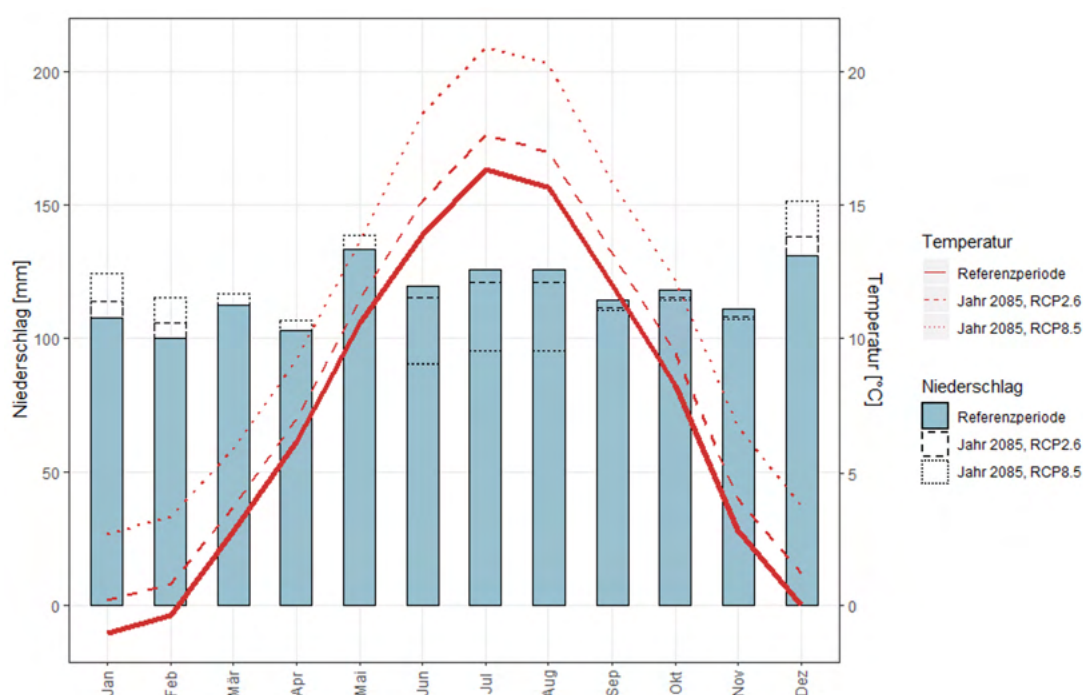


Abbildung 3.7: Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Gorges de Court mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018).

Wald

Der Wald reicht von 580 m ü. M. im Norden der Gorges de Court bis auf 1180 m ü. M. Damit sind Waldgesellschaften der untermontanen und obermontanen Stufe vertreten. In der untermontanen Stufe dominieren Buchenwälder, wobei es sich im Norden der Gorges de Court v.a. um den typischen Bingelkraut-/Zahnwurz-Buchenwald (12a) und den trockenen Bingelkraut-/Zahnwurz-Buchenwald (12e) handelt (Scherer et al., 2019). Auf Grund der ähnlichen Geologie und des Klimas wird angenommen, dass diese Waldstandorte auch weiter südlich des Untersuchungsgebietes noch verbreitet sind. Satellitenbilder bestätigen diese Annahme. Auf den Satellitenbildern sowie Fotos aus dem Bericht von Scherer et al. (2019) ist zudem zu erkennen, dass Nadelbäume (häufig Fichten) beigemischt sind, wobei der Anteil an Nadelbäumen in der obermontanen Stufe zunimmt.

Die Bestandeskarte der Region zeigt, dass zum Aufnahmezeitpunkt im Jahr 2011 das Stangenholz (12-30 cm BHD) mit 33% der Waldfläche am meisten vertreten war, gefolgt vom schwachen und mittleren Baumholz (31-40 cm bzw. 41-50 cm BHD) mit 32% und 21% der Waldfläche. Jungwuchs kam auf 6% der Waldfläche vor. Der Deckungsgrad betrug 2011 auf der Hälfte der Waldfläche über 75%. Auf weiteren 43% der Waldfläche betrug der Deckungsgrad zwischen 50% und 75%.

3.1.4 Perimeter Riginordlehne

Allgemein

Das Untersuchungsgebiet Riginordlehne liegt in den nördlichen Randalpen in den Gemeinden Arth und Küsnacht SZ. Der Perimeter weist eine Fläche von 17.3 km² auf und beinhaltet die Riginordlehne vom Immenseer Wald oberhalb Ghürsch bis nach Bürgisberg oberhalb Arth (Abbildung 3.8 und 3.9). Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über knapp 1400 Höhenmeter vom Zugersee auf 416 m ü. M. bis auf die Rigi Kulm auf 1797 m ü. M. Die Bahnlinie verläuft am Hangfuss entlang des Zugersees und liegt damit im Transitbereich mehrerer Steinschlaggebiete.



Abbildung 3.8: Lokalisation des Perimeters Riginordlehne (roter Kasten). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020

Bekannte Steinschlagereignisse

Innerhalb des Perimeters Riginordlehne wurden über 100 Steinschlagereignisse dokumentiert (BAFU, 2021). Das älteste Ereignis stammt von 1904, das jüngste Ereignis aus 2018. Von den über 100 Ereignissen verursachten rund die Hälfte Schäden an der Infrastruktur, einige mit einer Schadenshöhe von mehreren 10'000 Franken.

Am Hangfuss des Bolliwalds schützen deshalb Steinschlagschutznetze mit einem Aufnahmevermögen von 2'000 kJ die Fahrbahn (Ingenieurgesellschaft Louis/Beffa Tognacca GmbH, 2009).



Abbildung 3.9: 3D-Ansicht des Perimeters Riginordlehne. Blick auf die Riginordlehne und die Stadt Arth am Zugersee. Image: © Google Earth, 2021

Geologie

Das Untersuchungsgebiet Riginordlehne liegt im Molassebecken. Der geologische Atlas (Hantke & Bollinger, 2006) zeigt, dass im Ghürschbachtal beim Immenseerwald die Molasse Rouge aufgeschlossen ist. Es handelt sich um eine Wechsellagerung von Kalksandsteinbänken und Mergeln. Über der Molasse Rouge lagerte sich die Rigi-Rossbergschuppe ab. Sie besteht aus einer Wechsellagerung von Konglomeratbänken sowie Sandstein- und Mergellagen. Dabei wird die Rigi-Rossbergschuppe in die Radiolaritreiche Nagelfluh, Bunte Rigi-Nagelfluh und Scheidegg-Nagelfluh eingeteilt (Hantke, 2006). Erstere erstreckt sich als Band durch die Riginordlehne auf einer Höhe von ca. 1100 m ü.M. bis 1400 m ü.M und weiter südöstlich auf 900 – 1100 m ü.M (Hantke & Bollinger, 2006). Sie weist einen hohen Anteil an verwitterungsresistenten Radiolariten auf. Die Bunte Rigi-Nagelfluh ist hingegen reich an Dolomit- und kristallinen Gesteinen. Die Scheidegg-Nagelfluh ist auf dem Gipfel der Rigi aufgeschlossen und besteht fast ausschliesslich aus Flyschgeröllen (Hantke, 2006).

Klima

Laut den interpolierten Klima-Normwerten der Jahre 1981 bis 2010 (MeteoSchweiz, 2021) beträgt die mittlere Jahrestemperatur im Untersuchungsgebiet Riginordlehne ca. 7.5° C. Der mittlere Jahresniederschlag liegt bei ungefähr 1450 mm. Das

Klimadiagramm in Abbildung 3.10 zeigt zudem die monatliche Verteilung des Niederschlags, sowie die mittleren Monatstemperaturen. Es ist zu erkennen, dass der meiste Niederschlag in den Sommermonaten fällt, wobei der maximale Monatsmittelwert 185 mm beträgt (August). Die Wintermonate sind mit 70 bis 90 mm deutlich trockener. Die mittlere Temperatur beträgt in den Wintermonaten ca. 0° C, während im Sommer die mittleren Temperaturen auf 16° C ansteigen (MeteoSchweiz, 2021).

Mit dem Klimawandel wird sich die mittlere Jahrestemperatur bis 2085 in den Voralpen um ca. 1° C (RPC2.6) bzw. 4° C (RCP8.5) erwärmen, während der mittlere Jahresniederschlag ungefähr konstant bleibt (CH2018, 2018). Wie in Abbildung 3.10 zu sehen ist, gibt es aber merkliche Veränderungen in der Verteilung des Niederschlags innerhalb des Jahres. So wird es in den Sommermonaten tendenziell trockener, während im Winter und Frühling mehr Niederschlag fällt (CH2018, 2018).

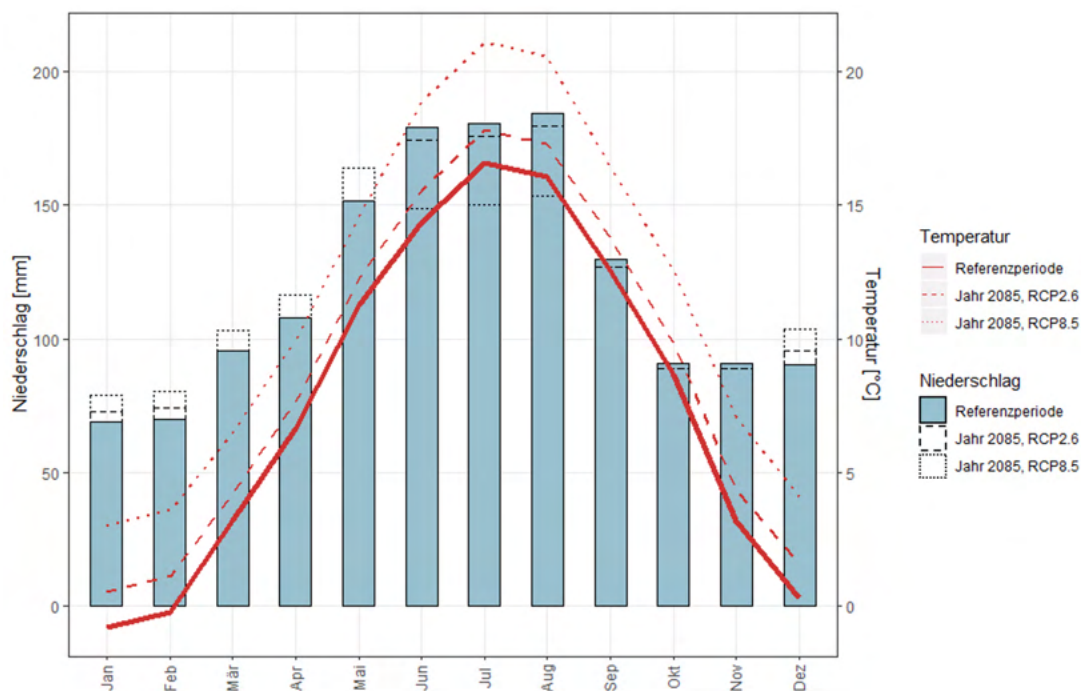


Abbildung 3.10: Klimadiagramm des Untersuchungsgebietes Riginordlehne mit den mittleren Monatsniederschlägen und -Temperaturen für die Referenzperiode 1981 bis 2010 (durchgezogene Linien), sowie für die Jahre 2070 bis 2099 unter dem Emissionsszenario RCP2.6 (gestrichelte Linie) und dem Emissionsszenario RCP8.5 (gepunktete Linie). Datengrundlage: Normwert-Gitterdaten (MeteoSchweiz, 2021) und den Klimaszenarien CH2018 (2018).

Wald

Der Wald an der Riginordlehne reicht von 460 m ü. M. auf ca. 1700 m ü. M. Damit sind Waldgesellschaften der submontanen bis subalpinen Stufe vertreten, wobei 40% aller Waldstandorte Tannen-Buchenwälder (typischer Tannen-Buchenwald und farnreicher Tannen-Buchenwald) sind (Hug, 2017). Neben dem Tannen-Buchenwald ist der typische Zahnwurz-Buchenwald häufig anzutreffen (Hug, 2017). Abundante Baumarten sind Buchen, Tannen und Fichten. Neben Buchen sind auch andere Laubholzarten wie Bergahorn und Eschen vertreten. Der Anteil an Laubhölzern an der Riginordlehne nahm zwischen 1925 und 2004 deutlich zu und lag bei der letzten Messung (Jahr 2004) bei 60%. Erstaunlicher Weise ist diese Zunahme in erster Linie nicht durch einen Anstieg der Buche zu verzeichnen, sondern durch die Zunahme der übrigen Laubbäume. Die höhere Präsenz von Laubhölzern ist unter anderem durch den Jungwald auf Sturmflächen zu erklären (Hug, 2017). Gleichzeitig nahm der Anteil der Fichte von 30% auf 20% ab, der Anteil der Tanne von 25% auf 17%. Die Abnahme der Nadelhölzer ist neben den Sturmschäden auch auf das forstliche Management zurückzuführen, welches vermehrt auf eine Förderung der Laubhölzer abzielt. Die Tannenverjüngung an der Riginordlehne leidet zudem unter hohem Verbissdruck (Hug, 2017).

Zum Aufnahmezeitpunkt der Bestandeskarte (2004) waren der Jungwuchs (< 10 cm BHD), das mittlere Baumholz (36 – 50 cm BHD), sowie stufige Bestände am häufigsten vertreten. Besonders der Jungwuchs erfuhr zwischen 1925 und 2004 eine grosse Zunahme, während die geschlossenen Bestände abnahmen. Dies ist womöglich auf Störungen (wie der Föhnsturm 1987 und der Lothar 1999) und den damit herbeigeführten Zwangsnutzungen zurückzuführen (Hug, 2017). Der Schlussgrad an der Rigi-Nordlehne liegt auf über der Hälfte der Waldfläche zwischen 60 – 90%. Bei weiteren knapp 18% ist der Schlussgrad sogar über 90%, während 11% der gesamten Waldfläche einen Schlussgrad von weniger als 20% aufweist. Wie bei den übrigen Untersuchungsgebieten ist auch bei diesen Zahlen Vorsicht geboten. Denn seit 2004 wurden an der Riginordlehne einerseits forstliche Eingriffe durchgeführt (Hug, 2017) und andererseits sind in der Zwischenzeit gewisse Bestände in die nächste Entwicklungsstufe gewachsen.

3.2 Aktuelle Gefahrensituation

Für jedes der vier Untersuchungsgebiete wird die aktuelle Gefahrensituation beurteilt. Dazu werden Simulationen mit dem Software-Paket RAMMS::Rockfall (Version 1.7.50) durchgeführt. Die verwendeten Parameter werden nachfolgend erläutert.

3.2.1 Digitales Terrainmodell

Als Grundlage für die Simulationen in RAMMS::Rockfall dient ein digitales Terrainmodell (DTM). Die Auflösung des DTMs ist einerseits entscheidend für die Güte der Resultate, andererseits werden die Resultate mit dieser Auflösung kalibriert (“RAMMS::Rockfall User Manual v1.6”, 2016). Die Wahl des DTMs ist aus diesen Gründen von grosser Bedeutung.

In der vorliegenden Arbeit wurde das digitale Terrainmodell aus dem Jahr 2019 (swisstopo, 2021b) mit einer Auflösung von 2 m x 2 m verwendet. Diese Auflösung erlaubt eine akkurate Abbildung wichtiger topographischer Strukturen wie Runsen und Klippen und gleichzeitig eine angemessene Simulationsdauer (“RAMMS::Rockfall User Manual v1.6”, 2016).

3.2.2 Anrisspunkte

Für die Gefahrenmodellierung in RAMMS::Rockfall müssen zuerst die potentiellen Anrisspunkte definiert werden. Dies wird anhand eines automatisierten Algorithmus durchgeführt, welcher von Völkl (2021) im Rahmen des Projekts CCAMM entwickelt wurde. Dabei werden folgende drei Kriterien zur Ausscheidung von potentiellen Anrisspunkten verwendet:

- Bodentyp Fels: Es werden jene Gebiete ausgeschieden, welche dem Bodentyp “bedrock” entsprechen.
- Hangneigung $> 55^\circ$: Innerhalb der Felsflächen werden die Bereiche mit einer Hangneigung von über 55° selektiert.
- Lokale topographische Höhen: Die Anrissgebiete sollen an lokalen topographischen Höhen, wie z.B. an Felsvorsprüngen ausgeschieden werden. Die Fliessakkumulation (engl. Flow Accumulation) der entsprechenden Rasterzelle soll deshalb Null betragen.

Die aus den drei Kriterien resultierenden Anrisspunkte werden anschliessend reduziert, um eine zu grosse Anzahl an Anrisspunkten zu verhindern. Dabei werden Geländekammern definiert, in welchen jeweils nur der höchstgelegene Anrisspunkt ausgewählt wird. Die Geländekammern werden über die Fliessakkumulation definiert. Zellen, in welche mehr als 250 andere Zellen fliessen (Fliessakkumulation > 250) werden als Wasserlauf definiert. Es ergibt sich ein Netz von Wasserläufen, welches in mehrere Abschnitte aufgeteilt werden kann. Alle Zellen, welche dem gleichen Gewässerabschnitt aufgrund ihrer Fliessrichtung zugeordnet werden, entsprechen einer Geländekammer. Für eine detailliertere Beschreibung des Vorgehens wird auf die Dokumentation (Völkl, 2021) verwiesen.

Die Tabelle 3.1 listet die Anzahl resultierenden Anrisspunkte für die vier Untersuchungsgebiete auf. Eine Karte mit der Lokalisation der Anrisspunkte ist in Anhang A.1 zu finden.

Tabelle 3.1: Anzahl Anrisspunkte pro Untersuchungsgebiet

Albula	Biasca	Gorges de Court	Riginordlehne
448	1137	457	1521

3.2.3 Blockgrössen, -formen und Startpositionen

Blockgrössen

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein 30-jährliches, 100-jährliches und ein 300-jährliches Ereignis pro Untersuchungsgebiet simuliert. Die verwendeten Blockgrössen für die drei Jährlichkeiten sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2: Verwendete Blockgrössen für die 3 Jährlichkeiten

30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
0.2 m ³	1 m ³	5 m ³

Mit einer Gesteinsdichte von 2'700 kg/m³ (Default-Wert in RAMMS::Rockfall) resultiert ein Gewicht von 540 kg für das 30-jährliche Ereignis, 2'700 kg für das 100-jährliche Ereignis und 13'500 kg für das 300-jährliche Ereignis.

Die Definition der Blockgrößen basiert auf den verwendeten Blockgrößen in anderen Studien (Dorren, Bauer, Günter, Menk & Moos, 2017; Scherer et al., 2019) und gilt für alle Untersuchungsgebiete. Dorren et al. (2017) führten Simulationen für die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte bezüglich Steinschlag im Kanton Graubünden durch. Somit weisen die Berechnungen einen ähnlichen Massstab auf, wie vorliegende Arbeit und die Blockgrößen wurden aus dieser Studie übernommen. Die Blockgrößen sind aber auch für Gebiete ausserhalb des Kantons Graubünden repräsentativ, wie ein Vergleich mit der Studie von Scherer et al. (2019) zeigt, welche ähnliche Blockgrößen für das Untersuchungsgebiet Gorges de Court definiert.

Eine Definition der Blockgrösse in Abhängigkeit der Gesteinseigenschaften bzw. der Klüftung und Verschneidungen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Eine solche Aufteilung wäre sicherlich realitätsgetreuer, da die Blockgrößen stark vom Verlauf der Schichtflächen und Klüftungen abhängen (BAFU, 2015). Um die Trennflächen zu bestimmen, wird häufig eine Einzelhangbeurteilung durchgeführt (BAFU, 2016a). Dies ist für vorliegende Arbeit aber nicht realisierbar. Für die Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte mit Masstab 1:25'000 ist eine Generalisierung der Blockgrösse für alle Gebiete jedoch ausreichend. Dorren et al. (2017) bestätigen diese Aussage. Sie schlussfolgern, dass die simulierten Ergebnisse, mit den selben Blockgrößen für den ganzen Kanton Graubünden, durchaus plausibel sind (Dorren et al., 2017).

Blockform

RAMMS::Rockfall ermöglicht es, für die Simulationen verschiedene Blockformen zu definieren. Die Blockform ist, wie die Blockgrösse, von der Klüftung des Gesteines abhängig (BAFU, 2016a). Aus den oben genannten Gründen wird aber auch bei der Blockform nicht zwischen den Untersuchungsgebieten differenziert. Wie gravierend diese Annahme ist, soll ein Vergleich der Simulationen mit unterschiedlichen Blockformen zeigen. Dazu werden alle Simulationen der aktuellen Gefahrensituation sowohl mit einer kompakten Blockform *Real Equant 1.2* als auch mit einer flacheren Blockform *Real Flat 1.6* durchgeführt (s. Abbildung 3.11).

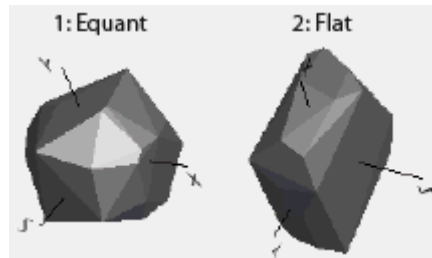


Abbildung 3.11: Darstellung der verwendeten Blockformen *Real Equant 1.2* und *Real Flat 1.6*.

Startpositionen

In RAMMS::Rockfall werden zudem die Anzahl zufälliger Startorientierungen (engl. Number of Random Initial Orientations) definiert. Diese Startorientierungen definieren die Orientierung des Blockes im Raum am Anrisspunkt. In der vorliegenden Arbeit wird mit 100 zufälligen Startorientierungen gerechnet. Dies scheint eine angemessene Zahl, da bei einer deutlich geringeren Anzahl an Startorientierungen die Wahrscheinlichkeit gross ist, dass die Magnitude unterschätzt wird (s. Resultate der Berechnungen mit lediglich 10 zufälligen Startorientierungen pro Block in Anhang A.12). Eine grössere Anzahl an Startpositionen hingegen würde die Simulationsdauer markant verlängern, ohne eine signifikante Besserung der Ergebnisse zu erreichen (mündliche Mitteilung Dr. Andrin Caviezel, Steinschlags- und RAMMS-Experte WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF, 21.07.2021).

3.2.4 Bodenparameter

In allen Untersuchungsgebieten wird die Bodenbedeckung anhand der CORINE-Landcoverdaten aus dem Jahr 2018 (Copernicus Land Service, 2018), sowie falls vorhanden aus den Landcoverdaten swissTLMRegio aus dem Jahr 2020 (swisstopo, 2020) bestimmt. Die Karten mit der resultierenden Bodenbedeckung pro Untersuchungsgebiet sind in Anhang A.2 aufgeführt. Anschliessend werden für die unterschiedlichen Bodenbedeckungen in RAMMS::Rockfall entsprechende Bodenparameter bestimmt. Dazu wird jedem Bodenbedeckungstyp eine mechanische Bodenfestigkeit (M_e -Wert) und ein Widerstandswert (C_d -Wert) (engl. scar drag coefficient) zugeteilt. Der M_e -Wert bestimmt die Eindringtiefe eines Blockes in den Boden: Je höher der Wert, desto geringer ist die Eindringtiefe, wobei die Korrelation zwischen M_e -Wert und Eindringtiefe nicht linear ist (Lu et al., 2019). Der C_d -Wert bestimmt,

wie stark die Reibung zwischen Block und Untergrund aufgrund der Bodenverdichtung ist (Lu et al., 2019). Je höher der C_d -Wert, desto grösser ist die Reibung.

Die gewählten Grössen für die mechanische Bodenfestigkeit und den Widerstandswert haben einen grossen Einfluss auf die Simulationsergebnisse (“RAMMS::Rockfall User Manual v1.6”, 2016). Deshalb sind in RAMMS:Rockfall Richtwerte für die gängigsten Bodenklassen definiert. Die Tabelle 3.3 zeigt auf, welche Richtwerte für die einzelnen Bodenbedeckungstypen verwendet werden.

Tabelle 3.3: Zuteilung der Bodenbedeckungstypen der Untersuchungsgebiete in die vordefinierten Bodenklassen und deren mechanische Bodenfestigkeiten (M_e -Werte) und Widerstandswerte.

Bodentyp (aus der Arealstatistik und swissTLMRegio)	vordefinierte Bodenklasse in RAMMS::Rockfall	M_e -Wert	C_d -Wert
Fels	bedrock	100.0	2.00
Wald	subsoil	5.0	1.55
Gebüschwald	topsoil	3.0	1.55
Oberboden	topsoil	3.0	1.55
Alpiner Oberboden	subsoil	5.0	1.55
Hangschutt	scree fine	7.0	2.0
Sumpf	swamp	0.3	50.00
Gewässer	river	0.1	10000.00
Siedlung	asphalt	75.0	2.0
Infrastruktur	asphalt	75.0	2.0

3.2.5 Wald

In RAMMS::Rockfall (Version 1.7.50) kann die Waldfläche in dichten, mitteldichten und offenen Wald eingeteilt werden. Die Bäume werden zufällig angeordnet. Die Stammzahlen pro Hektare sowie die BHD-Verteilungen der drei Dichteklassen sind in Tabelle 3.4 aufgelistet. Es handelt sich dabei um Default-Werte des Software-Pakets RAMMS::Rockfall.

Tabelle 3.4: Verwendete Stammzahl und BHD-Verteilung in RAMMS::Rockfall für dichten, mitteldichten und offenen Wald.

	dichter Wald	mitteldichter Wald	offener Wald
Stammzahl	600/ha	400/ha	200/ha
BHD-Verteilung (Median (+-Sigma))	30 cm (+-9 cm)	28 cm (+-7 cm)	25 cm (+-5 cm)

Im Rahmen vorliegender Arbeit wird der Wald in die oben genannten Dichteklassen eingeteilt. Dazu wird die aktuelle Bestandesdichte mittels des neuesten Vegetationshöhenmodells (VHM) des Landesforstinventars ermittelt. Das VHM beruht auf LiDAR-Daten zwischen 2016-2019 und ist schweizweit mit einer räumlichen Auflösung von 2 m x 2 m verfügbar (Ginzler, 2021). Um die Bestandesdichte zu evaluieren, wird auf der gesamten Waldfläche im Untersuchungsgebiet (definiert nach Kap. 3.2.4) eine Lückendetektion durchgeführt (s. Anhang B.1). Je mehr Lücken der Wald aufweist, desto offener ist der Bestand. Als Lücken werden alle Zellen des VHM bezeichnet, welche eine Vegetationshöhe von weniger als 3 Metern aufweisen. Diese Klassifizierung lehnt sich an die Walddefinition des Landesforstinventars (LFI, 2021). Anschliessend wird der Wald in 25 m x 25 m grosse Rasterzellen eingeteilt. In jeder Rasterzellen wird der prozentuale Anteil an Lücken (Zellen mit einer Vegetationshöhe < 3 m) berechnet und folgendermassen in die drei Dichtekategorien eingeteilt:

- Dichter Bestand: Anteil an Bestandeslücken $\leq 25\%$
- Mitteldichter Bestand: Anteil an Bestandeslücken $> 25\%$ und $\leq 50\%$
- Offener Bestand: Anteil an Bestandeslücken $> 50\%$

Für das Untersuchungsgebiet Albula resultieren dichte Bestände auf 54% der Waldfläche, mitteldichte Bestände auf 20% und offene Bestände auf 26% der Waldfläche. Abbildung 3.12 zeigt, dass die dichten Bestände aber v.a. am Nordhang liegen, welcher für die Bahnstrecke auf dem Südhang nicht von Bedeutung ist. Der relevante Schutzwald im Südhang hingegen weist grosse offene und mitteldichte Bestände auf.

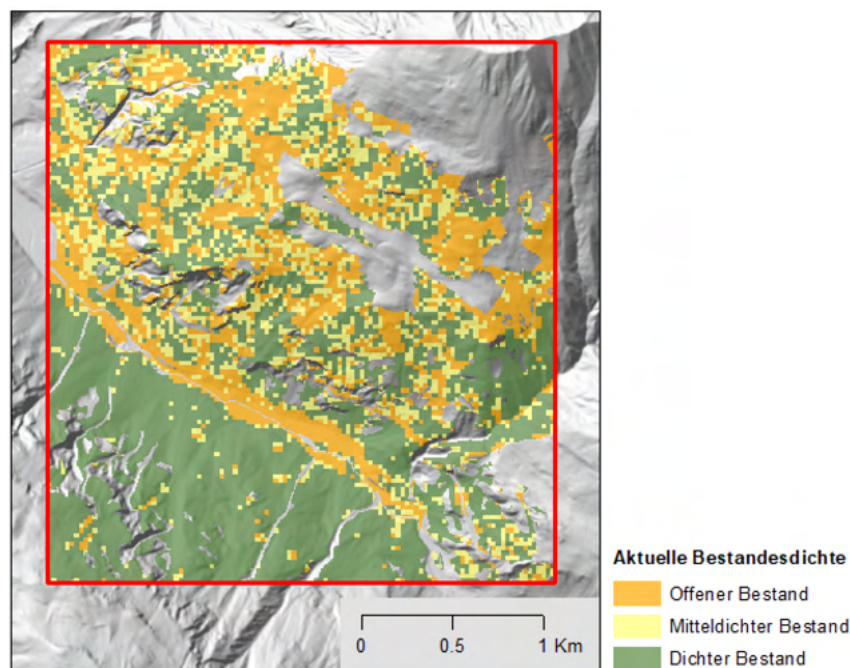


Abbildung 3.12: Aktuelle Bestandesdichte des Waldes im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten). Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019

Für das Untersuchungsgebiet Biasca ergab die Analyse einen dichten Bestand auf 73% der Waldfläche, einen mitteldichten Bestand auf ca. 11% und eine offene Bestockung auf 16%.

Im Untersuchungsgebiet Gorges de Court sind auf 86% der Waldfläche dichte Bestände vorhanden, während mitteldichte und offene Bestände nur auf 6% bzw. 8% der Waldfläche vorkommen.

Im Untersuchungsgebiet Riginordlehne sind auf 77% der Waldfläche dichte Bestände anzutreffen. 9% der Waldfläche sind mitteldicht, während auf ca. 14% offene Bestände vorkommen. Letztere befinden sich vorwiegend an den Waldrändern, sowie am Hangfuss der Riginordlehne.

Die Karten mit der detaillierten Verteilung der Bestandesdichten für alle Untersuchungsgebiete sind in Anhang B.1 aufgeführt.

3.3 Zukünftige Gefahrensituation

Für jedes der vier Untersuchungsgebiete wird neben der aktuellen auch die zukünftige Gefahrensituation im Jahr 2085 beurteilt. Die Gefahrenbeurteilung wird sowohl für ein moderates Emissionsszenario RCP2.6, als auch für ein extremes Emissionsszenario RCP8.5 durchgeführt. Dazu werden wiederum Simulationen mit RAMMS::Rockfall (Version 1.7.50) realisiert unter Verwendung des digitalen Terrainmodells aus dem Jahr 2019 mit einer Auflösung von 2m x 2m (swisstopo, 2021b). Da einige verwendete Parameter sensitiv auf Klimaänderungen reagieren, müssen diese entsprechend angepasst werden.

3.3.1 Änderung der Häufigkeit von Steinschlagereignissen

Mani und Caduff (2015) definieren die Frequenz von Steinschlägen als Zusammenspiel zwischen Materialverfügbarkeit und Wasserzufluss des Systems. Dies wird in vorliegender Arbeit übernommen. Dabei wird die Materialverfügbarkeit durch die Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins und die Stärke der Frostverwitterung beeinflusst. Der Wasserzufluss wird definiert als Kombination der Starkniederschläge und der Schneeschmelze (Abbildung 3.13).

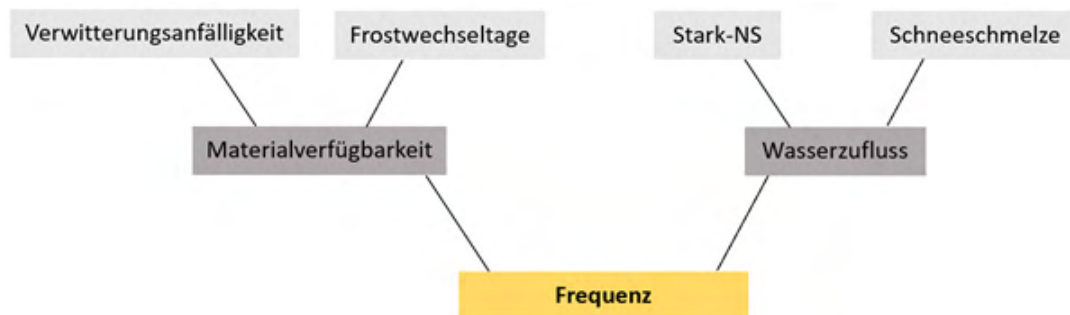


Abbildung 3.13: Schematische Darstellung der Variablen, welche zur Bestimmung der Änderung der Frequenz verwendet werden, in Anlehnung an das Vorgehen von Mani und Caduff (2015).

Aufgrund fehlender Datengrundlagen und limitierenden Ressourcen werden weitere Variablen, welche Auswirkungen auf die Frequenz von Steinschlägen haben, nicht berücksichtigt (z. B. Wind und Wurzeldruck, Erschütterungen, etc.). Der Einfluss von Permafrost wird bewusst weggelassen, da ein Vorkommen von Permafrost in allen Untersuchungsgebieten laut der Hinweiskarte für Permafrostverbreitung (BAFU, 2005) unwahrscheinlich ist.

Wie sich eine Zunahme bzw. Abnahme der Materialverfügbarkeit und des Wasserzufflusses auf Grund des Klimawandels auf die Frequenz auswirkt ist in Tabelle 3.5 dargestellt. Diese Beurteilung lehnt sich an das Vorgehen der Klimasensitivitätsstudie Naturgefahren von Mani und Caduff (2015).

Tabelle 3.5: Veränderung der Frequenz in Abhängigkeit der Materialverfügbarkeit und des Wasserzufflusses. Verändert nach Mani und Caduff (2015).

Materialverfügbarkeit	Wasserzuffluss	Frequenz
abnehmend	-	abnehmend
unverändert	abnehmend	abnehmend
unverändert	unverändert	unverändert
unverändert	zunehmend	zunehmend
zunehmend	abnehmend	unverändert
zunehmend	unverändert oder zunehmend	zunehmend

Nachfolgend wird erläutert, welche Datengrundlagen und Methoden verwendet werden, um die Veränderungen der Materialverfügbarkeit bzw. des Wasserzufflusses mit dem Klimawandel einzuschätzen.

Veränderung der Materialverfügbarkeit

Die Materialverfügbarkeit wird im Rahmen dieser Arbeit durch die Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins und der Frostverwitterung bestimmt. Die Tabelle 3.6 zeigt, wie sich eine Änderung der Frostverwitterung in Abhängigkeit der Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins auf die Materialverfügbarkeit auswirkt (Einschätzung nach Mani und Caduff (2015)).

Tabelle 3.6: Veränderung der Materialverfügbarkeit in Abhängigkeit der Verwitterungsanfälligkeit des Gesteins und der Veränderung der Anzahl Frostwechseltage. Verändert nach Mani und Caduff (2015).

Verwitterungsanfälligkeit	Frostverwitterung	Materialverfügbarkeit
Gross und Mittel	unverändert	unverändert
Gross und Mittel	abnehmend	abnehmend
Gross und Mittel	zunehmend	zunehmend
Gering	-	unverändert

Verwitterungsanfälligkeit

Die Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine wird aus der Studie SilvaProtect-CH (Losey & Wehrli, 2013) übernommen. Dabei werden die Gesteine anhand ihrer Lithologie in drei Klassen eingeteilt: (1) Geringe Verwitterungsanfälligkeit, (2) Mittlere Verwitterungsanfälligkeit und (3) Grosse Verwitterungsanfälligkeit (s. Anhang A.3). Für die Untersuchungsgebiete Biasca und Riginordlehne resultiert eine mittlere Verwitterungsanfälligkeit. Auch im Perimeter Gorges de Court weisen die meisten Gesteine eine mittlere Verwitterungsanfälligkeit auf. Im Untersuchungsgebiet Albula sind die meisten Felspartien aus gering verwitterbaren Gestein, während nur einige Gesteine eine mittlere Verwitterungsanfälligkeit aufweisen (s. Anhang A.4).

Frostverwitterung

Die Intensität der Frostverwitterung wird in vorliegender Methode mit der Anzahl an Frostwechseltage gleichgesetzt. Dies wird damit begründet, dass häufige Frost-Tau-Wechsel zu einer Destabilisierung und Ermüdung bestehender Gesteinsbrücken führen (s. Kap. 2.2). Als Frostwechseltage werden jene Tage bezeichnet, an welchen die Minimaltemperatur unter 0° C fällt, während die Maximaltemperatur bei über 0° C liegt. Diese Anzahl an Temperaturwechsel durch 0° C wird auch in vielen anderen Studien mit der Intensität der Frostverwitterung korreliert (Wegmann, 1998).

Zur Berechnung der Änderung der Anzahl Frostwechseltage, werden die in den Klimaszenarien CH2018 (2018) verfügbaren Eistage von den Frosttagen subtrahiert. Als Eistage werden Tage bezeichnet, an welchen sowohl die Minimal- als auch die Maximaltemperatur unter 0°C liegt. An Frosttagen sinkt hingegen nur die Minimaltemperatur unter 0°C , nicht jedoch die Maximaltemperatur. Die Daten stehen in vier Höhenstufen pro Grossregion der Schweiz (Jura, Mittelland, Voralpen, Alpen und Alpensüdseite) sowie pro Jahreszeit zur Verfügung. Die Berechnungen erfolgen separat für die zwei Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5.

Eine Veränderung der Frostverwitterung wird ab einer Veränderung der Frostwechseltage von 10 Tagen angenommen (Variante 1, s. Anhang A.5). Diese Beurteilung wurde von Mani und Caduff (2015) übernommen. Um den Einfluss dieses Grenzwertes zu beurteilen wird eine zweite Variante berechnet (Variante 2), bei welcher eine relevante Veränderung der Frostwechseltage erst ab einer Veränderung von 20 Tagen angenommen wird.

Veränderung des Wasserzuflusses

Zur Berechnung der Änderung des Wasserzuflusses wird zwischen nivalen und pluvialen Einzugsgebieten unterschieden. Die Einteilung erfolgt anhand des Entscheidungsdiagramms des BAFU zur Bestimmung des Abflussregimes (Aschwanden und Weingartner (1985), s. Anhang A.6). Die Untersuchungsgebiete Albula und Riginordlehne werden als nivale Einzugsgebiete klassifiziert, während die Untersuchungsgebiete Biasca und Gorges de Court zu den pluvialen Einzugsgebieten zugeordnet werden.

Pluviale Einzugsgebiete

Für die pluvialen Einzugsgebiete Biasca und Gorges de Court wird der zukünftige Wasserzufluss anhand der Veränderung des 1-Tagesniederschlags mit einer Wiederkehrperiode von 5 Jahren berechnet. Dies wird damit begründet, dass intensive Niederschläge oft eine Auslösung von Steinschlägen hervorrufen (Gruner, 2008). Dabei reichen bereits kurze aber intensive Niederschläge (Mani & Caduff, 2015). Auch die Studie von Mani und Caduff (2015) verwendet die Veränderung des 5-jährlichen Tagesniederschlags zur Beurteilung des zukünftigen Wasserzuflusses.

Die Veränderung des 1-Tagesniederschlags mit einer Wiederkehrperiode von 5 Jahren wird aus den Klimaszenarien CH2018 (2018) entnommen. Dabei wird zwischen den Regionen Westschweiz, Nordostschweiz, Alpen West, Alpen Ost und Südschweiz

unterschieden, sowie zwischen den Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5. Eine Veränderung des Wasserzuflusses wird ab einer Änderung des 5-jährlichen Tagesniederschlags von mindestens 10% angenommen. Die Resultate sind in Anhang A.7 aufgeführt.

Nivale Einzugsgebiete

In den nivalen Untersuchungsgebieten Albula und Riginordlehne sollen zusätzlich zu den Starkniederschlägen, die Veränderungen der Schmelzwasserabflüsse berücksichtigt werden. Die Veränderung des Wasserzuflusses wird entsprechend der Tabelle 3.7 bestimmt.

Tabelle 3.7: Veränderung des Wasserzuflusses für die nivalen Einzugsgebiete Albula und Riginordlehne in Abhängigkeit der Änderung der Starkniederschläge und Schmelzwasserabflüsse. Verändert nach Mani und Caduff (2015).

