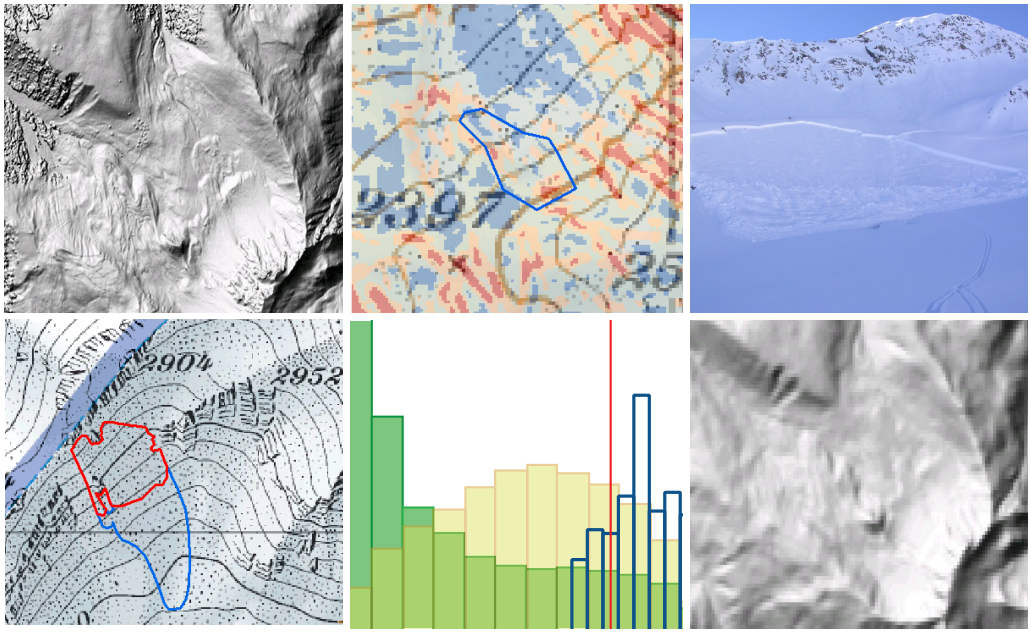
Geländeanalysen von Unfalllawinen



GEO 511 – Masterarbeit
Geographisches Institut der Universität Zürich
Abteilung Geographische Informationssysteme (GIS)

Irene Vontobel
06-714-158

Betreuer:
Dr. Ross Purves
Stephan Harvey (SLF)

Fakultätsvertreter:
Prof. Dr. Robert Weibel

Eingereicht am: 28.Oktober 2011

Kontakt – Autor:
Irene Vontobel
irene.vontobel@geo.uzh.ch

Kontakt – Institut:
Geographisches Institut
Universität Zürich – Irchel
Winterthurerstrasse 190
CH-8057 Zürich

Vorwort

Die Natur und ihre zum Teil unergründlichen Prozesse übten schon immer eine grosse Faszination auf mich aus. Die Möglichkeiten, welche sich uns heutzutage bieten, mittels Geographischen Informationssystemen (GIS) und Fernerkundung der Natur auf den Grund zu fühlen, sind immens und ebenso faszinierend. Sie haben mich dazu motiviert, eine Arbeit in der Schnittstelle zwischen Natur und Technik zu schreiben.

Ein grosser Dank gilt meinen Betreuer Dr. Ross Purves und Stephan Harvey, welche mir diese Arbeit ermöglicht und mich während des ganzen Arbeitsprozesses begleitet haben. Sie standen mir immer mit konstruktiver Kritik und Ratschlägen zur Seite. Weiter möchte ich mich bei Yves Bühler vom SLF für die hilfreiche Unterstützung bei Fragen zum ADS-DOM bedanken, Selena Rhinisperger für das Korrekturlesen meiner Arbeit und Melanie Eberhard für die Einführung und vielen guten Tipps im Umgang mit Adobe InDesign. Mein Dank gilt ebenfalls allen Freunden, Bekannten und Verwandten, die mich während der Zeit der Masterarbeit begleitetet haben und mir in vieler Hinsicht eine moralische oder tatkräftige Unterstützung waren.

Irene Vontobel

Ennetbaden, 28.Oktober 2011

Zusammenfassung

In der Schweiz sterben jährlich durchschnittlich 25 Menschen in Lawinen. Ein Grossteil dieser Lawinen wurde von der betroffenen Person selber ausgelöst. Über den Auslöseprozess von Lawinen ist zwar Vieles schon bekannt, trotzdem ist es bis heute nicht möglich den Ort und Zeitpunkt eines Lawinenniedergangs zu prognostizieren. Das Gelände gehört zu einem der drei Hauptfaktoren der Lawinenformation und hat bei der Beurteilung des Lawinenrisikos einen hohen Stellenwert. Die Geländeeigenschaften von kleinen bis mittleren Lawinen wurden bis jetzt jedoch kaum untersucht.

Im Rahmen dieser Masterarbeit wurden die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen insbesondere ihrer Anrissgebiete analysiert. Dafür wurden Fotos und Umrisse von Schweizer Unfalllawinen aus den Winter 1999/2000 bis 2009/2010 und zwei verschiedene, qualitativ hochstehende digitale Höhenmodelle (DHM25 und ADS-DOM) verwendet. Es konnten 142 Lawinenanrisse digitalisiert werden, wovon 53 für die Analyse mit dem hochaufgelösten ADS-DOM zur Verfügung standen. Mittels geomorphometrischen Methoden wurden lawinenrelevante Geländeeigenschaften (Kämme, Neigung, Exposition, Rauigkeit, Exponiertheit und die Kurvatur) aus den zwei Höhenmodellen extrahiert. Zudem wurde die Grösse (Länge und Breite) der Anrissgebiete abgeleitet und eine Methode entwickelt, um die Anrissgebiete automatisch in verschiedene Zonen zu unterteilen. Die zonale Auswertung der Geländeeigenschaften machte es möglich, die Werte mit den von Hand gemessenen Werten aus der SLDB zu vergleichen und auf diese Weise die Qualität der verwendeten Methoden und räumlichen Auflösungen abzuschätzen. Ebenfalls wurde der Einfluss der Eigenschaften der Höhenmodelle auf die erhaltenen Werte un-tersucht, indem die Resultate für die verschiedenen DHM verglichen wurden.

Es konnte gezeigt werden, dass die verwendeten Methoden und Auflösungen gut geeignet sind, um lawinenrelevante Eigenschaften für Unfalllawinen abzuleiten. Sowohl die mehrheitlich nördliche Exposition, die Kammnähe als auch die häufig konkave Profilkurvatur der Anrissgebiete der Unfalllawinen konnten bestätigt werden. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass sich viele Unfalllawinen in relativ planaren Hängen ereignet haben. Die Geländerauigkeit lag im mittleren Wertebereich, was nach Auswertung mittels Luftbildern einer relativ regelmässigen, geröllbedeckten Oberfläche entspricht. Die Analyse der Zusammenhänge zwischen den Geländeeigenschaften innerhalb der Anrissgebiete zeigte eine schwache positive Korrelation zwischen der Geländerauigkeit und der maximaler Hangneigung, welche aber nicht abschliessend bestätigt werden konnte. Die Anrissmächtigkeit der Lawinen zeigte keine Abhängigkeit mit den Geländeeigenschaften.

