

**Autor/in\*:**  
Jean Patrick Franzelin

# Analyse der Lawinengefahr in Südtirol: Eine Bewertung des bestehenden Lawinenkatasters durch Gefahrenkartierung und Simulationen

## Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades  
*Bachelor of Science*  
in der Studienrichtung *Geographie*

eingereicht an der

**Universität Graz**  
Umwelt-, Regional- und Bildungswissenschaftliche Fakultät  
Institut für Geographie und Raumforschung

**Betreuer/in\*:**  
(Mergili, Martin, Univ.-Prof. Dr.rer.nat.)

2024

# Eidesstatliche Erklärung

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen inländischen oder ausländischen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht. Die vorliegende Fassung entspricht der eingereichten elektronischen Version

Datum: 18.07.2024      Unterschrift: Franklin Jean Patruel

# Abstract

In this bachelor's thesis, the avalanche hazard in South Tyrol was analyzed, focusing on the evaluation of the existing avalanche cadastre through hazard mapping and simulations. The theoretical foundations addressed the various types of avalanches, their causes, and the relevant parameters for determining potential avalanche release areas (PRAs). Particularly important were the slope angle, terrain roughness, wind protection, and forest cover. Based on the collected data, potential avalanche release areas (PRAs) were identified. This was done by applying thresholds for various geomorphological parameters (slope angle, roughness, wind shelter, forest cover). For example, areas with a slope angle between  $28^\circ$  and  $60^\circ$  were classified as potentially dangerous. The simulation results were compared with historical avalanche events to verify the accuracy and reliability of the hazard mapping. Discrepancies were analyzed and the methodology was adjusted accordingly to improve predictive accuracy. The results showed that most (90 out of 104) historical avalanche events were well covered by the PRAs. However, discrepancies were also found, particularly in areas with high slope or those that historically did not have forest cover or a dense forest stand, or specific topographical features that were not fully captured by the PRAs. The results indicate that only for avalanche events before the winter of 2006/07 were coverages of less than 10% identified. This could indicate that recording precision has improved over time. However, it was also found that a total of 93 events were documented before 2006/07, whereas only 11 events were recorded after 2008, making comparison difficult. The analysis of avalanche hazards in South Tyrol has shown that the existing avalanche cadastre provides a valuable basis for hazard mapping. By applying the described methodology, potential areas for improvement could be identified and specific recommendations for optimizing hazard maps were derived. In summary, it can be said that the combination of historical data analysis and modern simulation technology represents a significant advance in avalanche risk management. For future work, it would be advisable to further refine the methodology and incorporate additional parameters, such as climatic changes, into the analyses.

In dieser Bachelorarbeit wurde die Lawinengefahr in Südtirol analysiert, wobei der Fokus auf der Bewertung des bestehenden Lawinenkatasters durch Gefahrenkartierung und Simulationen lag. Die theoretischen Grundlagen befassten sich mit den verschiedenen Arten von Lawinen, deren Ursachen und den relevanten Parametern zur Bestimmung potenzieller Lawinenabgangsgebiete (PRAs). Besonders wichtig waren dabei die Hangneigung, die Rauheit des Geländes, der Windschutz und die Waldbedeckung. Auf Basis der gesammelten Daten wurden potenzielle Lawinenabgangsgebiete (PRAs) identifiziert. Dies erfolgte durch die Anwendung von Schwellenwerten für die verschiedenen geomorphologischen Parameter (Hangneigung, Rauheit, Windshelter, Waldbedeckung). Es wurden zum Beispiel Gebiete mit einer Hangneigung zwischen  $28^\circ$  und  $60^\circ$  als potenziell gefährlich eingestuft. Die Ergebnisse der Simulationen wurden mit den historischen Lawinenereignissen verglichen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Gefahrenkartierung zu überprüfen. Diskrepanzen wurden analysiert und die Methodik entsprechend angepasst, um die Vorhersagegenauigkeit zu verbessern. Die Ergebnisse zeigten, dass die meisten (90 von 104) historischen Lawinenereignisse in den PRAs gut abgedeckt sind. Es

wurden jedoch auch Diskrepanzen festgestellt, insbesondere in Bereichen mit hoher Steigung oder jene, die historisch nicht Waldbedeckt waren, bzw keinen dichten Waldbestand hatten oder spezifischen topographischen Gegebenheiten, die nicht vollständig durch die PRAs erfasst wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass nur bei Lawinenereignissen vor dem Winter 2006/07 Abdeckungen von weniger als 10% festgestellt wurden. Dies könnte darauf hinweisen, dass sich die Aufnahmepräzision im Laufe der Zeit verbessert hat. Jedoch wurde auch festgestellt, dass von den Lawinen vor 2006/07 insgesamt 93 Ereignisse dokumentiert wurden, während es nach 2008 nur 11 Ereignisse sind, was den Vergleich erschwert. Die Analyse der Lawinengefahr in Südtirol hat gezeigt, dass der bestehende Lawinenkataster eine wertvolle Grundlage für die Gefahrenkartierung darstellt. Durch die Anwendung der beschriebenen Methodik konnten potenzielle Verbesserungsbereiche identifiziert und konkrete Empfehlungen zur Optimierung der Gefahrenkarten abgeleitet werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Kombination aus historischer Datenanalyse und moderner Simulationstechnik einen bedeutenden Fortschritt im Risikomanagement von Lawinen darstellt. Für zukünftige Arbeiten wäre es sinnvoll, die Methodik weiter zu verfeinern und zusätzliche Parameter, wie etwa klimatische Veränderungen, in die Analysen einzubeziehen.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>viii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theorieteil Lawinen und Risiko</b>	<b>2</b>
2.1 Einfluss von Wind und Sonneneinstrahlung . . . . .	2
2.2 Klassifizierung von Lawinen . . . . .	3
<b>3 Untersuchungsgebiet</b>	<b>8</b>
3.1 Verteilung der Lawinenpolygone im Land . . . . .	9
<b>4 Methodik</b>	<b>10</b>
4.1 Aufnahme der Lawinenpolygone durch Lawinenmelder . . . . .	10
4.2 Geomorphologische Charakterisierung des Terrains . . . . .	11
4.2.1 Hangneigung . . . . .	12
4.2.2 Krümmung . . . . .	12
4.2.3 Windshelter . . . . .	13
4.2.4 Rauheit . . . . .	14
4.2.5 Waldbedeckung . . . . .	16
4.3 Ablauf des Python-Codes und Eingabe- bzw. Ausgabeparameter . . . . .	16
4.3.1 Vektorisierung der PRA-Rasterdatei . . . . .	18
4.4 Lawinensimulation RAMMS . . . . .	19
<b>5 Ergebnisse</b>	<b>21</b>
5.1 PRA Analyse . . . . .	21
5.2 Fallbeispiel: Gruben Lawine und Prischerwind Lawine, aufgenommen vor Winter 2006/07 . . . . .	23
5.3 Fallbeispiel 2: Äußere Grube Lahn und Taufenlawine, aufgenommen nach dem Winter 2006/2007 . . . . .	27
<b>6 Diskussion</b>	<b>31</b>
6.1 Diskussion der Methoden . . . . .	31
6.1.1 Waldbedeckung . . . . .	31
6.1.2 Roughness . . . . .	31
6.1.3 Windshelter oder Curvature . . . . .	32
6.1.4 Veränderung der Eingabeparameter . . . . .	32
6.1.5 Verwendete Software zur Simulation . . . . .	32
6.2 Diskussion der Ergebnisse . . . . .	33

<b>7 Zusammenfassung</b>	<b>37</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>40</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Darstellung der Kräfte, die auf ein Schneepaket an einer geneigten Fläche wirken, einschließlich der Scherkräfte, der Gravitation und der Kompression, die zur Auslösung einer Lawine beitragen können. . . . .	4
2.2	Schematische Darstellung des Aufbaus einer StaUBLawine. Die Grafik illustriert die unterschiedlichen Schichten einer solchen Lawine. . . . .	5
2.3	Vergleich der Haupttypen von Lawinen und ihrer Strukturen. Dargestellt sind eine RundsEN-Lawine, eine Lockerschnee-Lawine und eine Schneebrett-Lawine, jeweils mit markierten Bereichen für das Anrissgebiet (a), die Sturzbahn (b) und das Ablagerungsgebiet (c). . . . .	7
3.1	Übersicht Untersuchungsgebiet Südtirol, markiert durch die rote Grenze . . . . .	8
4.1	Ablauf der Methodik zur Validierung des Lawinenkatasters . . . . .	10
4.2	Beispielbilder zweier verschiedener Schadlawinen aufgenommen im Passeiertal . . . . .	11
4.3	Darstellung der Bildung von Schwachschichten durch Unterbrechungen in homogenen Schneefeldern. a) Felsen, die als Unterbrechungen fungieren . b) Bäume, die ähnliche Unterbrechungen darstellen und Schwachschichten innerhalb des Schneefelds verursachen können. . . . .	15
4.4	Schematische Darstellung der Berechnung der Rauheit $R(i, j)$ in einem digitalen Geländemodell (DEM) . . . . .	15
4.5	Flussdiagramm zur Generierung einer PRA-Maske basierend auf Geländemerkmalen . . . . .	18
4.6	Tabelle zur Zuordnung der Reibungskoeffizienten (for Snow and SLF, 2022). . . . .	20
5.1	Vergleich der zugewiesenen Rauheitswerte mit dem natürlichen Terrain . . . . .	21
5.2	Vergleich der Windshelter-Indizes mit unterschiedlichen Hauptwindrichtungen . . . . .	22
5.3	Das Passeiertal, dargestellt auf einem 2,5 m DGM (Digitales Geländemodell). Die historischen Lawinenereignisse vor und nach dem Winter 2006/07 sind in Rot markiert. . . . .	22
5.4	Zeigt die Auswirkungen verschiedener Windschutz- und Hangneigungsschwellen auf die PRA-Übereinstimmung. Die drei Diagramme repräsentieren unterschiedliche Hangneigungsbereiche (26-50, 30-60 und 26-60 Grad). . . . .	23
5.5	Historischer Umriss der Gruben Lawine von 1986, Hintergrund: Orthofoto ArcGIS SPOT Imagery . . . . .	24
5.6	Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Gruben Lawine . . . . .	25
5.7	Aufnahme des Ablagerungsbereichs der Prischerwind Lawine. Foto: Amt Landeswarndienst Südtirol . . . . .	26
5.8	Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Prischerwind Lawine . . . . .	27
5.9	In Rot markierter Anrissbereich Äußere Grube Lahn, Foto: Amt Landeswarndienst Südtirol . . . . .	28

5.10	Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Äu- ßeren Grube Lahn . . . . .	29
5.11	PRA-Gebiete Taufenlawine . . . . .	29
5.12	Darstellung der Simulation der Taufenlawine in RAMMS und Google Earth . . .	30
6.1	Visualisierung der Abdeckung der PRA-Flächen des Lawinenkatasters mit drei Kategorien. . . . .	34
6.2	Darstellung sechs ausgewählter Lawinen mit einer PRA-Abdeckung unter 5%. .	36



# Tabellenverzeichnis

2.1	Lawinenklassifikation basierend auf dem Entwurf des (Schweizerischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung und Haefeli, 1955) überarbeitet von (de Quervain, 1965). . . . .	3
3.1	Zusammenfassung der Lawinenaktivitäten und geografischen Anteile in Südtirol	9
4.1	Bereichsfilterung und Abdeckung innerhalb der Lawinenpolygone basierend auf der Krümmung. . . . .	13
6.1	Lawinen mit einer Abdeckung unter 5% . . . . .	34

# 1 Einleitung

Lawinen stellen in den Bergregionen Europas eine erhebliche Gefahr dar. Sie bedrohen den Verkehr, indem sie Bewegungsströme blockieren, beispielsweise Autobahnen und Zugverbindungen und zerstören Infrastrukturen. Zudem können sie im Wintertourismus Todesfälle und Verletzungen verursachen und tragen somit zu einem schlechten Ruf bei (McClung and Schaeffer, 2009). Dementsprechend sind Risiko- und Gefahrenplanungen unerlässlich (Schmidt-Thomé and Kallio, 2006). Ein wesentlicher Indikator für das Auftreten von Lawinen sind historische Ereignisse (Schmidt-Thomé and Kallio, 2006).

Diese Bachelorarbeit fokussiert sich auf die Validierung des Lawinenkatasters der Autonomen Provinz Südtirol, der flächendeckend seit 1983 durch den Landeswarndienst für Südtirol geführt wird. Der Lawinenkataster, ein essenzielles Instrument für Risikomanagementstrategien und die Kartierung von Gefahrenzonen, zeigte in der Vergangenheit aufgrund der Dokumentation durch unterschiedliche Lawinenmelder in verschiedenen politischen Bezirken gewisse Inkonsistenzen (Aussage Herr Christoph Oberschmied, Herr Diego Mantovani Amt Landeswarndienst Südtirol). Im zentral vom Landeswarnzentrum Südtirol geführten Kataster werden nur Schadlawinen erfasst, die Schäden an öffentlicher und privater Infrastruktur verursacht haben.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Passeiertal, Südtirol. Um die Methodik in diesem spezifischen Untersuchungsgebiet zu erproben. Mithilfe der Gefahrenzonenanalyse (in dieser Arbeit auch PRA - Potential Release Area genannt) sollen Bereiche identifiziert werden, in denen Lawinen potenziell abgehen könnten. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden Lawinsimulationen mit dem Programm RAMMS durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Simulationen werden anschließend durch statistische Auswertungen und die Untersuchung ausgewählter Fallbeispiele analysiert.

## Forschungsfragen

- Wie effektiv kann der bestehende Lawinenkataster der Autonomen Provinz Südtirol durch die Identifikation und Kartierung potenzieller Lawinenabgangsgebiete (PRAs) verbessert werden?
- Welche geomorphologischen Parameter (z.B. Hangneigung, Rauheit des Geländes, Windschutz, Waldbedeckung) haben den größten Einfluss auf die Entstehung und Ausbreitung von Lawinen in Südtirol?
- Welche Verbesserungen können an der bestehenden Methodik zur Erfassung und Analyse von Lawinenpolygonen vorgenommen werden, um eine präzisere Gefahrenbewertung zu ermöglichen?

## 2 Theorieteil Lawinen und Risiko

Lawinen, definiert als Schneemassen, die sich von einem Hang lösen und mit hoher Geschwindigkeit hinabströmen, zählen zu den gravierenden Naturgefahren. Sie bergen signifikante Risiken für Menschen und die Infrastruktur in Gebirgsregionen weltweit (Schweizer et al., 2003). Es ist wichtig anzumerken, dass die Lawinenbildung ein komplexes Zusammenwirken verschiedener Variablen ist (Veitinger, 2015). Dieses Kapitel zielt darauf ab, durch die Erläuterung der theoretischen Aspekte die wichtigsten und nützlichsten Parameter für eine PRA-Analyse offenzulegen.

Um das Verständnis für die Entstehung von Lawinen zu schaffen, muss man erkennen, dass die Winterschneedecke aus Schichten unterschiedlicher Dichte oder Kohäsion besteht, die sich aufgrund intermittierender Schneefallperioden und wechselnder meteorologischer Bedingungen bilden. Die Schichtung der Schneedecke mit ihren entsprechenden Schnee-Eigenschaften ist entscheidend dafür, welcher Typ einer Lawine sich bilden kann (McClung and Schaerer, 2009). Die Stabilität eines Schneepakets variiert aufgrund verschiedenster Variablen, die in zwei Kategorien eingeteilt werden können: feste Parameter, die sich auf die geomorphologische Beschaffenheit des Lawinengebietes beziehen, wie Hangneigung, Rauheit, Krümmung und Ausrichtung. Variierende Parameter umfassen Neuschnee- bzw. Regenmuster, Windrichtung und -intensität, sensible Wärme und radiales Erwärmen oder Abkühlen des Schnees sowie die Stabilität des Schneepakets (Balmforth et al., 2001; McClung and Schaerer, 2009). In dieser Arbeit werden feste Parameter für die Definition der potenziellen Lawinenabgangsgebiete (PRA) verwendet.

### 2.1 Einfluss von Wind und Sonneneinstrahlung

Wind ist neben Neuschnee der größte aktive Faktor, der zur Lawinenbildung beiträgt (de Quervain, 1965). In 40 Prozent aller Lawinenereignisse im Davoser Gebiet sind Starkwindereignisse direkt damit verbunden (Quervain and Meister, 1987). Die Verteilung des Schnees kann entweder während oder kurz nach einem Niederschlagsereignis erfolgen, insbesondere beim Blowing-Schnee (wenn Schneepartikel auf mehr als 2 m Höhe angehoben werden) (Meister, 1989). Wind beeinflusst die Lawinenaktivität in zweierlei Hinsicht wesentlich: (a) Der durch Temperaturgradienten bedingte Schneemetamorphismus ist hauptsächlich von der Gesamtschneetiefe abhängig und variiert daher zwischen Orten mit angesammeltem Schnee und solchen, von denen der Schnee verweht wurde; (b) zusätzliche Spannungen in Bruchzonen sind vornehmlich auf durch den Wind transportierte Schneemassen zurückzuführen (Meister, 1989).