Starkniederschläge	Schmelzwasserabflüsse	Wasserzufluss
unverändert	abnehmend	abnehmend
unverändert	unverändert	unverändert
unverändert	zunehmend	zunehmend
zunehmend	abnehmend	unverändert
zunehmend	unverändert oder zunehmend	zunehmend

Die Einschätzung der Veränderung der Starkniederschläge wird analog der pluvialen Einzugsgebiete vorgenommen. Für die Änderung der Schmelzwasserabflüsse werden die mittleren täglichen Schmelzwasserabflüsse pro Jahreszeit aus der Studie von (Brunner, Farinotti, Zekollari, Huss & Zappa, 2019) verwendet. Die Daten stehen für 307 Einzugsgebiete zur Verfügung, wobei zwischen dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 unterschieden wird. In Anhang A.8 sind die verwendeten Einzugsgebiete konkretisiert. Analog der Methode zur Bestimmung der Starkniederschläge wird auch hier von einer signifikanten Änderung ab mindestens 10% ausgegangen. Die Resultate sind in Anhang A.8 aufgeführt.

Die resultierenden Veränderungen der Wasserzuflüsse für alle Untersuchungsgebiete, Jahreszeiten und Emissionsszenarien sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Tabelle 3.8: Änderung des Wasserzuflusses (Variante 1) für die vier Untersuchungsgebiete pro Jahreszeit und Emissionsszenario.

		Albula	Biasca	Gorges de Court	Riginordlehne
Winter	RCP2.6	+	+/-	+/-	-
	RCP8.5	+	+	+	+/-
Frühling	RCP2.6	+	+/-	+/-	+/-
	RCP8.5	+	+	+	+/-
Sommer	RCP2.6	-	+/-	+/-	+/-
	RCP8.5	-	+/-	+/-	+/-
Herbst	RCP2.6	-	+/-	+/-	+/-
	RCP8.5	+/-	+	+	+/-

3.3.2 Zukünftige Anrisspunkte

Für die Gefahrenmodellierung der zukünftigen Szenarien wird die Anzahl an Anrisspunkten je nach erwarteter Frequenzänderung angepasst. Wird aus den Berechnungen (s. Kapitel 3.3.1) eine Zunahme der Frequenz von Steinschlägen erwartet, wird dies mit einer Zunahme der Anrisspunkte um den Faktor 1.5 abgebildet. Dazu werden 1.5mal so viele Anrisspunkte zufällig aus den nicht reduzierten potentiellen Anrisspunkten ausgewählt. Sind in einem Untersuchungsgebiet nur ein Teil der Anrisspunkte von einer Zunahme betroffen, werden nur diejenigen nicht reduzierten Anrisspunkte beachtet, welche sich in derselben Geländekammer befinden (s. Kapitel 3.2.2). Bei einer Abnahme der Frequenz bis Ende des 21. Jahrhunderts werden die Anrisspunkte um die Hälfte reduziert. Auch hier wird die Auswahl randomisiert. Die Berechnungen wurden in RStudio (Version 3.6.1.) durchgeführt.

3.3.3 Blockgrößen, -formen und Startpositionen

Für die zukünftige Gefahrenmodellierung werden dieselben Blockgrößen verwendet, da die Blockgrösse v.a. durch die Orientierung der Trennflächen und Klüfte bestimmt wird (BAFU, 2016a), welche als konstant betrachtet werden kann. Das selbe gilt für die Blockform. Allerdings wird für die zukünftige Gefahreneinschätzung nur mit der Blockform Real Equant 1.2 simuliert. Weiter wird wiederum mit 100 zufälligen Startpositionen gerechnet.

3.3.4 Bodenparameter

Da die Bodenparameter nicht nur vom Bodentyp sondern auch von der Bodenfeuchte abhängen, sind die Werte klimasensitiv. Verändert sich die Bodenfeuchte mit dem Klimawandel, müssen auch die Bodenparameter entsprechend angepasst werden. Ist eine geringere Bodenfeuchte bis Ende des 21. Jahrhunderts zu erwarten, und damit trockenere und härtere Böden, wird die Eindringtiefe eines Blockes verringert und der M_e -Wert wird dadurch grösser. Ist hingegen eine erhöhte Bodenfeuchte zu erwarten, werden die Böden nasser und weicher, wodurch sich der M_e -Wert verringert. Die Veränderung der Bodenfeuchte mit dem Klimawandel wird anhand der standardisierten Bodenfeuchtanomalie aus den CH2018 Szenarien eingeschätzt. Ist die Bodenfeuchteanomalie in der Region grösser als 1 bzw. kleiner als -1, werden die Bodenparameter entsprechend angepasst. Für trockene Unterböden wird der M_e -Wert von 3.0 auf 7.0 erhöht, für trockene Oberböden wird der M_e -Wert von 5.0 auf 9.0 erhöht. Der Widerstandswert wird konstant bei 1.55 gehalten. Die Werte beruhen auf den Erkenntnissen einzelner Fallstudien (Ringebach, Stihl et al., 2021; Vick, Zimmer, White, Massey & Davies, 2019) und der Experteneinschätzung von Dr. Andrin Caviezel und Adrian Ringebach (Steinschlags- und RAMMS-Experten SLF).

3.3.5 Wald

Der Klimawandel wird die Wirkung des Schutzwaldes je nach Standortregion unterschiedlich stark verändern (Bebi, Bugmann, Lüscher, Lange & Brang, 2016; Huber, Bugmann, Cailleret, Bircher & Lafond, 2021). Die wichtigsten Auswirkungen des Klimawandels auf den Schutzwald sind laut Bebi et al. (2016) ein erhöhter Trockenstress auf trockenheitslimitierten Standorten, ein stärkeres Wachstum auf kältelimitierten Standorten und eine Zunahme von natürlichen Störungen auf mittleren Standorten.

Diese Effekte beeinflussen das Wachstum und die Mortalität der Bäume, was zu einer Veränderung der Grundfläche bis Ende des 21. Jahrhunderts führt (Bircher, Cailleret, Zingg & Bugmann, 2016b). Dabei sind die Reaktionen der Bestände auf die Klimaänderung stark von den standörtlichen Bedingungen, wie Artenzusammensetzung, Struktur der Bestände und Bodenbedingungen abhängig (Bircher et al., 2016b). Diese Veränderung der Grundfläche ist für die Schutzwirkung des Waldes gegenüber Steinschlag von grosser Bedeutung, da die Schutzwirkung mit zunehmender Grundfläche steigt (Dorren et al., 2015). Deshalb werden nachfolgend für alle Untersuchungsgebiete die klimabedingten Veränderungen der Bestände eingeschätzt. Anschliessend werden diese Veränderungen in RAMMS:Rockfall implementiert, indem die Stammzahl der Bestände angepasst wird (s. Anhang B.2). Nachfolgend werden die Änderungen unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für jedes Untersuchungsgebiet erläutert. Für das Emissionsszenario RCP2.6 wird in allen Untersuchungsgebieten keine Veränderung der Bestandesdichte angenommen. Diese Annahme beruht auf den Simulationen von Huber et al. (2021), welche für ein schwaches Klimaszenario keine markanten Veränderungen der Bestandesdichten modellieren.

Perimeter Albula

Durch das kontinentale Klima im Untersuchungsgebiet Albula herrschen bereits heute trockene Bedingungen. Geringe Niederschlagssummen, Südexposition und ein flachgründiger Boden führen dazu, dass die Tanne in der hochmontanen Stufe nicht mehr vorkommt. Auch für die Fichte liegt dieser Standort an deren Trockenheitsgrenze. Es treten deshalb häufig trockenheitsadaptierte Baumarten wie Waldföhre und Lärche auf. Diverse Studien zeigen, dass die Mortalität auf stark trockenheitslimitierten Standorten unter dem Klimawandel zunehmen und sich die Schutzleistung dadurch langfristig reduzieren wird (Bircher, Cailleret, Zingg & Bugmann, 2016a; Rigling et al., 2012). Laut den Modellierungen von Huber et al. (2021) sind die trockenheitslimitierten Standorte am stärksten von den negativen Folgen des Klimawandels betroffen und es wird eine besonders ausgeprägte Abnahme der Grundfläche erwartet. Für die Fichten- und Waldföhrenbestände wird deshalb eine Reduktion der Stammzahl implementiert. Auf einem Drittel der aktuell dichten Bestände wird die Stammzahl auf 400/ha reduziert, wobei die Auswahl zufällig getroffen wird.

Wie sich die Grundfläche in der obersubalpinen Stufe entwickeln wird, ist schwierig vorherzusagen. Viele Studien zeigen, dass die Bestände in hohen Lagen durch die steigenden Temperaturen profitieren (Jochner, Bugmann, Nötzli & Bigler, 2018; Bebi et al., 2016; Bircher et al., 2016b). Neue Studien zeigen jedoch, dass die Effekte des Klimawandels je nach Region, Bodeneigenschaften und Wasserverfügbarkeit variieren können (Martin-Benito et al., 2018; Huber et al., 2021). Simulationen von Huber et al. (2021) sagen für flachgründige Böden eine gleichbleibende Grundfläche für obersubalpine Lärchen-Arvenwälder voraus. Deshalb wird für diese Bestände keine Veränderung der Dichte angenommen.

Eine Verschiebung der Waldgrenze wird nicht erwartet. Zwar wurde in vielen subalpinen Wäldern ein Anstieg der Waldgrenze in den letzten Jahrzehnten beobachtet (Mietkiewicz, Kulakowski, Rogan & Bebi, 2017), jedoch ist die Ausbreitung des Waldes im Untersuchungsgebiet Albula nicht realistisch, da einerseits dichte Legföhren oberhalb der Waldgrenze wachsen und andererseits eine Beweidung stattfindet.

Für die zukünftigen Szenarien resultieren aus oben genannten Annahmen unter dem Emissionsszenario RCP8.5 nur noch auf 39% der Waldfläche dichte Bestände, mitteldichte Bestände sind auf 26% und offene Bestände auf 35% anzutreffen. Eine Karte mit der Einteilung der zukünftigen Bestände in die drei Dichteklassen ist im Anhang B.2 beigelegt.

Perimeter Biasca

Die Wälder im unteren Teil des Untersuchungsgebiets Biasca setzen sich aus diversen Pionierbaumarten, wie Kastanien, Eichen, Linden, Birken und Ulmen zusammen. Mit den wärmeren Temperaturen wird eine Ausdehnung dieser Arten in höher gelegene Gebiete erwartet (Huber et al., 2021; Zimmermann et al., 2016). Die trockenheitsempfindliche Fichte (Lévesque et al., 2013) wird hingegen starke Einbussen im Zuwachs erleiden. Dies ist unter anderem mit den deutlich trockeneren Sommern zu begründen (Bugmann et al., 2014). Modellierungen deuten darauf hin, dass der Verlust der Fichte nur teilweise durch die Pionierbaumarten kompensiert werden kann und deshalb eine Abnahme der Grundfläche resultiert (Huber et al., 2021). Da die Mortalität mit der Bestandesdichte zunimmt (Bircher et al., 2016a) wird auf 1/3 der dichten Waldfläche die Stammzahl auf 400/ha reduziert. Die Auswahl erfolgt zufällig. Es resultieren dichte Bestände auf 49% der Waldfläche, mitteldichte Bestände auf 35% und offene Bestände auf 16%. Die Abbildung 3.14 zeigt die aktuellen sowie die zukünftigen Bestandesdichten.

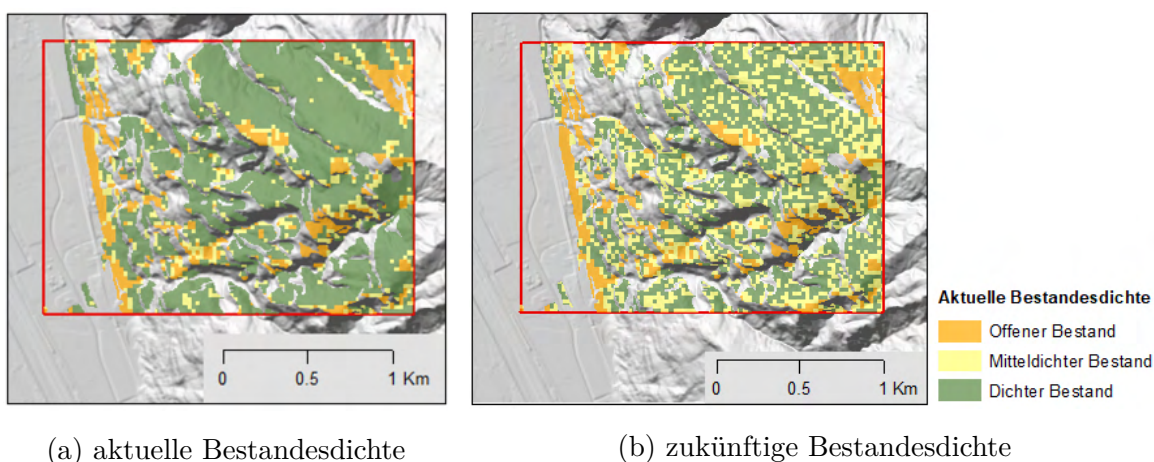


Abbildung 3.14: Bestandesdichten des Untersuchungsgebiets Biasca (roter Kasten) für (a) die aktuellen Szenarien und (b) die zukünftige Szenarien unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019

Perimeter Gorges de Court

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 sind im Untersuchungsgebiet Gorges de Court mit deutlich wärmeren Temperaturen und trockeneren Sommern zu rechnen (s. Kap. 3.1.3). Bugmann et al. (2014) zeigt, dass die Fichte sensitiv auf eine Reduktion der Sommerniederschläge reagiert. Es wird deshalb angenommen, dass sich die Grundfläche der Fichte reduzieren wird. Auch die Buche wird in den tiefen Lagen des Untersuchungsgebiets an ihre physiologischen Grenzen stossen. Bereits heute sind trockenheitstolerante Arten wie die Linde vertreten, die Modellierungen von Huber et al. erwarten für solche Bestände jedoch, dass der Verlust der Buche und Fichte nicht durch den Zuwachs der trockenheitstoleranteren Arten kompensiert werden kann. Dies bestätigen die Ergebnisse aus Bircher et al. (2016b), welche eine maximale Reduktion der Grundfläche in untermontanen Wäldern im Jura vorhersagen. Die erwartete Abnahme der Grundfläche wird in RAMMS:Rockfall mit einer Reduktion der Stammzahl implementiert. Auf einem Drittel der aktuell dichten Bestände wird die Stammzahl auf 400/ha reduziert, wobei die Auswahl zufällig getroffen wird.

Während sich die Buche in der obermontanen Stufe ausbreiten wird, leidet die Fichte auch in dieser Höhenstufe unter Trockenheitsstress (Zimmermann et al., 2016; Huber et al., 2021). Dies führt zu einer erhöhten Anfälligkeit der Fichte gegenüber Borkenkäferbefall (Jakoby, Stadelmann, Lischke & Wermelinger, 2016). Jakoby et al. (2016) erwartet v.a. im Mittelland eine starke Erhöhung der Prädisposition der Waldbestände gegenüber Buchdruckerbefall, aber auch im Jura führen mehr Generationen in Kombination mit erhöhtem Trockenheitsstress zu einem häufigeren Befall. Dabei sind reine Fichtenbestände mit einer hohen Dichte und Oberhöhe besonders anfällig (Stritih, Senf, Seidl, Gret-Regamey & Bebi, 2021). Orthophotos der Bestände im Untersuchungsgebiet Gorges de Court zeigen, dass der Wald grösstenteils gut strukturiert ist, weshalb keine grossflächigen Störungen erwartet werden. Kleinflächige Störungen sind aufgrund genannten Einschätzungen jedoch durchaus zu erwarten. Für Bestände mit einem Fichtenanteil von mehr als 50% und einer dichten Bestockung wird die Stammzahl deshalb auf 400/ha reduziert.

Für die zukünftigen Szenarien resultieren unter dem Emissionsszenario RCP8.5 folglich auf 39% der Waldfläche dichte Bestände, mitteldichte Bestände sind auf 53% und offene Bestände auf 8% anzutreffen. Eine Karte mit der Einteilung der zukünftigen Bestände in die drei Dichteklassen ist im Anhang B.2 beigelegt.

Perimeter Riginordlehne

Analog zum Untersuchungsgebiet Gorges de Court wird die Buche auch an der Riginordlehne in höhere Lagen vorstossen, während die Standorteignung für die Fichte v.a. in den tiefen Lagen abnehmen wird (Frehner, Brang, Kaufmann & KÜchli, 2018; Zimmermann et al., 2016). Modellierungen gehen für ähnliche Bestände unter Bewirtschaftung von einer gleichbleibenden Grundfläche bis 2085 aus (Huber et al., 2021). Hug (2017) weist jedoch auf die ausgeprägte Verbissproblematik an der Riginordlehne hin. Im Rahmen eines Waldgutachtens (Frehner, Ott & Schwitter, 1998) wurde festgestellt, dass die natürliche Verjüngung der Tanne nicht mehr möglich und jene der Buche und des Ahorns stark erschwert ist. Längerfristig ist deshalb die Schutzwirkung des Waldes unter gleichbleibendem Verbissdruck nicht gewährleistet (Hug, 2017). Das fehlende Aufkommen der Verjüngung wird in RAMMS:Rockfall mit einer Reduktion der Stammzahl implementiert. Da die Mortalität mit der Bestandesdichte zunimmt (Bircher et al., 2016a), wird auf 1/3 der dichten Waldfläche die Stammzahl auf 400/ha reduziert. Die Auswahl erfolgt zufällig.

Weiter ist aufgrund des Klimawandels vermehrt mit Störungen zu rechnen (Seidl, Schelhaas, Rammer & Verkerk, 2014). Dabei sind v.a. dichte, geschlossene Bestände mit hohem Fichtenanteil betroffen (Stritih et al., 2021). Solche Bestände sind an der Riginordlehne auf 7% der gesamten Waldfläche anzutreffen. Aufgrund ihrer Anfälligkeit gegenüber Windwurf, Schneebruch und Borkenkäferbefall wird die Stammzahl dieser Bestände auf 400/ha reduziert.

Für das Untersuchungsgebiet Riginordlehne resultiert unter dem Emissionsszenario RCP8.5 eine Reduktion der dichten Bestände auf 49% der Waldfläche, die mitteldichten Bestände steigen auf 37% und die offenen Bestände bleiben bei 14% der Waldfläche. Eine Karte ist im Anhang B.2 beigelegt.

3.4 Vorgehen bei der Evaluation der Resultate

Für die Einschätzung der aktuellen und zukünftigen Gefahrensituation wird die Auslauflänge der simulierten Blöcke und deren kinetische Energie analysiert. Dazu wird evaluiert, wie viele der total simulierten Blöcke im Gleisbereich abgelagert werden (direkte Treffer) oder diesen passieren (Anpralle). Die direkten Treffer und Anpralle werden in vorliegender Arbeit unter dem Begriff *potentielle Treffer* zusammengefasst. Das detaillierte Vorgehen in ArcMap (Version 10.8) ist in Anhang C.1 beschrieben.

Die Auslauflängen der simulierten Blöcke dienen zudem als Grundlage zur Erstellung der aktuellen und zukünftigen Gefahrenhinweiskarten. Die Gefahrenhinweiskarten werden sowohl für das 30-jährliche als auch für das 300-jährliche Ereignis erstellt. Hierzu werden die möglichen Transit- und Ablagerungsbereiche sowie Anrissgebiete für die beiden Jährlichkeiten definiert. In einem ersten Schritt wird ein Raster mit Zellgrößen von 25x25 m über den Perimeter gelegt. Alle Zellen, welche mindestens eine Trajektorie beinhalten, werden als möglicher Transit- und Ablagerungsbereich definiert. Für die Gefahrenhinweiskarten des Jahres 2085 werden die Trajektorien aller Szenarien verwendet (alle Jahreszeiten mit und ohne veränderte Bestandesdichte und Bodenparameter), um die ungünstigste Entwicklung der Gefahrensituation abzubilden. Als mögliche Anrissgebiete gelten alle Felspartien (s. Kapitel 3.2.4). Die Implementierung in ArcMap (Version 10.8) wird in Anhang C.3 genauer erläutert.

Weiter interessiert die kinetische Energie, mit welcher die Blöcke auf den Gleisbereich treffen. Dabei wird zwischen schwachen, mittleren und starken Intensitäten unterschieden (Tabelle 3.9). Für die Abschätzung der Intensitäten wird innerhalb des Gleisbereichs der Median der 95%-Quantile der Trajektorien berechnet (s. Anhang C.2).

Tabelle 3.9: Kriterien zur Bestimmung der Intensität anhand der kinetischen Energien nach BAFU (2016a).

geringe Intensität	mittlere Intensität	starke Intensität
$\leq 30 \text{ kJ}$	$> 30 \text{ kJ}$ und $\leq 300 \text{ kJ}$	$> 300 \text{ kJ}$

Der Gleisbereich wird mit dem Datensatz swissTLM3D (swisstopo, 2021c) lokalisiert. Um diesen Liniendatensatz wird ein Buffer gelegt, sodass der Gleisbereich eine Breite von 10 Metern aufweist. Ein Vergleich mit Orthofotos zeigt, dass diese 10 Meter der Breite von mehrspurigen Streckenabschnitten entsprechen. Für den Perimeter Biasca werden zusätzlich zum Gleisbereich auch die Gebäude beim Güterbahnhof ausgeschieden.

Für die Analyse der Anzahl Treffer sowie deren kinetischen Energie werden alle Trajektorien unabhängig derer Flughöhe verwendet. Berechnungen zeigen, dass die mediale Sprunghöhe innerhalb des Gleisbereichs für ein 300-jährliches Ereignis in allen Untersuchungsgebieten weniger als 6 Meter beträgt (Anhang C.4). Weiter ist die meist beobachtete Sprunghöhe im Gleisbereich 1 Meter. Bei einer Höhe der Infrastruktur von ca. 6 Metern (Höhe eines Doppelstockzuges (Bombardier Inc., 2020) plus schätzungsweise 1.5 m für die Stromleitungen) kann somit durch die Mehrheit der Anpralle ein potentieller Schaden entstehen. Die Sprunghöhe kann deshalb vernachlässigt werden.

Kapitel 4

Resultate

4.1 Perimeter Albula

In Kürze: Die Simulationen der aktuellen Gefahrensituation zeigen, dass bereits für das 30-jährliche Ereignis ein Grossteil der Eisenbahnlinie im möglichen Transit- und Ablagerungsbereich liegt. Die erwarteten Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis sind mittel, während für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis mit starken Intensitäten im Gleisbereich zu rechnen ist. In Zukunft ist eine deutliche Zunahme von Treffern im Winter und Frühling und eine Abnahme im Sommer und Herbst für alle Jährlichkeiten zu erwarten. Die kinetischen Energien bleiben mehr oder weniger konstant.

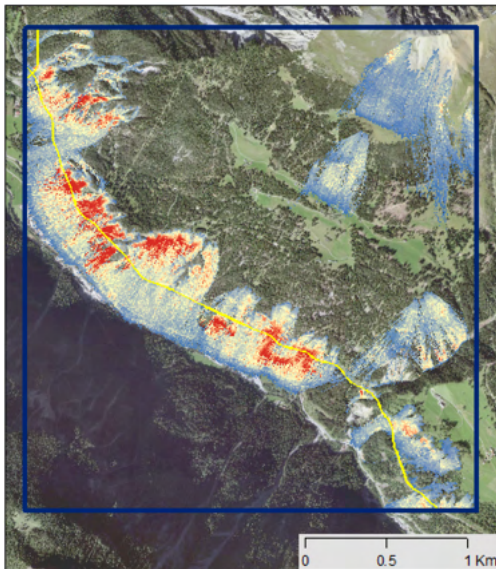
4.1.1 Aktuelle Gefahrensituation

Wie in Kapitel 3.2.3 beschrieben, werden die Simulationen für die drei Jährlichkeiten sowohl mit der Blockform *Real Equant 1.2* als auch mit der Blockform *Real Flat 1.6* durchgeführt. Für den Perimeter Albula wird jede Simulation mit 44'800 Blöcken gerechnet. Die Tabelle 4.1 zeigt den prozentualen Anteil dieser Blöcke, welche im Gleisbereich oder unterhalb abgelagert werden. Es ist zu beobachten, dass mit einer flacheren Blockform *Real Flat* bei allen Jährlichkeiten rund 14% weniger Blöcke den Gleisbereich erreichen als mit der Blockform *Real Equant*. Diese kürzeren Auslauf-längen sind auch in Abbildung 4.1 deutlich zu erkennen. Weiter ist zu beobachten, dass bei einem 300-jährlichen Ereignis gegenüber einem 30-jährlichen Ereignis knapp 20% mehr potentielle Treffer simuliert werden. Dies ist unabhängig von der gewählten Blockform (s. Tabelle 4.1). Dabei fällt auf, dass sich die Eisenbahnlinie bereits

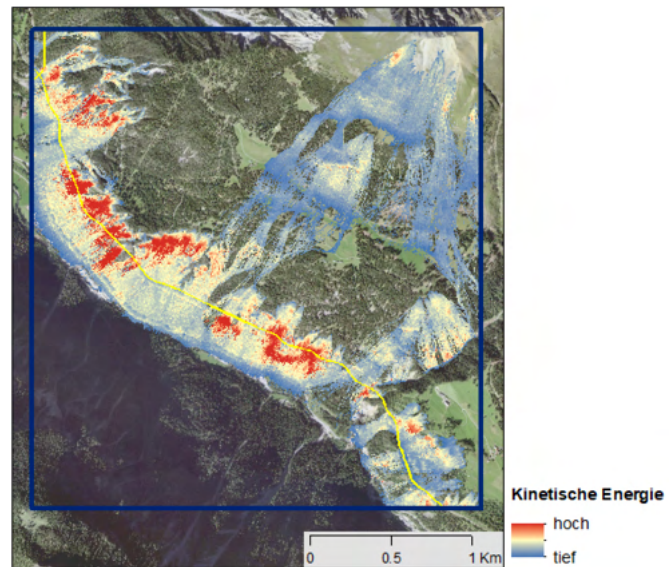
bei einem 30-jährlichen Ereignis auf dem gesamten Streckenabschnitt im möglichen Transit- und Ablagerungsgebiet befindet (s. Anhang D.2).

Tabelle 4.1: Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform Real Equant und Real Flat für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Albula.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	53%	58%	70%
Real Flat	39%	44%	59%



(a) Blockform Real Flat



(b) Blockform Real Equant

Abbildung 4.1: Kinetische Energie und Auslauflänge des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform Real Flat (a) und Real Equant (b) des Perimeters Albula (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.

Für die Einschätzung der heutigen Gefahrensituation sind nicht nur die Auslauf­längen der Blöcke entscheidend, sondern auch die kinetische Energie, mit welcher die Blöcke auf den Gleisbereich treffen. Innerhalb des Gleisbereichs ist für ein 30-jährliches Ereignis mit Blockform *Real Equant* im Mittel mit einem 95%-Quantil von 80 kJ zu rechnen. Mit der Blockform *Real Flat* sind es 89 kJ (s. Tabelle 4.2). Damit ist die kinetische Energie nicht stark von der Blockform abhängig, sondern v.a. von der Blockgrösse. Denn für seltenere Ereignisse und somit grössere Blöcke nimmt die kinetische Energie um ein vielfaches zu und erreicht für ein 300-jährliches Ereignis über 4'600 kJ. Nach der suggerierten Einteilung des Bundes (BAFU, 2016a) handelt es sich bei beiden Blockformen um mittlere Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis und um starke Intensitäten für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

Tabelle 4.2: Median des 95%-Quantils der kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Albula.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	80 kJ	722 kJ	4'692 kJ
Real Flat	89 kJ	713 kJ	4'618 kJ

4.1.2 Zukünftige Gefahrensituation

Wie in Kapitel 3.3.3 beschrieben, werden die zukünftigen Simulationen für die drei Jährlichkeiten mit der Blockform *Real Equant 1.2* durchgeführt. Die Anzahl simulierter Blöcke resultiert aus der klimabedingten Veränderung der Frequenz und unterscheidet sich je nach Jahreszeit und Emissionsszenario (Tabelle 4.3). Zusätzlich wird für das Emissionsszenario RCP8.5 ein Szenario simuliert, welches eine reduzierte Bestandesdichte aufgrund der Klimaänderung aufweist. Der Anteil an dichten Beständen wurde dabei von 54% auf 39% reduziert (Details s. Kap. 3.3.5). Weiter wird ein Szenario simuliert, in welchem die Bodenparameter an härtere Böden angepasst werden, um die Effekte der zukünftig abnehmenden Bodenfeuchte während des Frühlings, Sommers und Herbst abzubilden. Nachfolgend wird auf die Simulationsergebnisse näher eingegangen.

Tabelle 4.3: Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Albula.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
RCP2.6	67'200	67'200	22'400	22'400
RCP8.5	67'200	57'800	22'400	40'100

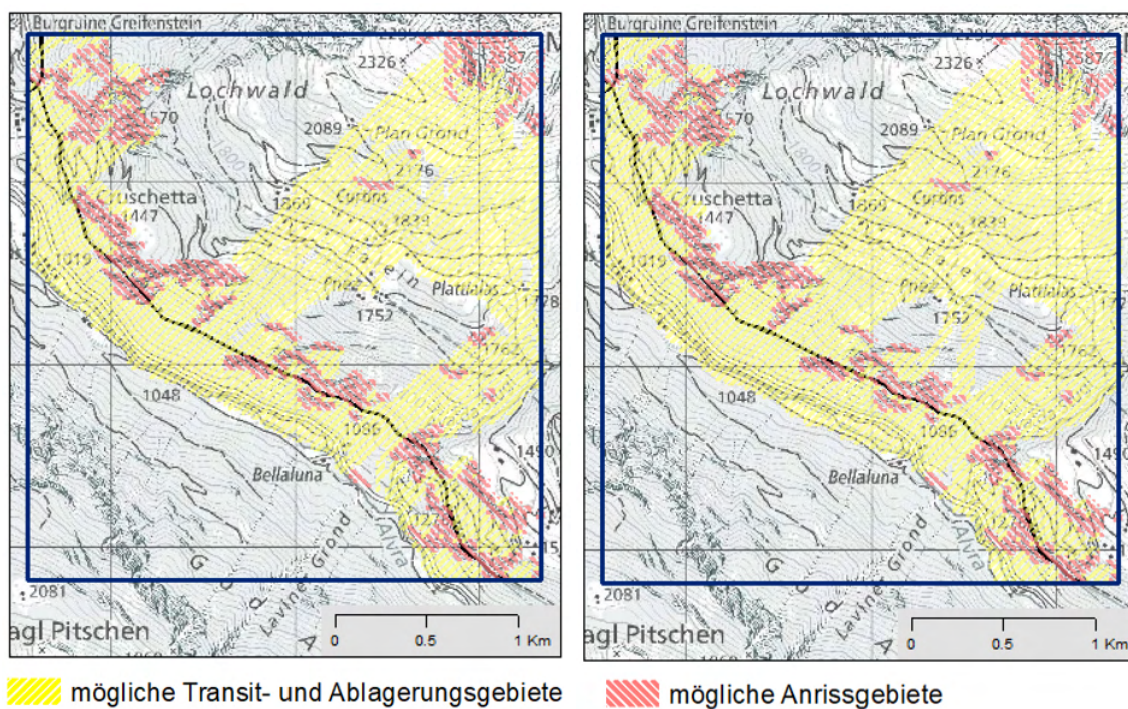
Frequenz

Für das Emissionsszenario RCP2.6 resultiert im Winter und im Frühling eine Zunahme der Anzahl Ereignisse, während im Sommer und Herbst eine Abnahme zu erwarten ist (Tabelle 4.3, Details s. Anhang A.9). Diese Veränderung der Anzahl Ereignisse widerspiegelt sich auch in der Anzahl an potentiellen Treffern. Die potentiellen Treffer steigen im Winter und Frühling um bis zu 70% für das 30-jährliche und 100-jährliche Ereignis, während im Sommer und Herbst eine Abnahme von ungefähr 40% zu erwarten ist (s. Anhang D.1).

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 zeigt sich im Winter und im Sommer ein ähnliches Bild. Im Frühling ist die erwartete Zunahme der Ereignisse und der potentiellen Treffer jedoch weniger stark ausgeprägt (Tabelle 4.3 und Anhang A.9 sowie D.1). So sind für die Simulationen mit aktueller Bestandesdichte nur noch maximal 38% mehr Treffer zu erwarten. Weiter ist im Herbst die Abnahme der Anzahl Ereignisse, sowie Treffer weniger stark ausgeprägt. Für die Simulationen mit aktueller Bestandesdichte ist eine Abnahme der potentiellen Treffer von maximal -12% zu erwarten.

Zudem fällt auf, dass kein markanter Unterschied zwischen den Simulationen mit aktueller Bestandesdichte und veränderter Bestandesdichte vorliegt. Das selbe gilt auch für die Simulationen mit zusätzlich veränderten Bodenparameter. Hier werden tendenziell etwas mehr potentielle Treffer und Anprälle erwartet, der Unterschied beträgt aber weniger als 10%. Eine Tabelle mit den genauen Veränderungen ist in Anhang D.1 aufgeführt.

Die Abbildung 4.2 zeigt die Gefahrenhinweiskarte der 300-jährlichen Ereignisse für das Jahr 2085 im Vergleich mit der aktuellen Gefahrenhinweiskarte. Die Gefahrenhinweiskarten stellen die ungünstigste Entwicklung dar, welche modelliert wurde (s. Kapitel 3.4). Da bereits unter der aktuellen Gefahrensituation, der gesamte Streckenabschnitt im Transitbereich liegt (s. Abbildung 4.1), ergibt sich durch den Klimawandel keine Auswirkungen auf die laterale Ausbreitung des Transitgebietes. Das selbe gilt für das 30-jährliche Ereignis (s. Anhang D.3).



(a) aktuelle Situation

(b) zukünftige Situation

Abbildung 4.2: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Albula für ein 300-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.

Intensität

Die Ergebnisse zeigen, dass sich die kinetischen Energien der Simulationen mit aktueller Bestandesdichte und veränderter Bestandesdichte nicht markant unterscheiden. Beide Szenarien simulieren im Winter und Frühling ähnliche kinetische Energien, wie für die heutige Gefahrensituation, der Unterschied liegt bei maximal 6%. Im Sommer wird für beide Emissionsszenarien und sowohl für die Simulationen mit aktueller und veränderter Bestandesdichte ein leichter Rückgang der Intensitäten modelliert, die Abnahme beträgt jedoch für alle Jährlichkeiten maximal 16%. Unter dem Emissionsszenario RCP2.6 wird auch im Herbst eine Verminderung der kinetischen Energie erwartet, während unter dem Emissionsszenario RCP8.5 keine Veränderungen zu erwarten sind. Deutlichere Veränderungen sind hingegen unter zusätzlich veränderten Bodenparametern zu beobachten. Hier sind im Frühling bis zu 40% höhere kinetische Energien zu erwarten, im Sommer bis zu 31% und im Herbst bis zu 49%. Für alle Szenarien sind jedoch weiterhin mittlere Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis erwartet und starke Intensitäten für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis. Eine Tabelle mit den genauen Veränderungen ist in Anhang D.1 aufgeführt.

4.2 Perimeter Biasca

In Kürze: Die Simulationen der aktuellen Gefahrensituation zeigen, dass für alle Jährlichkeiten praktisch alle Blöcke bereits oberhalb des Gleisbereichs abgelagert werden und diesen nicht erreichen. Die Blöcke, welche unten ankommen weisen für das 30-jährliche Ereignis eine geringe Intensität, für das 100-jährliche Ereignis eine mittlere Intensität und für das 300-jährliche Ereignis eine starke Intensität auf. Die Anzahl potentieller Treffer wird sich in Zukunft v.a. unter dem Emissionsszenario RCP8.5 verändern. Im Winter ist eine Abnahme zu erwarten, während im Frühling und Herbst eine deutliche Zunahme modelliert wird. Die Intensitäten bleiben für alle Jahreszeiten vergleichbar mit der aktuellen Situation.

4.2.1 Aktuelle Gefahrensituation

Für den Perimeter Biasca werden die Simulationen mit den Blockformen *Real Equant 1.2* und *Real Flat 1.6* je mit 113'700 Blöcken gerechnet. Die Tabelle 4.4 zeigt den prozentualen Anteil dieser Blöcke, welche im Gleisbereich oder unterhalb abgelagert werden. Es fällt auf, dass sowohl mit der Blockform *Real Equant* als auch mit der flacheren Blockform *Real Flat* nur wenige Blöcke bis auf den Schienenbereich gelangen. Über 95% werden bereits oberhalb der Bahnlinie abgelagert. Dabei sind die Auslauflängen für die Blockform *Real Flat* tendenziell kürzer als mit der Blockform *Real Equant*. Weiter fällt auf, dass bei einem 30-jährlichen Ereignis nur der Güterbahnhof im möglichen Transit- und Ablagerungsgebiet liegt, während für das 300-jährliche Ereignis der gesamte Streckenabschnitt betroffen ist (Abbildung 4.3).

Tabelle 4.4: Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform *Real Equant* und *Real Flat* für das aktuelle 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Biasca.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	1%	3%	5%
Real Flat	0%	1%	2%

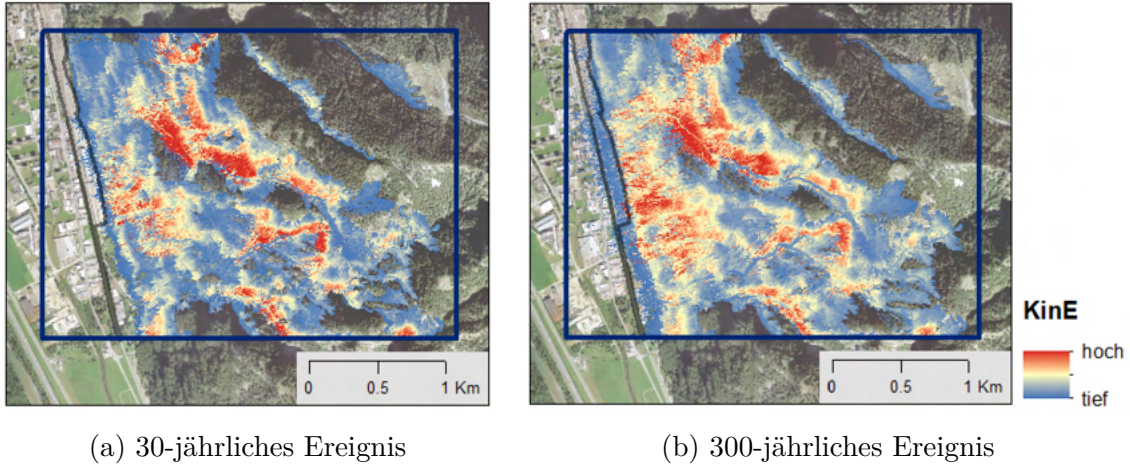


Abbildung 4.3: Kinetische Energie und Auslauflänge (a) des 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses des Perimeters Biasca (blauer Kasten) mit Blockform Real Equant 1.2. Die Eisenbahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.

Wie im Untersuchungsgebiet Albula ist die kinetische Energie nicht stark von der Blockform abhängig, sondern v.a. von der Blockgrösse. Das 95%-Quantil der kinetischen Energie innerhalb des betroffenen Gleisbereichs beträgt im Mittel für ein 30-jährliches Ereignis ungefähr 20 kJ und für ein 300-jährliches Ereignis knapp das 100-fache (Tabelle 4.5). Folglich handelt es sich bei beiden Blockformen um geringe Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis, um mittlere Intensitäten für das 100-jährliche und um starke Intensitäten für das 300-jährliche Ereignis.

Tabelle 4.5: Median des 95%-Quantils der kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des betroffenen Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis im Untersuchungsgebiet Biasca.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	22 kJ	214 kJ	1'954 kJ
Real Flat	20 kJ	210 kJ	1'869 kJ

4.2.2 Zukünftige Gefahrensituation

Die Anzahl simulierter Blöcke resultiert aus der klimabedingten Veränderung der Frequenz und unterscheidet sich je nach Jahreszeit und Emissionsszenario (Tabelle 4.6). Zusätzlich wird für das Emissionsszenario RCP8.5 ein Szenario simuliert, welches eine reduzierte Bestandesdichte aufgrund der Klimaänderung aufweist. Der Anteil an dichten Beständen wurde dabei von 73% auf 49% reduziert (Details s. Kapitel 3.3.5). Die Bodenparameter wurden nicht angepasst, da weder für das Emissionsszenario RCP2.6 noch für RCP8.5 eine signifikante Änderung der Bodenfeuchte erwartet wird (s. Kapitel 3.3.4). Nachfolgend wird auf die Simulationsereignisse näher eingegangen.

Tabelle 4.6: Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
RCP2.6	113'200	113'700	113'700	113'700
RCP8.5	79'300	116'900	113'700	94'500

Frequenz

Für das Emissionsszenario RCP2.6 resultiert nur im Winter eine Veränderung der Anzahl Ereignisse (Tabelle 4.6). Die Anzahl Ereignisse nimmt jedoch auch im Winter nur für wenige, tiefgelegene Anrissgebiete ab (s. Anhang A.9), weshalb bei der Anzahl potentieller Treffer nur eine geringe Veränderung erwartet wird (s. Anhang D.1).