Der Unterschied in der Auflösung zwischen dem DHM25 (25 m) und dem ADS-DOM (10 m) zeigte sich nur für den Parameter der Hangneigung als besonders entscheidend. Für die 10 m-Auflösung wiesen alle Lawinen eine höhere maximale Hangneigung als 30 Grad auf, für die 25 m-Auflösung lag diese für einige Lawinen darunter. Das stellt für die Einschätzung des Lawinenrisikos ein relevanter Unterschied dar. Weiter konnte festgestellt werden, dass die Lagegenauigkeit der eingezeichneten Lawinen und die gewählten Schwellenwerten zum Teil einen wichtigeren Einfluss auf die Resultate hatten als die räumliche Auflösung. Es wäre interessant diese Zusammenhänge in zukünftigen Arbeiten noch besser zu untersuchen. Weiter wäre es spannend, die Berechnungen auf die ganze Schweiz auszudehnen und eine grössere Anzahl Unfalllawinen zu untersuchen. Damit nicht alle Anrissgebiete separat digitalisiert werden müssen, könnten sie, mit der hier vorgestellten Methode für die Zonierung der Anrissgebiete, abgeleitet werden. Mit den bestehenden 142 Anrissgebiete kann die automatische Klassifikation verifiziert werden.

Summary

In Switzerland 25 people get killed in snow-avalanches on an average yearly base. Mostly all of these avalanches are released by the affected person. The release process of snow-avalanches is quite well understood, however it is not possible to predict the exact location and time of a release so far. The terrain is one of the three main factors contributing to the formation of avalanches and highly important for the assessment of the avalanche risk. But the terrain characteristics of small to medium human triggered avalanches are barely analyzed till now.

This work focused on analyzing the terrain characteristics of human triggered avalanches and their starting zones. Photos and shapes of avalanches in Switzerland between 1999/2000 and 2009/2010 and two different, high-quality digital elevation models (DHM25 and ADS-DOM) were used for this study. It was possible to digitalize 142 starting zones of which 53 could be used for the analysis at high resolution with the ADS-DOM. Geomorphometric methods were used to extract different terrain features (ridges, slope, aspect, roughness, exposure and curvature) from the DEMs. Furthermore the size (length and width) of the starting zones was derived and a method was developed to divide the starting zones automatically in different districts. The zonal evaluation of the terrain features enabled the comparison of the results with field measurements of the SLDB. In this way the quality of the methods used and the spatial resolution could be evaluated. In addition the influence of the characteristics of the DEMs on the findings was analyzed by comparing the results for the two different DEMs.

It could be illustrated that the methods and resolutions used are qualified for the extraction of avalanche relevant properties. The mostly northern aspects as well as the common concave profile curvature for human triggered avalanches could be confirmed. It was furthermore detected that a lot of avalanches were released in planar slopes and the roughness of the terrain corresponded a relatively constant debris covered surface. A weak positive correlation between the roughness of the terrain and the maximum slope inside the starting zone could be observed. But it was not possible to confirm this relationship exclusively because of the small quantity of observations. The depth of fracture of the avalanches didn't show a relationship to the evaluated terrain features.

The difference between the resolution of the DHM25 (25 m) and the ADS-DOM (10 m) appeared particularly critical only for the parameter slope. All avalanches were released with a higher maximal gradient as 30 degree for the 10 m-resolution, for the 25 m-resolution the gradient was for 9 % of the avalanches under this 30 degree threshold. This difference in slope is relevant for the estimation of avalanche risk. It would be interesting to expand this analysis to the whole area of Switzerland to be able to analyze a bigger quantity of human triggered avalanches and to confirm the findings. In addition it could be observed that the accuracy of position for the digitalized outlines and the chosen thresholds had sometimes a more important influence on the results than the spatial resolution. It would also be interesting to analyze this relationship in future work more precisely. In order to derive the starting zones automatically, the presented methods for the division of the starting zones can be used. The automatic classification can then be verified with the existing 142 starting zones which were derived by hand for the presented study.

Inhalt

Vorwort	**i**
Zusammenfassung	**ii**
Summary	**iii**
Abbildungen	**vi**
Tabellen	**viii**
Abkürzungen	**ix**
Einleitung	**1**
1.1 Problemstellung und Motivation	**1**
1.2 Zielsetzung	**2**
1.3 Aufbau der Arbeit	**3**
Grundlagen	**5**
2.1 Lawinen	**5**
2.1.1 Lawinenklassifikation und Begriffsbestimmung	5
2.1.2 Lawinenbildende Faktoren	7
2.1.3 Auslöseprozess einer Schneebrettlawine	9
2.1.4 GIS und der Faktor Gelände in der Lawinenforschung	10
2.2 Geomorphometrie	**12**
2.2.1 Definition des Forschungsbereiches	12
2.2.2 Digitale Höhenmodelle (DHM)	13
2.2.3 Elementare Oberlächeneigenschaften	14
2.2.4 Geländeformen	15
2.2.5 Datenqualität	16
2.3 Forschungslücken	**17**
Daten, Untersuchungsgebiet und Software	**19**
3.1 Datengrundlage	**19**
3.1.1 Lawinenfotos und Lawinenumrisse	19
3.1.2 Digitale Höhenmodelle (DHM)	21
3.1.3 Topografische Karten	21
3.2 Untersuchungsgebiet	**22**
3.3 Software	**24**
Methodik	**25**
4.1 Erstellen der Lawinenzonen	**27**
4.1.1 Digitalisieren der Anrissgebiete	27
4.1.2 Berechnen von verschiedenen Zonen im Anrissgebiet	27
4.2 Aufbereiten der digitalen Höhenmodelle	**28**
4.3 Geländeanalyse	**29**
4.3.1 Neigung – Exposition – Kurvatur	29
4.3.2 Rauigkeit	30
4.3.3 Exponiertheit	31
4.3.4 Kamm	32

4.4 Auswertungen **34**
4.4.1 Automatisches Herleiten der Länge und Breite 34
4.4.2 Berechnen der Kammdistanz 34
4.4.3 Zonale Auswertung und Klassierung der Geländeeigenschaften 35
4.4.4 Vergleichende Statistik 38

Resultate **39**
5.1 Grösse und Lage **40**
5.1.1 Länge und Breite 40
5.1.2 Höhenlage 43
5.1.3 Exposition 43
5.1.4 Kammnähe 46
5.2 Flächenhafte Geländeeigenschaften und ihre Verteilung innerhalb der Anrissgebiete **47**
5.2.1 Geländeform 47
5.2.2 Rauigkeit 49
5.2.3 Exponiertheit 50
5.2.4 Hangneigung 50
5.3 Zusammenhang zwischen den Geländeeigenschaften **53**
5.3.1 Hypothesenbildung 53
5.3.2 Zusammenhang Kurvatur – Exponiertheit und Kurvatur - Rauigkeit 54
5.3.3 Zusammenhang Hangneigung – Rauigkeit und Hangneigung - Kurvatur 56
5.3.4 Zusammenhang Anrissmächtigkeit – Geländeeigenschaften 58
5.4 Zusammenfassung **59**

Diskussion **61**
6.1 Eigenschaften der Unfalllawinen **61**
6.1.2 Grösse und Lage 62
6.1.3 Geländeform und -beschaffenheit 63
6.1.4 Zusammenhang zwischen Geländeeigenschaften 64
6.2 Einfluss der Eigenschaften der Höhenmodelle **65**
6.2.1 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften der DHM 65
6.2.2 Einfluss der Auflösung 67
6.3 Verbesserungsvorschläge **69**

Schlussfolgerung **71**
7.1 Arbeitsprozess **71**
7.2 Erkenntnisse **72**
7.3 Ausblick **73**