Die Umverteilung der Schneemassen wird stark durch die lokale Topografie beeinflusst. Senken zwischen 10 und 100 Metern tendieren dazu, aufgefüllt zu werden, wodurch sich im Verlauf des Winters die Oberflächentopografie des Schnees verändert (McClung and Schaerer, 2009). Der Wind trägt den Schnee weiter und deponiert ihn an den Leeseiten von Gratkämmen, Rinne- und Mulden, die durch einen ausgeprägten Unterschied in der Hangneigung gekennzeichnet sind.

Die kritische Windgeschwindigkeit definiert den Grenzwert, ab welchem der Wind Schneepartikel durch turbulente Wirbelbewegungen aufnimmt und umverteilt. Mit steigender Temperatur und Feuchtigkeit nimmt die kritische Windgeschwindigkeit zu. Während des Prozesses der Schneeverfrachtung werden Schneepartikel zerkleinert und dichter gepackt, was die kritische Windgeschwindigkeit weiter erhöht. Existieren Quellen für Schneepartikel, wie frischer Neuschnee oder eine schwache Oberflächenschicht, ist die kritische Windgeschwindigkeit wesentlich niedriger (McClung and Schaerer, 2009).

Temperatur und Strahlung beeinflussen ebenfalls die Lawinensituation. Die direkten Auswirkungen der Temperatur sind im Winter zwar gering, jedoch wirken sie sich zeitverzögert auf die Schneedecke aus. Strahlung wirkt sich in erster Linie auf die obersten 20-30 cm der Schneesicht aus (de Quervain, 1965). Der Wärmeaustausch findet durch turbulenten Austausch, auch als fühlbare Wärme bezeichnet, zwischen der Luft und der Schneeoberfläche statt. Bei wärmerer Luft wird die Schneedecke erwärmt, während bei einer wärmeren Schneedecke diese Wärme an die kühlere Luft abgegeben wird (McClung and Schaerer, 2009). Ein kritischer Punkt ist erreicht, wenn der Gefrierpunkt der Schneedecke überschritten wird, da freies Wasser im Schneepaket einen entscheidenden Einfluss auf die Stabilität hat. Strahlung führt dazu, dass Schnee auf Felsformationen schmilzt und in die Schneedecke einfließt (de Quervain, 1965).

## 2.2 Klassifizierung von Lawinen

Zur Unterscheidung verschiedener Lawinentypen wird eine Einteilung herangezogen, die Lawinen anhand verschiedener Kriterien klassifiziert. Diese umfassen den Startpunkt der Lawine, die Beschaffenheit der Gleitfläche, ob die Lawine feucht oder trocken ist, ob die gesamte Schneedecke abrutscht oder sich entlang einer Schwachschicht bewegt, sowie die Bewegungsform der Lawine – ob sie durch die Luft wirbelt, am Boden fließt oder eine Mischform darstellt. Diese Klassifikation versucht, Lawinen aufgrund von sechs Hauptkriterien zu kategorisieren.

**Tabelle 2.1:** Lawinenklassifikation basierend auf dem Entwurf des (Schweizerischen Instituts für Schnee- und Lawinenforschung und Haefeli, 1955) überarbeitet von (de Quervain, 1965).

Kriterium	Alternative Merkmale und Bezeichnungen	
<b>1. Bruchart</b>	Start von einer Linie - Schneebrettlawine	Start von einem Punkt - Lockerschneelawine
<b>2. Lage der Gleitfläche</b>	Innerhalb der Schneedecke - Schichtenlawine	am Boden - Schneedeckenlawine
<b>3. Feuchtigkeitszustand</b>	trockener Schnee - Trockenlawine	nasser Schnee - Nassschneelawine
<b>4. Spurform</b>	offene flache Spurgrenzte Lawine	kanalisierte Spurgrenzte Lawine
<b>5. Bewegungsform</b>	wirbelnd durch die Luft	fließend/gleitend entlang des Bodens
<b>6. Auslösefaktor</b>	interne Auslösung spontane Lawine	externe Auslösung Lawine natürlich/künstlich

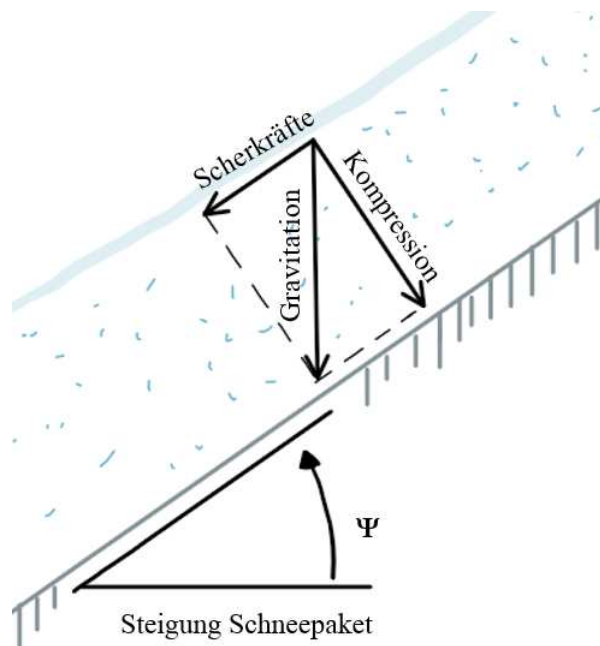
**Wichtige Faktoren:** Schneefall (Menge und Intensität); Wind; Temperaturvariation (Luft und Schnee); Schichtung der alten Schneedecke.

**Weitere wichtige Merkmale:**

- Dimensionen, Volumen der abgelösten Schneemasse, Ablagerungstiefe;
- Höhe, Exposition und Steilheit des Lawinengebiets; Qualität der Gleitschicht;
- Zeit des Abgangs, Bewegungsgeschwindigkeit.

### 1. Brucharten: Unterschied Schneebrettlawine und Lockerschneelawine

Die zwei Haupttypen von Lawinen sind Schneebrettlawinen und Lockerschneelawinen (Balmforth et al., 2001). Die Schneebrettlawine löst sich als kohäsiver Schneeblock entlang einer Schwachschicht im Schneeprofil über ein größeres Gebiet, wenn die Scherfestigkeit die maximale aufnehmbare Kraft des Schneeprofiles überschreitet (Balmforth et al., 2001).



**Abbildung 2.1:** Darstellung der Kräfte, die auf ein Schneepaket an einer geneigten Fläche wirken, einschließlich der Scherkräfte, der Gravitation und der Kompression, die zur Auslösung einer Lawine beitragen können.

Kennzeichnend für Schneebrettlawinen sind die Anbruchskante und die Gleitfläche, über die die Schneebrettlawine abrutscht (Balmforth et al., 2001). Lockerschneelawinen hingegen beginnen meist an einem Punkt an der Oberfläche bzw. nur gering darunter und nehmen an Masse zu, während sie abgleiten. Sie breiten sich meist kegelförmig aus und sind kleiner als Schneebrettlawinen.

### 2. Lage der Gleitfläche:

Eine Lawine kann sich entweder innerhalb der Schneedecke lösen oder direkt vom Boden abgleiten. Bei einem Bruch innerhalb der Schneedecke unterscheidet man zwischen einem Neuschneebruch (Schnee innerhalb der letzten 5 Tage abgelagert) und einem Altschneebruch. Bei der Bodenlawine rutscht das gesamte Schneepaket vom Untergrund ab (de Quervain et al., 1981).

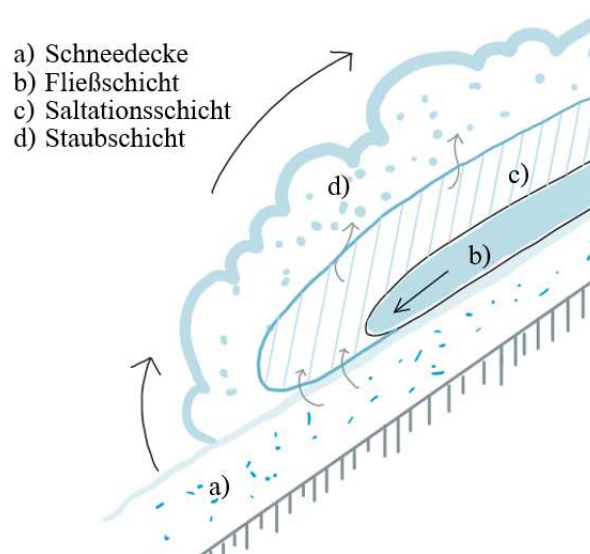
### 3. Trocken- und Nassschneelawinen

Trockenlawinen entstehen typischerweise bei kaltem Wetter und sind durch die geringe

Feuchtigkeit im Schnee gekennzeichnet. (McClung and Schaerer, 2009). Nassschneelawinen hingegen treten bei wärmeren Temperaturen auf und sind durch den hohen Wassergehalt im Schnee charakterisiert. (de Quervain et al., 1981).

#### 4. Bewegungsform der Lawine:

Grundsätzlich wird die Form der Bewegung in zwei Kategorien eingeteilt, einer translatorischen, gleitenden Bewegung mit dem Hauptanteil des Kerns am Boden und einer Staublawine ohne Kern am Grund (Balmforth et al., 2001; de Quervain et al., 1981). Mischformen sind jedoch auch sehr geläufig und man spricht dann entweder von einer Fließlawine mit Staubanteil oder einer Staublawine mit Fließanteil (de Quervain et al., 1981).



**Abbildung 2.2:** Schematische Darstellung des Aufbaus einer Staublawine. Die Grafik illustriert die unterschiedlichen Schichten einer solchen Lawine.

Das Entstehen von Staublawinen wird durch trockenes und kaltes Wetter begünstigt. Die Kraft, die nötig ist, um Schneepartikel mit dem turbulenten Abfluss mitzureißen, ist geringer als bei rekristallisiertem Schwimmschnee. Die Bildung der Wirbelschicht und Luftdurchmischung ist direkt abhängig von der Fließgeschwindigkeit (Voellmy and Roch, 1955). Anfangs wird der Kern der Lawine von einer Wirbelschicht aus Luft umgeben, die suspendierten Schnee enthält. Mit zunehmender Geschwindigkeit und Dauer verstärkt sich diese Schicht und verwandelt schließlich die gesamte Masse in ein mehr oder weniger homogenes Aerosol (Voellmy and Roch, 1955).

#### 5. Spurform

Man unterscheidet zwischen einer offenen Spur (Flächenlawine) und einer kanalisierten (Runsenslawine). Lawinen beginnen oft in offener Form, das Anrissgebiet ist jedoch trichterförmig, sodass die Lawinen in eine geomorphologische Rinne kanalisiert werden (de Quervain et al., 1981). Aus der Abbildung 4.6 zu den Reibungskoeffizienten und Turbulenzkoeffizienten (Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF), 1999) geht hervor, dass Lawinen, die sich über offenes Gelände bewegen, in der Regel niedrigere Werte für den Basalreibungskoeffizienten und den Turbulenzkoeffizienten aufweisen, verglichen mit kanalisierten Lawinen. Dies deutet darauf hin, dass Flächenlawinen aufgrund der geringeren Geländeeinschränkung und der breiteren Ausbreitung tendenziell

eine geringere Reibung erfahren. Der offene Charakter dieser Lawinen ermöglicht eine weniger gehinderte Bewegung, was zu schnelleren Fließgeschwindigkeiten führt. Die kanalisierte Bewegung resultiert in einer konzentrierteren und oft schnelleren Lawinenbewegung innerhalb der Rinne.

## 6. Auslösefaktor

Man unterscheidet zwischen interner und externer Auslösung von Lawinen. Die interne Auslösung bezieht sich auf spontane Lawinen ohne zusätzliche Belastung, während die externe Auslösung durch externe Faktoren verursacht wird, die auf den Auslösebereich einwirken, wie kräftiger Schneefall, Erwärmung der Schneedecke und damit einhergehende steigende Belastung oder eine Belastung durch einen Skifahrer (de Quervain et al., 1981) (McClung and Schaerer, 2009).

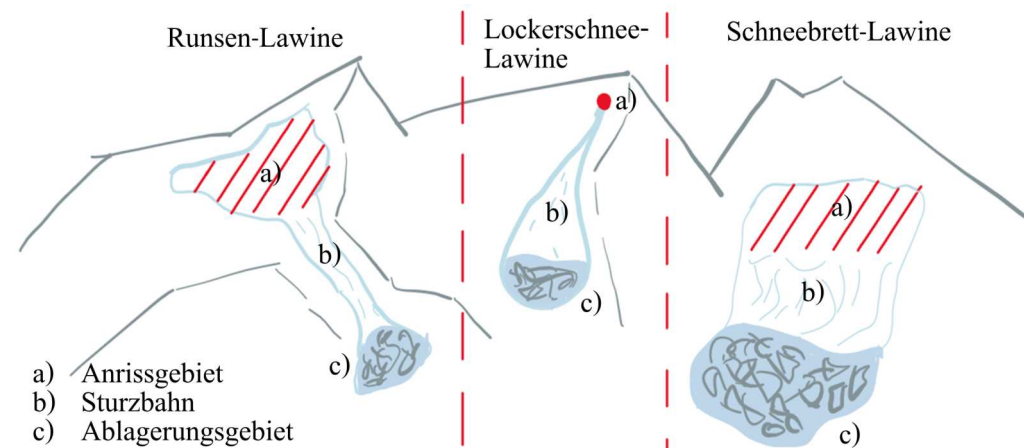
Es gibt verschiedene Klassifikationssysteme, um Lawinen nach ihrer Größe zu ordnen. In dieser Arbeit wird die Einteilung nach dem EWAS-System verwendet, das Lawinen in fünf Kategorien unterteilt:

- **Kleine Lawine (Größe 1):** Länge 10-30 m, Volumen 100 m<sup>3</sup>, stoppt in steilen Hängen.
- **Mittlere Lawine (Größe 2):** Länge 50-200 m, Volumen 1.000 m<sup>3</sup>, erreicht das Ende des steilen Hangs.
- **Große Lawine (Größe 3):** Länge mehrere 100 m, Volumen 10.000 m<sup>3</sup>, kann flaches Gelände über weniger als 50 m überqueren.
- **Sehr große Lawine (Größe 4):** Länge 1-2 km, Volumen 100.000 m<sup>3</sup>, überquert flaches Gelände über mehr als 50 m, erreicht den Talboden.
- **Extrem große Lawine (Größe 5):** Länge über 2 km, Volumen über 100.000 m<sup>3</sup>, erreicht den Talboden, landschaftsverändernd.

Lawinen, einschließlich der in dieser Arbeit untersuchten Lawinenpolygone, können in drei Zonen unterteilt werden: den Startbereich, den Fließpfad und den Ablagerungsbereich:

- **Anrissgebiet:** Hier entsteht die Lawine. Es ist der Ort, an dem sich der Schnee löst und beginnt, bergab zu fließen.
- **Sturzbahn:** Dies ist der Weg, den die Lawine auf ihrem Weg nach unten zurücklegt. In diesem Bereich hat die Lawine ihre maximale Geschwindigkeit und gewinnt an Volumen.
- **Ablagerungsbereich:** Dies ist der Bereich, in dem das Lawinenmaterial zum Stillstand kommt und sich ansammelt.

(Barbolini et al., 2002)

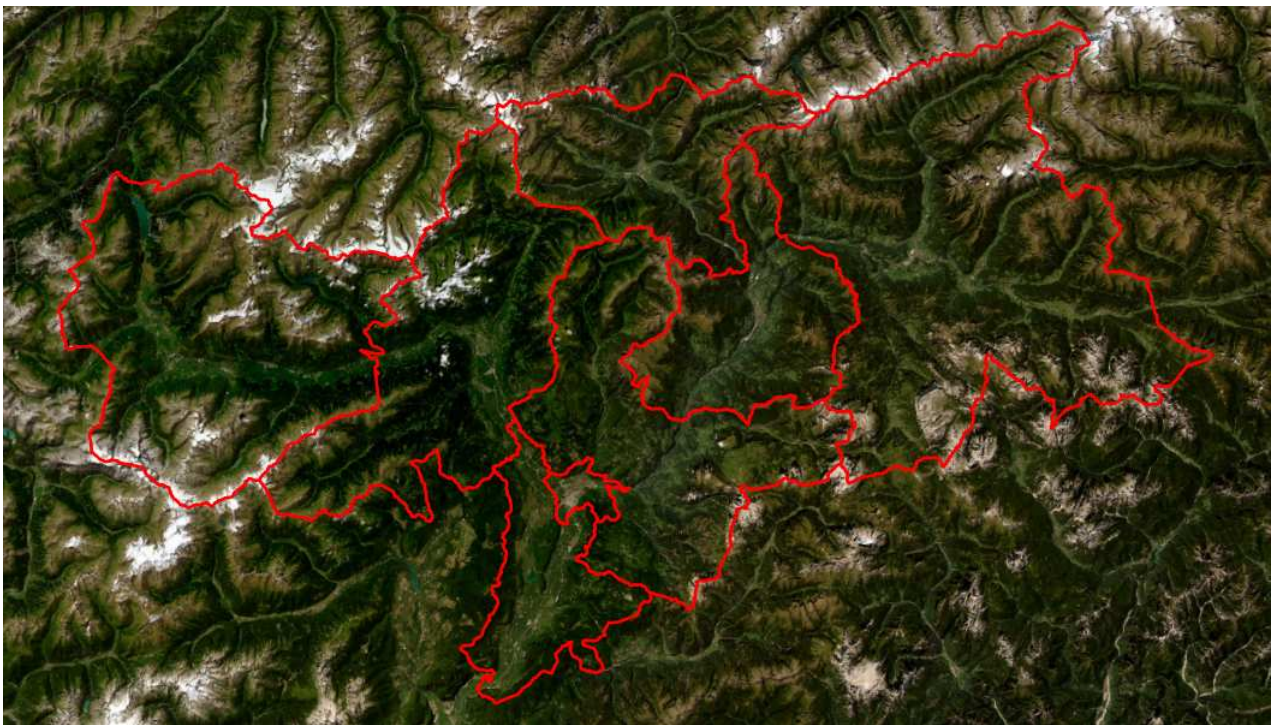


**Abbildung 2.3:** Vergleich der Haupttypen von Lawinen und ihrer Strukturen. Dargestellt sind eine Rundsens-Lawine, eine Lockerschnee-Lawine und eine Schneebrett-Lawine, jeweils mit markierten Bereichen für das Anrissgebiet (a), die Sturzbahn (b) und das Ablagerungsgebiet (c).