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 nimmt die totale Anzahl an Ereignissen im Winter und Herbst ab. Trotzdem ist nur im Winter eine Abnahme an potentiellen Treffern zu erwarten. Im Herbst ist hingegen eine deutliche Zunahme der Treffer simuliert. Dies ist damit zu erklären, dass die totale Veränderung der Anzahl Herbstereignisse zwar abnimmt, die Abnahme aber nur für die höheren Anrissgebiete gilt, während für die tiefer gelegenen Anrisspunkte eine Zunahme der Frequenz erwartet wird (Anhang A.9). Auch im Frühling wird auf Grund der zunehmenden Frequenz in den tiefer gelegenen Anrissgebieten eine erhöhte Anzahl an potentiellen Treffern simuliert. Die Anzahl Sommerereignisse bleibt hingegen unverändert. Weiter fällt auf, dass kein markanter Unterschied zwischen den Simulationen mit aktueller Bestandesdichte und jener mit veränderter Bestandesdichte vorliegt (s. Anhang D.1).

Intensität

Unter dem Emissionsszenario RCP2.6 resultiert, wie bereits oben erwähnt, nur im Winter eine geringe Veränderung der Anzahl Ereignisse. Die kinetische Energie bleibt deshalb in allen Jahreszeiten vergleichbar mit jenen der aktuellen Situation (s. Anhang D.1). Für das Emissionsszenario RCP8.5 ist im Winter hingegen eine deutlichere Abnahme der kinetischen Energie zu erwarten. Im Frühling, Sommer und Herbst sind unter dem Emissionsszenario keine einheitlichen Tendenzen der Veränderung der kinetischen Energie festzustellen. Während der Median des 95%-Quantils für das 30-jährliche und 300-jährliche Ereignis abnimmt, ist die Tendenz für das 100-jährliche Ereignis leicht steigend (s. Anhang D.1). Die Veränderungen sind aber sowohl für die Szenarien mit aktueller Bestandesdichte, als auch für jene mit zukünftiger Bestandesdichte gering und es wird sich auch in Zukunft um geringe Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis handeln, um mittlere Intensitäten für das 100-jährliche Ereignis und um starke Intensitäten für das 300-jährliche Ereignis.

4.3 Perimeter Gorges de Court

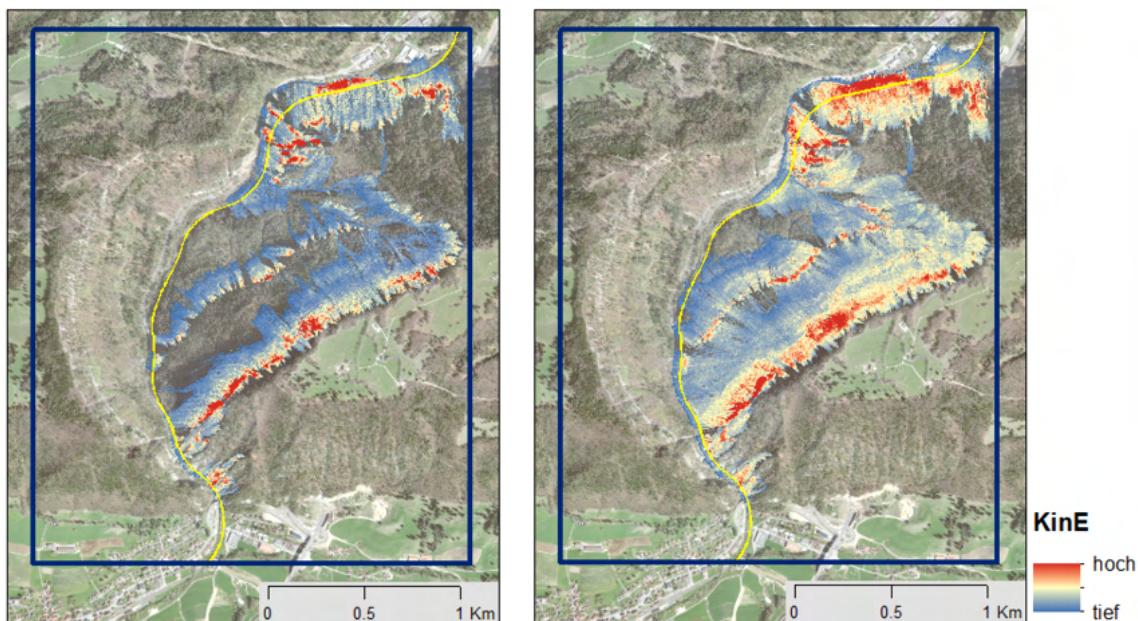
In Kürze: Die Simulationen der aktuellen Gefahrensituation zeigen, dass für ein 30-jährliches Ereignis 70 bis 80% der Blöcke den Gleisbereich nicht erreichen, sondern bereits oberhalb abgelagert werden. Für ein 300-jährliches Ereignis kommen deutlich mehr Blöcke bis auf die Schienen. Während für das 30-jährliche Ereignis mittlere Intensitäten erwartet werden, werden für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis hohe Intensitäten modelliert. Die Anzahl potentieller Treffer wird in Zukunft unter dem Emissionsszenario RCP8.5 im Winter und Frühling deutlich zurück gehen, während sie im Herbst zunimmt. Im Sommer kann hingegen von einer gleichbleibenden Frequenz ausgegangen werden. Die Intensitäten sind für alle Jahreszeiten vergleichbar mit der aktuellen Situation.

4.3.1 Aktuelle Gefahrensituation

Für den Perimeter Gorges de Court werden die Simulationen mit den Blockformen *Real Equant 1.2* und *Real Flat 1.6* je mit 45'700 Blöcken gerechnet. Die Tabelle 4.7 zeigt den prozentualen Anteil dieser Blöcke, welche im Gleisbereich oder unterhalb abgelagert werden. Es ist zu beobachten, dass mit der flacheren Blockform *Real Flat* bei allen Jährlichkeiten rund 10% weniger Blöcke den Gleisbereich erreichen als mit der Blockform *Real Equant*. Weiter ist zu beobachten, dass bei einem 300-jährlichen Ereignis gegenüber einem 30-jährlichen Ereignis rund 15% mehr potentielle Treffer simuliert werden. Dies ist unabhängig von der gewählten Blockform (s. Tabelle 4.7). Dabei fällt auf, dass bei einem 300-jährlichen Ereignis längere Abschnitte der Fahrbahn im möglichen Transit- und Ablagerungsgebiet liegen, als bei einem 30-jährlichen Ereignis, da für grössere Blöcke vermehrt auch der mittlere Streckenabschnitt von Steinschlag betroffen ist (s. Abbildung 4.5).

Tabelle 4.7: Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform *Real Equant* und *Real Flat* für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	30%	33%	45%
Real Flat	20%	22%	35%



(a) 30-jährliches Ereignis

(b) 300-jährliches Ereignis

Abbildung 4.5: Kinetische Energie und Auslauflängen des (a) 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform Real Equant des Perimeters Gorges de Court (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.

Auch im Untersuchungsgebiet Gorges de Court ist die kinetische Energie nicht stark von der Blockform abhängig, sondern v.a. von der Blockgrösse. Das 95%-Quantil der kinetischen Energie innerhalb des betroffenen Gleisbereichs liegt im Mittel für ein 30-jährliches Ereignis bei ungefähr 45 kJ und für ein 300-jährliches Ereignis bei ca. 3'400 kJ. Folglich handelt es sich bei beiden Blockformen um mittlere Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis und starke Intensitäten für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

Tabelle 4.8: Mediale kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	48 kJ	506 kJ	3'337 kJ
Real Flat	43 kJ	508 kJ	3'557 kJ

4.3.2 Zukünftige Gefahrensituation

Die Anzahl simulierter Blöcke resultiert aus der klimabedingten Veränderung der Frequenz und unterscheidet sich je nach Jahreszeit und Emissionsszenario (Tabelle 4.9). Zusätzlich wird für das Emissionsszenario RCP8.5 ein Szenario simuliert, welches eine reduzierte Bestandesdichte aufgrund der Klimaänderung aufweist. Der Anteil an dichten Beständen wurde dabei von 86% auf 39% reduziert (Details s. Kapitel 3.3.5). Weiter wird ein Szenario simuliert, in welchem die Bodenparameter an härtere Böden angepasst werden, um die Effekte der zukünftig abnehmenden Bodenfeuchte im Herbst abzubilden. Nachfolgend wird auf die Simulationsergebnisse näher eingegangen.

Tabelle 4.9: Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
RCP2.6	45'700	45'700	45'700	45'700
RCP8.5	22'900	22'900	45'700	48'900

Frequenz

Für das Emissionsszenario RCP2.6 resultiert während des ganzen Jahres keine Veränderung der Anzahl Ereignisse (Tabelle 4.9, Details s. Anhang A.9). Auch Veränderungen in der Bestandesdichte des Waldes, sowie der Boden Härte sind nicht zu erwarten. Die Frequenz verändert sich nicht, es wird auf die aktuelle Gefahrensituation verwiesen (Kapitel 4.3.1).

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 bleibt die Anzahl Ereignisse nur während des Sommers gleich. Im Winter und Frühling ist hingegen eine Abnahme der Anrisse zu erwarten. Im Herbst ist eine Abnahme nur in den höher gelegenen Gebieten wahrscheinlich, während in tieferen Lagen eine Zunahme zu erwarten ist (Tabelle 4.9, Details s. Anhang A.9). Im Herbst werden demnach rund 7% mehr Ereignisse simuliert, während es im Winter und Frühling nur halb so viele Ereignisse sind, wie bei den Simulationen für den aktuellen Zustand. Dies spiegelt sich auch in der Anzahl an potentiellen Treffern wieder.

Für das Szenario mit der aktuellen Bestandesdichte wird im Winter und Frühling eine Abnahme der Anzahl potentieller Treffer zwischen 45% (300-jährliches Ereignis) und 46% (30- und 100-jährliches Ereignis) simuliert. Im Herbst nimmt die Anzahl mit 45% bis 64% (300- bzw. 30-jährliches Ereignis) deutlich zu, obwohl die Anzahl Ereignisse nur um 7% steigt. Diese starke Zunahme ist damit zu begründen, dass die Zunahme der Anrisse nur in den tiefer gelegenen Anrisspunkten erwartet wird (s. Anhang A.9). Blöcke aus diesen Anrisspunkten erreichen mit grösserer Wahrscheinlichkeit den Gleisbereich, während die Blöcke aus den höher gelegenen Anrisspunkten bereits vor dem Erreichen der Eisenbahnlinie abgelagert werden. Eine Abnahme der höher gelegenen Anrisspunkte hat deshalb keinen grossen Einfluss auf die Anzahl an potentiellen Treffern.

Mit veränderter Bestandesdichte sind ähnliche Veränderungen zu erwarten. Es ist während des ganzen Jahres mit etwas mehr potentiellen Treffern zu rechnen, jedoch beträgt der Unterschied lediglich maximal 11%. Bei zusätzlich veränderten Bodenparametern steigt die Anzahl an direkten Treffern und Anprällen im Herbst je nach Jährlichkeit nochmals um 5 bis 15% (s. Anhang D.1).

Die Abbildung 4.6 zeigt die Gefahrenhinweiskarte der 300-jährlichen Ereignisse für das Jahr 2085 im Vergleich mit der aktuellen Gefahrenhinweiskarte, wobei diese die ungünstigste Situation darstellen. Wie bereits in den Untersuchungsgebieten Albula und Biasca sind bis 2085 keine grossen Änderungen der Transit- und Ablagerungsgebiete zu erkennen. Dies gilt auch für die Gefahrenhinweiskarten des 30-jährlichen Ereignis (s. Anhang D.3).

Intensität

Wie bereits oben erwähnt, resultiert für das Emissionsszenario RCP2.6 während des ganzen Jahres keine Veränderung der Anzahl Ereignisse, der Bodenstärke oder des Waldbestandes. Deshalb wird auch für die Intensität auf die aktuelle Gefahrensituation verwiesen (Kapitel 4.3.1).

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 sind die kinetischen Energien im Winter und Frühling tendenziell abnehmend. Die Abnahme des 95%-Quantils beträgt im Mittel für das 30-jährliche Ereignis mit aktueller Bestandesdichte 15% und für das 300-jährliche Ereignis ca. 25%. Auch im Herbst ist die Intensität leicht abnehmend, jedoch betragen die Unterschiede lediglich wenige Kilojoule und sind deshalb eher auf die Unsicherheiten der Simulationen zurückzuführen (s. Anhang D.1). Im Sommer bleiben die Intensitäten konstant. Weiter fällt auf, dass für alle Szenarien mit einer

reduzierten Bestandesdichte leicht höhere kinetische Energien zu erwarten sind. Der Unterschied zwischen den Szenarien mit unterschiedlicher Bestandesdichte beträgt für das 30- und 100-jährliche Ereignis ungefähr 10%, für das 300-jährliche Ereignis lediglich ca. 5%. Eine deutliche Zunahme der kinetischen Energie ist unter zusätzlich veränderten Bodenparametern modelliert. Die trockeneren Böden im Herbst in Kombination mit der reduzierten Bestandesdichte führen für das 30-jährliche Ereignis zu einer Zunahme des 95%-Quantils von über 50% gegenüber der heutigen Situation. Für die grösseren Blöcke steigt die Intensität etwas weniger stark an (s. Anhang D.1). Es handelt sich nach wie vor für alle Szenarien um mittlere Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis und um starke Intensitäten für das 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

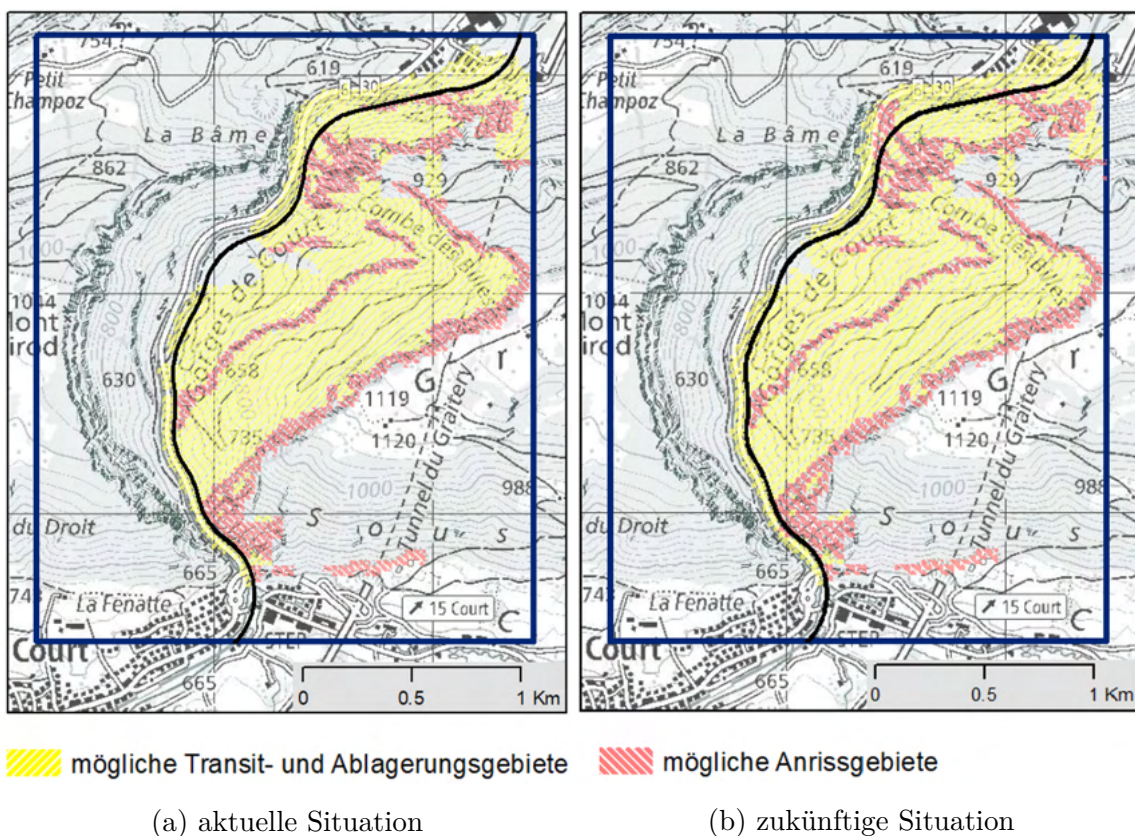


Abbildung 4.6: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Gorges de Court für ein 300-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.

4.4 Perimeter Riginordlehne

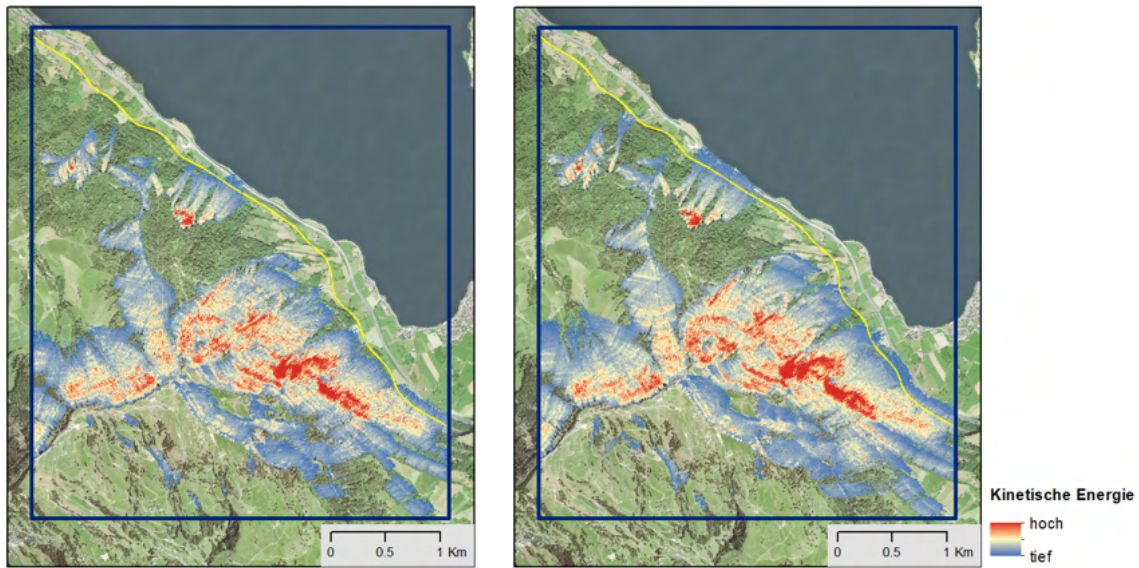
In Kürze: Die Simulationen der aktuellen Gefahrensituation zeigen, dass mehr als 90% der Blöcke den Gleisbereich nicht erreichen, sondern bereits oberhalb abgelagert werden. Dabei werden für das 30-jährliche Ereignis geringe Intensitäten, für das 100-jährliche mittlere Intensitäten und für das 300-jährliche Ereignis starke Intensitäten erwartet. Diese Einteilung der Intensitäten bleibt auch bis ins Jahr 2085 konstant. Während unter dem Emissionsszenario RCP2.6 nur im Winter eine Veränderung der Anzahl Ereignisse erwartet wird, nehmen die Anzahl Treffer unter dem Emissionsszenario RCP8.5 im Winter und Frühling deutlich ab. Im Sommer wird eine Zunahme der potentiellen Treffer unter reduzierter Bestandesdichte erwartet, während im Herbst keine eindeutigen Veränderungen modelliert werden.

4.4.1 Aktuelle Gefahrensituation

Für den Perimeter Riginordlehne werden die Simulationen mit der Blockform *Real Equant 1.2* und *Real Flat 1.6* mit je 152'100 Blöcken gerechnet. Die Tabelle 4.10 zeigt den prozentualen Anteil dieser Blöcke, welche im Gleisbereich oder unterhalb abgelagert werden. Es fällt auf, dass über 90% der Blöcke bereits oberhalb des Gleisbereichs liegen bleiben. Dabei erreichen mit der Blockform *Real Equant* für alle Jährlichkeiten mehr als doppelt so viele Blöcke den Gleisbereich, wie mit der flacheren Blockform *Real Flat*. Weiter ist zu beobachten, dass bei einem 300-jährlichen Ereignis gegenüber einem 30-jährlichen Ereignis rund 10 mal mehr Treffer simuliert werden (Tabelle 4.10). Dies ist unabhängig von der gewählten Blockform. Die Abbildung 4.7 zeigt zudem, dass für das 30-jährliche Ereignis nur sehr wenige Abschnitte des Schienenbereichs im potentiellen Transit- und Ablagerungsgebiet liegen, während für das 300-jährliche Ereignis deutlich mehr Abschnitte betroffen sind.

Tabelle 4.10: Prozentualer Anteil an direkten Treffern und Anprällen der losgelösten Blöcke mit Blockform *Real Equant* und *Real Flat* für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	0.7%	0.9%	7.4%
Real Flat	0.3%	0.4%	2.0%



(a) 30-jährliches Ereignis

(b) 300-jährliches Ereignis

Abbildung 4.7: Kinetische Energie und Auslauflänge des (a) 30-jährlichen Ereignisses und (b) des 300-jährlichen Ereignisses mit Blockform *Real Equant 1.2* des Perimeters Riginordlehne (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissimage, 2021.

Der Median des 95%-Quantils der kinetische Energie innerhalb der betroffenen Streckenabschnitte beträgt für ein 30-jährliches Ereignis mit Blockform *Real Equant* 18 kJ, für die Blockform *Real Flat* 22 kJ (Tabelle 4.11). Damit ist die kinetische Energie wie in den übrigen Untersuchungsgebieten nicht stark von der Blockform abhängig, sondern v.a. von der Blockgrösse. Denn für seltenere Ereignisse und somit grössere Blöcke nimmt die kinetische Energie um ein Vielfaches zu und erreicht für ein 300-jährliches Ereignis über 1'000 kJ. Folglich handelt es sich bei beiden Blockformen um geringe Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis, um mittlere Intensitäten für das 100-jährliche und um starke Intensitäten für das 300-jährliche Ereignis.

Tabelle 4.11: Mediale kinetische Energie der Blöcke Real Equant und Real Flat innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis.

	30-jährliches Ereignis	100-jährliches Ereignis	300-jährliches Ereignis
Real Equant	18 kJ	174 kJ	1'083 kJ
Real Flat	22 kJ	188 kJ	1'494 kJ

4.4.2 Zukünftige Gefahrensituation

Die Anzahl simulierter Blöcke resultiert aus der klimabedingten Veränderung der Frequenz und unterscheidet sich je nach Jahreszeit und Emissionsszenario (Tabelle 4.12). Zusätzlich wird für das Emissionsszenario RCP8.5 ein Szenario simuliert, welches eine reduzierte Bestandesdichte aufgrund der Klimaänderung aufweist. Der Anteil an dichten Beständen wurde dabei von 77% auf 49% reduziert (Details s. Kapitel 3.3.5). Da sich die Bodenfeuchte gegenüber heute nicht signifikant verändern wird, werden keine Simulationen mit angepassten Bodenparametern durchgeführt.

Tabelle 4.12: Anzahl simulierter Ereignisse pro Jahreszeit für das Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5.

	Winter	Frühling	Sommer	Herbst
RCP2.6	73'000	152'100	152'100	152'100
RCP8.5	202'600	73'000	152'100	103'500

Frequenz

Für das Emissionsszenario RCP2.6 resultiert im Frühling, Sommer und Herbst keine Veränderung der Anzahl Ereignisse (Tabelle 4.12 und Anhang A.9). Lediglich im Winter wird eine Abnahme der Ereignisse erwartet, was sich auch in der Anzahl potentieller Treffer widerspiegelt. So nimmt die Anzahl an Blöcken für das 30-jährliche Ereignis um 68% ab, während die Anzahl für ein 300-jährliche Ereignis um 53% abnimmt (s. Anhang D.1).

Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 bleiben die Anzahl Ereignisse nur während des Sommers gleich. Im Winter ist total eine leichte Zunahme der Ereignisse zu verzeichnen. Dabei ist zu beachten, dass nur für die höher gelegenen Gebiete eine Zunahme zu erwarten ist, während für die tieferen Anrissgebiete eine Abnahme modelliert wird (s. Anhang A.9). Deshalb resultiert aus den Simulationen eine deutliche Abnahme der Anzahl Treffer für das 30-jährliche Ereignis und eine leichte Zunahme der 300-jährlichen Ereignisse. Im Frühling nimmt die Frequenz hingegen überall ab, während die Anzahl Ereignisse am Hangfuss konstant bleibt und nur die höher gelegenen Anrissgebiete eine Abnahme der Frequenz erfahren (s. Anhang A.9). Folglich nimmt die Anzahl potentieller Treffer im Frühling für alle Blockgrößen deutlich ab, während im Herbst nur die 300-jährlichen Ereignisse abnehmen.

Weiter ist zu beobachten, dass die reduzierte Bestandesdichte teilweise einen deutlichen Einfluss auf die Anzahl Treffer hat. Besonders bei kleinen Blockgrößen sind unter der veränderten Bestandesdichte deutlich mehr Treffer modelliert. So ist für ein 30-jährliches Ereignis unter aktueller Bestandesdichte im Sommer keine Veränderung der Anzahl potentieller Treffer zu erwarten, mit einer reduzierten Bestandesdichte wird hingegen eine Zunahme von fast 40% simuliert (Details s. Anhang D.1).

Trotz der erwarteten Veränderungen der Anzahl Treffer verändert sich die Ausbreitung der möglichen Transit- und Ablagerungsgebiete nicht. Dies zeigen die Gefahrenhinweiskarten des 30-jährlichen sowie des 300-jährlichen Ereignisses für die heutige Situation und für die ungünstigste Situation im Jahr 2085 (Abbildung 4.8 und Anhang D.3).

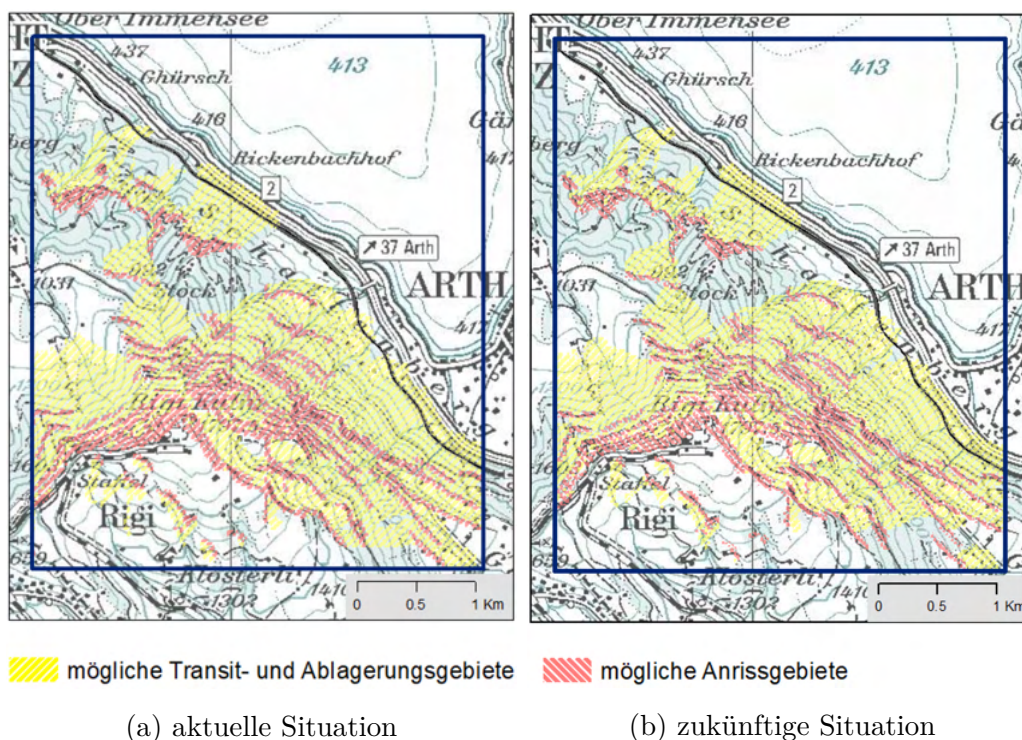


Abbildung 4.8: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Riginordlehne für das 300-jährliche Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Der Gleisbereich ist in schwarz hervorgehoben. Hintergrundkarte: © swisstopo, topomaps, 2020.

Intensität

Unter dem Emissionsszenario RCP2.6 resultiert, wie bereits oben erwähnt, nur im Winter eine Veränderung der Anzahl Ereignisse. Der Median des 95%-Quantils der kinetische Energie innerhalb des betroffenen Gleisbereichs nimmt dabei etwas ab, es bleibt aber weiterhin bei geringen Intensitäten für das 30-jährliche Ereignis, mittleren Intensitäten für das 100-jährliche Ereignis und starken Intensitäten für das 300-jährliche Ereignis (s. Anhang D.1). Für das Emissionsszenario RCP8.5 ist im Winter und Frühling eine Abnahme der kinetischen Energie zu erwarten, während im Sommer und Herbst keine markanten Veränderungen simuliert werden. Dabei sind die erwarteten kinetischen Energien für die Szenarien mit aktueller Bestandesdichte vergleichbar mit jenen aus den Szenarien mit reduzierter Bestandesdichte. Der Unterschied beträgt maximal 10% (s. Anhang D.1). Folglich bleibt auch unter dem Emissionsszenario RCP8.5 die Einteilung in die drei Intensitätsklassen unverändert.

Kapitel 5

Diskussion

5.1 Simulationen der heutigen Gefahrensituation

5.1.1 Plausibilität der Ergebnisse

Die Simulationen der aktuellen Gefahrensituation zeigen, dass in den Untersuchungsgebieten Biasca und Riginordlehne nur ein geringer Anteil der total losgelösten Blöcke im Gleisbereich ankommt. Sowohl für das 30-jährliche Ereignis als auch für das 300-jährliche Ereignis erreichen weniger als 7% der simulierten Blöcke den Gleisbereich. Für das Untersuchungsgebiet Gorges de Court kommen hingegen 30% der 0.2 m³ Blöcke und 45% der 5 m³ Blöcke (mit Blockform *Real Equant 1.2.*) bis auf den Schienenbereich. Im Untersuchungsgebiet Albula sind es sogar 53% bzw. 70%.

Die Simulationen mit der flacheren Blockform *Real Flat* weisen grundsätzlich kürzere Auslauflängen auf, als jene mit der Blockform *Real Equant*, was in einer geringeren Anzahl an potentiellen Treffern resultiert. Dies zeigen auch die Resultate von Ringenbach, Bebi et al. (2021) und Gerber (2019). Die kürzeren Auslauflängen der Blöcke *Real Flat* können durch das vermehrte Gleiten der Blöcke erklärt werden. Trifft ein flacher Block auf seiner Sturzbahn gegen ein Hindernis, wie zum Beispiel einen Baum, besteht die Möglichkeit eines längeren Gleitens auf der flachen Seite des Blockes. Erst wenn der Block längere Zeit nicht auf ein Hindernis stösst, tendiert er sich aufzustellen und wie ein Rad hangabwärts zu rollen (Leine et al., 2014). Auf bestockten Sturzbahnen erfährt ein Block mit einer flacheren Form demnach eine erhöhte Reibung und wird früher abgebremst.

Um die kinetische Energie der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs einschätzen zu können, wird der Median des 95%-Quantils der Trajektorien berechnet. Es zeigt sich, dass in den Untersuchungsgebieten Biasca und Riginordlehne für das 30-jährliche Ereignis im Mittel 95% der Blöcke mit einer schwachen Intensität auf den Gleisbereich treffen. Für das 100-jährliche Ereignis wird eine mittlere Intensität erwartet, während die Blöcke des 300-jährlichen Ereignisses mehrheitlich eine starke Intensität aufweisen. In den Untersuchungsgebieten Albula und Gorges de Court treffen bereits die Blöcke eines 30-jährlichen Ereignisses mit einer mittleren Intensität auf den Gleisbereich, während die Blöcke eines 100-jährlichen und 300-jährlichen Ereignisses grösstenteils eine hohe Intensität aufweisen.

Während die Intensitäten stark von der Blockgrösse abhängen, spielt die Blockform eine untergeordnete Rolle. Dies zeigt der Vergleich der Simulationen mit der Blockform *Real Equant* und *Real Flat*. Tendenziell werden mit der Blockform *Real Flat* geringere kinetische Energien beobachtet, der Unterschied beträgt jedoch nur wenige Prozent und beeinflusst für alle Untersuchungsgebiete die Klassifizierung in die drei Intensitätsstufen nicht.

Ein Vergleich mit der Gefahrenkarte im Untersuchungsgebiet Riginordlehne zeigt, dass die simulierten kinetischen Energien durchaus plausibel sind. Am Hangfuss des Bolliwalds sind für seltene Ereignisse Energien von mehreren Tausend Kilojoule zu erwarten (Ingenieurgesellschaft Louis/Beffa Tognacca Gmbh, 2009), was mit den Simulationen für das 300-jährliche Ereignis übereinstimmt. Weiter wurden im Jahr 2005 neue Steinschlagschutznetze mit einem Aufnahmevermögen von 2'000 kJ erbaut (Ingenieurgesellschaft Louis/Beffa Tognacca Gmbh, 2009). Dies entspricht der Grössenordnung der simulierten 95%-Quantile, welche für ein 300-jährliches Ereignis mit Blockform *Real Flat* im Mittel eine Höhe von ca. 1'500 kJ erreichen.

Für das Untersuchungsgebiet Albula steht eine Risikohinweiskarte der RhB zur Verfügung, welche für das Gebiet Cruschetta und Schmelziwald die höchste Gefährdung klassifiziert (Kanton Graubünden, 2021). Auch vorliegende Ergebnisse suggestieren die höchste kinetische Energie auf diesen Abschnitten (vgl. Abbildung 4.1). Für die restlichen Untersuchungsgebiete stehen leider keine Gefahrenkarten zur Verfügung, weshalb eine Plausibilisierung der modellierten Intensitäten schwierig ist.

5.1.2 Methodenkritik

Wie oben erläutert, scheinen die Simulationen eine plausible Einschätzung zu liefern, wo eine Gefährdung bestehen könnte. Im Sinne einer Gefahrenhinweiskarte scheint die erarbeitete Methode realisierbar. Trotzdem müssen folgende Punkte beachtet werden:

Blockgrösse

Einerseits werden für alle Untersuchungsgebiete dieselben Blockgrössen verwendet. Damit wird der Einfluss der lokalen Struktur des Gesteins vernachlässigt. Der Verlauf der Schichtflächen und Klüftungen verändert sich kleinräumig und beeinflusst die vorkommenden Blockgrössen massgeblich (BAFU, 2015). Da diese Trennflächen mit Methoden aus der Fernerkundung nicht oder nur schwierig zu erkennen sind, wird für eine akkurate Einschätzung der Blockgrösse normalerweise eine Einzelhangbeurteilung vor Ort durchgeführt (BAFU, 2016a). Dies ist für die vorliegende Arbeit aber nicht realisierbar. Wie die Ergebnisse der Simulationen zeigen, sind die zu erwartenden Intensitäten und Ausläuflängen jedoch deutlich von der Blockgrösse abhängig. Für die Dimensionierung von Schutzbauten ist deshalb eine differenzierte Definition der Blockgrössen unabdingbar. Für die Erstellung vorliegender Gefahrenhinweiskarte mit Massstab 1:25'000 ist eine Generalisierung der Blockgrösse für alle Gebiete jedoch ausreichend. Dorren et al. (2017) bestätigen diese Aussage. Sie schlussfolgern, dass die simulierten Ergebnisse mit der gleichen Blockgrösse für den ganzen Kanton Graubünden durchaus plausibel sind (Dorren et al., 2017).

Bodenparameter

Andererseits werden auch die Bodenparameter nicht an die lokalen Bodenbeschaffenheiten angepasst. So wird für den eher feuchteren Waldboden an der Riginordlehne der gleiche Widerstandswert und die gleiche mechanische Bodenfestigkeit verwendet wie für den trockenen Waldboden am Südhang des Untersuchungsgebiets Albula. Da die Bodenbeschaffenheit und insbesondere die Bodenfeuchte die Reduktion der kinetischen Energie der Blöcke beeinflusst (Dorren, 2003), ist diese für detailliertere Modellierungen unabdingbar (Vick et al., 2019). Im Rahmen vorliegender Arbeit wurde auf die Anpassung der Bodenparameter jedoch verzichtet, um die Ergebnisse besser untereinander vergleichen zu können. Für das Untersuchungsgebiet Riginordlehne ist deshalb anzunehmen, dass die simulierten Ausläuflängen eher einem pessimistischen Szenario entsprechen, da die verwendeten Bodenparameter nicht an

feuchte Waldböden angepasst sind. So verwendet Ringenbach, Stihl et al. (2021) für feuchte Böden einen tieferen M_e -Wert, um die grössere Eindringtiefe der Blöcke abzubilden.

Wald

Die Bestandesdichte wurde mit einer vereinfachten automatisierten Lückendetektion auf Basis des aktuellen Vegetationshöhenmodells eingeschätzt (s. Kap. 3.2.5). Ein Vergleich mit den Bestandeskarten zeigt, dass die vorliegende Methode die Bestände tendenziell als dichter bewertet.

Im Untersuchungsgebiet Gorges de Court wird mit vorliegender Methode 86% der Waldfläche als dicht eingeschätzt, während die Bestandeskarte von 2011 nur auf einer Fläche von ca. 50% einen dichten Bestand klassifiziert. Für das Untersuchungsgebiet Riginordlehne wird in der Bestandeskarte von 2004 auf knapp 70% der Waldfläche ein Deckungsgrad von über 60% ausgeschieden. Im Vergleich dazu wird mit vorliegender Methode 77% der Waldfläche ein Deckungsgrad von über 75% klassifiziert. Im Untersuchungsgebiet Biasca sind noch grössere Divergenzen zwischen vorliegenden Ergebnissen und der Bestandeskarte festzustellen. So sind laut der Bestandeskarte von 2015 lediglich auf 0.1% der Waldfläche dichte Bestände vorzufinden, während mit der vorliegenden Methode über 70% der Waldfläche als dicht klassifiziert wird. Für das Untersuchungsgebiet Albula ist ein direkter Vergleich der Bestandesdichte nicht möglich, da in der Bestandeskarte nur der Schlussgrad, nicht aber der Deckungsgrad spezifiziert wird.

Die Divergenz der Bestandesdichte aus vorliegender Methode und jener aus den Bestandeskarten ist einerseits auf das unterschiedliche Alter der Datengrundlage zurückzuführen. Während vorliegende Methode das Vegetationshöhenmodell von 2019 mit einer Auflösung von 2 Metern verwendet (Ginzler, 2021), beruhen die Bestandeskarten aus Vegetationshöhendaten der Jahre 1998/1999 (Perimeter Albula), 2004 (Perimeter Riginordlehne), 2011 (Perimeter Gorge de Court) bzw. 2015 (Perimeter Biasca). Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass der Deckungsgrad in den letzten Jahren so stark zugenommen hat. Vielmehr ist die unterschiedliche Methodik für die verschiedenen Resultate mitverantwortlich. Es ist deshalb fraglich, ob die angewandte Methode plausible Bestandesdichten liefert. Weitere Untersuchungen sind nötig, um zu evaluieren, wie stark sich dies auf die Resultate der Simulationen auswirkt (s. auch Kap. 5.2).

Weiter werden in vorliegenden Simulationen die Bäume zufällig auf der Waldfläche verteilt. Eine Einzelbaumdetektion gäbe nicht nur eine akkuratere Einschätzung bezüglich der Bestandesdichte, sondern würde zudem eine realitätsgetreue Verteilung der Bäume im Hang ermöglichen.

Ein weiterer wichtiger vernachlässigter Faktor ist die Schutzwirkung des Totholzes. Liegendes und stehendes Totholz kann wesentlich zur Schutzwirkung des Waldes gegen Steinschlag beitragen, indem es die Oberflächenrauigkeit erhöht und ab einer gewissen Grösse ein Hindernis für die rollenden Blöcke darstellt (Fuhr, Bourrier & Cordonnier, 2015). Auch neueste Simulationen von Ringenbach, Bebi et al. (2021) zeigen, dass unter Einbezug des Totholzes kürzere Auslauflängen zu erwarten sind. Dieser Effekt ist vor allem auch für die zukünftigen Szenarien von Bedeutung (s. Kap. 5.2.2).

5.2 Simulationen der zukünftigen Gefahrensituation

5.2.1 Plausibilität der Ergebnisse

Veränderung der Steinschlagfrequenz und deren Auswirkung auf die Anzahl Treffer

Die Resultate zeigen, dass die Veränderung der Anzahl von Steinschlagereignissen bedingt durch den Klimawandel eine grosse Auswirkung auf das Gefahrenpotenzial der einzelnen Untersuchungsgebiete hat. Im Untersuchungsgebiet Biasca sind zum Beispiel für das Jahr 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5 im Frühling rund doppelt so viele Treffer modelliert wie heute, während in den Untersuchungsgebieten Gorges de Court und Riginordlehne die Anzahl um rund 50% abnimmt. Die Veränderungen sind nicht nur stark vom Untersuchungsgebiet abhängig, sondern unterscheiden sich auch innerhalb des Jahres (Abbildung 5.1). So nimmt die Anzahl an Treffern unter dem Emissionsszenario RCP8.5 in den Untersuchungsgebieten Biasca und Gorges de Court im Winter ab, während sie im Herbst deutlich zunimmt. Nachfolgend werden die Veränderungen der Frequenz für jede Jahreszeit diskutiert.

