



**Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum  
für Wald, Naturgefahren und Landschaft**

Austrian Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape | <http://bfw.ac.at>

Projektbericht

# Evaluierung von Gefahrenbeurteilungsmethoden und deren Implikationen für die forstliche Raumplanung - EVAMETH

---

Institut für Naturgefahren  
Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft  
Hofburg - Rennweg 1  
6020 Innsbruck

Juni, 2015





Institut für Naturgefahren

Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft

Hofburg - Rennweg 1  
6020 Innsbruck

---

**Projektbericht:** Evaluierung von Gefahrenbeurteilungsmethoden und deren Implikationen für die forstliche Raumplanung - EVAMETH

**Projekt-Nr.:** 15030

**Projektleitung:** Dr. Jan-Thomas Fischer

**Autoren:** DI Andreas Huber, DI Elisabeth Hainzer, DI Andreas Kofler, Dr. Jan-Thomas Fischer, Mag. Reinhard Fromm

Die Durchführung der Arbeiten in diesem Projekt erfolgten in Abstimmung und Zusammenarbeit mit dem Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung - WLVB, Sektion Tirol, Stabstelle Schnee und Lawine - SSL, WLVB-GBL Mittleres Inntal, WLVB-GBL Osttirol, sowie den Gemeinden, zuständigen Waldaufsehern und den örtlichen Lawinenkommissionen in den untersuchten Projektgebieten.

Projektsbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft im Rahmen der technischen Hilfe des österreichischen Programms LE 07-13 mit Unterstützung von Bund, Ländern und der Europäischen Union.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Projektziele . . . . .	1
1.2	Berichtsstruktur . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Wechselwirkung Wald-Lawine</b>	<b>3</b>
2.1	Waldwirkung . . . . .	3
2.1.1	Wald in potentiellen Anbruchgebieten . . . . .	4
2.1.2	Wald in der Sturzbahn . . . . .	8
2.2	Aufnahme von Waldlawinen und Waldparametern im Feld . . . . .	9
2.3	Berücksichtigung von Wald in Lawinensimulationen . . . . .	11
2.3.1	Überblick bestehende Ansätze . . . . .	11
2.3.2	Simulationsansatz und Parameterbestimmung . . . . .	13
2.3.3	Anpassung Parameter $\mu, \tau_0$ für Kleinlawinen . . . . .	19
2.3.4	Untersuchung zum Waldparameter $c_{res}$ . . . . .	22
2.4	Probabilistische Simulation der Waldwirkung . . . . .	23
2.4.1	Testgebiete - Waldlawinen . . . . .	23
2.4.2	Probabilistisches Simulationskonzept . . . . .	26
2.4.3	Waldschutzwirkung in der Simulation . . . . .	27
2.5	Zusammenfassung . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Extremwertstatistik</b>	<b>31</b>
3.1	Analyse historischer Lawinenereignisse - Überblick . . . . .	31
3.2	Methodik zur Analyse historischer Zeitreihen in EVAMETH . . . . .	33
3.3	Anwendung für ausgesuchte Lawineneinzugsgebiete . . . . .	34
3.3.1	Vorstellung Einzugsgebiete . . . . .	34
3.3.2	Auswertung für ausgesuchte Einzugsgebiete . . . . .	37
3.4	Zusammenfassung . . . . .	38
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>47</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Aufnahmenformulare</b>	
A.1	Waldparameterwerte . . . . .	
A.2	Aufnahmenformular Stammzahl . . . . .	
A.3	Prant Lawine . . . . .	

- A.4 Berglet Lawine . . . . .
- B Visualisierung Geländeaufnahmen**
  - B.1 Prant Lawine . . . . .
  - B.2 Berglet Lawine . . . . .
- C Visualisierung Simulationsergebnisse**
  - C.1 Prant Lawine . . . . .
  - C.2 Berglet Lawine . . . . .
- D Extremwertstatistik - dokumentierte Ereignisse**
  - D.1 Durbach Lawine . . . . .
  - D.2 Moosbach Lawine . . . . .

# 1. Einleitung

Die Schaffung einer Schnittstelle zwischen der forstlichen Beurteilung der Schutzwirkung des Waldes (Frehner et al., 2005; Perzl, 2005; Perzl und Walter, 2012; BMLFUW, 2013) und gängigen Methoden zur lokalen Gefahrenbeurteilung von Lawinen, insbesondere physikalisch-numerische Prozessmodelle (z.B. Zwinger, 2000; Sampl, 2007), erscheint von besonderem praktischen Interesse. Information zur Schutzwirksamkeit von Waldbeständen in potentiellen Lawinenanbruchgebieten sind relevant für die Ausweisung von Anbruchgebieten. Für die simulationsbasierte Gefahrenbeurteilung sind zudem auch Informationen über eine mögliche Bremswirkung des Waldes von Interesse. Besonders im Hinblick auf die Beurteilung von kleineren Lawinenereignissen mit höheren Auftretensfrequenzen erscheint eine Berücksichtigung der möglichen Bremswirkung des Waldes in der Sturzbahn interessant.

Hinsichtlich der Schutzwirksamkeit des Waldes als biologische Anbruchverbauung und insbesondere der Interaktion von Lawinen mit Waldbeständen in der Lawinenbahn und dem Ablagerungsgebiet bestehen aus wissenschaftlicher Sicht noch offene Fragen. Dies belegen nicht zuletzt aktuelle wissenschaftliche Arbeiten. Annahmen hinsichtlich der Schutzwirkung des Waldes im Anbruchgebiet und vor allem in der Sturzbahn gehen dementsprechend mit Unsicherheiten einher. Diesem Umstand muss bei einer Integration dieser Informationen in die physikalisch-numerische Beurteilung der Lawinengefahr Rechnung getragen werden. Die Behandlung und Darstellung von Unsicherheiten in der Lawinensimulation stellt deshalb einen weiteren wichtigen Punkt dar.

## 1.1 Projektziele

Ziel des Projektes ist die Untersuchung ergänzender Methoden zur Beurteilung von Naturgefahrenprozessen auf verschiedenen Ebenen der forstlichen Raumplanung (GZP, WEP, etc.) am Beispiel von Lawinen. Die untersuchten Methoden basieren auf statistischen und probabilistischen Analysen. Insbesondere können folgende Ziele identifiziert werden:

1. Zusammenfassung von bestehenden Ansätzen zur Bestimmung der Schutzwirksamkeit von Waldbeständen gegen Lawinen im Anbruchgebiet und der Sturzbahn und Bestimmung von Waldparametern, welche die Schutzwirksamkeit des Waldes beschreiben. Erhebung relevanter Waldparameter für ausgesuchte Untersuchungsgebiete.
2. Untersuchung der Möglichkeit die Waldschutzwirkung in bestehende physikalisch-numerische Instrumente zur Gefahrenbeurteilung zu integrieren.
3. Untersuchung der Anwendbarkeit extremwerttheoretischer Ansätze für die Analyse dokumentierter Lawinenereignisse. Auswertungen zu dokumentierten Lawinenereignissen können als zusätzliche Information für die Gefahrenbeurteilung herangezogen werden. Insbesondere wird angestrebt mittels extremwerttheoretischer Methoden Aussagen über die Magnitude-Frequenz Beziehung von Ereignissen in gut dokumentierten Lawineneinzugsgebieten zu treffen.

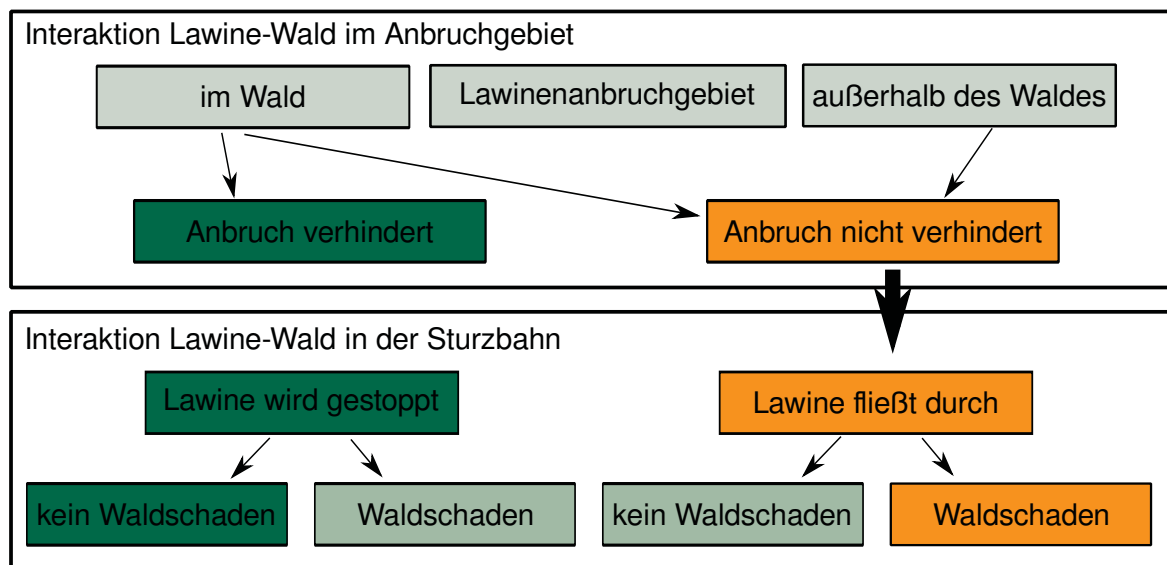
4. Abschließend wird auf Basis der durchgeführten Arbeiten der mögliche Mehrwert der vorgestellten Methoden für die Gefahrenbeurteilung diskutiert.

## 1.2 Berichtsstruktur

Kapitel 2 gibt einen Überblick über die Wechselwirkung zwischen Lawine und Wald unter Bezugnahme auf zu diesem Thema durchgeführte Untersuchungen und Arbeiten. Zudem wird die Berücksichtigung von der Waldwirkung in der physikalisch-numerischen Lawinensimulation beleuchtet, und an Hand von zwei Untersuchungsgebieten die Integration der Waldwirkung in der Lawinensimulation beispielhaft dargelegt. In Kapitel 3 wird an Hand von drei Lawineneinzugsgebieten eine extremwerttheoretische Auswertung von dokumentierten Lawinenausläuflängen vorgestellt. Abschließend diskutiert Kapitel 4 die Anwendbarkeit der vorgestellten Methoden im Kontext der praktischen Gefahrenbeurteilung für Lawinen und zeigt die Möglichkeiten und Limitationen der verwendeten Methoden auf.

## 2. Wechselwirkung Wald-Lawine

In Regionen mit hoher Reliefenergie übernehmen Waldbestände wichtige Funktionen zum Schutz vor Naturgefahren. So können Waldbestände unter Anderem die Entstehung, Größe und teilweise auch Reichweite von Lawinen wesentlich beeinflussen (Nairz et al., 2011). Diese Eigenschaften des Waldes spielen eine tragende Rolle für den Schutz von Lebensraum in alpinen Regionen und damit für dessen dauerhafte Besiedelung. Lawinen und Wald stehen dabei in einer Wechselwirkung. Die Struktur und Zusammensetzung des Waldbestandes beeinflussen einerseits die Lawinenaktivität, andererseits hat die Lawinenaktivität ihrerseits Einfluss auf die Waldzusammensetzung und -struktur (Bebi et al., 2009).



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung der Interaktion zwischen Lawine und Wald in potentiellen Lawinenanbruchgebieten und Lawinensturzbahnen (verändert nach De Quervain, 1978; Margreth, 2004).

### 2.1 Waldwirkung

Nach Margreth (2004) beruht die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen insbesondere auf der Verhinderung von Lawinenanbrüchen im bewaldeten Gebiet. Eine mögliche bremsende Wirkung des Waldes auf sich in Bewegung befindliche Lawinen hängt von Faktoren wie der Lawinengröße und -intensität, der räumlichen Lage des Anbruchgebietes und der Distanz zum Bestand und den Fließeigenschaften der Lawine ab (z.B. Margreth, 2004; Feistl et al., 2014). Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht über die möglichen Wechselwirkungen zwischen Wald und Lawine, nähere Details dazu sind im folgenden angeführt.

### 2.1.1 Wald in potentiellen Anbruchgebieten

Die Fähigkeit eines gut strukturierten Lawinenschutzwaldes besteht darin, den Anriss von Lawinen zu verhindern. Demzufolge finden sich Lawinenschutzwälder im potenziellen Anrissgebiet von Lawinen, also in Steillagen. Als potentielle Anbruchgebiete können annäherungsweise Hänge mit einer Neigung zwischen  $28^\circ$  und  $55^\circ$  angegeben werden. Die Grunddisposition für die Naturgefahr Lawine wird zudem durch zusätzliche Standortfaktoren wie Exposition, Geländeform und Rauigkeit bestimmt. Als variable Faktoren nehmen Neuschneemenge, Temperatur, Windverhältnisse und in weiterer Folge der Schneedeckenaufbau Einfluss auf die Lawinenbildung (Nairz et al., 2011).

Im Bereich der hochmontanen bis subalpinen Nadelwälder (zwischen 1,600 m und 2,200 m SH) brechen, nach Beobachtungen in der Schweiz (vgl. Mayer und Ott, 1991), Walddlawinen überwiegend in den Expositionen NO bis NW. Es treten primär trockene Schneebrettlawinen auf. Für den Bereich der unter- bis obermontanen Laub- und Mischwälder ( $< 1,200$  m SH) sind Gleitschneelawinen und feuchte Lockerschneelawinen charakteristisch, deren Anbruchflächen sich an südexponierten Hängen befinden. Nahe der Waldgrenze wird die Waldstruktur vermehrt durch Öffnungen im Bestand gebildet; Das bedeutet, dass der Deckungsgrad und in weiterer Folge auch die Lawinenschutzwirkung abnimmt. Brechen Lawinen oberhalb der potentiellen Waldgrenze an, so ist das Aufkommen von Bestand oft auf seltener gestörte Standorte wie z.B. Geländerrücken limitiert (Frehner et al., 2005).

#### Schutzwirkung des Waldes

Es gibt vielerlei Gründe warum Wald als effektiver und kostengünstiger Lawinenschutz bezeichnet werden kann. Wald stabilisiert in potentiellen Lawinenanbruchgebieten die Schneedecke, ein Anreißen von Lawinen kann bei entsprechender Ausstattung des Waldes verhindert werden. Die wichtigsten Einflüsse, welche der Wald auf die Schneedeckenstabilität und Lawinengefahr hat, sind:

- Interzeptionswirkung des immergrünen Nadelwaldes
  - Einfluss auf die Schneeverteilung
  - Einfluss auf den Aufbau der Schneedecke
- Einfluss auf den Energiehaushalt der Schneedecke (Ein- und Ausstrahlung)
  - Reduzierte Bildung von Oberflächenreif in Bestandsflächen
- Mechanische Stabilisierung der Schneedecke durch die Stämme

Aufgrund von Interzeption wird ein Teil des Niederschlages im Kronendach zurückgehalten und evaporiert. Der Rest fällt nachträglich als Schneeklumpen oder Schmelzwasser zu Boden. Dadurch weist die Schneedecke im Wald eine geringere Mächtigkeit auf und ist zudem stärker strukturiert als im Freiland. Bestenfalls spricht man von einem inhomogenen Schneedeckenaufbau, d.h. die natürliche Schneedeckenstabilität im Wald ist gegenüber dem Freiland wesentlich erhöht.



Das Mikroklima ist in einem dichten wintergrünen Wald wesentlich ausgeglichener als im Freiland. Das lässt sich daraus erklären, dass sowohl die Erwärmung der Schneedecke während des Tages als auch die Abkühlung in der Nacht kleiner sind. Im Vergleich zum Freiland kommt es daher weniger häufig zur Bildung von Oberflächenreif, welcher die Basis zur Bildung gefährlicher Schwachschichten ist. Auch eine reduzierte Schwimmschneebildung ist deutlich feststellbar.

Eine natürliche Stabilisierung der Schneedecke ist durch die Stämme gegeben, da sie die Schneedecke punktuell abstützen. Jedoch kann eine Stützwirkung hinsichtlich der Gefahrenbeurteilung nur dann berücksichtigt werden, wenn eine Verjüngung von Altbeständen rechtzeitig gegeben ist. Ebenso muss der Negativeinfluss von niedrig beziehungsweise völlig überschneiten Bäumen (z.B. *Pinus mugo* subsp. *mugo*, *Alnus viridis*) berücksichtigt werden, welche die Lawinenbildung fördern können (Margreth, 2004).

### Anforderungen an den Lawinenschutzwald

Der Funktionsgrad eines Waldes und damit dessen Anforderungsprofil an die Waldstruktur, um die Entstehung von Lawinenanbrüchen im Wald zu verhindern, sind abhängig vom erwarteten Schutzziel, dem vorhandenen Schadenspotential wie auch der Nähe der Schutzwaldflächen zum Dauersiedlungsraum (direkte Objektschutzwirkung) (Margreth, 2004; Teich, 2013).

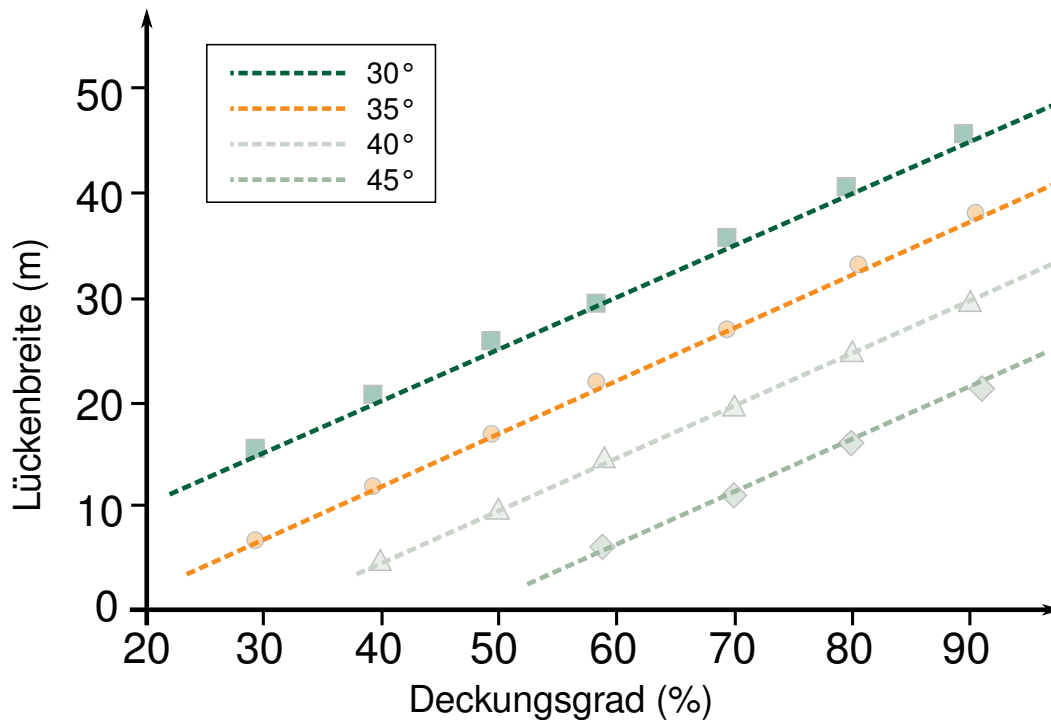
Die allgemeine Faustregel *„Bei einem Kronendeckungsgrad von 50 % und einer Hangneigung von 35° wird bis zu einer Lückenbreite von 15 m die Lawinenauslösung als sehr unwahrscheinlich angesehen.“* findet sich in mehreren Publikationen (z.B. BUWAL, 1996; Hotter et al., 2013). Um beantworten zu können welche Anforderungen ein Wald hinsichtlich Baumart und Bestandesstruktur zu erfüllen hat, damit Lawinenereignisse verhindert oder eingeschränkt werden können, bedarf es einer näheren Betrachtung der einzelnen Waldparameter. Eine statistische Auswertung von Waldlawinenereignissen (Datenzeitreihe 1985 – 1990) mit Fokus auf Waldstrukturparameter wurde am SLF durchgeführt (Meyer-Grass und Schneebeili, 1992). Die Ergebnisse zeigen, dass in Bezug auf Waldtypen immergrüne Baumarten die höchste Schutzwirksamkeit gegenüber Lawinenanbrüchen aufweisen, wobei im Unterschied zu Gubler und Rychetnik (1991) Lärchenbestände eine ähnliche Wirkung zeigen. Für Bereiche über 1,600 m SH kann nachgewiesen werden, dass die Dichte eines Bestandes einen wesentlich größeren Einfluss auf das Anbrechen von Lawinen im Wald einnimmt, als über den Waldtyp abgebildet werden kann. Nachfolgende Tabelle zeigt das Ergebnis der statistischen Auswertung untersuchter Waldparameter und die daraus abgeleiteten Grenzwerte für Neigung, Überschirmungsgrad, Stammzahlen pro Hektar und Lückenbreite, differenziert nach fünf Waldtypen in der Schweiz.

Bedingt durch die relativ kurze Datenzeitreihe und der Tatsache, dass Daten zu Extremereignissen fehlen, wird darauf verwiesen, dass die festgelegten Grenzwerte ihren Gültigkeitsbereich bei Lawinen mittleren Schadensausmaßes haben. Für Lawinenabgänge unter extremen Witterungsbedingungen bedarf es einer Überprüfung beziehungsweise Anpassung der definierten Grenzwerte (Meyer-Grass und Schneebeili, 1992).

Welche Waldparameter des weiteren Einfluss auf das Anbrechen von Lawinen nehmen, können vornehmlich Schweizer Forschungsergebnisse entnommen werden. Schneebeili und Bebi

**Tabelle 2.1:** Grenzwerte für Waldparameter differenziert nach Waldtyp (nach: Meyer-Grass und Schneebeli, 1992). Waldtypen: 1: Laubwald, 2: Laub-Nadel Mischwald, 3: immergrüner Nadelwald (Fichte), 4: Fichten-Lärchen Mischwald, 5: reiner Lärchenwald

Parameter	Waldtyp				
	1	2	3	4	5
Hangneigung [°]	> 38	> 42	> 38	> 35	> 32
Deckungsgrad [%]	< 80	< 70	< 35	< 30	< 35
Stammzahl/ha (BHD $\geq$ 16 cm)	< 450	< 280	< 190	< 200	< 180
Lückebreite [m]	> 5	> 5	> 10	> 10	> 10



**Abbildung 2.2:** Kritische Lückebreiten in Abhängigkeit der Hangneigung und des Deckungsgrades (nach: Schneebeli und Bebi, 2004)

(2004) zeigen die Beziehung zwischen Lückebreite und Kronendeckungsgrad für mehrere Hangneigungen auf, basierend auf einer multivariaten Analyse von 112 Lawinenanbrüchen in subalpinen Nadelwäldern (Abbildung 2.2).

Im Rahmen von NaiS (Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald) wurden waldbauliche Anforderungsprofile, differenziert nach Waldstrukturtypen und Naturgefahren, beschrieben (Frehner et al., 2005). Die Autoren fassen wissenschaftliche Untersuchungen zusammen und leiten daraus Handlungsempfehlungen für die Forstpraxis ab. Für ein Anforderungsprofil an Schutzwaldbestände zur Verhinderung von Lawinenanbrüchen wird auf Frehner et al. (2005, Anhang 1 S.3 ff.) verwiesen.

Für Tirol werden waldbauliche Anforderungsprofile für die verschiedenen Waldstandorte und

Naturgefahren im Waldtypenkatalog der "Waldtypisierung Tirol" (Hotter et al., 2013) beschrieben. Die Empfehlungen zur Schutzwaldpflege sind ausgerichtet auf Standortverhältnisse und Stabilitätsanforderungen bei Naturgefahren.

### Beurteilung der Schutzwirkung

Im Zuge der Gefahrenbeurteilung für den raumrelevanten Bereich (GZP) wird die Schutzwirkung von Wald bislang gutachterlich beurteilt (vgl. BMLFUW, 2011). Neben der Erfassung von Indikatoren am Standort (örtliche Gegebenheiten - Grunddisposition), werden für die Beurteilung von Bestandesstrukturen und in weitere Folge der Bewertung von Anbruchwahrscheinlichkeiten in erster Linie Schlüsselgrößen wie Kronendeckungsgrad, Stammzahl pro Hektar, Lückenlänge und -breite oder Baumhöhe herangezogen.

Über die Zusammenführung wissenschaftlicher Erkenntnisse wurde von (Perzl, 2005) eine praxisnahe Faustformel zur Beurteilung der Lawinenschutzwirkung von Wäldern entwickelt. Die Ansprache weniger topographischer und forstlicher Parameter erlaubt eine vereinfachte Bewertung der Schutzwirkung von Wald in potentiellen Lawinenanbruchgebieten. Im Folgenden wird auf die Bestimmung der Waldstrukturparameter eingegangen.

Die effektive Baumhöhe, damit gemeint ist die wirksame Baumhöhe für den Lawinenanbruchschutz, kann bestimmt werden über die effektive Schneedeckenhöhe und ist abhängig von Hangneigung und Bodenrauigkeit. In Anlehnung an die Faustregel von Saeki und Matsuoka (1969), welche besagt dass die mittlere Baumhöhe in etwa das 1.5 bis 2-fache der Schneedeckenhöhe betragen muss, wird nach Perzl (2005) für die effektive Schneedeckenhöhe die mittlere maximale Schneedeckenhöhe um den Faktor 2.2 multipliziert.

Ein Bestand kann als schutzwirksam gegenüber Lawinenanbrüchen beschrieben werden, wenn der wintergrüne Überschirmungsgrad über 50 – 60 % liegt und eine regelmäßige Verteilung mit Bäumen ab der effektiven Baumhöhe vorliegt. Bei einem Überschirmungsgrad < 50 % (Lärchenbestand, Blößen, usw.) ist nach (Perzl, 2005) für die Beurteilung der Schutzwirksamkeit die Bestandesdichte (Stammzahl / ha) heranzuziehen. Eine Übersicht erforderlicher Stammzahlen gegen Lawinenanbruch findet sich in (Perzl, 2005).

Für die Anschätzung des Stützbereiches vorhandener Rauigkeitselemente wie Baumstämme, usw. und in weiterer Folge der Beurteilung der Schutzwirkung gegen Lawinenanbruch wurde nach (Perzl, 2005) ein Index definiert. Dabei wird die Stützwirksamkeit der Rauigkeitselemente in Abhängigkeit von deren Höhe zur effektiven Höhe (Soll-Höhe) für den Lawinenschutz gebracht. Liegt eine regelmäßige räumliche Verteilung verschiedener Rauigkeitselemente vor, so können deren Stützbereiche vereinfacht addiert werden. Die Schutzwirkung gegen Lawinenanbruch lässt sich somit beschreiben über:

$$SW_{LA} = \sum STF_{LA}/10.000 \text{ [m}^2/\text{ha]} \quad (2.1.1)$$

wobei:

$SW_{LA}$  ... Schutzwirkung gegen Lawinenanbruch  $[0, \dots, 1, (> 1)]$   
 $STF_{LA}$  ... wirksame Stützfläche gegen Lawinenanbruch  $[\text{m}^2/\text{ha}]$

Ein Wert für  $SW_{LA}$  von 1 kennzeichnet eine hohe Schutzwirkung eines Bestandes gegen Lawinenanbrüche, ein Wert von 0 entspricht keiner vorhandenen Schutzwirkung. Liegt der Wert für  $SW_{LA}$  über 1, wird dadurch ausgedrückt, dass der Anteil der abgestützten Schneedecke über der erforderlichen abgestützten Schneedecke (schutzwirksamen Fläche) liegt. Mit Bezug auf die Stützwirkung von Stämmen wird festgehalten, dass bei bis zum Boden bekronten Nadelbäumen nicht der BHD zur Schätzung der Stützfläche verwendet werden sollte. Vielmehr muss davon ausgegangen werden, dass durch bodennahe Äste der Stützbereich auf ca. zwei Drittel der Kronenbreite erweitert wird.

Die Lückengröße innerhalb eines Bestandes gibt Aufschluss über das Ausmaß der Schneebewegungen. Eine Hilfestellung hinsichtlich der Beurteilung zulässiger Lücken- und Schlagbreiten findet sich, wie im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, in [Schneebeili und Bebi \(2004\)](#).

### 2.1.2 Wald in der Sturzbahn

Während die Schutzwirksamkeit dichter Waldbestände für die Verhinderung von Lawinenanbrüchen in potentiellen Lawinenanbruchgebieten als anerkannt gilt (vgl. [Nairz et al., 2011](#)), muss die mögliche Bremswirkung von Waldbeständen auf sich in Bewegung befindliche Lawinen differenzierter betrachtet werden. Die Möglichkeit von Waldbeständen Lawinen, die oberhalb der Waldgrenze anbrechen, abzubremsen und zu stoppen ist begrenzt ([Feistl et al., 2014](#)). Die Bäume können hier oft den dynamischen Kräften von großen, sich schnell bewegenden Lawinen nicht standhalten und werden gebrochen oder entwurzelt ([De Quervain, 1978](#); [Margreth, 2004](#)). Im Vergleich zur gesamten Fließenergie großer Lawinen ist die Energie, die für das Brechen und Entwurzeln der Bäume oder für die Aufnahme der Bruchstücke in die Lawinenmasse notwendig ist, vergleichbar gering ([Bartelt und Stockli, 2001](#)). Speziell auf steilen Waldflächen kommt es durch umstürzende Bäume unter Umständen sogar zu einer Rückführung von Energie in die Lawine, und das mitgeführte Holz kann die Gefährlichkeit der Lawine gegen Bauwerke noch erhöhen ([De Quervain, 1978](#)).