### 3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit beschränkt sich auf die Provinz Südtirol im Norden Italiens, die mit einer Flächenausdehnung von 7.400 km<sup>2</sup> die größte Provinz Italiens ist. Sie befindet sich im Dreiländereck Italien, Österreich und Schweiz. Südtirol, überwiegend ein Gebirgsland mit Höhen von 200 bis 3900 m ü. A., hat nur 5 Prozent seiner Fläche unterhalb von 500 m ü. A. und 85 Prozent oberhalb von 1.000 m ü. A. (Strunz, 2014). Generell kann man sagen, dass der tiefer gelegene südöstliche Teil des Gebiets (gewöhnlich unterhalb von 3.000 Metern über dem Meeresspiegel) den Dolomiten zugeordnet wird. Diese bestehen aus Sedimentgesteinsformationen mit einer eher sanften Morphologie, die gelegentlich von markanten Klippen durchbrochen ist, während die übrigen Bereiche aus metamorphem und magmatischem Gestein bestehen, welche steilere Talseiten und größere Höhen aufweisen (Pistocchi and Notarnicola, 2013). Die Provinz ist in acht administrative Bezirke unterteilt: Vinschgau, Burggrafenamt, Überetsch-Unterland, Bozen, Salten-Schlern, Eisacktal, Wipptal und Pustertal. Diese Arbeit fokussiert auf das Passeiertal, das zum Bezirk Burggrafenamt gehört, für die Entwicklung der Methodik. In der Zeit seit Beginn der Aufzeichnungen ereigneten sich im Passeiertal 104 Lawinen, und im gesamten Land wurden 3133 Schadlawinen verzeichnet.



**Abbildung 3.1:** Übersicht Untersuchungsgebiet Südtirol, markiert durch die rote Grenze

### 3.1 Verteilung der Lawinenpolygone im Land

In der Tabelle 3.1 ist die Verteilung der Lawinenaktivitäten in Südtirol dargestellt. Mit insgesamt 3133 aufgenommenen Lawinen seit 1974 zeigt sich, dass das Pustertal mit 1286 Lawinen die höchste Aktivität aufweist, gefolgt vom Vinschgau mit 560 und dem Wipptal mit 465 Lawinen. Im Überetsch-Südlichen Unterland wurden 13 Lawinen erfasst, die hauptsächlich auf den Gebirgszug im Südosten, dem Naturpark Pale di San Martino, und im Westen des Bezirks bei der Mendel zurückzuführen sind.

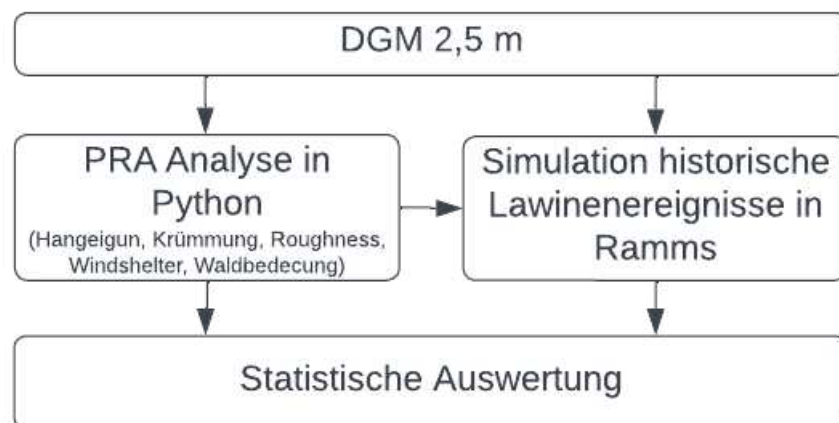
**Tabelle 3.1:** Zusammenfassung der Lawinenaktivitäten und geografischen Anteile in Südtirol

Bezirk	Fläche über 2000m (%)	Anzahl der Lawinen	Gesamtfläche (km <sup>2</sup> )	Flächen- anteil (%)
Gesamt Südtirol	37.05	3133	-	100.00
Vinschgau	62.73	560	1440.66	19.47
Burggrafenamt	34.15	305	1099.65	14.86
Überetsch-Unterland	0.85	13	423.48	5.72
Bozen	0.00	0	52.34	0.71
Salten-Schlern	21.14	273	1036.66	14.01
Eisacktal	23.15	250	623.91	8.43
Wipptal	38.32	465	650.04	8.78
Pustertal	40.80	1286	2072.53	28.01

## 4 Methodik

Die Analysen sind in drei große Blöcke aufgeteilt: Das Erkennen möglicher Auslösegebiete, die die Voraussetzungen zur Entstehung einer Lawine formal erfüllen, die Nachbildung dieser Gebiete anhand bestehender Methoden und die Validierung mit der PRA-Analyse von (Sykes et al., 2022), sowie die anschließende Simulation der selbst generierten PRAs im Softwarepaket RAMMS.

Abbildung 4.1 zeigt den methodischen Ablauf der Lawinengefahrenanalyse. Ausgangspunkt ist das digitale Geländemodell (DGM) mit einer Auflösung von 2,5 Metern. Die PRA-Analyse in Python berücksichtigt verschiedene geomorphologische Parameter (Hangneigung, Krümmung, Rauheit, Windschutz, Waldbedeckung). Danach werden die errechneten PRA-Gebiete in RAMMS simuliert. Die Ergebnisse werden schließlich statistisch ausgewertet.



**Abbildung 4.1:** Ablauf der Methodik zur Validierung des Lawinenkatasters

### 4.1 Aufnahme der Lawinenpolygone durch Lawinenmelder

Im Rahmen eines Gesprächs mit Herrn Christoph Oberschmied, Mitarbeiter des Amt Landeswarnzentrum Südtirol, konnten detailliertere Informationen zur Erfassung des Lawinenkatasters gewonnen werden. Es werden ausschließlich Schadlawinen erfasst, die vom Landeswarndienst als solche definiert werden, die entweder Infrastruktur beschädigt haben oder Arbeitsaufwand für die ansässigen Bewohner verursachen. Hierzu zählen beschädigte Häuser, verschüttete Straßen, Wander- und Forstwege sowie Wiesen und Weideflächen.

Die Aufzeichnung der Lawinenereignisse begann ursprünglich mit analogen Mitteln auf einer Militärkarte im Maßstab 1:25.000, auf der einzelne Lawinenereignisse zu einem umfassenden Polygon zusammengefasst wurden. Diese Daten wurden anschließend auf die Landeskarte im Maßstab 1:10.000 übertragen. Ursprünglich lag die Verwaltung des Lawinenkatasters in den Händen



(a) Jaufenlawine, verschüttete Straßen und Wiesen



(b) Lawine Zeppichel, Eindringen in privates Wohnhaus

**Abbildung 4.2:** Beispielbilder zweier verschiedener Schadlawinen aufgenommen im Passeiertal

der Forstbehörde, die sowohl für die kartographische als auch die schriftliche Dokumentation zuständig war. Im Jahr 1983 wurde diese Verantwortung jedoch an den Lawinenwarndienst übergeben. Seit den frühen 1990er Jahren erfolgt die Dokumentation der Ereignisse mittels des von AINEVA entwickelten, für den gesamten italienischen Alpenraum standardisierten Modells 7. Die Datensätze sind in zwei Zeiträume unterteilt: von 1974 bis Winter 2006/07 und von Winter 2007/08 bis zur Gegenwart. Die Daten beziehen sich hierbei auf die Wintersaison und nicht auf das Sonnenjahr. Die Aufzeichnungen der Lawinenpolygone seit 2007 wurden von Herrn Christoph Oberschmied bearbeitet. Typischerweise werden Fotos von Lawinen, die vom zuständigen Förster des Bezirks an den Landeswarndienst übermittelt werden, für die Aufnahme des Umrisses verwendet. Manchmal werden Luftaufnahmen aus einem Helikopter gemacht, allerdings ist es nach Aussage von Herrn Christoph Oberschmied schwierig, das Anrissgebiet auf diesen Bildern zu identifizieren, da solche katastrophalen Lawinen oft während starker Schneefälle auftreten, wodurch das Anrissgebiet entweder verdeckt oder aufgrund der Wetterbedingungen nicht sichtbar ist. In GIS-Systemen werden mit Hilfe von Hangneigungskarten potenzielle Anrissgebiete für das Lawinenereignis auf den bestehenden Grundlagen modelliert und anschließend im Programm RAMMS simuliert. Diese Simulation wird manuell angepasst, basierend auf vorhandenen Informationen oder Bildern. Die Führung des Lawinenkatasters dient laut Aussage vorrangig der Gefahrenzonenplanung.

## 4.2 Geomorphologische Charakterisierung des Terrains

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich eine Lawine ereignet, ist abhängig von festen Parametern und variablen Parametern (vgl. 2.2). Aufgrund der Komplexität und fehlender Daten der variablen Parameter werden in dieser PRA-Analyse nur die wichtigsten Variablen der festen Parameter herangezogen. Die relevantesten Variablen zur Bestimmung der PRA sind die Hangneigung, Plankrümmung, Roughness Index und die Waldbedeckung (Sykes et al., 2022). Es wurde basierend auf dem 2,5 m digitalen Geländemodell von Südtirol gearbeitet, das für Testzwecke auf das Burggrafenamt zugeschnitten wurde.

### 4.2.1 Hangneigung

In der Literatur werden verschiedene Hangneigungsbereiche angegeben, in denen sich Lawinen bilden können. Lawinen können sich meistens nur ab einer Hangneigung größer als 27° (Balmforth et al., 2001) bzw. 30° (Schweizer et al., 2003) bilden, da erst ab einem kritischen Punkt die Scherfestigkeit durch die Gravitation überschritten werden kann. Bei Hangneigungen größer als 45° bis 50° (Balmforth et al., 2001) bzw. bis 60° (Maggioni et al., 2002) ereignen sich oft kleinere Rutschungen, die das Akkumulieren großer Schneemengen verhindern. Die Hangneigung wurde berechnet und Werte unter 30° bzw. über 60° wurden ausgeschlossen. Diese Werte können variiert werden, damit für das Untersuchungsgebiet die besten Ergebnisse erzielt werden.

Die Steigung  $S$  an einem Punkt  $(i, j)$  im digitalen Geländemodell (DEM) wird berechnet, um das Maß der Neigung des Terrains an diesem Punkt zu bestimmen. Dies wird typischerweise in Grad ausgedrückt und lässt sich mathematisch wie folgt beschreiben (Wood, 2015):

$$S(i, j) = \arctan \left( \sqrt{\left(\frac{\partial Z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial Z}{\partial y}\right)^2} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.1)$$

Hierbei ist:

- $Z$  der Höhenwert im DEM.
- $\frac{\partial Z}{\partial x}$  und  $\frac{\partial Z}{\partial y}$  sind die partiellen Ableitungen der Höhe in Bezug auf die x- und y-Richtung, die die Steigung des Terrains in diesen Richtungen anzeigen.

### 4.2.2 Krümmung

Die Krümmung wurde mit der Funktion 'Krümmung' in ArcGIS berechnet. Diese Funktion hat mehrere Ausgabeparameter, darunter die Standard-, Profil- und Horizontalkrümmung (Plankrümmung). Für die Analyse der PRA ist die Plankrümmung von Bedeutung (Maggioni et al., 2002; Barbolini et al., 2011), da sie Mulden und Senken anzeigen kann, in denen sich durch Windverfrachtung im Lee-Bereich Schnee akkumulieren kann. Die Plankrümmung ist lotrecht zur Richtung der maximalen Neigung und bezieht sich auf die Fließkonvergenz und -divergenz auf einer Oberfläche (ArcDoc, 2024). Die Profilkrümmung maximiert die Effekte der gravitativen Prozesse (Wood, 2015). Die Gleichungen für die Profil- und Plankrümmung lauten gemäß (Evans, 1979):

$$\text{prof}_c = -200 \frac{(ad^2 + be^2 + cde)}{(e^2 + d^2)(1 + d^2 + e^2)^{1.5}} \quad (4.2)$$

$$\text{plan}_c = 200 \frac{(bd^2 + ae^2 - cde)}{(e^2 + d^2)^{1.5}} \quad (4.3)$$

Hierbei repräsentieren die Variablen  $a$ ,  $b$  und  $c$  Koeffizienten der Geländeoberfläche, während  $d$  und  $e$  partielle Ableitungen der Höhe in der x- und y-Richtung darstellen.



**Tabelle 4.1:** Bereichsfilterung und Abdeckung innerhalb der Lawinenpolygone basierend auf der Krümmung.

Krümmung	Form
kleiner $-0.2^\circ$	Konkav
0	Flach
größer $0.2$	Konvex

### 4.2.3 Windshelter

In Kapitel 2.1 wurde die Bedeutung von Schneeverfrachtung durch Wind auf die Lawinenaktivität erläutert. Zur Berücksichtigung dieses Einflusses wird in der PRA-Analyse oft die Krümmung herangezogen (Sykes et al., 2022; Maggioni et al., 2002). Eine Alternative ist der Windshelter-Index, der Bereiche bestimmt, die durch die gegebene Topographie und eine angegebene Hauptwindrichtung windgeschützte Bereiche bzw. Ablagerungszonen darstellen (Veitinger, 2015). (Winstral et al., 2002) bestätigen in seiner Studie die Idee des Windshelter-Indexes. Für die Berechnung des Windshelter-Indexes wurde sich auf die Arbeit von (Veitinger, 2015) gestützt, der sich wiederum auf (Plattner et al., 2004) bezieht.

Der Windshelter-Index wird durch die Analyse der lokalen Topographie im Verhältnis zu einer gegebenen Windrichtung bestimmt. Dies erfolgt durch die Erstellung einer Sektormaske und die Berechnung der Distanzen von einem Zentralpixel zu den umgebenden Pixeln innerhalb des definierten Sektors. Anschließend wird der Windshelter-Index basierend auf den relativen Höhen und den Distanzen der umgebenden Pixel berechnet.

**sector\_mask:** Diese Funktion erstellt eine Maske für einen Kreissektor basierend auf einem gegebenen Radius und einem Winkelbereich. Diese Maske wird verwendet, um Bereiche des DEM zu identifizieren, die potenziell von Wind geschützt oder exponiert sind.

**windshelter\_prep:** Diese Funktion bereitet die für die Windshelter-Berechnung notwendigen Daten vor, einschließlich der Distanz und der Maske, die in der **sector\_mask**-Funktion erstellt wurden. Sie passt die Maske basierend auf der spezifischen Windrichtung und der Toleranz an, um Bereiche zu identifizieren, die als windgeschützt (leeseitig) oder windexponiert (luvseitig) gelten.

**calculate\_wind\_shelter:** In dieser Funktion wird der Windshelter-Index für das gesamte DEM berechnet. Für jedes Pixel im DEM wird die relative Höhe zu den umliegenden Pixeln im definierten Radius betrachtet. Die Berechnung verwendet die Arctan-Funktion, um den Winkel der relativen Höhe im Verhältnis zur Distanz zu bestimmen, modifiziert durch die vorher erstellte Maske. Das Ergebnis ist ein Array, das den Windshelter-Index für jede Zelle im DEM angibt, wobei hohe Werte Bereiche anzeigen, die vor Wind geschützt sind, und niedrige Werte windexponierte Bereiche kennzeichnen.

### Formeln und Variablen

Zur Erstellung der Sektormaske und für die Berechnung des Windshelter-Indexes werden folgende Variablen definiert:

- *DEM*: Das digitale Höhenmodell, für das der Windshelter-Index berechnet wird.
- *wind\_Richtung*: Die vorherrschende Windrichtung in Grad.