Literatur **75**
Anhang **80**
Persönliche Erklärung **89**

Abbildungen

Abb.1.1:	Lawinentote in der Schweiz seit Winter 1936/37	1
Abb.2.1:	Lawinenklassifikation nach Auslöseart	6
Abb.2.2:	Verschiedene Zonen einer Schneebrettlawine	7
Abb.2.3:	Lawinenbildende Faktoren für eine Unfalllawine	8
Abb.2.4:	Auslöseprozess einer Schneebrettlawine	10
Abb.2.5:	Kontext der Geomorphometrie	12
Abb.2.6:	Zwei Typen von digitalen Höhenmodellen	13
Abb.2.7:	Reliefklassifikation	15
Abb.2.8:	Einfluss der Auflösung auf die Geländedarstellung	17
Abb.3.1:	Schadenslawinen nach Auslöseart und Winter (N=579)	20
Abb.3.2:	Überblick über die Datengrundlage	22
Abb.3.3:	Gliederung der Gebirgsregion der Schweiz	23
Abb.3.4:	Räumliche Verteilung der untersuchten Unfalllawinen und Untersuchungsgebiete	23
Abb.4.1:	Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens	26
Abb.4.2:	Prozess des Abgrenzens und Digitalisierens der Anrissgebiete	27
Abb.4.3:	Schematische Darstellung des Vorgehens für die Zonierung der Anrissgebiete	28
Abb.4.4:	Vergleich des ADS-DOM (2m) vor und nach der Aufbereitung	29
Abb.4.5:	Berechnung der Neigung in einer 3x3 Nachbarschaft	30
Abb.4.6:	Berechnung der Rauigkeit gemäss Sappington et al.	31
Abb.4.7:	Rauigkeitswerte auf einer ebenen, geröllbedeckten Oberfläche	31
Abb.4.8:	Vorgehen bei der Kammberechnung (Methode 1)	32
Abb.4.9:	Vorgehen bei der Kammberechnung (Methode 2)	33
Abb.4.10:	Vergleich der Resultate für die beiden Methoden der Kammberechnung	33
Abb.4.11:	Schematische Darstellung des Vorgehens für die Herleitung der Länge und der Breite	34
Abb.4.12:	Berechnung der Oberflächendistanz	35
Abb.4.13:	Geländeformen nach Dikau (1989)	36
Abb.4.14:	Klassierung der Rauigkeitswerte in vier Gruppen	37
Abb.4.15:	Klassierung der Exponiertheit	37
Abb.5.1:	Länge und Breite der Lawinen	40
Abb.5.2:	Grössenverteilung der Länge und Breite von Unfalllawinen	42
Abb.5.3:	Grössenverteilung der Länge und Breite der Lawinenumrisse nach Auslöseart	42
Abb.5.4:	Häufigkeitsverteilung der maximalen Höhe der Unfalllawinen (N=579)	43
Abb.5.5:	Lawine mit relevanter Expositionsänderung zwischen ADS-DOM und DHM25	44
Abb.5.6:	Vergleich der Expositionsverteilung	45
Abb.5.7:	Vergleich mit der Expositionsverteilung der ganzen Schweiz	45
Abb.5.8:	Expositionsverteilung nach jahreszeitlichen Ereignissen	45
Abb.5.9:	Verteilung der Kammdistanzen der Unfalllawinen der ganzen Schweiz	46
Abb.5.10:	Häufigkeitsverteilung der Geländeform (nach Dikau, 1989)	48
Abb.5.11:	Häufigkeitsverteilung der Geländesituation	48
Abb.5.12:	Vergleich der durchschnittlichen Kurvatur zwischen ADS-DOM und DHM25	48

Abb.5.13:	Einfluss verschiedener Schwellenwerte auf die Häufigkeitsverteilung der Geländeform	49
Abb.5.14:	Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Rauigkeit	49
Abb.5.15:	Verteilung der durchschnittlichen Exponiertheit	50
Abb.5.16:	Verteilung der maximalen und durchschnittlichen Hangneigung	52
Abb.5.17:	Vergleich der maximalen Hangneigung zwischen verschiednen Zonen	52
Abb.5.18:	Vergleich der max. Hangneigung zwischen DHM25 (25 m) und ADS-DOM (10 m)	52
Abb.5.19:	Muster der Verteilung der durchschnittlichen Geländeeigenschaften in den Anrissgebieten	53
Abb.5.20:	Muster von Zusammenhängen zwischen Geländeeigenschaften und der Anrissmächtigkeit	54
Abb.5.21:	Zusammenhang zwischen der Rauigkeit und der Kurvatur	55
Abb.5.22:	Zusammenhang zwischen maximaler Hangneigung und Rauigkeit bzw. Profilkurvatur	56
Abb.5.23:	Zusammenhang zwischen maximaler Hangneigung und der durchschnittlichen Kurvatur	57

Abb.6.1:	Einfluss Geländerauigkeit auf die Schneebrettauslösung	64
Abb.6.2:	Differenz der Inputmodelle ADS-DOM (10m) und DHM25 (25m)	66
Abb.6.3:	Lawinen mit kritischem Hangneigungsunterschied zwischen ADS-DOM und DHM25	68
Abb.6.4:	Einfluss Auflösung und Lagegenauigkeit auf Profilkurvatur	68
Abb.6.5:	Lawinen, für welche sich die Kurvatur diametral änderte zwischen ADS-DOM und DHM25	69

Tabellen

Tab.2.a:	Lawinenklassifikation nach Grösse	7
Tab.2.b:	Arbeiten in der Lawinenforschung im Zusammenhang mit dem Gelände	11
Tab.2.c:	Elementare Oberflächeneigenschaften	14
Tab.5.a:	Anzahl Lawinenumrisse und Lawinenanrisse für die Auswertung	40
Tab.5.b:	Vergleich der Länge und Breite zwischen den Auslösearten	42
Tab.5.c:	Vergleich der Länge und Breite mit den Werten aus der SLDB	42
Tab.5.d:	Vergleich der Kurvatur im Anriss zwischen ADS-DOM und DHM25	49
Tab.5.e:	Abhängigkeit zwischen Kurvatur, Rauigkeit und Exponiertheit	55
Tab.5.f:	Abhängigkeit zwischen Ø und max. Hangneigung mit der Kurvatur, der Rauigkeit und der Exponiertheit	57
Tab.5.g:	Abhängigkeit zwischen der Anrissmächtigkeit und Kurvatur, Rauigkeit, Exponiertheit und Hangneigung	58
Tab.6.a:	Lawinen, welche den 30-Grad Grenzwert überschreiten zwischen ADS-DOM und DHM25	67

Abkürzungen

DHM	Digitales Höhenmodell / Digitale Höhenmodelle
GIS	Geographisches Informationssystem / Geographic Information Science
SLDB	Schadenslawinendatenbank
SLF	WSL-Institut für Schnee und Landschaftsforschung
WSL	Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

„Der Natur ist es gleichgültig,
ob die verborgenen Gründe und Arten ihres Handelns
dem Menschen verständlich sind oder nicht.“
Galileo Galilei

Kapitel 1
Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Die durchschnittliche Anzahl Todesfälle aufgrund von Lawinen beträgt weltweit 250 pro Jahr (Meister, 2002). In den Vereinigten Staaten verursachen Lawinen auf einer durchschnittlichen jährlichen Basis mehr Tote als Erdbeben und Bergstürze zusammen (Voight et al., 1990). Dabei ist ein Grossteil der Todesfälle nicht auf grosse, spontan ausgelöste Lawinen, sogenannte Katastrophenlawinen, zurückzuführen, sondern auf meist selbstverschuldete Unfalllawinen. In der Schweiz sterben jährlich durchschnittlich 25 Menschen in Lawinen, 90 % davon haben ihre Lawine selber ausgelöst (vgl. Abb.1.1; SLF, 2011a).