Eine maßgebliche Bremswirkung von Waldbeständen in der Lawinenbahn wird meist nur für kleine bis mittlere Lawinenereignisse (Lawinen mit einer Anbruchmasse bis  $\leq 10000 \text{ m}^3$ ) unterstellt ([Gubler und Rychetnik, 1991](#); [Schneebeili und Bebi, 2004](#); [Teich et al., 2012](#)). Auch bei größeren Lawinen kann der Wald durchaus dazu in der Lage sein, Lawinengeschwindigkeiten und Auslauflängen zu vermindern (z.B. [Takeuchi et al., 2011](#)) jedoch kann es dabei zu einer teilweisen oder ganzen Zerstörung des Bestandes kommen ("Einmal-Schutzwirkung"), der die Schutzwirksamkeit des Waldes für mögliche nachfolgende Ereignisse herabsetzt.

Entscheidend für die mögliche Bremswirkung des Waldes für kleine und mittlere Ereignisse sind, neben der Lawinengröße, Faktoren wie die Lage des Anbruchgebietes im Verhältnis zum Wald (im Wald, oberhalb des Waldes, Lauflänge der Lawine bis zum ersten Auftreffen auf eine bestockte Fläche), die Art und Zusammensetzung des Bestandes und spezifische Fließeneigenschaften der Lawine ([Feistl et al., 2015](#)), aber auch Einflüsse der zugrunde liegenden Topographie ([Frehner et al., 2005](#)).

[Schneebeili und Bebi \(2004\)](#) geben an, dass die meisten Lawinen, welche mehr als 150 m oberhalb des Waldes anbrechen, auch genügend Energie besitzen um Bäume zu brechen oder zu entwurzeln. Ähnlich dazu wird auch die kritische Länge für Bestandeslücken von verschiedenen Autoren in der Größenordnung zwischen 30 und 150 m angegeben (z.B. [Gubler und Rychetnik, 1991](#); [Weir, 2002](#); [Bebi et al., 2009](#)). Die Schadbilder (Stammbruch, Entwurzelung) sind

abhängig von der Baumart, Baumhöhe, dem Stammdurchmesser und dem Schneedruck, sowie der maßgeblichen Lawinenwirkung (Staublawine, Fließanteil) (De Quervain, 1978; Teich, 2013).

In den letzten Jahren hat ein gesteigertes Interesse an der Gefahrenbeurteilung für häufiger auftretende, kleine und mittlere Lawinen, welche für die Gefährdung von Personen in Ski-gebieten oder entlang von Straßen und Bahngleisen ausreichend sind (Dreier et al., 2014), dazu geführt, dass die bis dato nicht näher untersuchte Bremswirkung von Wald auf Lawinen dieser Größenordnung (vgl. Bebi et al., 2009) vermehrt in den Fokus von wissenschaftlichen Arbeiten getreten ist (z.B. Teich et al., 2012, 2014; Feistl et al., 2014).

Nach Teich et al. (2012) können Waldbestände auch auf größere Lawinen, mit einer Lauf-länge von bis zu maximal 700 Metern vor dem Auftreffen auf den Wald, bremsend wirken. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass *Walddlawinen* (d.h. Lawinen, welche im Wald anbrechen) und Lawinen, die außerhalb beziehungsweise oberhalb des Waldes anbrechen, auch hinsichtlich der möglichen Bremswirkung des Waldes getrennt angesprochen werden sollten. Speziell für Lawinen, die innerhalb oder knapp oberhalb des Waldes anbrechen, spielt die Bestandesdichte eine wesentliche Rolle für das Abbremsen von bereits angebrochenen Lawinen.

## 2.2 Aufnahme von Walddlawinen und Waldparametern im Feld

Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, hängt die Schutzwirkung des Waldes maßgebend von der Struktur und Beschaffenheit des Bestandes ab. Daher ist für die Beurteilung der Waldschutzwirkung, beispielsweise in der Lawinensimulation die Kenntnis des Waldzustandes von Bedeutung.

Im Rahmen des Projektes sind im Juni 2015 im Gemeindegebiet von Innervillgraten (Bezirk Lienz) zwei Walddlawinenereignisse für die Lawinensimulation erfasst worden. Die Ergebnisse der Geländeaufnahmen (vgl. Anhang A.3 und A.4), beziehungsweise die im Gelände erfassten Größen und Parameter bilden die Grundlage der im Kapitel 2.4 beschriebenen Einzugsgebiete der Prant Lawine und der Berglet Lawine und gehen als Eingangsgrößen in die probabilistische Simulation (vgl. Abschnitt 2.4.2) ein.

Als Dokumentationsgrundlage ist ein Aufnahmeformular mit Fokus auf Walddlawinenereignisse entwickelt worden (vgl. Anhang A.1), mit dem die topographischen Gegebenheiten und die Struktur des Waldes erfasst werden können. Darüber kann ermittelt werden, wie der Wald zum Zeitpunkt des jeweiligen Ereignisses strukturell aufgebaut war und somit sollte ein Rückschluss möglich sein, welche Parameter Einfluss auf das Anbrechen der Lawine hatte beziehungsweise die Bremswirkung in der Sturzbahn beeinflusste.

Das Aufnahmeformular gliedert sich im Wesentlichen in drei Abschnitte. Neben der geographischen Lage, wird das Lawinenereignis dokumentiert und die Waldflächen innerhalb des zugehörigen Abbruchgebietes sowie der Sturzbahn aufgenommen. Die Beschreibung des Lawinenereignisses orientiert sich am 5 W-Standard (vgl. Walter et al., 2012), die verwendeten Fachbegriffe beziehen sich auf die ONR-24805 (2010). Die verwendete Klassifizierung zu den ereignisbezogenen und forstlichen Parametern des Aufnahmeformulars findet sich in Anhang A.1 des vorliegenden Berichtes. Die Grundlage für die Auswahl der Parameter, welche in Bezug auf die Waldschutzwirkung relevant sind und daher in das Formular aufgenommen



(a) Zählung der Stammzahl in der Sturzbahn der Prant Lawine (b) teilverbautes Anbruchgebiet der Berglet Lawine

**Abbildung 2.3:** Felderhebung Innervillgraten, Lawinen Prant und Berglet

wurden, bilden die Arbeiten nach [Teich et al. \(2012, 2014\)](#); [Feistl et al. \(2014\)](#) und [BMLFUW \(2013\)](#). Da ein Waldbestand innerhalb eines Lawineneinzugsgebietes unterschiedliche Anforderungen zu erfüllen hat, werden im Aufnahmeformular die Waldstrukturparameter nach Lawinenanbruchgebiet und Sturzbahn differenziert betrachtet. Beispielsweise können immergrüne Nadelwälder ohne größere Lücken zwar den Anriss von Lawinen durch ihre Interzeptionswirkung wirkungsvoll verhindern, aber eine ausgelöste Lawine vermögen sie im Transit- und Ablagerungsbereich durch ihre Wurzelbeschaffenheit nicht oder nur ungenügend zu bremsen.

Die Anbruchgebiete der beiden aufgenommenen Lawinen können aufbauend auf die Erhebung nach dem eingeführten Aufnahmeblatt, begründet durch deren aktuellen Bestandesaufbau, als Homogenflächen beschrieben werden. Die selbe Annahme ist für die Sturzbahnen gültig. Innerhalb der Homogenflächen des Projektgebietes wurden repräsentative Flächen ausgewiesen, in den Aufnahmeblättern (Anhang [B.1](#) und [B.2](#)) als Probeflächen bezeichnet, in denen die Erfassung der Waldstrukturparameter mittels einer Vollkluppierung erfolgte. Durch die Einbeziehung mehrerer repräsentativer Flächen und der Mittelung erfasster Werte, sollte eine Erhebung der Waldstruktur für die gesamte Homogenfläche möglich sein. Die Grenzpunkte der einzelnen Probeflächen wurden im Gelände abgesteckt und mit GPS eingemessen (vgl. [Abbildung 2.3](#)).

Über die Angabe der Waldgruppe wird die Hauptbaumart innerhalb der Probefläche angesprochen. Für die Beschreibung des vertikalen und horizontalen Bestandesaufbaus und die Schätzung des Überschirmungsgrades, unterteilt nach Deckungsgrad des Jungwuchses und der Baumschicht, wurde auf die Klassifizierung nach [BMLFUW \(2013\)](#) zurückgegriffen. Stützwirksame Bodenrauigkeiten innerhalb der Probeflächen wurden ebenfalls nach [BMLFUW \(2013\)](#) klassifiziert. Die Lawinenschutzwirkung eines Waldbestandes ist neben dem Überschirmungsgrad auch von der Stammzahl abhängig ([BMLFUW, 2013](#)). Um diese zu erheben, wurde in den Repräsentativflächen ( $10 \times 10 \text{ m}$ , beziehungsweise  $20 \times 20 \text{ m}$ ) eine Zählung der Stammzahl durchgeführt (vgl. [Abbildung 2.3 \(a\)](#)), wobei nur Stämme ab Stangenholz (Brusthöhendurchmesser BHD  $> 10 \text{ cm}$ ) erfasst wurden. Dies ist damit zu begründen, dass aufgrund des geringen Stabilisierungseffektes der Stämme in früheren Entwicklungsstufen von keiner

	Berglet Lawine	Prant Lawine	Zone	
maßgebliche Waldstrukturparameter				
Hangneigung [°]	31	40	Anbruchgebiet	
Waldgruppe	zum Ereigniszeitpunkt unbestockt	subalpiner Lärchenwald		
Vertikalstruktur		einschichtig		
Überschirmungsgrad [%]		licht ( $\geq 35 - 65\%$ )		
Entwicklungsstufe		Stangenholz (BHD $> 10$ cm)		
stützwirksame Bodenrauigkeit	glatt	sehr glatt		
max. Lückenlänge [m]	–	50		
max. Lückenbreite [m]	–	15		
Hangneigung [°]	39	37		Sturzbahn
Waldgruppe	subalpiner Lärchen-Fichten-Wald	subalpiner (Fichten)-Lärchen-Wald		
Vertikalstruktur	einschichtig	einschichtig		
Entwicklungsstufe	Baumholz (BHD $> 20$ cm)	Altholz (BHD $> 50$ cm)		

**Tabelle 2.2:** Auszug aus den Aufnahmeblättern der Berglet und Prant Lawine; die hier dargestellten Waldparameter sind über die verschiedenen Probeflächen (vgl. Anhang A.3 und A.4, sowie B.1 und B.2) gemittelt.

Schutzwirkung des Waldes bei Lawinen ausgegangen werden kann (Frehner et al., 2005). Für die Zählung der Stammzahl und Messung des BHD wurde ein Formular erstellt, in das auch die Baumartenverteilung miteingeht (vgl. Anhang A.2). Ebenso wurden Lückenbreiten und Lückenlängen innerhalb eines Bestandes quer zur Fallrichtung und in Fallrichtung gemessen, da dies maßgebliche Faktoren für das Anbrechen von Lawinen sind. Als Lücke definiert ist eine Fläche von mindestens 15 m Breite und 15 m schräger Länge, auf der die Überschirmung mit Gehölzen von  $> 130$  cm weniger als 30 % beträgt (BMLFUW, 2013). Erfasst wurden jeweils die größte Lückenbreite (quer zur Fallrichtung) und die größte schräge Länge (in Fallrichtung) innerhalb einer Probefläche. In Tabelle ?? ist eine Zusammenfassung, beziehungsweise Auswertung der zentralen Ergebnisse der Geländeaufnahmen zu finden. Darin sind getrennt für Anbruchgebiet und Sturzbahn die Parameter Hangneigung, Waldgruppe, Vertikalstruktur, Entwicklungsstufe und für das Anbruchgebiet zusätzlich Überschirmungsgrad, stützwirksame Bodenrauigkeit sowie maximale Lückenlänge und -breite zu finden.

Die ereignisbezogenen Daten (Anbruchhöhen, Auslauflängen, Schäden, usw.) wurden bei der Befragung Ortsansässiger erhoben. Ebenso miteinbezogen wurde die Lawinenchronik des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (Berglet Lawine, Ereignis 1986). Die Lawinenanbruchgebiete und Sturzbahnen wurden nach Angaben des Waldaufsehers der Gemeinde Innervillgraten auf einer Basiskarte (Orthophoto, Höhenschichten) abgegrenzt und im Gelände unter Berücksichtigung topographischer Einflussfaktoren (Neigungsverhältnisse, Geländeform, Exposition, Rauigkeit) nachkartiert (vgl. Anhang B.1 und B.2).

## 2.3 Berücksichtigung von Wald in Lawinensimulationen

Wald ist ein effektiver Lawinenschutz, da die natürliche Schneedeckenstabilität im Wald gegenüber freien Flächen erhöht ist. Dies hat verschiedene Gründe (vgl. Kapitel 2). Die Schutzwirkung des Waldes ist insbesondere darauf zurückzuführen, dass vor allem das Anbrechen von Lawinen verhindert wird, wie in Abschnitt 2.1.1 ausgeführt; bei Lawinen, welche oberhalb der Waldgrenze anbrechen und dementsprechend bereits eine hohe kinetische Energie aufweisen, werden Bäume im Allgemeinen zerstört und die Bremswirkung kann verschwindend klein werden (vgl. Abschnitt 2.1.2, beziehungsweise Margreth (2004)). Ein wichtiger Faktor ist zudem die Größe der Lawine; eine Bremswirkung ist generell nur bei kleinen bis mittelgroßen Lawinen (Anbruchvolumina  $< 10000 \text{ m}^3$ ) zu erwarten (Margreth, 2004; Teich et al., 2014).

In diesem Abschnitt wird aufgezeigt, welche Schritte notwendig sind, wenn Wald in der Lawinensimulation berücksichtigt werden soll. Dazu zählt vor allem die Wahl eines geeigneten Modells für die Simulation von kleinen bis mittelgroßen Lawinen und ein weiteres Modell für die Berücksichtigung der Waldwirkung. Da Simulationssoftware wie SamosAT, die in dieser Arbeit verwendet wird, bisher kaum für die Simulation von kleinen Lawinen herangezogen wurde, bedarf es zunächst einer Überprüfung, ob die implementierten Modellansätze und Parameter für diese Aufgabe geeignet sind. Daher wird im ersten Schritt das Simulationsmodell auf die Anwendung von Kleinlawinen ohne Waldeinfluss optimiert. Anschließend wird anhand von dokumentierten Ereignissen mit Waldeinfluss das implementierte Modell zur Berücksichtigung von Wald überprüft.

### 2.3.1 Überblick bestehende Ansätze

In der Praxis gibt es keine einheitliche Regelung, wie Wald in der Lawinensimulation berücksichtigt werden soll. Wichtig für die Beurteilung, ob Wald schutzfähig ist, ist in jedem Fall eine Feldaufnahme des Bestandes (vgl. Kapitel 2.2). Dabei werden in erster Linie Waldparameter erfasst, wie die Struktur, Zusammensetzung und Dichte eines Bestandes (beispielsweise Stammzahl Flächeneinheit, Kronendeckungsgrad), Baumhöhen und Alter des Bestandes, etwaige Lücken, Hangneigung und andere. Nach Margreth (2004) lassen sich demnach 4 Kategorien bilden:

- *Dichter Wald:* Ein dichter, geschlossener Wald, welcher ein gesamtes Anbruchgebiet umfasst kann als zuverlässige Schutzmassnahme betrachtet (Margreth und Krummenacher, 2002) und daher beim Erarbeiten von Lawinengefahrenkarten berücksichtigt werden, da aus ihm grossflächige Lawinenanbrüche ausgeschlossen werden können (vgl. Abschnitt 2.1.1). Wichtig dabei ist allerdings, dass Auswirkungen zufolge Nutzung oder Schäden über waldbauliche, beziehungsweise technische Massnahmen erhalten werden kann (Schneebeli und Bebi, 2004).
- *Dichter Wald mit kleinen Lücken:* Sofern in einem geschlossenen Wald Lücken ( $> 15 \text{ m}$ ) vorhanden sind, kann nicht mehr ausgeschlossen werden, dass Lawinenanbrüche aus dem Wald ausgeschlossen sind. In diesem Falle kann die Bremswirkung des Waldes berücksichtigt werden.



- *Anrissgebiete oberhalb dichtem Wald:* Wenn oberhalb eines dichten Waldes großflächige Anbruchgebiete vorkommen, so ist davon auszugehen, dass aufgrund der Größe der Lawine und der zum Zeitpunkt des Auftreffens auf den Wald bereits entwickelten Energie, die Wirkung des Waldes vernachlässigbar wird und daher nicht berücksichtigt werden sollte. Zudem wäre eine Bremswirkung für ein eventuell nachfolgendes Ereignis bei teilweiser Zerstörung kaum mehr gegeben (vgl. Abschnitt 2.1.2).
- *Lawinenschneise:* Im Falle von Lawinen, wo sich Anrissgebiete und Sturzbahn zwischen dichtem Wald befinden, wird von einer Lawinenschneise gesprochen. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass in den dicht bestockten Flächen kein Anriss stattfindet und somit die Anbruchfläche vermindert wird, beziehungsweise die Lawinenbahn durch die dichte seitliche Waldbestockung eingeengt ist. Die Bremswirkung des Waldes kann in solchen Fällen über geeignete Ansätze in lawinendynamischen Berechnungen berücksichtigt werden.

Bei der Berücksichtigung von Wald in der Lawinensimulation gibt es hauptsächlich zwei Ansätze, wobei beide Ansätze versuchen, den Einfluss, beziehungsweise die bremsende Wirkung von Wald und die durch Wald zurück gehaltene Schneemasse realistisch zu erfassen:

- Erhöhung der Reibung
- Massenverlust durch Detrainment

Der Ansatz, die Reibungskräfte beim Durchfließen eines Waldes zu erhöhen und somit die bremsenden Kräfte zu berücksichtigen, wurde in mehreren Arbeiten und Untersuchungen angewandt (vgl. [Bartel und Stockli, 2001](#); [Christen et al., 2010](#)). Der bremsende Effekt wird bei dieser Betrachtung nicht einem Zurückhalten von Schnee zugeschrieben, sondern vielmehr der Kraft, die aufgewendet werden muss um einen Waldbestand beziehungsweise einen Teil davon zu zerstören (Bäume umwerfen, Stämme brechen, Fremdmaterial in die Lawine aufnehmen, [Feistl et al.](#) (vgl. [2014](#))). Daher wird dieser Ansatz im generellen auch für Lawinen mit entsprechender Größe (mittelgroße bis große Lawinen) angewandt, was für die Aufgabenstellung der Gefahrenzonenplanung, für die generell Extremereignisse heranzuziehen sind, der Fall ist. Zur Berücksichtigung der bremsenden Wirkung des Waldes werden die Reibungskräfte erhöht, was durch Modifizierung der Reibungsparameter, oder durch Berücksichtigung einer zusätzlichen Reibungsquelle geschehen kann. Der Bremsprozess erfolgt somit kontinuierlich.

[Feistl et al. \(2014\)](#) stellen in ihrer Arbeit eine einparametrische Funktion vor, mithilfe welcher der Massenverlust durch zurückgehaltenen Schnee an Bäumen (Detrainment) in den Erhaltungsgleichungen von lawinendynamischen Modellen berücksichtigt wird. Aufbauend auf Feldbeobachtungen wird angenommen, dass beim Durchfließen des Waldes an bestehenden Bäumen, Baumgruppen oder auch Baumstumpfen Schnee zurückgehalten wird. Durch den beobachteten Rückstau und die einhergehende Verdichtung wird Fließenergie dissipiert. Die rückhaltende Wirkung des Waldes wird für die Berechnung an die Detrainmentrate gekoppelt, die selbst eine Funktion des Waldparameters  $K$  ist. Dieser Waldparameter dient vor allem der Erfassung des Waldbestandes und -zustandes. Die Verwendung dieses Ansatzes setzt voraus, dass die Lawine so klein ist, als dass sie nicht in der Lage ist, die Bäume zu beschädigen oder zu zerstören (klein- bis mittelgroße Lawinen, vgl. [Teich et al. \(2014\)](#)).

Für das vorliegende Projekt wird auf die bestehende Methode, der in Österreich verwendeten Simulationssoftware SamosAT, zurück. In [Sampl \(2007\)](#); [Jörg und Granig \(2009\)](#), beziehungsweise Kapitel 2.3.2 wird aufgezeigt, wie die Berücksichtigung von Wald in SamosAT implementiert ist. Für jede ausgewiesene Widerstandfläche wird mithilfe von Waldparametern, die zu spezifizieren sind, eine Widerstandskraft berechnet, die in der Impulserhaltung berücksichtigt wird. Dieser Ansatz ähnelt jenem, bei dem die Reibungskräfte erhöht werden, da die eingeführte Widerstandskraft einer Erhöhung der Reibung entspricht und auch kein Massenverlust berücksichtigt wird.

### 2.3.2 Simulationsansatz und Parameterbestimmung

Gererell wird festgehalten, dass die Modell- und Parameterwahl zur Berücksichtigung von Wald ein kontroverses Thema ist, da unterschiedlichste Faktoren eine Rolle spielen (vgl. [Jörg und Granig, 2009](#); [Feistl et al., 2014](#); [Teich et al., 2014](#)). In EVAMETH wird versucht verschiedene Probleme, die für die Berücksichtigung von Wald in der Lawinensimulation, auftreten, zu erfassen. Die einzelnen Aspekte sehen dabei wie folgt aus:

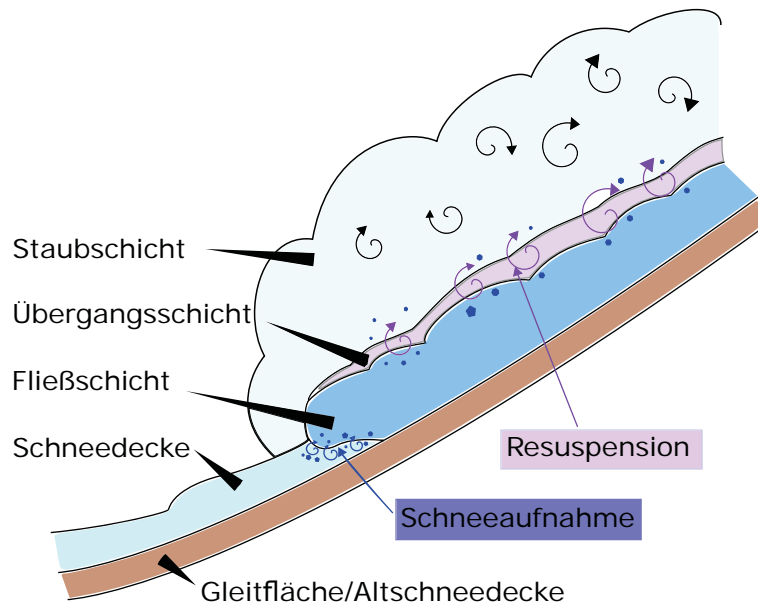
- Optimierung des verwendeten Reibungsmodells anhand von drei Kleinlawinen ohne Waldeinfluss (vgl. Kapitel 2.3.3)
- Anwendung des Widerstandsmoduls für Wald auf 14 Waldlawinen und Untersuchung und Optimierung der Waldparameter (vgl. Abschnitt 2.4)

In den Kapiteln 2.3.2 und 2.3.2 wird das implementierte Simulationsmodell beziehungsweise die verwendete Optimierungsmethode erläutert.

#### Simulationsmodell - SamosAT

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Lawinensimulationsprogramm SamosAT (**S**now **A**valanche **M**Odelling and **S**imulation - **A**dvanced **T**echnology [Sampl \(2007\)](#)) verwendet. Im Folgenden wird kurz das Modell beschrieben. Vor allem auf die Frage, wie Widerstandskräfte zufolge Wald berücksichtigt werden können, wird genauer eingegangen.

Die Beschreibung der Bewegung einer Lawine erfolgt in dieser Software als physikalische Modellierung (vgl. [Zwinger, 2000](#)), was bedeutet, dass die wichtigsten physikalischen Eigenschaften in einem mathematischen Modell ([Savage und Hutter, 1989](#)) erfasst sind. Die vollständige physikalische Beschreibung eines Lawinenabganges ist aber aufgrund seiner Komplexität nicht ohne weiteres möglich und so werden Vereinfachungen getroffen (vgl. [Zwinger, 2000](#)). Somit bedarf es einer Optimierung der im Modell verwendeten Parameter. Dies erfolgt zumeist anhand von Rückrechnungen dokumentierter Lawinenereignisse; in den meisten Fällen anhand von Ausläuflängen, da andere Größen schwieriger zu erfassen sind und bisher kaum dokumentiert wurden. SamosAT wird für trockene Schneelawinen verwendet, da Kohäsionskräfte zwischen den Eispartikeln während der Simulation vernachlässigt werden (vgl. [Salm, 2004](#); [Sampl, 2007](#)). Diese Trockenschneelawine besteht aus einem Eispartikel-Luft-Gemisch und ist prinzipiell aus drei Schichten folgendermaßen aufgebaut (vgl. Abbildung 2.4):



**Abbildung 2.4:** Schichtenstruktur einer Lawine (aus Sampl (1999); Fischer (2013), abgeändert)

- Fließschicht
- Resuspensionschicht
- Staubschicht,

wobei der Austausch zwischen den Schichten als Schneeaufnahme, beziehungsweise Resuspension bezeichnet wird. In dieser Arbeit werden vor allem Fließlawinen untersucht; d.h. vor allem die Bewegung der Fließschicht und deren Interaktion mit eventuell auftretendem Wald ist von Interesse. Mithilfe des implementierten Modells kann der zeitliche und räumliche Verlauf der Kenngrößen der Lawine dargestellt werden (Geschwindigkeit, Fließhöhe, Druck, vgl. Zwinger (2000); Gleirscher (2011)).

Die Bewegungsgleichungen der Fließlawine, die in Lagrange'scher Betrachtungsweise in einem lokalen Koordinatensystem formuliert sind, werden ausführlich in Zwinger (2000); Salm (2004); Sampl (2007) hergeleitet und sind anschaulich in Fischer und Kofler (2013); Kofler (2014) zusammengefasst. Im betrachteten Koordinatensystem liegt die  $x_1$ -Achse in Fließrichtung parallel zur Bodenoberfläche und die  $x_3$ -Achse steht normal auf diese. Die fehlende  $x_2$ -Achse ergibt sich aus der Forderung, senkrecht auf die beiden vorigen zu stehen.

Die Massenerhaltungsgleichung (2.3.1) besagt, dass sich die Masse des fließenden Schnees während der Simulation bei Vernachlässigung von Schneeaufnahme oder -ablagerung (Entrainment, beziehungsweise Detrainment  $q = 0$ , vgl. Fischer et al. (2012); Jörg und Granig (2013); Fischer und Kofler (2013)) nicht ändert

$$\frac{dV}{dt} = \frac{d(A\bar{h})}{dt} = 0. \quad (2.3.1)$$

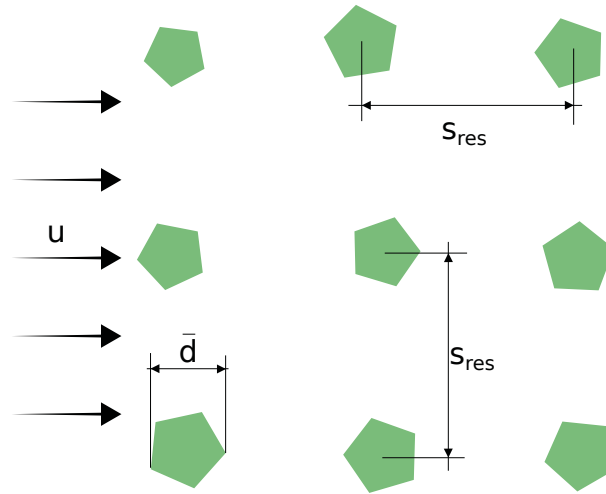


Abbildung 2.5: Widerstandskraft bei Hindernissen (aus Sampl (2007), abgeändert)

Die Änderung des Impulses, Gleichung (2.3.2) kann in eine Geschwindigkeitsänderung und eine Massenänderung (die im speziellen Fall gleich Null ist,  $q = 0$ ) aufgeteilt werden.

$$\frac{d\bar{u}_i}{dt} = g_i + \frac{1}{\rho A \bar{h}} \oint_{\partial A} \left( \frac{\bar{h} \sigma^{(b)}}{2} \right) n_i dl - \delta_{i1} \frac{\tau^{(b)}}{\rho \bar{h}} - \frac{1}{2} c_{res} \bar{\mathbf{u}}^2 \frac{\bar{u}_i}{\|\bar{\mathbf{u}}\|}. \quad (2.3.2)$$

Sie ergibt sich aus den Anteilen aus Schwerkraft  $g_i$  und der Summe aller Oberflächenkräfte, die sich unter Berücksichtigung der Randbedingungen aus den Anteilen der Bodenschubspannung  $\tau^{(b)}$ , die durch das Kronecker-Delta  $\delta_{i1}$  entgegen der Bewegungsrichtung der strömenden Masse wirkt, und dem verbleibenden Oberflächenintegral, das sich über die Mantelfläche des Elements von der Berandung der Bodenfläche  $\partial A$  bis zur Fließoberfläche  $h = s - b$  erstreckt, ergibt.  $dl$  ist ein Linienelement der Berandung und  $n_i$  der nach innen gerichtete Einheitsvektor normal auf die Berandung. Der letzte Term der rechten Seite der Gleichung (2.3.2) stellt die Widerstandskräfte zufolge von Hindernissen  $F_i^{res}$  dar. Über diesen kann die Wirkung von Wald berücksichtigt werden (vgl. Gleichung (2.3.3)).