Winter

Im Winter ist in den tieferen Lagen eine Abnahme der Ereignisse zu erwarten, während in höheren Lagen mit einer Zunahme gerechnet wird. Dies ist mit der Veränderung der Frostwechsellage zu begründen. Laut den Szenarien CH2018 (2018) ist im Alpenraum eine Zunahme der Frostwechsellage zu erwarten, während in tiefen Lagen die Anzahl deutlich abnimmt. Für das Untersuchungsgebiet Albula wird deshalb unter beiden Emissionsszenarien eine Zunahme der potentiellen Treffer simuliert, während in den übrigen Untersuchungsgebieten eine abnehmende Tendenz zu erwarten ist (Abbildung 5.1a). Besonders interessant ist die Entwicklung im Untersuchungsgebiet Riginordlehne: Die Veränderung der Frostwechsellage führt unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für die hoch gelegenen Anrissgebiete zu einer Zunahme und für die Anrissgebiete am Hangfuss zu einer Abnahme der Ereignisse. Für kleinere Blöcke resultiert deshalb eine Abnahme der Treffer, da nur die unteren Anrissgebiete relevant sind, während für die Blöcke des 300-jährlichen Ereignisses eine Zunahme simuliert wird, da auch Blöcke von den höheren Anrissgebieten bis auf den Gleisbereich treffen können (Abbildung 5.1a).

Damit stimmen die Ergebnisse mit den Resultaten der Klimasensitivitätsanalyse von Mani und Caduff (2015) überein, welche eine Zunahme der Steinschlagfrequenz in hoch gelegenen Gebieten und eine Abnahme der Frequenz in tiefen Lagen prognostiziert. Auch Gruner (2004) beobachtete zwischen 1981 und 2010 für tiefere Lagen (Alpennordseite) eine Abnahme der Winterereignisse.

Frühling

Im Frühling ist kein klarer Trend zu erkennen, die Veränderungen unterscheiden sich stark je nach Untersuchungsgebiet und Emissionsszenario. Unter dem Emissionsszenario RCP2.6 sind für die Gebiete Biasca, Gorges de Court und Riginordlehne im Frühling keine Veränderungen bezüglich der Frequenz von Steinschlagereignissen zu erwarten. Dies deckt sich mit der Aussage von Gruner (2004), der auf der Alpennordseite von einer konstant bleibenden Steinschlagaktivität im Frühling ausgeht. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 deuten vorliegende Resultate aber auf eine Abnahme der Frühlingsergebnisse in den Untersuchungsgebieten Gorges de Court und Riginordlehne und eine Zunahme der Ereignisse in Albula und Biasca hin (Abbildung 5.1b).

Sommer

Im Sommer ist unter beiden Emissionsszenarien eine gleichbleibende Frequenz zu erwarten. Dies ist auf die unveränderten Starkniederschläge sowie Anzahl Frostwechseltage zurückzuführen. Dies zeigt sich auch in der Anzahl simulierter Treffer (Abbildung 5.1c). Modifikationen sind hier nur aufgrund veränderter Bestandesdichten zu erwarten. Lediglich im Untersuchungsgebiet Albula wird basierend auf den abnehmenden Schmelzwasserabflüssen eine Abnahme der Steinschlagfrequenz erwartet.

Herbst

Im Herbst ist für die Untersuchungsgebiete Biasca und Gorges de Court eine deutliche Zunahme der potentiellen Treffer modelliert. Im Untersuchungsgebiet Biasca werden im Vergleich zum aktuellen Zeitpunkt bis ins Jahr 2085 rund doppelt so viele Blöcke mit einem Volumen von 0.2 m^3 wie heute erwartet (Abbildung 5.1d). Für die grösseren Blöcke ist die Zunahme etwas geringer. Dies ist auf die reduzierte Frequenz in den höheren Lagen aufgrund der abnehmenden Frostverwitterung zurückzuführen. Für kleine Blöcke sind diese Anrissgebiete weniger relevant, da die Blöcke bereits oberhalb des Schienenbereichs abgelagert werden. Grosse Blöcke hingegen erreichen auch aus hohen Anrissgebieten den Gleisbereich, weshalb die dortige Abnahme der Frequenz Auswirkungen auf die Anzahl Treffer hat. Im Untersuchungsgebiet Rigi-

nordlehne zeigt sich ein ähnliches Bild: Eine Zunahme der Treffer wird nur für die kleinen Blöcke erwartet, während Blöcke mit einer Grösse des 300-jährliche Ereignisses seltener werden. Im Perimeter Albula ist mit einer leicht abnehmenden Anzahl an Herbstereignissen zu rechnen.

Die prognostizierte Erhöhung der Steinschlagfrequenz im Herbst aufgrund der vermehrten Starkniederschläge (Gruner, 2004) kann nur teilweise bestätigt werden. Obwohl für alle Untersuchungsgebiete erhöhte Starkniederschläge prognostiziert werden, kann aufgrund der abnehmenden Frostwechseltage und der damit abnehmenden Materialverfügbarkeit nicht von einer Zunahme der Steinschlagereignisse ausgegangen werden. Welche Auswirkungen dies auf die Plausibilität der Ergebnisse hat, wird in Kap. 5.2.2 diskutiert.

Generell ist zu beobachten, dass die Veränderung der Frequenz einen deutlich grösseren Einfluss auf die Gefahrensituation hat als die Veränderung der Bestandesdichte und Bodenparameter (Abbildung 5.1). Der Unterschied der Anzahl Treffer zwischen den Simulationen mit aktueller und jenen mit veränderter Bestandesdichte ist mehrheitlich kleiner als 10%. Bei zusätzlicher Anpassung der Bodenparameter verändert sich die Anzahl Treffer um nochmals ca. 5 - 15%. Lediglich im Perimeter Riginordlehne sind grössere Einflüsse der veränderten Bestandesdichte zu beobachten. Dies könnte mit der komplexen Veränderung der Frequenz zusammenhängen. Wie oben beschrieben, nimmt an der Riginordlehne die Anzahl Ereignisse im Winter unter dem Emissionsszenario RCP8.5 in den tiefen Anrissgebieten ab, während sie in hohen Lagen zunimmt. Unter der aktuellen Bestandesdichte hat die Zunahme in hohen Lagen für die häufigen Ereignisse keinen Einfluss, da die kleinen Blöcke vom dichten Wald aufgehalten werden. Mit der veränderten Bestandesdichte nimmt die Schutzwirkung aufgrund der geringeren Dichte jedoch ab und auch die kleinen Blöcke werden nicht mehr genügend verlangsamt und treffen bis auf den Schienenbereich. In den übrigen Untersuchungsgebieten ist die Veränderung der Frequenz innerhalb des Perimeters homogener, weshalb der Einfluss des Waldes weniger stark auffällt. Des Weiteren wird deutlich, dass die Veränderungen der Waldstruktur für kleinere Blöcke signifikanter ist als für die grossen Blöcke. Dies hängt damit zusammen, dass die Schutzwirkung des Waldes gegenüber Steinschlag für grosse Blöcke markant abnimmt (Lanfranconi, Sala, Frattini, Crosta & Valagussa, 2020). Um den Einfluss des Waldes bezüglich seiner Schutzleistung besser einschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen mit drastischeren Veränderungen der Bestandesdichte bzw. Simulationen mit und ohne Wald nötig (s. Kap. 5.2.2).

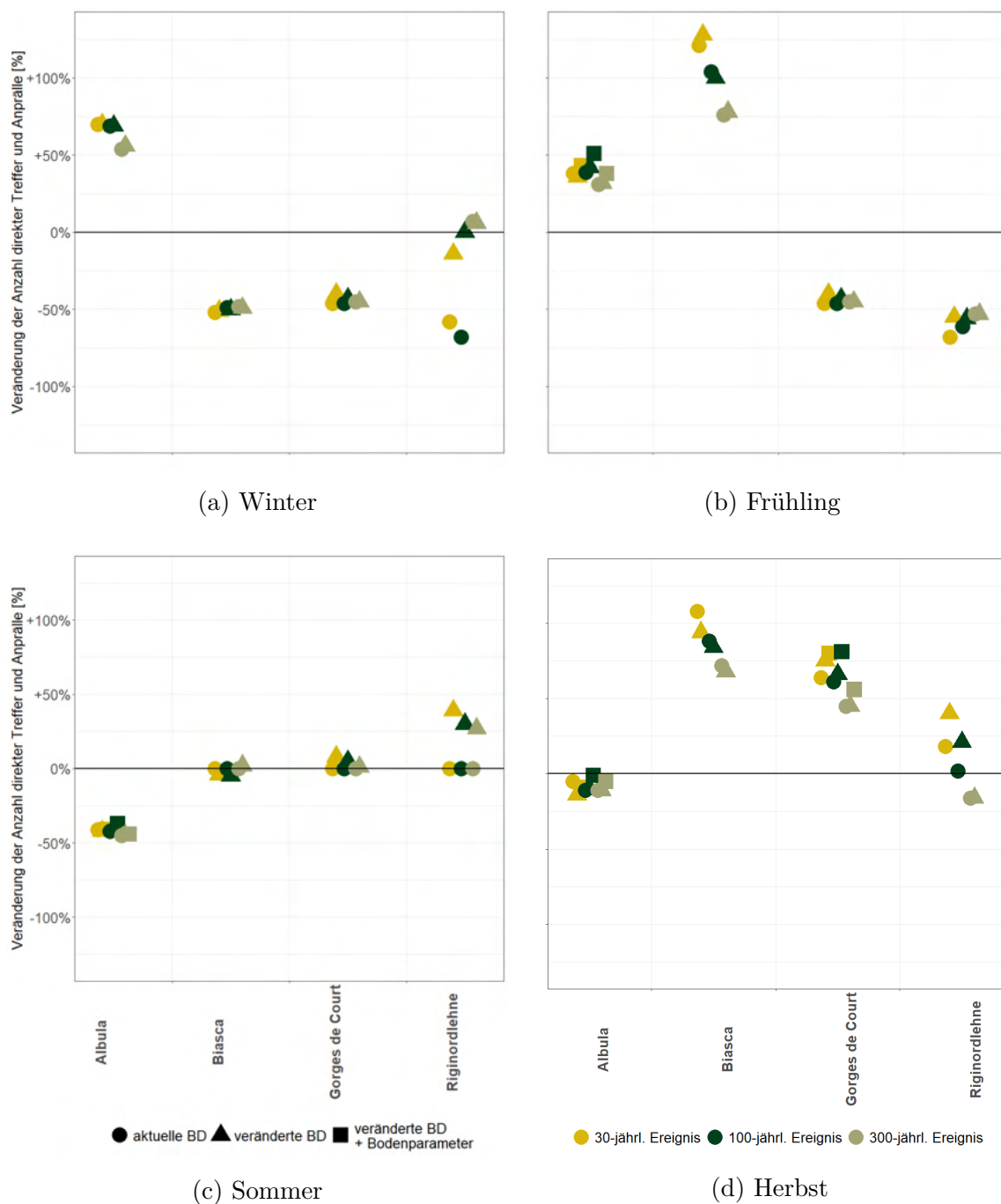


Abbildung 5.1: Veränderung der Anzahl Treffer bis ins Jahr 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5 für die vier Untersuchungsgebiete im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer, (d) Herbst. Die verschiedenen Szenarien (mit und ohne veränderte Bestandesdichten (abgekürzt als BD) und Bodenparameter) sind durch unterschiedliche Formen der Punkte dargestellt. Je weiter auseinander die Punkte liegen, desto grösser ist der Einfluss der Bestandesdichte bzw. der Bodenfeuchte. Die unterschiedlichen Farben definieren die Jährlichkeit der Ereignisse.

Veränderung der kinetischen Energie

Die Resultate zeigen, dass die klimabedingte Veränderung der Anzahl Steinschlagereignisse, sowie die Veränderungen der Bestandesdichte keine grossen Auswirkungen auf die kinetische Energie ausüben. Der Median des 95%-Quantils innerhalb des Gleisbereichs verändert sich meist weniger als 10%. Nur in einzelnen Simulationen beträgt die Abweichung bis zu 33% (s. Kap. 4). Dabei fällt auf, dass die Szenarien mit einer reduzierten Bestandesdichte tendenziell etwas höhere kinetische Energien aufweisen, als jene mit dichterem Bestand. Dies ist mit der höheren Schutzleistung dichter Wälder (Lanfranconi et al., 2020), aufgrund der grösseren Anzahl an Hindernissen, zu begründen. Der Unterschied ist jedoch gering.

Eine deutlichere Zunahme der kinetischen Energie ist unter Einbezug veränderter Bodenparameter zu beobachten. Aufgrund der trockeneren Bodenverhältnisse in Kombination mit einer reduzierten Bestandesdichte ist in den Untersuchungsgebieten Albula und Gorges de Court eine Zunahme der Intensität um bis zu 50% zu erwarten. Trotzdem bleibt die Einteilung in die drei Intensitätsklassen für alle Szenarien unverändert. Damit deuten die Ergebnisse darauf hin, dass in Zukunft die Dimensionierung der Schutzbauten bezüglich der Kapazität zur Energieaufnahme nicht verändert werden muss. Neben der Intensität sind bei der Erstellung von Schutzbauten aber auch die Sprunghöhen relevant, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht werden. Allgemein handelt es sich hier lediglich um einen Gefahrenhinweis, für die Planung von Schutzbauten sind deshalb detailliertere Untersuchungen nötig.

5.2.2 Methodenkritik

Veränderung der Frequenz und Auswirkungen auf die Anzahl Anrisspunkte

Bei der Einschätzung der klimabedingten Frequenzänderung von Steinschlägen fällt auf, dass die Veränderung der Frostverwitterung einen ausserordentlich hohen Einfluss auf die Frequenz hat. Nehmen die Frost-Tau-Zyklen ab, nimmt für die Mehrheit der Gesteine auch die Materialverfügbarkeit ab, was unabhängig des Wasserzuflusses zu einer Reduzierung der Steinschlagfrequenz führt. Dies ist v.a. in den wärmeren Monaten und tieferen Lagen relevant, wo die Anzahl an Frostwechsellagen gering ist und nicht zwingend den dominierenden Faktor bei der Auslösung darstellt. Gerade im Frühling können die Starkniederschläge und Schmelzwasserabflüsse das aufgrund der winterlichen Frostverwitterung destabilisierte Gestein weiter ermüden und somit Steinschläge auslösen (Gruner, 2008). Dies bedeutet, dass z.B. im Frühling trotz abnehmender Frostverwitterung die Anzahl an Ereignissen steigen kann aufgrund intensiver Frostverwitterung im Winter. Dabei kann es zu einer zeitlichen Verschiebung kommen und die Blöcke werden erst im Frühling aufgrund des erhöhten Wasserzuflusses losgelöst. Diese Verzögerung der Ereignisse wird in der vorliegenden Methode nicht berücksichtigt.

Weiter kommt hinzu, dass es bisher keine wissenschaftlichen Daten gibt, wie viele Frostwechsellagen es für die Ermüdung von Gesteinsbrücken braucht, weshalb es schwierig ist einzuschätzen, ab wann eine Veränderung der Frostwechsellagen einen signifikanten Einfluss auf die Frequenz hat. Die oben genannten Ergebnisse beruhen auf einem Grenzwert von 10 Tagen. D.h. eine Zunahme der Materialverfügbarkeit aufgrund der Frostverwitterung wird ab einem Anstieg der Frostwechsellagen von mindestens 10 Tagen erwartet. Dieser Grenzwert beruht auf Experteneinschätzung (Mani & Caduff, 2015). Die Berechnungen mit einem doppelt so hohen Grenzwert zeigen jedoch, dass die Tendenz zu einer Abnahme oder Zunahme der Frequenz bestehen bleibt und sich die beiden Varianten vor allem in der Amplitude der Frequenzänderung unterscheiden (s. Anhang A.11).

Die Materialverfügbarkeit ist aber nicht nur von der Anzahl Frostwechsellagen abhängig, sondern auch stark von den Verwitterungseigenschaften der Gesteine. Eine feinere Differenzierung der Verwitterungsanfälligkeit in mehrere Klassen unter Berücksichtigung der Anzahl an Klüften und des Alters des Gesteins würde eine akkuratere Einschätzung der Materialverfügbarkeit ermöglichen.

Weiter ist die vereinfachte Einschätzung des Wasserzuflusses zu beachten. Das korrekte Verhältnis zwischen dem Einfluss der Schneeschmelze und der Starkniederschläge zu wählen, bleibt eine Herausforderung. Neben der Unterscheidung zwischen nivalen und pluvialen Einzugsgebieten könnte zudem die kleinflächige Topographie miteinbezogen werden. Liegt der Felsvorsprung mit potentiellen Anrissgebieten unterhalb eines abschüssigen Hanges, kann eine grosse Menge an versickertem Wasser auf der Höhe des Felsvorsprungs austreten und in den Klüften zusätzlichen hydraulischen Druck aufbauen. Zudem spielt die Oberflächenrauigkeit eine entscheidende Rolle bei der Schneeakkumulation (Erickson, Williams & Tomaszewski, 2001), sowie das Vorkommen von Lawinen, welche grosse Teile der Schneedecke abtragen. Weitere mögliche Auslöseprozesse wie die Permafrostdegradation, Rückzug der Gletscher und Wurzelbewegungen aufgrund von stärkeren Winden werden bewusst ausgelassen.

Schliesslich ist die Implementierung der Frequenzänderung in RAMMS::Rockfall zu diskutieren. Die Einschätzung der Frequenzänderung erfolgt rein qualitativ. Eine Quantifizierung der Veränderung mit vorliegender Methode, Datengrundlage und aktuellem Wissensstand ist nicht möglich. Für die Implementierung in RAMMS::Rockfall ist jedoch eine quantitative Anpassung der Anzahl Anrisspunkte nötig, um die Veränderung der Anzahl Ereignisse abzubilden. Die resultierenden Veränderungen der Anzahl Treffer soll deshalb nur als Trend verstanden werden, nicht als explizite quantitative Veränderung der zukünftigen Anzahl Ereignisse im Gleisbereich.

Blockgrösse und -formen

Für die zukünftigen Szenarien werden dieselben Blockgrössen wie für die aktuelle Gefahrensituation verwendet. Dies beruht auf der Annahme, dass die Blockgrössen in erster Linie von der Trennflächenanordnung und den Klüftungen abhängt. Mani und Caduff (2015) gehen jedoch von einer Abnahme der Blockgrössen v.a. im Grossraum der Alpen infolge des Klimawandels aus. Begründet wird diese Abnahme damit, dass das lose Gesteinsmaterial aufgrund der zunehmenden Frequenz häufiger mobilisiert wird und die einzelnen Ereignisse dadurch ein kleineres Volumen aufweisen. Gruber und Häberli (2007) argumentieren hingegen, dass in hohen Lagen eine Zunahme der Blockgrössen aufgrund von tiefer Permafrostdegradation möglich sei.

Bodenparameter

Anhand der Simulationen wird deutlich, dass die Veränderung der Bodenfeuchte im Transitbereich einen bedeutenden Einfluss auf die Intensität und Auslauflänge der fallenden Blöcke hat. Wie sich die Bodenfeuchte bis Ende des 21. Jahrhunderts verändern wird, ist jedoch noch unsicher (CH2018, 2018). Weitere Untersuchungen mit unterschiedlicher Anpassung der Bodenparameter könnten helfen, diese Unsicherheiten besser abzubilden.

Wald

Für die Einschätzung der Veränderung der Waldbestände sind neben den lokalen Klimabedingungen und Bodeneigenschaften auch die Charakteristiken der aktuellen Bestände wie Dichte, Struktur, Alter und Artenzusammensetzung relevant (Huber et al., 2021; Stritih et al., 2021). Vorliegende Methode versucht diese Variablen zu beachten, jedoch stehen nicht für alle Untersuchungsgebiete detaillierte Daten zur Verfügung. Hinzu kommt, dass die Wirkung des Klimawandels auf den Schutzwald sehr komplex ist. Die Wechselwirkungen zwischen Störungen, trockenheitsbedingter Mortalität und verändertem Wachstum erschweren die Einschätzung der Auswirkungen auf den Schutzwald (Bebi et al., 2016).

Die Reduktion der Stammzahl einiger dichten Bestände von 600 Bäume/ha auf 400 Bäume/ha ergab grösstenteils nur eine geringe Zunahme potentieller Treffer im Gleisbereich. Dies deutet darauf hin, dass sich kleinere Reduktionen der Stammzahl nicht nachteilig auf die Schutzwaldleistung auswirken. Inwiefern grossflächige Störungen die Schutzwirkung beeinflussen, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden. Die Schutzwirkung nimmt einerseits mit abnehmender Grundfläche ab (Dorren et al., 2015), andererseits begünstigt in den ersten Jahren nach einem Störungsereignis das liegende und stehende Totholzes die Schutzwirkung (Bebi et al., 2015). Dabei sind jedoch die zurückgehaltenen Blöcke zu beachten, welche bei der Zersetzung des Holzes losgelöst werden können (Bebi et al., 2016). Dies ist vor allem in den Untersuchungsgebieten Biasca und Riginordlehne relevant, in denen ein Grossteil der Blöcke oberhalb des Schienenbereichs abgelagert werden.

Kapitel 6

Schlussfolgerungen

In vorliegender Arbeit wurde eine Methode entwickelt, welche es ermöglicht, die klimabedingten Veränderungen der Steinschlagdisposition und die Auswirkungen auf das Gefahrenpotential im Rahmen einer Gefahrenhinweiskarte zu beurteilen. Das automatisierte Verfahren wurde in vier Untersuchungsgebieten getestet und führt zu zufriedenstellenden Resultaten. Die Anwendung des Vorgehens ist demnach auch für weitere grossflächige Gebiete entlang des Schienenverkehrs innerhalb der Schweiz geeignet.

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Veränderung des Gefahrenpotentials von Steinschlägen stark von der Region und insbesondere der Höhenlage abhängt. Kleinräumige Veränderungen der Anzahl Frostwechsellage in Kombination mit der Veränderung des Wasserzuflusses führen zu gebietsspezifischen Auswirkungen auf die Häufigkeit von Steinschlägen. Dabei fällt auf, dass nicht nur eine Zunahme der Anzahl Ereignisse erwartet wird, sondern je nach Untersuchungsgebiet und Jahreszeit von einer Abnahme ausgegangen wird. Diese Abnahme ist in tiefen Lagen auf die reduzierte Frostverwitterung zurückzuführen. In hohen Lagen wird die Abnahme während des Sommers und Herbst mit den geringeren Schmelzwasserabflüssen begründet. Die Ergebnisse bestätigen damit die Hypothese, dass die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Disposition von Steinschlägen stark von der Region und den damit verbunden unterschiedlichen klimatischen Bedingungen abhängen.

Welche Auswirkungen die Änderung der Disposition auf die vier Streckenabschnitte des nationalen Schienennetzes hat, zeigen die Simulationen mit RAMMS::Rockfall. Die Anzahl Blöcke, welche auf den Gleisbereich treffen, verändert sich proportional zur Veränderung der Häufigkeit von Ereignissen. Für alle Untersuchungsgebiete

ist deshalb je nach Jahreszeit eine Abnahme oder Zunahme der Anzahl potentieller Treffer zu erwarten. Weiter ist zu beobachten, dass sich die klimabedingten Veränderungen des Transitbereichs, wie die reduzierte Bestandesdichte und die trockeneren Böden, negativ auf das Gefahrenpotential auswirken. Eine Zunahme der Anzahl potentieller Treffer, ausgelöst durch die Veränderung der Häufigkeit von Ereignissen, wird durch die Reduktion der Bestandesdichte und die trockeneren Böden tendenziell verschärft, während eine Abnahme der Anzahl potentieller Treffer abgeschwächt wird. Anhand der Simulationen wird deutlich, dass die Veränderung der Bodenfeuchte in Kombination mit einer reduzierten Bestandesdichte einen bedeutenden Einfluss auf die Auslauflänge der fallenden Blöcke hat. Die Effekte der veränderten Bestandesdichten ohne angepasste Bodenfeuchte sind hingegen mehrheitlich schwach ausgeprägt. Der Unterschied der Anzahl Treffer zwischen den Simulationen mit aktueller Bestandesdichte und jenen mit veränderter Bestandesdichte ist grösstenteils kleiner als 10%.

Laut den Modellierungen haben die klimabedingten Veränderungen der Bestandesdichte auch auf die Intensität der Blöcke nur eine schwache Auswirkung. Der Median des 95%-Quantils der kinetischen Energie innerhalb des Gleisbereichs ist durch die Reduktion der Bestandesdichte zwar tendenziell erhöht, die Unterschiede sind aber gering. Eine deutlichere Zunahme der kinetischen Energie ist unter Einbezug veränderter Bodenparameter zu beobachten. Trotzdem bleibt die Einteilung in die drei Intensitätsklassen für alle Szenarien und Untersuchungsgebiete unverändert.

Die Hypothese, dass die Veränderung des Gefahrenpotentials auch massgeblich durch die klimabedingten Veränderungen im Transitbereich bestimmt wird, kann deshalb nicht abschliessend bestätigt bzw. widerlegt werden. Die Ergebnisse deuten lediglich darauf hin, dass sich kleinere Reduktionen der Stammzahl nicht nachteilig auf die Schutzwaldleistung auswirken. Inwiefern grossflächige Störungen die Schutzwirkung beeinflussen, kann aber im Rahmen vorliegender Arbeit nicht beantwortet werden. Für eine detailliertere Einschätzung sind weitere Untersuchungen mit verschiedenen starken Veränderungen der Bestandesdichte und Bodenparameter nötig.

Ein Vergleich der Gefahrenhinweiskarten für die aktuelle Gefahrensituation mit jenen der zukünftigen Gefahrensituation zeigt, dass weiterhin die selben Streckenabschnitte des Schienennetzes betroffen sein werden. Laut den Modellierungen werden weder für das 30-jährliche, noch für das 300-jährliche Ereignis markante Veränderungen in der lateralen Ausbreitung der möglichen Transit- und Ablagerungsgebiete erwartet. Diese Erkenntnis ist besonders für das Naturgefahrenmanagement rele-

vant. Die modellierten gleichbleibenden Intensitäten deuten zudem darauf hin, dass in Zukunft die Dimensionierung der Schutzbauten bezüglich der Kapazität zur Energieaufnahme nicht verändert werden muss. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass die vorliegende Arbeit einerseits die Sprunghöhen nicht untersucht und es sich andererseits lediglich um einen Gefahrenhinweis handelt. Die Ergebnisse sollen deshalb nur als Trend verstanden werden, nicht als explizite quantitative Veränderungen. Für die Planung von Schutzbauten sind detailliertere Untersuchungen nötig.

Zudem ist die Einschätzung der zukünftigen Gefahrendisposition mit vielen Unsicherheiten verbunden. Neben den Unsicherheiten der Klimaszenarien, bleibt es eine Herausforderung, die Auswirkungen der Klimaveränderungen für den Prozess Steinschlag zu quantifizieren. Die vorliegende Arbeit zeigt, dass unterschiedliche Grenzwerte und Annahmen bezüglich der Veränderung der Klimavariablen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Weiter beinhaltet die Auslösung eines Steinschlagereignisses diverse Parameter und Prozesse. Für eine Sensitivitätsanalyse sind deshalb geeignete Vereinfachungen und Annahmen zu treffen, welche es ermöglichen, eine plausible Veränderung der Gefahrendisposition zu prognostizieren. Auf der Stufe der Gefahrenhinweiskarte ist mit vorliegender Methode ein erster Ansatz zur großflächigen Einschätzung der zukünftigen Gefahrendisposition von Steinschlag unter dem Klimawandel erarbeitet worden.

Literaturverzeichnis

- Aschwanden, H. & Weingartner, R. (1985). Die Abflussregimes der Schweiz. *Geographisches Institut der Universität Bern. Publikation Gewässerkunde*, Nr. 65.
- BAFU. (2005). *Hinweiskarte der potenziellen Permafrostverbreitung*. Zugriff auf map.geo.admin.ch
- BAFU. (2012). Anpassung an den Klimawandel in der Schweiz - Ziele, Herausforderungen und Handlungsfehler. *Bundesamt für Umwelt, Bern*, 66 S.
- BAFU. (2015). Sturzprozesse. Faktenblätter Gefahrenprozesse. *Bundesamt für Umwelt, Bern*, 2 S. Zugriff auf www.bafu.admin.ch/gefahrenprozesse
- BAFU. (2016a). Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. *Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. 1608*, 98 S.
- BAFU. (2016b). Umgang mit Naturgefahren in der Schweiz. Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 12.4271 Darbellay vom 14.12.2012. *Bundesamt für Umwelt*, 131 S.
- BAFU. (2021). *Naturereigniskataster StorMe*. Zugriff auf <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/naturgefahren/fachinformationen/naturgefahrensituation-und-raumnutzung/gefahrengrundlagen/naturereigniskataster-storme.html>
- Bebi, P., Bugmann, H., Lüscher, P., Lange, B. & Brang, P. (2016). Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In A. R. Plüss, S. Augustin & P. Brang (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für die Adaptionsstrategien* (S. 269-285). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Bebi, P., Putallaz, J., Fankhauser, M., Schmid, U., Schwitter, R. & Gerber, W. (2015). Die Schutzfunktion in Windwurfflächen. *Schweiz. Z. Forstwes.*, 166, 168-176.

- Bircher, N., Cailleret, M., Zingg, A. & Bugmann, H. (2016a). Mortalität von Waldbäumen: Ursachen und Trends. In A. R. Plüss, S. Augustin & P. Brang (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für die Adaptationsstrategien* (S. 177-197). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Bircher, N., Cailleret, M., Zingg, A. & Bugmann, H. (2016b). Potenzielle Grundflächenveränderungen auf Bestandesebene im Klimawandel. In A. R. Plüss, S. Augustin & P. Brang (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für die Adaptationsstrategien* (S. 157-174). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Bombardier Inc. (2020). TWINDEXX Swiss Express IC200. Faktenblatt. , 2 S.
- Brunner, M. I., Farinotti, D., Zekollari, H., Huss, M. & Zappa, M. (2019). Future shifts in extreme flow regimes in alpine regions. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, *23*, 4471-4489.
- Bugmann, H., Brang, P., Elkin, C., Henne, P., Jakoby, O., Lévesque, M., ... Zimmermann, N. (2014). Climate change impacts on tree species, forest properties, and ecosystem services. In *Ch2014-impacts, toward quantitative scenarios of climate change impacts in switzerland* (S. 79-89). OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim; Bern.
- BUWAL. (1998). Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit und Risiko. Arbeitspapier. *Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern*, 72 S.
- CH2018. (2018). *CH2018 - Climate Scenarios for Switzerland* (Bericht). National Centre for Climate Services, Zürich, 271 S.
- Copernicus Land Service. (2018). *CORINE Land Cover (CLC)*. Zugriff auf <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>
- Dorren, L. (2003). A review of rockfall mechanics and modelling approaches. *Progress in Physical Geography*, *27*, 69-87.
- Dorren, L., Bauer, K., Günter, M., Menk, J. & Moos, C. (2017). *Pilotprojekt "Vorabklärung Modellierung GHK-Sturz Graubünden"*. *Schlussbericht* (Bericht). Berner Fachhochschule. Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL.
- Dorren, L., Berger, F., Frehner, M., Huber, M., Kühne, K., Metral, L., ... Wasser, B. (2015). Das neue NaiS-Anforderungsprofil Steinschlag. *Schweiz Z. Forstwes.*, *166*, 16-23.

- Erickson, T., Williams, M. W. & Tomaszewski, M. (2001). Landscape controls on snow accumulation in an alpine catchment. *Proceedings of the western snow conference, 69th annual meeting*, 115-118.
- Frehner, M., Brang, P., Kaufmann, G. & K uchli, C. (2018). *Standortkundliche Grundlagen für die Waldbewirtschaftung im Klimawandel* (Bericht). WSL. Nr. 66: 43S.
- Frehner, M., Ott, E. & Schwitter, R. (1998). *Waldgutachten rigi-nordlehne* (Bericht). Sargans.
- Fuhr, M., Bourrier, F. & Cordonnier, T. (2015). Protection against rockfall along a maturity gradient in mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 354, 224-231.
- Geoprevent AG. (2019). Monitoring systems for gravitative natural hazards. , 44 S.
- Gerber, W. (2019). *Naturgefahr Steinschlag - Erfahrungen und Erkenntnisse* (Bericht). Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. Nr. 74, 149 S.
- Ginzler, C. (2021). *Vegetation height model nfi*. National Forest Inventory (NFI). Zugriff auf <https://www.envidat.ch/dataset/vegetation-height-model-nfi>
- Gruber, S. & Häberli, W. (2007). Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research*, 112, 1-10.
- Gruner, U. (2004). Klima und Sturzereignisse in Vergangenheit und Zukunft. *Bull. angew. Geol., Vol., 9/2*, 23-27.
- Gruner, U. (2008). Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. *INTERPRAEVENT 2008. Conference Proceedings, Vol., 2*.
- Hantke, R. (2006). Blatt 1151 Rigi, mit Nordteil von Blatt 1171 Beckenried. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Erläut. 116. , 81 S.
- Hantke, R. & Bollinger, D. (2006). Blatt 1151 Rigi, mit Nordteil von Blatt 1171 Beckenried. – Geol. Atlas Schweiz 1:25000, Karte 116.
- Harris, C., Davies, M. C. R. & Etzelm uller, B. (2001). The Assessment of Potential Geotechnical Hazards Associated with Mountain Permafrost in a Warming Global Climate. *Permafrost and Periglac. Process*, 12, 145-156.
- Hobbs, P. V. (1974). *Ice physics*. Oxford University - Clarendon Press.

- Huber, N., Bugmann, H., Cailleret, M., Bircher, N. & Lafond, V. (2021). Stand-scale climate change impacts on forests over large areas: transient responses and projection uncertainties. *Ecological Applications*, *0(0)*, e02313.
- Hug, M. (2017). *Zwischenrevision Betriebsplan für das Gebiet Rigi und Rossberg der Schweizerischen Bundesbahn AG (SBB) und des Kantonsforstamtes Schwyz. Gültigkeitsperiode: 2015 bis 2024* (Bericht).
- Ingenieurgesellschaft Louis/Beffa Tognacca Gmbh. (2009). *Integrale Naturgefahrenkarte Los Arth* (Bericht). Kanton Schwyz.
- Jakoby, O., Stadelmann, G., Lischke, H. & Wermelinger, B. (2016). Borkenkäfer und Befallsdisposition der Fichte im Klimawandel. In A. R. Plüss, S. Augustin & P. Brang (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für die Adaptionsstrategien* (S. 247-264). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.
- Jochner, M., Bugmann, H., Nötzli, M. & Bigler, C. (2018). Tree growth responses to changing temperatures across space and time: a fine-scale analysis at the treeline in the Swiss Alps. *Trees*, *32*, 645-660.
- Kanton Graubünden. (2021). *Risiko-Hinweiskarte RhB*. Zugriff auf map.geo.gr.ch
- Krähenbühl, R. (2004). Temperatur und Kluftwasser als Ursache von Felssturz. *Bull. angew. Geol., Vol., 9/1*, 19-35.
- Lanfranconi, C., Sala, G., Frattini, P., Crosta, G. B. & Valagussa, A. (2020). Assessing the rockfall protection efficiency of forests at the regional scale. *Landslides*, *17*, 2703-2721.
- Leine, R., Schweizer, A., Christen, M., Glover, J., Bartelt, P. & Gerber, W. (2014). Simulation of rockfall trajectories with consideration of rock shape. *Multibody Syst Dyn*, *32*, 241-271.
- LFI. (2021). *So werden die Daten erhoben. Walddefinition im LFI*. Zugriff auf <https://www.lfi.ch/lfi/methoden3.php>
- Losey, S. & Wehrli, A. (2013). Schutzwald in der Schweiz. Vom Projekt SilvaProtect-CH zum harmonisierten Schutzwald. *Bundesamt für Umwelt, Bern*, 29 S. und Anhänge.
- Lu, G., Caviezel, A., Christen, M., Demmel, S. E., Ringenbach, A., Bühler, Y., ... Bartelt, P. (2019). Modelling rockfall impact with scarring in compactable soils. *Landslides*, *16*, 2353-2367.
- Lévesque, M., Saurer, M., Siegwolf, R., Eilmann, B., Brang, P., Bugmann, H. & Rigling, A. (2013). Drought response of five conifer species under contrasting

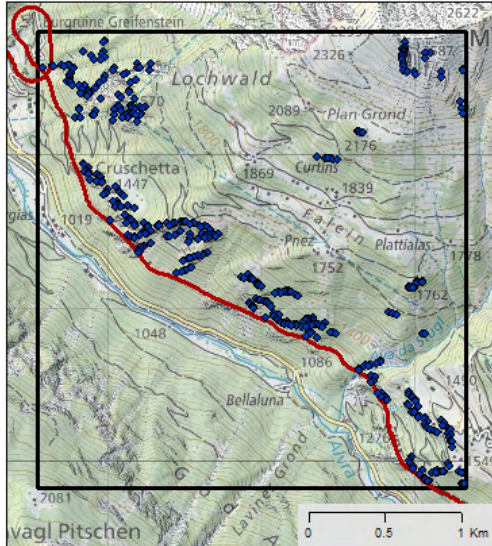
- water availability suggests high vulnerability of norway spruce and european larch. *Global Change Biology*, 19, 3184–3199.
- Mani, P. & Caduff, U. (2015). Klimasensitivität Naturgefahren. Teil 1: Methodenbericht. *geo7AG, Bern*, 115 S.
- Martin-Benito, D., Pederson, N., Kose, N., Dogan, M., Bugmann, H., Mosulishvili, M. & Bigler, C. (2018). Pervasive effects of drought on tree growth across a wide climatic gradient in the temperate forests of the caucasus. *Global Ecology and Biogeography*, 27, 1314-1325.
- MeteoSchweiz. (2021). *Räumliche Klimaanalysen. Normwert-Gitterdaten.* Zugriff auf <https://www.meteoschweiz.admin.ch/home/klima/schweizer-klima-im-detail/raeumliche-klimaanalysen.html>
- Mietkiewicz, N., Kulakowski, D., Rogan, J. & Bebi, P. (2017). Long-term change in sub-alpine forest cover, tree line and species composition in the swiss alps. *Journal of Vegetation Science*, 28, 951-964.
- Pfirter, U. (1997). Feuille 1106 moutier. - atlas géol. suisse 1:25000, notice expl. 96, 72 S.
- Pfirter, U., Antenen, M., Heckendorn, W., Burkhalter, R., Gürler, B. & Krebs, D. (1996). Feuille 1106 moutier. atlas géol. suisse 1:25000, carte 96.
- RAMMS::Rockfall User Manual v1.6 [Software-Handbuch]. (2016). WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF.
- Rigling, A., Elkin, C., Dobbertin, M., Eilmann, B., A, G., Wohlgemuth, T. & Bugmann, H. (2012). Wald und Klimawandel in der inneralpinen Trockenregion Visp. *Schweizer Z. Forstwesen*, 153, 437-445.
- Ringebach, A., Bebi, P., Bühler, Y., Stoffel, A., Christen, M., Bartelt, P. & Caviezel, A. (2021). Automatic deadwood generator to simulate rockfall in forest windthrow areas. *Manuskript in Bearbeitung.*
- Ringebach, A., Stihl, E., Christen, M., Lu, G., Bühler, Y., Bebi, P., . . . Caviezel, A. (2021). Brief communication: Experimental trilogy to examine the deadwood effect on rockfall dynamics in forests. *Manuskript in Bearbeitung.*
- Ritter, A., Elbert, P. & Onder, C. (2018, Dezember). How to use the IDSCreport L^AT_EX class [Software-Handbuch]. Version 1.6.0. ETH Zürich, Switzerland.
- Sass, O. & Oberlechner, M. (2012). Is climate change causing increased rockfall frequency in austria? *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 3209-3216.
- Scherer, B., Oggier, N. & Steffen, D. (2019). Fallstudie PROTECT Bio - Steinschlag Gorge de Court. Wirkung des Schutzwaldes auf das SBB-Risiko. *geoformer igp AG*, 106 S.

- Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W. & Verkerk, P. J. (2014). Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat. Clim. Change*, 4, 806-810.
- Stoffel, M. & Huggel, C. (2012). Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*, 36, 421-439.
- Streckeisen, A., Zanettin, B., Bas, M. L., Bonin, B., Bateman, P., Bellieni, G., ... Woolley, A. (2002). *Ingenous Rocks. A Classification and Glossary of Terms* (2nd Aufl.; R. L. Maitre, Hrsg.). Cambridge University Press.
- Stritih, A., Senf, C., Seidl, R., Gret-Regamey, A. & Bebi, P. (2021). The impact of land-use legacies and recent management on natural disturbance susceptibility in mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 484, 1-10.
- swisstopo. (2020). *swissTLMRegio*. Zugriff auf <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlmregio.html>
- swisstopo. (2021a). *GeoKarten 500 - Vektor*. Zugriff auf <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/geology/maps/gk500/vector.html>
- swisstopo. (2021b). *swissALTI3D*. Zugriff auf <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/height/alti3d.html>
- swisstopo. (2021c). *swissTLM3D*. Zugriff auf <https://www.swisstopo.admin.ch/de/geodata/landscape/tlm3d.html>
- Vick, L. M., Zimmer, V., White, C., Massey, C. & Davies, T. (2019). Significance of substrate soil moisture content for rockfall hazard assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 1105-1117.
- Völkl, S. M. (2021). *Dokumentation potential release points* (Bericht).
- Wegmann, M. (1998). *Frostdynamik in hochalpinen Felswänden am Beispiel der Region Jungfraujoch - Aletsch* (Bericht). Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETHZ.
- WSL. (2021). *Hänge in Bewegung: Steinschlag, Felssturz und Rutschung*. Zugriff auf <https://www.wsl.ch/de/naturgefahren/steinschlag-und-rutschung.html>
- Zimmermann, N., Schmatz, D., Gallien, L., Körner, C., Huber, B., Frehner, M. & Psomas, A. (2016). Baumartenverbreitung und Standorteignung. In A. R. Plüss, S. Augustin & P. Brang (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für die Adaptationsstrategien* (S. 199-221). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern; Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf; Haupt, Bern, Stuttgart, Wien.

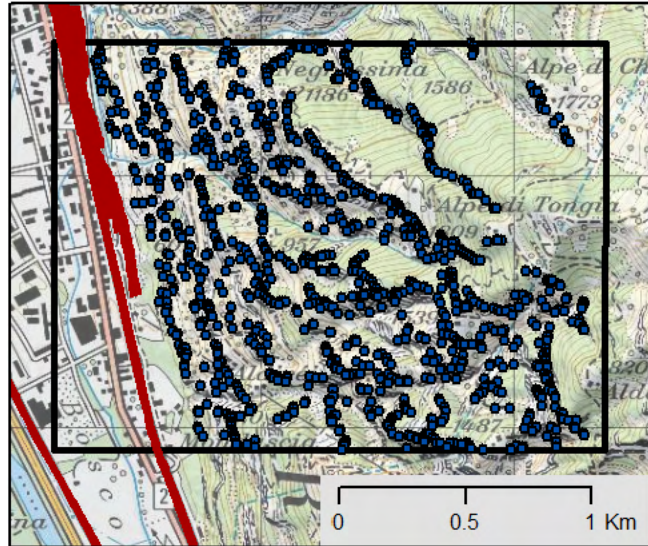
Anhang A

Bestimmung der Häufigkeit von Ereignissen

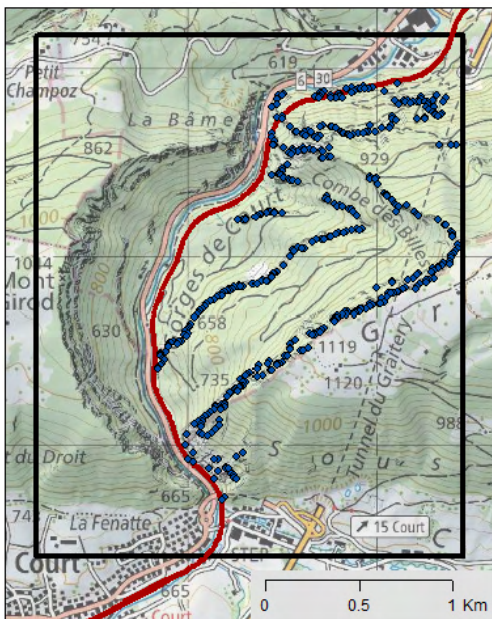
A.1 Lokalisation der aktuellen Anrisspunkte



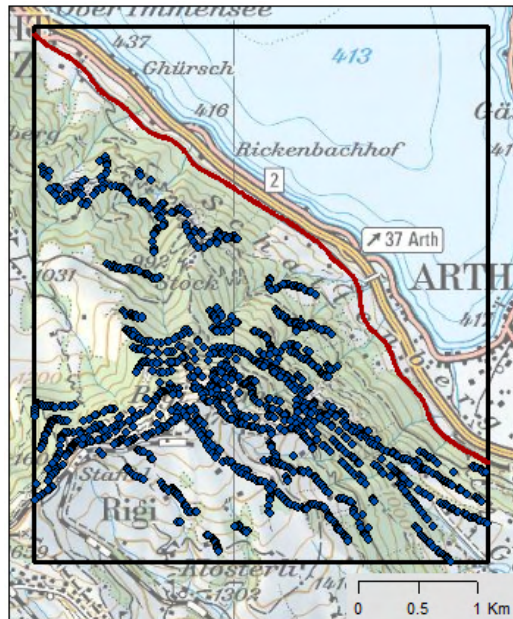
(a) Albula



(b) Biasca



(c) Gorges de Court



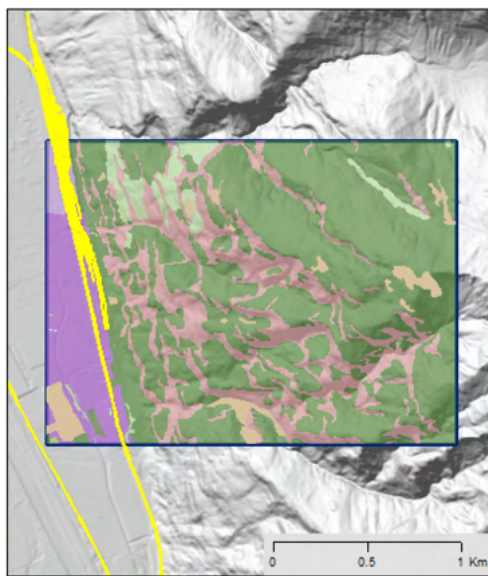
(d) Riginordlehne

Abbildung A.1: Anrisspunkte für die Simulationen der heutigen Gefahrensituation für die vier Untersuchungsgebiete. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben, die Systemgrenzen sind als schwarzer Rahmen gekennzeichnet. Hintergrundkarte: © swisstopo, Topomaps, 2021.

A.2 Bodenbedeckung der Untersuchungsgebiete



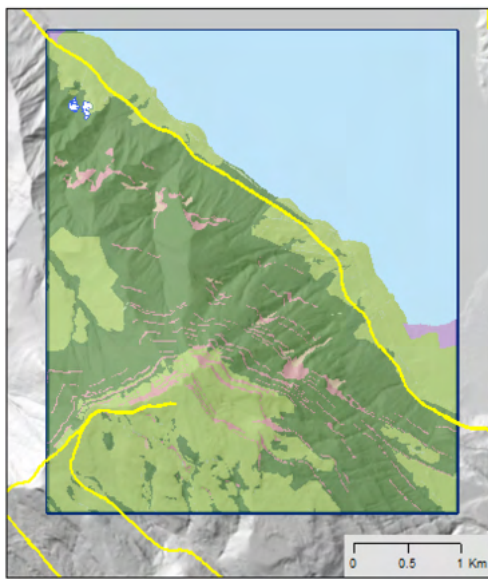
(a) Albula



(b) Biasca



(c) Gorges de Court



(d) Riginordlehne

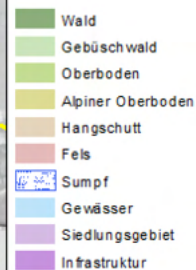


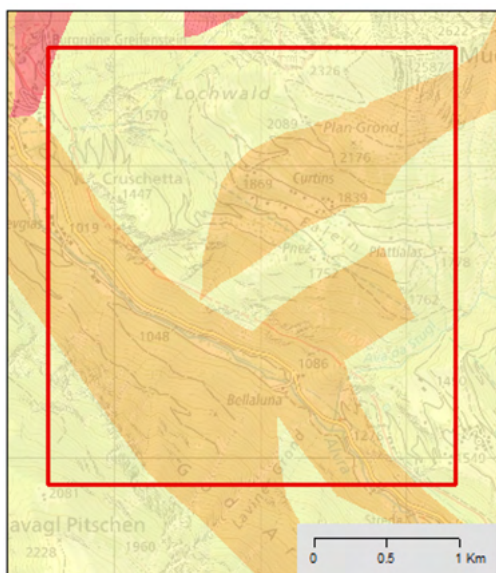
Abbildung A.2: Bodenbedeckung der Untersuchungsgebiete (blaue Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Karte: © swisstopo, swissTLMRegio, 2020; Copernicus Land Service, CORINE Land Cover, 2018.

A.3 Tabelle zur Bestimmung der Verwitterungsanfälligkeit

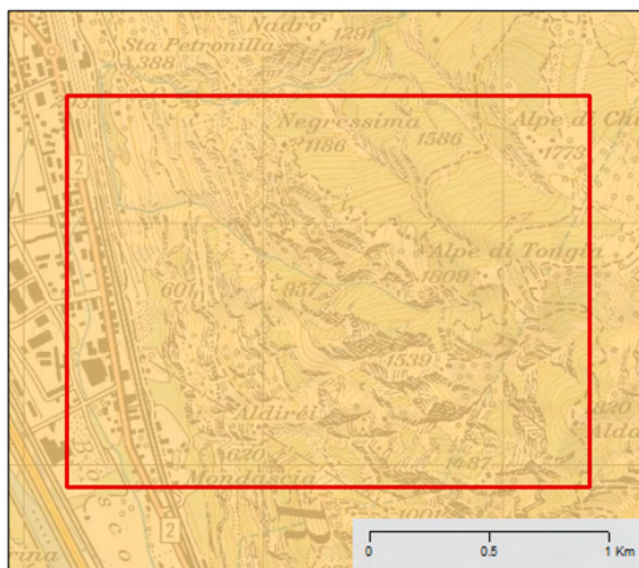
Tabelle A.1: Bestimmung der Verwitterungsanfälligkeit anhand der Lithologie des Gesteins. Verändert nach Losey und Wehrli (2013).

Gestein	Attribut Geotechn. Karte	Verwitterungsanfälligkeit
	(GK500V1: ID Lith)	
tonige Gesteine	13, 14, 18, 30, 112	gross
Mergel tonig	12, 15, 17	gross
Mergel	31, 33, 111	gross
Mergel/Sandstein	10, 42	gross
Sandstein kalkig	16, 19, 55	mittel
Sandkalke	21, 32	mittel
Dolomit	49	gross
Kalksteine	40, 41	mittel
Kalkschiefer	11, 35, 36, 37, 75, 44, 110	mittel
Konglomerate	20, 45, 54, 130	mittel
Serizitschiefer	63, 637	mittel
Glimmergneise	59, 62, 65, 66, 67, 68	mittel
Gneise mit viel Feldspat	48, 60, 61, 69, 120	gering
Brekzien	22, 131	mittel
Kieselkalke/Radiolarite	43, 48	mittel
harte Gesteine	23, 38, 46, 47, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 64, 70, 71, 80, 81, 83, 84, 132	gering

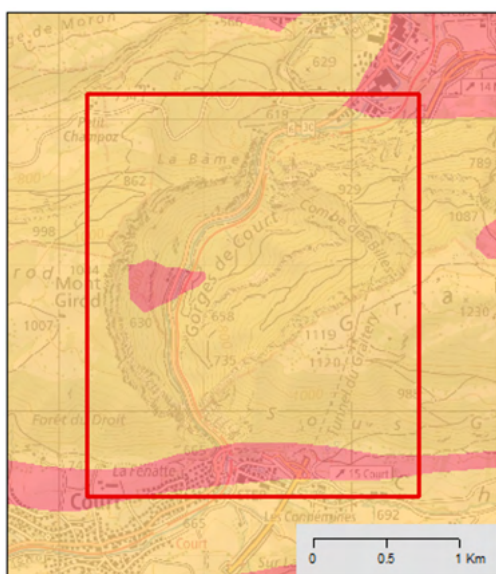
A.4 Verwitterungsanfälligkeit in den Untersuchungsgebieten



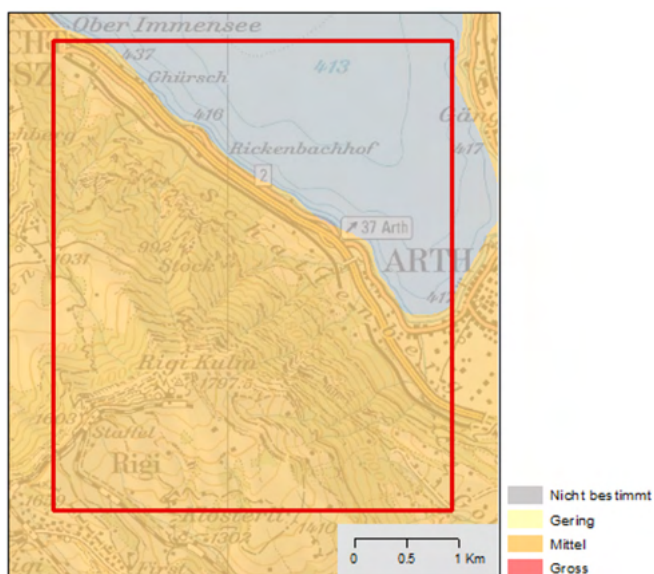
(a) Perimeter Albula



(b) Perimeter Biasca



(c) Perimeter Gorges de Court



(d) Perimeter Riginordlehne

Abbildung A.3: Verwitterungsanfälligkeit der Gesteine in den Untersuchungsgebieten. Klassifizierung nach Losey und Wehrli (2013, s. Anhang A.3). Datengrundlage: © swisstopo, GK500V1, 2014.

A.5 Veränderung der Anzahl Frostwechseltage

Perimeter Albula

Laut CH2018 (2018) wird für das Emissionsszenario RCP2.6 für alle Jahreszeiten grösstenteils keine Veränderung der Anzahl Frostwechseltage bis 2085 angenommen (Abbildung A.4). Lediglich im Sommer oberhalb von 2500 m ü. M. kann mit einer Abnahme der Frostwechseltage gerechnet werden. Dies betrifft jedoch nur 2 von 448 Anrisspunkte. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 nehmen die Frostwechseltage im Winter ab einer Höhe von 1500 m ü. M. zu, weiter unten bleiben sie unverändert (Abbildung A.5). Unverändert bleibt auch die Anzahl Frostwechseltage im Sommer, mit Ausnahme der 2 Anrisspunkten oberhalb von 2500 m ü. M., wo eine Abnahme der Frostwechseltage zu erwarten ist. Im Frühling und im Herbst wird grösstenteils eine Abnahme der Frostwechseltage erwartet. Nur oberhalb 2500 m ü. M. bleibt die Anzahl Frostwechseltage gleich.

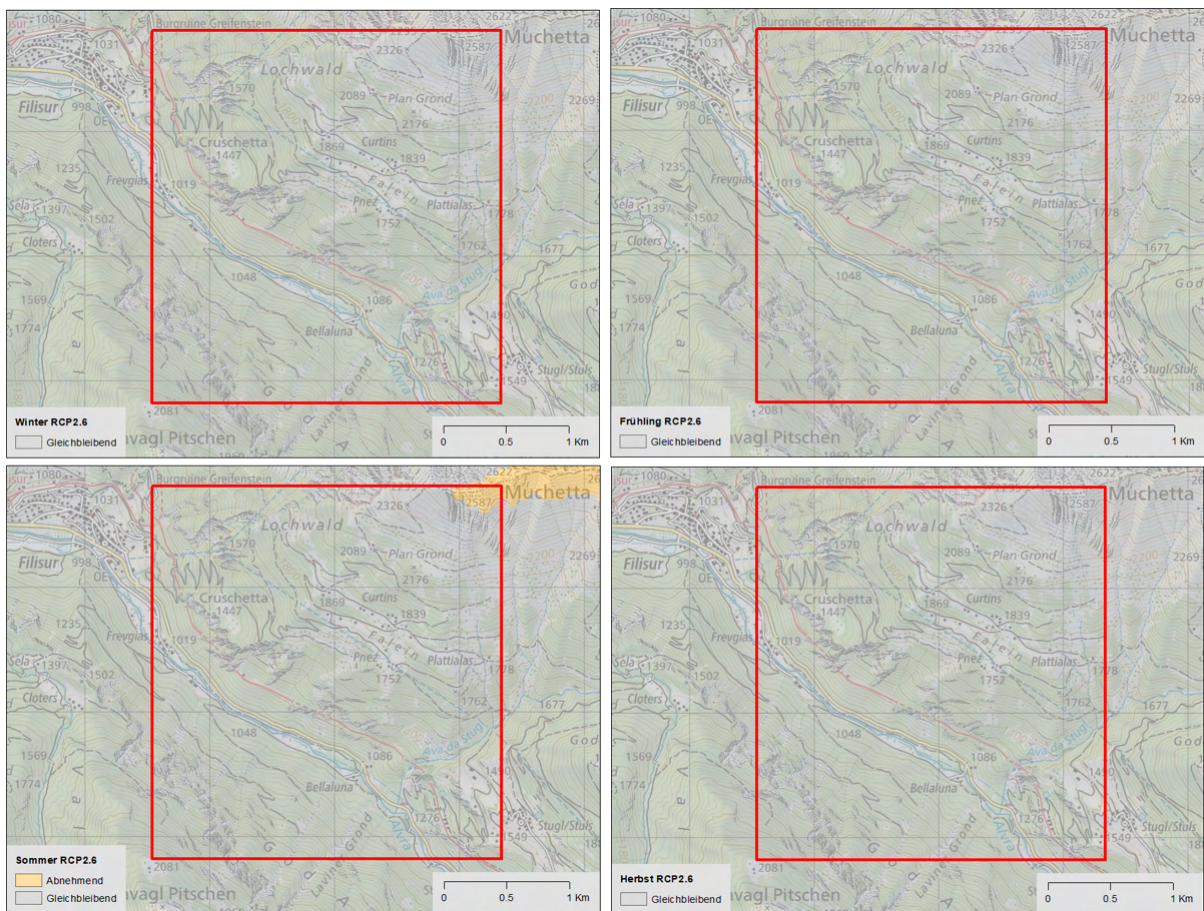


Abbildung A.4: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swiss-topo, Topomaps, 2020.

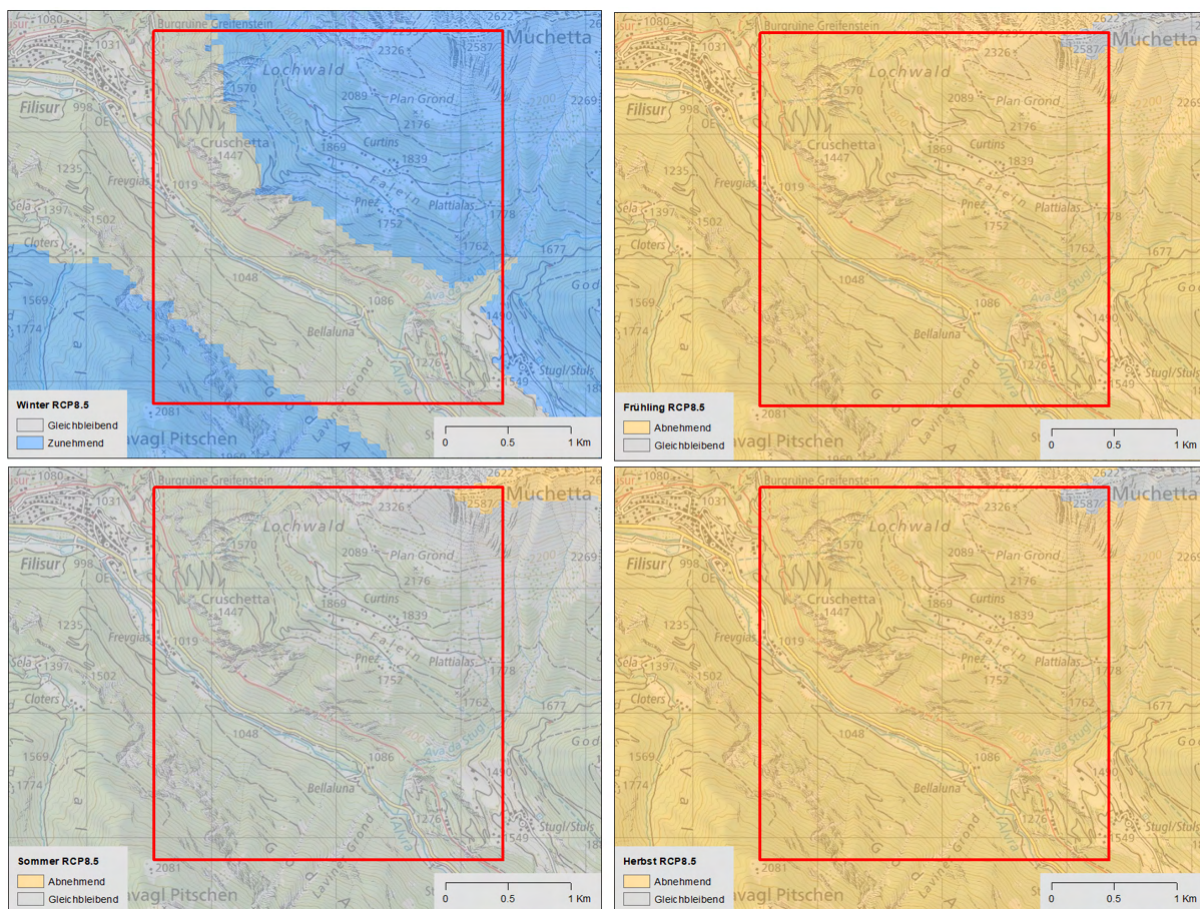


Abbildung A.5: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Albula (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swiss-topo, Topomaps, 2020.

Perimeter Biasca

Laut CH2018 (2018) nehmen unter dem Emissionsszenario RCP2.6 die Frostwechseltage im Winter unterhalb von 300 m ü. M. ab, während sie in den höher gelegenen Bereichen gleich bleiben (Abbildung A.6). In den übrigen Jahreszeiten bleibt die Anzahl Frostwechseltage bis Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich stabil. Für das Emissionsszenario RCP8.5 wird eine Zunahme der Frostwechseltage oberhalb und eine Abnahme der Frostwechseltage unterhalb 1500 m ü. M. vorhergesagt (Abbildung A.7). Im Frühling nehmen die Frostwechseltage zwischen 800 und 1500 m ü. M. ab, ansonsten bleiben sie gleich. Im Sommer ist hingegen mit keiner Veränderung der Anzahl Frostwechseltage zu rechnen, während im Herbst die Frostwechseltage ab einer Höhe von 800 m ü. M. abnehmen.

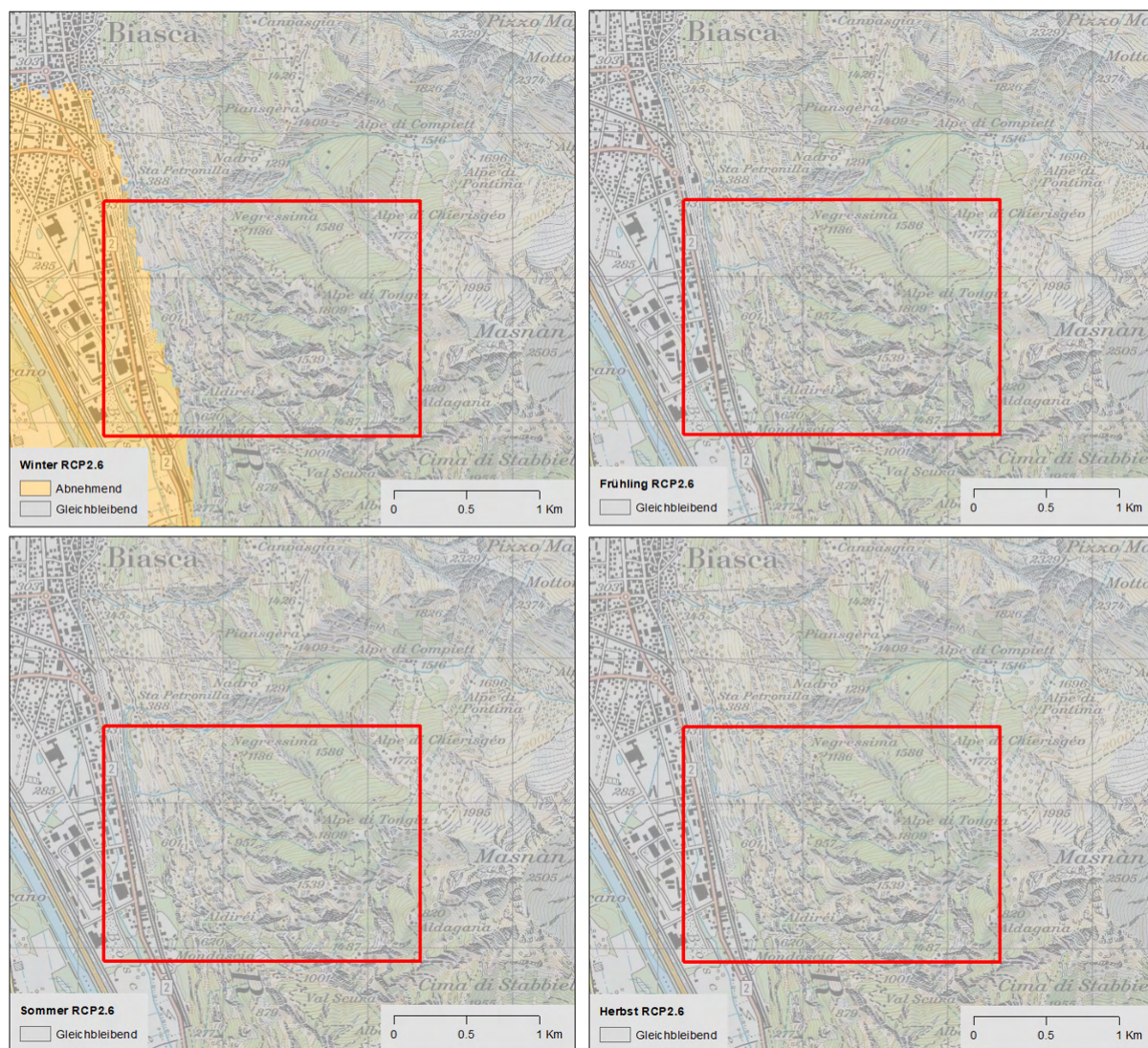


Abbildung A.6: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Biasca (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swiss-topo, Topomaps, 2020.

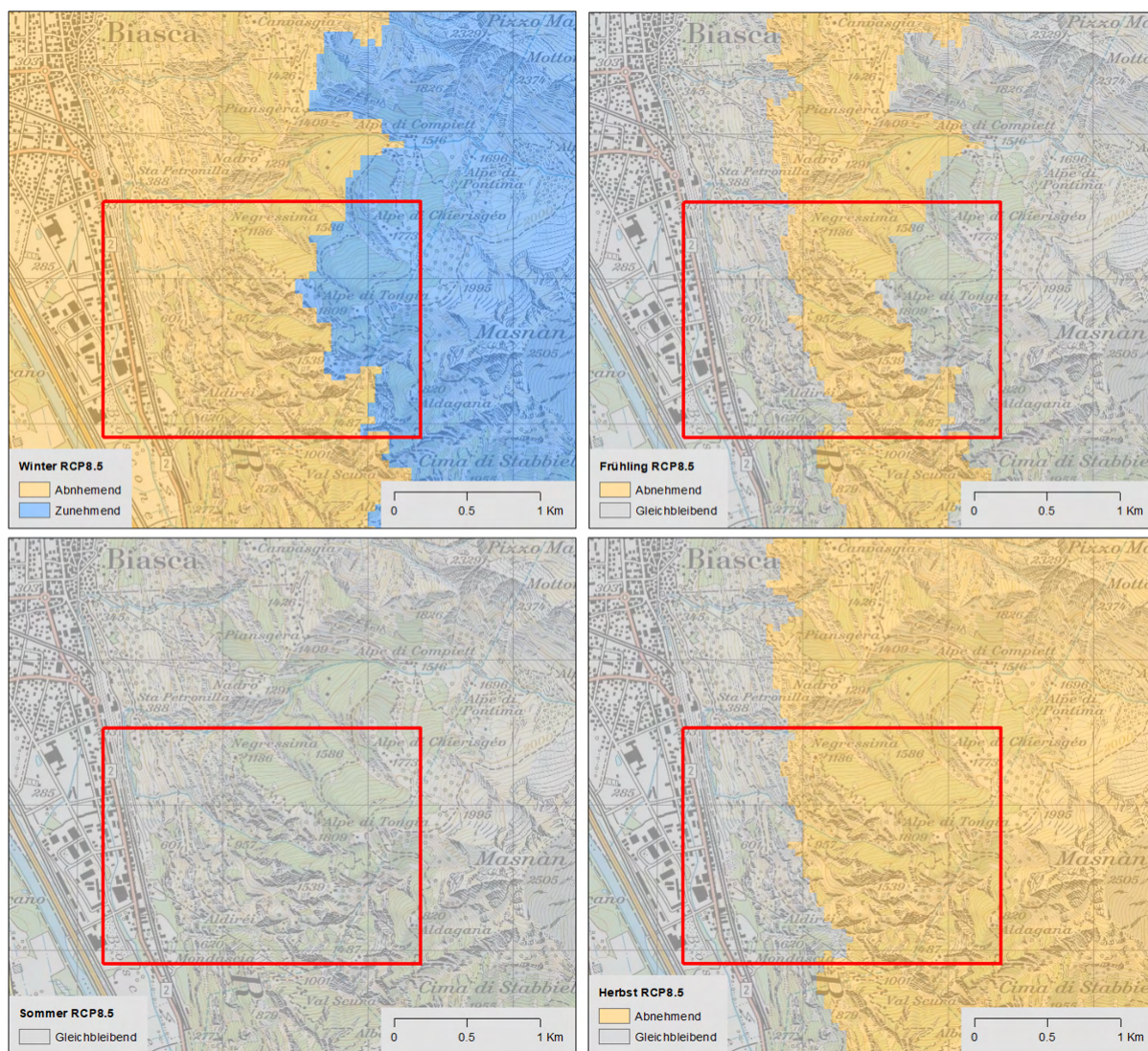


Abbildung A.7: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Biasca (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swiss-topo, Topomaps, 2020.

Perimeter Gorges de Court

Laut CH2018 (2018) sind im Untersuchungsgebiet Gorge de Court unter dem Emissionsszenario RCP2.6 keine Veränderung der Anzahl Frostwechseltage zu erwarten (Abbildung A.8). Für das Emissionsszenario RCP8.5 ist im Winter und Frühling eine Abnahme der Frostwechseltage prognostiziert (Abbildung A.9). Im Sommer ist aber auch unter dem stärkeren Emissionsszenario keine Änderung zu erwarten. Im Herbst wird von einer Abnahme der Frostwechseltage oberhalb von 800 m ü. M. ausgegangen.

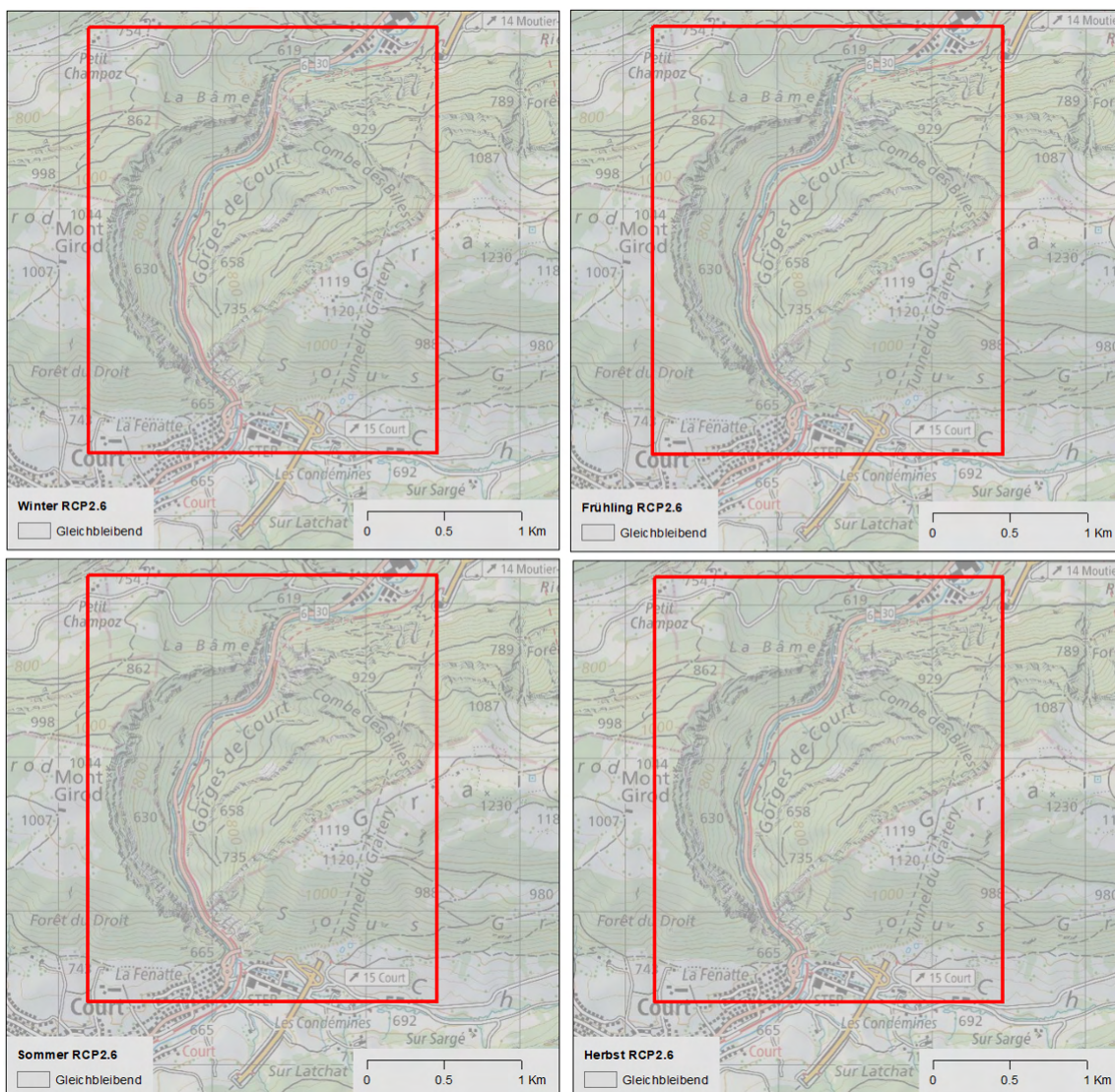


Abbildung A.8: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.

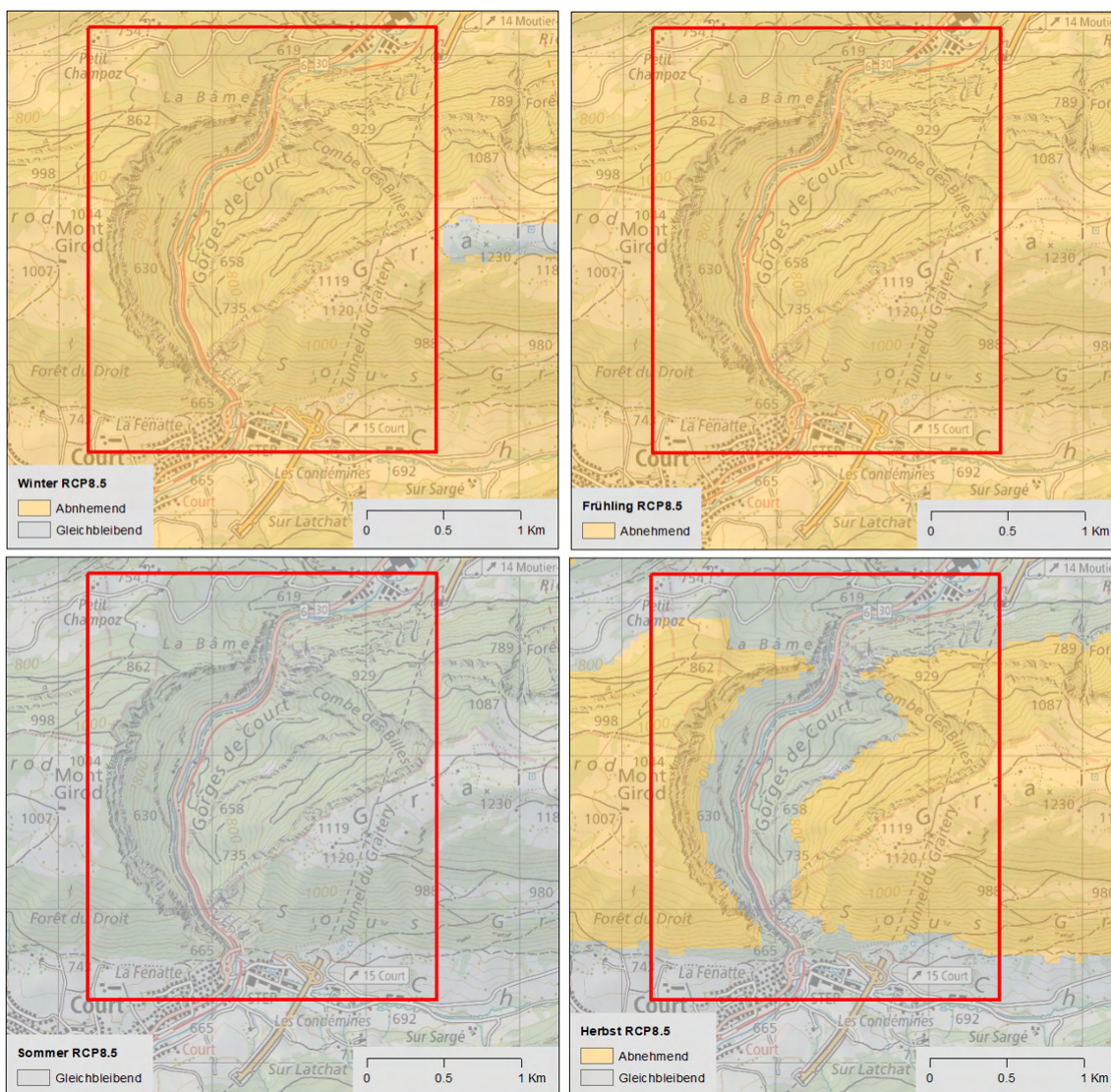


Abbildung A.9: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.

Perimeter Riginordlehne

Laut CH2018 (2018) sind im Untersuchungsgebiet Gorge de Court unter dem Emissionsszenario RCP2.6 keine Veränderung der Anzahl Frostwechseltage zu erwarten (Abbildung A.10). Für das Emissionsszenario RCP8.5 ist im Winter eine Zunahme der Frostwechseltage oberhalb von 1500 m ü. M. (Abbildung A.11) und eine Abnahme unterhalb von 800 m ü. M. prognostiziert, während dazwischen die Anzahl Frostwechseltage konstant bleibt. Im Frühling nehmen die Frostwechseltage hingegen im ganzen Perimeter ab, während im Sommer keine Veränderung erwartet wird. Im Herbst nimmt die Anzahl Frostwechseltage lediglich oberhalb von 800 m ü. M. ab.



Abbildung A.10: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP2.6. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.