- *toleranz\_Winkel*: Die Toleranz um die vorherrschende Windrichtung, ebenfalls in Grad.
- *Zellen\_Größe*: Die Größe einer Zelle im DEM-Array, repräsentiert die räumliche Auflösung.
- *Radius*: Der Radius um das Zentralpixel, innerhalb dessen die Topographie für die Berechnung des Windshelter-Indexes analysiert wird.

Die Distanz  $d$  jedes Pixels innerhalb des Sektors vom Zentralpixel wird berechnet durch:

$$d = \sqrt{(x - x_{\text{zentrum}})^2 + (y - y_{\text{zentrum}})^2} \times \text{cell\_size} \quad (4.4)$$

Die Formel zur Berechnung des Windshelter-Indexes lautet:

$$WS(i, j) = \text{nanquantile} \left( \arctan \left( \frac{\text{Höhenunterschied}}{\text{Distanz} + \epsilon} \right) \times \text{Maske}, 0.75 \right) \quad (4.5)$$

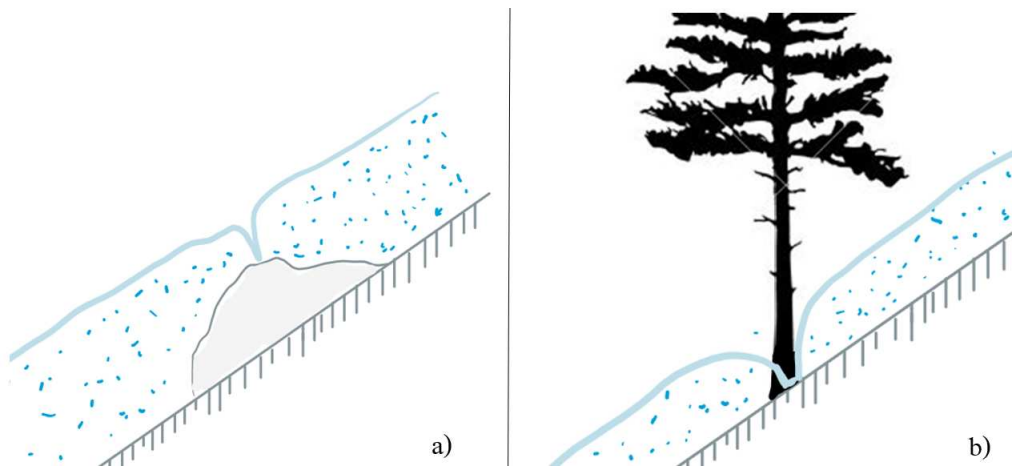
wobei:

- $WS(i, j)$ : Windshelter-Index für die Zelle  $(i, j)$ .
- Höhenunterschied: Differenz zwischen der Höhe der Zentralzelle und der umliegenden Zellen im Fenster.
- Distanz: Entfernung zwischen der Zentralzelle und den umliegenden Zellen, angepasst durch die Windrichtung.
- $\epsilon$ : Ein kleiner Wert (z.B.  $1e^{-10}$ ), um Division durch Null zu vermeiden.
- Maske: Basierend auf der Windrichtung und -toleranz erstellte Maske, die angibt, welche Bereiche als windgeschützt oder windexponiert betrachtet werden.
- $\text{nanquantile}(\dots, 0.75)$ : Berechnet das dritte Quartil der Werte innerhalb des Fensters, ignoriert dabei NaN-Werte.

Hohe Werte im Windshelter-Index zeigen Bereiche an, die vor Wind geschützt sind, was zu einer Akkumulation von Schnee führen kann. Niedrige Werte hingegen weisen auf Bereiche hin, die dem Wind stark ausgesetzt sind, wo Schnee also wahrscheinlich abgetragen wird. Diese Informationen sind entscheidend für die Identifikation potenzieller Lawinenstartgebiete.

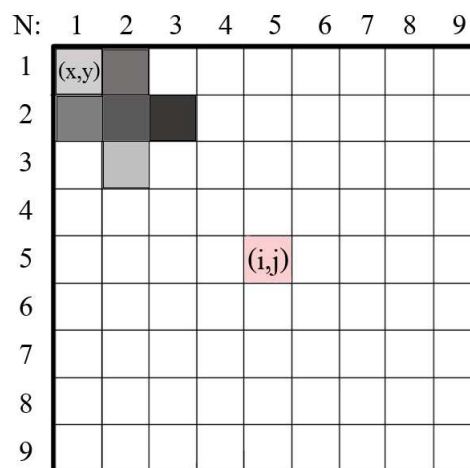
#### 4.2.4 Rauheit

Der Index 'Roughness' liefert Informationen über die Rauheit des Untergrunds. Für die Auslösung einer Lawine ist ein niedriger 'Roughness Index' ideal, da er die Bildung einer kontinuierlichen Schneeschicht begünstigt. Dichte Wälder, zerklüftetes Gelände, Startzonen, die von mehreren Graten durchzogen sind, sowie von großen Felsblöcken bedeckter Boden begrenzen generell die Menge an Schnee, die zu Beginn einer Lawine involviert sein kann. Im Gegensatz dazu können weit auseinanderliegende Wälder und große, offene Hänge mit glattem Untergrund die Auslösung von Lawinen fördern (Balmforth et al., 2001). Sehr große Schneebrettlawinen (mit einer Anrisskantentiefe  $> 1$ ) können beispielsweise nur auf einer offenen Fläche von ungefähr 10 m Breite und 10-20 m Länge entstehen (Schweizer et al., 2003).



**Abbildung 4.3:** Darstellung der Bildung von Schwachschichten durch Unterbrechungen in homogenen Schneefeldern. a) Felsen, die als Unterbrechungen fungieren. b) Bäume, die ähnliche Unterbrechungen darstellen und Schwachschichten innerhalb des Schneefelds verursachen können.

Die Variable der Rauheit ist nur relevant, solange die Mächtigkeit der Schneedecke zwischen 0,3 und 1 m (Schweizer et al., 2003) beträgt, weil darüber hinaus die Rauheit des Untergrunds 'geglättet' wird und so sogar die Schneedecke geschwächt werden kann (Veitinger et al., 2016). Veitinger (Veitinger et al., 2016) hat in seinem Modell zur Lawinenprädiktion ein Modul für die Roughness eingebaut, das die Variable nur bis zu einer bestimmten Schneedeckenmächtigkeit berücksichtigt. Dieser Ansatz in diese Bachelorarbeit zu implementieren wäre jedoch zu komplex für den gewählten Rahmen. Für die Berechnung der Roughness wurde um jeden Pixel herum ein 9x9 Fenster gebildet, um die Abweichung der Höhe um den Pixel zu ermitteln. Der Index ist dann die Standardabweichung der Höhenwerte innerhalb des Fensters, normalisiert durch die Anzahl der Zellen im Fenster.



**Abbildung 4.4:** Schematische Darstellung der Berechnung der Rauheit  $R(i, j)$  in einem digitalen Geländemodell (DEM)

Die Rauheit  $R$  an einem Punkt  $(i, j)$  im digitalen Geländemodell (DEM) wird berechnet als die Wurzel aus der durchschnittlichen quadratischen Abweichung der Höhenwerte innerhalb des



Fensters  $W$  im Vergleich zur Höhe des Zentrums des Fensters. Dies lässt sich mathematisch ausdrücken als:

$$R(i, j) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x, y \in W} (DEM(x, y) - DEM(i, j))^2} \quad (4.6)$$

Hierbei ist:

- $N$  die Anzahl der Zellen im Fenster  $W$ , wobei  $N = 81$  für ein 9x9 Fenster.
- $DEM(x, y)$  der Höhenwert an der Position  $(x, y)$  innerhalb des Fensters.
- $DEM(i, j)$  der Höhenwert der Zentralzelle  $(i, j)$  des Fensters.

#### 4.2.5 Waldbedeckung

Dichte Waldbedeckung trägt zur Verhinderung von Lawinen bei, indem sie die Bildung kontinuierlicher Schwachschichten reduziert, einen Verankerungseffekt durch Bäume bietet sowie die Strahlungs- und Temperaturbedingungen verändert (Maggioni et al., 2002; Teich et al., 2012; Sykes et al., 2022). Sie kann zudem kleine bis mittlere Lawinen bremsen (Teich et al., 2012). Aus diesen Gründen wurden potenzielle Startzonen, die Waldbedeckung aufweisen, aus der Analyse ausgeschlossen. Dies könnte jedoch zu Fehleinschätzungen führen, da lediglich die allgemeine Waldbedeckung und nicht die spezifische Baumdichte berücksichtigt wird. Es ist möglich, dass auch in bewaldeten Gebieten Lawinen ausgelöst werden, insbesondere in Bereichen mit steilen Hangneigungen, geringer Baumdichte oder in Lichtungen innerhalb von Waldgebieten (Sykes et al., 2022).

### 4.3 Ablauf des Python-Codes und Eingabe- bzw. Ausgabeparameter

Der entwickelte Python-Code dient der Identifikation potenzieller Lawinenabgangsgebiete (PRA) auf Basis digitaler Geländemodelle (DGM) sowie weiterer geophysikalischer Daten, unter Berücksichtigung der Windverhältnisse und der Waldbedeckung. Der Code gliedert sich in mehrere Funktionen, die spezifische Aspekte der Gelände- und Vegetationsanalyse bearbeiten. Im Folgenden wird der Ablauf des Codes sowie die Eingabe- und Ausgabeparameter der zentralen Funktionen erläutert.

#### Eingabe- und Ausgabeparameter

Primäre Eingabeparameter sind der Pfad zum DGM, die Hauptwindrichtung und die Waldbedeckung. Optionale Parameter umfassen die Windrichtung und Toleranz für die Windshelter-Berechnung. Als Ausgabe erzeugt der Code eine georeferenzierte TIFF-Datei der identifizierten PRA-Gebiete.

#### Ablauf und Funktionen

**DEM Laden (`read_dem_gdal`):** Zunächst wird das digitale Geländemodell mit der Funktion `read_dem_gdal` geladen, die den Pfad zur DEM-Datei (`dem_path`) als Eingabeparameter nimmt und das DEM als Numpy-Array zurückgibt.

**Hangneigung Berechnen (`calculate_slope_gdal`):** Die Funktion `calculate_slope_gdal` berechnet die Hangneigung aus dem DEM, nutzt GDAL zur Ermittlung der Neigung in Grad und gibt ein Numpy-Array der Hangneigung zurück.

**Krümmung Laden (`load_curvature_raster`):** Die vorberechnete Geländekrümmung wird mit `load_curvature_raster` geladen, um detaillierte Krümmungsinformationen in die Analyse einzubeziehen.

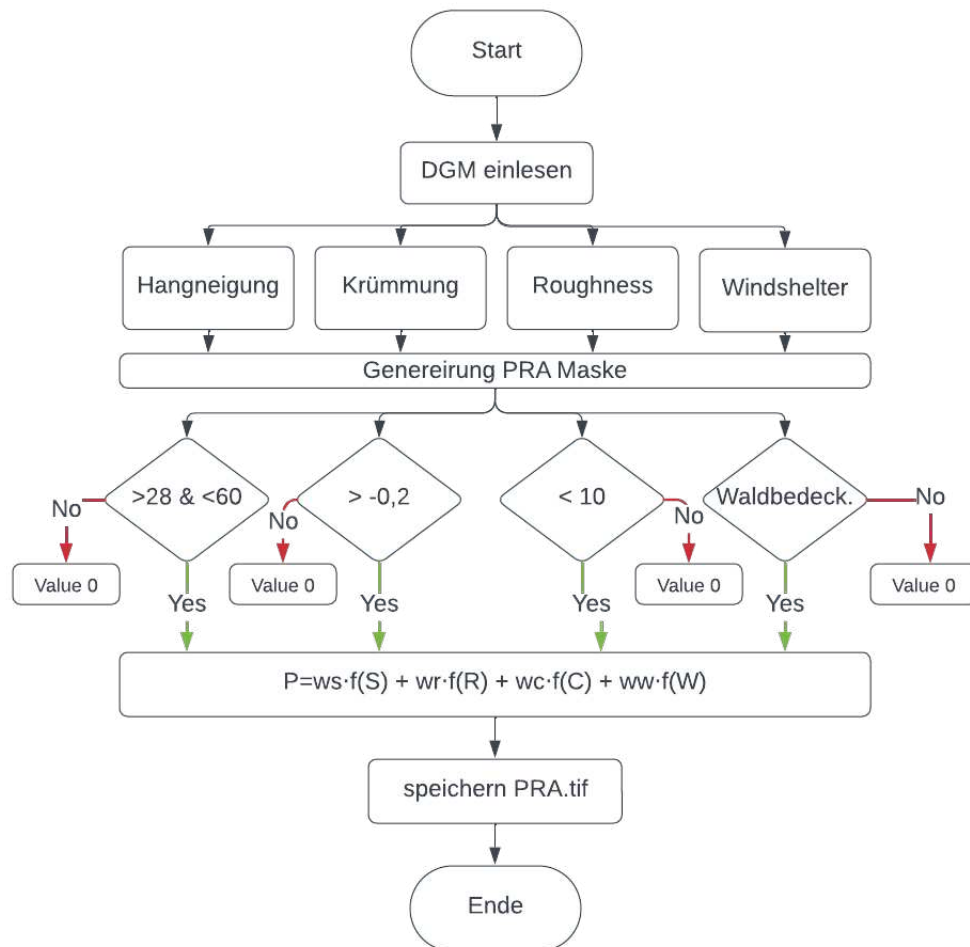
**Rauheit Berechnen (`calculate_ruggedness`):** `calculate_ruggedness` analysiert das DEM innerhalb eines 9x9 Fensters zur Bestimmung der Geländerauheit durch Berechnung der Standardabweichung der Höhenwerte.

**Windshelter Index Berechnen (`calculate_wind_shelter`):** Basierend auf Windrichtung, Toleranz, Zellgröße und Radius berechnet `calculate_wind_shelter` den Windshelter-Index, der windgeschützte Bereiche identifiziert.

**Waldbedeckung Verarbeiten (`process_forest_tiff`):** Mit `process_forest_tiff` wird die Waldbedeckung geladen und verarbeitet, um Waldgebiete bei der Identifikation von PRA auszuschließen.

**PRA Identifizieren (`identify_pra`):** Auf Basis der berechneten Daten identifiziert `identify_pra` PRA-Gebiete unter Anwendung spezifischer Kriterien und Ausschluss von Waldgebieten.

**Ergebnis Speichern (`save_pra_mask_to_raster`):** Die identifizierten PRA-Gebiete werden als georeferenzierte TIFF-Datei gespeichert, wobei `save_pra_mask_to_raster` das PRA-Masken-Array sowie den Pfad zur Ausgabedatei nutzt.



**Abbildung 4.5:** Flussdiagramm zur Generierung einer PRA-Maske basierend auf Gelände-merkmalen

### 4.3.1 Vektorisierung der PRA-Rasterdatei

Der entwickelte Python-Code arbeitet mit dem TIFF-Dateiformat, während die Simulation in RAMMS das Shape-Format für potenzielle Anrissgebiete benötigt. Deshalb wurde das Rasterfile mit der in ArcGIS eingebetteten Funktion "Raster to Polygon im vereinfachten Modus" in ein Shape-Format konvertiert. Weiterhin wurde in ArcGIS mit der Funktion "Geomorphon" die Gratrücken bestimmt und mit der Erase-Funktion aus der PRA-Datei entfernt. Um jedes Lawinenpolygon wurde ein Buffer von 100 Metern gelegt, um alle potenziellen Anrissgebiete im Gebiet zu inkludieren, auch wenn das ursprüngliche Polygon möglicherweise fehlerhaft eingezeichnet wurde. Mithilfe des Buffers konnten alle PRA-Gebiete in der Umgebung der historischen Lawinenereignisse mit der Funktion Clip ausgeschnitten werden. Nun liegt eine Datei vor, die alle PRA-Gebiete in und 100 Meter um die historischen Lawinenereignisse enthält. Um jedoch ein halb-automatisierter Ablauf von Lawinensimulationen vorzunehmen, müssen alle potenziellen Anrissgebiete einzeln als shp-Datei vorliegen, damit sie nacheinander in die RAMMS-Umgebung geladen werden können. Das Skript arbeitet mit der Attributtabelle des Lawinen-Buffer-Layers, welcher alle relevanten geografischen Daten der Lawinenereignisse enthält. Durch eine programmierte Iteration über jeden Eintrag in dieser Tabelle wählt das Skript nacheinander jede einzelne Lawine aus. Für jedes ausgewählte Lawinenereignis führt das Skript

dann eine gezielte Zuschneidung der zugehörigen potenziellen Anrissgebiete (PRA) durch. Dieser Schritt wird mittels geographischer Verarbeitungsfunktionen in ArcGIS realisiert, die es ermöglichen, präzise diejenigen Bereiche des PRA-Layers zu extrahieren, die innerhalb des spezifischen Bufferbereichs der jeweiligen Lawine liegen. Nach dem Zuschneiden der Daten speichert das Skript jede einzelne PRA-Datei als Shapefile.