Die Widerstandskraft zufolge eines Hindernisses wurde aus den Gleichungen für umströmte Hindernisse empirisch angenähert (vgl. Sampl, 2007). Sie hängt vom maßgebenden Durchmesser  $\bar{d}$ , seiner Höhe  $h_{res}$ , dem mittleren Abstand zu anderen Objekten  $s_{res}$  und einem empirischen Beiwert  $c_w$  ab (siehe Abbildung 2.5) und ergibt sich somit zu

$$F_i^{res} = -\frac{1}{2} \left( \bar{d} \frac{c_w}{s_{res}^2} \right) \rho A \min \left\{ \frac{\bar{h}}{h_{res}} \right\} \bar{\mathbf{u}}^2 \frac{\bar{u}_i}{\|\bar{\mathbf{u}}\|}. \quad (2.3.3)$$

Die Parameter  $\bar{d}$ ,  $c_w$  und  $s_{res}$  werden zum Term  $c_{res}$  zusammengefasst, der in der vorliegenden Untersuchung analysiert wird

$$c_{res} = \bar{d} \frac{c_w}{s_{res}^2}. \quad (2.3.4)$$

Die Wirkung des Waldes wurde in Jörg und Granig (2009) untersucht, wobei hauptsächlich der Einfluss auf die Staubschicht betrachtet wurde. Der Einfluss auf den Fließanteil ist im Falle von großen Lawinen als eher gering beziehungsweise im Falle von kleinen Lawinen als schwer einschätzbar beurteilt worden. Eine systematische Studie über die Verwendung des Widerstandsmoduls für den Fließanteil wurde bisher noch nicht durchgeführt.

Zur Lösung der unbekanntenen Größen der Bewegungsgleichungen (2.3.1) und (2.3.2)  $\bar{u}_1$ ,  $\bar{u}_2$  und  $\bar{h}$  ist die in Gleichung (2.3.2) noch vorkommende Bodenschubspannung  $\tau^{(b)}$  zu spezifizieren ist. Dies wird über eine Konstitutivgleichung gelöst, welche eben diese Bodenschubspannung als Funktion des Strömungszustandes des fließenden Schnees beschreibt

$$\tau^{(b)} = f(\sigma^{(b)}, \bar{u}, \bar{h}, \bar{\rho}, t, \mathbf{x}). \quad (2.3.5)$$

Darin sind  $\sigma^{(b)}$  die Normalspannung,  $\bar{u}$  und  $\bar{h}$  die tiefengemittelte Fließgeschwindigkeit beziehungsweise Fließmächtigkeit,  $\bar{\rho}$  die tiefengemittelte Dichte, sowie  $t$  die Zeit und  $\mathbf{x}$  der Ortsvektor. In SamosAT sind verschiedene Modelle implementiert (vgl. [Sampl, 2007](#)). Für diese Untersuchung wurde ein einfacher Ansatz durch Kombination eines Coulomb'schen Reibungsterms mit einer Mindestschubspannung gewählt, da nach Untersuchungen in [Sailer et al. \(2008\)](#) diese Parameter maßgebend für die Beschreibung der Bewegung von Kleinlawinen eigenen

$$\tau^{(b)} = \tau_0 + \mu \sigma^{(b)}. \quad (2.3.6)$$

Der Anteil  $\mu \sigma^{(b)}$  beschreibt im Allgemeinen das Reibungsverhalten zwischen den Grenzflächen von zwei Festkörpern und wird generell als Mohr-Coulomb'sches Reibungsmodell bezeichnet. Die Schubspannung  $\tau^{(b)}$  an der Kontaktfläche ist nach dem Coulomb'schen Gesetz proportional zu Normalspannung  $\sigma^{(b)}$  auf die Grenzfläche. Der Proportionalitätsfaktor  $\mu$  wird in der Literatur meist als Tangens des Bettreibungswinkels  $\delta$  bezeichnet  $\mu = \tan \delta$  ([Bartelt et al., 1999](#); [Zwinger, 2000](#); [Wang et al., 2004](#); [Sampl, 2007](#)). Nach dieser Formulierung kommt eine Lawine dann in Bewegung, wann die Neigung des Geländes größer als der Bettreibungswinkel ist. Ist die Neigung des Geländes allerdings konstant, so ergibt sich eine konstante Beschleunigung, was zu einer "unendlichen" Geschwindigkeit in steilem Gelände führen würde. Um dem entgegen wirken zu können, müsste der Bettreibungswinkel wiederum größer gewählt werden, was aber dazu führt, dass eine Lawine gar nicht ins Fließen gerät. Daher wird zudem die Mindestschubspannung  $\tau_0$  berücksichtigt. Diese stellt eine untere Grenze dar, die in jedem Fall überwunden werden muss, damit ein Fließen der Lawine überhaupt zustande kommt, was als  $\bar{\rho} \bar{h} g \sin \alpha > \tau_0$  beschrieben werden kann.  $\alpha$  ist dabei die Geländeneigung. Die Unabhängigkeit der Mindestschubspannung von der Fließtiefe der Lawine bewirkt eine starke Bremsung, vor allem bei Lawinen mit geringer Fließmächtigkeit (vgl. [Sampl, 2007](#)).

Um brauchbare Simulationsergebnisse zu erhalten, sind für den Simulationsinput sinnvolle Annahmen zu treffen. Dazu gehören Rand- und Anfangsbedingungen, wie die gewählte Topographie oder die zum Untersuchungsobjekt definierten Anbruchgebiete mit ihrer Schneehöhenverteilung (vgl. [Fischer et al., 2014b](#)) untersucht. Zudem sind die Prozessparameter zu definieren (vgl. [Sampl, 2007](#); [Granig und Oberndorfer, 2007](#); [Jörg und Granig, 2010, 2013](#)). In dieser Arbeit wird ein modifiziertes Mohr-Coulomb'sches Reibungsverhalten verwendet, woraus sich die Parameter  $\mu$  und  $\tau_0$  zur Modellierung des Reibungsverhaltens ergibt. Zentral für die vorliegende Untersuchung ist die Untersuchung zum Parameter  $c_{\text{res}}$ , vgl. Gleichung (2.3.4), der maßgebend für die Widerstandskraft des Waldes ist.

Direkte Simulationsergebnisse sind die zeitliche und räumliche Entwicklung von Fließmächtigkeit und Geschwindigkeit. Aus diesen können Größen wie maximaler Aufpralldruck, Auslauflänge, Massenzuwachs zum Zwecke einer praktisch verwendbaren Größe gewonnen werden (vgl. [Fischer und Kofler, 2013](#)). Als praktisch verwendbar gelten in dieser Arbeit jene Größen, welche mit Feldbeobachtungen für eine Parameteroptimierung verglichen werden können. Gerade für Kleinlawinen, beziehungsweise Waldlawinen ist allerdings die Dokumentation generell dürftig. Daher wird in dieser Arbeit auf die Optimierungsgröße Auslauflänge verwendet.

Nichtsdestotrotz sollten auch weitere Aspekte, wie beispielsweise die Betrachtung der simulierten Geschwindigkeiten oder Fließhöhen, erfasst werden.

## Optimierungsmethode

Mithilfe der in [Fischer und Kofler \(2013\)](#); [Fischer et al. \(2014a\)](#); [Kofler und Fischer \(2015\)](#) entwickelten objektiven Optimierungsmethode ist es möglich, Simulationsergebnisse objektiv mit einer Dokumentation zu vergleichen und gegebenenfalls eine Parameteroptimierung vorzunehmen, um beispielsweise praxisrelevante Parameterkombinationen für probabilistische Simulation in der Gefahrenzonenplanung zu finden. Dafür werden eine große Anzahl von Simulationen durchgeführt, um verschiedene reale Lawinenszenarien nachzumodellieren. Die Simulationsergebnisse werden mit einer vorhandenen, ausreichend guten Dokumentation (Photos, Schäden an Gebäuden usw.) hinsichtlich verschiedener Aspekte, wie Auslauflänge, Geschwindigkeit oder Massenzuwachs der Lawine während des Absturzes verglichen, um Aussagen über die Übereinstimmung zu treffen. Daraus kann auf die Eignung der verwendeten Eingangsparameter geschlossen werden.

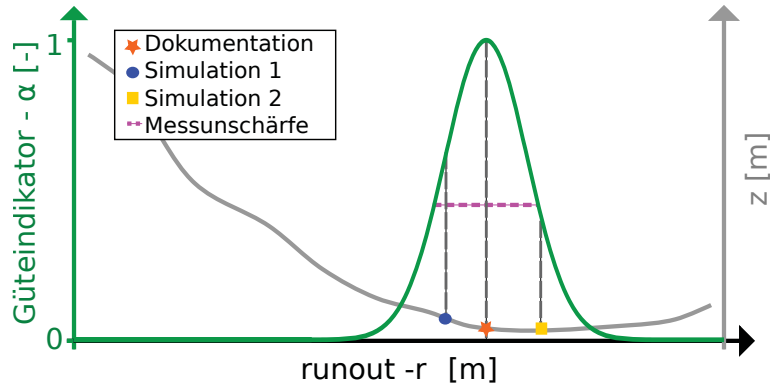
Mithilfe des Analyse-Tools **AIMEC** (**A**utomated **I**ndicator based **M**odel **E**valuation and **C**omparison) ([Fischer, 2013](#)) werden relevante Lawinensimulationsergebnisse so verarbeitet, dass sie in einem definierten, mit dem Fließpfad ausgerichteten Koordinatensystem  $s, l$  zur Verfügung stehen und interpretiert werden können. Ebenso können Dokumentationsgrößen der bekannten Ereignisse in dieses Raster eingetragen werden und damit wird eine Vergleichbarkeit ermöglicht. Beispielsweise kombinierte [Fischer \(2013\)](#) diese Methode mit probabilistischen Simulationsansätzen für die Untersuchung von Auslauflängen, während [Fischer et al. \(2014b\)](#) und [Rauter \(2015\)](#) ein Optimierungskonzept in Bezug auf Lawinengeschwindigkeiten mithilfe der Methode präsentierten. Eine ausführliche Beschreibung des Analysewerkzeuges ist in [Fischer \(2013\)](#); [Fischer und Kofler \(2013\)](#); [Kofler \(2014\)](#); [Kofler und Fischer \(2015\)](#) zu finden.

In dieser Arbeit wird wie bereits erwähnt auf die Auslauflängen der Ereignisse untersucht, beziehungsweise optimiert. Diese Optimierungsvariable, im Folgenden mit  $r$  (runout, vgl. [Fischer und Kofler, 2013](#)) bezeichnet, kann sowohl aus einer vorhandenen Dokumentation als auch aus den Simulationsergebnissen ermittelt werden, wodurch der Vergleich zwischen Dokumentation und Simulation ermöglicht wird. Für die Ermittlung der maximalen Auslauflänge aus den Simulationen werden die über die Simulationszeit maximalen Druckergebnisse, die bereits in das mit dem Pfad ausgerichtete Koordinatensystem transformiert wurden, verwendet. Es wird eine Druckgrenze  $p_{\text{lim}}$  definiert, welche die Grenze des Wirkungsbereiches der Lawine beschreibt. Dabei wird in dieser Studie ein Grenzwert der Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung (Grenzwert der gelben Zone, vgl. [BMLFUW, 2011](#)) von

$$p_{\text{lim}} = 1 \text{ kPa} \quad (2.3.7)$$

gewählt. Alle Rasterpunkte, welche eine Druckstärke kleiner als den Grenzwert aufweisen, liegen somit nach dieser Definition außerhalb der Wirkungsbereiches. Aus den Druckdaten wird nun die maximale Druckstärke über die  $l$  Koordinate ermittelt

$$p_{\text{max}}(s) = \max_l(p(s, l)). \quad (2.3.8)$$



**Abbildung 2.6:** Güteindikator  $\alpha_r$  für verschiedene Auslauflängen  $r$ . Verwendete Gütefunktion ist eine Normalverteilung

Die weiteste  $s$  Koordinate, bei der die Druckstärke unter den Grenzwert  $p_{lim}$  fällt, stellt die Auslauflänge  $r$  dar (vgl. Fischer, 2013).

$$s_{runout} = r = \max\{s | p_{max}(s) > p_{lim}\}. \quad (2.3.9)$$

Die beobachtete Auslauflänge  $\hat{r}$  wird aus der entsprechenden maximalen  $s$ -Koordinate der Auslauflinie im AIMEC-Koordinatensystem ermittelt. Sie beziehungsweise die Grenze einer Ablagerung ist Allgemeinen aber nicht eine klare Linie, sondern vielmehr ein unscharfer Bereich, in den eine Grenzlinie hinein interpretiert werden kann. Daraus folgt, dass auch die Auslauflänge in diesen Fällen mit einer entsprechenden Ungenauigkeit zu behandeln ist (vgl. Ancey, 2005). Daher wird zusätzlich wird der Parameter  $\sigma_r$  definiert, der Messunsicherheiten bei der Aufnahme der Dokumentation, beziehungsweise die Ungenauigkeit verursacht durch die Rastergröße, berücksichtigt.

Um die Übereinstimmung zwischen simulierte Auslauflängen  $r$  und der beobachteten Auslauflänge  $\hat{r}$  des jeweiligen Simulationslaufes objektiv zu beschreiben wird eine Verteilungsdichtefunktion  $f_{\hat{r}}$  basierend auf den Dokumentationsgrößen eingeführt. Mit dieser kann abgeschätzt werden, wie gut die simulierten Ergebnisse mit der Dokumentation übereinstimmen, indem die Ergebnisse der Simulationsläufe auf die Verteilungsfunktion projiziert werden. Um zusätzlich eine Vergleichbarkeit zu anderen Ergebnissen oder Pfaden zu ermöglichen, wird die Gütefunktion zwischen Null und Eins über den Maximalwert der Normalverteilung normiert

$$\alpha_r = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{r - \hat{r}}{\sigma_r}\right)^2\right). \quad (2.3.10)$$

Demnach führt die "ideale" Simulation, bei der die simulierte Auslauflänge genau die dokumentierte erreicht zu einem Wert von 1. Simulationen, welche weiter laufen oder eher zum Stillstand kommen, erhalten einen Wert zwischen 0 und 1 (vgl. Abbildung 2.6).

Mithilfe des Güteindicators ist es möglich die besten Simulationen, das heißt jene Simulationen mit den höchsten Werten für  $\alpha_r$ , zu identifizieren und deren zugrundeliegenden Parameterkombinationen zu untersuchen. Dafür werden die besten Simulationen anhand eines einfachen Rankings geordnet und eine bestimmte Anzahl der besten Simulationen ausgewählt; beispielsweise werden in dieser Arbeit die besten besten 5% der Ergebnisse herangezogen und deren Eingangsparameter statistisch ausgewertet.

Untersuchungen in [Fischer und Kofler \(2013\)](#); [Fischer et al. \(2014a\)](#); [Kofler und Fischer \(2015\)](#) haben gezeigt, dass die verwendete Optimierungsmethode komplexer wird, sobald mehrere Pfade ins Spiel kommen, da Modellparameter aufgrund der getroffenen Vereinfachungen und Annahmen im Allgemeinen recht pfadspezifisch sind. Über Klassifizierungskriterien wird nun versucht, charakteristische Eigenschaften und Besonderheiten von verschiedenen Lawinenpfaden zu erfassen und Zusammenhänge zu den Simulationen zugrundeliegenden Eingangsparametern zu finden und auszuwerten (vgl. [Teich et al., 2012](#)).

### 2.3.3 Anpassung Parameter $\mu$ , $\tau_0$ für Kleinlawinen

Simulationssoftware wie SamosAT wird in der Gefahrenzonenplanung als zusätzliches Beurteilungsmittel herangezogen. In diesem Kontext sind aber generell große Ereignisse (Anbruchvolumen  $V > 10000 \text{ m}^3$ ) interessant. Weniger werden klein- bis mittelgroße Lawinen (Anbruchvolumen  $V < 1000$  beziehungsweise  $10000 \text{ m}^3$ ) in die Betrachtung miteinbezogen ([Teich et al., 2014](#)). Daher erfolgt auch die Optimierung der Parameter des Simulationsmodells SamosAT anhand von Extremereignissen (vgl. [Granig und Oberndorfer, 2007](#); [Jörg und Granig, 2010, 2013](#)).

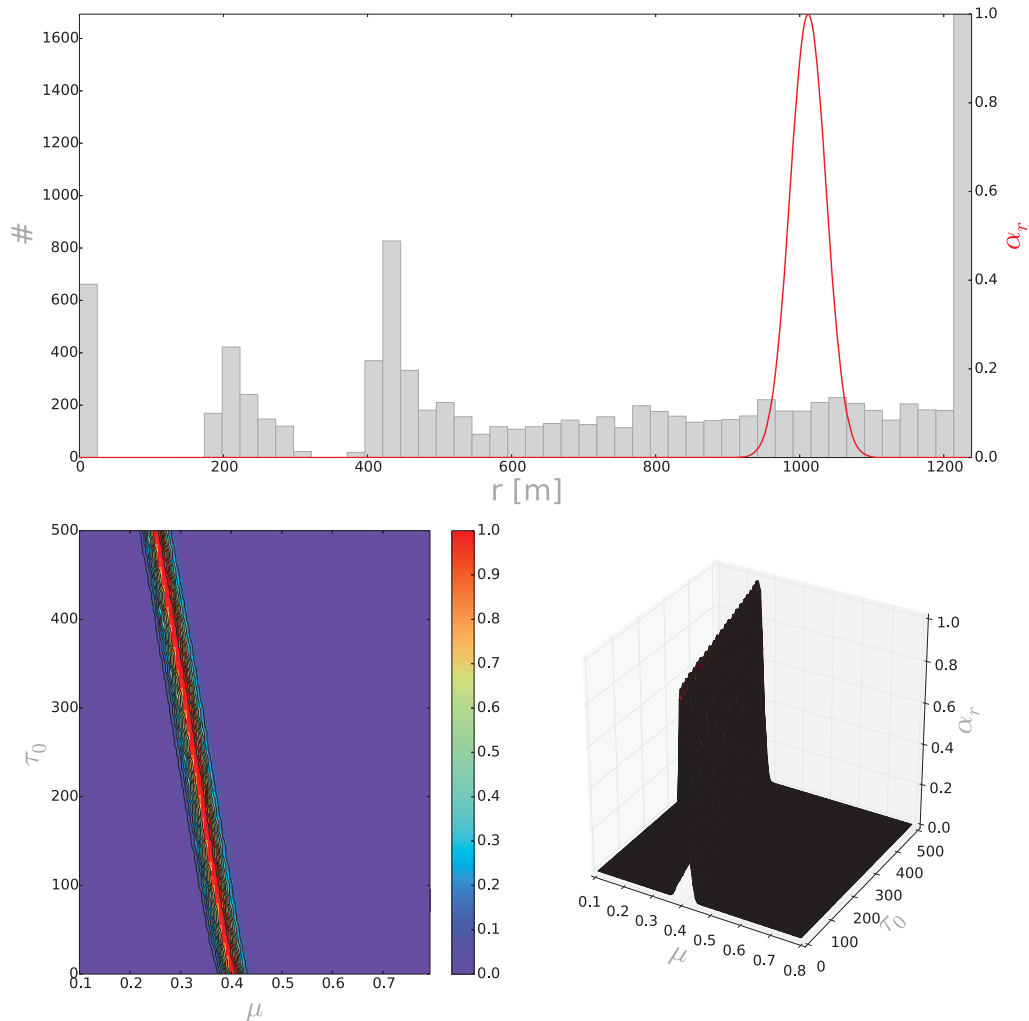
Da in der vorliegenden Arbeit ein Reibungsmodell für die Berechnung von kleinen bis mittelgroßen Ereignissen Verwendung findet, bedarf es zunächst einer Parameteroptimierung durch Rückrechnung von entsprechenden Ereignissen. Dies ist insofern schwierig, da kleine, eher regelmäßig auftretende Ereignisse kaum dokumentiert werden und somit keine Daten verfügbar sind. In dieser Studie sind von seiten der Stabstelle Schnee und Lawinen der Wildbach- und Lawinenverbauung drei entsprechende Ereignisse zur Verfügung gestellt worden. Bei den Ereignissen handelt es sich um

- BadlechneralmLawine in Donnersbach (Steiermark): Anbruchmasse  $\approx 20000 \text{ m}^3$ , Anbruchfläche  $\approx 2.5 \text{ ha}$ , Fallhöhe  $\approx 600 \text{ m}$
- Pletz-Oetz Lawine in St. Jakob in Haus (Tirol), Anbruchmasse  $\approx 6000 \text{ m}^3$ , Anbruchfläche  $\approx 0.6 \text{ ha}$ , Fallhöhe  $\approx 528 \text{ m}$
- Schweinest Lawine in St. Jakob in Haus (Tirol), Anbruchmasse  $\approx 12500 \text{ m}^3$ , Anbruchfläche  $\approx 0.7 \text{ ha}$ , Fallhöhe  $\approx 427 \text{ m}$

Für diese drei Beispiele wurde ein Simulationskonzept erstellt. Für das das in Abschnitt [2.3.2](#) erwähnte Reibungsmodell sind in einem regelmäßigen Gitter Parameterkombinationen für die beiden zu bestimmenden Parameter  $\mu$  und  $\tau_0$  erstellt worden. Die Grenzen für die Parameter wurden zu  $\mu = [0.1, \dots, 0.8]$  und  $\tau_0 = [0.0, \dots, 500] \text{ kPa}$  gesetzt. Damit wurden je 10000 Simulationsläufe gestartet und deren Ergebnisse mit der in Abschnitt [2.3.2](#) vorgestellten Methode ausgewertet. Die dokumentierten projizierten Auslauflängen  $\hat{r}$

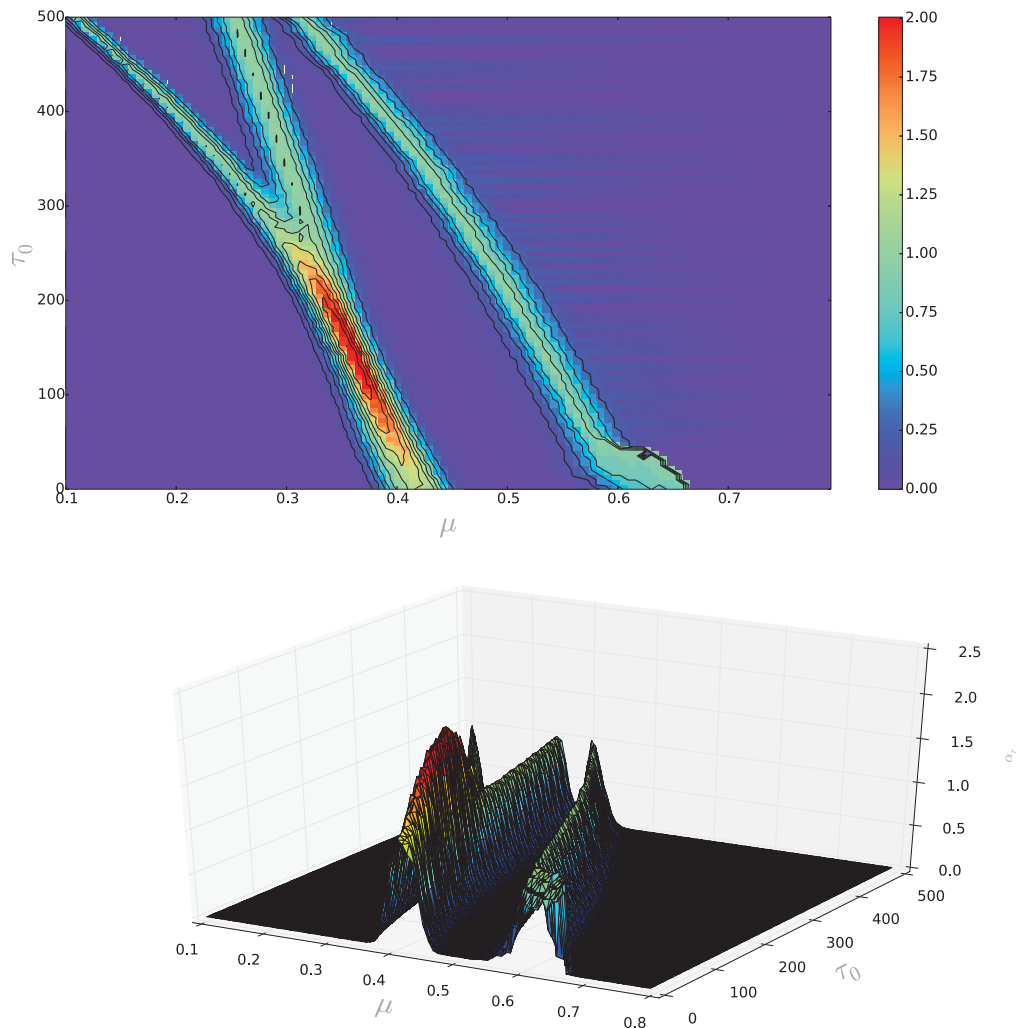
- BadlechneralmLawine:  $\hat{r} = 937 \text{ m}$
- Pletz-Oetz Lawine:  $\hat{r} = 1085 \text{ m}$
- Schweinest Lawine:  $\hat{r} = 1012 \text{ m}$





**Abbildung 2.7:** Anwendung der Optimierungsmethode auf die 10000 Simulationsergebnisse der Schweinest Lawine. Oben ist die Verteilung der simulierten Ausläuflängen für die Schweinest Lawine als Histogramm aufgetragen, wobei in rot die Gütefunktion zufolge der dokumentierten Größe  $\hat{r}$  mit der zugrundegelegten Unsicherheit  $\sigma_r$  hinterlegt ist. Unten links ist die Verteilung des Güteindikators als Scatterplot, beziehungsweise unten rechts als dreidimensionale Grafik zu sehen. Farbcodiert ist die Größe des Güteindikators  $\alpha_r$ .

sind mit einer Unsicherheit von  $\sigma_r = \pm 25$  m beaufschlagt worden. In Abbildung 2.7 ist die AIMEC-Auswertung der Schweinest Lawine dargestellt. In der Abbildung oben ist die Verteilung der simulierten Ausläuflängen  $r$  als Histogramm aufgetragen. In rot hinterlegt ist darin die Gütefunktion zufolge der dokumentierten Größe  $\hat{r} = 1012$  m mit der zugrundegelegten Unsicherheit  $\sigma_r = \pm 25$  m. Unten hingegen ist die flächige Verteilung des Güteindikators ist die Verteilung des Güteindikators, beziehungsweise als dreidimensionale Grafik zu sehen. Man kann erkennen, dass es keine einzelne "beste" Parameterkombination gibt; wird  $\mu$  größer und  $\tau_0$  im entsprechenden Verhältnis kleiner, wird damit die selbe Ausläuflänge erreicht. Nichtsdestotrotz lassen sich Bereiche für die Parameter abgrenzen. Beispielsweise geht hervor, dass ab einem  $\mu > 0.45$  keine Simulationen die dokumentierte Ausläuflänge erreichen. Diese Analyse wurde für alle drei Beispiele durchgeführt. Um die Ergebnisse zusammen zu führen, wurde ein



**Abbildung 2.8:** Zusammenführung des Güteindicators für alle drei Ereignisse

Güteindikatoren für jede Parameterkombination durch Aufsummieren über die drei Ereignisse ermittelt. Der so gewonnene Indikator ist jede untersuchte Parameterkombination von  $\mu$  und  $\tau_0$  in Abbildung 2.8 ersichtlich. Im oberen Teil der Grafik ist wiederum ein Scatterplot des Güteindicators für jeden Punkt des Parametergitters ersichtlich, während der untere Teil der Abbildung eine dreidimensionale Veranschaulichung des Indicators darstellt. Damit lässt der Bereich der besten Parameterkombinationen bereits sehr gut eingrenzen und die Analyse führte zu einer Parameterkombination von  $\mu = 0.35$  und  $\tau_0 = 160$  kPa. Mit diesen Parametern kann im nächsten Schritt mit der Simulation von Waldlawinen begonnen werden, um den Einfluss von Wald zu erfassen.

Eine entsprechende Analyse mit einer größeren Anzahl von Lawinereignissen wäre angebracht, um eine größere Variabilität in die Ergebnisse zu bringen, beziehungsweise damit Besonderheiten eines Einzelpfades nicht zu stark das Gesamtergebniss beeinflussen. Zusätzlich ist anzumerken, dass die hier verwendeten Lawinen nach Definition (vgl. Teich et al., 2014) eher in den Bereich der mittelgroßen bis großen Lawinen fallen. trotzdem soll an dieser

Stelle aufgezeigt werden, dass die gängigen Simulationsmodelle mit den Standardwerten nicht für die Modellierung von Kleinlawinen geeignet sind.