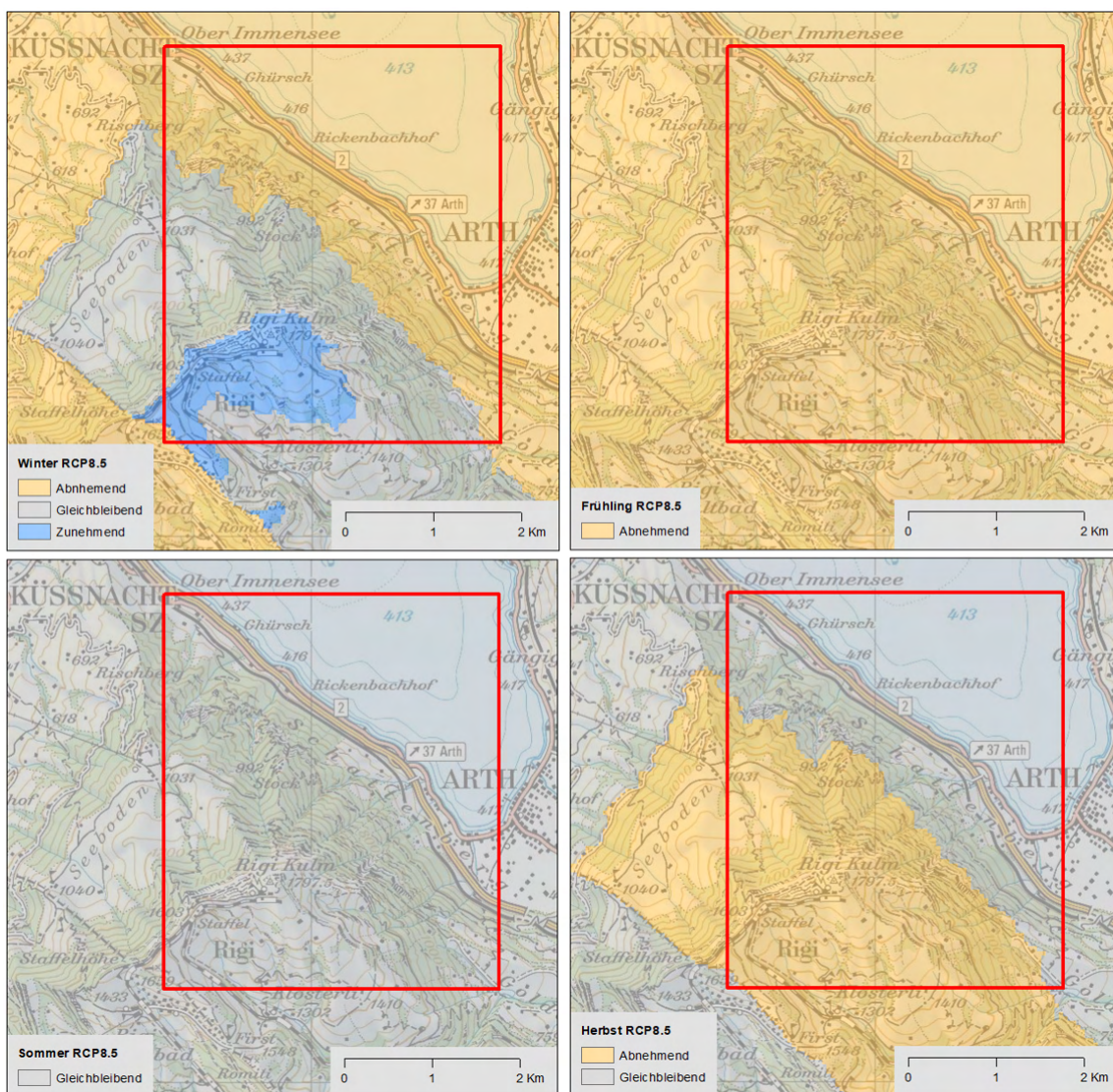


Abbildung A.11: Veränderung der Anzahl Frostwechseltage pro Jahreszeit im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (roter Kasten) bis 2085 unter dem Emissionsszenario RCP8.5. Die Daten stammen aus den Szenarien CH2018 (2018). Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2020.

A.6 Entscheidungsdiagramm für nivale und pluviale Einzugsgebiete

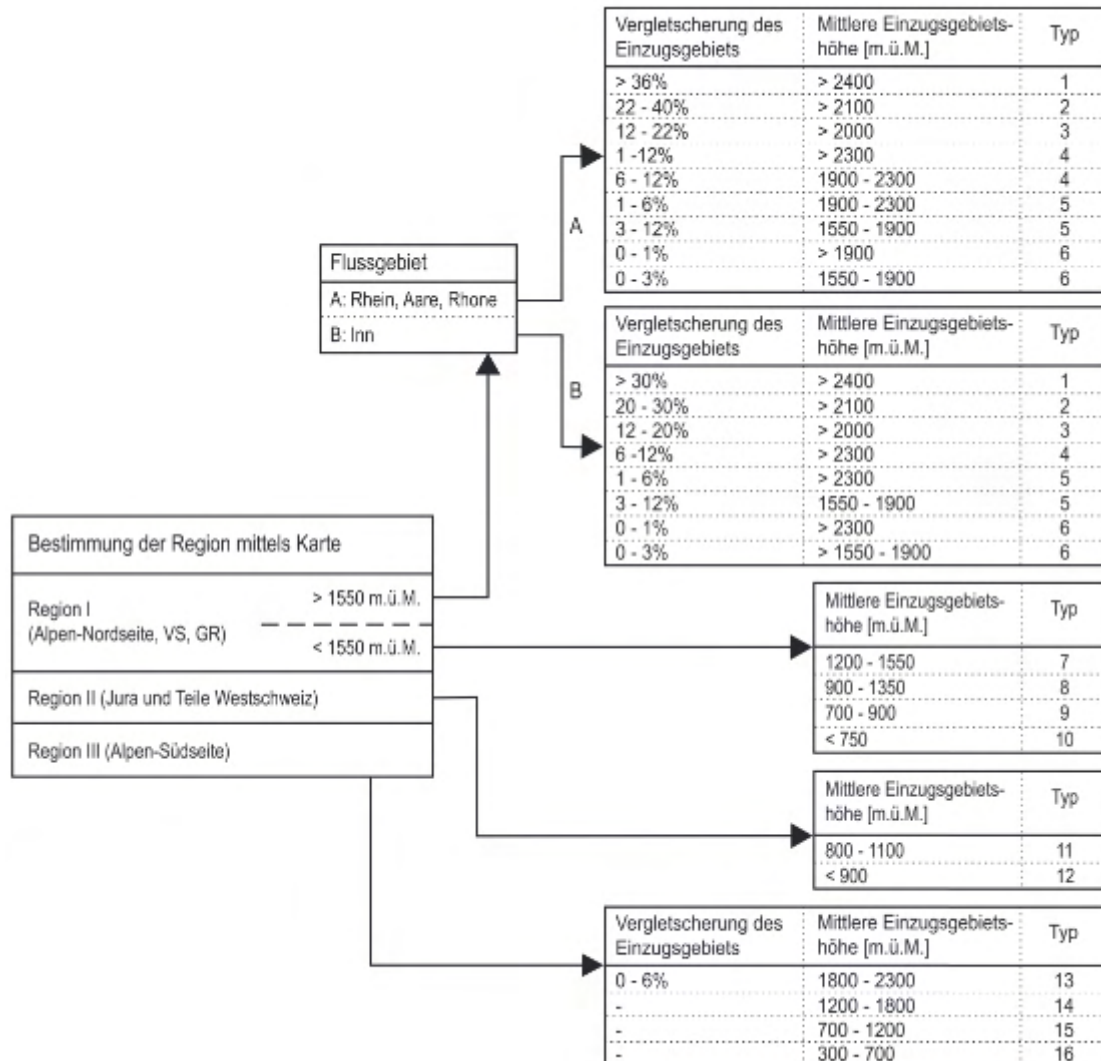


Abbildung A.12: Entscheidungsdiagramm aus Aschwanden und Weingartner (1985) zur Bestimmung des Abflussregimetyps. Die Abflussregimetypen sind in Abbildung A.13 beschrieben.

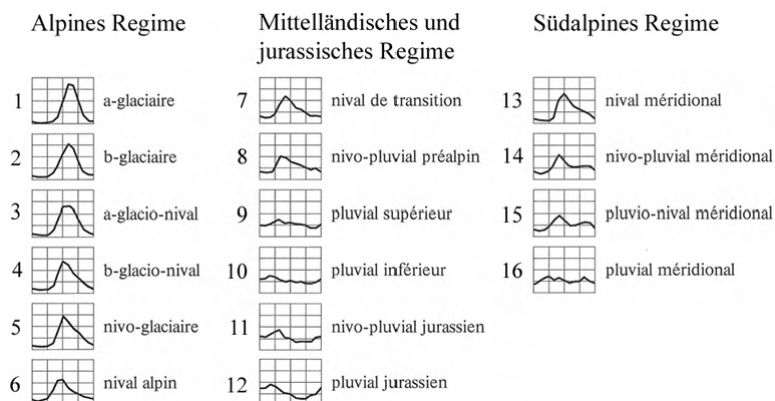


Abbildung A.13: Beschreibung der Abflussregimetyphen nach Aschwanden und Weingartner (1985).

In vorliegender Arbeit wird bei den Abflussregimetyphen 1-8, 11, 13, 14 von nivalen Einzugsgebieten gesprochen, die Abflussregimetyphen 9, 10, 12, 15, 16 werden als pluviale Einzugsgebiete bezeichnet. Folglich sind die Untersuchungsgebiete Albula (Abflussregimetyp 7) und Riginordlehne (Abflussregimetyp 8) nivale Einzugsgebiete, während die Perimeter Biasca (Abflussregimetyp 15) und Gorges de Court (Abflussregimetyp 12) als pluviale Einzugsgebiete bezeichnet werden.

A.7 Veränderung der Starkniederschläge

Unter Annahme, dass eine Veränderung ab mindestens 10% signifikant ist, resultiert unter dem Emissionsszenario RCP2.6 in allen Untersuchungsgebiete und während des ganzen Jahres keine signifikante Veränderung des 5-jährlichen Tagesniederschlags bis 2085. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 hingegen, ist für die Untersuchungsgebiete Albula, Biasca und Gorges de Court eine Zunahme der 5-jährlichen Tagesniederschläge zu erwarten, mit Ausnahme während der Sommermonate (Juni, Juli, August) wo keine Veränderung prognostiziert wird. Im Untersuchungsgebiet Riginordlehne ist während des ganzen Jahres mit einer signifikanten Zunahme des 5-jährlichen Tagesniederschlags zu rechnen (s. Tabelle A.2).

Tabelle A.2: Prozentuale Veränderung des 5-jährlichen Tagesniederschlags (Mittlere Schätzung) bis 2085 pro Untersuchungsgebiet und Jahreszeit basierend auf den Daten der CH2018 (2018).

		Albula	Biasca	Gorges de Court	Riginordlehne
Winter	RCP2.6	+6%	+7%	+6%	+3%
	RCP8.5	+17%	+23%	+17%	+15%
Frühling	RCP2.6	+5%	+4%	+3%	+3%
	RCP8.5	+11%	+13%	+15%	+14%
Sommer	RCP2.6	+3%	-0,1%	+3%	+3%
	RCP8.5	+9%	-0.5%	+7%	+11%
Herbst	RCP2.6	+5%	+5%	+1%	+3%
	RCP8.5	+17%	+17%	+15%	+10%

A.8 Veränderung der Schmelzwasserabflüsse

Die Daten der Schmelzwasserabflüsse stammen aus den Simulationsergebnissen des Modells PREVAH (Brunner et al., 2019) der Einzugsgebiete Nr. 7 für das Untersuchungsgebiet Albula und Nr. 163 für das Untersuchungsgebiet Riginordlehne (s. Abbildung A.14). Die prozentuale Veränderung der mittleren Schmelzwasserabflüsse pro Jahreszeit sind in Tabelle A.3 aufgeführt. Eine signifikante Veränderung wird ab 10% angenommen.

Im Untersuchungsgebiet Albula resultiert unter dem Emissionsszenario RCP2.6 eine Zunahme der Schmelzwasserabflüsse im Winter und Frühling und eine Abnahme im Sommer und Herbst. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 ist nur noch im Winter eine Abnahme zu erwarten, im Frühling bleiben die Schmelzwasserabflüsse konstant, während sie im Sommer und Herbst abnehmen.

Im Untersuchungsgebiet Riginordlehne resultiert unter dem Emissionsszenario RCP2.6 nur im Winter eine Veränderung. Hier nimmt die Schmelze ab, während sie im Frühling, Sommer und Herbst unverändert bleibt. Unter dem Emissionsszenario RCP8.5 ist hingegen während des ganzen Jahres eine Abnahme der Schmelzwasserabflüsse zu erwarten.

Tabelle A.3: Prozentuale Veränderung der Schmelzwasserabflüsse (Mittlere Schätzung) bis 2085 pro Jahreszeit für die Untersuchungsgebiete Albula und Riginordlehne basierend auf den Daten der PREVAH-Modellrechnungen von Brunner et al. (2019).

		Albula	Riginordlehne
Winter	RCP2.6	+33%	-33%
	RCP8.5	+113%	-45%
Frühling	RCP2.6	+14%	-5%
	RCP8.5	+6%	-62%
Sommer	RCP2.6	-40%	-0.2%
	RCP8.5	-88%	-100%
Herbst	RCP2.6	-27%	-8%
	RCP8.5	-52%	-58%

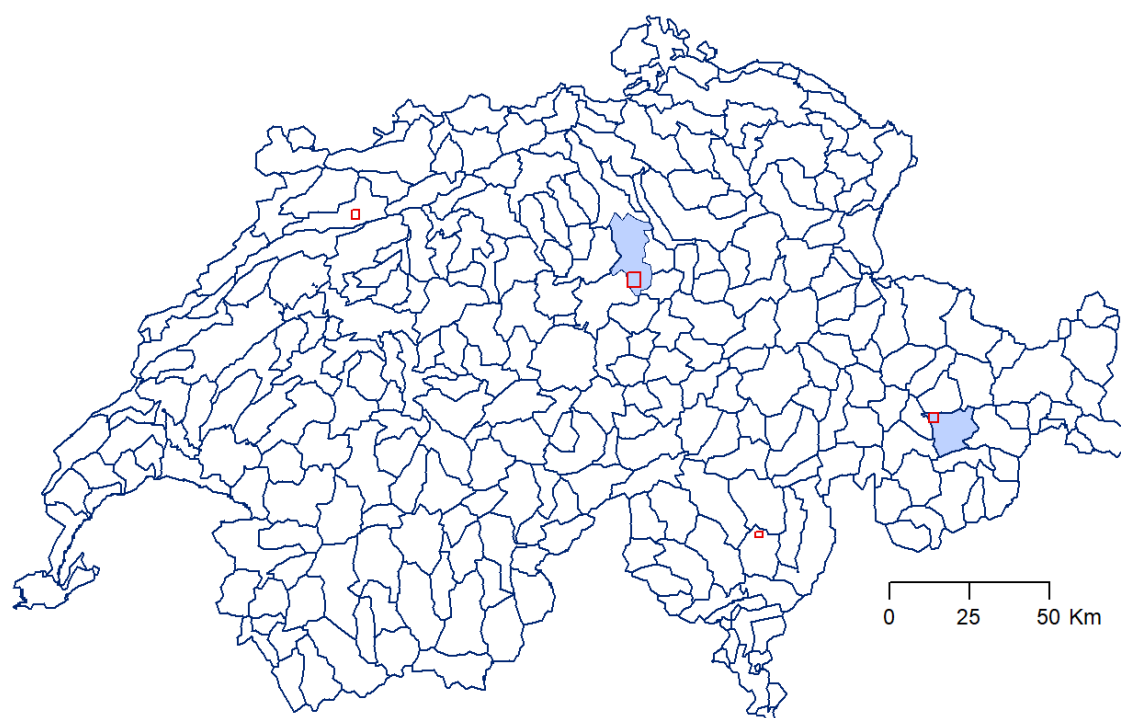


Abbildung A.14: Die Daten zu den Schmelzwasserabflüssen für die Untersuchungsgebiete (roter Kasten) stammen aus den hellblau markierten Einzugsgebieten. Die Einzugsgebiete wurden von Brunner et al. (2019) definiert.

A.9 Resultierende Frequenzänderung

Perimeter Albula

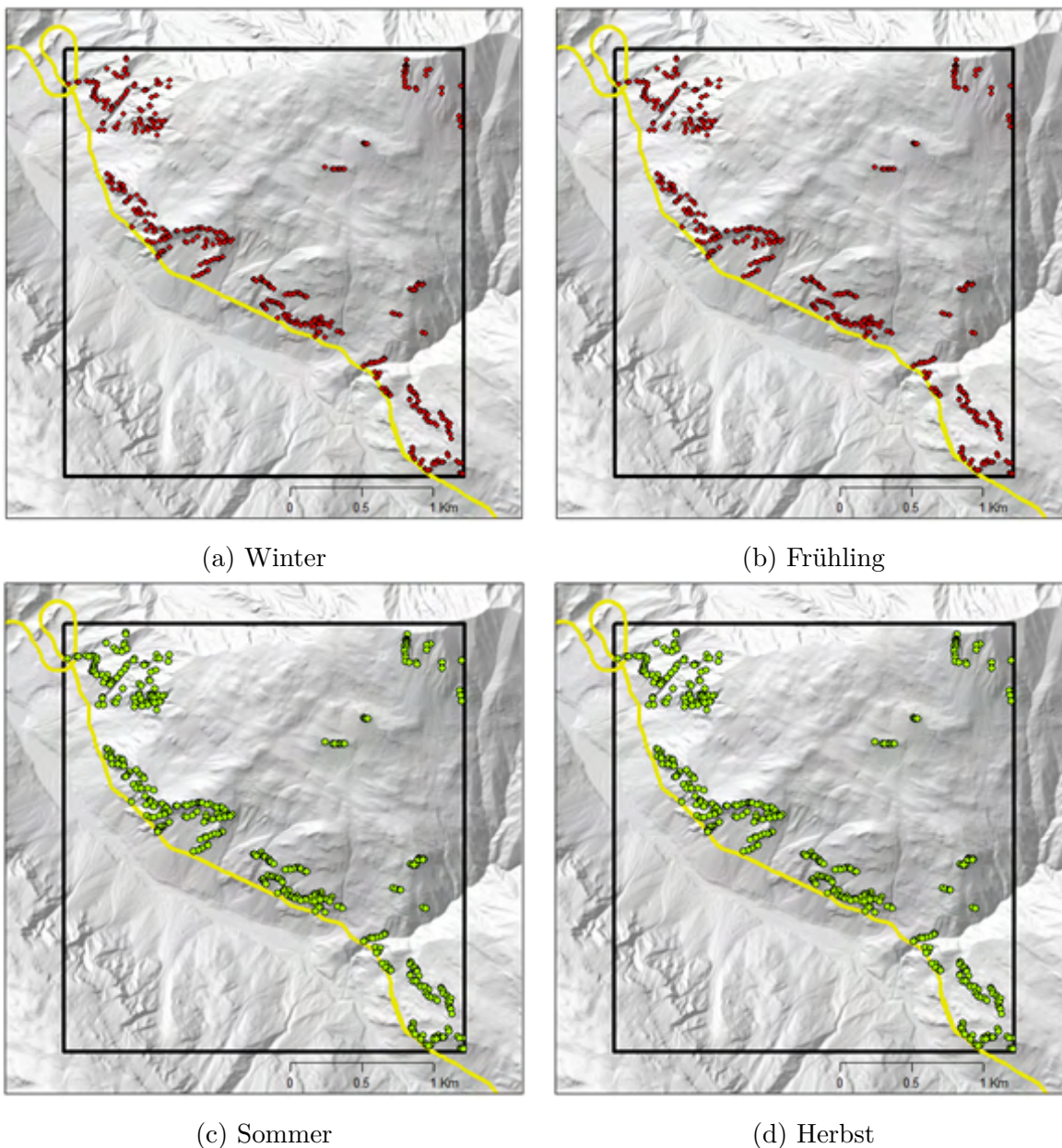


Abbildung A.15: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

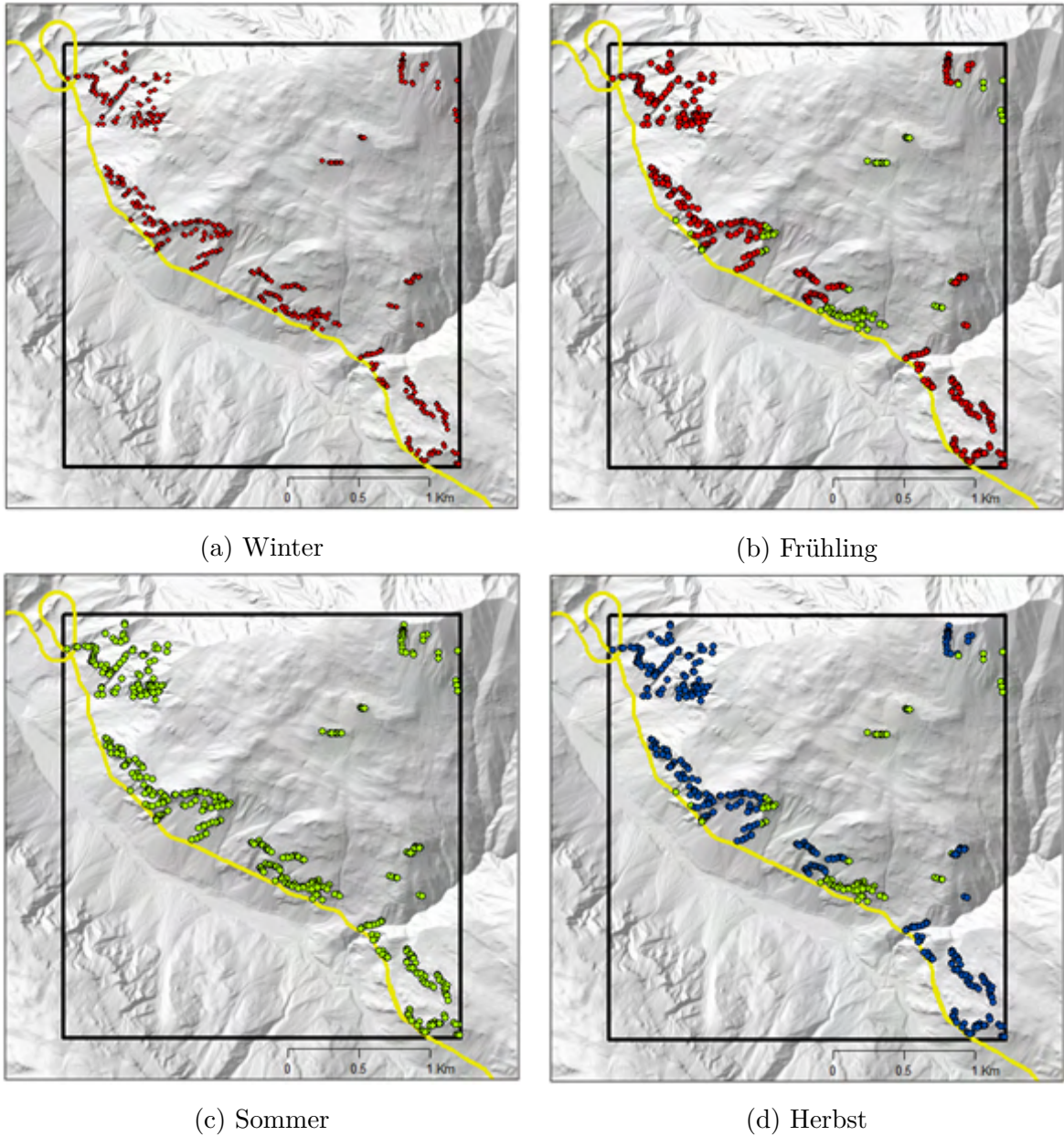


Abbildung A.16: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Biasca

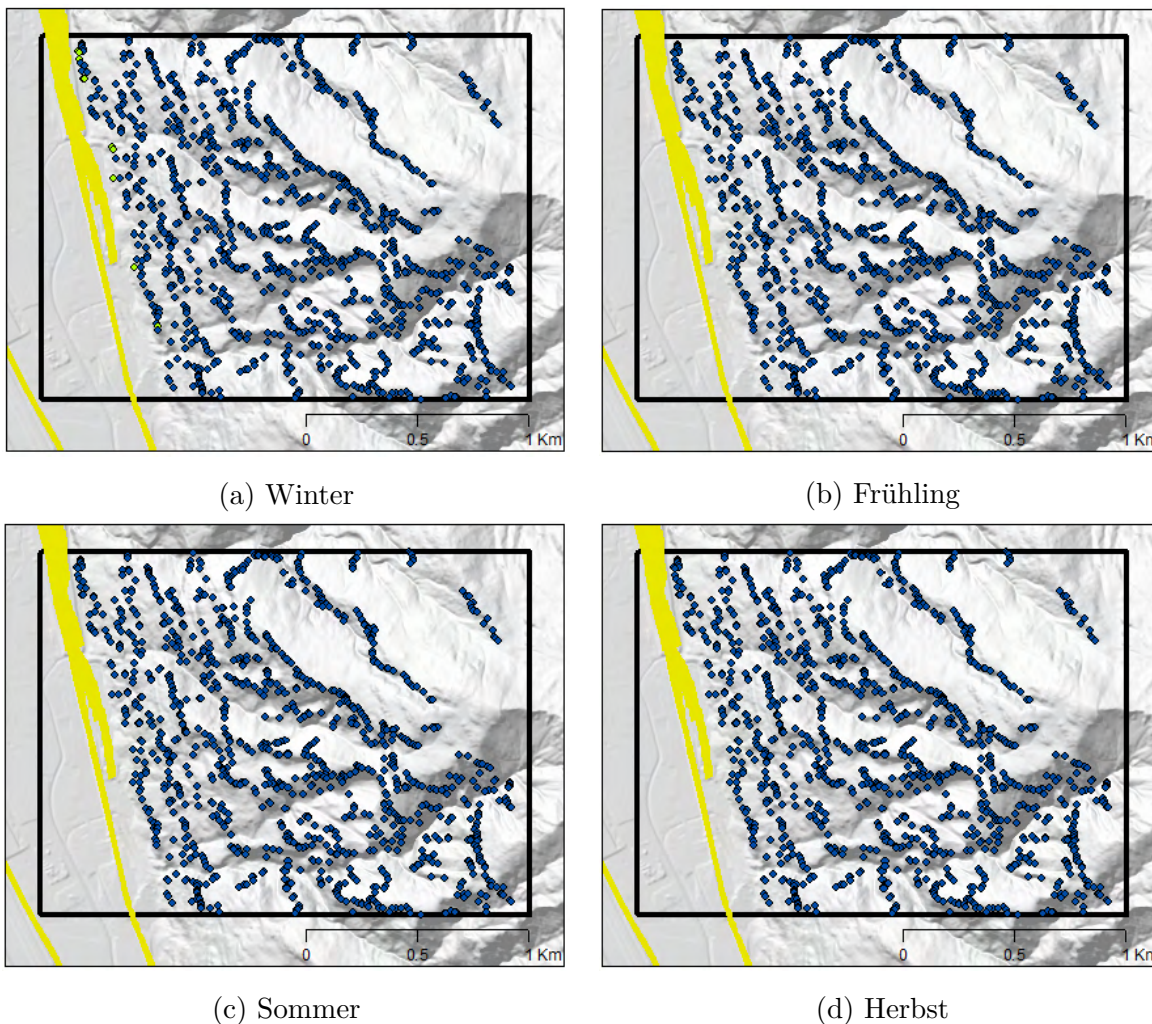


Abbildung A.17: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

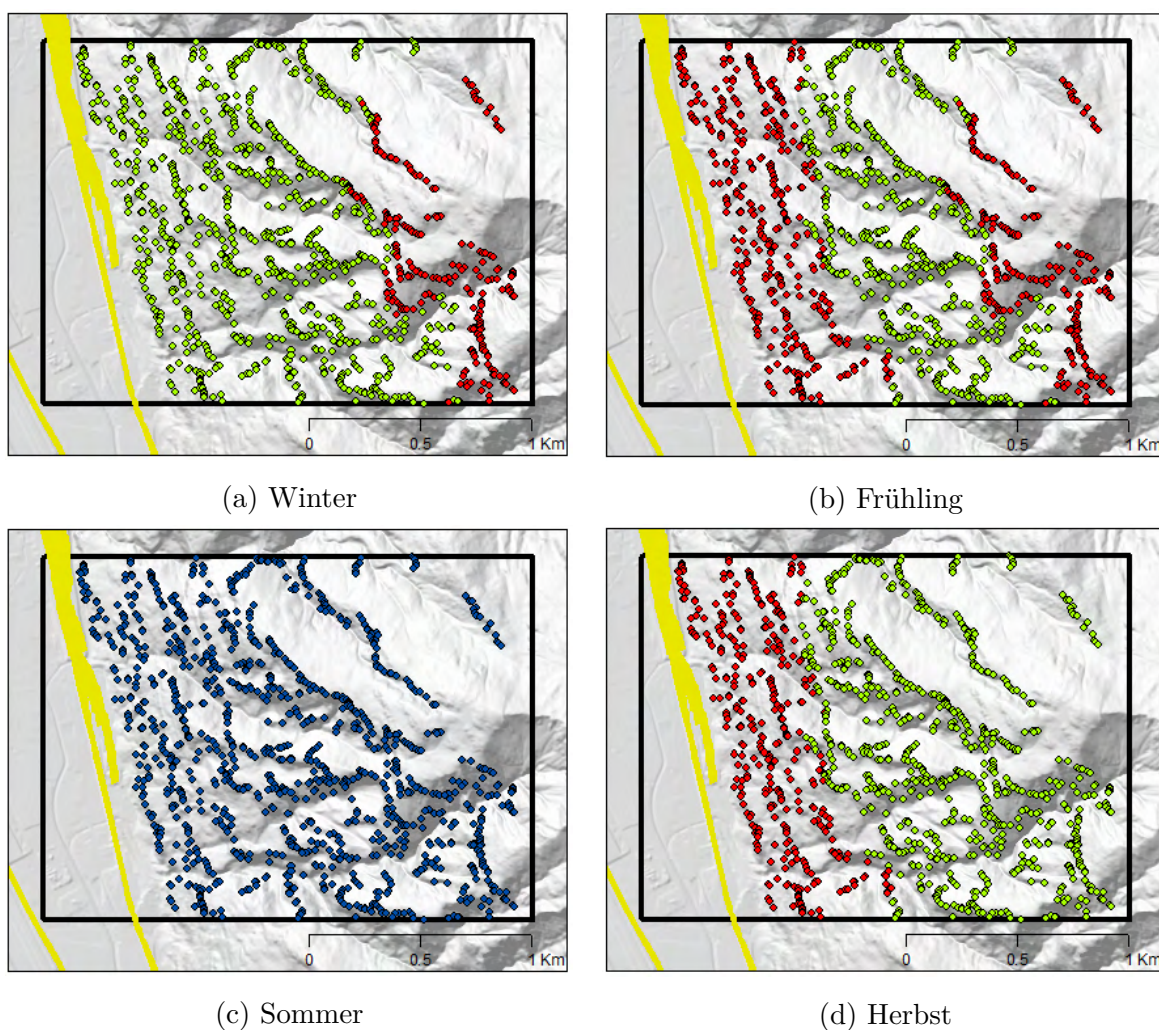


Abbildung A.18: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Gorges de Court

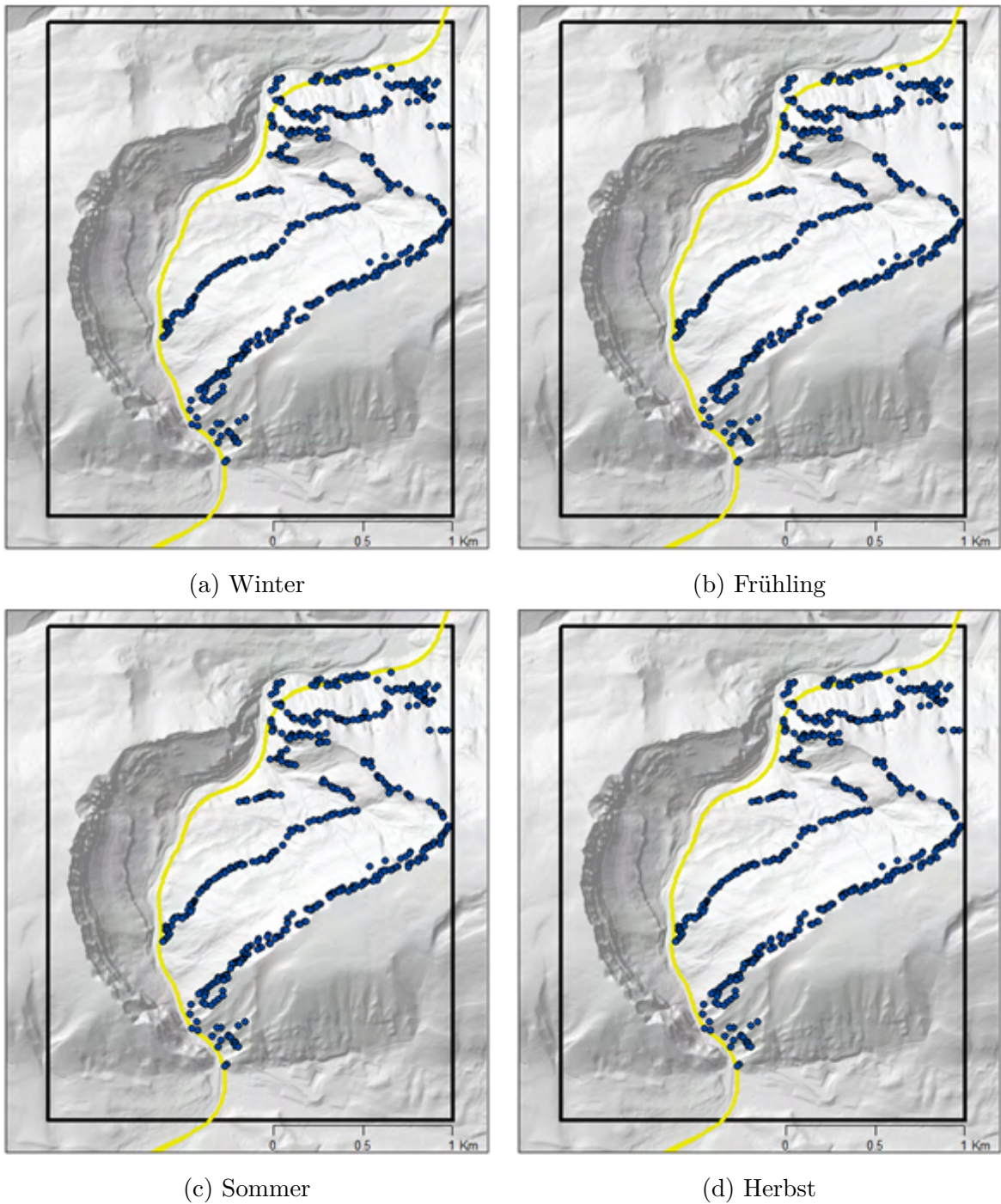


Abbildung A.19: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

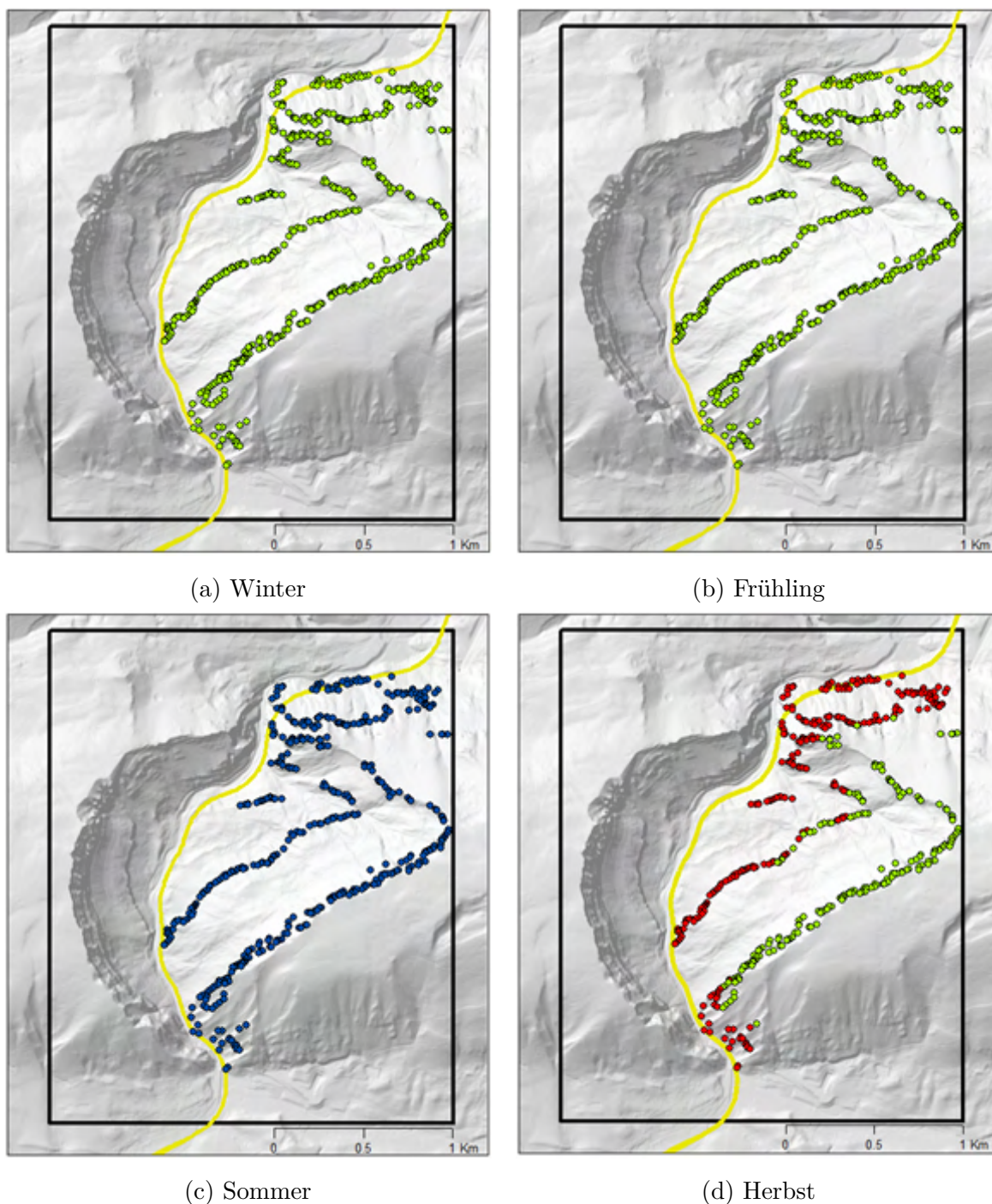


Abbildung A.20: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Riginordlehne

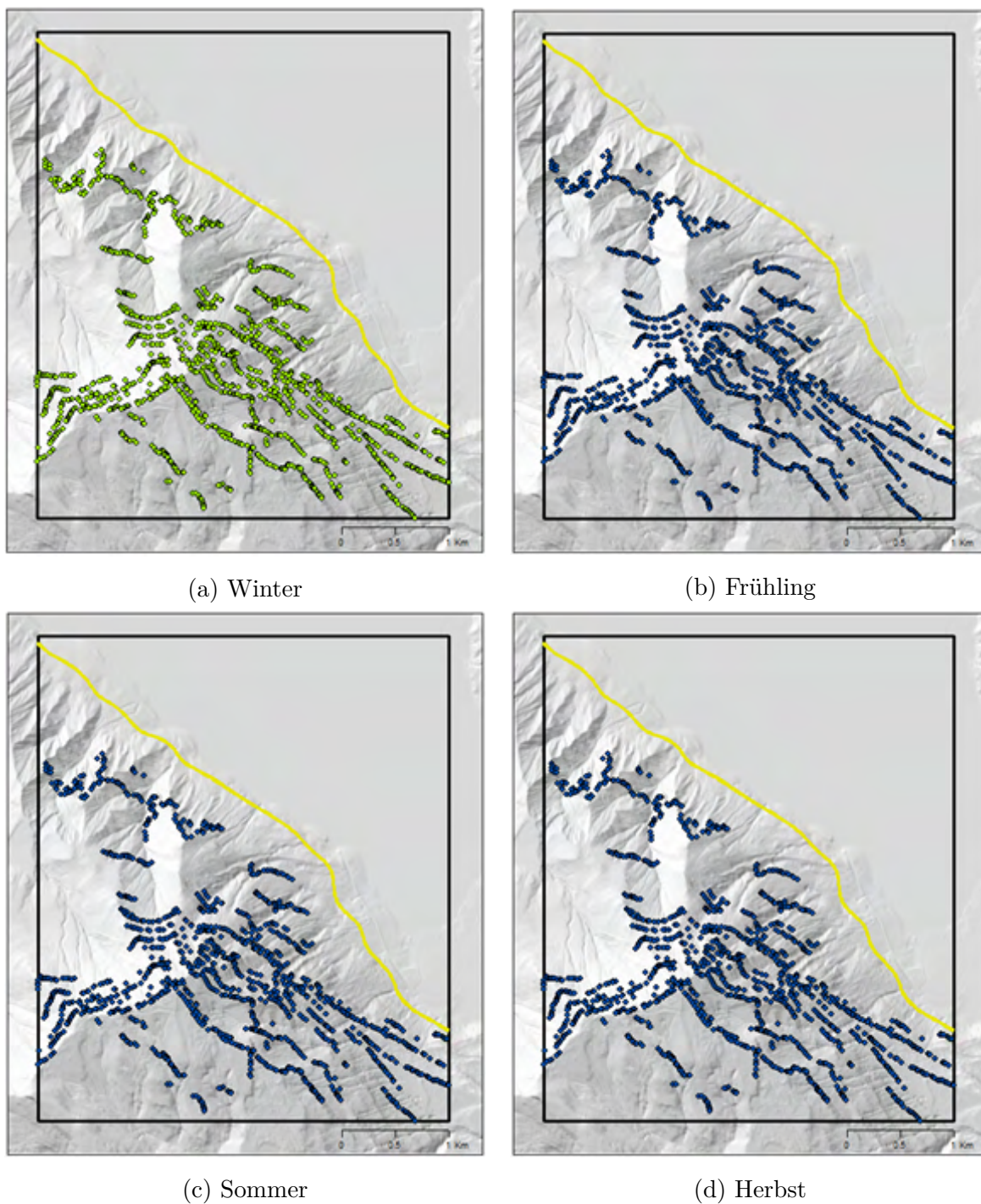


Abbildung A.21: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP2.6** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