## 4.4 Lawinensimulation RAMMS

RAMMS (Rapid Mass Movements Simulation) stellt ein fortgeschrittenes numerisches Modellierungswerkzeug dar, das speziell für die Untersuchung der Dynamik geophysikalischer Massenbewegungen wie Schneelawinen entwickelt wurde. Dieses zweidimensionale Simulationsmodell ermöglicht eine detaillierte Analyse des Bewegungsverhaltens von Lawinen über dreidimensionale Terrains (for Snow and SLF, 2022). Durch die Integration von digitalen Höhenmodellen (DEM) und angepassten physikalischen Parametern, wie den Reibungskoeffizienten und Fließgeschwindigkeiten, erlaubt RAMMS eine präzise Modellierung der Lawinenbahnen, einschließlich deren Auslaufstrecken und Aufpralldrücke (for Snow and SLF, 2022).

Die Genauigkeit der Simulationsergebnisse hängt wesentlich von den Eingabedaten ab. Für die Durchführung der Simulationen wurden folgende spezifische Daten verwendet:

1. Ein digital erhobenes Höhenmodell mit einer Auflösung von 2,5 Metern, resampelt auf eine 10 m Auflösung angepasst für das Untersuchungsgebiet Burggrafenamt.
2. Shapefiles der Anrissgebiete, welches mittels eines Python-Skripts aus den PRA-Gebieten generiert wurde.
3. Angaben zur Schneehöhe, basierend auf den Aineva 7-Daten.

Innerhalb des RAMMS-Interfaces lassen sich zusätzlich die Jährlichkeit (300, 100, 30, 10 Jahre) und die Größe der Lawine (z.B. Large) einstellen, die einen direkten Einfluss auf die Reibungskoeffizienten  $\mu$  und  $\xi$  und damit auf die Ergebnisse haben.

Die Tabelle 4.6 zeigt einen Ausschnitt zur Bestimmung der Reibungskoeffizienten  $\mu$  und  $\xi$  für verschiedene Szenarien von Lawinen, basierend auf der Lawinengröße (Large oder Medium, Small und Tiny), der Höhenlage (über 1500 m, zwischen 1000 und 1500 m, unter 1000 m) und der geografischen Beschaffenheit (unverzweigt, verzweigt, in einer Schlucht oder auf flachem Gelände). Es werden sowohl Werte für eine Wiederkehrperiode von 300 Jahren als auch für 100 Jahre dargestellt. Diese Koeffizienten sind entscheidend für die Simulation von Lawinenbewegungen in RAMMS, da sie die physikalischen Eigenschaften der Schneemasse und deren Interaktion mit der Umgebung beeinflussen.

Large avalanche ( > 60'000 m <sup>3</sup> )		300-Year		100-Year	
	Altitude (m.a.s.l.)	$\mu$	$\xi$	$\mu$	$\xi$
unchannelled	above 1500	0.155	3000	0.165	3000
	1000 - 1500	0.17	2500	0.18	2500
	below 1000	0.19	2000	0.2	2000
channelled	above 1500	0.21	2000	0.22	2000
	1000 - 1500	0.22	1750	0.23	1750
	below 1000	0.24	1500	0.25	1500
gully	above 1500	0.27	1500	0.28	1500
	1000 - 1500	0.285	1350	0.3	1350
	below 1000	0.3	1200	0.315	1200
flat	above 1500	0.14	4000	0.15	4000
	1000 - 1500	0.15	3500	0.16	3500
	below 1000	0.17	3000	0.18	3000
Medium avalanche ( 25 - 60'000 m <sup>3</sup> )		300-Year		100-Year	
unchannelled	above 1500	0.195	2500	0.205	2500
	1000 - 1500	0.21	2100	0.22	2100
	below 1000	0.23	1750	0.24	1750
channelled	above 1500	0.25	1750	0.26	1750
	1000 - 1500	0.27	1530	0.28	1530
	below 1000	0.28	1350	0.29	1350
gully	above 1500	0.32	1350	0.33	1350
	1000 - 1500	0.33	1200	0.34	1200
	below 1000	0.36	1100	0.37	1100
flat	above 1500	0.17	3250	0.18	3250
	1000 - 1500	0.19	2900	0.2	2900
	below 1000	0.21	2500	0.22	2500
forested area (mu=delta, xi=fix)		0.02	400	0.02	400

Abbildung 4.6: Tabelle zur Zuordnung der Reibungskoeffizienten (for Snow and SLF, 2022).

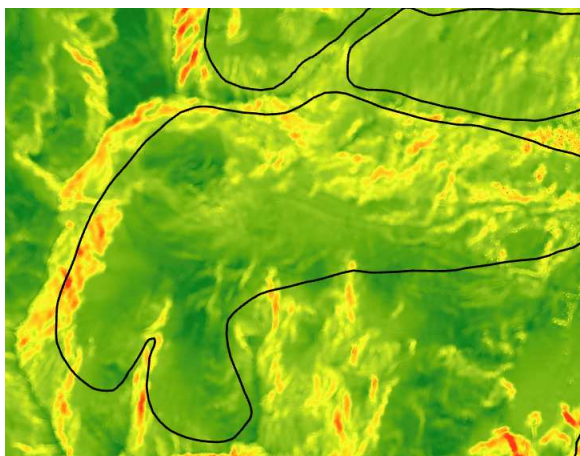
## 5 Ergebnisse

### 5.1 PRA Analyse

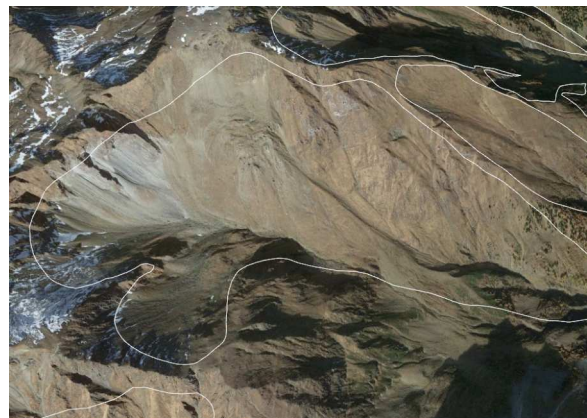
Die PRA-Analyse basiert auf den Variablen Hangneigung, Rauheit des Geländes (Roughness), Windschutz (Windshelter) und Waldbedeckung, welche im Methodikteil detailliert erläutert wurden.

Die am meisten gewichtete Variable ist die Hangneigung. Lawinen können sich erst ab einer gewissen Steigung lösen, wenn die Gravitation die Scherfestigkeit überschreitet (McClung and Schaerer, 2009). Eine maximale Obergrenze gibt es ebenfalls, da sonst kleine Schneemengen immer wieder abrutschen und somit die Bildung größerer Schneemassen verhindert wird. Der Hangneigungsindex ist mit 60 Prozent gewichtet.

Der Rauheitswert ermöglicht die Erkennung von Kämmen, Graten und ähnlichen Strukturen, die mittels eines Schwellenwertes unter 7 aus der PRA-Analyse ausgeschlossen werden können. Die hellgrünen bis roten Pixel zeigen Bereiche mit hohem Rauheitswert. Lawinen brechen typischerweise unterhalb von Kämmen an; wenn der Bereich zu unhomogen ist, wird die Bildung von Lawinen schwieriger (Schweizer et al., 2003), (McClung and Schaerer, 2009). In Abbildung 5.1 sieht man, dass im oberen Drittel der Lawinenpolygone typischerweise eine homogene dunkelgrüne Fläche vorhanden ist, was darauf hindeutet, dass in diesem Bereich eine homogene Topographie besteht.



(a) Zugewiesene Rauheitswerte



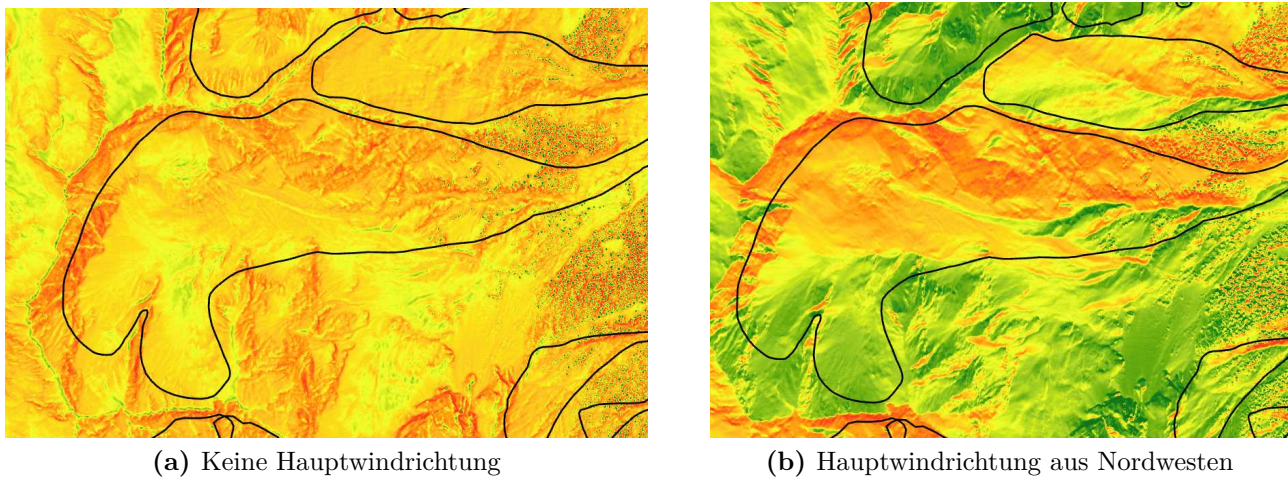
(b) Visualisierung des Terrains

**Abbildung 5.1:** Vergleich der zugewiesenen Rauheitswerte mit dem natürlichen Terrain

Bei der Variablen des Windschutzes kann man entweder eine Hauptwindrichtung angeben, von der der Wind typischerweise weht, mit einem Abweichungswert, oder die Hauptwindrichtung auf 0 setzen und die Toleranz auf 180 Grad, um alle Bereiche abzudecken. Der Windshelter-Index versucht, Gebiete zu ermitteln, die durch Windverfrachtung betroffen sind, d.h. dort, wo der Schnee abgelagert wird. Im Theorieteil in Kapitel 2.1 zur Bedeutung von Wind wurde gründlich darauf eingegangen, welche Probleme Windverfrachtung mit sich bringt. Solche Flächen befinden sich typischerweise an den Lee-Seiten von Kämmen und Graten. Da für die

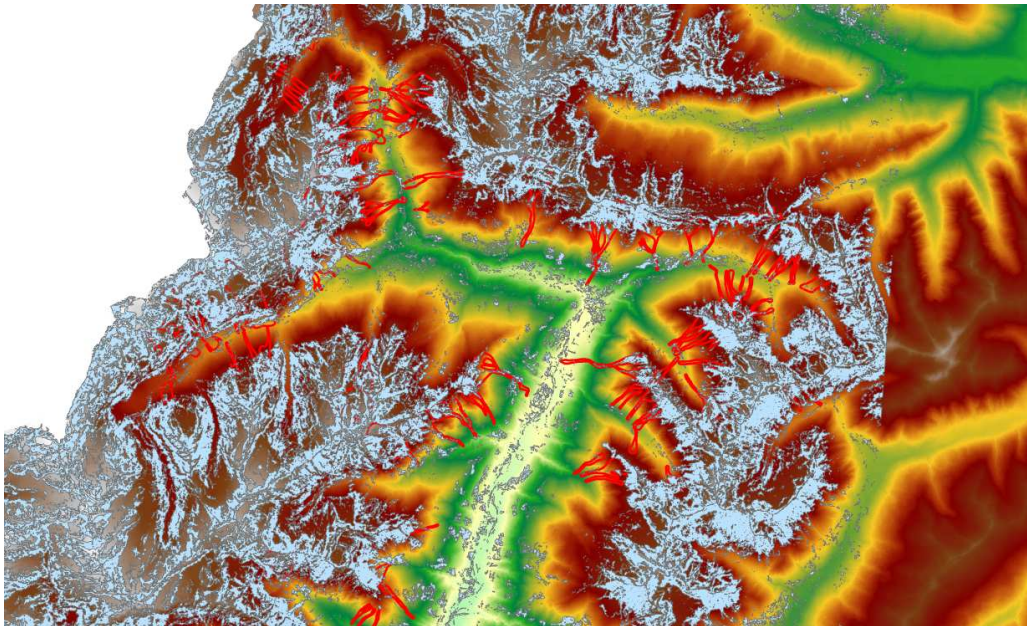


Berechnung keine Hauptwindrichtung angegeben wurde, ist es nicht möglich, eine Lee-Seite zu bestimmen.



**Abbildung 5.2:** Vergleich der Windshelter-Indizes mit unterschiedlichen Hauptwindrichtungen

Der vierte Koeffizient ist die Waldbedeckung. Gebiete mit Waldbedeckung werden aus den PRA-Gebieten ausgeschlossen, wie in Kapitel 4.2.5 detaillierter besprochen.

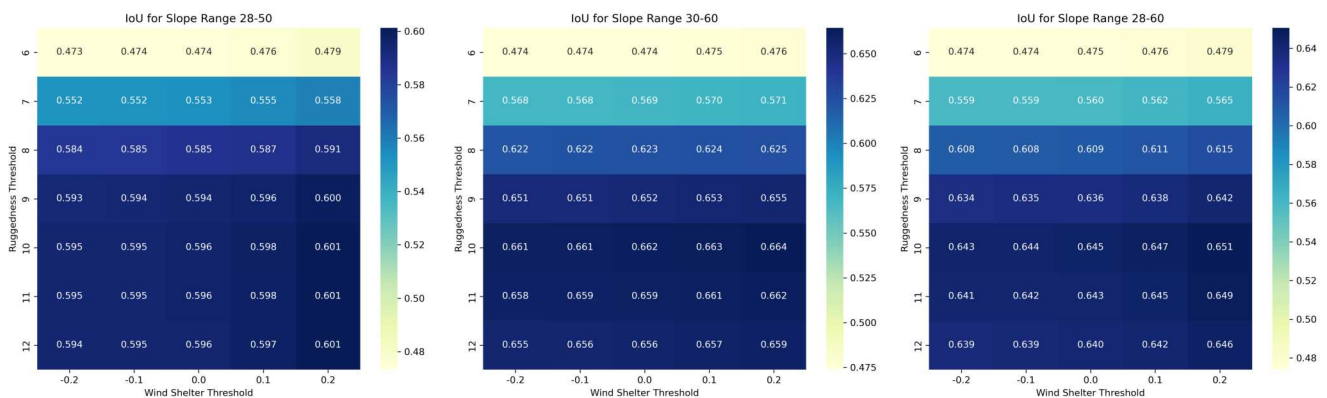


**Abbildung 5.3:** Das Passeiertal, dargestellt auf einem 2,5 m DGM (Digitales Geländemodell). Die historischen Lawinenereignisse vor und nach dem Winter 2006/07 sind in Rot markiert.

Für die Durchführung der Berechnungen benötigt der Algorithmus Schwellenwerte. Zur Ermittlung der optimalen Schwellenwerte wurde eine iterative Analyse mittels Schleifen über verschiedene Schwellenwertvariablen durchgeführt, mit dem Ziel, das bestmögliche Ergebnis zu finden. Die aus diesen Berechnungen resultierenden Daten wurden sowohl mit der PRA-Analyse, in Übereinstimmung mit (Sykes et al., 2022), als auch mit den Lawinenereignissen

aus dem Lawinenkataster bewertet. Insbesondere wurden drei Hangneigungsintervalle untersucht: 28-50°, 30-60° und 28-60°. Für jedes dieser Intervalle wurden Heatmaps erstellt, um die Intersektionsüberunion (IoU)-Werte für verschiedene Kombinationen von Rauheits- und Windabschirmungsschwellenwerten darzustellen(5.4).

Die Analyse zeigte, dass mit zunehmender Rauheitsschwelle die Übereinstimmung zwischen den vorhergesagten Lawinenabgangsbereichen und den Referenzdaten generell ansteigt. Dieser Trend ist über alle Hangneigungsintervalle hinweg erkennbar, wobei die höchsten IoU-Werte im Bereich von 0,650 bis 0,664 für das Intervall von 30-60° erreicht wurden. Im Vergleich dazu bewegten sich die IoU-Werte für das Intervall von 28-50° zwischen 0,473 und 0,600 und für das erweiterte Intervall von 28-60° zwischen 0,474 und 0,651. Der Einfluss der Windabschirmung auf die IoU-Werte ist im Vergleich zur Rauheitsschwelle weniger ausgeprägt. Es zeigt sich eine leichte Tendenz, dass die IoU-Werte mit höheren Windabschirmungswerten steigen.



**Abbildung 5.4:** Zeigt die Auswirkungen verschiedener Windschutz- und Hangneigungsschwellen auf die PRA-Übereinstimmung. Die drei Diagramme repräsentieren unterschiedliche Hangneigungsbereiche (26-50, 30-60 und 26-60 Grad).