### 2.3.4 Untersuchung zum Waldparameter $c_{res}$

Laut Teich et al. (2014) sind gerade die Auslauflängen von klein- bis mittelgroßen Lawinen im Bereich von Waldeinflussflächen sehr stark von dessen Beschaffenheit abhängig. Daher ist eine Bestandsaufnahme von Waldparametern bei der Simulation unumgänglich. In ihrer Arbeit untersuchten Teich et al. (2014) 40 dokumentierte Waldlawinen um den in RAMMS implementierten Detrainment-Ansatz zu verifizieren und den zugrundeliegenden Waldparameter  $K$  (vgl. Feistl et al., 2014) zu optimieren. Diese dokumentierten Waldlawinen wurden für vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Zur Beschreibung der Bodenschubspannung verwendeten die Autoren das in RAMMS implementierte Voellmy Modell (Voellmy, 1955)

$$\tau^{(b)} = \mu \sigma^{(b)} + \frac{\bar{\rho}}{\xi} \bar{u}^2 \quad (2.3.11)$$

mit  $\mu = 0.29$  und  $\xi = 1500 \text{ m s}^{-2}$ . Im Gegensatz zum Mohr-Coulomb'schen Modell berücksichtigt das Voellmy Modell zusätzlich zur trockenen Reibung einen geschwindigkeitsabhängigen Reibungsterm zur Beschreibung der Bewegung der Lawine. Dieser turbulente Reibungsterm wird in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Dies ist damit zu begründen, dass die hier untersuchten Lawinen in der Regel von kleinerem Ausmaß sind und demnach deren Geschwindigkeiten und damit zusammenhängend der Einfluss der turbulenten Reibung nicht tragend werden. Durch die Wahl der Parameter auf die Standardwerte der Simulationssoftware RAMMS wurden die Auslauflängen bei der Nullvariante (Simulation ohne Waldeinfluss) bis zu 700 % überschätzt. Zudem wird in den Arbeiten von Teich et al. (2014); Feistl et al. (2014) der Detrainment-Ansatz zur Beschreibung der Waldwirkung verwendet. In diesem Projekt sind die Parameter des Reibungsmodells bereits auf mittelgroße Lawinen optimiert worden (vgl. Abschnitt 2.3.3). Wie allerdings in Grafik 2.8 zu erkennen, beziehungsweise in Kofler und Fischer (2015) angemerkt ist, ist es schwierig verschiedene Pfade und Ereignisse zusammen zu führen. Die Beschränkung auf eine Parameterkombination von  $\mu = 0.35$  und  $\tau_0 = 160 \text{ kPa}$  führt im vorliegenden Fall dazu, dass ungefähr die Hälfte der bereitgestellten Lawinen auch ohne Einfluss von Wald die dokumentierte Auslauflänge nicht erreichen, beziehungsweise zwei Lawinen starten bedingt durch die geringe Anbruchhöhe gar nicht. Dies deutet darauf hin, dass das von uns verwendete Modell nicht in der Lage ist, alle untersuchten Ereignisse darzustellen. Für die restlichen 18 Lawinen wird im nächsten Schritt der Einfluss des Waldparameters mit dem in SamosAT implementierten Reibungsansatz (vgl. Abschnitt 2.3.2) untersucht. Dafür wird der Waldparameter  $c_{res}$  im Bereich von  $[10^{-4}, \dots, 10^1]$  in 1000 Schritten auf einer logarithmischen Skala variiert. Mithilfe der in Abschnitt 2.3.2 vorgestellten Optimierungsmethode werden die jeweiligen simulierten Auslauflängen mit der entsprechenden dokumentierten Auslauflänge verglichen und die besten 5 %  $1000 = 50$  der Simulationen pro Lawinenpfad, beziehungsweise deren zugrundeliegende Parameterkombinationen gehen in die gemeinsame Analyse mit ein. Die resultierenden Parameterkombinationen ( $N = 18 \text{ Pfade} \times 50 \frac{\text{Simulationen}}{\text{Pfade}} = 900$ ) können untersucht werden. Die Häufigkeitsverteilung des Parameters  $c_{res}$  ist in Abbildung 2.9 als Histogramm dargestellt. Damit lässt sich eine Dichtefunktion ( $\text{pdf-}c_{res}$ ) bestimmen und deren Kenngrößen (beispielsweise Median) oder

Perzentilwerte (25 % – 75 %) können für die probabilistische Simulation herangezogen werden.

$$\begin{aligned}
 c_{res,Median} &= 10^{-1.15} \approx 0.070 \\
 c_{res,25\%} &= 10^{-2.30} \approx 0.005 \\
 c_{res,75\%} &= 10^{-0.52} \approx 0.300
 \end{aligned}
 \tag{2.3.12}$$

Eine Korrelationsanalyse von Waldcharakteristika mit den besten Waldparametern, beziehungsweise den Optimierungsgrößen, wie in [Teich et al. \(2012\)](#) durchgeführt, könnte eine weitere Verfeinerung der gewonnenen Verteilung bringen. Beispielsweise konnte ein signifikanter ( $p < 0.01$ ) Zusammenhang zwischen dem zusammengeführten Parameter  $c_{res}$  und dem Waldparameter *Structure* (vertikale Waldstruktur) von  $R_s = 0.419$  gefunden werden. Der Waldparameter wurde von [Teich et al. \(2012\)](#) in mehrere Klassen eingeteilt, beispielsweise Klasse 1 = *One layer* (einschichtig). Der Faktor  $R_s$  stellt dabei den Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman dar. Was aus dieser Analyse hervorgeht, ist, dass die Waldbremswirkung, repräsentiert durch  $c_{res}$  tendenziell ansteigt, wenn der Wald in seiner vertikalen Struktur mehrschichtiger aufgebaut ist. Nach diesen Kriterien könnten die Pfade weiter unterteilt werden um auf die Besonderheiten der jeweiligen Klasse einzugehen. Eine weitere interessante Unterteilung wäre ebenso die Art der Waldzusammensetzung, Kronendeckungsgrad und andere (vgl. [Teich et al., 2012, 2014](#)). Auf eine weitere Unterteilung wird in diesem Abschnitt verzichtet, da die Anzahl der untersuchten Pfade zu gering ist und daher eine weitere Verfeinerung dazu führen würde, dass die Ergebnisse zu stark die Einflüsse eines einzelnen Pfades repräsentieren würden (vgl. Abschnitt 2.3.3).

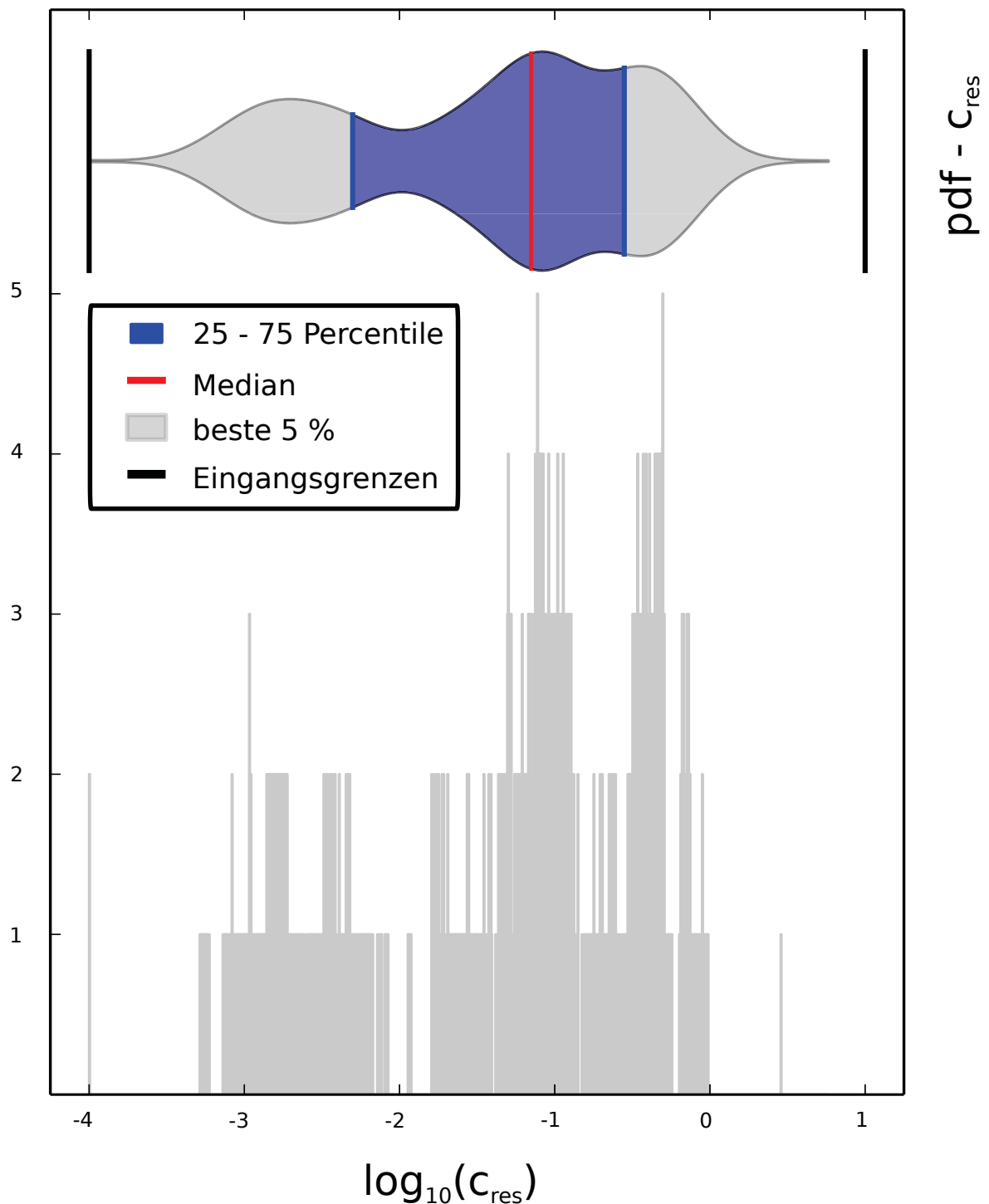
## 2.4 Probabilistische Simulation der Waldwirkung

Die in den Kapiteln 2.3.3 und 2.3.4 gewonnenen Ergebnisse werden in diesem Abschnitt auf zwei Testgebiete angewandt. Für die im Tiroler Bezirk Lienz, beziehungsweise in der Katastralgemeinde Innervillgraten liegenden Lawinen sind Geländeaufnahmen angefertigt worden, wobei verschiedene Ereignisgrößen ermittelt, beziehungsweise Waldparameter erfasst wurden, die als Eingangsgrößen für die Simulation verwendet werden. Nachfolgend werden zuerst die beiden Testgebiete vorgestellt. Anschließend wird ein probabilistisches Simulationskonzept erstellt und angewandt. Mit den gewonnenen Ergebnissen, beziehungsweise deren Unsicherheiten wird aufgezeigt, wie die Berücksichtigung von Wald in der Lawinensimulation erfolgen und visualisiert werden kann.

### 2.4.1 Testgebiete - Walddlawinen

#### Prant Lawine

Das Einzugsgebiet der Prant Lawine befindet sich oberhalb des Weilers Kalkstein auf 1640 m Seehöhe (vgl. Anhang B.1). Bis zu den 1970er Jahren sind häufig Anrisse aus der Verflachung des vom Kalksteinbaches orographisch links gelegenen Mittelhangs beobachtet worden. Zum damaligen Zeitpunkt wie auch heute wird die Anrisszone durch einen teils lückenhaften Lärchenbestand bestockt. Unterschiede zu früheren Ereignissen ergeben sich aus der Fichtenbeimischung und der zunehmend aufkommenden Bodenvegetation aus Alpenrosen und



**Abbildung 2.9:** Gemeinsame Verteilung der des Waldparameters  $c_{res}$  für die besten 5% der Simulationsergebnisse für 18 Waldlawinenereignisse; in grau hinterlegt ist das Histogramm der Auftretenshäufigkeit, darüber platziert ist ein Violine-Plot, wo anschaulich die Ergebnisse des Histogramms, beziehungsweise statistische Kenngrößen daraus (Median, Quantilwerte), sowie als schwarze Balken die Grenzen der Eingangsparameter aufgetragen sind. Auf der x-Achse ist der Logarithmus des variierten Parameters  $c_{res}$  aufgetragen.

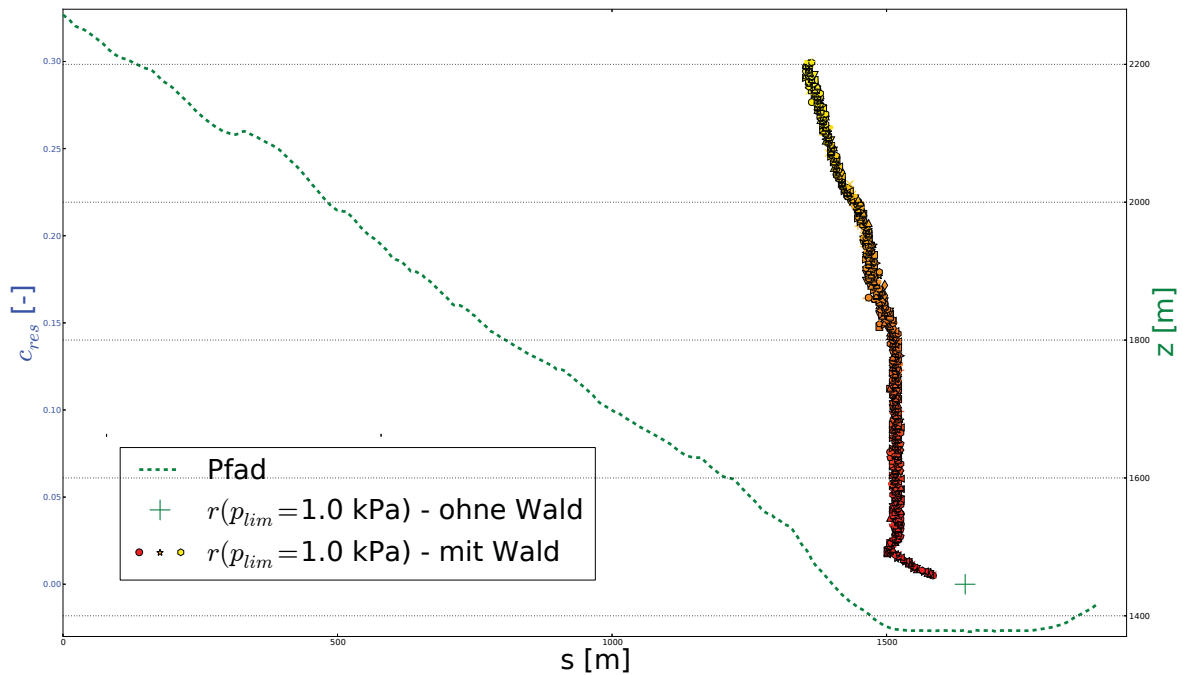
Zwergsträuern (vgl. Anhang A.3). Vor den 1970er Jahren sind Ereignisse aus den damals unbewaldeten Bereichen nordöstlich des Kalksteiner Egg bis auf 2100 m bekannt. Die Vegetation war maßgeblich beeinflusst durch intensive Beweidung und wurde gebildet durch eine Grasnarbe mit Kleinsträuchern und teilweise glatten Almwiesen.

Im Zuge der Geländeaufnahmen (vgl. Anhang A.3) und unter Einbeziehung der Aussagen Ortsansässiger wurde eine ereignisbezogene Abbruchfläche für die Simulation nachkartiert. Diese gliedert sich in zwei Teilanbrüche, welche von  $\approx 1860$  m bis auf 2010 m reichen. Die Anrisszone ist Nord-Ost bis Ost exponiert und weist eine durchschnittliche Neigung von  $37^\circ$  auf. Die Anbruchmächtigkeit betrug laut Berichten Ortsansässiger  $\approx 0.40$  m. Für die Simulation ergibt sich somit ein Anbruchvolumen von  $\approx 6000 \text{ m}^3$ . Die Sturzbahn im Wald kann als annähernd flächig beschrieben werden, mit gelichteten Fichten- und Lärchenbeständen und einer Alpenrosenvegetation als Strauchschicht. Die Lawinensturzbahn reichte bei Extremereignissen bis zum Talboden. Ablagerungen früherer Ereignisse sind bis auf Grundparzelle 2194/4 bekannt, wo sich heute das Gasthaus Badl Alm befindet (vgl. Abbildung B.1). Bei kleineren Ereignissen wurde regelmäßig der oberhalb liegende Forstweg, welcher unter anderem die Alfenalm erschließt, überfahren.

### Berglet Lawine

Das Einzugsgebiet der Berglet Lawine ist auf der orographisch linken Seite des Villgratenbaches gelegen. Das Süd-exponierte potentielle Anbruchgebiet wurde im Zuge der Revision des GZP Innervillgraten (LE.3.3.3/66-IV5/2009) aufgrund der topographischen Gegebenheiten mit einer Fläche von insgesamt  $\approx 7$  ha zwischen einer Seehöhe 2000 m bis 2200 m ausgewiesen. Bei den Geländeaufnahmen (vgl. Anhang A.4 und B.2) ist die ereignisbezogene Abbruchfläche des Lawinenabganges aus dem Jahre 1986 unter Einbeziehung der Aussagen Ortsansässiger nachkartiert worden. Das so gewonnene Anbruchgebiet, das für die Simulation herangezogen wird, weist eine Gesamtfläche von 4.10 ha auf und erstreckt sich zwischen 2110 m und 2230 m Seehöhe. Die Abbruchfläche mit einer durchschnittlichen Neigung von  $32^\circ$  gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teilanbruchgebiete, differenziert nach maßgeblicher Auslösung eines Ereignisses (extremer Schneefall, Einwehung von Nordwest). Durch dieses Anbruchzenario ergaben sich laut Aussagen Ortsansässiger Anbruchmächtigkeiten von  $\approx 1.2$  m, was für die Simulation zu einem Anbruchvolumen von  $\approx 50000 \text{ m}^3$  führt. Das Anbruchgebiet der Lawine ist teilweise verbaut, da aufgrund der schwierigen Erreichbarkeit des Abbruchgebietes (keine Erschließung) im Einzugsgebiet der Berglet Lawine bis zum Jahre 2012 keine technischen Verbauungsmaßnahmen durch den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung durchgeführt wurden. Nach dem Ereignis 1986 wurden grüne Maßnahmen im Abbruchbereich gesetzt. Um die Voraussetzung für das Aufkommen eines Jungwuchses zu schaffen, sind in den Aufforstungsflächen Gleitschneeschutzmaßnahmen getroffen worden, indem Teile des Hangbereiches verpflockt wurden. Zudem wurden Teile des Anbruchgebietes mittels Stahlschneebrücken verbaut (vgl. Abbildung 2.3 (b)).

Zum Zeitpunkt des Ereignisses 1986 war die Abbruchfläche unbewaldet. Die potentielle Waldgrenze wurde kenntlich durch den Einfluss von Almwirtschaft gedrückt. Aktuell stockt ein einschichtiger, lichter Lärchen- und Fichtenwald mit vorherrschender Einzelbaumstruktur. Die Strauchschicht bildet eine Alpenrosenvegetation. Die Sturzbahn ist im Hochwald oberhalb der Höfe "Berglet" runsenförmig, geht dann über flächigere, steile Wiesen bis zu einem weiteren steilen Absturz, wo sie wiederum in eine Runse mündet und schließlich im Talboden



**Abbildung 2.10:** AIMEC-Analyse der 1000 Simulationsergebnisse der Berglet Lawine; in grün hinterlegt ist das Höhenprofil des zentralen Fließpfades. Aufgetragen sind die Ausläuflängen  $r$  gegenüber dem entsprechenden Parameter für  $c_{res}$ . Die Farbcodierung beinhaltet keine zusätzliche Information.

ausläuft. Die gesamte Sturzbahn erstreckt sich über eine Höhe von  $\approx 700$  m. Beim Ereignis 1986 wurden Ablagerungshöhen von bis zu 1 m im Bereich der Landesstraße dokumentiert. Schäden waren im Bereich "Schmiedhofer" zu verzeichnen.

## 2.4.2 Probabilistisches Simulationskonzept

Für die probabilistische Simulation werden die Ergebnisse der vorangegangenen Kapitel 2.3.3 und 2.4 herangezogen. Die Parameter des Reibungsmodells werden, wie aus der Parameteroptimierung in Kapitel 2.3.3 hervorgeht, mit  $\mu = 0.35$  und  $\tau_0 = 160$  kPa festgelegt und für die Erfassung des Waldeinflusses wird der Waldparameter nach Gleichung (2.3.12) im Bereich der 25% – 75%–Percentile zwischen  $c_{res} = [0.005, \dots, 0.300]$  in 1000 regelmäßigen Abständen variiert. Die Ergebnisse der somit durchgeführten Simulationen können wieder mit der AIMEC-Methode ausgewertet werden, vgl. Abbildung 2.10. Die Ergebnisse entsprechen jenen in Kapitel 2.4.3, beziehungsweise Anhang C.2, die Darstellung unterscheidet sich insofern als dass in Abbildung 2.10 die flächigen Simulationsergebnisse in ein mit dem Pfad ausgerichtetes Koordinatensystem transformiert werden und die vorliegende Abbildung somit einen Schnitt durch den zentralen Fließpfad darstellen. Darin ist der Einfluss des Waldparameters auf die Ausläuflänge ersichtlich; je größer der Parameter für  $c_{res}$  gewählt wird, umso stärker die bremsende Wirkung, der Unterschied zwischen der weitesten und kürzesten Ausläuflänge beträgt  $\approx 200$  m. Das grüne + kennzeichnet die Ausläuflänge der Referenzsimulation ohne Waldeinfluss  $r = 1643$  m. Diese ist um  $\approx 60$  m weiter als die maximale Ausläuflänge aus den Simulationen mit dem Einfluss von Wald durch  $c_{res}$ .

### 2.4.3 Waldschutzwirkung in der Simulation

Bei der Visualisierung, beziehungsweise Interpretation von Simulationsergebnissen ist es wichtig zu berücksichtigen, dass verschiedenste Unsicherheiten in die Berechnung mit eingegangen sind (vgl. Ancey et al., 2003; Straub und Grêt-Regamey, 2006; Eckert et al., 2010; Kunz et al., 2011; Kofler und Fischer, 2015). Diese Unsicherheiten haben verschiedene Ursprünge; einerseits sind die Eingangsgrößen, beziehungsweise Beobachtungen eines Ereignisses mit Unsicherheiten behaftet. Beispielsweise ist die Abgrenzung eines Anbruchgebietes aus Fotos mit eingeschränkter Genauigkeit rekonstruierbar. Des Weiteren werden in den Simulationsansätzen Modellvereinfachungen getroffen (vgl. Abschnitt 2.3.2) und die mit Optimierungsverfahren ermittelten Standardwerte von Modellparametern weisen ebenso eine Restunschärfe auf, da auch die für die Rückrechnung erforderlichen Beobachtungen nur mit begrenzter Genauigkeit bestimmt werden können. Die Quantifizierung aller Unsicherheiten ist im Allgemeinen kaum möglich und daher weisen die resultierenden Ergebnisse Ungenauigkeiten zufolge verschiedener Quellen auf, die nicht zugeordnet werden können.

Für die in diesem Abschnitt vorgestellten Testgebiete bezieht sich die Visualisierung der Ergebnisse vor allem auf die Unsicherheiten des Waldeinflusses. Die Unsicherheiten des verwendeten Reibungsmodells (vgl. Abschnitt 2.3.3) werden an dieser Stelle nicht betrachtet, Methoden zur Beurteilung dieser sind in Ancey (2005); Eckert et al. (2010); Fischer und Kofler (2013); Kofler und Fischer (2015) zu finden. In den Abbildungen sind die Ergebnisse der Simulationsläufe mit variablem  $c_{res}$  dargestellt. Durch die Wahl des Grenzwertes für die Abgrenzung des Wirkungsbereiches kann für jede Simulation aus den maximalen Druckergebnissen über die Zeit die Auslauflänge, beziehungsweise der Wirkbereich selbst flächig ermittelt werden. Dazu wird ein Filter über das jeweilige Druckraster gelegt, der alle Rasterpunkte mit  $p \geq p_{lim}$  als getroffen und Rasterpunkte mit  $p < p_{lim}$  als nicht getroffen kennzeichnet. Damit kann für jeden Rasterpunkt eine statistische Aussage getroffen werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit er bei einem entsprechenden Ereignis getroffen wird.

In den Abbildungen C.1 und C.2 sind die Ergebnisse der probabilistischen Simulation für beide Testgebiete visualisiert. Darin sind farbcodiert die Auftretenshäufigkeiten von  $p > p_{lim} = 1$  kPa dargestellt. Die in gelb eingefärbten Flächen kennzeichnen jene Flächen, die in maximal 5% der Simulationen getroffen werden. In orange sind jene Flächen eingefärbt, bei welchen der Grenzwert des Wirkungsbereiches in mehr als 5% der Fällen überschritten wird und in rot sind jene Flächen gekennzeichnet, die in 100% der Simulationen, also bei jeder Simulation eine Druckwirkung von  $p > p_{lim}$  aufweisen. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass außerhalb des eingefärbten Bereiches nach dem verwendeten Simulationskonzept (Reibungsmodell:  $\mu = 0.35$ ,  $\tau_0 = 160$  kPa und Waldberücksichtigung  $c_{res} = [0.005, \dots, 0.3]$ ) keine der Simulationen eine Druckmagnitude  $p > p_{lim}$  aufweist. Dem gegenüber steht die Simulation ohne Waldwirkung  $c_{res} = 0$ , beziehungsweise die entsprechende 1 kPa Druckgrenze in blau. Bei der Prant Lawine ist zu beobachten, dass die Referenzsimulation ohne Waldwirkung zu einem größeren Einflussbereich führt als die Umhüllende der Simulationen mit Waldeinfluss. Bei der Berücksichtigung des Waldeinflusses bei der Berglet Lawine ist zu beobachten, dass im Allgemeinen die Auslauflänge kürzer wird je größer die bremsende Wirkung von Wald angenommen, beziehungsweise der Faktor  $c_{res}$  wird. Bedingt durch eine Richtungsänderung, die sich durch ein verändertes Fließverhalten mit höherer Reibung, beziehungsweise geringerer Geschwindigkeit ergibt, werden im Auslauf orographisch links von weniger als 5% (gelbe Fläche in Abbildung C.2) kleine Bereiche betroffen, die ohne Berücksichtigung von Wald nicht getroffen werden.



Allgemein ist aber gut zu erkennen, dass eine Erhöhung von  $c_{res}$ , was einer Erhöhung der effektive Waldreibung, beziehungsweise Waldschutzwirkung entspricht, einen erheblichen Einfluss auf den Einfluss der Lawine hat (beispielsweise  $\approx 200$  m zwischen dem weitesten und dem geringsten Auslauf bei Berücksichtigung von Wald für die Berglet Lawine). Im Vergleich dazu beträgt der Unterschied zwischen dem Auslauf ohne Waldeinfluss und dem weitesten Auslauf bei Berücksichtigung von Wald  $\approx 60$  m. Bei der Prant Lawine sieht das Verhältnis anders aus; der Unterschied zwischen Vernachlässigung  $c_{res} = 0$  und Berücksichtigung von Wald beträgt mindestens  $\approx 45$  m, der Einfluss von Wald spielt sich innerhalb  $\approx 40$  m ab.

## 2.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde untersucht, wie sich Wald auf Lawinen auswirken kann und ob der bremsende Einfluss erfasst werden kann. Wie in Abschnitt 2.1 festgehalten, hat Wald einen großen Einfluss in potentiellen Anbruchgebieten, dort wirkt er sich vor allem stabilisierend auf die Schneedecke aus. In der Sturzbahn einer Lawine ist die Schutzwirkung genauer zu differenzieren; bei kleinen Ereignissen kann der Einfluss abhängig von der Waldbeschaffenheit beträchtlich sein, bei größeren Ereignissen, beziehungsweise schlechtem Waldzustand kann die Wirkung verschwindend klein werden. Daher ist eine Kenntnis des Waldes, beziehungsweise seiner Struktur und seines Zustandes von fundamentaler Wichtigkeit bei der Beurteilung seiner Schutzwirksamkeit. Dafür bedarf es einer Bestandsaufnahme.

Mittels des in Abschnitt 2.2 entwickelten Aufnahmeblattes wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Waldstruktur und die zentralen Waldparameter einheitlich aufzunehmen und somit für die Beurteilung übersichtlich bereitzustellen, wobei in Zusammenhang mit Waldlawinen zwischen (potentiell) Anbruchgebiet und Sturzbahn zu unterscheiden ist. Das Aufnahmeblatt wurde des weiteren so gestaltet, dass eine Kartierung von Waldlawinenereignissen möglich ist. Für zwei Beispiele sind die Waldstrukturparameter und Ereignisparameter im Feld aufgenommen worden. Die zentralen Parameter darin sind die Hangneigung, die Waldgruppe und seine Vertikalstruktur. Für das Anbruchgebiet sind zusätzlich Parameter wie der Überschirmungsgrad, die stützwirksame Bodenrauigkeit oder die maximalen Abmessungen einer Lücke von Bedeutung.

Für die Berücksichtigung von Wald in Lawinensimulationssoftware gibt es verschiedene Ansätze, deren Vor- und Nachteile in Abschnitt 2.3.2 genauer spezifiziert sind. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der Reibungsansatz generell mittelgroße bis große Lawinen geeignet sind, wohingegen der von Feistl et al. (2014) vorgestellte Ansatz prinzipiell für kleinere Lawinen besser funktioniert. Diese Aussage wird allerdings wieder dadurch begrenzt, als dass das zugrundeliegende Reibungsmodell für die Beschreibung der Bewegung der Lawine nur bedingt für die Größe der zu modellierenden Ereignisse geeignet ist. Daher wurde in dieser Untersuchung versucht, ein Modell zu verwenden, welches eine bessere Beschreibung von Kleinlawinen ermöglicht. Dessen Reibungsparameter wurden mittels Rückrechnung von drei dokumentierten Kleinlawinen optimiert. Auf dieser Basis wurden zusammen mit dem in SamosAT implementierten Modell für die Berücksichtigung von Wald (Reibungsansatz) 40 dokumentierte Waldereignisse nachgerechnet. Allerdings konnten nur 18 der Ereignisse nachgebildet werden, da die dokumentierte Auslauflänge bereits bei der Simulation ohne den Einfluss von Wald ( $c_{res}$ ) nicht erreicht werden konnte, beziehungsweise zwei der Lawinen

aufgrund der zu geringen Anbruchmächtigkeit gar nicht starteten. Dies zeigte die Anwendungsgrenzen des implementierten Modells auf. Aufgrund der 18 überprüften Waldlawinen, konnte der Widerstandsparameter für die Bremswirkung optimiert werden.