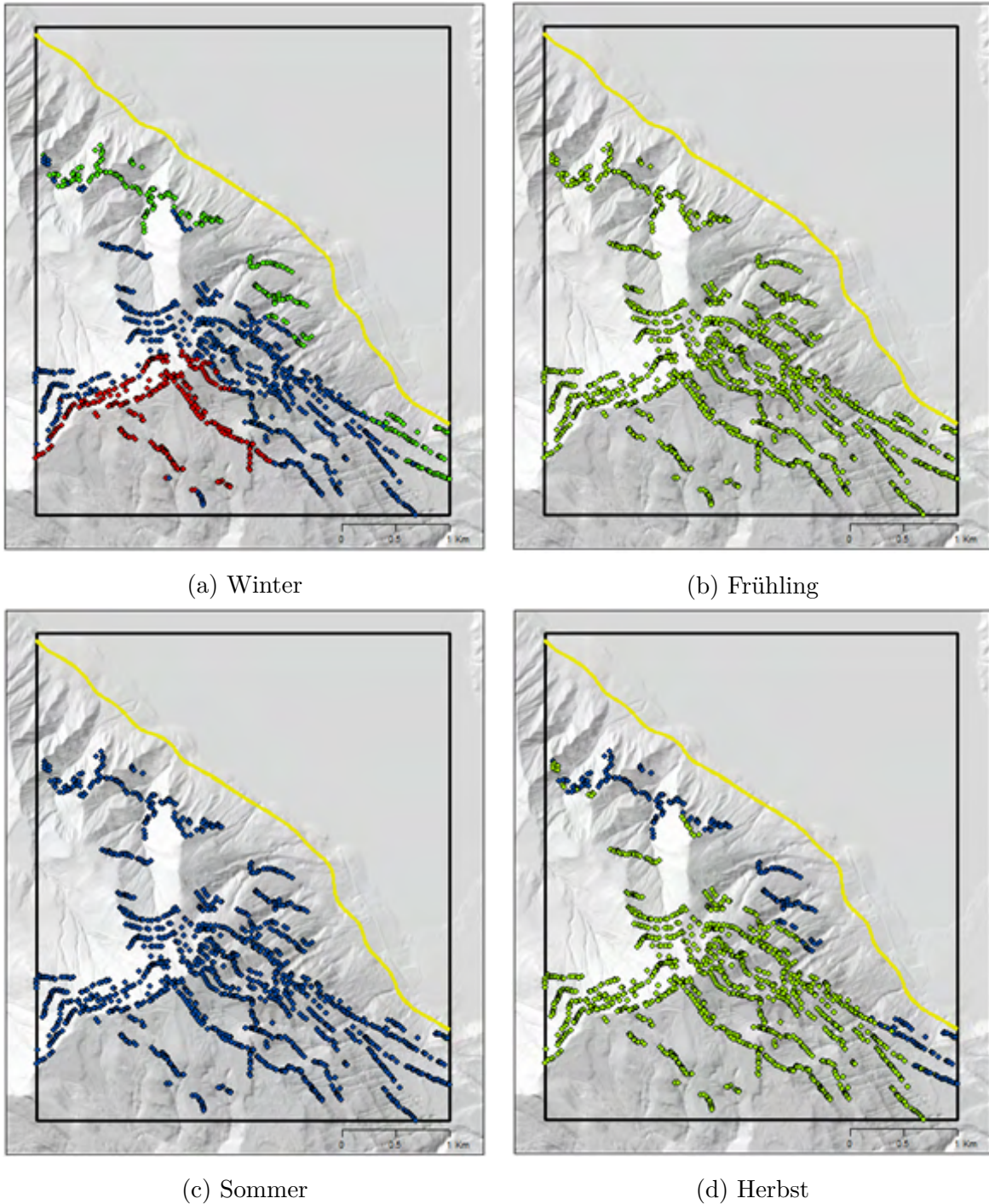
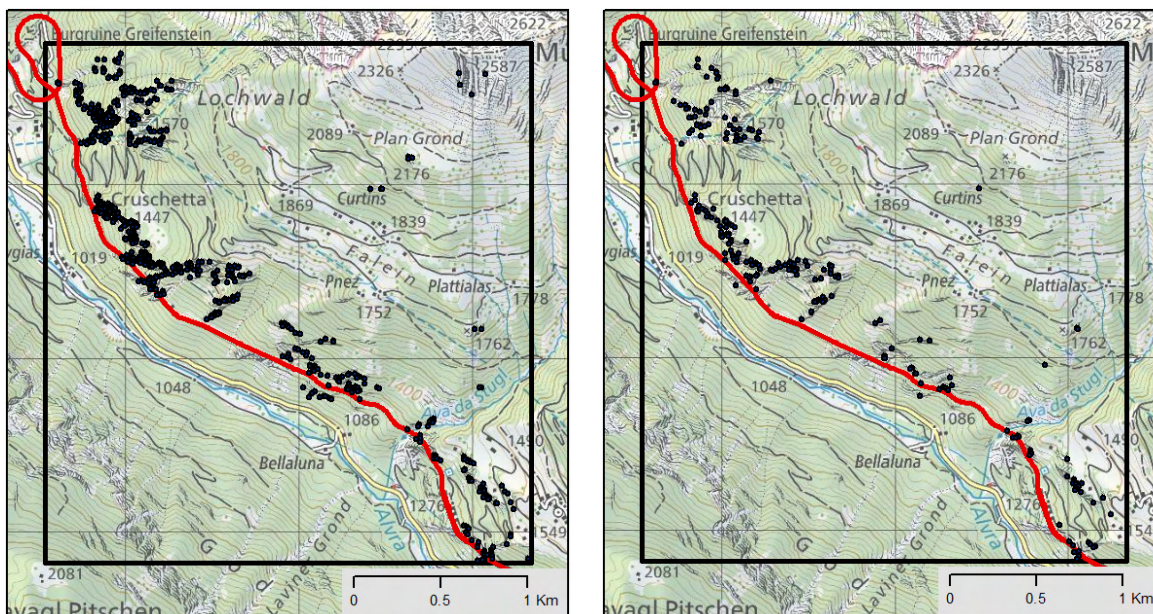


Abbildung A.22: Änderung der Frequenz bis 2085 pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

A.10 Lokalisation der zukünftigen Anrisspunkte

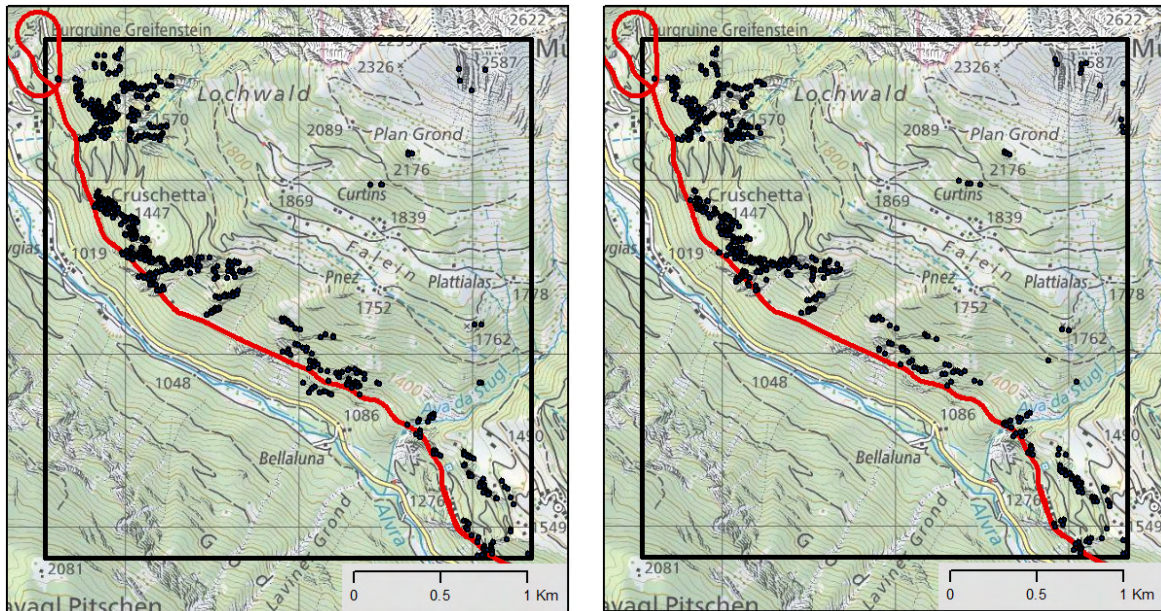
Perimeter Albula



(a) Winter und Frühling

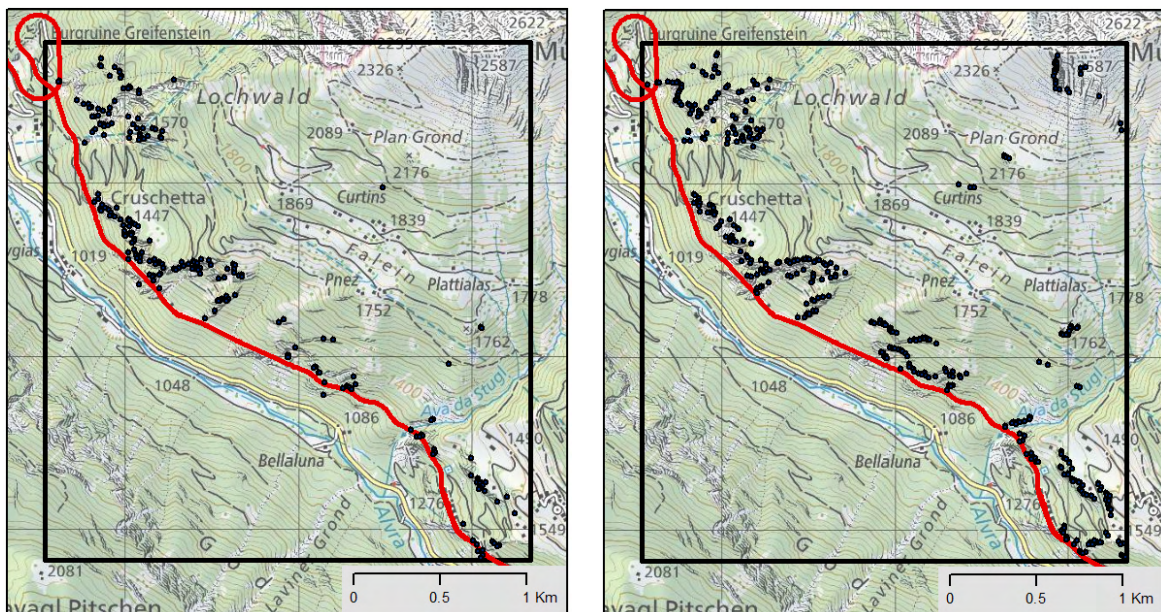
(b) Sommer und Herbst

Abbildung A.23: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.



(a) Winter

(b) Frühling

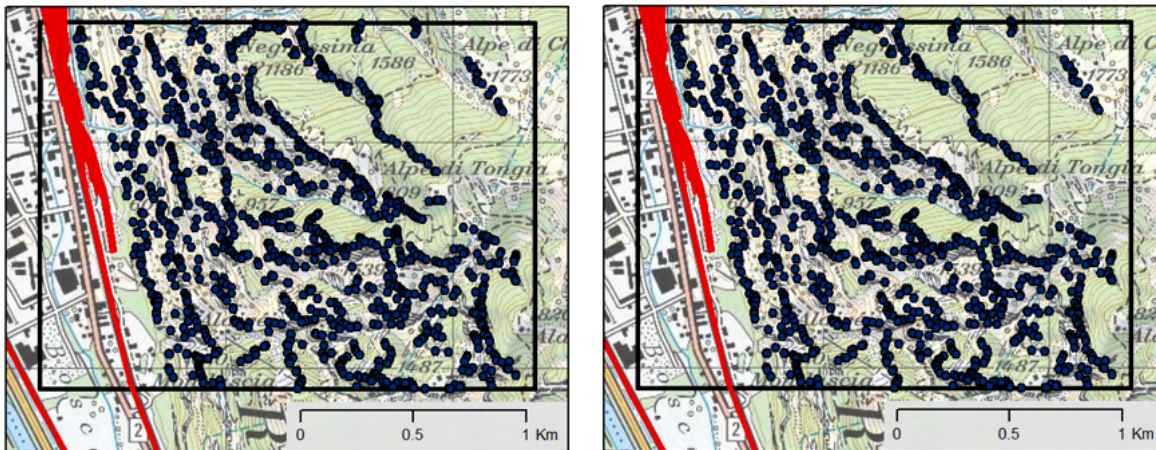


(c) Sommer

(d) Herbst

Abbildung A.24: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.

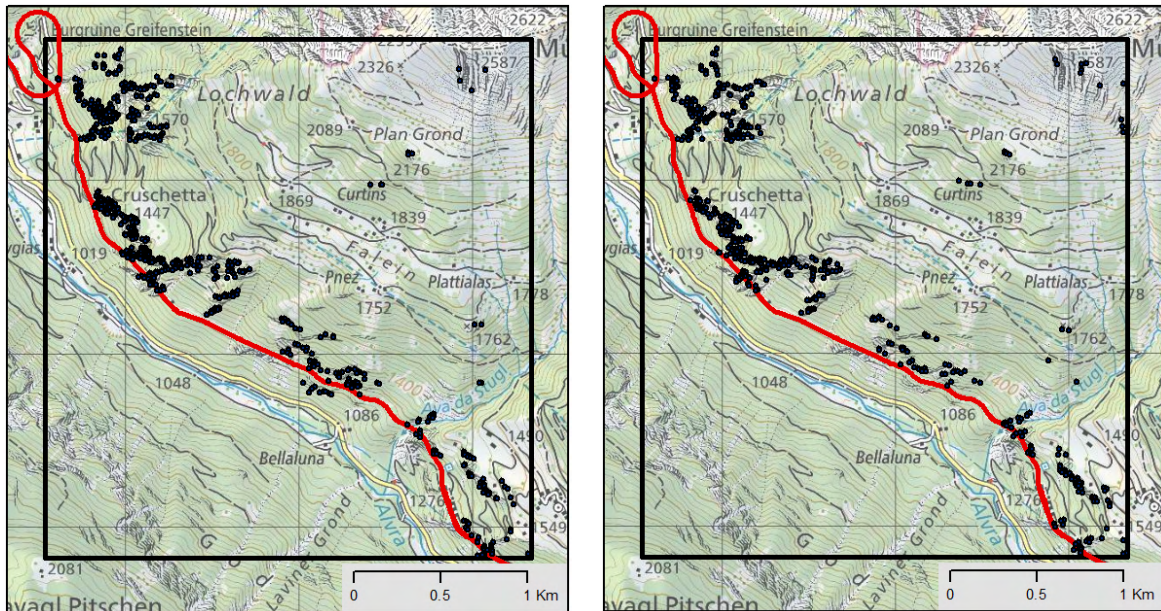
Perimeter Biasca



(a) Winter

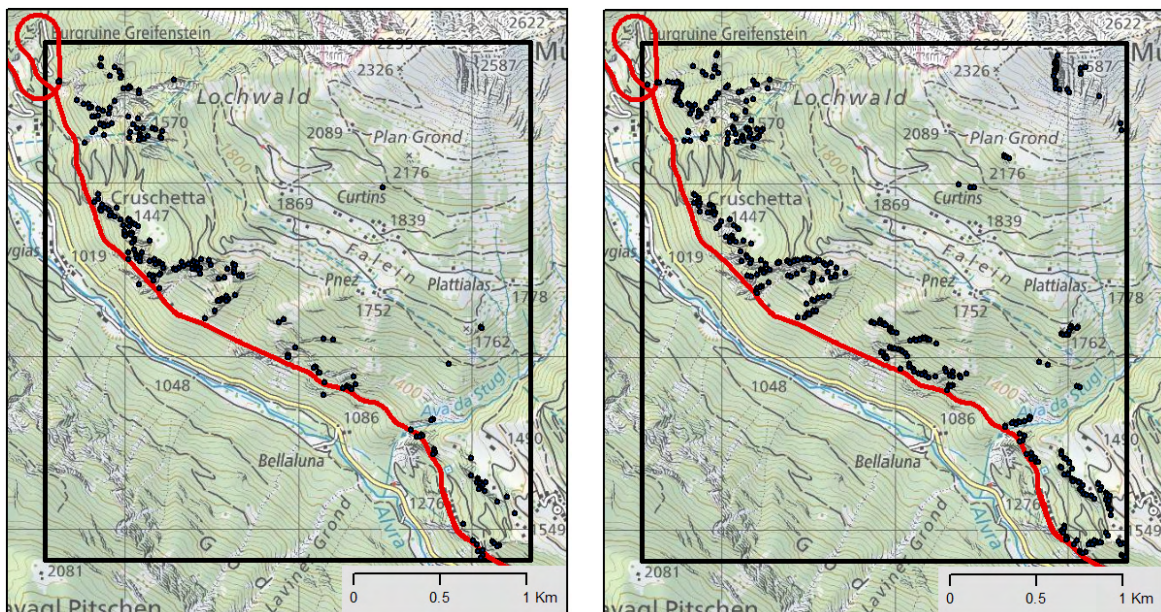
(b) Frühling, Sommer und Herbst

Abbildung A.25: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.



(a) Winter

(b) Frühling



(c) Sommer

(d) Herbst

Abbildung A.26: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.

Perimeter Gorges de Court

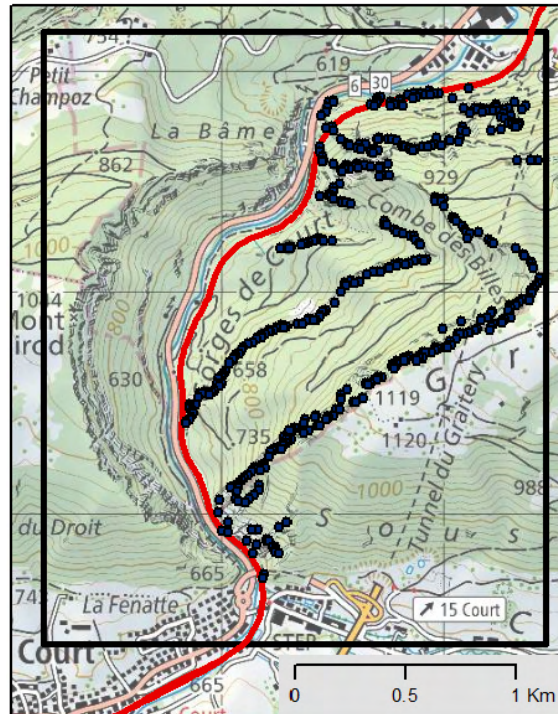
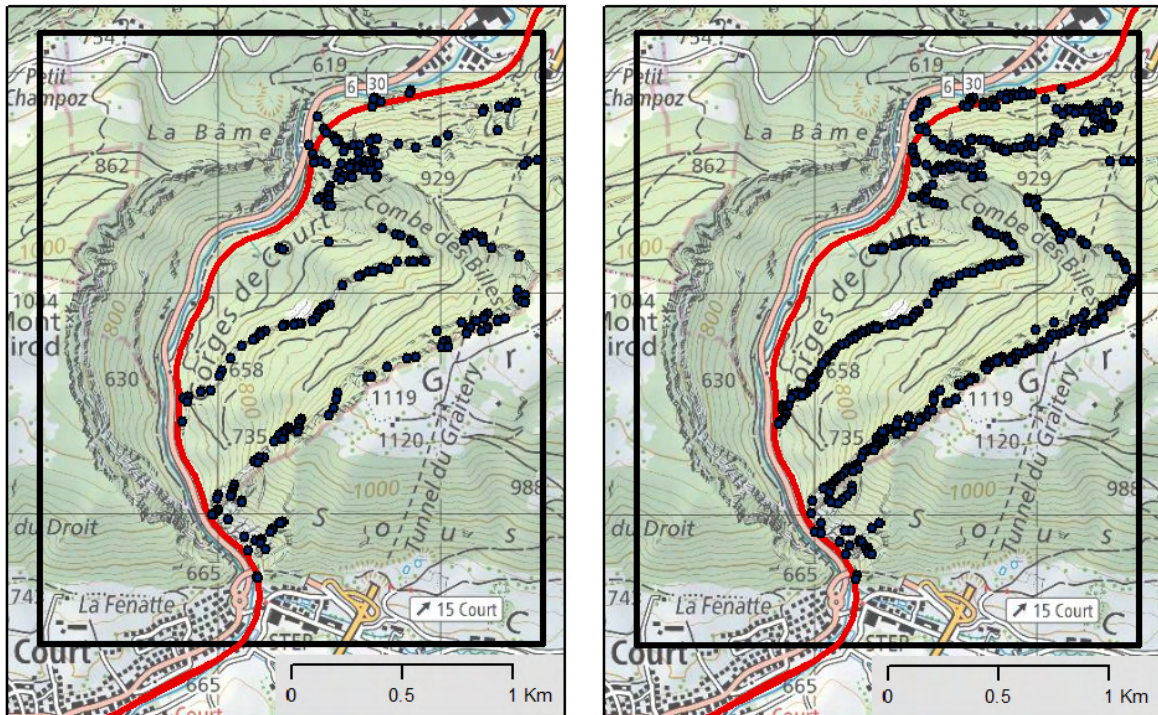


Abbildung A.27: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.



(a) Winter und Frühling

(b) Sommer



(c) Herbst

Abbildung A.28: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.

Perimeter Riginordlehne

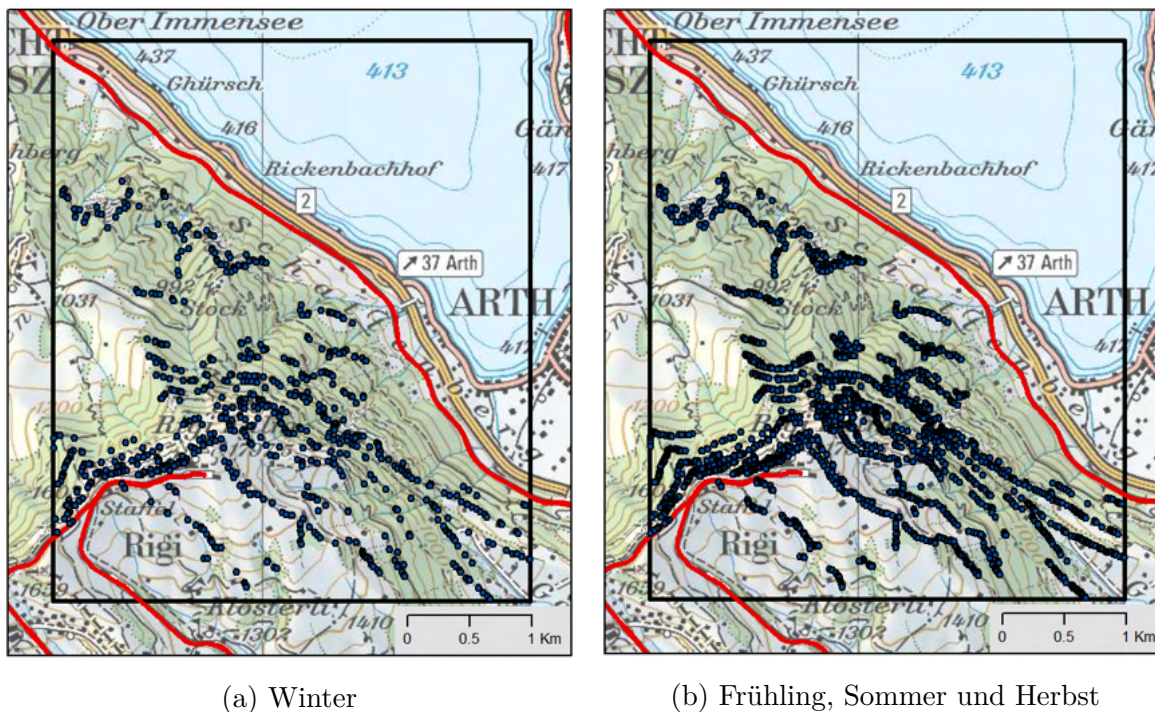
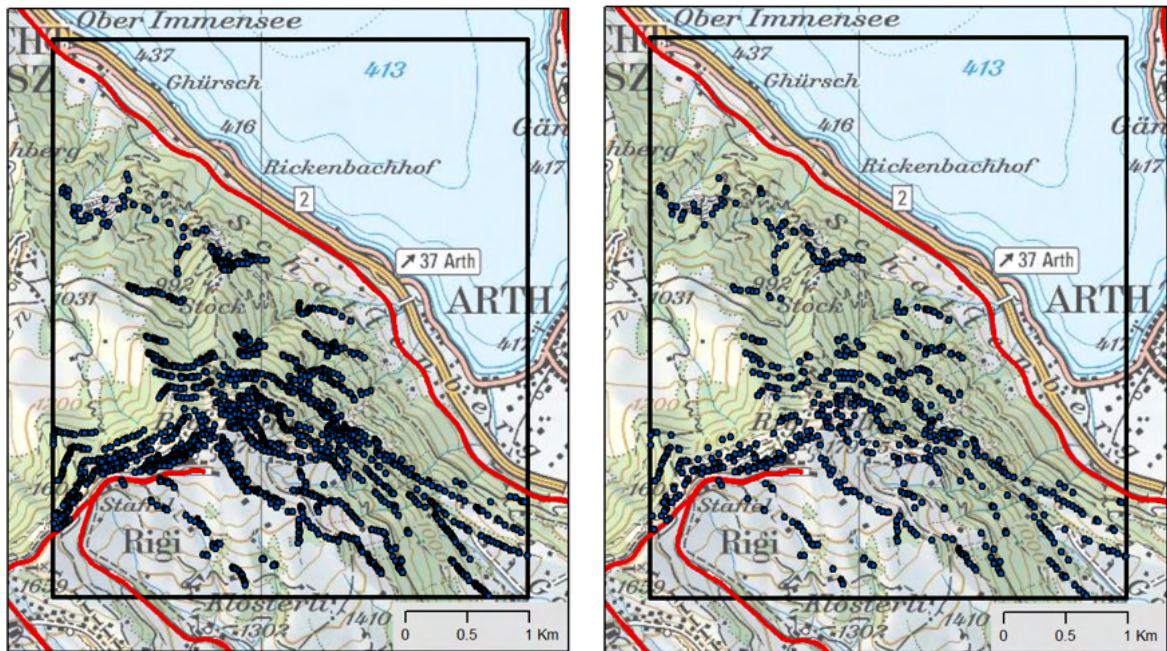
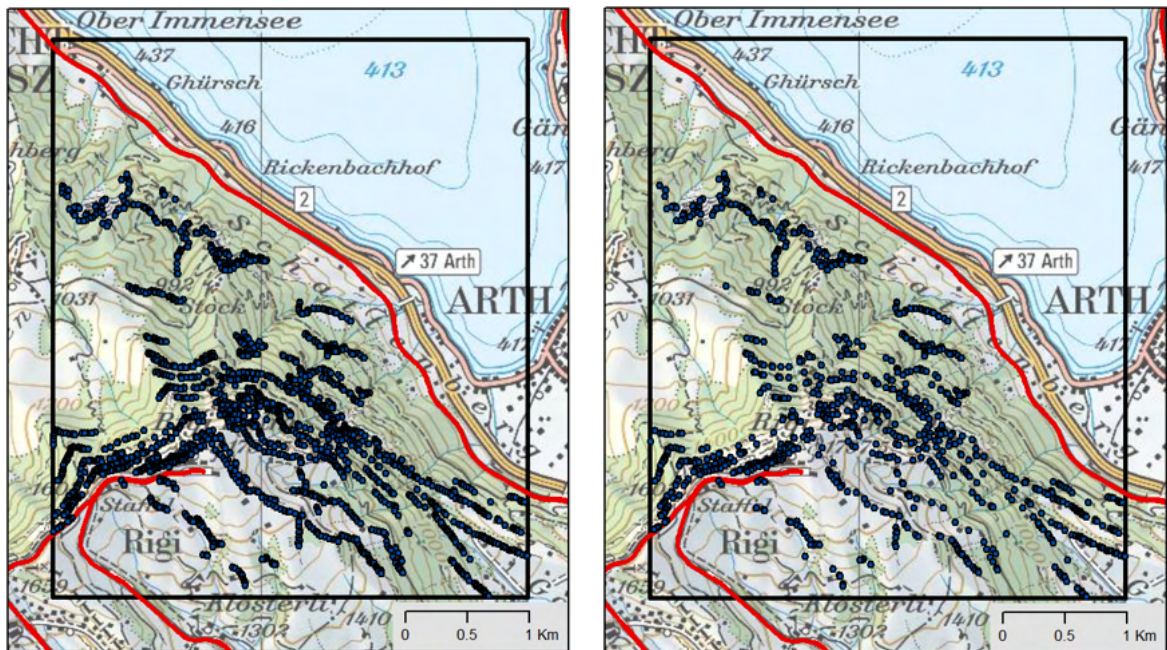


Abbildung A.29: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP2.6**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.



(a) Winter

(b) Frühling



(c) Sommer

(d) Herbst

Abbildung A.30: Zukünftige Anrisspunkte für die Simulationen der Gefahrensituation 2085 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) unter dem **Emissionsszenario RCP8.5**. Die Eisenbahnlinie ist in rot hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Topomaps, 2021.

A.11 Frequenzänderung Variante 2

Die Variante 2 beschreibt die Frequenzänderung von Steinschlägen, falls eine relevante Veränderung der Anzahl Frostwechseltage erst ab einer Veränderung von 20 Tagen angenommen wird. Nachfolgend wird für jedes Untersuchungsgebiet die resultierende Änderung der Häufigkeit von Ereignissen unter Verwendung des höheren Grenzwerts beschrieben. Die Tabelle A.4 zeigt die prozentuale Veränderung der Anzahl Anrisspunkte bis ins Jahr 2085 für die Variante 1 sowie die Variante 2.

Für das Emissionsszenario RCP2.6 resultiert in allen Untersuchungsgebieten die selbe Frequenz wie unter der Variante 1. Die folgenden Abbildungen und Tabellen zeigen deshalb nur die Resultate des Emissionsszenarios RCP8.5. Für das Emissionsszenario RCP2.6 wird auf Anhang A.9 verwiesen.

Tabelle A.4: Prozentuale Veränderung der Anzahl Anrisspunkte für die Variante 1 und Variante 2 unter dem Emissionsszenario RCP8.5.

		Albula	Biasca	Gorges Court	de Riginordlehne
Winter	Var1	+50%	-30%	-50%	+33%
	Var2	+50%	+17%	+50%	0%
Frühling	Var1	+29%	+3%	-50%	+52%
	Var2	+50%	+50%	+50%	0%
Sommer	Var1	-50%	0%	0%	+39%
	Var2	-50%	0%	0%	0%
Herbst	Var1	-10%	-17%	+7%	+32%
	Var2	0%	+50%	+50%	0%

Perimeter Albula

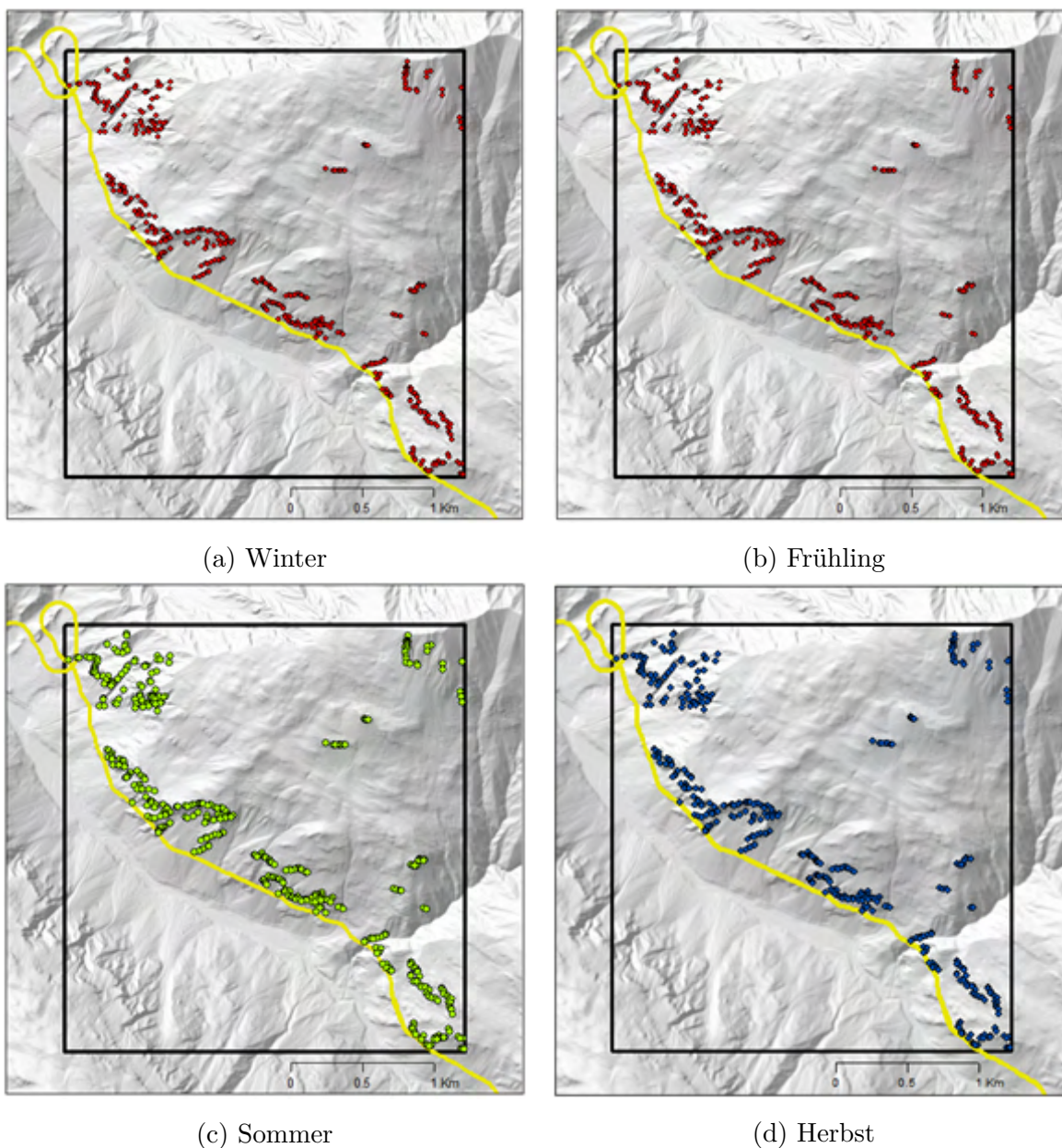


Abbildung A.31: Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Albula (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Biasca

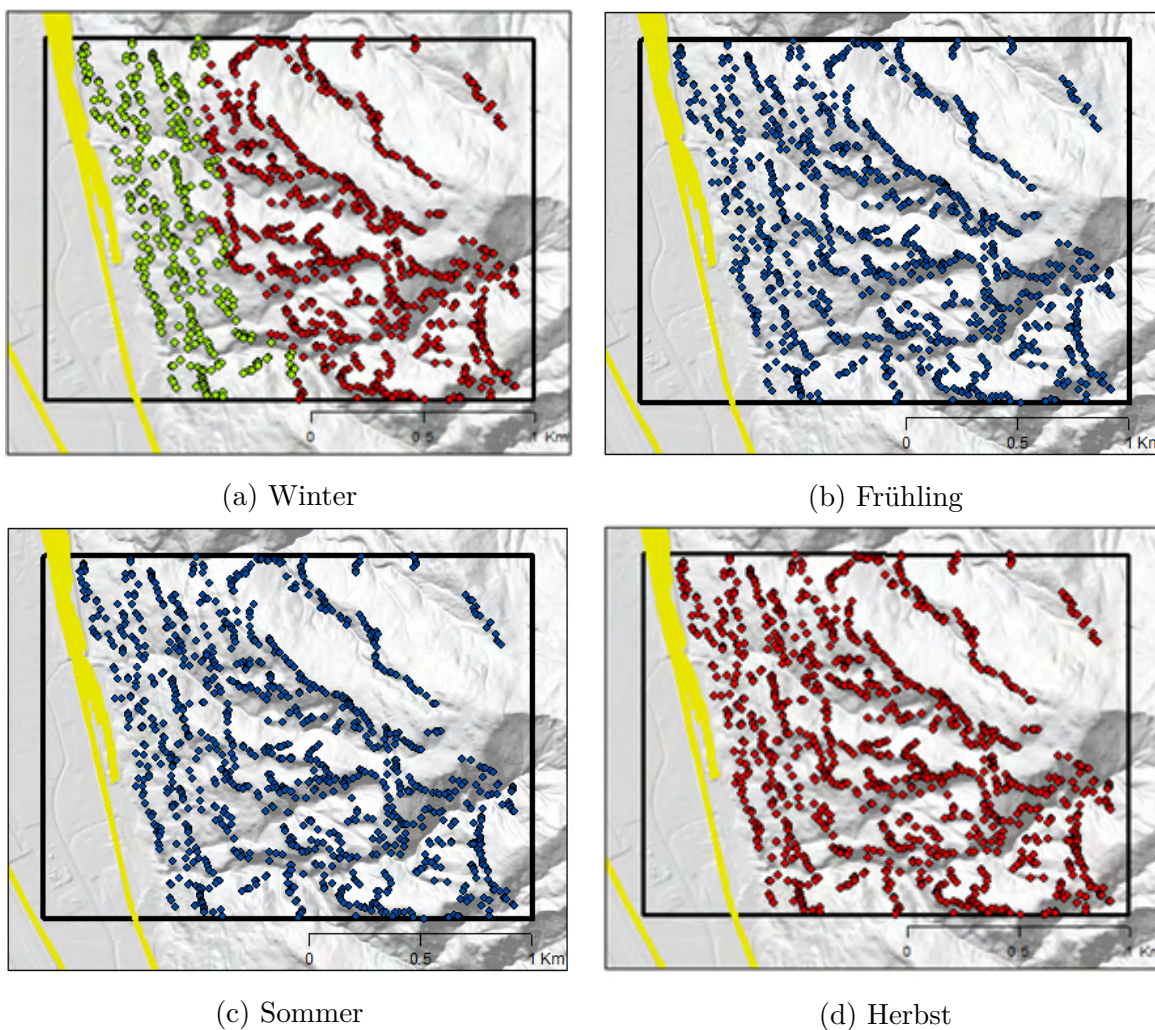


Abbildung A.32: Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Biasca (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Gorges de Court

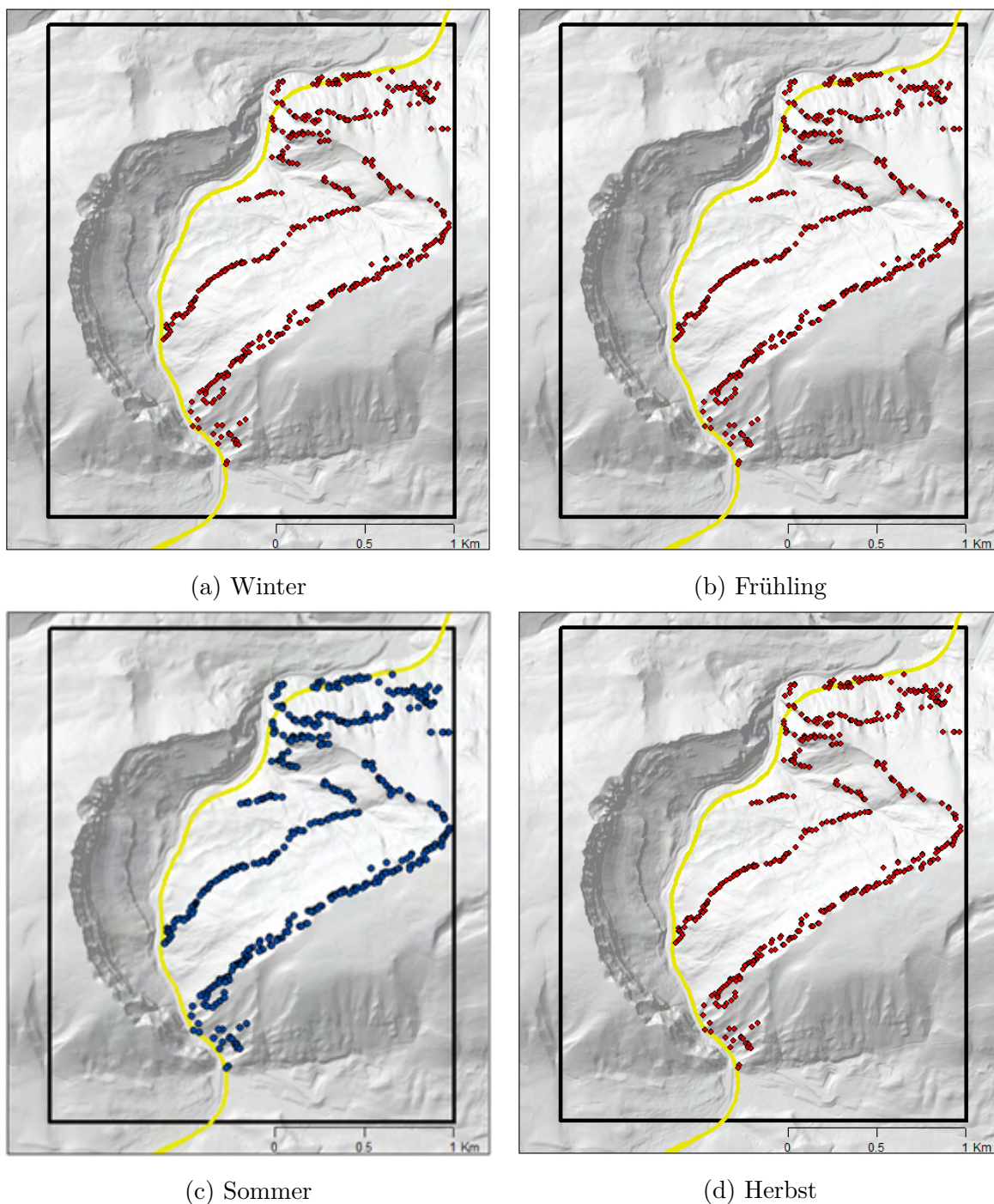


Abbildung A.33: Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Gorges de Court (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** im (a) Winter, (b) Frühling, (c) Sommer und (d) Winter. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Perimeter Riginordlehne

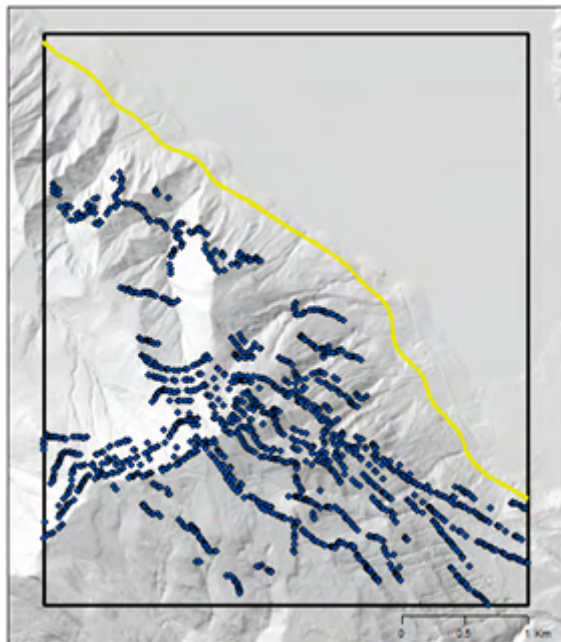


Abbildung A.34: Änderung der Frequenz bis 2085 (Variante 2) pro Anrisspunkt im Untersuchungsgebiet Riginordlehne (schwarzer Kasten) für das **Emissionsszenario RCP8.5** während des ganzen Jahres. Grün bedeutet eine Abnahme, rot eine Zunahme und blau eine gleichbleibende Frequenz. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

A.12 Einfluss der Anzahl Startorientierungen

Tabelle A.5: Median des 95%-Quantils der kinetischen Energie innerhalb des betroffenen Gleisbereichs für die aktuelle Gefahrensituation mit Blockform Real Equant 1.2. Es werden die Resultate der Simulationen mit 10 Startorientierungen mit jenen mit 100 Startorientierungen verglichen.