## 5.2 Fallbeispiel: Gruben Lawine und Prischerwind Lawine, aufgenommen vor Winter 2006/07

Die Gruben Lawine, die am 24. April 1986 niederging, ereignete sich an einem nordwestlich exponierten Hang. Die Anbruchzone der Lawine befand sich auf einem offenen Hang mit einer Schneedecke von etwa 2 Metern Höhe. Der Anriss erfolgte in einer gemischten Art, und die maximale reale Länge des Abgangs betrug 1000 Meter, während die maximale reale Breite 600 Meter betrug. Die Ablagerung fand am Fuß des Hanges statt, wobei die Form des Ablagerungskegels fächerförmig war. Der Schnee im Ablagerungsgebiet war hauptsächlich nass und die Lawine hinterließ eine deutlich sichtbare Schneespur. Diese detaillierten Informationen über die Gruben Lawine wurden von Hansjörg Partel, einem Förster, aufgenommen und dokumentiert. Alle Daten wurden gemäß Modell 7 Aivena erfasst.

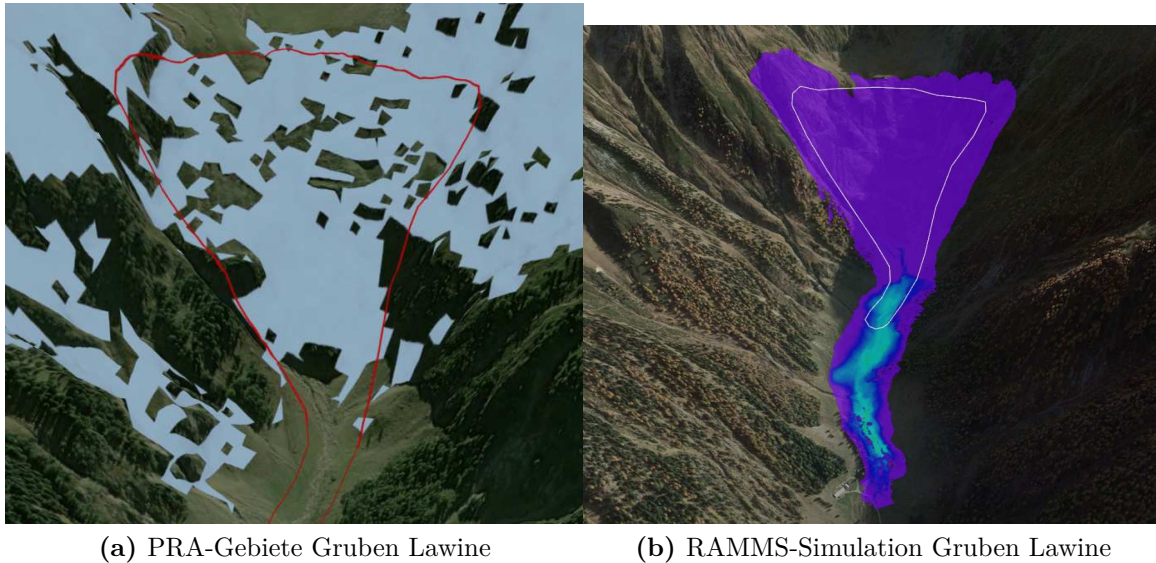




**Abbildung 5.5:** Historischer Umriss der Gruben Lawine von 1986, Hintergrund: Orthofoto ArcGIS SPOT Imagery

Es ist erkennbar, dass der 1986 aufgenommene Umriss nicht ganz mit dem generierten potenziellen Lawinenanrissgebiet übereinstimmt (5.6); es gibt kleinere Unstimmigkeiten im höchsten Bereich des Lawinenpolygons. Außerdem ist ersichtlich, dass nicht alle Flächen innerhalb des PRA-Bereiches potenzielle Anrissgebiete darstellen. Dennoch können Schneemassen, die von oben herabkommen, Material mit sich reißen.

Die größte Unstimmigkeit zeigt sich im Ablagerungsbereich. Im Modell 7 von Aivena wurde spezifiziert, dass es sich um eine Bodenlawine mit einer Schneehöhe von 2 Metern handelt. Entsprechend wurde auch die Simulation durchgeführt, was zu einem deutlich größeren Ablagerungsbereich führt.



**Abbildung 5.6:** Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Gruben Lawine

Im Vergleich zur Gruben Lawine wurde auch die Prischerwind Lawine simuliert. Diese Lawine ist bereits in den Jahren 1986, 1988, 1999 und 2001 abgegangen. Für die Simulation wurde die Lawine von 2001 herangezogen. Im Unterschied zur Gruben Lawine handelt es sich bei der Prischerwind Lawine um eine oberflächige Staublawine, die nicht im Frühjahr, sondern am 27. Januar 2001 abgegangen ist. Die Simulation von Staublawinen unterscheidet sich deutlich von der Simulation von Bodenlawinen und Gleitschneelawinen.

Die Prischerwind Lawine trat am 27. Januar 2001 in Moos in Passeier auf. Der Abgang ereignete sich nachmittags zwischen 12 und 18 Uhr. Zum Zeitpunkt des Ereignisses wurden 51 bis 100 cm Neuschnee und starker Wind gemeldet, wobei ähnliche Bedingungen in den zwei bis drei Tagen vor dem Abgang herrschten. Der höchste Punkt des Anbruchs lag bei 2600 m, während der höchste Punkt der Ablagerung bei 1200 m lag. Die Schneebeschaffenheit wurde als trocken beschrieben. Die Geometrie der Anbruchzone zeigte eine Schneedeckenhöhe von 2,0 m und eine Mächtigkeit der Schwachschicht von 1,0 m. Die maximale reale Länge der Anbruchzone betrug 300,0 m, ebenso wie die maximale reale Breite. Die Ablagerung der Lawine war fächerförmig mit einer knolligen Oberfläche. Die maximale reale Länge des Ablagerungskegels betrug 400,0 m, die maximale reale Breite 80,0 m, und die größte Ablagerungshöhe betrug 8,0 m.

Abbildung 5.7 zeigt den Ablagerungskegel der Prischerwind Lawine. Das Bild wurde später im Frühling aufgenommen, was daran zu erkennen ist, dass die umliegenden Bereiche nicht mehr schneebedeckt sind und Teile des Ablagerungskegels bereits abgeschmolzen sind.

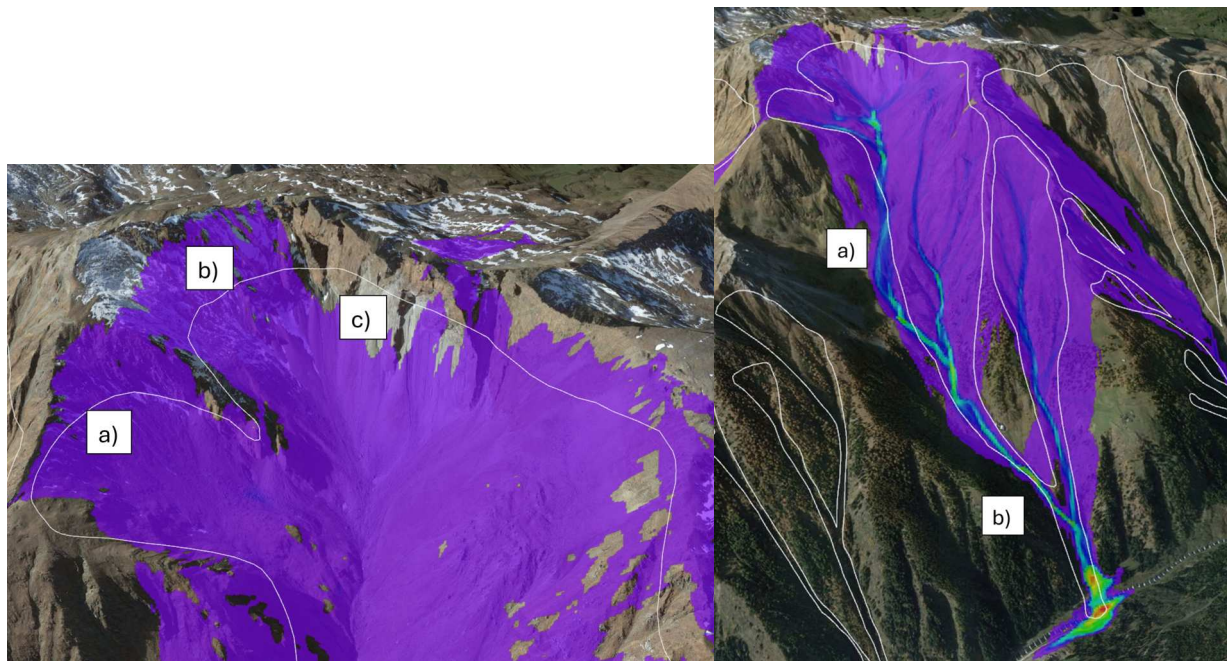


**Abbildung 5.7:** Aufnahme des Ablagerungsbereichs der Prischerwind Lawine. Foto: Amt Landeswarndienst Südtirol

Bemerkenswert ist, dass die Prischerwind Lawine jährlich mehrfach auftritt, was auf eine hohe Wiederholungsrate hinweist. Bei der Analyse der potenziellen Anrissgebiete gibt es Diskrepanzen zwischen den aufgenommenen historischen Lawinenpolygonen und den errechneten potenziellen Anrisszonen. In Abbildung 5.8 sind die in Weiß eingezeichneten historischen Lawinenpolygone und die darunter liegenden Anrissgebiete des simulierten Lawinenabgangs in RAMMS zu sehen.

Im Anrissgebiet (5.8 (a)) Punkt a) zeigt sich eine Unstimmigkeit, da hier die errechneten Flächen höher liegen als die historischen Aufzeichnungen. Zudem ist der Übergang zur Fläche b) nicht kontinuierlich; hier befindet sich eine Steinstufe, die historisch nicht vollständig erfasst wurde. Bei Punkt b) könnte der Bereich ebenfalls höher liegen, jedoch ist dies nicht durchgängig der Fall. Direkt nebenan, bei Fläche c), zeigt sich erneut eine Abweichung, da die historischen Lawinenpolygone über Flächen mit einer Steigung größer als der PRA-Schwellenwert verlaufen. Das bedeutet, dass es laut Code hier ausgeschlossen ist, dass eine Lawine anreißt.





(a) Anrissbereich gemäß PRA-Berechnung im Vergleich zu (b) RAMMS-Simulation Prischerwind Lawine  
aufgenommenem Lawinenpolygon (weißer Umriss)

**Abbildung 5.8:** Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Prischerwind Lawine

In Abbildung 5.8 (b), Punkt a), erstreckt sich die simulierte Lawine weiter als das tatsächliche Lawinenpolygon. Die Lawinenmassen fließen um eine Kuppe herum und teilen sich in zwei Ströme, was möglicherweise auf topographische Einflüsse hinweist. An Punkt b) zeigt die Simulation eine sehr gute Übereinstimmung mit dem aufgenommenen Lawinenpolygon. Laut Simulation treffen sich die beiden Lawinenstränge bei Punkt b) erst ein wenig tiefer als im tatsächlichen Lawinenpolygon. Der Ablagerungsbereich der simulierten Lawine ist großflächiger als das tatsächliche Polygon.

### 5.3 Fallbeispiel 2: Äußere Grube Lahn und Taufenlawine, aufgenommen nach dem Winter 2006/2007

Die Lawine Äußere Grube Lahn ereignete sich am 6. Februar 2014 um 14:00 Uhr in der Gemeinde Moos in Passeier. In den letzten zwei bis drei Tagen vor dem Abgang fiel Neuschnee von über 100 cm. Diese Lawine wurde als Oberflächenlawine klassifiziert, die sich als Staublawine bewegte. Der höchste Punkt des Anrisses lag auf 2400 m und der Ablagerungsbereich auf 1290 m. Die maximale projizierte Länge der Staublawine betrug 2000 m. Die Schneebeschaffenheit wurde als trocken beschrieben.

Die Anbruchzone der Lawine war nach Südwesten ausgerichtet und befand sich an einem offenen Hang. Der Anriss war linear und die Anbruchzone bestand aus nacktem Fels sowie Wiesen oder Weiden mit herausragenden Felsen. Die Höhe der Schneedecke betrug 2,5 m, die Mächtigkeit der Schicht 1,5 m. Die Länge und Breite der Anbruchzone betrugen 100 m bzw. 350 m.

Abbildung 5.9 zeigt eine Aufnahme des Untersuchungsgebiets mit dem rot markierten unge-

führen Anrissbereich. Der Bereich zeigt die Stelle, an der die Lawine beginnt, sich zu lösen.

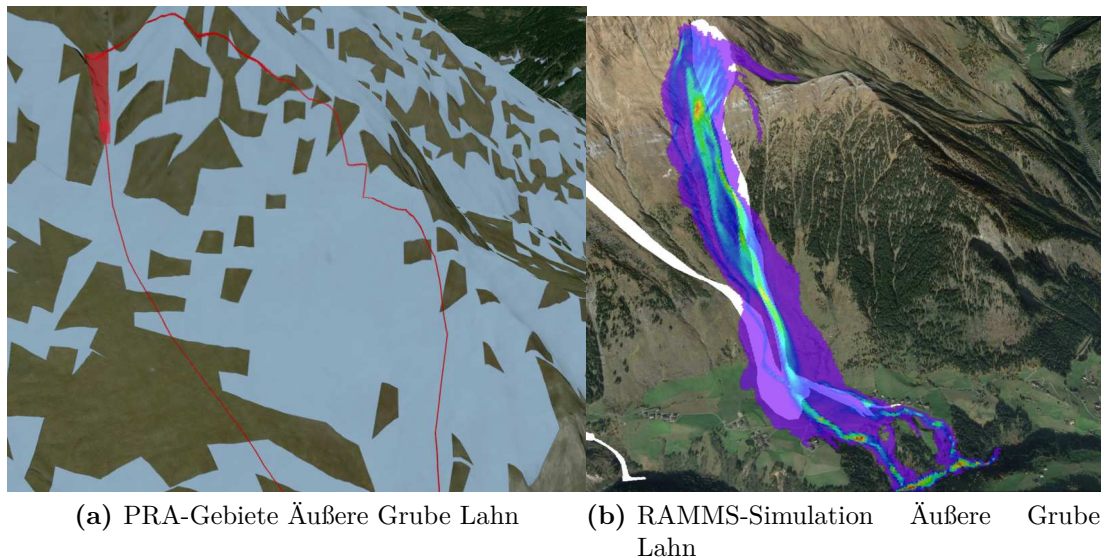


**Abbildung 5.9:** In Rot markierter Anrissbereich Äußere Grube Lahn, Foto: Amt Landeswarn-dienst Südtirol

Die Lawine folgte einer gemischten Sturzbahn und lagerte sich entlang einer Rinne und in einem bebauten Gebiet ab. Die Ablagerungsform war fächerförmig und die Schneebeschaffenheit war knollig. Die maximale reale Länge des Ablagerungskegels betrug 600 m, die Breite 80 m und die Höhe 10 m. Die Lawine erreichte eine Straße. Die Lawine ging am 6. Dezember 2020 erneut ab.

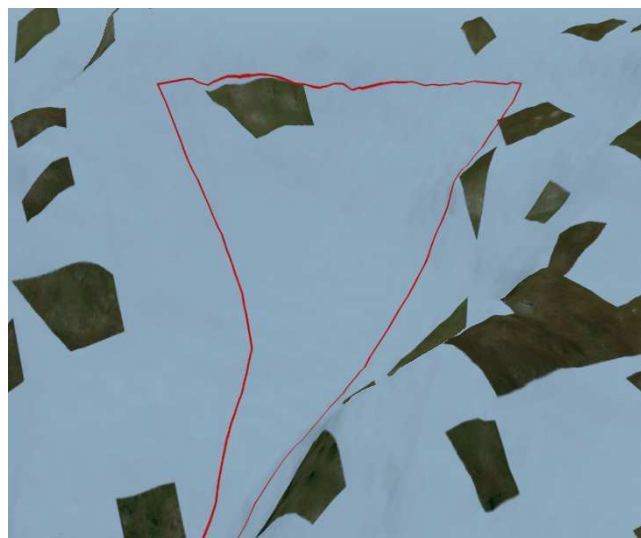
Die Abbildung 5.10 (a) zeigt die PRA-Flächen im Vergleich zu den dokumentierten Anrissgebieten. Die Übereinstimmung ist größtenteils gut, der rot markierte Bereich im westlichen Bereich weist auf eine Diskrepanz hin.

Die Simulationsergebnisse in Abbildung 5.10 (b) stimmen in groben Zügen mit den dokumentierten Lawinenereignissen überein. Es gibt jedoch Unterschiede in der Laufbahn der Lawine sowie deutliche Unterschiede in der Ablagerungszone. Diese Unterschiede sind besonders hervorzuheben, da die Ablagerungszone dieser Lawine genau dokumentiert ist und in der Realität nicht so groß ausfällt wie in der Simulation gezeigt. Bei dieser Simulation wurde die PRA-Fläche genau auf die Umrisse der Lawine zugeschnitten, da sonst große Unstimmigkeiten in der Laufbahn aufgetreten sind. Der Puffer von 100 m wurde weggelassen.