Mithilfe der gewonnenen Modellparameter und der aufgenommenen Ereignis- und Waldparameter konnte so ein probabilistisches Simulationskonzept aufgesetzt werden (vgl. Abschnitt 2.4). Die Ergebnisse dieser Simulationen sind in Anhang C.1 und C.2 dargestellt und in Abschnitt 2.4.3 interpretiert. Einen wichtigen Punkt stellen bei der Darstellung die auftretenden Unsicherheiten der Modellierung dar. In diesem Abschnitt wurden vor allem Unsicherheiten zufolge des Waldeinflusses untersucht und dargestellt. Für eine vollständige Beschreibung der Unschärfen einer Simulation bedarf es einer umfangreichen Untersuchung der eingehenden Größen. Darunter fallen, wie schon angedeutet, das verwendete Simulationsmodell, beziehungsweise das implementierte Reibungsmodell oder die Ausweisung der Anbruchgebiete und die Schneehöhenverteilung darin.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich der Einfluss von Wald prinzipiell mithilfe eines brauchbaren Modells darstellen lässt. Die Schutzwirkung des Waldes, beziehungsweise ihre Variabilität kann wie in Abschnitt 2.4.3 dargestellt, statistisch erfasst und graphisch dargestellt werden, die Quantifizierung der Unsicherheiten stellt allerdings weiterhin eine große Herausforderung dar. Einen wichtigen Punkt stellen die Feldaufnahmen dar, da, wie in Abschnitt 2.4 erwähnt, die darin erhobenen Waldparameter bei ausreichender Datenlage in die Simulation eingehen und die Ergebnisse somit verfeinert werden könnten (beispielsweise Klassifizierung nach Waldtyp usw.). Zudem stellt, wie in Abschnitt 2.3.2 angemerkt, eine einheitliche und gute Dokumentation, die Grundlage für die Verbesserung existierender Modelle dar.

## 3. Extremwertstatistik

Für die Gefahrenabschätzung von Lawinen ist das Wissen über die Frequenz und Magnitude von auftretenden Ereignissen von besonderem Interesse. Eine Möglichkeit die Ereignismagnitude mit der Auftretenswahrscheinlichkeit für ein Einzugsgebiet in Relation zu setzen bietet u.A. die statistische Auswertung dokumentierter Lawinenereignisse (Skolaut et al., 2011). Im folgenden Kapitel wird ein solcher Ansatz am Beispiel einer extremwerttheoretischen Analyse von Lawinenausläuflängen vorgestellt und für drei ausgesuchte Lawineneinzugsgebiete angewendet.

### 3.1 Analyse historischer Lawinenereignisse - Überblick

Mittels unterschiedlicher Herangehensweisen wurde bereits von einer Vielzahl von Autoren versucht, durch die Untersuchung dokumentierter Lawinenereignisse eine Abschätzung der Lawinengefahr durchzuführen. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über Arbeiten, die zu diesem Thema durchgeführt wurden.

(Föhn und Meister, 1981) zeigten in einer Studie, wie Lawinengröße und -häufigkeiten aus direkten Beobachtungen und indirekt aus Schneedeckendaten bestimmt werden können. Bei der Anwendung dieser beiden Ansätze traten Differenzen auf. Es stecken gewisse Vereinfachungen und Annahmen dahinter, die es erst ermöglichen die jeweiligen Modelle anzuwenden. Eine Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Unsicherheiten in den Eingangsdaten und den Modellparametern dafür verantwortlich sind. Für die Praxis heißt das, dass Kalibrierungen der Methoden notwendig sind und die Modellergebnisse immer nur ein Teil der Gesamtbeurteilung darstellen sollen.

Eckert et al. (2007a) verwendeten jährliche Lawinendaten auf Gemeindeskala, um die Wiederkehrdauer von Lawinen räumlich zu untersuchen. Dazu wurden 124 Gemeinden mit 18755 Lawinenereignissen aus 60 Jahren herangezogen. Das verwendete Verfahren beruht auf hierarchisch bayes'scher Statistik, welches unter anderem auch in der Medizin zur Berechnung der Ausbreitung von Epidemien eingesetzt wurde. Es geht von gewissen Annahmen aus, wie beispielsweise der Übertragbarkeit von Eigenschaften zwischen benachbarten Gebieten. Das bedeutet, dass z.B. benachbarte Gemeinden ähnliche meteorologische Charakteristiken und ähnliche topographische Eigenschaften besitzen. Diese werden mit dem Abstand gewichtet übertragen. Es resultierte, dass 60% von den gesamten Variationen auf die räumliche Struktur zurückzuführen sind.

Eckert et al. (2007b) und Eckert et al. (2008) kombinierten ein einfaches Lawinen-Blockmodell mit dem Bayesischen Ansatz. Das Ziel war die statistische Beschreibung der Ausläuflänge und der Wiederkehrdauer. Jedes Lawinenereignis benötigt zur Initialisierung die Startposition und -geschwindigkeit. Einige Annahmen und Vereinfachungen sind notwendig, wie z.B., dass die Lawinenereignisse unabhängig voneinander sind; das trifft nicht für Einzelereignisse zu, allerdings ist dies für Langzeitbetrachtungen erfüllt. Die beobachtete Ausläuflänge wird dazu

verwendet, die Modellparameter zu bestimmen. Dazu wird das Bayes'sche Theorem mittels Monte Carlo Techniken ermittelt. Als Ergebnis liegen die Modellparameter nun in Form von Wahrscheinlichkeitsverteilungen vor. Damit lassen sich statistische Aussagen über die Auslauflänge und die Wiederkehrdauer machen. Der Ansatz von [Eckert et al. \(2007b\)](#) eröffnet neue Ansichten zur Interpretation der Auslauflänge und der Wiederkehrdauer in Bezug auf die Zonenplanung. Allerdings ist es für eine operationelle Anwendung notwendig eine ausführliche Validierungen durchzuführen und anstatt des einfachen Blockmodells, ein State-of-the-Art Lawinenmodell zu verwenden.

Statistische Analysen numerischer Simulationen und Beobachtungen, sowie kleinskalige Experimente, wurden anhand des mächtigen Lawinenpfades Taconaz nahe Chamonix (Frankreich) von [Naaim et al. \(2010\)](#) verglichen. Der Schwerpunkt der Betrachtungen lag bei Wirkung der künstlichen Hindernisse in der Sturzbahn. Zudem wurden das Volumen des Anbruchs und die Froudezahl variiert. Es zeigte sich, dass im Prinzip die Ergebnisse übertragbar sind, allerdings einige Annahmen im Experiment und in der Numerik des Modells verbesserbar sind.

[Ancey et al. \(2004\)](#) und [Salm \(1997\)](#) weisen darauf hin, dass physikalisch-basierte Lawinenmodelle explizit noch keine Wiederkehrdauer beinhalten. Nur die Kombination mit statistischen Ansätzen ermöglicht die Bestimmung von Wiederkehrdauer der Auslauflänge und der Lawindrücke. Dazu führten sie statistische Methoden ein, die bisher in der Hydrologie verwendet wurden. Die 3-Tages-Neuschneehöhe und der Coulomb'sche Reibungskoeffizient wurden dabei als statistische Größen definiert. In der Schlussfolgerung wird betont, dass die Methode nur auf Lawinenpfade angewandt werden kann, wenn ausreichend Informationen vorhanden sind.

[Ancey \(2012\)](#) wirft die Frage auf, ob Katastrophenlawinen mit den bisher verwendeten Extremwertstatistiken beschrieben werden können oder ob sie als Ausreißer zu betrachten sind und damit anderen Gesetzmäßigkeiten folgen. Es sind nicht nur meteorologische Bedingungen, die zu Katastrophenlawinen führen, es spielen Geländeparameter und deren Veränderungen, wie z.B. Vorverfüllungen und Entwaldung, sowie Gabelungen in der Sturzbahn eine entscheidende Rolle. [Ancey \(2012\)](#) weist darauf hin, dass die Katastrophenlawinen größer sind als es die Grundlagen zur Bemessungen vorgeben. Daher ist zu berücksichtigen, dass sich in einzelnen Lawinenpfaden solch große Lawinen entwickeln können.

Topographische Modelle wurden eingesetzt, um den Auslauf von extremen Lawinen in Ort und Zeit zu bestimmen ([McClung, 2000](#); [McClung und Lied, 1987](#)). Die räumliche Extremwertstatistik beruht dabei auf der Gumbel-Verteilung und die Bestimmung der Wiederkehrdauer basiert auf der Poisson-Verteilung (aufgrund der Charakteristik, dass Lawinen 'selten' auftreten). [McClung et al. \(1989\)](#), [Mears \(1989\)](#), [McClung und Mears \(1991\)](#) und [McClung \(2000\)](#) stellten fest, dass die Parameter für Gebirgsgruppen als konsistent angenommen angenommen werden können, wenn sie mit ausreichenden Daten für das Gebiet bestimmt werden.

[McClung \(2001\)](#) verglich empirische Modelle zur Berechnung des Auslaufs von extremen Lawinen. Dabei unterscheidet er zwischen Regressionsmodellen und extremwert-statistischen Methoden. Bei dem Vergleich stellte sich heraus, dass die Ergebnisse variieren und von den verwendeten Modellen abhängen. Die Analyse zeigte, dass die Neigung der Auslaufzone und die gewählte Verteilung die Wahrscheinlichkeiten für das Erreichen eines Punktes im Auslauf beeinflussen. Dabei wird die Abweichung des Regressionsmodells von einer Normalverteilung beschrieben, die Auslauflängen oder -verhältnisse gehorchen hingegen einer Gumbelverteilung ([Nixon und McClung, 1993](#)). Die Gumbel-Parametrisierung erzielt für flachen Auslauf konservative Ergebnisse, umgekehrt ist die Regression für steiles Terrain konservativer. Für steile

Auslaufgebiete ist die Gumbel-Parametrisierung näher an den Beobachtungen. Um einen klimatologischen Einfluss auf die Ergebnisse gering zu halten, verwendete [McClung \(2001\)](#) Daten aus mehreren Gebieten in den USA, Kanada und Norwegen.

[Keylock \(2005\)](#) schlug einen alternativen Weg vor. Er nutzte die Generalisierte Pareto Verteilung und fragte danach, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Schwellwert (peaks-over-threshold) überschritten wird. Diesem generellen Ansatz liegen die Gumbel-, die Fréchet- und Weibullverteilung zugrunde. Diese robustere Methode wird auch in der Hydrologie für Extremwertstatistiken verwendet.

Lawinen unterschiedlicher Größe können die selbe Auslauflänge aufweisen, allerdings unterscheiden sich die Wahrscheinlichkeiten, dass sie diese Auslauflänge erreichen ([Keylock et al., 1999](#)). [Barbolini und Keylock \(2002\)](#) berücksichtigten daher auch die Lawinendrucke, was ihnen durch die Kombination der statistischen Methoden mit einem deterministischen Modellen gelang. Sie verwendeten dazu ein eindimensionales Lawinenmodell. Der Vorteil ihrer Vorgangsweise liegt darin, dass sie auch mit nur wenigen historischen Aufzeichnungen anwendbar ist und die Konfidenzintervalle bestimmt werden können.

Eine etwas andere Herangehensweise zeigen die Isländer ([Jonasson et al., 1999](#)). Sie definieren das Risiko ein Leben zu verlieren nicht über Wiederkehrdauer, sondern die Wahrscheinlichkeit. Die akzeptable Wahrscheinlichkeit in einem Wohnhaus ums Leben zu kommen geben sie mit  $0,3 \cdot 10^{-4}$  an. Das würde einer Wiederkehrdauer zwischen 3000 und 8000 Jahren entsprechen. [Jonasson et al. \(1999\)](#) verwendeten als physikalisches Lawinenmodell das PCM von [Perla et al. \(1980\)](#).

## 3.2 Methodik zur Analyse historischer Zeitreihen in EVAMETH

Im Zuge dieses Projektes werden, in Anlehnung an Methoden aus der Hydrologie (vgl. [DWA, 2012](#)), dokumentierte Lawinenereignisse extremwertstatistisch analysiert. Das Ziel der Auswertung ist es eine Beziehung zwischen der Intensität bzw. Magnitude von Lawinenereignissen und der entsprechenden Ereignishäufigkeit (Wiederkehrdauer) für ausgesuchte Lawineneinzugsgebiete herzustellen. Als Kenngröße für die Ereignismagnitude wurden Auslauflängen (Horizontalprojektion der Auslauflängen entlang des Lawinenpfades) herangezogen, da diese Information für die meisten Ereignisse direkt dokumentiert (Kartierung, Vermessung), oder indirekt rekonstruierbar ist (Abschätzung an Hand textlicher Beschreibungen, Fotodokumentation, etc.). Für eine Beschreibung der angewendeten Methode zur Abschätzung von Jährlichkeiten für Auslauflängen von Lawinen sei an dieser Stelle auf [Fischer et al. \(2013\)](#) verwiesen. Für die Anwendung dieser Methode werden einerseits die Auslauflängen dokumentierter Extremereignisse bzw. Schadereignisse herangezogen, andererseits sind Informationen zur Auslauflänge von Ereignissen, welche kein extremes Ausmaß aufweisen (z.B. jährlich auftretendes Auslaufmaximum), von besonderem Interesse. Zusätzlich erlaubt es die vorgestellte Methode Lücken in der Zeitreihe durch einen Grenzwert abzubilden, welcher die minimale Magnitude eines Extremereignisses für den entsprechenden Lawinenpfad darstellt.

Für die Anwendung der Methode in Evameth wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

- Zusammenstellung von Chronikdaten für die untersuchten Lawineneinzugsgebiete aus verschiedenen Quellen. Dies inkludiert Aufzeichnungen zu Schadereignissen bzw. Ereignissen mit großer Magnitude und, wenn vorhanden, Aufzeichnungen zu häufiger auftretenden Ereignissen geringeren Ausmaßes.
- Aufbereitung der Daten. Um die Auslauflängen statistisch auszuwerten, wurden Informationen zur Auslauflänge aus den Aufzeichnungen extrahiert und homogenisiert (Projektion der Auslauflängen für verschiedene Ereignisse auf einen zentralen Lawinenpfad).
- Extremwerttheoretische Analyse der Daten nach Methoden aus der Hydrologie (vgl. [DWA, 2012](#)).

### 3.3 Anwendung für ausgesuchte Lawineneinzugsgebiete

Die von [Fischer et al. \(2013\)](#) vorgestellte Methodik zur Bestimmung von Jährlichkeiten für Auslauflängen von gut dokumentierten Lawineneinzugsgebieten wurde für drei Lawineneinzugsgebiete angewendet.

#### 3.3.1 Vorstellung Einzugsgebiete

##### Durbach

Das Einzugsgebiet der Durbach Lawine liegt im Defereggental, im westlichen Teil des Tiroler Bezirkes Lienz, in der Katastralgemeinde St. Veit i. D. Das Defereggental ist ein von Westen nach Osten verlaufendes Seitental des Iseltales.

Das ca. 31 ha große Lawinenanbruchgebiet wird von der Kammlinie des Kreuzberges zwischen Donnerstein und Melspitze umrahmt. Das Anbruchgebiet erstreckt sich zwischen 2.400 m und 2.720 m Seehöhe. Die Abbruchfläche ist SO – S – SW exponiert. Die durchschnittliche Neigung liegt bei 37°. Das Anbruchgebiet liegt weit über der Waldgrenze, die durch dauernde Lawinenereignisse und die Almwirtschaft bis auf 1.950 m Seehöhe gedrückt wurde.

Die Lawine geht zunächst über steiles mit Gras und mit Geröll durchsetztes Gelände bis sie kanalisiert wird. Die Hauptstoßrichtung der Lawine bildet der Graben des Durbaches. Der Bewuchs in den seitlichen Grabeneinhängen zeigt deutlich die Wirkung bzw. die räumliche Ausdehnung von Staublawinen und erlaubt Schätzungen hinsichtlich deren Frequenz.

Die Durbach Lawine weist keine Gefahrenzonen auf, da sie gemäß der Gefahrenbeurteilung der Wildbach- und Lawinenverbauung außerhalb des raumrelevanten Bereiches liegt. Im unmittelbaren Wirkungsbereich der Durbach Lawine befinden sich 490 lfm Gemeindestraße. Verbauungsmaßnahmen befinden sich in der Sturzbahn (Galerie über Gemeindestraße) sowie im Auslaufbereich der Lawine (Ablenkdam). Bei entsprechender Gefährdung durch Lawine werden zudem temporäre Maßnahmen (Straßensperren) gesetzt.

Zahlreiche Großereignisse sind bekannt. Als dominante Prozessart, damit gemeint ist der im Schadensraum aufgrund der vorgefundenen Phänomene festgestellte Leitprozess, kann ein

Staublawinenereignis beschrieben werden. Ebenso weisen die Dokumentationen von Schadergebnissen auf den Einfluss von Nassschneelawinen hin. Jährliche Lawinenabgänge werden bis auf SH 1.750 m beobachtet.

Die Datenreihe aller dokumentierten Lawinenabgänge der Durbach Lawine umfasst eine Zeitspanne von 319 Jahren. Das erste dokumentierte Ereignis reicht auf das Jahr 1695 zurück. Insgesamt konnten 39 Lawinenereignisse erfasst werden. Davon liegen für 35 Lawinenereignisse dokumentierte Auslauflängen vor. Als Quellen dienten Aufzeichnungen der Gebietsbauleitung Osttirol im Lawinenmeldeblatt der Durbach Lawine, Lawinenmeldungen des Gendarmeriepostenkommandos St. Jakob i. D., weiters die Dorfchronik der Gemeinde St. Veit und Beobachtungen, Fotodokumentationen sowie Protokolle der örtlichen Lawinenkommission.

### Moosbach

Das Einzugsgebiet der Moosbach Lawine befindet sich im mittleren Defereggental in der Katastralgemeinde St. Veit i. D. und ist auf der orographisch linken Seite der Schwarzach gelegen.

Aufgrund der topographischen Gegebenheiten (Neigungsverhältnisse, Geländeform, Exposition, Rauigkeit) kann ein potentiell Anbruchgebiet mit einer Fläche von insgesamt ca. 65 ha ausgewiesen werden. Das kesselförmige Anbruchgebiet ist SO – S – SW exponiert und wird durch Geländerippen strukturiert. Die durchschnittliche Neigung beträgt 40°. Die Vegetation ist eine Grasnarbe mit Kleinsträuchern bzw. Grünerlenbewuchs entlang des Lawinestriches. Die Geländerücken sind vereinzelt bis auf ca. 2.150 m Seehöhe hinauf bestockt.

Bei der Moosbach Lawine handelt es sich wie auch bei der Durbach Lawine um eine kanalisierte Lawine, deren Hauptsturzbahn infolge der durch den Bach entwickelten Grabeneinhänge entsprechend verengt wird. Die Sturzbahn ist bis zu 60 m breit und folgt dem Verlaufe des Moosbaches.

Hinsichtlich Ausmaß und Grad der Gefährdung liegt kein flächenhaftes Gutachten der Wildbach- und Lawinenverbauung vor, da auch die Moosbach Lawine außerhalb des raumrelevanten Bereiches liegt. Von der Lawine gefährdet sind insgesamt 130 lfm Landesstraße sowie 110 lfm Gemeindestraße. Wie auch bei der Durbach Lawine wird die Grabenquerung in der Sturzbahn der Lawine durch eine Galerie geschützt. Bei erhöhter Lawinengefahr werden zudem temporäre Maßnahmen (Straßensperren) gesetzt.

Die Lawine geht jährlich bis auf ca. 1.520 m Seehöhe herab, im Durchschnitt alle 6 Jahre bis zum Bereich Galerie – Gemeindestraße. Selten dringt sie bis zur Landesstraße bzw. bis zur Schwarzach vor.

Die Dokumentation der Lawinenereignisse umfasst eine Datenreihe von 138 Jahren. Für 34 Lawinenabgänge liegen Aufzeichnungen zu den jeweiligen Auslauflängen vor. Zudem liegen neben den historischen Daten jährliche Beobachtungen der örtlichen Lawinenkommission für den Zeitraum 1999 – 2014 vor. Als Quellen für die Zusammenstellung der Datenreihe sind zu nennen: Aufzeichnungen der Gebietsbauleitung Osttirol im Lawinenmeldeblatt der Moosbach Lawine, Beobachtungen, Fotodokumentationen sowie Protokolle der örtlichen Lawinenkommission, weiters Lawinenmeldungen in Zeitungsberichten und die Ortschronik der Gemeinde St. Veit.

## Arzler Alm

Die Arzler Alm Lawine befindet sich nördlich der Innsbrucker Stadtteile Mühlau und Arzl.

Das Einzugsgebiet der Arzleralm-Lawine lässt sich unterteilen in drei, durch Geländerippen getrennte, Teilanrissgebiete. Von W nach O finden sich 3 Geländekammern mit anschließenden Trockenrunsen, das Ochsental, Almtal und Brunntal, welche sich unterhalb der Arzler Alm zum Duffbachgraben vereinigen. Das Gesamtanbruchgebiet liegt auf der Südseite des Karwendelgebirges, auf einem Südhang der Innsbrucker Nordkette. Die Neigungsverhältnisse im Anbruchgebiet liegen zwischen  $42^\circ - 44^\circ$ .

Auf Höhe der Arzler Alm (1100m SH) wird das Gelände flacher und die Runsen sind nicht mehr kanalisiert. Etwas unterhalb befindet sich auch der bisherige Lawinen- Auffangdamm (950m SH). Unterhalb schließt der wiederum stärker ausgeprägte Duffbachgraben an, der sich bis zum Auslass (700mSH) hinabzieht. Der anschließende Schwemmkegel setzt sich mosaikartig aus flacheren Siedlungs- und landwirtschaftlichen Flächen zusammen. Die Sturzbahnen weisen ein mittleres Gefälle von  $28^\circ$  auf. Aus der natürlichen Topographie ergibt sich keine Sprungschancenwirkung.

Das Anbruchgebiet der Arzler Alm Lawine liegt im Lee der Niederschlag bestimmenden Winde aus Nordwesten. Seit 1963 wird die Schneesituation auf der Station „Seegrube“ registriert. Es konnten im Laufe der Jahre 1-Tages-Neuschneemengen von bis zu 163 cm und 3-TagesNeuschneemengen von bis zu 300 cm registriert werden. In Mulden kann die Schneedecke durch Windverfrachtung eine Mächtigkeit von bis zu 11 m erreichen.

In den Jahren 1935 - 1941 wurden die ersten Lawinenverbauungen errichtet. 9 gemauerte Lawinentrichter, 4 gemauerte Leitwerke sowie 2 kleine Auffangdämme mit Fallböden sollten das Gemeindegebiet Mühlau schützen, jedoch wurde die Verbauung beim Lawinengroßereignis 1968 (Staublawine mit anschließender Grundlawine) überfahren. In den darauffolgenden Jahren (1955 - 1960) wurden zusätzlich 1 Ablenkdam und 18 Erdkegel erbaut, allerdings ist auch diese Verbauung von der Lawine im Jahre 1968 überfahren worden. Im Zuge der letzten Schutzmaßnahmen wurden in den Jahren 1973 - 1977 ein Auffangdamm, welcher von 8m auf 20m erhöht wurde, sowie 10 Erdhöcker errichtet. Mittels jener Verbauung konnten Lawinenabgänge seither erfolgreich zurückgehalten werden. Für das Gebiet oberhalb des großen Auffangdammes (Sturzbahn) bestehen im Falle eines Lawinenabganges Topographie bedingt einige seitliche Ausbruchsmöglichkeiten. Beispielsweise wäre im Ochsental im Bereiche der Arzler Alm eine Richtungsänderung orographisch nach rechts möglich. Im Almtal könnte eine Lawine im Bereich Zwiesel orographisch links Richtung Brunntal ausbrechen. Für das Brunntal besteht die Möglichkeit einer Aufweitung und Teilung auf der Herzwiese und ist somit ausschlaggebend. Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass die seitlichen Ausbruchsmöglichkeiten durch permanente Verbauungsmaßnahmen wie Leitwerke und Ablenkdam bisher weitgehend unterbunden werden konnten.

Aus der Chronik sind zahlreiche Lawinenereignisse bekannt. Laut den Aufzeichnungen gefährden seit 1855 herabstürzende Schneemassen den besiedelten Bereich des Ortsteiles Mühlau. Als eine der größten Lawinenkatastrophen um Innsbruck ist jene vom 04.02.1935 zu nennen. Jene Lawine ist unterhalb des Gleirscheckes losgebrochen und durch den sogenannten Duftlgraben niedergegangen, wo sie sich in 3 Arme geteilt hat. Die letzten Ausläufer reichten bis zu einer Seehöhe von ca. 660m. Mehrere Häuser wurden dabei verschüttet, des Weiteren sind auch die Josef-Schraffl-Straße und die Schlossfeldgasse von den Schneemassen vollkommen verlegt



worden. Rund 890.000  $m^3$  Lawinenschnee wurden auf der Arzleralm abgelagert, 170.000 $m^3$  gelangten bis nach Mühlau. Es wird von bis zu 30m hohen Lawinenarmen berichtet, deren letzte Reste noch bis Mitte September erhalten blieben.

### 3.3.2 Auswertung für ausgesuchte Einzugsgebiete

Im folgenden werden die Ergebnisse der extremwertstatistischen Analyse der Auslauflängen dokumentierter Ereignisse für die drei vorgestellten Einzugsgebiete präsentiert.

#### Durbach

Die gesamte Zeitreihe für die Durbachlawine umfasst 320 Jahre (siehe Abbildung 3.1 a). Die vom statistischen Fit angegebene Auslauflänge für ein Referenzereignis mit einer ca. 150 jährlichen Wiederkehrdauer liegt bei 2860 m mit einer Bandbreite (Konfidenzintervalle, vgl. Abbildung 3.1 c) von 2820 m bis 2905 m. Das beobachtete Ereignis mit der längsten Auslauflänge in der vorhandenen 320 jährigen Datenreihe (empirische Wiederkehrdauer von 340 Jahren) weist eine Auslauflänge von 2965 m auf, was etwas länger als die berechnete Bandbreite für ein 150 jähriges Ereignis ist, und damit plausibel erscheint (vgl. Abbildung 3.1 c). Will man der Auslauflänge von 2965 m im statistisch angepassten Modell eine Jährlichkeit zuordnen, so kommt man auf einen Wert von jenseits 5000 Jahren, wobei die Bandbreite von 847 Jahren bis unbestimmt groß angegeben werden kann. Eine Interpretation der Graphik in Abbildung 3.1 c) ist im Sinne der Zuordnung einer Jährlichkeit für ein Extremereignis bestimmter Auslauflänge nicht zweckmäßig.

Eine kartographische Übersicht über die berechneten Auslauflängen mit bestimmter Jährlichkeit, sowie eine Auswahl an dokumentierten Ereignissen für den Auslaufbereich der Lawine gibt Abbildung 3.2.

#### Moosbach

Die gesamte Zeitreihe für die Moosbachlawine umfasst einen Zeitraum von 139 Jahren (siehe Abbildung 3.3 a). Die statistisch bestimmte Auslauflänge für ein Referenzereignis mit einer ca. 150 jährlichen Wiederkehrdauer liegt bei 2858 m mit einer Bandbreite (Konfidenzintervalle, vgl. Abbildung 3.3 c) von 2782 m bis 2940 m. Das beobachtete Ereignis mit der längsten Auslauflänge in der vorhandenen Datenreihe weist eine Auslauflänge von 2867 m auf. Damit liegt dieses Ereignis mit einer empirischen Wiederkehrdauer von 159 Jahren innerhalb des bestimmten Konfidenzbereichs für das statistisch ermittelte 150 jährige Ereignis, was wiederum plausibel erscheint. Die Bestimmung der Jährlichkeit für ein Ereignis mit 2867 m Auslauflänge entlang des statistischen Fits gibt wiederum einen Wert von  $> 1000$  Jahren mit einer Bandbreite von 11 Jahren bis unbestimmt groß, was wiederum zeigt, dass die Bestimmung von Jährlichkeiten für Ereignisse mit bestimmter Intensität mit der vorgestellten Methode nur äußerst bedingt möglich ist, während die Information über den Auslauf eines Ereignisses bestimmter Jährlichkeit brauchbare Resultate liefert.

Eine kartographische Übersicht über die berechneten Auslauflängen mit bestimmter Jährlichkeit, sowie eine Auswahl an dokumentierten Ereignissen für den Auslaufbereich der Lawine gibt Abbildung 3.4.

### Arzler Alm

Die Länge der Ereigniszeitreihe für die Arzler-Alm Lawine beträgt 156 Jahre (siehe Abbildung 3.5 a). Die statistisch bestimmte Auslauflänge für ein Referenzereignis mit einer 150 jährlichen Wiederkehrdauer liegt bei 3640 m mit einer Bandbreite (Konfidenzintervalle, vgl. Abbildung 3.5 c) von 3470 m bis 3821 m. Das beobachtete Ereignis mit der längsten Auslauflänge in der vorhandenen Datenreihe weist eine Auslauflänge von 3730 m auf, was wiederum im bestimmten Wertebereich für das statistisch ermittelte 150 jährige Ereignis liegt. Dies entspricht einer empirischen Wiederkehrdauer von 187 Jahren. Im statistischen Modell entspricht diese Auslauflänge einer Wiederkehrperiode von  $> 1000$  Jahren, wobei die Bandbreite (Konfidenzintervalle, vgl. Abbildung 3.5 c) dafür von 51 Jahren bis unbestimmt groß angegeben werden kann.

Eine kartographische Übersicht über die berechneten Auslauflängen mit bestimmter Jährlichkeit, sowie eine Auswahl an dokumentierten Ereignissen für den Auslaufbereich der Lawine gibt Abbildung 3.4.