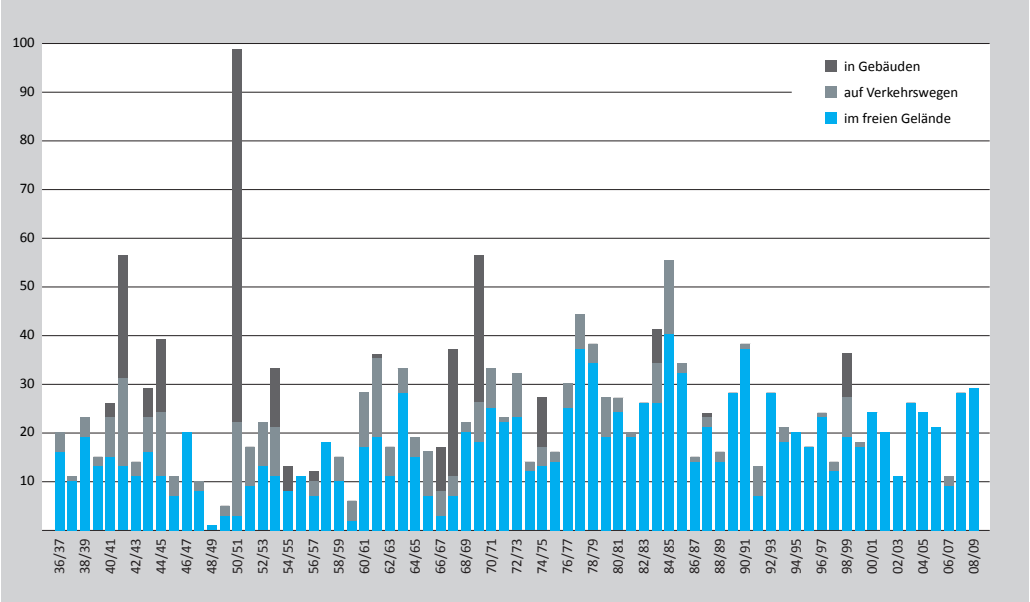


Abb.1.1: Lawinentote in der Schweiz seit Winter 1936/37 (abgeändert nach SLF, 2011a)

Die Lawinenformation und die Lawinendynamik wurden bereits intensiv untersucht. So haben daraus abgeleitete Massnahmen, wie die Aufforstung von Schutzwäldern oder die Erstellung von Lawinenverbauungen, die Anzahl Lawinentote auf Verkehrswegen und in Gebäuden reduzieren können. Jedoch konnte die Zahl der Todesopfer trotz der verbesserten Informations- und Präventionsarbeit und der Fortschritte in der Ausrüstung nicht reduziert werden. Auch heute ist es noch nicht möglich, den genauen Zeitpunkt und Ort eines Lawinenniedergangs zu prognostizieren (Schweizer et al., 2003).

Vieles über den Auslöseprozess von Unfalllawinen ist noch nicht bekannt. Numerische Modelle und Analysen sind darum wichtig, um quantitative und grossflächige Untersuchungen zu ermöglichen und weitere Fortschritte in der Lawinenerforschung zu erzielen (Schweizer et al., 2003). Das Gelände ist unter den räumlich und zeitlich stark variablen lawinenrelevanten Faktoren der einzige, welcher über die Zeit konstant bleibt. Er ist aus diesem Grund besonders gut geeignet, um mittels quantitativer und automatischer Methoden untersucht zu werden.

Da Unfalllawinen in der Regel den kleinen bis mittleren Lawinen angehören und somit keine grosse räumliche Ausdehnung besitzen, war es bis anhin schwierig, sie mit den zur Verfügung stehenden Auflösungen von digitalen Höhenmodellen zu untersuchen. Das ist mitunter ein Grund, warum bis jetzt noch relativ wenig über die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen bekannt ist (Harvey & Zweifel, 2008). Da für die Schweiz bald flächendeckend hochaufgelöste Höhenmodelle vorhanden sein werden und dank einer Initiative des SLF eine langjährige Datenbank mit Umrissen und Fotos von Unfalllawinen existiert, bietet sich heute die Möglichkeit, die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen genauer zu untersuchen.

Ein detailliertes Wissen über die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen, vor allem in ihren Anrissgebieten, könnte einerseits für lawinendynamische Modellierungen von kleinen bis mittleren Lawinen, aber auch für die Präventionsarbeit interessant sein und im besten Fall helfen, die Anzahl Todesopfer zu reduzieren.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen mittels geomorphometrischer Methoden möglichst detailliert zu beschreiben und die Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität zu beurteilen. Untersucht werden Unfalllawinen der letzten 10 Jahre (Winter 1999/2000 bis 2009/2010) in der Schweiz, wobei der Fokus auf ihren Anrissgebieten liegt. Einerseits soll die Verteilung der einzelnen Geländeeigenschaften untersucht werden, andererseits die Beziehung der Geländeeigenschaften untereinander. Um die Qualität der Ergebnisse abschätzen zu können und zu erfahren, welchen Einfluss die verwendeten geomorphometrischen Methoden und räumliche Auflösung auf die Resultate hatten, werden sie zwischen verschiedenen Höhenmodellen unterschiedlicher Auflösung verglichen und die Resultate den manuell auf Karten oder im Feld gemessenen Eigenschaften aus der SLDB gegenübergestellt.

Es lassen sich folgende Grobziele formulieren:

1. Abgrenzen der Anrissgebiete der Unfalllawinen und Erstellen einer Datengrundlage für die Auswertung
2. Ableiten von für Unfalllawinen bedeutsamen Geländeeigenschaften mittels geomorphometrischen Methoden
3. Abschätzen des Zusammenhangs zwischen den verschiedenen Geländeeigenschaften in den Anrissgebieten
4. Abschätzen der Qualität und Relevanz der Ergebnisse und des Einflusses der Eigenschaften der verwendeten DHM auf die Resultate

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in sieben Kapitel gegliedert. Nach dieser Einführung werden im Kapitel zwei Grundlagen zur Lawinenforschung und der Geomorphometrie präsentiert, der Stand der aktuellen Forschung behandelt und daraus Fragestellungen abgeleitet. Im Kapitel drei werden die verwendeten Daten sowie das Untersuchungsgebiet vorstellt. Die verwendete Methodik für die Extraktion der Geländeeigenschaften und deren Auswertung wird im Kapitel vier präsentiert. Im Kapitel fünf folgen die Resultate und erste Interpretationen. Diese werden dann im Kapitel sechs anhand der Fragestellungen diskutiert und erlauben einen Ausblick auf weitere zukünftig mögliche Forschungsschwerpunkte. Im Kapitel sieben folgt eine Schlussfolgerung zum Erreichten und zu den neu gewonnenen Erkenntnissen.

„If snow is the question,
terrain is the answer… always."
Drew Hardesty, from one of his UAFC advisories this season
(Avalanche Review February 2011)

Kapitel 2
Grundlagen

Um die Anrissgebiete von Lawinen möglichst genau abzugrenzen, zu verstehen, inwiefern die Geländeoberfläche mit der Auslösung einer Unfalllawine gekoppelt ist und welche Geländeeigenschaften dabei wichtig sind, ist ein grundlegendes Wissen über das Phänomen Lawine wichtig. Ebenso ist es notwendig, die methodischen Möglichkeiten zu kennen, die es ermöglichen lawinenrelevante und qualitativ hochstehende Geländeeigenschaften automatisiert zu identifizieren und zu extrahieren.

Das folgende Kapitel ist in drei Teile gegliedert. Im ersten Teil werden Grundlagen zum Phänomen Lawine, insbesondere der Schneebrettlawine, gegeben und vorgestellt, inwiefern GIS im Zusammenhang mit Geländeanalysen in der Lawinenforschung bereits genutzt wurde. Im zweiten Teil wird zuerst der Forschungsbereich der Geomorphometrie, sowie das DHM als Input für Geländeanalysen vorgestellt. Danach werden Konzepte der Geomorphometrie präsentiert, die im Zusammenhang mit der automatisierten Beschreibung des Geländes stehen. Zuletzt folgt ein Input zur Qualität von digitalen Höhenmodellen und den daraus abgeleiteten Parametern. Im dritten Teil wird aufgezeigt, wo noch Forschungslücken bestehen, und es werden einige Fragestellungen definiert, welche in dieser Arbeit beantwortet werden und helfen sollen, die entdeckten Forschungslücken zu schliessen.