**Abbildung 5.10:** Darstellung der PRA-Bereiche und Simulation im Programm RAMMS der Äußeren Grube Lahn

Die Taufenlawine, die am 4. April 2019 in Pfelders Unterstein im Gemeindegebiet Moos in Passeier abgegangen ist, wurde ebenfalls umfassend dokumentiert durch Modell 7 Aivena. Die Lawine wurde als Oberflächenlawine klassifiziert und trat in der Nacht zwischen 18 Uhr und 6 Uhr auf. Die Lawine wurde durch spontane Faktoren wie Schneebelastung, Regen oder Temperaturanstieg ausgelöst. Die maximale Höhe des Anrisses betrug 2300 Meter und die Ablagerungshöhe lag bei 1600 Metern, mit einer maximalen Auslaufstrecke von 1030 Metern. Die Lawine löste sich auf einem offenen Hang mit einer Hangneigung von etwa 30 Grad und einer südöstlichen Exposition. Der Anrissbereich war eine lineare Zone mit einer Höhe der Schneedecke von 1,8 Metern und einer maximalen Breite von 200 Metern. Der Hang war größtenteils von Wiesen oder Weiden mit herausragenden Felsen bedeckt.

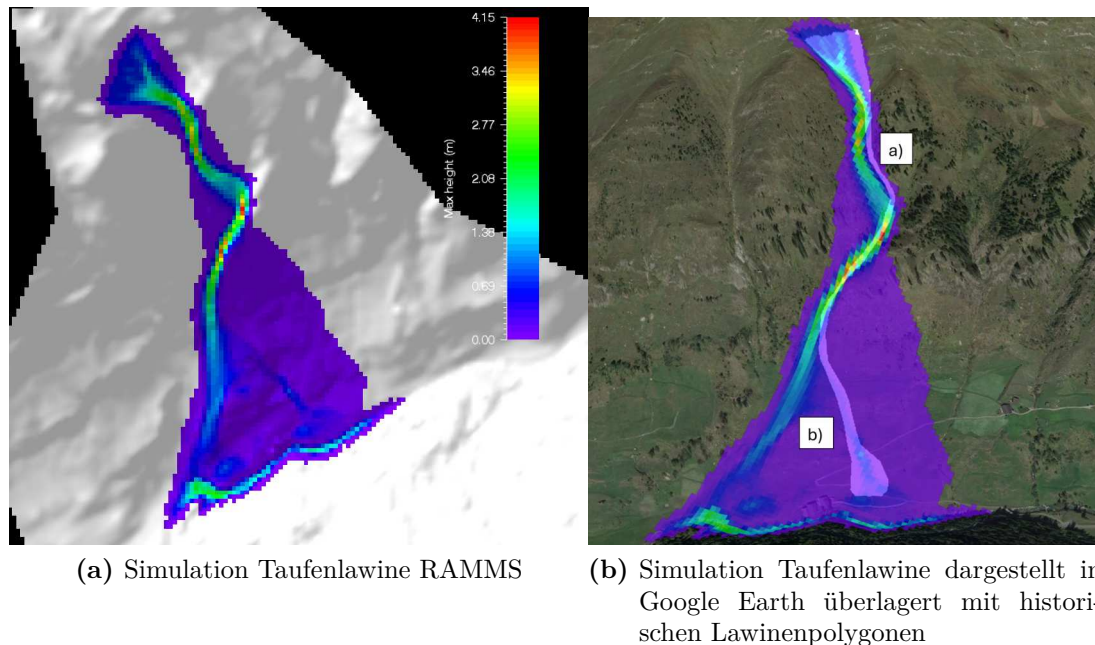


**Abbildung 5.11:** PRA-Gebiete Taufenlawine

Der Anrissbereich der Lawine war fast flächendeckend vom PRA-Layer abgedeckt (5.11), was die Zuverlässigkeit der PRA-Analyse bestätigt. Es ist jedoch möglich, dass der Anrissbereich



möglicherweise etwas höher oder breiter gewesen sein könnte. Die Lawine brach in einem Kessel an und die Sturzbahn verlief durch eine Rinne, was die Bewegung der Lawine kanalisiert hat. Die Ablagerungszone war fächerförmig und die Schneemassen waren knollig. Das Ablagerungsgebiet befand sich vor dem Pfelderer Bach, mit einer maximalen Länge von 150 Metern und einer Breite von 30 Metern. Die Lawine erreichte eine maximale Ablagerungshöhe von 2 Metern.



**Abbildung 5.12:** Darstellung der Simulation der Taufenlawine in RAMMS und Google Earth

Die Abbildung (5.12) zeigt die RAMMS-Simulation des Lawinenverlaufs. Die Simulation zeigt, dass die Lawine aufgrund des Momentums die Rinne leicht verlässt, was zu einer ersten Unstimmigkeit führt. In diesem Bereich, gekennzeichnet als a), weicht der simulierte Verlauf von der dokumentierten Sturzbahn ab.

Eine weitere signifikante Unstimmigkeit tritt auf, wenn die Lawine die Rinne verlässt b). Gemäß dem Lawinenpolygon fließt die Lawine weiter östlich und kommt vor dem Bach zum Stillstand. Die Simulation hingegen zeigt, dass die Lawine einen anderen Pfad nimmt und das Flussbett füllt. Dies steht im Widerspruch zu den dokumentierten Ablagerungszonen im Modell 7, das eine genaue Darstellung des Ablagerungsbereichs bietet. Ein kleiner Seitenpfad der RAMMS-Simulation folgt jedoch dem dokumentierten Lawinenumriss im Bereich.

## 6 Diskussion

Die berechneten Ergebnisse stellen eine theoretische Grundlage dar und können nicht vollständig auf die realen Weltverhältnisse übertragen werden. Dennoch bieten die PRA-Gebiete eine wertvolle Hilfe zur Identifizierung zukünftiger Lawenstriche, indem sie spezifische Geländeinformationen am Computer sichtbar machen. Außerdem ermöglichen sie die Überprüfung historischer Lawenereignisse, um zu bestimmen, ob deren Anrissgebiete in den generierten PRA-Bereichen liegen.

### 6.1 Diskussion der Methoden

#### 6.1.1 Waldbedeckung

Ein Beispiel für die Auswirkungen der Waldbedeckung auf die Identifikation potenzieller Lawenabgangsgebiete (PRA) zeigt sich darin, dass die Algorithmen stets auf die Waldverhältnisse von 2016 zurückgreifen. Diese Vorgehensweise kann zu Diskrepanzen führen, insbesondere bei sehr alten Lawen in tieferen Bereichen, wo sich die Waldverhältnisse über die Jahre verändert haben.

In einigen Bereichen erkennt man ein abruptes Ende der PRA-Gebiete. Beim Überlagern der Ergebnisse mit der Waldmaske wird deutlich, dass der Algorithmus die PRA genau entlang der Waldgrenze abgeschnitten hat. Der Code wurde jedoch nicht so entwickelt, dass er die Wald- oder Baumdichte sowie die verschiedenen Waldsituationen in den unterschiedlichen Jahren berücksichtigt. Dies könnte dazu führen, dass einige PRA-Gebiete nicht korrekt identifiziert werden und zu Unstimmigkeiten führen.

Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Verwendung von statischen Waldverhältnissen aus dem Jahr 2016 potenziell nicht die aktuellen oder historischen Waldverhältnisse reflektiert. Infolgedessen könnte die Genauigkeit der Identifikation potenzieller Lawenabgangsgebiete beeinträchtigt sein. Eine dynamischere Herangehensweise, die die Veränderungen der Waldverhältnisse über die Jahre berücksichtigt, könnte zu einer genaueren Modellierung und damit zu einer besseren Vorhersage der Lawenengefahr führen.

#### 6.1.2 Roughness

Die Größe des gleitenden Fensters beeinflusst, wie lokale oder regionale Topographie in die Analyse einbezogen wird. Kleinere Fenstergrößen (z.B. 3x3, 7x7) erfassen feinere Details und sind empfindlicher gegenüber kleinen topographischen Veränderungen. Sie eignen sich gut für die Analyse von Geländen, bei denen kleine Oberflächenstrukturen wie Felsblöcke, kleine Hänge oder Erosionsrinnen von Bedeutung sind (Grohmann et al., 2011). In solchen Fällen könnte eine kleinere Fenstergröße als 'gut' betrachtet werden, da sie die lokale Variabilität besser darstellt und damit genauere Informationen liefert. Größere Fenstergrößen (z.B. 11x11, 15x15) glätten lokale Unregelmäßigkeiten und bieten eine generalisierte Ansicht der Oberflächenrauheit. Sie sind vorteilhaft für die Untersuchung größerer und homogenerer Flächen, wo es wichtiger ist, übergreifende Trends statt lokaler Details zu verstehen (Grohmann et al., 2011).



Kleine Fenstergrößen (z.B. 3x3) sind im Allgemeinen weniger empfindlich gegenüber Änderungen der räumlichen Auflösung. Sie neigen dazu, ähnliche Rauheitswerte bei unterschiedlichen Auflösungen zu erzeugen. Große Fenstergrößen (z.B. 31x31, 51x51) werden stärker von der räumlichen Auflösung des DEM beeinflusst. Mit zunehmender Fenstergröße neigen die Rauheitswerte dazu, gemäß einer Potenzgesetzbeziehung zuzunehmen. Dieser Trend ist bei größeren Auflösungen deutlicher ausgeprägt (Grohmann et al., 2011).

Oft ist ein mittlerer Ansatz sinnvoll, um sowohl lokale Details als auch regionale Trends zu erfassen. Ein mittelgroßes Fenster (z.B. 7x7 oder 11x11) kann einen guten Kompromiss darstellen.

### **6.1.3 Windshelter oder Curvature**

Windshelter ist ein Index, der die durch Wind verursachte Schneeverfrachtung berücksichtigt. Dieser Index ist besonders nützlich in Gebieten, wo prädominante Windrichtungen bekannt sind und eine signifikante Rolle bei der Schneeverteilung spielen. Die Stärke des Windshelter-Ansatzes liegt in seiner Fähigkeit, mikroklimatische Variationen im Gelände zu modellieren, die zu unterschiedlichen Schneeanhäufungen führen können (Veitinger, 2015). Solche Anhäufungen können präzise Indikatoren für potenzielle Anrissgebiete von Lawinen sein.

Im Gegensatz dazu misst Curvature die Krümmung des Geländes. Positive Krümmungswerte (konvex) deuten auf Bereiche hin, die eher Schneetransport und -abtrag erfahren, während negative Krümmungswerte (konkav) auf Bereiche hinweisen, in denen Schnee eher angesammelt wird (Balmforth et al., 2001).

Die Auswahl zwischen diesen beiden Ansätzen sollte auf der spezifischen Geographie des Untersuchungsgebietes und der Verfügbarkeit von Daten basieren. In Gebieten mit starken, konsistenten Windmustern könnte der Windshelter-Index eine größere Relevanz haben, während in topographisch komplexen Regionen der Curvature-Index eine höhere Vorhersagekraft für Lawinenaktivitäten bieten könnte. Zukünftige Forschungen könnten darauf abzielen, die Kombination beider Indices zu untersuchen, um eine umfassendere Bewertung der Lawinengefahr zu ermöglichen, die sowohl die aerodynamischen als auch die topographischen Aspekte der Schneeverteilung berücksichtigt.

### **6.1.4 Veränderung der Eingabeparameter**

Bei der Analyse Abbildung 5.4 wurde untersucht, welche Eingabeparameter für Hangneigung, Rauheit und Windshelter die größte Übereinstimmung mit den von (Sykes et al., 2022) berechneten PRA-Gebieten aufweisen. Dies suggeriert, dass die nach Bühler berechneten PRA-Gebiete das Optimum darstellen.

Um eine größtmögliche Abdeckung zu gewährleisten, könnten die Eingabeparameter so weit gefasst werden, dass sie bis zum Schluss fast keinen Einfluss mehr auf die PRA-Gebiete haben und somit hinfällig wären. In diesem konkreten Fall war dies jedoch nicht so.

Es ist schwierig, über ein so großes Untersuchungsgebiet die bestmöglichen Eingabeparameter zu definieren. Deshalb wurde ein automatisierter Ansatz gewählt. Sonderfälle und spezielle topographische Gegebenheiten werden mit diesem Ansatz nicht berücksichtigt.

### **6.1.5 Verwendete Software zur Simulation**

Die RAMMS-Simulationen haben prinzipiell gut gepasst und zeigten eine einigermaßen gute Übereinstimmung mit den dokumentierten Lawinenpolygonen. Die Anrissbereiche und die

Sturzbahn der Lawine konnten größtenteils korrekt modelliert werden, was die Nützlichkeit der Simulationen unterstreicht. Allerdings wurden mit den in Modell 7 Aivena angegebenen Schneehöhen des Anrissbereichs Lawinen simuliert, die zu groß ausfielen. Dies führte dazu, dass die Ablagerungsbereiche in der Simulation nicht mehr genau mit den dokumentierten Ablagerungszonen übereinstimmten.

Aufgrund des Rahmens dieser Bachelorarbeit und des damit verbundenen Arbeitsaufwands war es nicht möglich, eine größere Anzahl von Simulationen durchzuführen. Für zukünftige Arbeiten wäre es sinnvoll, diesen Aspekt zu vertiefen, um die Modelle weiter zu verbessern.

## 6.2 Diskussion der Ergebnisse

Das Diagramm zeigt die Abdeckung der historischen Lawinenkataster durch die PRA-Flächen, unterteilt in die Kategorien  $<5\%$ ,  $5-10\%$ , und  $>10\%$ . Es wurden zwei Zeiträume betrachtet: vor Winter 2006/07 und nach Winter 2007/08.

Es gibt Aufschluss über die Lawenstriche und die Validität der PRA-Bereiche. Von den 104 verorteten Lawinenpolygonen befinden sich grundsätzlich 90 (69 vor 2007 und 11 nach 2008) in der Kategorie mit einer Abdeckung von über  $10\%$ . Dies bedeutet, dass diese Lawinenereignisse einen validierten Anrissbereich haben, was die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der berechneten PRA-Flächen unterstreicht.

### 1. $<5\%$ Abdeckung

In dieser Kategorie befinden sich 20 Lawinenpolygone aus dem Zeitraum vor 2007 und eines nach 2008. Die geringe Abdeckung könnte darauf hindeuten, dass diese Lawinenereignisse in Gebieten liegen, die heute durch Wald bedeckt sind. Dies könnte ein Grund sein, warum diese Polygone von den PRA-Flächen nicht erfasst werden. Ein weiteres mögliches Problem ist die potenziell ungenaue Verortung der historischen Polygone. Modell 7 Aivena liefert keine spezifischen Daten zu diesen Lawinenereignissen, was die Analyse weiter erschwert. Es fehlen detaillierte Informationen zu den genauen Bedingungen und Ursachen dieser Lawinen, was eine genaue Zuordnung erschwert.

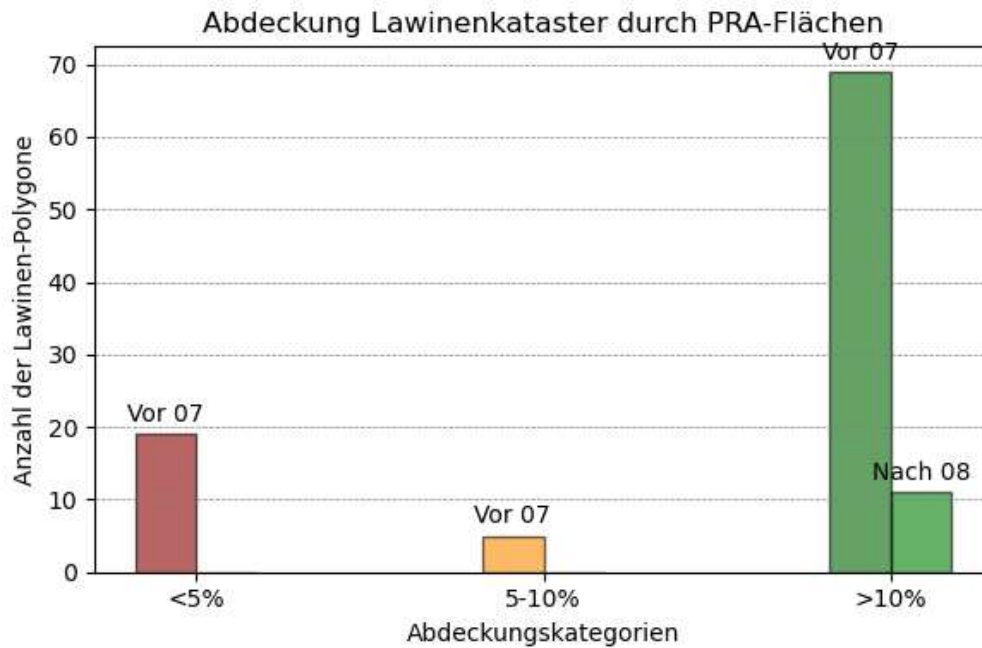
### 2. $5-10\%$ Abdeckung

Diese Kategorie umfasst fünf Lawinenpolygone aus der Zeit vor 2007. Dies zeigt, dass wenige historische Lawinenereignisse nur teilweise von den PRA-Flächen erfasst werden.