## 3.4 Zusammenfassung

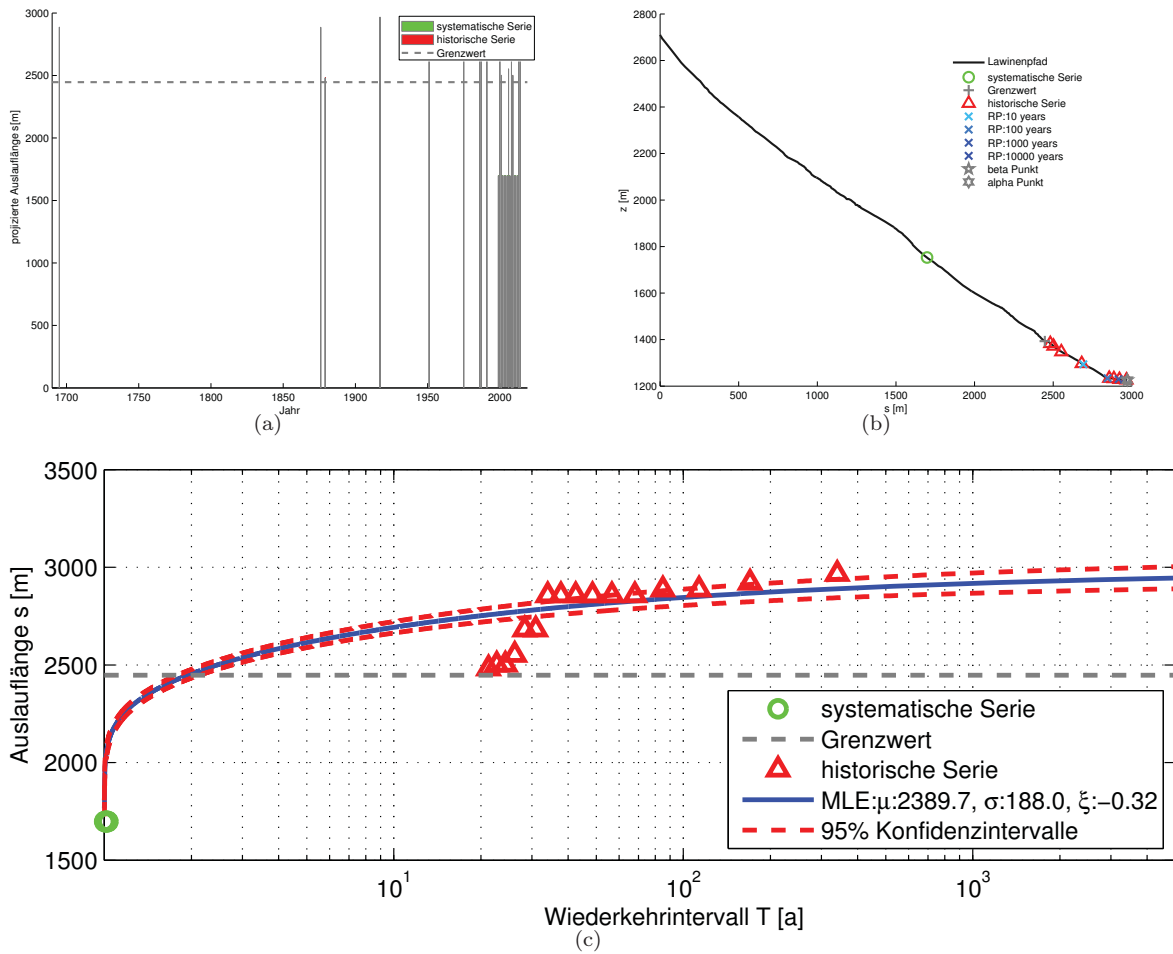
Mit der in diesem Kapitel vorgestellten Methode zur Analyse von jährlichen Maxima der Auslauflänge von Lawinen wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, für einen Lawinenpfad eine Einschätzung der Beziehung zwischen Magnitude und Auftretenshäufigkeit der Lawinenereignisse zu treffen. Als Kennwert für die Ereignismagnitude wurde die Auslauflänge herangezogen, da die Auslauflänge eine Größe ist, die für viele Lawinenereignisse dokumentiert ist bzw. mit relativ geringer Unsicherheit für die Ereignisse rekonstruierbar ist. Im Vergleich dazu finden sich in Aufzeichnungen zu historischen Lawinenereignissen weitaus seltener Informationen zu Volumina oder Druckangaben, welche alternativ auch zur Definition der Magnitude von Lawinenereignissen herangezogen werden können.

Die extremwertstatistische Analyse der Auslauflängen für die drei vorgestellten Lawineneinzugsgebiete hat folgendes gezeigt:

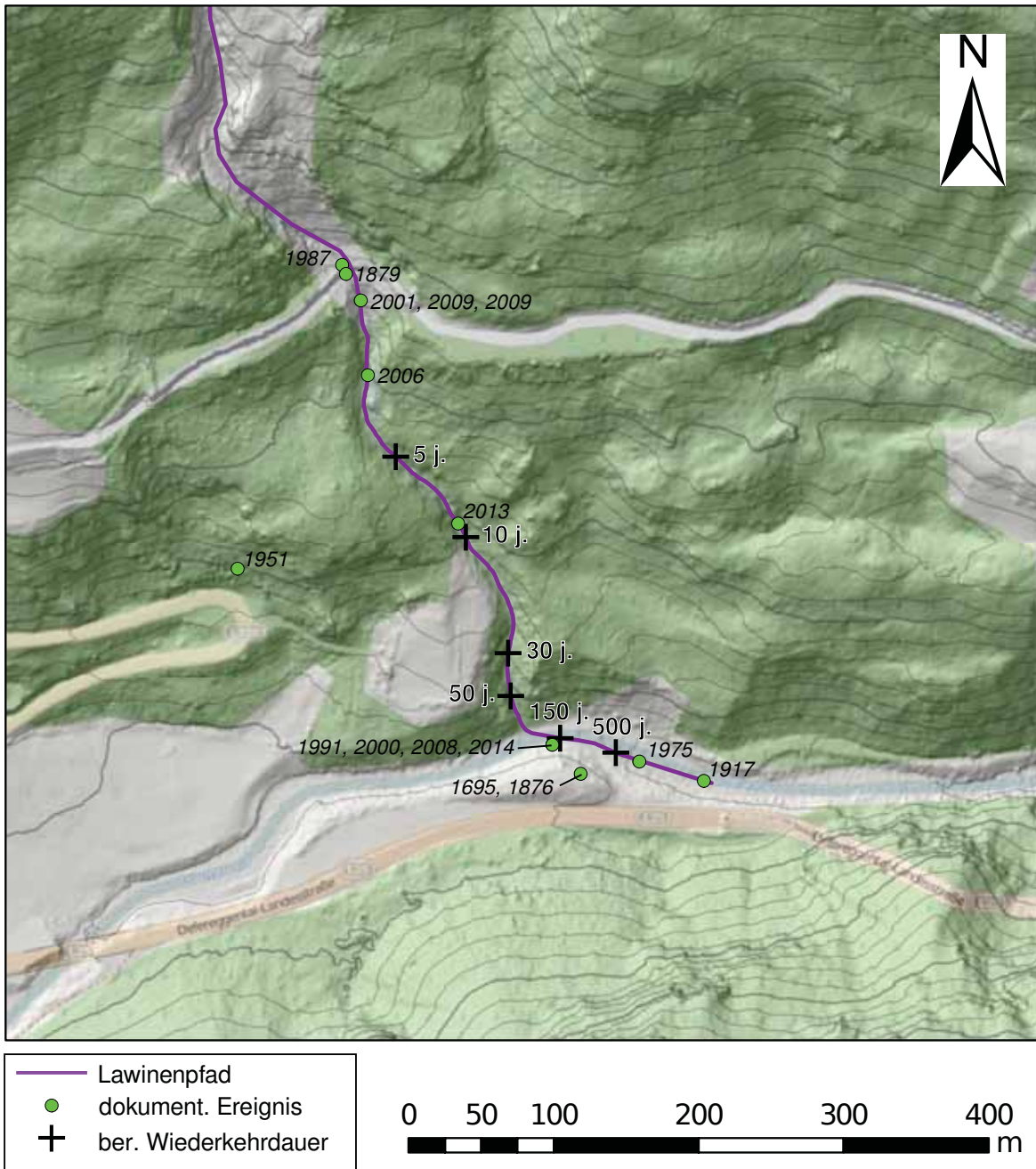
- Extreme Lawinenereignisse bzw. Lawinenereignisse mit Schadenseintritt sind für viele Lawineneinzugsgebiete in Österreich dokumentiert. Die Qualität und Quantität der vorhandenen Informationen über ein Ereignis reicht dabei von rudimentären textlichen Beschreibungen bis hin zu detaillierten Aufnahmen des Ereignisses.
- Lawinenereignisse geringer Größe, welche mit größerer Häufigkeit auftreten, dabei aber zumeist keinen Schaden verursachen, werden nicht systematisch erfasst. Aufzeichnungen zu diesen häufigen Ereignissen sind nur vereinzelt vorhanden und, wenn überhaupt, nur schwer recherchierbar. Allerdings sind Aufzeichnungen zu diesen Ereignissen von großer Wichtigkeit um mit der vorgestellten Methode den Zusammenhang zwischen Wiederkehrdauer und Magnitude für einen Lawinenpfad zu bestimmen.

- Die Anpassung einer generellen Extremwertverteilung an die dokumentierten Ereignisse erlaubt es Ausläuflängen (oder andere Variablen, welche die Ereignismagnitude beschreiben) und die entsprechenden Wiederkehrdauern gegenüberzustellen.
- Mit der vorgestellten Methode ist es möglich, für ein Extremereignis (d.h. ein Ereignis hoher Wiederkehrdauer) definierter Jährlichkeit eine plausible Bandbreite für die entsprechende Ausläuflänge anzugeben. Umgekehrt ist die Aussage über die mögliche Jährlichkeit eines Ereignisses mit definierter Ausläuflänge nur sehr eingeschränkt möglich.

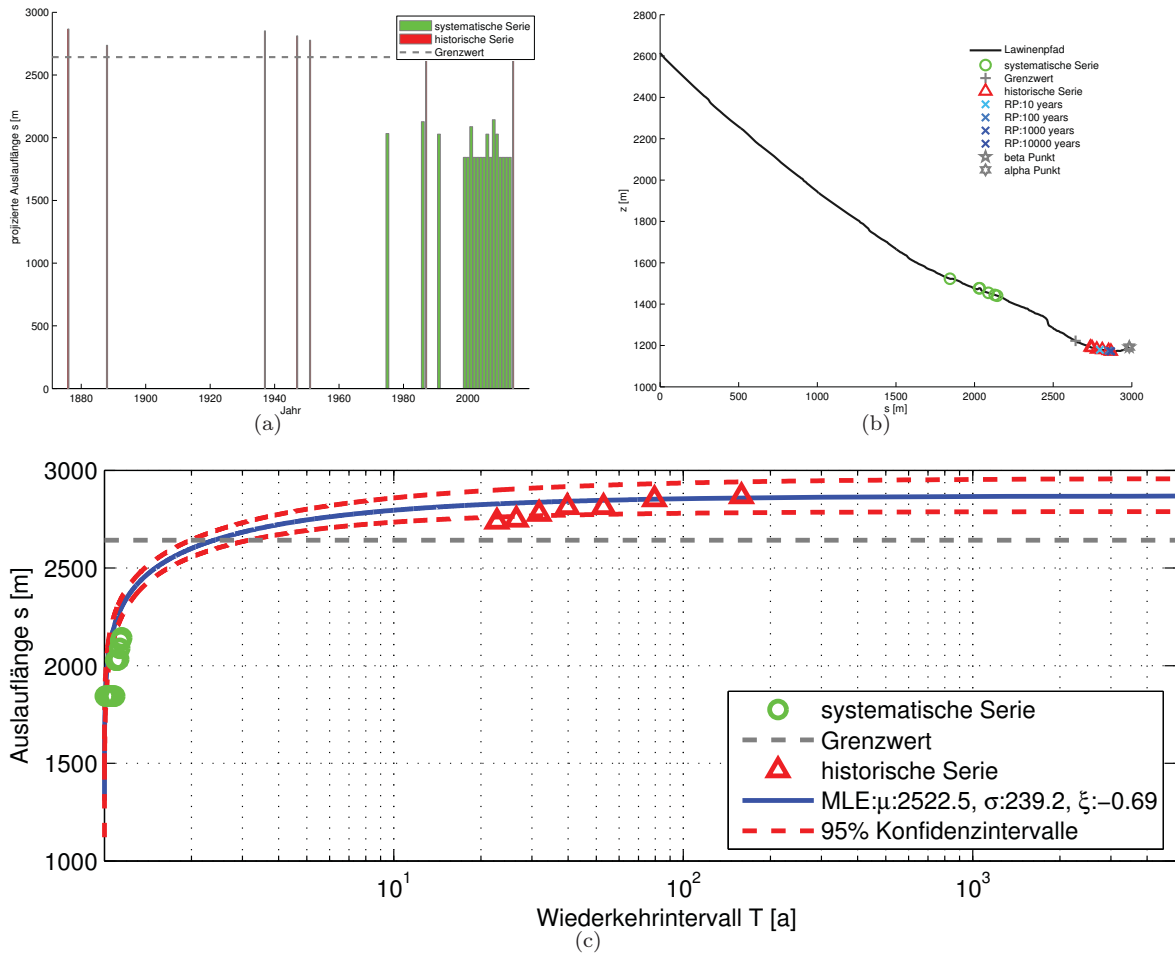
Zusammenfassend kann gesagt werden, dass, unter Voraussetzung einer guten Datenlage hinsichtlich dokumentierter Lawinenereignisse, die vorgestellte Methode ein geeignetes Mittel zur Abschätzung der Ausläuflänge für verschiedene Jährlichkeiten darstellt. So können etwa Resultate der Analyse, wie die statistisch ermittelte Ausläuflänge für ein Ereignis definierter Jährlichkeit (z.B. 150 jähriges Ereignis in Anlehnung an die für die Gefahrenzonenplanung maßgeblichen Bemessungsereignisse), zur Plausibilisierung von Ergebnissen alternativer Methoden zur Gefahrenanalyse herangezogen werden (z.B. Vergleich mit der Bewertung von Bemessungsereignissen mit Hilfe physikalisch-numerischer Methoden).



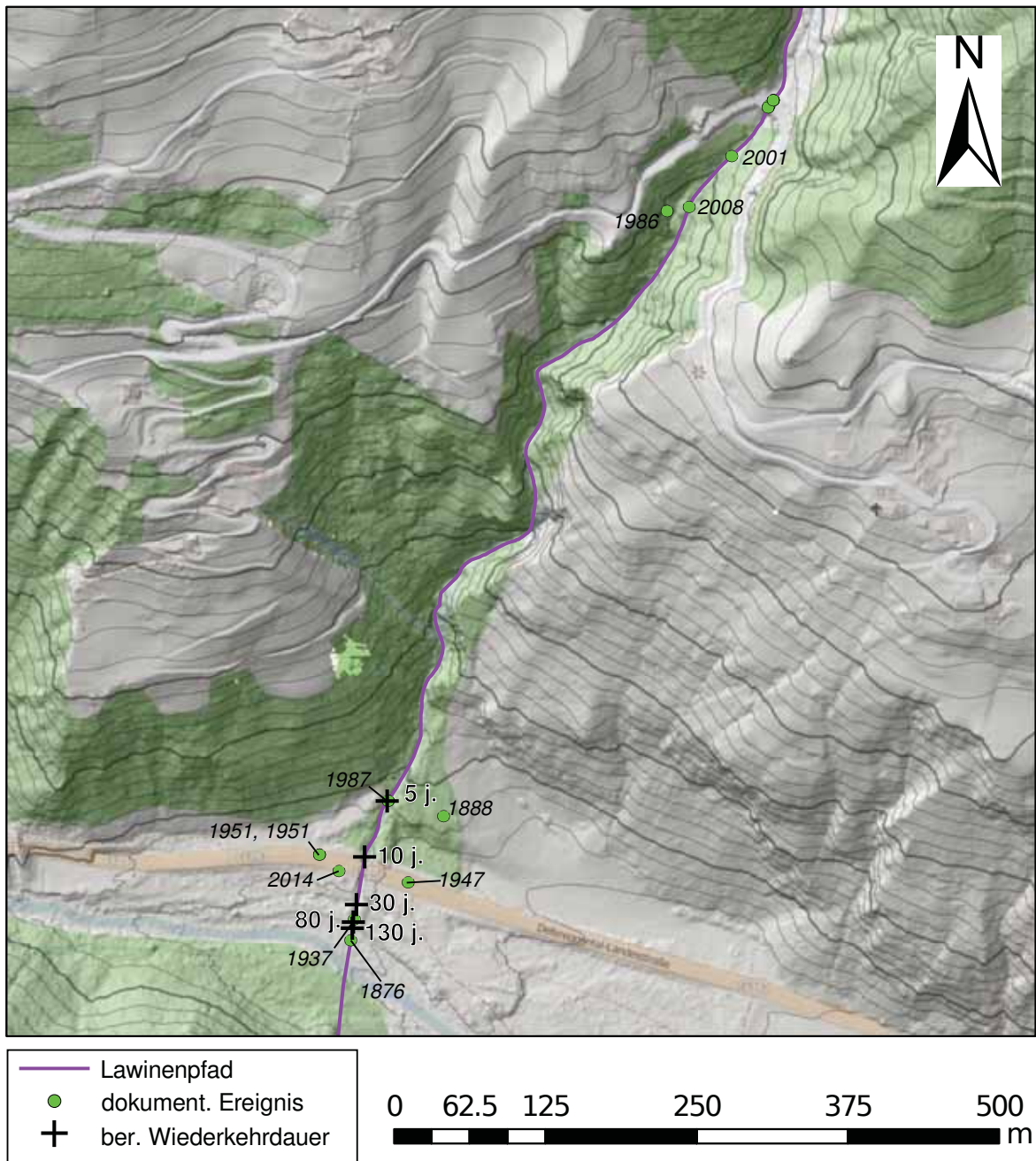
**Abbildung 3.1:** Extremwertanalyse für die Durbachlawine. (a) Zeitreihe der dokumentierten Ereignisse, (b) Darstellung der Auslauflängen für die dokumentierten Ereignisse entlang der Sturzbahn und (c) Plot der Wiederkehrintervalle und entsprechenden Auslauflängen auf logarithmischer Skala.



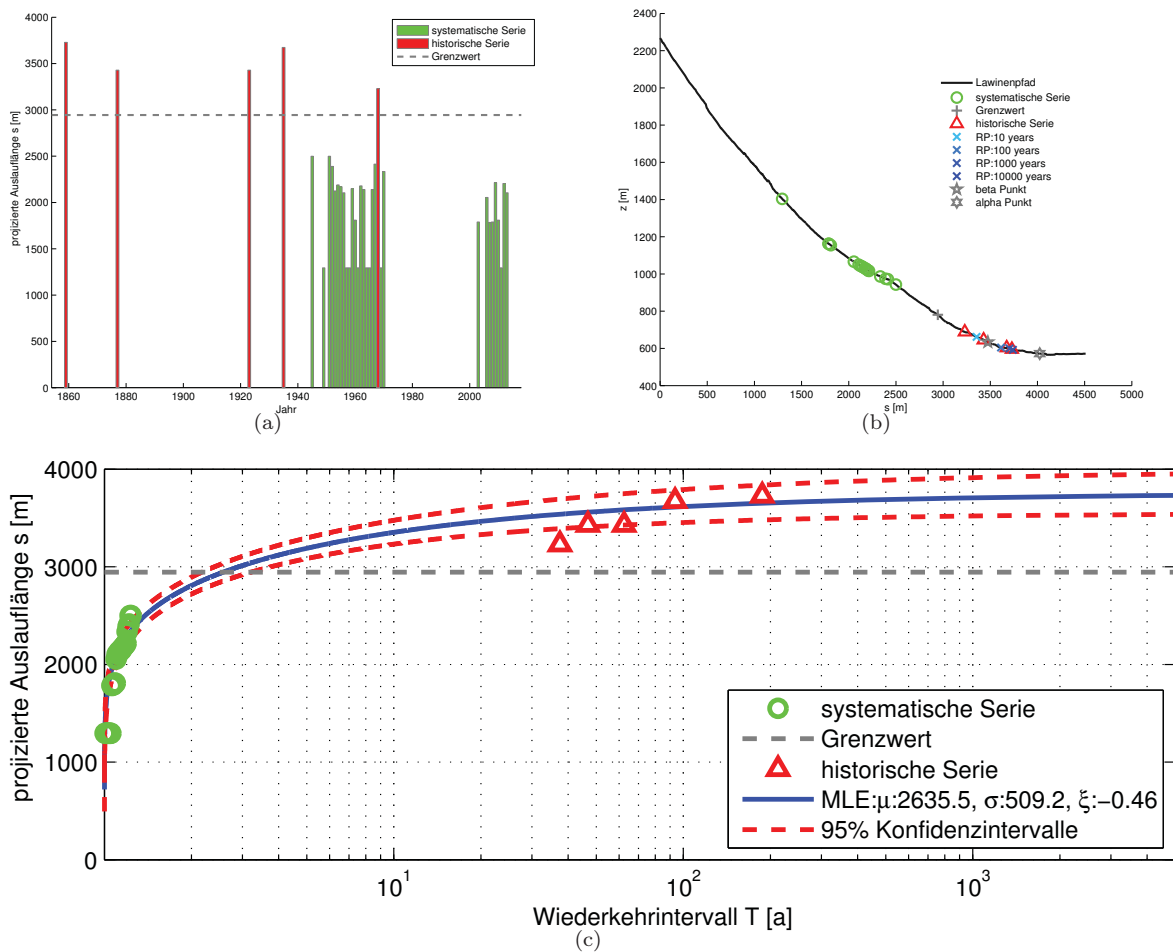
**Abbildung 3.2:** Darstellung der dokumentierten Ereignisse, sowie der extremwertstatistisch berechneten Ausläuflängen mit bestimmter Wiederkehrdauer für den Auslaufbereich der Durbach Lawine.



**Abbildung 3.3:** Extremwertanalyse für die Moosbach Lawine. (a) Zeitreihe der dokumentierten Ereignisse, (b) Darstellung der Auslauflängen für die dokumentierten Ereignisse entlang der Sturzbahn und (c) Plot der Wiederkehrintervalle und entsprechenden Auslauflängen auf logarithmischer Skala.

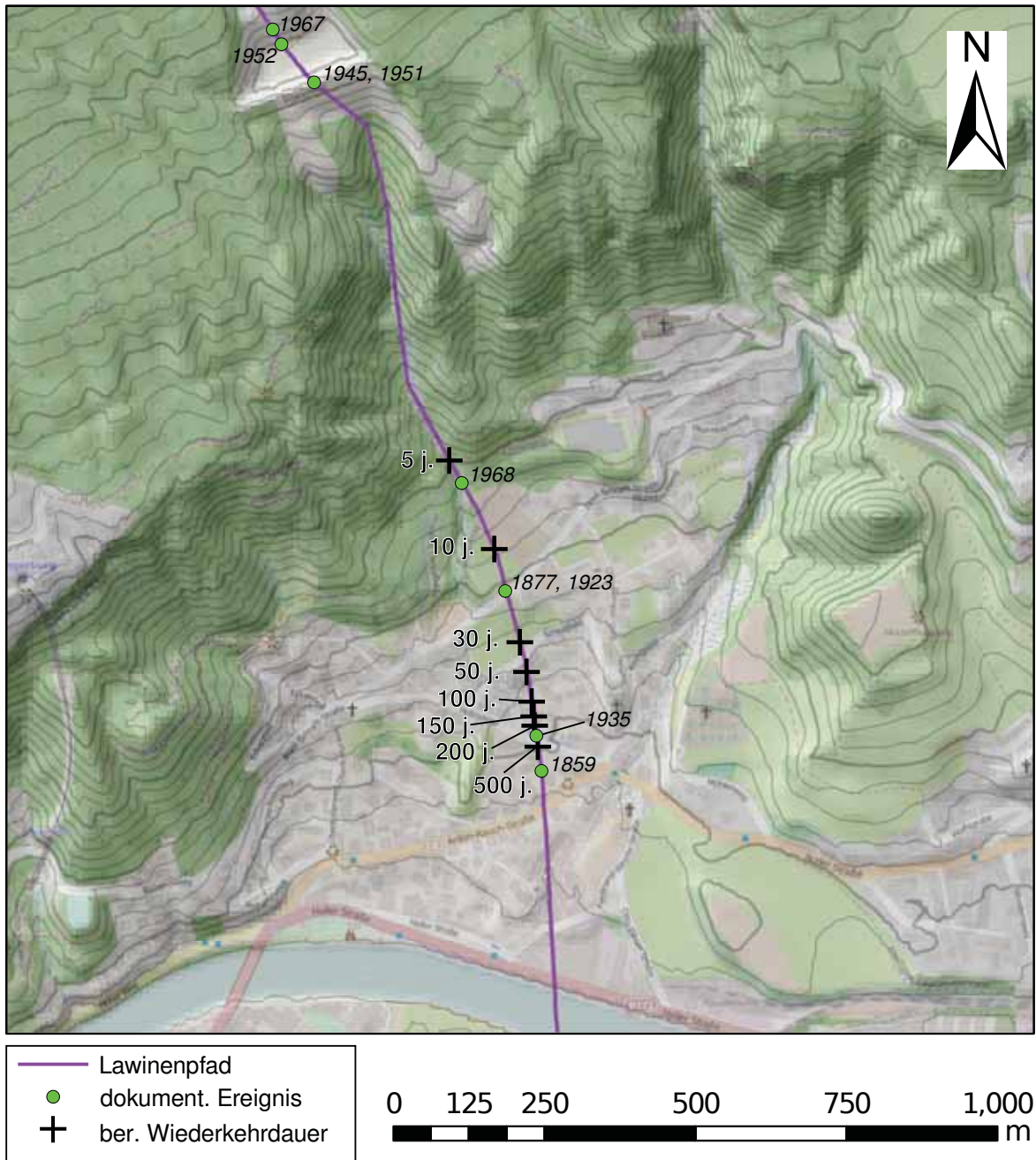


**Abbildung 3.4:** Darstellung der dokumentierten Ereignisse, sowie der extremwertstatistisch berechneten Ausläuflängen mit bestimmter Wiederkehrdauer für den Auslaufbereich der Moosbach Lawine.



**Abbildung 3.5:** Extremwertanalyse für die Arzler-Alm Lawine. (a) Zeitreihe der dokumentierten Ereignisse, (b) Darstellung der Auslauflängen für die dokumentierten Ereignisse entlang der Sturzbahn und (c) Plot der Wiederkehrintervalle und entsprechenden Auslauflängen auf logarithmischer Skala.





**Abbildung 3.6:** Darstellung der dokumentierten Ereignisse, sowie der extremwertstatistisch berechneten Ausläuflängen mit bestimmter Wiederkehrdauer für den Auslaufbereich der Arzler-alm Lawine.



## 4. Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge des gegenständlichen Projektes wurden unterschiedliche Methoden zur Beurteilung von Lawinen untersucht. Bestehende Grundlagen zur Beurteilung der Schutzwirkung von Waldbeständen gegen Lawinen wurden zusammengefasst. Mögliche Strategien für die Bestimmung von Waldparametern, welche für die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen relevant sind, wurden aufgezeigt und entsprechende Waldparameter wurden für zwei Untersuchungsgebiete erhoben. Weiters wurden Ansätze untersucht, um die forstliche Beurteilung der Schutzwirkung von Waldbeständen auch in physikalisch-numerische Instrumente der Gefahrenbeurteilung einfließen zu lassen. An Hand von zwei Beispielen wurden die Möglichkeiten und Limitationen bestehender Simulationssoftware für die Integration von Informationen zur Waldwirkung beleuchtet und diskutiert. In einem weiteren Punkt wurde eine extremwerttheoretische Methode zur Analyse von dokumentierten Lawinenereignissen vorgestellt und für drei ausgewählte Lawineneinzugsgebiete angewendet. Der folgende Abschnitt fasst die wichtigsten Erkenntnisse aus den durchgeführten Arbeiten zusammen, und zeigt Möglichkeiten für eine zukünftige Integration der vorgestellten Ansätze in bestehende Methoden zur Beurteilung von Naturgefahren auf.

Die Schutzwirkung des Waldes gegen Lawinen (Anbruchschutzwirkung, Bremswirkung) ist in einer Vielzahl von Arbeiten dokumentiert. Weiterführende Untersuchungen, welche Waldstrukturparameter die Schutzwirkung des Waldes maßgeblich beeinflussen, sind diesbezüglich notwendig. In der vorliegenden Arbeit wurde eine Methodik für die Erhebung dieser Parameter vorgestellt und an Beispielen durchgeführt. Eine einheitliche Methodik bildet die Basis, um in Zukunft Daten und Forschungsergebnisse vergleichbar zu halten.

Zur Integration von Informationen zur Schutzwirkung des Waldes in bestehende physikalisch-numerische Simulationsmethoden kann insgesamt festgestellt werden, dass sich der Einfluss von Wald grundsätzlich berücksichtigen lässt. Ein geeignetes Modell, welches sowohl die Einflüsse der Fließeigenschaften von kleinen Lawinen, als auch die Interaktion der Lawine mit Wald berücksichtigt, bildet die Grundlage hierfür. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Entwicklungspotential hinsichtlich der Modellierung und der systematischen Erfassung entsprechender Dokumentationsdaten vorhanden ist. Die probabilistische Auswertung und Darstellung von Simulationsergebnissen hat sich als geeignetes Instrument erwiesen, um die Variabilität der Schutzwirkung des Waldes in der Lawinensimulation darzustellen.