2.1 Lawinen

2.1.1 Lawinenklassifikation und Begriffsbestimmung

Lawinen lassen sich je nach Form, Lage, Art des Schadens oder des Materials in unterschiedliche Typen klassifizieren. Eine Zusammenstellung verschiedener Lawinentypen findet sich beispielsweise in Munter (2003) oder auf der Homepage des SLF (SLF, 2011b). Lawinen, die durch Personen ausgelöst wurden, gehören in den meisten Fällen der Kategorie der Schneebrettlawinen an. Laut Schweizer & Jamieson (2000) sind nur 2-5 % von Personen ausgelösten Lawinen Lockerschneelawinen und 1-3 % Nassschneelawinen. Ein grundlegender Unterschied zwischen der Lockerschneelawine und der Schneebrettlawine ist die Form des Anrisses. Lockerschneelawinen besitzen einen punktförmigen Anriss, Schneebrettlawinen einen linienförmigen, scharfkantigen Anriss (vgl. Abb.2.1). In dieser Arbeit werden Schneebrettlawinen untersucht, welche durch Personen ausgelöst wurden oder Personenschäden verursacht haben, was natürliche oder durch Sprengungen und Pistenmaschinen ausgelöste Lawinen miteinschliesst. Sie werden in dieser Arbeit als Unfalllawinen bezeichnet.

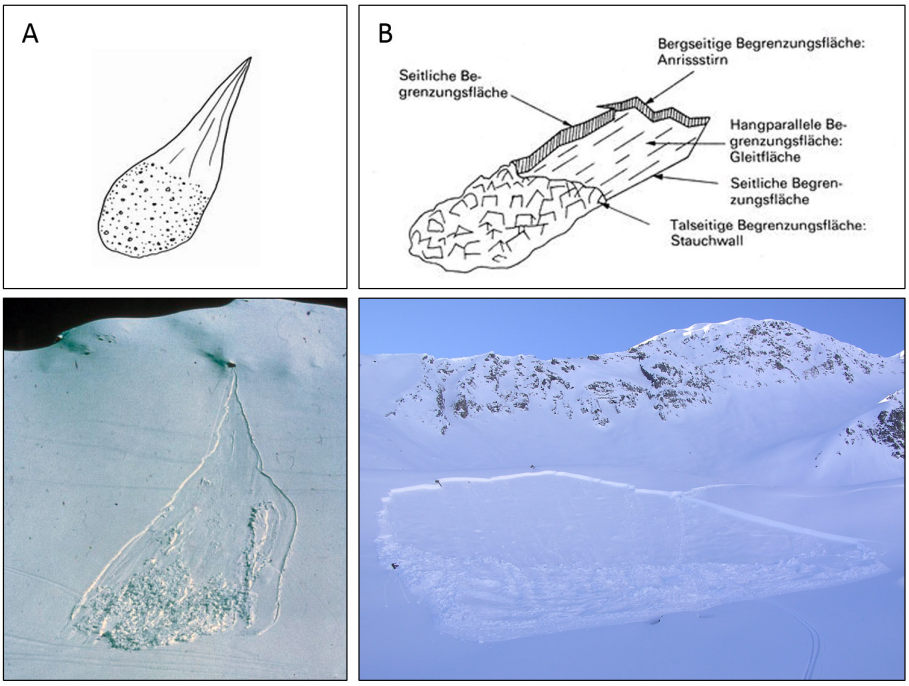


Abb.2.1: Lawinenklassifikation nach Auslöseart
A) Lockerschneelawine, B) Schneebrettlawine (SLF, 2011b bzw. White Risk, 2006)

Eine Schneebrettlawine lässt sich anhand ihrer morphologischen Charakteristiken in folgende drei Abschnitte unterteilen: Anrissgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsbereich (vgl. Abb.2.2). Das Anrissgebiet reicht von der hangobersten Bruchstelle, der sogenannten Anrissstirn, bis zur hanguntersten Bruchstelle, dem so genannten Stauchwall. Es ist die Zone, in der sich ein Schneebrett von der tiefer liegenden Schicht löst und hangabwärts abgleitet. Bei dieser Gleitschicht kann es sich entweder um eine tiefer liegende Schneeschicht oder um die Bodenoberfläche handeln, was häufig im Frühling bei Nassschneelawinen der Fall ist (McClung & Schaerer, 1993). Der Stauchwall wird gleichzeitig mit den seitlichen Begrenzungsflächen gebildet und dann vom Schneebrett überfahren. Zwischen dem Anrissgebiet und dem Ablagerungsbereich befindet sich die Sturzbahn. Sie kann mehrere 100 m betragen oder auch nicht vorhanden sein, wenn nach dem Stauchwall bereits die Ablagerung folgt (White Risk, 2006). Der Ablagerungsbereich ist gekennzeichnet durch seine unregelmässige Schneeoberfläche, die durch die Ablagerung der transportierten Schneeblöcke entstanden ist.

Die Länge einer Lawine wird vom obersten Punkt des Anrisses bis zum vordersten Punkt der Ablagerung gemessen und auch Lauflänge genannt. Für die Schneebrettlawinen existiert zudem der Begriff der Anrisslänge, damit wird die Länge des Anrisses vom obersten Punkt der Anrissstirn bis zum Stauchwall bezeichnet (EAWS, 2011). Die Anrissbreite bezeichnet die maximale Breite der seitlichen Flanken. Lawinen können auch nach ihrer Lauflänge oder ihres Volumen klassiert werden. Für diese Arbeit wird die Klassierung nach EAWS (2011) verwendet (vgl. Tab.2.a). Unfalllawinen gehören in den meisten Fällen den kleinen bis mittleren Lawinen an. Die Dicke der Schneedecke an der Anrissstirn wird als Anrissmächtigkeit bezeichnet und senkrecht auf den Hang gemessen. Sie beträgt für Unfalllawinen meistens weniger als einen Meter (Schweizer & Jamieson, 2001).

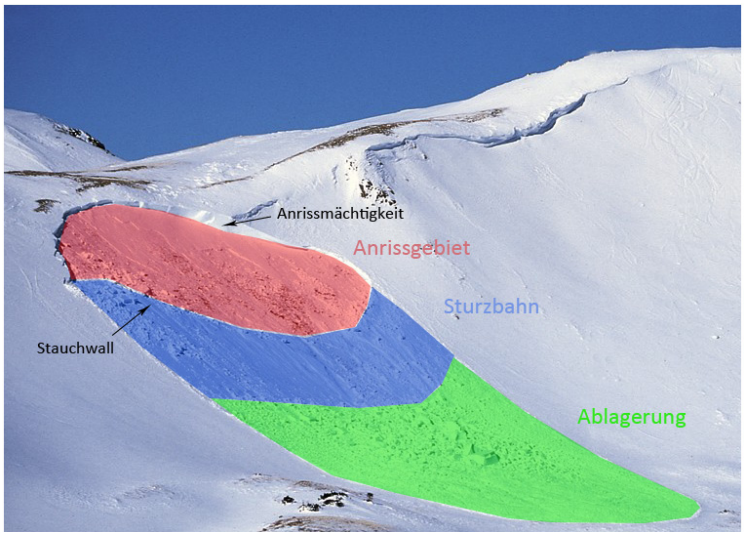


Abb.2.2: Verschiedene Zonen einer Schneebrettlawine
(Quelle Foto: Powderguide, 2011)

Grösse	Lauflänge und Volumen
Rutsch	Lauflänge < 50 m, Volumen < 100 m^3
Kleine Lawine	Lauflänge <100 m, Volumen < 1000 m^3
Mittlere Lawine	Lauflänge <1000 m, Volumen <10‘000 m^3
Grosse Lawine	Lauflänge ca. 1 – 2 km, Volumen <100‘000 m^3
Sehr grosse Lawine	Lauflänge ca. 3 km, Volumen >100‘000 m^3

Tab.2.a: Lawinenklassifikation nach Grösse (EAWS, 2011)