### 3. $>10\%$ Abdeckung

Hier befinden sich die meisten Lawinenpolygone. Vor 2007 sind es 69 Polygone, nach 2008 sind es alle 11 verzeichneten Polygone. Dies deutet darauf hin, dass die meisten historischen Lawinenereignisse gut durch die PRA-Flächen abgedeckt werden und von den Lawinenpolygonen, die nach dem Winter 07/08 aufgenommen wurden, überall das Anrissgebiete mindestens zu  $10\%$  von den berechneten PRA-Flächen überschneiden.

Das Diagramm zeigt, dass nur bei Lawinenereignissen vor dem Winter 06/07 Abdeckungen von weniger als  $10\%$  festgestellt wurden. Dies deutet darauf hin, dass sich die Aufnahmepräzision im Laufe der Zeit verändert haben könnte. Allerdings wurden von den Lawinen vor 06/07 insgesamt 93 Ereignisse dokumentiert, während es nach 2007 nur 11 Ereignisse sind, was den Vergleich schwierig macht. Zudem ist zu den Lawinen mit einer Abdeckung unter  $5\%$  keine spezifische Jahreszahl bekannt, was bedeutet, dass diese keine eindeutige Auskunft über die Aufnahmegenaugigkeit geben.



**Abbildung 6.1:** Visualisierung der Abdeckung der PRA-Flächen des Lawinenkatasters mit drei Kategorien.

ID	Abdeckung (%)	NAME_DE
1879	0.00	Gfeiser Mahder Lawine
1881	0.00	Baumannries Lawine
1051	0.00	Schlägeisen Lawine
1160	0.00	Fahrtleystal Lawine
1046	0.00	Jaufental Lawine
1216	0.00	Larcherrone Lawine
1237	0.00	Zetticher Lawine
1836	0.00	Dornries Lawine
1209	0.10	Bärwald Lawine
1203	0.12	Ober Glanegg 3 Lawine
1229	0.60	Fuchsloch Lawine
1202	0.66	Ober Glanegg 2 Lawine
1242	0.68	Rappental Lawine
1048	1.89	Bärental Lawine
1078	2.59	Plätzjaun Lawine
1211	2.70	Gasteig Lawine
1028	3.31	Streitegg 2 Lawine
1204	3.79	Federegg Lawine
1214	4.30	Magwald Lawine

**Tabelle 6.1:** Lawinen mit einer Abdeckung unter 5%

Die Analyse der ausgewählten Lawinenereignisse zeigt verschiedene Aspekte auf, die bei der Gefahrenkartierung und Simulationen von Lawinenabgangsgebieten (PRAs) berücksichtigt werden müssen.

- a) Gasteig Lawine: Diese Lawine liegt in einem Gebiet, in dem laut Orthofoto Wald vorhanden

ist. Dies deutet darauf hin, dass der Wald möglicherweise nicht dicht genug ist, um eine Lawine zu verhindern, oder dass der Wald im Laufe der Zeit seit dem Abgang der Lawine wieder aufgeforstet wurde.

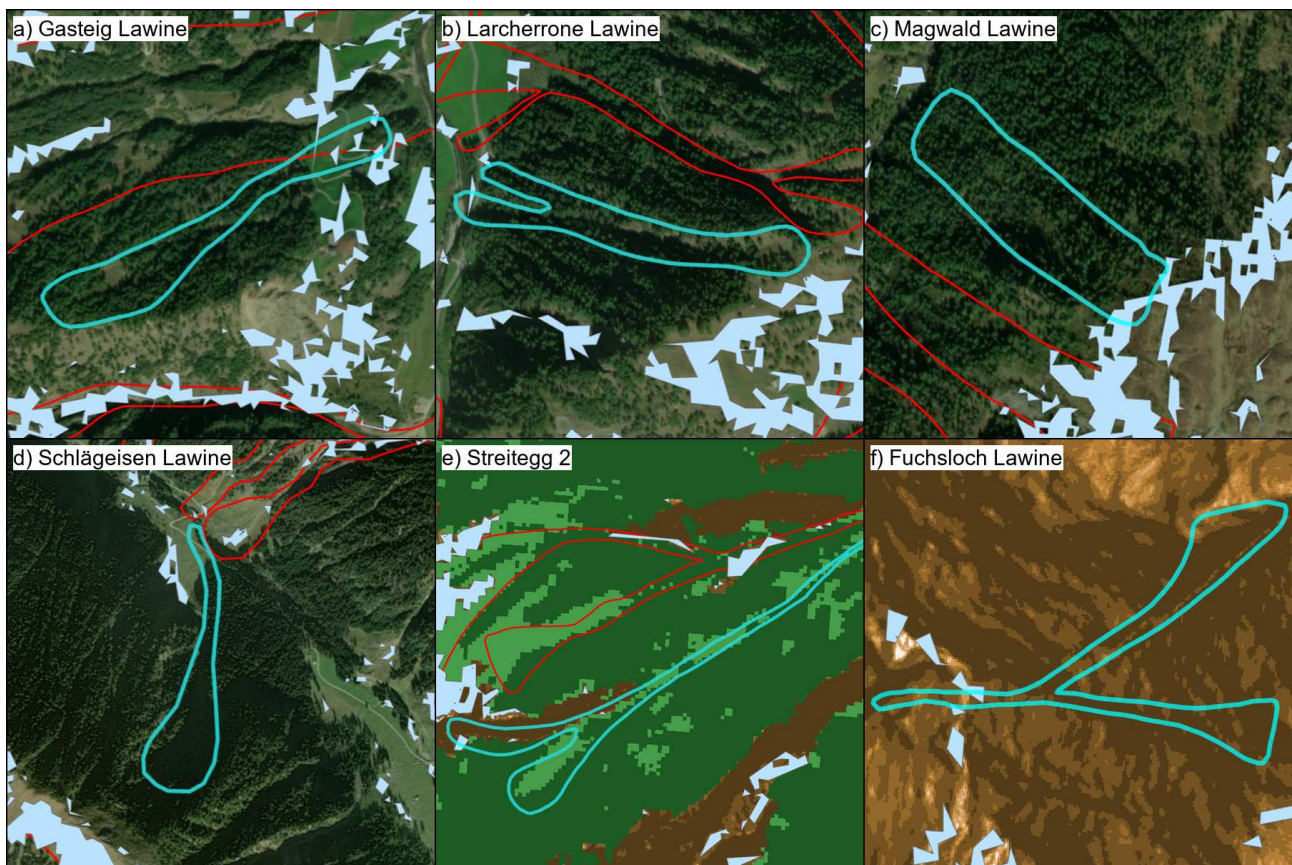
b) Larcherrone Lawine: In diesem Fall weist die Waldmaske das Gebiet als Wald aus, jedoch ist der Wald nicht dicht genug, um die Bildung von Lawinen zu verhindern. Diese Diskrepanz zeigt die Herausforderung bei der Definition und Klassifizierung von Waldgebieten in den Modellen. Es ist notwendig, nicht nur die bloße Anwesenheit von Bäumen, sondern auch die Dichte und Struktur des Waldes zu berücksichtigen, um die Lawinengefahr realistisch zu bewerten.

c) Magwald Lawine: Die Magwald Lawine hat ihren Anrissbereich entweder zu tief oder es gab früher weniger Wald in diesem Gebiet. Historische Vegetationsdaten könnten hier hilfreich sein, um die Modelle zu kalibrieren.

d) Schlägeisen Lawine: Ähnlich wie bei der Magwald Lawine liegt auch bei der Schlägeisen Lawine der Anrissbereich entweder zu tief oder der Wald war früher weniger dicht.

e) Streitegg 2: Dieses Gebiet ist eine Kombination aus Waldflächen, die als solche klassifiziert wurden, und hohen Steigungswerten (braun auf der Karte). Die Gebiete mit Steigungen über 60° werden von den PRA-Gebieten ausgeschlossen, weshalb hier keine Zuordnung zu PRA-Flächen stattfindet. Aufgrund der hohen Steigung und der Waldklassifizierung ist es unwahrscheinlich, dass in diesem Gelände eine Lawine abgegangen ist. Diese Diskrepanz deutet auf Ungenauigkeiten in der Aufnahme und Klassifizierung hin.

f) Fuchsloch Lawine: Die Fuchsloch Lawine befindet sich in einem Gebiet mit großflächig hohen Steigungswerten (über 60°, braun auf der Karte). Es handelt sich hierbei oft um Bereiche, in denen kleine Schneemassen abgehen können, jedoch nicht große Lawinen. Die Zuordnung zu PRA-Flächen wird durch diese extremen Steigungen und Waldflächen erschwert, was auf Ungenauigkeiten in der Aufnahme zurückzuführen sein kann.



**Abbildung 6.2:** Darstellung sechs ausgewählter Lawinen mit einer PRA-Abdeckung unter 5%.

## 7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Ergebnisse der Analyse der Lawinengefahr in Südtirol zusammengefasst und die Hauptfragen dieser Bachelorarbeit beantwortet. Der Fokus liegt dabei auf der Effektivität des bestehenden Lawinenkatasters, den Einfluss geomorphologischer Parameter sowie möglichen Verbesserungen der Methodik zur Erfassung und Analyse von Lawinenpolygonen.

### **1. Wie effektiv kann der bestehende Lawinenkataster der Autonomen Provinz Südtirol durch Identifikation und Kartierung potenzieller Lawinenabgangsgebiete (PRAs) verbessert werden?**

Der bestehende Lawinenkataster der Autonomen Provinz Südtirol deckt einen Großteil der potenziellen Lawinenabgangsgebiete (PRAs) gut ab. Es wurden jedoch 19 Lawinenereignisse identifiziert, die nicht durch die PRAs erfasst wurden. Dies könnte auf verschiedene Faktoren zurückzuführen sein, wie beispielsweise ungenaue oder fehlende Daten. Es gibt im Rahmen dieser Bachelorarbeit keine Möglichkeit zu validieren, ob an diesen Orten tatsächlich Lawinen abgegangen sind, sondern nur, ob diese Gebiete potenziell lawinengefährdet sind. Oftmals könnten die Anrissgebiete entweder kleiner oder größer sein als dokumentiert. Bei den 19 nicht erfassten Lawinen könnte analysiert werden, welche Faktoren dafür verantwortlich sind, dass diese nicht in den PRAs enthalten sind. Zukünftig könnte der PRA-Layer eine wertvolle Hilfe bei der Verzeichnung neuer Lawinenereignisse darstellen, indem er als zusätzliche Informationsquelle dient und die Genauigkeit der Dokumentation verbessert.

### **2. Welche geomorphologischen Parameter (z.B. Hangneigung, Rauheit des Geländes, Windschutz, Waldbedeckung) haben den größten Einfluss auf die Entstehung und Ausbreitung von Lawinen in Südtirol?**

Unter den geomorphologischen Parametern hat die Hangneigung den größten Einfluss auf die Entstehung und Ausbreitung von Lawinen. Lawinen ereignen sich typischerweise in Hängen mit einer Neigung zwischen  $30^\circ$  und  $45^\circ$  (de Quervain et al., 1981), da ab dieser Neigung die Scherfestigkeit des Schnees durch die Gravitation überschritten wird. Der Windshelter-Index ist ebenfalls ein wichtiger Faktor, besonders wenn die Hauptwindrichtung bekannt ist, allerdings könnte er für großangelegte Analysen weniger effektiv sein. Waldbedeckung spielt ebenfalls eine signifikante Rolle, da dichte Wälder die Bildung von Lawinen verhindern können. Eine genauere Analyse der Baumdichte wäre wünschenswert, da diese spezifische Information derzeit nicht ausreichend berücksichtigt wird. Die Rauheit des Geländes beeinflusst ebenfalls die Stabilität der Schneedecke, da ein niedriger Rauheitsindex die Homogenität der Schneedecke fördert und somit das Lawinenrisiko erhöht.

### **3. Welche Verbesserungen können an der bestehenden Methodik zur Erfassung und Analyse von Lawinenpolygonen vorgenommen werden, um eine präzisere Gefahrbewertung zu ermöglichen?**

Eine mögliche Verbesserung wäre die Integration des PRA-Layers und anschließender Simulationen, um einen Kompromiss zwischen Expertenwissen und technischen Modellen zu schaffen. Dies würde eine objektivere Bewertung und Validierung ermöglichen. Oftmals ist es schwierig, Lawinengebiete direkt vor Ort zu begutachten, da dies durch schlechte Wetterbedingungen erschwert wird. Eine umfassende Validierung und Verbesserung des alten Lawinenkatasters erfor-

dert weiterführende Arbeit und andere Ansätze, einschließlich umfangreicher Archivarbeit und detaillierter Geländeanalysen. Modelle allein sind hierfür nicht ausreichend, sie können jedoch helfen, potenzielle Anrissgebiete zu identifizieren und deren Wahrscheinlichkeit zu bewerten.

# Literaturverzeichnis

- ArcDoc (2024). *ArcInfo Online Help*. Environmental Systems Research Institute, Inc., version 3.2.2 service pack 1 edition.
- Balmforth, N. J., Provenzale, A., and Whitehead, J. A. (2001). *Geomorphological Fluid Mechanics*, volume 582 of *Lecture Notes in Physics*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 edition.
- Barbolini, M., Natale, L., and Savi, F. (2002). Effects of release conditions uncertainty on avalanche hazard mapping. *Natural Hazards*, 25:225–244.
- Barbolini, M., Pagliardi, M., Ferro, F., and Corradeghini, P. (2011). Avalanche hazard mapping over large undocumented areas. *Natural hazards*, 56(2):451–464.
- de Quervain, M. R. (1965). On avalanche classification, a further contribution. *Swiss Snow and Avalanche Research Institute, Weissfluhjoch, Davos*. Technical Report.
- de Quervain, M. R. et al. (1981). *Avalanche Atlas: Illustrated International Avalanche Classification*. Unesco.
- Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF) (1999). Neue berechnungsmethoden in der lawinengefahrenkartierung. Technical report, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, Switzerland.
- Evans, I. (1979). *An Integrated System of Terrain Analysis and Slope Mapping*. Department of Geography, University of Durham.
- for Snow, W. I. and SLF, A. R. (2022). *RAMMS::AVALANCHE User Manual*. Davos, Switzerland. Available at <https://ramms.slf.ch>.
- Grohmann, C. H., Smith, M. J., and Ellis, I. J. (2011). Influence of resolution and window size on terrain derivatives: Implications for digital terrain analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(1):492–503.
- Maggioni, M., Gruber, U., and Stoffel, A. (2002). Definition and characterisation of potenzial avalanche release areas. *Cold Regions Science and Technology*, pages 204–221.
- McClung, D. M. and Schaerer, P. A. (2009). *The Avalanche Handbook*. The Mountaineers Books, Seattle, WA, 3rd edition.
- Meister, R. (1989). Influence of strong winds on snow distribution and avalanche activity. *Annals of Glaciology*, 13:195–201.
- Pistocchi, A. and Notarnicola, C. (2013). Data-driven mapping of avalanche release areas: A case study in south tyrol, italy. *Natural Hazards*, 65.
- Plattner, C., Braun, L. N., and Brenning, A. (2004). The spatial variability of snow accumulation on vernagtfener, austrian alps, in winter 2003/2004. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 39:43–57.



- Quervain, M. d. and Meister, R. (1987). 50 years of snow profiles on the weissfluhjoch and relations to the surrounding avalanche activity (1936/37-1985/86). In *International Association of Hydrological Sciences Publication 162 (Symposium at Davos 1986 - Avalanche Formation, Movement and Effects)*, pages 161–181.
- Schmidt-Thomé, P. and Kallio, H. (2006). Natural and technological hazard maps of europe. pages 17–63.
- Schweizer, J., Bruce Jamieson, J., and Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics*, 41(4).
- Strunz, G. (2014). *Südtirol: Natur und Kultur zwischen Vinschgau und Dolomiten*. Trescher Verlag.
- Sykes, J., Haegeli, P., and Bühler, Y. (2022). Automated snow avalanche release area delineation in data-sparse, remote, and forested regions. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 22(10):3247–3270.
- Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A., and Bebi, P. (2012). Snow avalanches in forested terrain: Influence of forest parameters, topography, and avalanche characteristics on runout distance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44(4):509–519.
- Veitinger, J. (2015). *Release Areas of Snow Avalanches: New Methods and Parameters*. Dissertation zur erlangung der naturwissenschaftlichen doktorwürde (dr. sc. nat.), Universität Zürich, Zürich, Switzerland. Promotionskomitee: Prof. Dr. Ross Purves (Vorsitz), Dr. Betty Sovilla (Leitung der Dissertation), Prof. Dr. Robert Weibel.
- Veitinger, J., Purves, R., and Sovilla, B. (2016). Potential slab avalanche release area identification from estimated winter terrain: A multi-scale, fuzzy logic approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16:2211–2225.
- Voellmy, A. and Roch, A. (1955). *Über die Zerstörungskraft von Lawinen: L’Espacement des râteliers de retenue de la neige*. Schweizer. Bauzeitung.
- Winstral, A., Elder, K., and Davis, R. (2002). Spatial snow modeling of wind-redistributed snow using terrain-based parameters. *Journal of Hydrometeorology*, 3:524–538.
- Wood, J. (2015). The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models.