Auch für die Anwendung der vorgestellten Methode zur extremwertstatistischen Analyse dokumentierter Lawinenereignisse ist eine gute Datengrundlage unumgänglich. Dies umfasst einerseits eine standardisierte Dokumentation von extremen Lawinenereignissen (oder solchen Ereignissen mit Schadwirkung), sowie insbesondere eine systematische Erfassung von Ereignissen geringerer Magnitude. Speziell letztere Ereignisse werden bis dato gar nicht oder nur sehr sporadisch erfasst. An Hand von drei Beispielen konnte gezeigt werden, dass bei entsprechender Datenlage die Ergebnisse der extremwertstatistischen Auswertung eine wertvolle Zusatzinformation für die Beurteilung der Lawinengefahr darstellen können. Vor allem in Hinblick auf den Übergang der Betrachtungsweise von singulären Bemessungsereignissen hin zu einer differenzierteren Darstellung der Magnituden-Wiederkehrdauer Beziehung erscheint die

vorgestellte Methode als geeignet. So können etwa Resultate der Analyse, wie die statistisch ermittelte Auslauflänge für ein Ereignis definierter Jährlichkeit (z.B. 150 jähriges Ereignis in Anlehnung an das für die Gefahrenzonenplanung maßgebliche Bemessungsereignis), zur Plausibilisierung von Ergebnissen alternativer Methoden zur Gefahrenanalyse herangezogen werden.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Ergebnisse dieses Berichts einen Baustein zur Zusammenführung von unterschiedlichen Gefahrenbeurteilungsmethoden für Lawinen in der forstlichen Raumplanung darstellen und als Basis für weiterführende Arbeiten in diese Richtung dienen.

# Literaturverzeichnis

- Ancey, C. (2005). Monte Carlo calibration of avalanches described as Coulomb fluid flows. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 363:1529–1550.
- Ancey, C. (2012). Are there dragon-kings events (i.e. genuine outliers) among extreme avalanches? Eur. Phys. J. Special Topics, 205:117–129.
- Ancey, C., Gervasoni, C., und Meunier, M. (2004). Computing extreme avalanches. Cold Regions Science and Technology, 39(2-3):161–180.
- Ancey, C., Meunier, M., und Richard, D. (2003). Inverse problem in avalanche dynamics models. Water Resources Research, 39(4):1099.
- Barbolini, M. und Keylock, C. J. (2002). A new method for avalanche hazard mapping using a combination of statistical and deterministic models. Natural Hazards and Earth System Sciences.
- Bartelt, P., Salm, B., und Gruber, U. (1999). Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudinal straining. Journal of Glaciology, 45(150):242–254.
- Bartelt, P. und Stockli, V. (2001). The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. Annals Of Glaciology, Vol 32, 2001, 32:209–216.
- Bebi, P., Kulakowski, D., und Rixen, C. (2009). Snow avalanche disturbances in forest ecosystems—state of research and implications for management. Forest Ecology and Management, 257(9):1883–1892.
- BMLFUW (2011). die.wildbach - richtlinie für die gefahrenzonenplanung. Technical report, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Stubenring 1, 1010 Wien, Österreich.
- BMLFUW (2013). Initiative Schutz durch Wald (ISDW). ISDW-Handbuch für Detailprojekte, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.
- BUWAL (1996). Minimale Pflegemaßnahmen für Wälder mit Schutzfunktion. Technical report, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.
- Christen, M., Bartelt, P., und Kowalski, J. (2010). Back calculation of the In den Arelen avalanche with RAMMS: interpretation of model results. Annals of Glaciology, 51(54):161–168.

- De Quervain, M. (1978). Wald und Lawinen. In Proceedings of the International Union of Forest Research Organization (IUFRO) Seminar on Mountain Forests and Avalanches, pages 219–239, Davos, Switzerland. Eidgenössisches Institut für Schnee und Lawine (SLF).
- Dreier, L., Buehler, Y., Steinkogler, W., Feistl, T., M., C., und Bartelt, P. (2014). Modelling small and frequent avalanches. In International Snow Science Workshop, Banff, Alberta, Canada.
- DWA (2012). Merkblatt DWA-M 552. Regelwerk, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Hennef.
- Eckert, N., Naaim, M., und Parent, E. (2010). Long-term avalanche hazard assessment with a Bayesian depth-averaged propagation model. Journal of Glaciology, 56(198):563–586.
- Eckert, N., Parent, E., Belanger, L., und Garcia, S. (2007a). Hierarchical bayesian modelling for spatial analysis of the number of avalanche occurrences at the scale of the township. Cold Regions Science and Technology, 50(1-3):97–112.
- Eckert, N., Parent, E., Naaim, M., und Richard, D. (2008). Bayesian stochastic modelling for avalanche predetermination: from a general system framework to return period computations. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 22(2):185–206.
- Eckert, N., Parent, E., und Richard, D. (2007b). Revisiting statistical-topographical methods for avalanche predetermination: Bayesian modelling for runout distance predictive distribution. Cold Regions Science and Technology, 49(1):88–107.
- Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., Margreth, S., Diefenbach, L., und Bartelt, P. (2015). Forest damage and snow avalanche flow regime. Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions, 3(1):535–574.
- Feistl, T., Peter, Bebi, P., Teich, M., Yves, B., Christen, M., Thuro, K., und Bartelt, P. (2014). Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. Journal of Glaciology, 60(219).
- Fischer, J., Kofler, A., Fellin, W., Granig, M., und Kleemayr, K. (2014a). Optimization of computational snow avalanche simulation tools. In International Snow Science Workshop Banff, Alberta, Canada.
- Fischer, J.-T. (2013). A novel approach to evaluate and compare computational snow avalanche simulation. Natural Hazards and Earth System Science, 13(6):1655–1667.
- Fischer, J. T., Fromm, R., Gauer, P., und Sovilla, B. (2014b). Evaluation of probabilistic snow avalanche simulation ensembles with Doppler radar observations. Cold Regions Science and Technology, 97(0):151 – 158.
- Fischer, J.-T., Fromm, R., Senfter, M., und Maier, C. (2012). SamosAT EV - Evaluation of SamosAT. Technical report, Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Innsbruck, Austria.
- Fischer, J.-T. und Kofler, A. (2013). SamosAT CoSiCa - Concepts for enhanced Simulation and multivariate Calibration. Technical report, Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Innsbruck, Austria.

- Fischer, J. T., Stepanek, L., Huber, A., Fromm, R., Zeidler, A., und Kleemayr, K. (2013). Extreme value analysis of design events. In International Snow Science Workshop Grenoble Chamonix Mont-Blanc.
- Frehner, M., Wasser, B., und Schweitter, R. (2005). Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemaßnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Technical report, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), Bern.
- Föhn, P. M. B. und Meister, R. (1981). Determination of avalanche magnitude and frequency by direct observations and/or with the aid of indirect snowcover data. Mitteilungen der Forstlichen Bundes-Versuchsanstalt, Wien, 144:207–228.
- Gleirscher, E. (2011). Experimentelle untersuchung von lawinenbremsverbauten in der mühlauer klamm. Master's thesis, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Granig, M. und Oberndorfer, S. (2007). Modellkalibrierung des lawinensimulationsmodells samosat. Technical report, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Stabstelle Schnee und Lawinen, Schwaz.
- Gubler, H. und Rychetnik, J. (1991). Effects of forest near the timberline on avalanche formation. In Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991), number 205.
- Hotter, M., Simon, A., und Vacik, H. (2013). Walddtypisierung Tirol. Technical report, Amt der Tiroler Landesregierung.
- Jonasson, K., Sigurdsson, S., und Arnalds, D. (1999). Estimation of avalanche risk. ISSN 1025-0565, ISBN 9979-878-14-2.
- Jörg, P. und Granig, M. (2009). Kalibrierung der Widerstandsparameter in SamosAT. interner bericht, WLV-Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL).
- Jörg, P. und Granig, M. (2010). Rekalibrierung SamosAT - Suspensionsmodell 2010. interner bericht, WLV-Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL).
- Jörg, P. und Granig, M. (2013). Entrainmentstudie SamosAT - 2013. interner bericht, WLV-Stabstelle Schnee und Lawinen (SSL).
- Keylock, C. (2005). An alternative form for the statistical distribution of extreme avalanche runout distances. Cold Regions Science and Technology, 42(3):185–193.
- Keylock, C., McClung, D., und Magnusson, M. (1999). Avalanche risk mapping by simulation. Journal of Glaciology, 45(150):303–314.
- Kofler, A. (2014). Zur Wahl einer passenden Zielwertfunktion für die Parameteroptimierung von Lawinensimulationen. Master's thesis, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Technische Wissenschaften Institut für Infrastruktur Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau.
- Kofler, A. und Fischer, J.-T. (2015). CoSiCa II - Multivariate Parameteroptimierung von SamosAT. Technical report, Federal Research and Training Centre for Forests, Natural Hazards and Landscape, Innsbruck, Austria.

- Kunz, M., Grêt-Regamey, A., und Hurni, L. (2011). Visualization of uncertainty in natural hazards assessments using an interactive cartographic information system. Natural hazards, 59(3):1735–1751.
- Margreth, S. (2004). Die Wirkung des Waldes bei Lawinen. Forum für Wissen, pages 21–26.
- Margreth, S. und Krummenacher, B. (2002). Berücksichtigung von massnahmen in der gefahrenbeurteilung und nutzungsplanung. Vorstudie. Davos, Eidg. Institut für Schnee-und Lawinenforschung.
- Mayer, H. und Ott, E. (1991). Gebirgswaldbau, Schutzwaldpflege. Ein Waldbaulicher Beitrag zur Landschaftsökologie und zum Umweltschutz. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- McClung, D. und Lied, K. (1987). Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout. Cold Regions Science and Technology, 13(2):107–119.
- McClung, D. und Mears, A. (1991). Extreme value prediction of snow avalanche runout. Cold Regions Science and Technology, 19(2):163–175.
- McClung, D., Mears, A., und Schaerer, P. (1989). Extreme avalanche runout: data from four mountain ranges. Annals of Glaciology, 13(180-184).
- McClung, D. M. (2000). Extreme avalanche runout in space and time. Canadian Geotechnical Journal, 37(1):161–170.
- McClung, D. M. (2001). Extreme avalanche runout: a comparison of empirical models. Canadian Geotechnical Journal, 38(6):1254–1265.
- Mears, A. (1989). Regional comparisons of avalanche-profile and runout data. Arctic and Alpine Research, pages 283–287.
- Meyer-Grass, M. und Schneebeli, M. (1992). Die anhängigkeit der waldlawinen von standorts-, bestandes, und schneeverhältnissen. In Internationales Symposium Interpraevent, pages 443–455, Bern.
- Naaïm, M., Faug, T., Naaïm, F., und Eckert, N. (2010). Return period calculation and passive structure design at the Tacconnaz avalanche path, France. Annals of Glaciology, 51(54):89–97.
- Nairz, P., Sauer Moser, S., Kleemayr, K., Gabl, K., Stoffel, M., und Margreth, S. (2011). Lawinen: Entstehung und Wirkung. In Rudolf-Miklauer, F. und Sauer Moser, S., editors, Handbuch technischer Lawinenschutz, chapter 3, pages 21–62. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin.
- Nixon, D. J. und McClung, D. M. (1993). Snow avalanche runout from 2 canadian mountain-ranges. Annals of Glaciology, Vol 18, 1993 - Proceedings Of The Symposium On Snow And Snow-Related Problems, 18:1–6.
- ONR-24805 (2010). Permanenter technischer lawinenschutz - benennung und definition sowie statistische und dynamische einwirkungen.
- Perla, R., Cheng, T. T., und McClung, D. M. (1980). A two-parameter model of snow-avalanche motion. Journal of Glaciology, 26(94):119–207.



- Perzl, F. (2005). Beurteilung der lawinen-schutzwirkung des waldes. BFW-Praxisinformation, 8:27–31.
- Perzl, F. und Walter, D. (2012). Gefährdung der verkehrsinfrastruktur durch naturgefahren: Identifikation durch schneelawinen gefährdeter verkehrswege-abschnitte. Paramount Project Deliverable, Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), Innsbruck.
- Rauter, M. (2015). Entwicklung eines neuen sohlreibungsmodells für lawinen. Master's thesis, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Fakultät für Technische Wissenschaften Institut für Infrastruktur Arbeitsbereich für Geotechnik und Tunnelbau.
- Saeki, M. und Matsuoka, H. (1969). Snow-buried young forest trees growing on steep slopes. Seppyo: Journal of the Japan Society of Snow and Ice, 31:19–23.
- Sailer, R., Fellin, W., Fromm, R., Jörg, P., Rammer, L., Sampl, P., und Schaffhauser, A. (2008). Snow avalanche mass-balance calculation and simulation-model verification. Annals of Glaciology, 48(1):183–192.
- Salm, B. (1997). Principles of avalanche hazard mapping in switzerland. In Izumi, M., Nakamura, T., und Sack, R. L., editors, Snow Engineering: Recent Advances, pages 531–538. A.A Balkema, Rotterdam.
- Salm, B. (2004). A short and personal history of snow avalanche dynamics. Cold Regions Science and Technology, 39(2-3):83–92.
- Sampl, P. (1999). Samos-Handbuch. Technical report, BMFLUW.
- Sampl, P. (2007). SamosAT Modelltheorie und Numerik. Technical report, AVL List GMBH.
- Savage, S. B. und Hutter, K. (1989). The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. Journal of Fluid Mechanics, 199(1):177–215.
- Schneebeli, M. und Bebi, P. (2004). Hydrology: Forest and snow avalanche control. In Burley, J., Evans, J., und Youngquist, J. A., editors, Encyclopedia of Forest Science, pages 397–402. Elsevier.
- Skolaut, C., Rudolf-Miklau, F., und Stoffel, M. (2011). Analyse, Bewertung und planliche Darstellung von Lawinengefahren (-risiken). In Handbuch technischer Lawinenschutz. F. Rudolf-Miklau and S. Sauermoser.
- Straub, D. und Grêt-Regamey, A. (2006). A Bayesian probabilistic framework for avalanche modelling based on observations. Cold Regions Science and Technology, 46(3):192–203.
- Takeuchi, Y., Torita, H., Nishimura, K., und Hirashima, H. (2011). Study fo large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the makunosawa valley, Myoko, Japan. Annals of Glaciology, 52:119–128.
- Teich, M. (2013). Snow Avalanches in forested Terrain. Dissertation, ETH Zürich.
- Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A., und 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.

- Teich, M., Fischer, J.-T., Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., und Grêt-Regamey, A. (2014). Computational snow avalanche simulation in forested terrain. Natural Hazards and Earth System Science, 14(8):2233–2248.
- Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung, Sonderdruck aus dem 73. Jahrgang(12, 15, 17, 19 und 37):1–25.
- Walter, G., Sauermoser, S., Bacher, M., und Hübl, J. (2012). Ereignisdokumentation prozesse: Schnee. Vorlesungsunterlagen Universitätskurs Ereignisdokumentation, Institut für alpine Naturgefahren, BOKU Wien.
- Wang, Y., Hutter, K., und Pudasaini, S. (2004). The savage-hutter theory: A system of partial differential equations for avalanche flows of snow, debris, and mud. ZAMM-Journal of Applied Mathematics and Mechanics/Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik, 84(8):507–527.
- Weir, P. (2002). Snow Avalanche management in forested Terrain. Number 55 in Res. Br., B.C. Min.For., Victoria, B.C. Land Management Handbook. Province of British Columbia. [www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Lmh/Lmh55.htm](http://www.for.gov.bc.ca/hfd/pubs/Docs/Lmh/Lmh55.htm).
- Zwinger, T. (2000). Dynamik einer Trockenschneelawine auf beliebig geformten Berghängen. Phd thesis, Technischen Universitaet Wien.

# A. Aufnahmenformulare

## A.1 Waldparameterwerte

Parameter	Wert						Bezug Klassifizierung
Erfassung	Messwert, Feststellung	Annahme, Schätzung	unklar, noch zu erheben	nicht bestimmbar			
Form des Anrisses	Lockerschneelawine	Schneebrettlawine	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Lage der Gleitfläche	Oberlawine	Bodenlawine	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Flüssiges Wasser im Lawinenschnee	Trockenschneelawine	Nassschneelawine	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Form der Sturzbahn	Flächenlawine	Runsenlawine	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Form der Bewegung	Fließlawine	Staublawine	Mischlawine	n. a.			ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Oberflächenrauigkeit der Ablagerung	groß (über 0,3 m)	fein (unter 0,3 m)	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Flüssiges Wasser in der Ablagerung	trockene Ablagerung	nasse Ablagerung	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
Fremdmaterial in der Ablagerung	reine Ablagerung	gemischte Ablagerung (verunreinigt)	n. a.				ONR 24805, Ereignisdokumentation Lawine
maßgebliche Auslösung	Spontanlawine in unmittelbarem Zusammenhang mit Niederschlagsperiode	Spontanlawine zeitlich deutlich nach Niederschlagsperiode	Auslösung durch Zusatzbelastung - Sprengung	Zusatzbelastung - Schneeverfrachtung	Auslösung durch Zusatzbelastung - Wächtenbruch	n. a.	Ereignisdokumentation Lawine
vorherrschende Witterung	intensiver Schneefall	Temperaturanstieg / Föhn	Regen	n. a.			Ereignisdokumentation Lawine
Ereigniskartierung	Schätzung auf Basis Orthofoto	GPS/Vermessung	Fotodokumentation	n. a.			
Exposition	N	NE	E	S	SW	W	NW
Geländeform	konkav	konvex	annähernd flach				
Stützirksame Bodenrauigkeit	sehr rau	rau	glatt	sehr glatt			ISDW
PNWG							potentielle natürliche Waldgesellschaft nach Walztypisierung Tirol (tirisMaps)
Waldgruppe	Ansprache der aktuellen Waldgesellschaft nach Hauptbaumart						
Vertikalstruktur	einschichtig	zweischichtig	stufig-mehrschichtig				ISDW
Kollektivstruktur	Einzelbaumstruktur	Rotten - Gruppenstruktur					ISDW
Überschirmungsgrad Jungwuchs	≥ 5 - 35 %	≥ 35 - 65 %	≥ 65 - 85 %	≥ 85 %			ISDW
Überschirmungsgrad Baumschicht	räumlig (≥ 5 - 35 %)	licht (≥ 35 - 65 %)	locker (≥ 65 - 85 %)	geschlossen bis dicht (≥ 85 %)			ISDW
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	Aufnahme über Formular. Vollkuppelung. Zählung der Stammzahl auf mehreren kleineren Repräsentativflächen (10x10m). Umlegung des Durchschnitts auf die ganze Homogenfläche unter Berücksichtigung von Fehlstellen.						ISDW
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm							ISDW
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm							ISDW
Anteil Stangenholz	Auswertung Formular Vollkuppelung. Anzusprechen ist der Anteil des Stangenholzes (Bäume >500 cm Höhe bis 20 cm BHD) an der Überschirmung der Baumschicht (=100%) in Zehntel.						ISDW
Anteil Baumholz	Auswertung Formular Vollkuppelung. Anzusprechen ist der Anteil des Baumholzes (Bäume von >20 bis 50 cm BHD) an der Überschirmung der Baumschicht (=100%) in Zehntel.						ISDW
Anteil Altholz	Auswertung Formular Vollkuppelung. Anzusprechen ist der Anteil des Altholzes (Bäume von > 50 cm BHD) an der Überschirmung der Baumschicht (=100%) in Zehntel.						ISDW
Maximale Lückenbreite /-länge	Definition Lücke: Fläche von min. 15 m Breite und 15 m schräger Länge, auf der die Überschirmung mit Gehölzen (>130 cm) < 30 % beträgt.						ISDW

## A.2 Aufnahmenformular Stammzahl

Traktfläche [m <sup>2</sup> ]	
-------------------------------	--

Einzugsgebiet	
Homogenbereich - Zone	
Punkt Nummer (lfd.)	

BHD	Anzahl	$\Sigma$
10 - 20 cm		
20 - 50 cm		
> 50 cm		

Anteile je Klasse			
10 - 20 cm	20 - 50 cm	> 50 cm	$\Sigma$
			10

Baumart	Anzahl	$\Sigma$
Fi		
Ta		
Lä		
Ki		
Laubholz		
Zi		

Baumartenanteile						
Fi	Ta	Lä	Ki	Lh	Zi	$\Sigma$
						10

### A.3 Prant Lawine

## Aufnahmeformular Waldlawine

		Zone	Erfassung
<b>Kopfdaten</b>			
Projektsnummer/-name	15030-EVAMETH		
Bundesland	Tirol		
Bezirk	Lienz		
Gemeinde	Innervillgraten		
Einzugsgebiet	Prant Lawine		
WLK ID	—		
Bearbeiter	Rainer, Huber, Kofler, Hainzer		
Erhebungsdatum	11.06.2015		

<b>Ereignisdaten</b>			
Ereignisdatum	1970		
Form des Anrisses	n. a.	Anbruch- gebiet	Annahme, Schätzung
Lage der Gleitfläche	n. a.		Annahme, Schätzung
Flüssiges Wasser im Lawinenschnee	n. a.		Annahme, Schätzung
Form der Sturzbahn	Flächenlawine	Sturz- bahn	Annahme, Schätzung
Form der Bewegung	Fließlawine		Annahme, Schätzung
Oberflächenrauigkeit der Ablagerung	n. a.	Ablagerungs- gebiet	Annahme, Schätzung
Flüssiges Wasser in der Ablagerung	n. a.		Annahme, Schätzung
Fremdmaterial in der Ablagerung	n. a.		Annahme, Schätzung
Gesamtschneehöhe [cm]	—		Messwert, Feststellung
Anbruchhöhe [cm]	50		Annahme, Schätzung
maßgebliche Auslösung	n.a.		Annahme, Schätzung
vorhergehende Witterung	n. a.		Annahme, Schätzung
Ablagerungshöhe [m]	—		Annahme, Schätzung
Auslauflänge [m]	590		Messwert, Feststellung
Auslauflänge innerhalb Wald [m]	447		Messwert, Feststellung
Schäden	—		Annahme, Schätzung

<b>Ereigniskartierung</b>			
Anbruch	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung
Sturzbahn	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung
Ablagerung	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung

<b>Bestandeskartierung</b>			
<b>Probefläche</b>		Anbruch- gebiet	
Punkt Nummer (lfd.)	<b>Prant_PF 1</b>		
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert		
EPSG Code	31287		
Koordinate Rechtswert (X)	322040,052		Messwert, Feststellung
Koordinate Hochwert (Y)	323197,089		Messwert, Feststellung
Flächengröße [m <sup>2</sup> ]	100		Messwert, Feststellung



Standort	
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen
Seehöhe [m]	1.981
Hangneigung [°]	41
Exposition	NE
Stützwirksame Bodenrauigkeit	glatt

Vegetation - Bestockung	
PNWG	Kühler Steilhang-Silikat-(Grünerlen-Zirben-) Lärchenwald
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner Lärchenwald
Vertikalstruktur	einschichtig
Kollektivstruktur	Rotten - Gruppenstruktur
Überschirmungsgrad Jungwuchs [%]	≥ 5 - 35 %
Überschirmungsgrad Baumschicht [%]	licht (≥ 35 - 65 %)
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	400
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	200
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	—
Anteil Stangenholz	7
Anteil Baumholz	3
Anteil Altholz	—
Maximale Lückenbreite /-länge [m]	15 / 50

Anbruchgebiet

Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Annahme, Schätzung
Annahme, Schätzung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung

Probefläche	
Punkt Nummer (lfd.)	Prant_PF 2
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert
EPSG Code	31287
Koordinate Rechtswert (X)	322142,525
Koordinate Hochwert (Y)	323219,235
Flächengröße [m²]	100

Standort	
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen
Seehöhe [m]	1.906
Hangneigung [°]	38
Exposition	E
Stützwirksame Bodenrauigkeit	sehr glatt

Vegetation - Bestockung	
PNWG	Subalpiner frischer Silikat-Fichtenwald
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner Lärchenwald
Vertikalstruktur	einschichtig
Kollektivstruktur	Rotten - Gruppenstruktur
Überschirmungsgrad Jungwuchs [%]	≥ 5 - 35 %
Überschirmungsgrad Baumschicht [%]	licht (≥ 35 - 65 %)
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	800
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	500

Anbruchgebiet

Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung
Annahme, Schätzung
Annahme, Schätzung
Messwert, Feststellung
Messwert, Feststellung

Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	—	Messwert, Feststellung
Anteil Stangenholz	6	Messwert, Feststellung
Anteil Baumholz	4	Messwert, Feststellung
Anteil Altholz	—	Messwert, Feststellung
Maximale Lückenbreite /-länge [m]	—	Messwert, Feststellung

Probefläche	
Punkt Nummer (Ifd.)	<b>Prant_PF 3</b>
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert
EPSG Code	31287
Koordinate Rechtswert (X)	322336,669
Koordinate Hochwert (Y)	323273,743
Flächengröße [m²]	400

Standort	
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen
Seehöhe [m]	1.780
Hangneigung [°]	41
Exposition	E
Geländeform	annähernd flach

Vegetation - Bestockung	
PNWG	Subalpiner frischer Silikat-Fichtenwald
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner (Fi-) Lärchenwald
Vertikalstruktur	einschichtig
Kollektivstruktur	Rotten - Gruppenstruktur
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	25
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	100
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	150
Anteil Stangenholz	1
Anteil Baumholz	4
Anteil Altholz	5

Sturzbahn

Probefläche	
Punkt Nummer (Ifd.)	<b>Prant_PF 4</b>
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert
EPSG Code	31287
Koordinate Rechtswert (X)	322397,468
Koordinate Hochwert (Y)	323278,306
Flächengröße [m²]	400

Standort	
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen
Seehöhe [m]	1.744
Hangneigung [°]	32
Exposition	E
Geländeform	annähernd flach

Sturzbahn

Vegetation - Bestockung		
PNWG	Subalpiner frischer Silikat-Fichtenwald	Messwert, Feststellung
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner (Fi-) Lärchenwald	Messwert, Feststellung
Vertikalstruktur	einschichtig	Messwert, Feststellung
Kollektivstruktur	Einzelbaumstruktur	Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	25	Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	100	Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	75	Messwert, Feststellung
Anteil Stangenholz	1	Messwert, Feststellung
Anteil Baumholz	5	Messwert, Feststellung
Anteil Altholz	4	Messwert, Feststellung

## A.4 Berglet Lawine

## Aufnahmeformular Waldlawine

Zone      Erfassung

Kopfdaten			
Projektsnummer/-name	15030-EVAMETH		
Bundesland	Tirol		
Bezirk	Lienz		
Gemeinde	Innervillgraten		
Einzugsgebiet	Bergletlawine (Berglettallawine)		
WLK ID	1789340		
Bearbeiter	Rainer, Huber, Kofler, Hainzer		
Erhebungsdatum	11.06.2015		

Ereignisdaten			
Ereignisdatum	01.02.1986		
Form des Anrisses	Lockerschneelawine	Anbruch- gebiet	Annahme, Schätzung
Lage der Gleitfläche	n. a.		Annahme, Schätzung
Flüssiges Wasser im Lawinenschnee	Trockenschneelawine		Annahme, Schätzung
Form der Sturzbahn	Runsenlawine	Sturz- bahn	Annahme, Schätzung
Form der Bewegung	Mischlawine		Annahme, Schätzung
Oberflächenrauigkeit der Ablagerung	n. a.	Ablagerungs- gebiet	Annahme, Schätzung
Flüssiges Wasser in der Ablagerung	trockene Ablagerung		Annahme, Schätzung
Fremdmaterial in der Ablagerung	reine Ablagerung		Annahme, Schätzung
Gesamtschneehöhe [cm]	—		Messwert, Feststellung
Anbruchhöhe [cm]	150		Annahme, Schätzung
maßgebliche Auslösung	Spontanlawine in unmittelbarem Zusammenhang mit Niederschlagsperiode		Annahme, Schätzung
vorhergehende Witterung	intensiver Schneefall		Annahme, Schätzung
Ablagerungshöhe [m]	3 (Gst.Nr.: 146), 1 (Bereich Landesstraße)		Annahme, Schätzung
Auslauflänge [m]	1.515		Messwert, Feststellung
Auslauflänge innerhalb Wald [m]	709		Messwert, Feststellung
Schäden	Schäden an den Gebäuden des Weilers "Berglet", Harpfe, Hühnerstall bei "Schmiedhofer" zerstört.		Annahme, Schätzung

Ereigniskartierung			
Anbruch	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung
Sturzbahn	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung
Ablagerung	Schätzung auf Basis Orthofoto		Annahme, Schätzung

Bestandeskartierung			
<b>Probefläche</b>			
Punkt Nummer (Ifd.)	<b>Berglet_PF 1</b>		
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert		
EPSG Code	31287		
Koordinate Rechtswert (X)	326518,208		Messwert, Feststellung
Koordinate Hochwert (Y)	325158,84		Messwert, Feststellung

Flächengröße [m²]	—	Anbruchgebiet	Messwert, Feststellung
<b>Standort</b>			
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen		
Seehöhe [m]	2.185		Messwert, Feststellung
Hangneigung [°]	31		Messwert, Feststellung
Exposition	S		Messwert, Feststellung
Stützwirksame Bodenrauigkeit	glatt		Messwert, Feststellung
<b>Vegetation - Bestockung</b>			
Anmerkung	Hochlagenaufforstung		Messwert, Feststellung
	zum Ereigniszeitpunkt unbestockt		Messwert, Feststellung