2.1.2 Lawinenbildende Faktoren

Der Prozess der Lawinenbildung ist komplex und noch nicht in allen Details erforscht. Verschiedene miteinander interagierende Faktoren tragen zur Formation einer Lawine bei. Schweizer et al. (2003) umschreiben die Lawinenformation als komplexe Interaktionen zwischen meteorologischen Bedingungen, der Schneedecke und dem Gelände. Eine alternative Sichtweise auf die Lawinenformation ist die Modellierung des Auslöseprozess mittels physikalischen und mechanischen Prozessen. Dabei stehen vor allem die Mechanik und die Eigenschaften des Materials Schnee im Vordergrund (vgl. Kapitel 2.1.3). Im Falle von Unfalllawinen sollte neben diesen physikalischen Faktoren der Mensch als Beteiligter nicht ausser Acht gelassen werden. Denn die meisten Lawinenunfälle resultieren aufgrund menschlicher Fehler (McClung, 2002). Es genügt also nicht, die physikalischen Eigenschaften der Lawinenformation zu kennen, es muss auch noch besser verstanden werden, was die Entscheidungsfindung im Gelände beeinflusst (Adams, 2004). Anlehnend an Schweizer et al. (2003) und Adams (2004) werden nachfolgend die drei Hauptfaktoren, die zu einer Unfalllawine führen, vorgestellt (vgl. Abb.2.3) und auf einige Arbeiten in diesen Gebieten verwiesen. Diese Faktoren werden auch in gängigen Produkten der Lawinenprävention als Beurteilungs- und Entscheidungshilfen verwendet (z.B. "Achtung Lawinen!" und "White Risk").

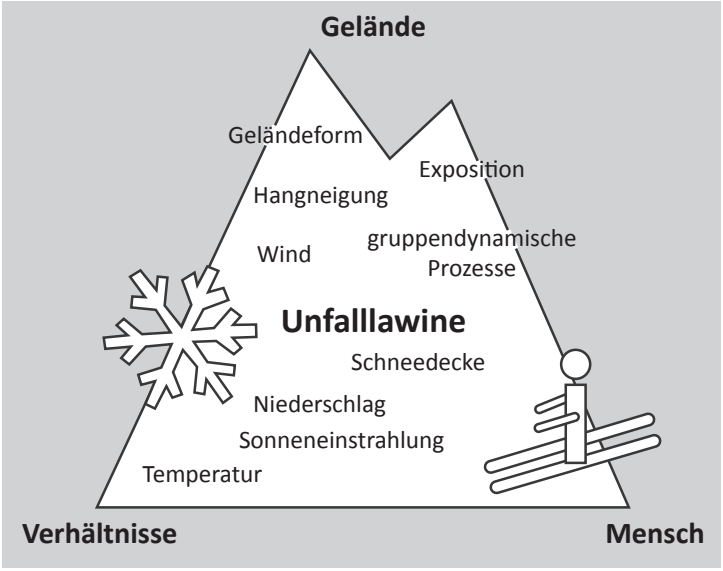


Abb.2.3: Lawinenbildende Faktoren für eine Unfalllawine
eigene Grafik, nach Schweizer et al. (2003) und Adams (2004)

Verhältnisse

Unter dem Faktor Verhältnisse werden sowohl die meteorologischen Bedingungen, wie auch der Schneedeckenaufbau zusammengefasst. Die meteorologischen Bedingungen, welche den Aufbau, wie auch die Stabilität der Schneedecke beeinflussen und somit einen grossen Einfluss auf die Formation einer Schneebrettlawine haben, sind die Temperatur, die Sonneneinstrahlung, die Windverhältnisse und der Niederschlag.

Grosse Neuschneemengen haben sowohl für natürlich ausgelöste Lawinen (Föhn et al., 2002), als auch für Unfalllawinen einen bedeutenden Einfluss, wobei für Unfalllawinen die kritische Neuschneemenge je nach vorherrschenden Bedingungen variiert (Munter, 2003). Der Wind beeinflusst den Schneefall, sowie die Verfrachtung des bereits abgelagerten Schnees (Lehning et al. 2000). Er verursacht somit je nach Erosions- oder Depositionslage verschiedene Bedingungen und Entwicklungen des Schneedeckenaufbaus. Gauer (1999) hat Schneeablagerungen auf beiden Seiten eines Kammes gemessen und festgestellt, dass im Mittel über den ganzen Hang auf der windabgewandten aber von Windverfrachtungen betroffenen Lee-Seite 20-30 % mehr Schnee abgelagert war als auf einer Vergleichsfläche im flachen Terrain. Für den Faktor Temperatur können gemäss McClung & Schweizer (1999) zwei wichtige Effektgruppen unterschieden werden: (1) Schneemetamorphose und Kriechen und (2) Mechanische Eigenschaften und Stärke des Schnees. Gemäss Schweizer et al. (2003) erklären die Effekte der Sonneneinstrahlung viele Prozesse, welche zu Schwachschichten in der Schneedecke führen. Der Schneedeckenaufbau wird als eigentlicher Schlüsselfaktor für die Formation von trockenen Schneebrettlawinen gehandelt (Schweizer et al., 2003). Temperaturveränderungen, Neuschnee oder windbedingte Verfrachtungen lösen alleine noch keine Schneebrettlawine aus, wenn nicht bereits eine Schwachstelle unter einer oder mehreren Schichten von gebundenem Schnee vorhanden ist (vgl. Kapitel 2.1.3).

Gelände

Das Gelände beeinflusst durch seine Ausprägung die Ablagerung und Verfrachtung des Schnees, sowie das Mass der Sonneneinstrahlung und lokale Temperaturunterschiede. Auch der Schneedeckenaufbau wird durch das Gelände beeinflusst. Gemäss Föhn et al. (2002) können Hangneigungsveränderungen zu

Stresskonzentrationen in der Schneedecke führen, welche die Formation einer Lawine begünstigen. Auch kann eine hohe Geländerauigkeit Ursache für eine hohe Variabilität im Schneedeckenaufbau von dünnen Schneeschichten sein oder den Aufbau einer kontinuierlichen Schneeschicht verhindern (Schweizer et al., 2003). Der Hangneigung kommt für die Beurteilung der Lawinengefahr eine Schlüsselrolle zu. Gemäss Harvey (2002) ereignet sich die Hälfte aller Unfalllawinen zwischen 36 und 42 Grad. Gemäss McClung & Schaerer (1993) ereignen sich bei über 60 Grad Neigung keine Lawinen mehr, da dann der Schnee kontinuierlich abgetragen wird und unter 30 Grad die Neigung zu gering ist, als dass eine Schneedecke ins Rutschen kommen könnte. Für Unfalllawinen könnte zudem die Kurvatur einen Einfluss auf die Auslösung haben, denn gemäss Gleason (1995) und McClung (2001) sind Anrissgebiete von Schneebrettlawinen häufiger in Gelände mit konkaver Plankurvatur zu finden. Gemäss Harvey (2002) waren 80 % der Unfalllawinen in der Schweiz in Gebieten nahe von einem Kamm, grossen Blöcken oder Mulden und Runsen zu finden und nur 20 % in Gebieten ohne spezielle Geländeformen.

Mensch

Eine Schneebrettlawine wird erst dann zur Unfalllawine, wenn Personen betroffen sind. Bei 90 % der Unfalllawinen in der Schweiz haben die betroffenen Personen die Schneebrettlawine selber ausgelöst (SLF, 2011a). Möchte man die Gefahr einer Unfalllawine besser verstehen und eingrenzen, sollte man wissen, wie sich Menschen im Gelände verhalten und Entscheidungen treffen (Adams, 2004). Gemäss McClung (2002) liegt der Hauptgrund von Unfalllawinen in der falschen Wahrnehmung der Lawinengefahr der betroffenen Personen. Diese falsche Wahrnehmung kann einerseits durch Unkenntnis einer angemessenen Schnee- und Lawinenkunde resultieren, andererseits spielen auch kognitive, soziale und emotionale Faktoren eine Rolle (Munter, 2003). Als Beispiel kann die höhere Bereitschaft grösserer Gruppen höheres Risiko einzugehen genannt werden, was in der Sozialpsychologie als „Risky-shift-effect“ bekannt ist (Cartwright, 1973).