		Albula	Biasca	Gorges de Court	Riginord- lehne
0.2 m³	10 Orientierungen	58 kJ	19 kJ	32 kJ	21 kJ
	100 Orientierungen	86 kJ	22 kJ	47 kJ	21 kJ
1 m³	10 Orientierungen	511 kJ	143 kJ	308 kJ	157 kJ
	100 Orientierungen	758 kJ	244 kJ	553 kJ	202 kJ
5 m³	10 Orientierungen	3458 kJ	959 kJ	2352 kJ	959 kJ
	100 Orientierungen	4896 kJ	2054 kJ	3486 kJ	1153 kJ

Anhang B

Evaluation der Bestandesdichte

B.1 aktuelle Bestandesdichte

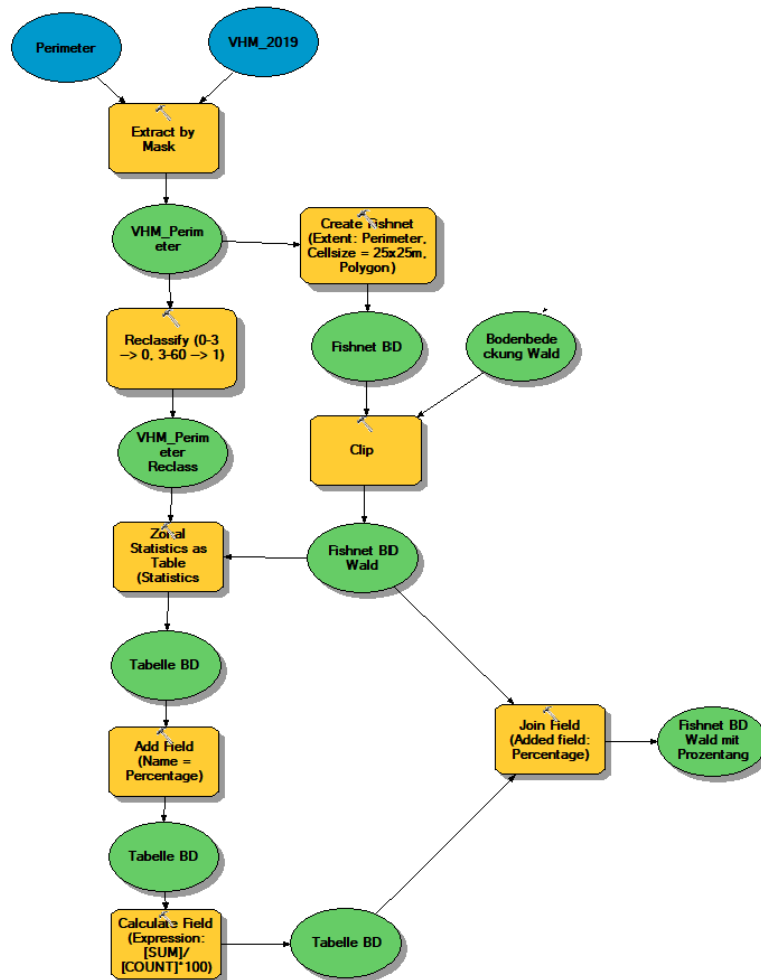
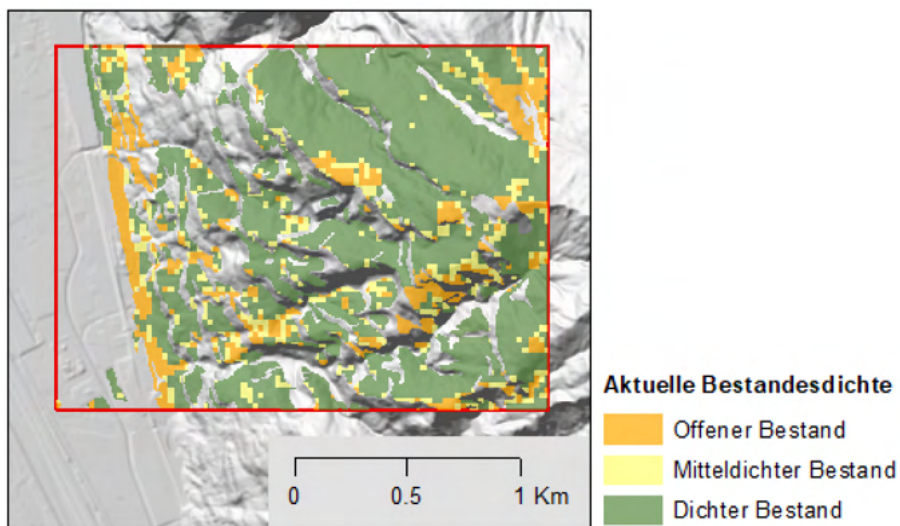
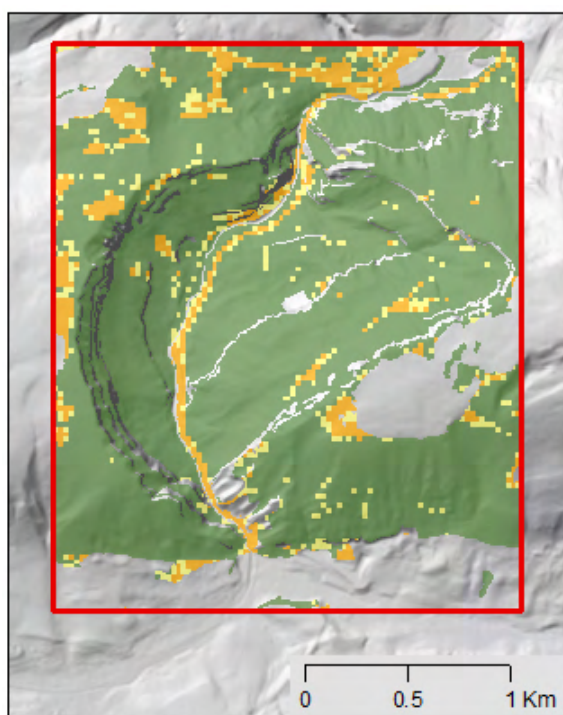


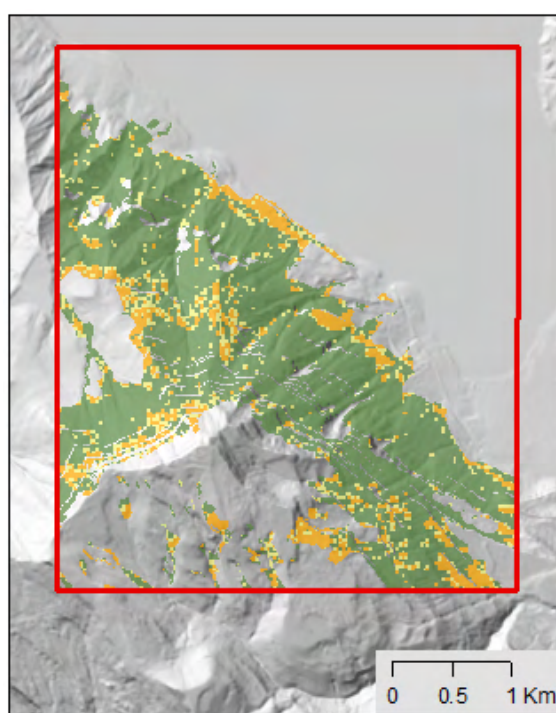
Abbildung B.1: Modelbuilder für die Berechnung der aktuellen Bestandesdichten in ArcMap.



(a) Biasca



(b) Gorges de Court



(c) Riginordlehne

Abbildung B.2: Aktuelle Bestandesdichte für die Untersuchungsgebiete (a) Biasca, (b) Gorges de Court und (c) Riginordlehne. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

B.2 zukünftige Bestandesdichte

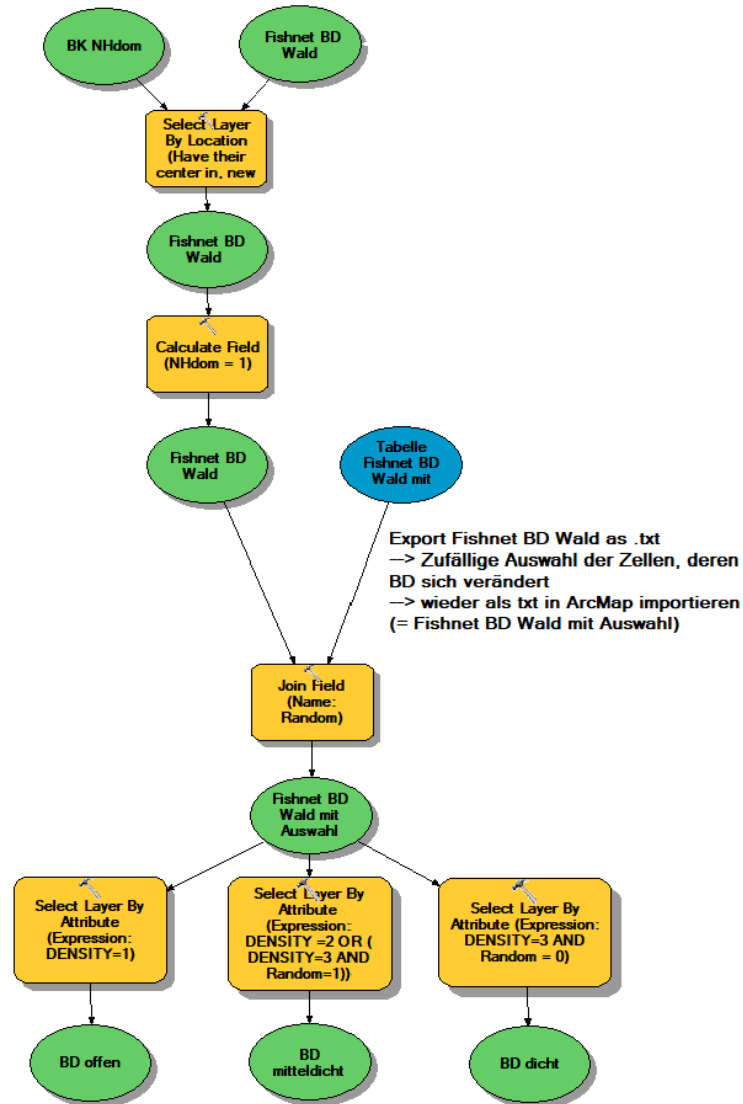
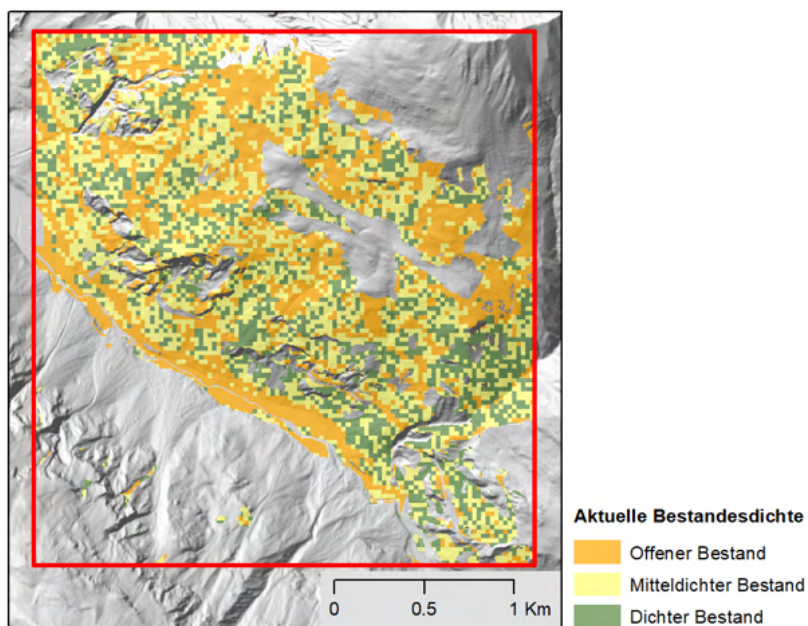
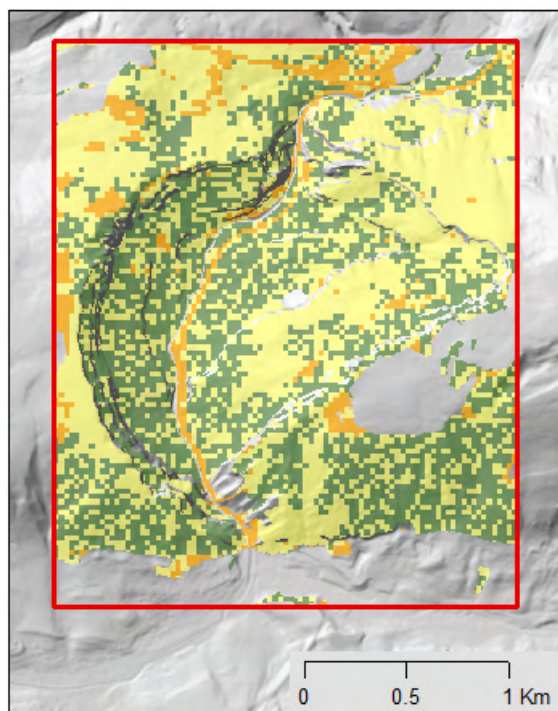


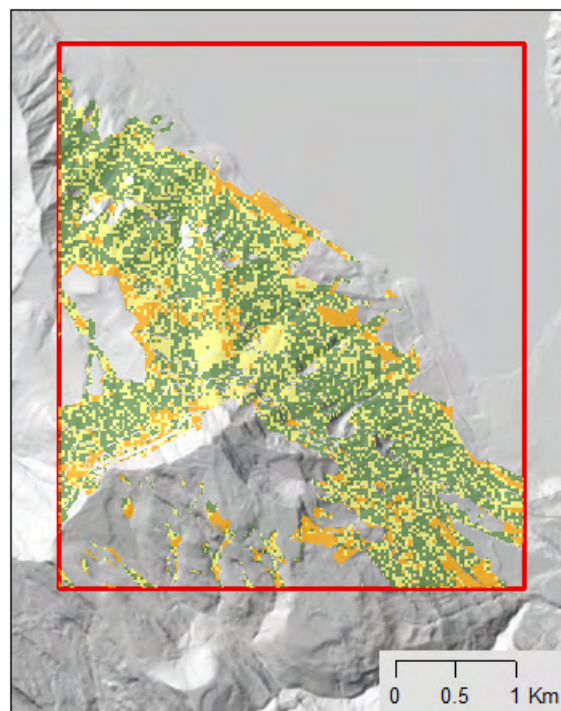
Abbildung B.3: Modelbuilder für die Berechnung der zukünftigen Bestandesdichten in ArcMap. Die Zufällige Auswahl der Zellen erfolgt in RStudio.



(a) Albula



(b) Gorges de Court



(c) Riginordlehne

Abbildung B.4: Zukünftige Bestandesdichte für die Untersuchungsgebiete (a) Albula, (b) Gorges de Court und (c) Riginordlehne. Hintergrundkarte: © swisstopo, swissALTI3D, 2019.

Anhang C

Auswertung der Simulationen

C.1 Modelbuilder Anzahl Treffer und Anprälle

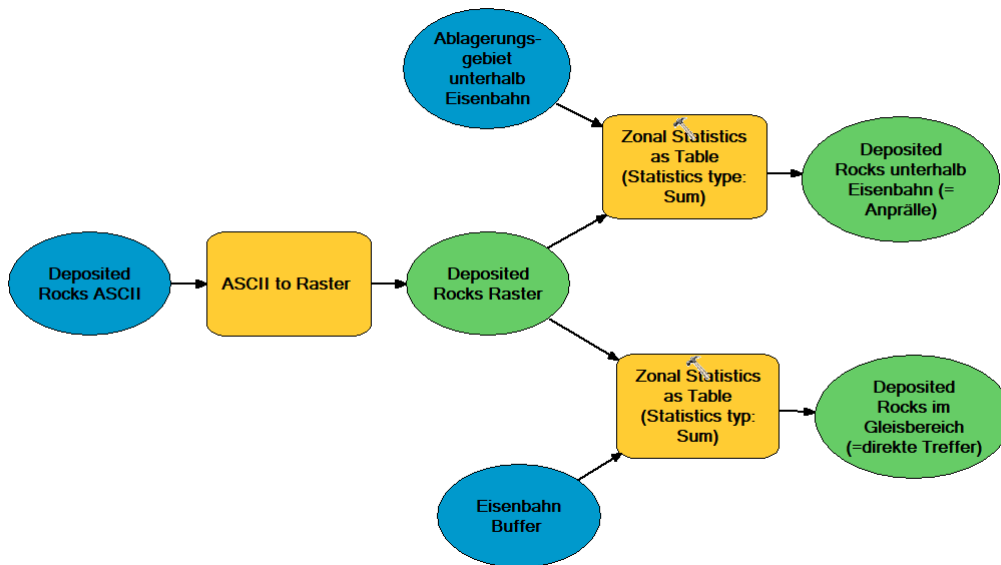


Abbildung C.1: Modelbuilder für die Berechnung der Anzahl Treffer und Anprälle in ArcMap. Dies wird für jede Simulation durchgeführt.

C.2 Modelbuilder Kinetische Energie

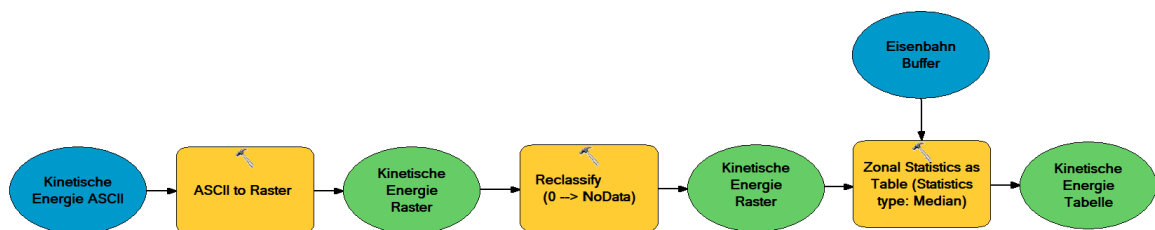


Abbildung C.2: Modelbuilder für die Berechnung des Medians des 95%-Quantils der kinetischen Energie in ArcMap. Dies wird für jede Simulation durchgeführt.

C.4 Sprunghöhen

Tabelle C.1: Median der Sprunghöhe der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für ein 300-jährliches Ereignis mit Blockform *Real Equant 1.2*.

Albula	Biasca	Gorges Court	de Riginordlehne
5 m	2 m	3 m	1 m

Anhang D

Detaillierte Resultate der Simulationen

D.1 Veränderung der kinetischen Energie und Anzahl Treffer

Perimeter Albula

Tabelle D.1: Prozentuale Veränderung der Anzahl **direkter Treffer und Anprälle** gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 für das Untersuchungsgebiet Albulas

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)
Winter	RCP2.6	+70%	-	+69%	+54%	-
	RCP8.5	+70%	+70%	+69%	+54%	+56%
Frühling	RCP2.6	+70%	-	+69%	+54%	-
	RCP8.5	+38%	+36% (+43%)	+39%	+42% (+51%)	+31%
Sommer	RCP2.6	-41%	-	-42%	-	-45%
	RCP8.5	-41%	-42% (-41%)	-42%	-40% (-37%)	-45%
Herbst	RCP2.6	-41%	-	-42%	-	-45%
	RCP8.5	-12%	-14% (-9%)	-11%	-10% (-1%)	-11%

Tabelle D.2: Mediale Veränderung des 95%-Quantils der **kinetischen Energie** der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Albul.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)
Winter						
RCP2.6	+1%	-	-6%	-	-5%	-
RCP8.5	+1%	+2%	-6%	-6%	-5%	-5%
Frühling						
RCP2.6	+1%	-	-6%	-	-5%	-
RCP8.5	-3%	-4% (+40%)	-4%	-5% (+38%)	-4%	-5% (+34%)
Sommer						
RCP2.6	-15%	-	-15%	-	-11%	-
RCP8.5	-15%	-14% (+19%)	-15%	-16% (+31%)	-11%	-11% (+29%)
Herbst						
RCP2.6	-15%	-	-15%	-	-11%	-
RCP8.5	0%	0% (+49%)	0%	0% (+40%)	0%	+1% (+44%)

Perimeter Biasca

Tabelle D.3: Prozentuale Veränderung der Anzahl **direkter Treffer und Anprälle** gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Biasca

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte
Winter	RCP2.6	-1%	-	+4%	-1%	-
	RCP8.5	-52%	-51%	-49%	-50%	-48%
Frühling	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	+121%	+128%	+104%	+100%	+76%
Sommer	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	0%	-4%	0%	-5%	0%
Herbst	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	+108%	+94%	+88%	+84%	+72%

Tabelle D.4: Mediale Veränderung des 95%-Quantils der **kinetischen Energie** der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Biasca.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte
Winter	RCP2.6	-9%	-	9%	-4%	-
	RCP8.5	-9%	-9%	-9%	-11%	-21%
Frühling	RCP2.6	0%	-	0%	0%	-
	RCP8.5	-9%	-5%	+8%	+6%	-5%
Sommer	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	0%	-5%	0%	+2%	0%
Herbst	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	0%	-14%	+6%	+12%	-1%

Perimeter Gorges de Court

Tabelle D.5: Prozentuale Veränderung der Anzahl **direkter Treffer und Anprälle** gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Gorges de Court.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte
Winter	-46%	-40%	-46%	-43%	-45%	-45%
Frühling	-46%	-40%	-46%	-43%	-45%	-45%
Sommer	0%	8%	0%	5%	0%	+1%
Herbst	+64%	+75% (+80%)	+61%	+66% (+81%)	+45%	+45% (+56%)

Tabelle D.6: Veränderung der medialen **kinetischen Energie** der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Gorge de Court.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)
Winter	RCP2.6	-%	-6%	-	-5%	-
	RCP8.5	-15%	-6%	-17%	-7%	-24%
Frühling	RCP2.6	+1%	-6%	-	-5%	-
	RCP8.5	-15%	-6%	-17%	-7%	-24%
Sommer	RCP2.6	-15%	-	-15%	-	-11%
	RCP8.5	0%	+2%	0%	-1%	0%
Herbst	RCP2.6	-15%	-	-15%	-	-11%
	RCP8.5	-6%	-2% (+53%)	-16%	-6% (+26%)	-15%

Perimeter Riginordlehne

Tabelle D.7: Prozentuale Veränderung der Anzahl **direkter Treffer und Anprälle** gegenüber der aktuellen Situation für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Szenarien mit aktueller und veränderter Bestandesdichte unter dem Emissionsszenario RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Riginorlehe.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte
Winter	RCP2.6	-68%	-	-61%	-	-53%
	RCP8.5	-58%	-14%	-68%	0%	7%
Frühling	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	-68%	-55%	-61%	-56%	-53%
Sommer	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	0%	+39%	0%	+30%	+27%
Herbst	RCP2.6	0%	-	0%	-	-
	RCP8.5	+18%	+40%	+2%	+21%	-16%

Tabelle D.8: Veränderung der medialen **kinetischen Energie** der Blöcke innerhalb des Gleisbereichs für das 30-jährliche, 100-jährliche und 300-jährliche Ereignis sowie die Emissionsszenarien RCP2.6 und RCP8.5 im Untersuchungsgebiet Riginordlehne.

	30-jährl. Ereignis		100-jährl. Ereignis		300-jährl. Ereignis	
	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)	Aktuelle Bestandesdichte	Veränderte Bestandesdichte (+Bodenparameter)
Winter	RCP2.6	-%	-6%	-	-5%	-
	RCP8.5	-15%	-17%	-7%	-24%	-19%
Frühling	RCP2.6	+1%	-6%	-	-5%	-
	RCP8.5	-15%	-17%	-7%	-24%	-19%
Sommer	RCP2.6	-15%	-15%	-	-11%	-
	RCP8.5	0%	0%	-1%	0%	-7%
Herbst	RCP2.6	-15%	-15%	-	-11%	-
	RCP8.5	-6%	-2% (+53%)	-6% (+26%)	-15%	-21% (+5%)

D.2 Ergänzende Simulationsergebnisse

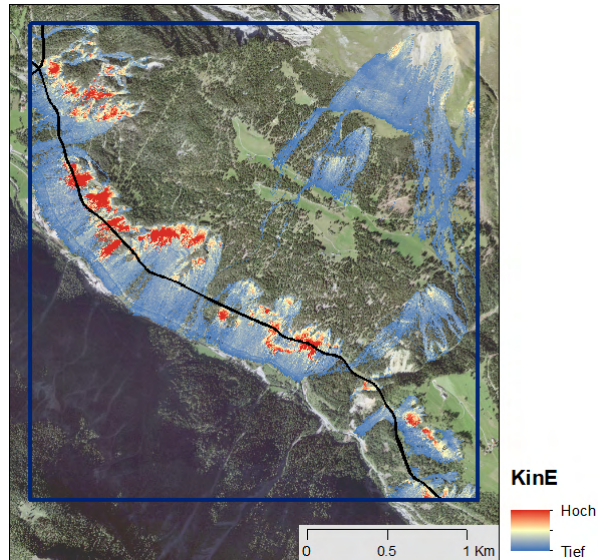


Abbildung D.1: Auslauflängen und kinetische Energien für das aktuelle 30-jährliche Ereignis mit Blockform *Real Equant 1.2* im Untersuchungsgebiet Albula (blauer Kasten). Die Eisenbahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, Swissimage, 2021.

D.3 Gefahrenhinweiskarten für das 30-jährliche Ereignis

Perimeter Albula

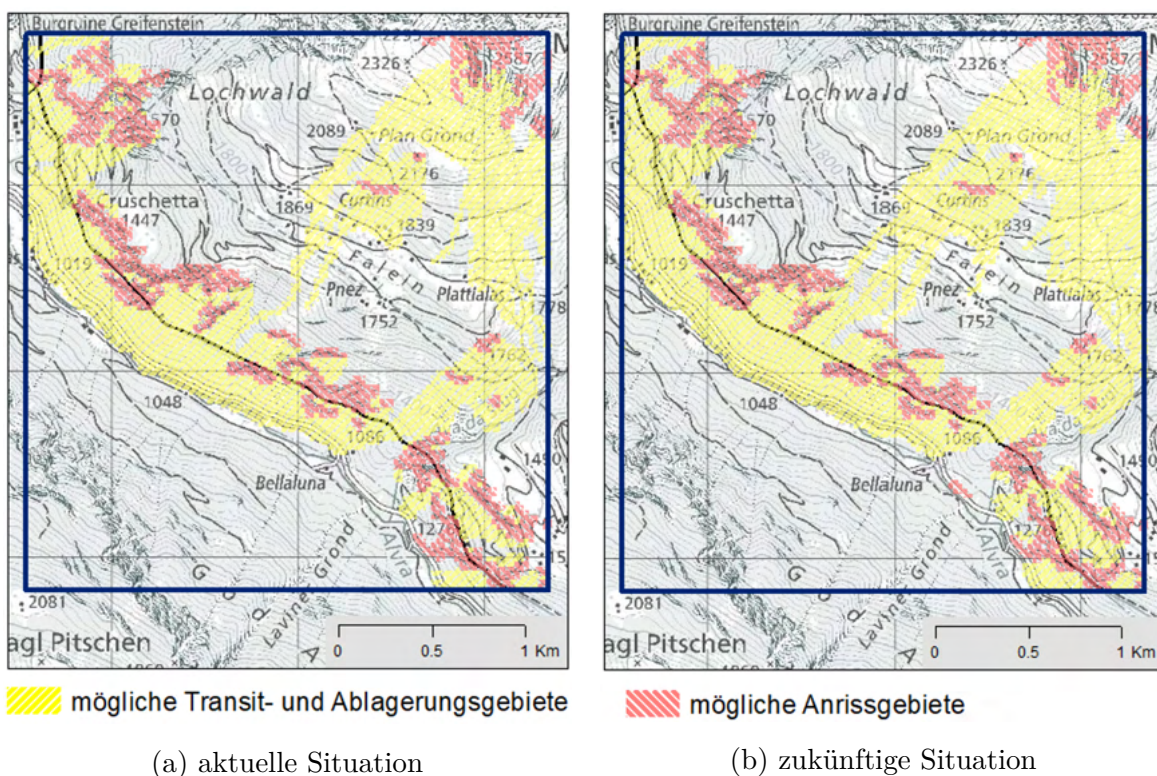


Abbildung D.2: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Albula (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.

Perimeter Biasca

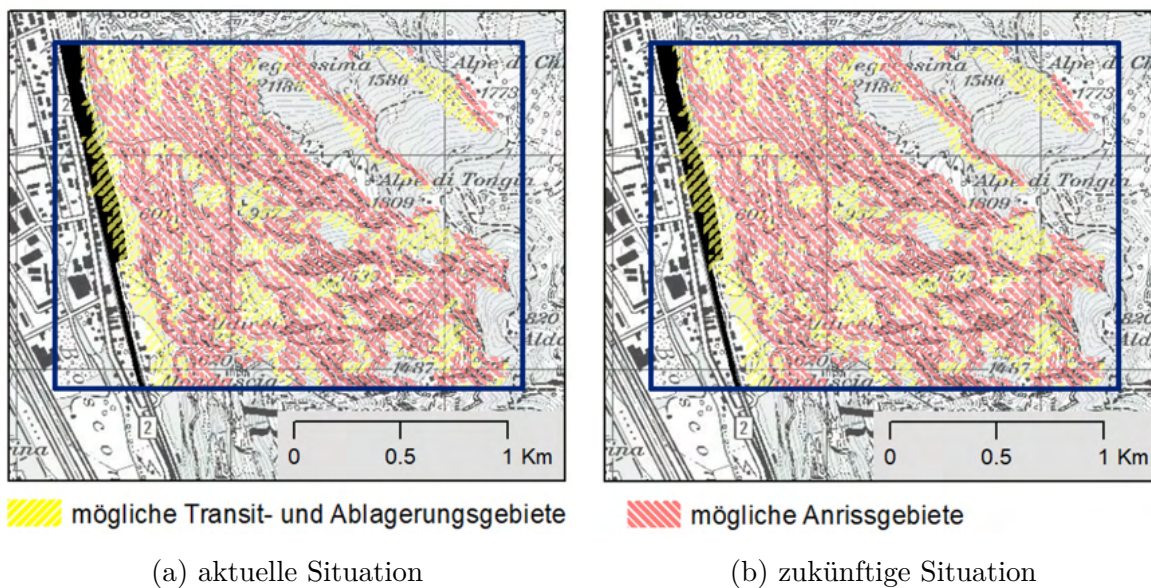
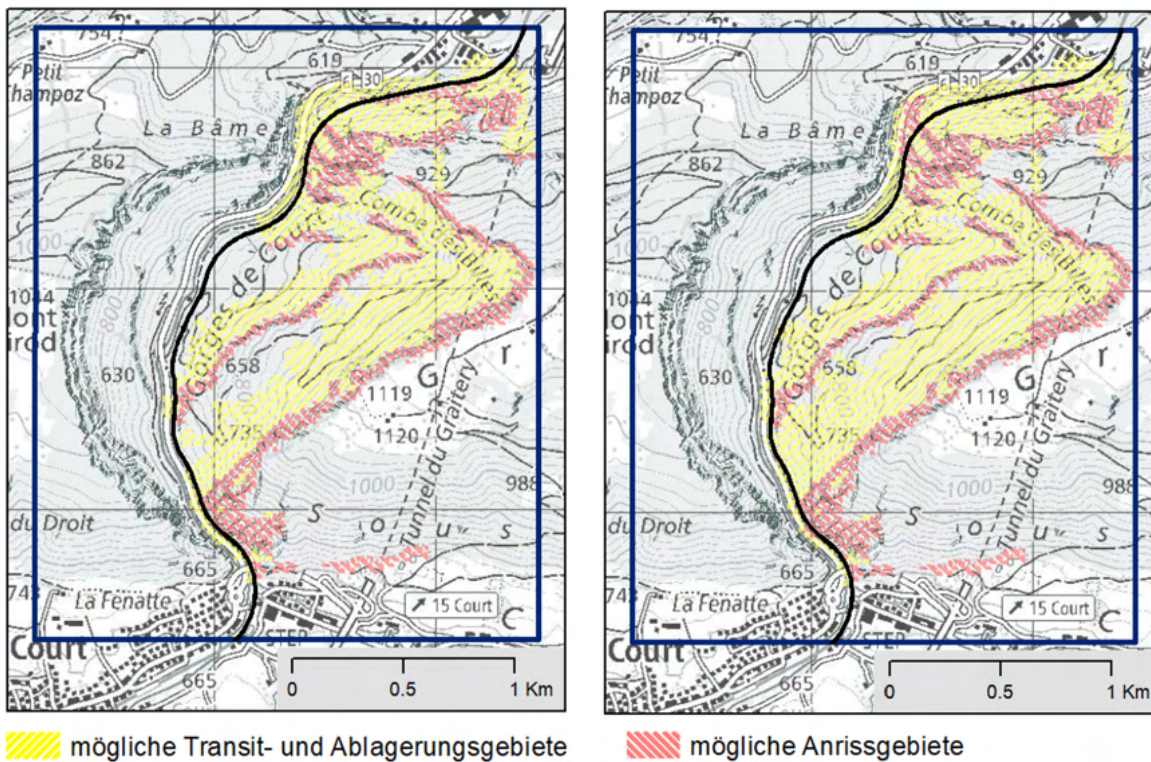


Abbildung D.3: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Biasca (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in schwarz hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.

Perimeter Gorges de Court

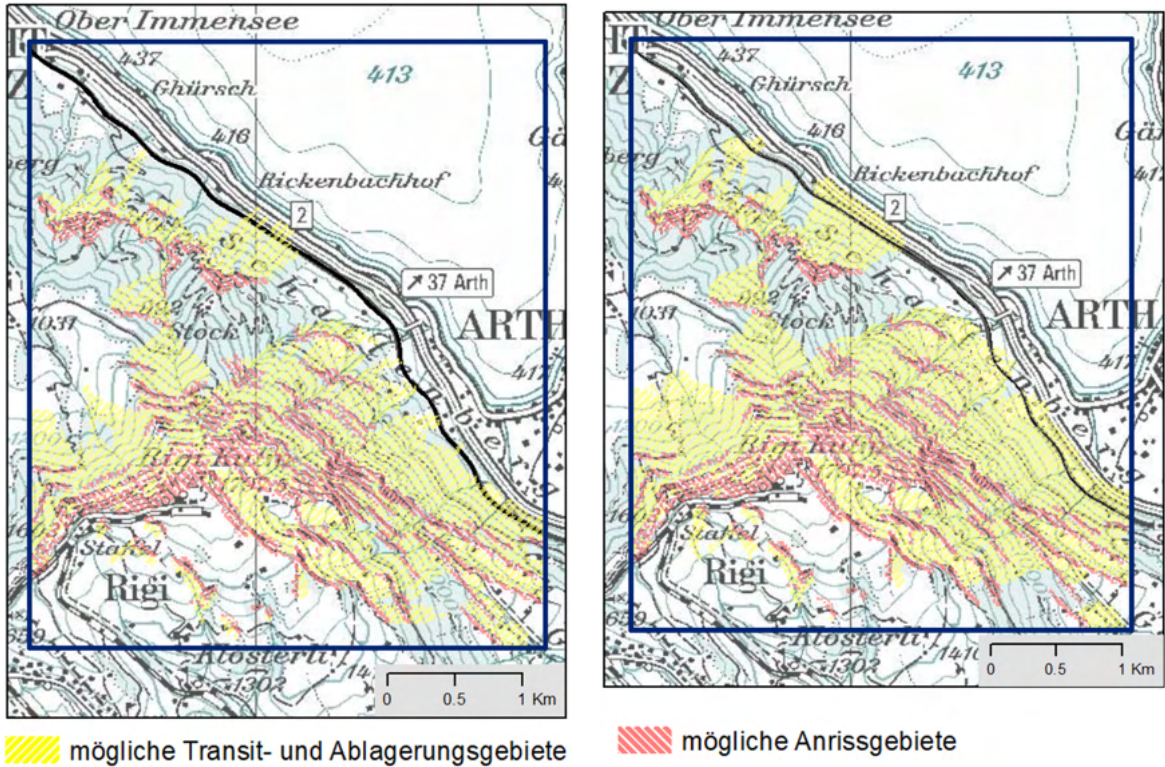


(a) aktuelle Situation

(b) zukünftige Situation

Abbildung D.4: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Gorges de Court (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.

Perimeter Riginordlehne



(a) aktuelle Situation

(b) zukünftige Situation

Abbildung D.5: Gefahrenhinweiskarten des Perimeters Riginordlehne (blauer Kasten) für ein 30-jährliches Ereignis für (a) die aktuelle Situation und (b) die Situation im Jahr 2085. Die Bahnlinie ist in gelb hervorgehoben. Kartengrundlage: © swisstopo, topomaps, 2020.



Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Änderung der Disposition von Steinschlägen infolge der Klimaänderung und die Auswirkungen auf das Gefahrenpotential

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Zaugg

Vorname(n):

Alice

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „[Zitier-Knigge](#)“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Plagiate überprüft werden kann.

Ort, Datum

14. 09. 2021

Unterschrift(en)

Alice Zaugg

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.