<b>Probefläche</b>		Sturzbahn	
Punkt Nummer (Ifd.)	<b>Berglet_PF 2</b>		
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert		
EPSG Code	31287		
Koordinate Rechtswert (X)	326510,828		Messwert, Feststellung
Koordinate Hochwert (Y)	325017,136		Messwert, Feststellung
Flächengröße [m²]	400		Messwert, Feststellung
<b>Standort</b>			
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen		
Seehöhe [m]	2.098		Messwert, Feststellung
Hangneigung [°]	34	Messwert, Feststellung	
Exposition	S	Messwert, Feststellung	
Geländeform	annähernd flach		

<b>Vegetation - Bestockung</b>		Sturzbahn	
PNWG	Armer Silikat-Lärchen-Zirbenwald		Messwert, Feststellung
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner Lärchen - Fichtenwald		Messwert, Feststellung
Vertikalstruktur	einschichtig		Messwert, Feststellung
Kollektivstruktur	Rotten - Gruppenstruktur		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	275		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	100		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	75		Messwert, Feststellung
Anteil Stangenholz	6		Messwert, Feststellung
Anteil Baumholz	2		Messwert, Feststellung
Anteil Altholz	2	Messwert, Feststellung	

<b>Probefläche</b>			
Punkt Nummer (Ifd.)	<b>Berglet_PF 3</b>		
Koordinatensystem	MGI Austria Lambert		
EPSG Code	31287		
Koordinate Rechtswert (X)	326319,926		Messwert, Feststellung
Koordinate Hochwert (Y)	324526,573		Messwert, Feststellung
Flächengröße [m²]	100	Messwert, Feststellung	

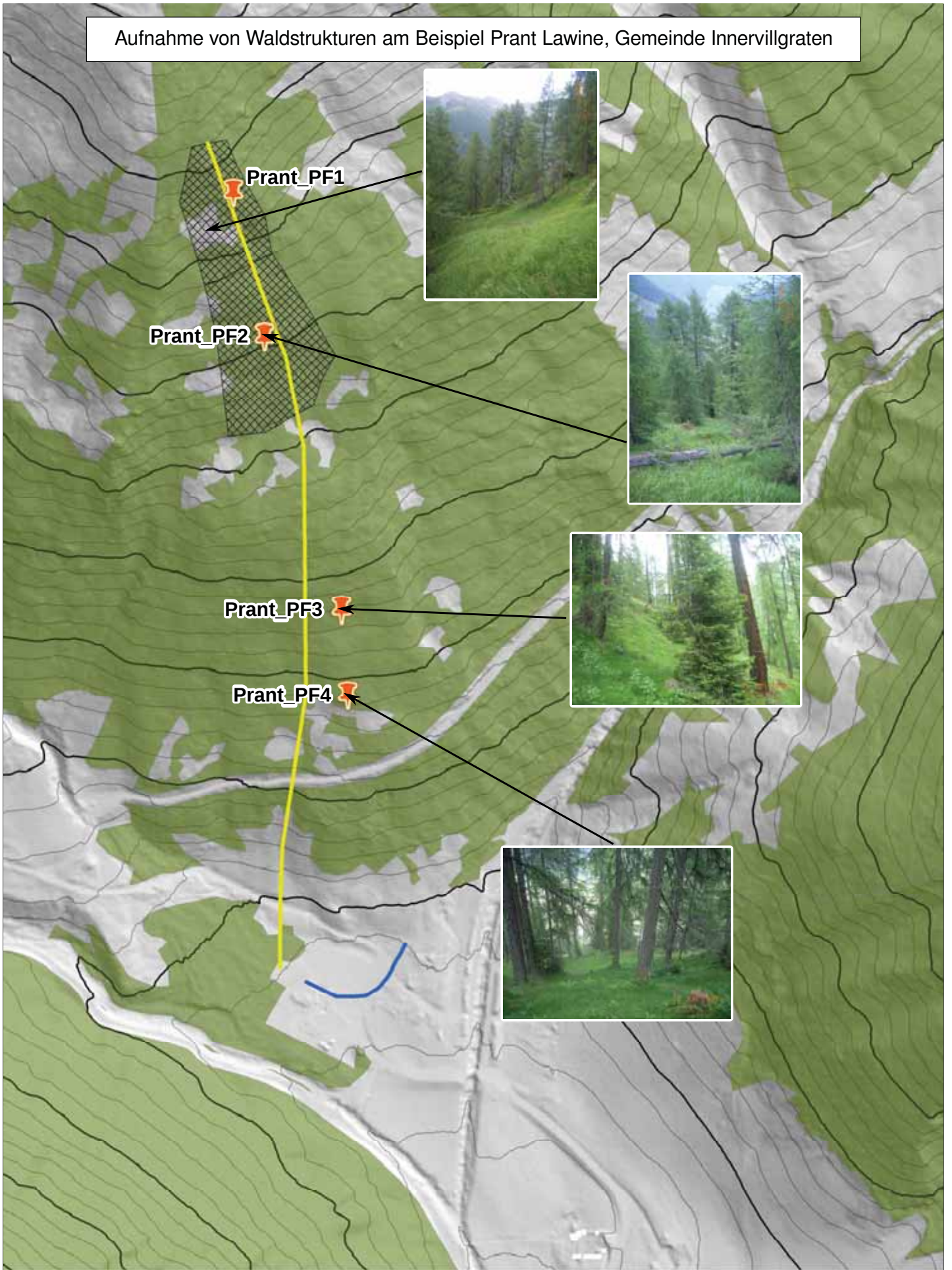
Standort		Sturzbahn	
Schneeregion	Südliche Zwischenalpen		
Seehöhe [m]	1.810		Messwert, Feststellung
Hangneigung [°]	44		Messwert, Feststellung
Exposition	SW		Messwert, Feststellung
Geländeform	konkav		
Vegetation - Bestockung			
PNWG	Subalpiner warmer Silikat-Lärchen-Fichtenwald		Messwert, Feststellung
Waldgruppe (Ansprache Hauptbaumart)	subalpiner Lärchen - Fichtenwald		Messwert, Feststellung
Vertikalstruktur	einschichtig		Messwert, Feststellung
Kollektivstruktur	Einzelbaumstruktur		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 10 - 20 cm	100		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD 20 - 50 cm	600		Messwert, Feststellung
Stammzahl/ha mit BHD > 50 cm	200	Messwert, Feststellung	
Anteil Stangenholz	1	Messwert, Feststellung	
Anteil Baumholz	7	Messwert, Feststellung	
Anteil Altholz	2	Messwert, Feststellung	

# B. Visualisierung Geländeaufnahmen

## B.1 Prant Lawine



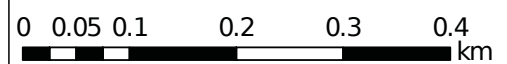
# Aufnahme von Waldstrukturen am Beispiel Prant Lawine, Gemeinde Innervillgraten



## Legende

- Lage Probeflächen
- Anbruchgebiet ereignisbezogen
- Sturzbahn ereignisbezogen
- Ablagerung ereignisbezogen
- Waldmaske

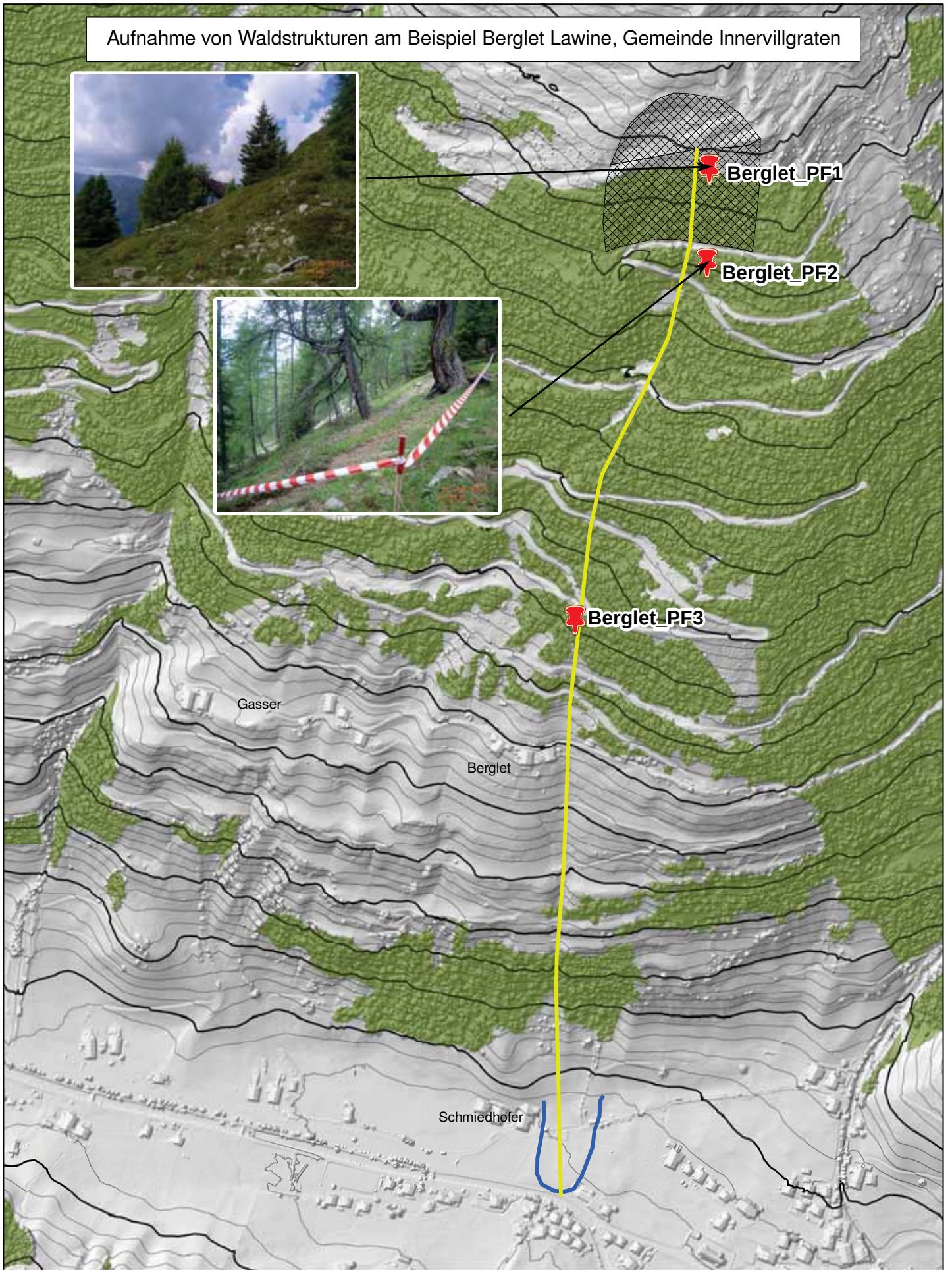
M 1:2,500



Quellen:  
DGM: Land Tirol - data.tirol.gv.at  
Waldflächen angepasst nach Amt der Tiroler Landesregierung,  
Abt. Waldschutz, tiris Wald

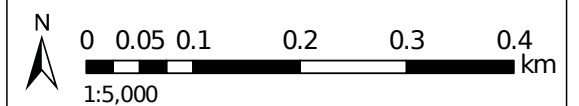
## B.2 Berglet Lawine

# Aufnahme von Waldstrukturen am Beispiel Berglet Lawine, Gemeinde Innervillgraten



## Legende

- Lage Probeflächen
- Anbruchgebiet Ereignis 1986
- Sturzbahn Ereignis 1986
- Ablagerung Ereignis 1986
- Waldmaske

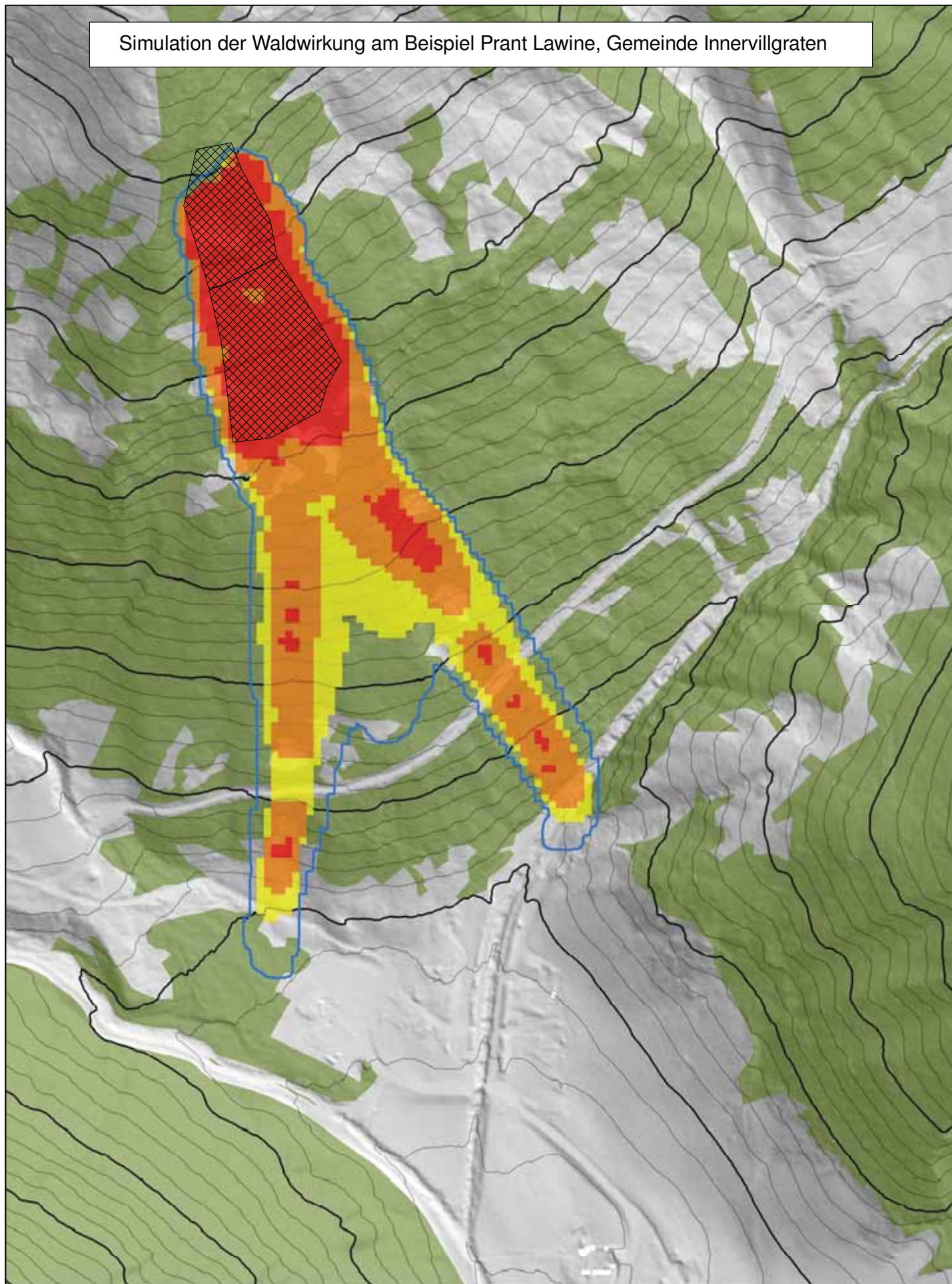


Quellen:  
DGM: Land Tirol - data.tirol.gv.at  
Waldflächen angepasst nach Amt der Tiroler Landesregierung,  
Abt. Waldschutz, tiris Wald

# C. Visualisierung Simulationsergebnisse

## C.1 Prant Lawine

Simulation der Waldwirkung am Beispiel Prant Lawine, Gemeinde Innervillgraten



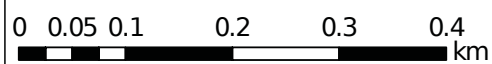
Legende

Simulation mit Variation  $c_{res}$

- mind. 1 Simulation > 1kPa
- mind. 5 % der Simulationen > 1kPa
- alle Simulationen > 1 kPa

- Anbruchgebiet
- Waldmaske
- Referenzsimulation (1 kPa Grenze)

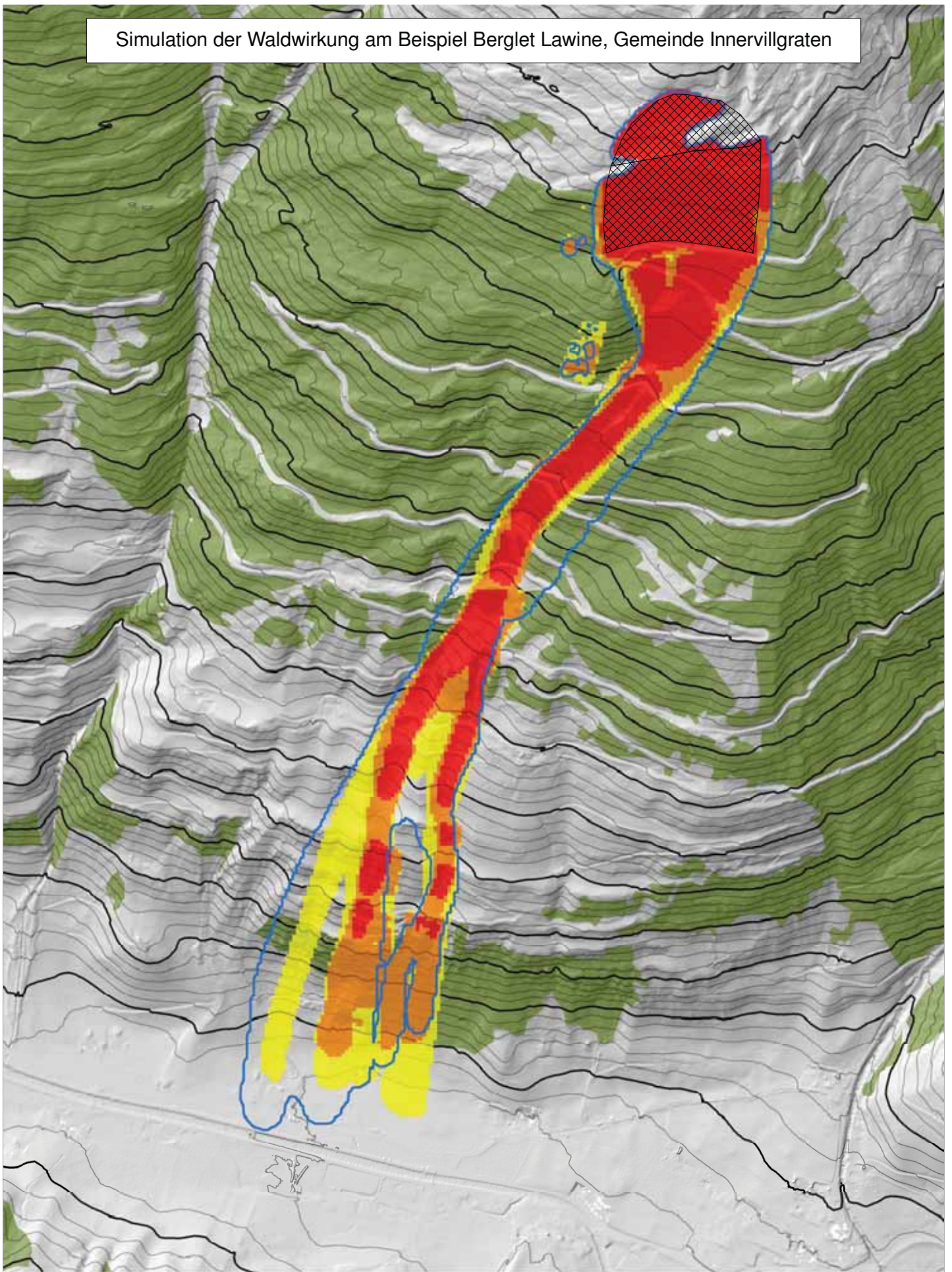
M 1:2,500



Quellen:  
DGM: Land Tirol - data.tirol.gv.at  
Waldflächen angepasst nach Amt der Tiroler Landesregierung,  
Abt. Waldschutz, tiris Wald

## C.2 Berglet Lawine

Simulation der Waldwirkung am Beispiel Berglet Lawine, Gemeinde Innervillgraten

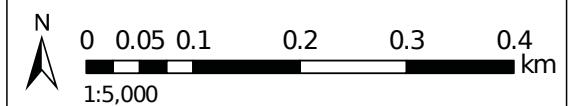


Legende

Simulation mit Variation  $c_{res}$

- mind. 1 Simulation  $> 1\text{kPa}$
- mind. 5 % der Simulationen  $> 1\text{kPa}$
- alle Simulationen  $> 1\text{kPa}$

- Anbruchgebiet
- Waldmaske
- Referenzsimulation (1 kPa Grenze)



Quellen:  
DGM: Land Tirol - data.tirol.gv.at  
Waldflächen angepasst nach Amt der Tiroler Landesregierung,  
Abt. Waldschutz, tiris Wald

# D. Extremwertstatistik - dokumentierte Ereignisse

## D.1 Durbach Lawine



## Einzugsgebiet Durbach Lawine

Gemeinde	St. Veit i. D.
Bezirk	Lienz
GBL	6.5 Osttirol
WLK ID	413020

Dokumentierte Ereignisse			
Ereigniszeitpunkt	Beschreibung Ereignis	Quelle	Anmerkung
13.02.1695	Staublawine, 17 Tote, letzter im August gefunden. Staublawine bis zur Schwarzach vorgedrungen (Marterl).	Meldeblatt der Gebietsbauleitung (GBL) Osttirol, Ortschronik der Gemeinde St. Veit	
22.02.1876	Großer Lawinenabgang bis in den Talbach.	Ortschronik	
12.12.1878	Lawinenunglück um 7.00 Uhr früh fordert 2 Tote, Anbruch und Ablagerung im Bereich der "Wiesen".	Ortschronik	
25.02.1879	Staublawinenabgang um 11.00 Uhr, bis über den Verbindungsweg nach St. Veit (Mooser-Güterweg).	Ortschronik	
26.02.1879	Staublawinenabgang.	Ortschronik	
1917	Rechtsufriger Wald gerissen; Staublawine bis zur Stanzbrücke (bei ehemaliger Landesstraße, Verlauf l. ufr. der Schwarzach vgl. Luftbild vom 10.09.1954), Wald außerhalb der Brücke gerissen.	Meldeblatt der GBL	
1919	l. ufr. Wald gerissen.	Meldeblatt der GBL	
1945/46	Der Gendarmierposten St. Veit i. D. meldet eine große Lawine.	Meldeblatt der GBL	
20.01.1951	Abgang einer Oberlawine zw. 16.00 und 17.00 Uhr, die ca. 5 ha Jungwald umgerissen hat.	Meldeblatt der GBL	Schätzung auf Basis Luftbildatlases (Aufnahme 1954)
17.03.1975	Naßschneelawine bis in die Schwarzach wurde vom r. ufr. Materialdamm (r. ufr. der Schwarzach) von der Straße abgehalten.	Meldeblatt der GBL	
10.04.1975	Die Neuschneelawine hat den Mooser-Güterweg auf 50 m beschädigt und unterbrochen. Lawinenablagerung im Schwarzachfluss.	Meldeblatt Gendarmierposten-kommando (GPK) St. Jakob	Schätzung anhand Kartierung des GPK St. Jakob
01.02.1986	Staublawine bis in die Schwarzach. Beim Güterweg Mellitz-Moos wurde die Lawingalerie im Westen um ca. 70 m, im Osten um ca. 50 m außerhalb überfahren. Die östliche Galerieleitmauer wurde überfahren.	Meldeblatt Gendarmierposten-kommando St. Jakob	Schätzung anhand Kartierung des GPK St. Jakob
03.1987	Lawinenabgang bis zur Schwarzach.	Meldeblatt der GBL	
18.04.1987	Naßschneelawine mittleren Ausmaßes. Lawinenschnee wurde im Bereich der Galerie abgelagert; erster Lawinenabgang (Naßschneelawine) bereits Anfang März bis zur Schwarzach.	Meldeblatt der GBL	
21./22.12.1991	Naßschneelawine nach heftigen Regenfällen bis in die Schwarzach.	Meldeblatt der GBL	
2000	Lawinenabgang bis zum Materialdamm.	Datensammlung örtliche Lawinenkommission (L.K)	Fotodokumentation örtliche Lawinenkommission
01.2001	Staublawinenabgang ab Seehöhe 2400 m bis über die Galerie Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung der Auslaufänge analog auf Basis Orthophoto

28.03.2006	Nassschneelawine Abgang von Seehöhe 2200 m bis knapp unterhalb der Galerie Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
12.2008	Staubleawinenabgang ab Seehöhe 2300 m bis ins Tal - Mündung Schwarzach.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
3./4.2009	Nassschneelawinenabgänge ab Seehöhe 2300 m bis über die Galerie Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
01.03.2013	Nassschneelawinenabgang ab Seehöhe 2200 m bis ca. 200 m unterhalb der Galerie-Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
31.01.2014	Lawinenabgang bis in die Schwarzach, zw. 06.00 und 07.00 Uhr früh.	Datensammlung örtliche LK	Fotodokumenation örtliche LK
07.03.2014	Abgang von mehreren Schneerutschen bzw. kleineren Lawinen bis SH 2300 m.	Datensammlung örtliche LK	Fotodokumenation örtliche LK

### Jährliche Beobachtungen

Ereigniszeitpunkt	Beschreibung Ereignis	Quelle	Anmerkung
1999-2014	Jährliche Lawinenabgänge, Verortung der Ausläuflängen analog auf Basis Orthophoto.	Datensammlung örtliche LK	

## D.2 Moosbach Lawine

## Einzugsgebiet Moosbach Lawine

Gemeinde	St. Veit i. D.
Bezirk	Lienz
GBL	6.5 Osttirol
WLK ID	413140

Dokumentierte Ereignisse			
Ereigniszeitpunkt	Beschreibung Ereignis	Quelle	Anmerkung
22.02.1876	Großer Lawinenabgang bis in den Talbach.	Ortschronik der Gemeinde St. Veit	
26.02.1879	Großer Lawinenabgang.	Ortschronik	
16.02.1888	Großer Lawinenabgang, Ablagerung beim Schmiedfeld.	Ortschronik	
30.03.1937	Großer Staublawinenabgang, mittags, Schneemassen weit über die Talstraße hinunter vorgedrungen, Straße einige hundert Meter weit mit Schutt überdeckt.	Ortschronik	
23.12.1947	Am 23.12. 14.00 Uhr ging vom Südhang des Moser Berges eine Grundlawine nieder, die auf der Straße eine Breite von 80 m und eine Höhe von 10 m erreichte. Es wurde eine Telefonleitung zerstört und zur Straßenräumung waren 250 Tagesschichten erforderlich.	Meldeblatt der Gebietsbauleitung (GBL) Osttirol	
21.01.1951	Am 21.01. 10 Uhr und am 07.02. gingen im Moosgraben Lawinen nieder die die Straße auf 180 m Länge und 15 m Höhe verschütteten.	Meldeblatt der GBL	Schätzung auf Basis Luftbildatlas
07.02.1951	Grundlawine, Landesstraße in 150 m Breite und 10 m Höhe verschüttet.	Meldeblatt der GBL	Schätzung auf Basis Luftbildatlas
1975	Die Gemeindestraße wurde auf ca. 100 m bis zu 15 m hoch verschüttet. Die Räumungsarbeiten kosteten 50.000 Schilling.	Meldeblatt der GBL, Zeitungsbericht	
22.12.1979	Abgang einer Lawine.	Meldeblatt der GBL	
01.02.1986	Lawine blieb unterhalb des Güterweges nach Moos liegen. Breite ca. 80 m, Höhe ca. 3 m.	Meldeblatt der GBL	
18.04.1987	Abgang von 2 Nassschneelawinen fast bis zur Landesstraße. Der Güterweg Mellitz-Moos wurde ca. 8 m tief verschüttet.	Meldeblatt der GBL	
19.04.1987	Abgang von 2 Nassschneelawinen fast bis zur Landesstraße. Der Güterweg Mellitz-Moos wurde ca. 8 m tief verschüttet.	Meldeblatt der GBL	
21.12.1991	Nassschneelawine nach Regenfällen bis auf Rückseite der neuen Lawinengalerie.	Meldeblatt der GBL	
22.12.1991	Nassschneelawine nach Regenfällen bis auf Rückseite der neuen Lawinengalerie.	Meldeblatt der GBL	
01.2001	Staublawinenabgang von Seehöhe 2400 m bis über die Galerie bei Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung der Auslaufänge analog auf Basis Orthophoto
05.03.2006	Nassschneelawinenabgang von Seehöhe 2300/2400 m bis an die Galerie bei Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
12.2008	Lawinenabgang Staublawine in einer Höhe von ca. 2600 m bis 100 m über die Galerie Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto

04.2009	Lawinenabgang im Frühjahr-Nassschnee von Seehöhe 2300 bis an die Galerie-Gemeindestraße heran.	Datensammlung örtliche LK	Verortung auf Basis Orthophoto
31.01.2014	Lawinenabgang um 6.15 Uhr, mehrere Meter hohe Ablagerung im Bereich der Landesstraße.	Datensammlung örtliche LK	Fotodokumenation örtliche Lawinenkommission
14.03.2014	Lawinenabgang bis zur Galerie der Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Fotodokumenation örtliche LK
15.03.2014	Lawinenabgang bis zur Galerie der Gemeindestraße.	Datensammlung örtliche LK	Fotodokumenation örtliche LK

**Jährliche Beobachtungen**

<b>Ereigniszeitpunkt</b>	<b>Beschreibung Ereignis</b>	<b>Quelle</b>	<b>Anmerkung</b>
1999-2014	Jährliche Lawinenabgänge, Verortung der Ausläufingen analog auf Basis Orthophoto.	Datensammlung örtliche LK	