2.1.3 Auslöseprozess einer Schneebrettlawine

Es existieren verschiedene Modelle, die den Auslöseprozess einer Schneebrettlawine beschreiben. Ein umfassendes Modell, welches für jegliche Ausgangsituationen einer Schneebrettlawine den Prozess erklären könnten, gibt es jedoch noch nicht.

Der traditionellste und noch immer weit verbreitete Ansatz basiert auf dem sogenannten Stabilitätsindex von Föhn (1987):

$$S' = \frac{\tau_s}{\tau_g + \Delta\tau}$$

Dabei ist τ_s die Scherfestigkeit der Schwachschicht und τ die Schubspannung, welche auf die Schwachschicht wirkt. $\Delta\tau$ ist die zusätzliche Schubspannung aufgrund der Belastung, welche auf die Schneedecke ausgeübt wird (gemäss Schweizer & Jamieson, 2003). Es wird dabei angenommen, dass es zum Bruch in einer Schneeschicht kommt, sobald das Verhältnis der Scherfestigkeit zur Schubspannung unter eins fällt. Dieses Konzept ist für von Personen ausgelöste Lawinen relativ erfolgreich. Für natürliche Lawinen, welche eine graduelle Belastung oder keine zusätzliche Belastung erfahren, konnte dieser Ansatz mit einer klar definierten Belastungsgrenze jedoch nicht überzeugen (Schweizer et al., 2003).

Heierli et al. (2008) schlugen einen neuen Ansatz vor, der auf den Prinzipien der Bruchmechanik und des „anticracking“ basiert. Das „anticrack“-Modell nutzt das Konzept der Energiebarriere, um die

Bruchausbreitung zu beschreiben und die Stabilität einer Schneeschicht zu berechnen. Diese Energiebarriere kann entweder durch die Vergrösserung einer beschädigten Stelle oder durch eine zusätzliche Belastung überwunden werden (Harvey & Heierli, 2009). Im Gegensatz zu früheren Modellen, in welchen die kritische Länge für Brüche ein paar Meter bis 10m gross war, ist die kritische Grenze für ein Anticrack ein paar Zentimeter bis ein paar 10 Zentimeter gross. Das bedeutet, dass bereits aufgrund wenige cm grosser Defekte in der Schneedecke spontane Brüche resultieren können.

Vereinfacht lassen sich vier Hauptkriterien zusammenfassen, die in jedem Fall für die Auslösung einer Schneebrettlawine vorhanden sein müssen. Das sind eine oder mehrere Schwachstellen in einer tiefer liegenden Schneeschicht, gebundener Schnee über der kritischen Schicht, ein genügend steiler Hang (ohne den ein Schneebrett gar nicht abfahren kann) und im Falle der Unfalllawine eine Person, welche eine Zusatzbelastung auf den Hang bewirkt.

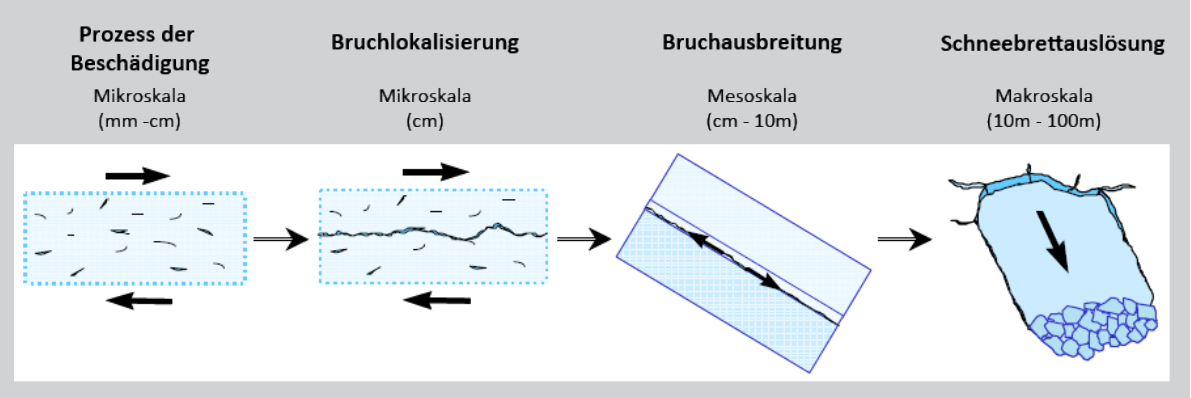


Abb.2.4: Auslöseprozess einer Schneebrettlawine
schematische Darstellung, abgeändert nach Schweizer & Jamieson (2003)

2.1.4 GIS und der Faktor Gelände in der Lawinenforschung

Seitdem Geodaten nicht mehr unerschwinglich sind und auch Computer Hard- und Software zu einem guten Preis-Leistungsverhältnis zu erhalten sind, werden auch in der Erforschung von Lawinen immer häufiger Geografische Informationssysteme (GIS) eingesetzt. Das Gelände, einer der Hauptfaktoren der Lawinenformation und der einzige, welcher über die Zeit konstant bleibt, lässt sich mittels räumlicher Daten relativ einfach analysieren und modellieren. Numerische Modelle und Analysen ermöglichen eine quantitative Untersuchung des Phänomens Lawine, was essentiell ist, um weitere Fortschritte in der Lawinenforschung zu machen (Schweizer et al. 2003). Einzige Limitation ist die Abhängigkeit der Daten, die zum Teil schwierig zu erhalten sind oder keine genügende Genauigkeit aufweisen. GIS wurde in der Lawinenforschung unter anderem dafür eingesetzt, den Zusammenhang zwischen Gelände, Schneeeigenschaften und der Lawinenaktivität zu untersuchen, potentielle Anrissgebiete zu finden, das Lawinenverhalten zu modellieren und damit Gefahrenkarten zu erstellen.

Nachfolgende Tabelle (2.b) soll einen Überblick über einige wichtige Arbeiten im Zusammenhang mit dem Gelände in der Lawinenforschung geben, sowie über deren Fokus, die mit einbezogenen Geländeeigenschaften und die verwendete räumliche Auflösung. Die meisten Arbeiten beschäftigten sich mit natürlich ausgelösten, mittleren bis grossen Lawinen. Nur wenige Arbeiten konzentrierten sich auf die kleinen bis mittleren Schneebrett- bzw. Unfalllawinen. Für diese Arbeiten wurden die Geländeeigenschaften in der Regel von Hand auf der Karte oder im Feld gemessen. Ein Grund dafür liegt wahrscheinlich in der zur Verfügung stehenden

Auflösungen der verwendeten DHM. In den meisten Studien war die Auflösung nicht besser als 20-30 m, was zu grob ist, um kleinräumige Veränderungen der Geländeeigenschaften zu erkennen, welche vor allem für kleine Lawinen interessant sind. In den meisten Arbeiten, die sich mit dem Zusammenhang von Gelände und Lawinenaktivität beschäftigten, wurde für einzelne Geländeeigenschaften die Häufigkeitsverteilung modelliert und nicht Zusammenhänge zwischen verschiedenen Geländeeigenschaften untersucht.

Autoren	Neigung	Exposition	Höhe	Kurvatur	Kamm	Rauigkeit	Zu. Sc-Ge [1]	Mod. Anr. [2]	anderes	Unfall. [3]	von Hand	DHM	Auflösung
Strempel et al. (1996)	■	■		■			■					■	5m
Stoffel et al. (1998)	■	■	■				■						?
Schweizer & Jamieson (2000)	■	■	■				■			■	■		
Schweizer & Lütschg (2001)	■	■	■				■			■	■		
McClung (2001)	■	■		■		■	■				■		
Gruber (2001)	■							■				■	25m
Deems et al. (2002)	■	■	■	■					■			■	30m
Harvey (2002)	■	■	■				■			■	■		
Maggioni & Gruber (2003)	■	■		■	■		■	■				■	25m
Forsythe & Wheate (2003)	■	■							■			■	100m
Hendrikx et al. (2005)		■					■					■	25m/ 5m
Ghinoi & Chung (2005)	■	■	■		■	■	■	■				■	20m
Gruber & Bartelt (2007)	■		■	■				■				■	25m
Cappabianca et al. (2008)	■							■				■	?
Delparte (2008)	■	■	■	■	■			■				■	25m/5m
Bühler et al. (2009)	■					■		■				■	25m
Barbolini (2009)	■			■				■				■	10m

Tab.2.b: Arbeiten in der Lawinenforschung im Zusammenhang mit dem Gelände

[1] Analyse des Zusammenhangs zwischen dem Gelände, den Schneeverhältnissen und der Lawinenaktivität,

[2] Modellierung von potentiellen Anrisszonen und Runout-Modellierungen

[3] Analyse von Unfalllawinen

2.2 Geomorphometrie

2.2.1 Definition des Forschungsbereiches

Geomorphometrie kann definiert werden als die Wissenschaft der quantitativen Beschreibung und Analyse der geometrisch-topologischen Charakteristiken der Erdoberfläche (Rasemann et al., 2004). Es ist ein interdisziplinäres Forschungsfeld, das im Schmelztiegel von Mathematik, Erdwissenschaften und Computerwissenschaften liegt (Pike et al., 2009). Früher war die Geomorphometrie, auch bekannt als Terrain Analysis (Wilson & Gallant, 2000) oder quantitative Geomorphologie, eine Subdisziplin der Geomorphologie. Heute wird sie als eigenständige Disziplin betrachtet (MacMillan & Shary, 2009).

Die Geomorphometrie hat eine lange Geschichte, schon Alexander von Humboldt (1816, 1825) verglich die mittlere Höhe von Kämmen und Berggipfeln von verschiedenen Hochalpinen Systemen (Rasemann et al., 2004). Im späten 20. Jahrhundert revolutionierten die rasanten technologischen Fortschritte das Forschungsfeld. Fortschritte in GIS und Fernerkundung haben der Geomorphometrie ermöglicht, in ein technisches Feld mit mächtigen analytischen Tools vorzustossen (Pike et al., 2009). Die Anwendungsfelder sind zu finden in der Biogeographie, Ozeanographie, Hydrologie, Raumfahrt, Naturgefahrenabschätzung und Unterhaltungsindustrie.

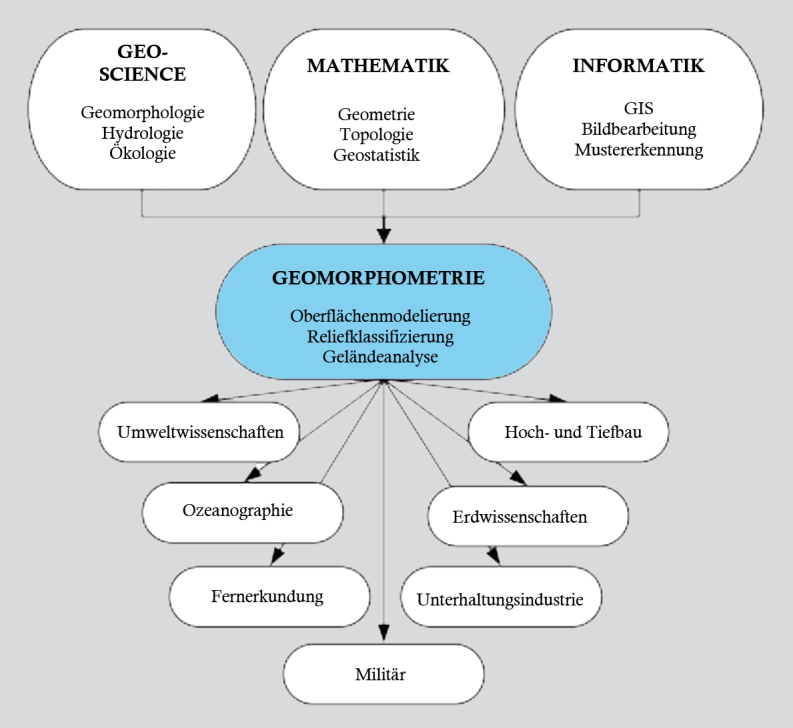


Abb.2.5: Kontext der Geomorphometrie
abgeändert nach Pike et al., 2009

Die moderne Geomorphometrie befasst sich unter anderem mit der Verfeinerung und dem Prozessieren von Höhendaten, der Auswirkung von Fehlern oder der räumlichen Auflösung auf Applikationen der Geländemodellierung und der Beschreibung und Visualisierung von Topografie (Pike et al. 2009).

2.2.2 Digitale Höhenmodelle (DHM)

Der Input für geomorphologische Analysen sind digitale Höhenmodelle (DHM). Dabei handelt es sich entweder um ein regelmässiges oder ein unregelmässiges Mosaik von Punktdaten, welche als Attribut den ungefähren Höhenwert der Erdoberfläche gespeichert haben (Hebeler & Purves 2009). Wenn man den Aufbau eines DHM betrachtet, können sie in zwei Gruppen unterteilt werden: rasterbasierte und vektorbasierte oder unregelmässige DHM (Weibel & Heller, 1991; Rana, 2004).

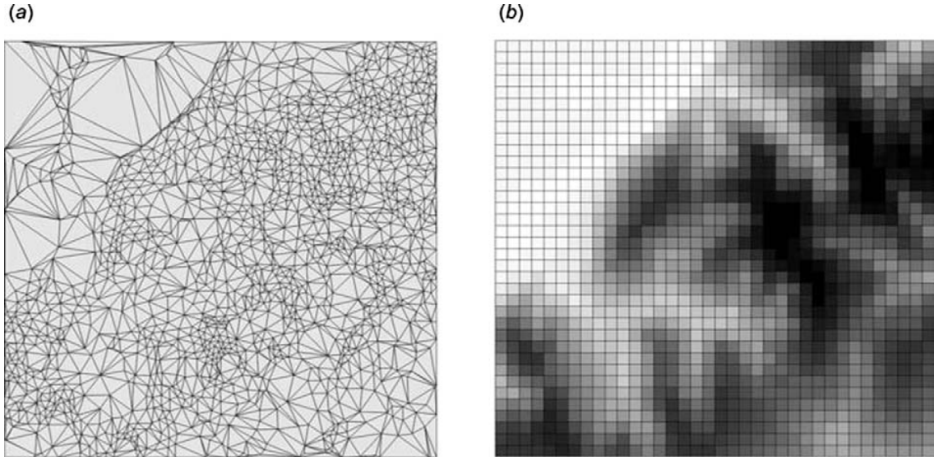


Abb.2.6: Zwei Typen von digitalen Höhenmodellen (Hengl & Evans, 2009)
a) unregelmässiges DHM, , b) rasterbasiertes DHM

In der Geomorphometrie ist das regelmässige, rasterbasierte DHM am gebräuchlichsten. Obwohl die Rasterstruktur nicht wenig Nachteile hat wie z.B. der grosser Speicherplatzbedarf, die Unter- oder Überrepräsentation in einer mannigfaltigen Landschaft und nicht anpassungsfähig ist an die Morphologie des Untersuchungsgebietes, ist die einfache Datenstruktur, welche über die Zellgrösse gesteuert werden kann, ein grosser Vorteil bei der Durchführung von morphologischen Operationen, da einfachere Algorithmen gebraucht werden können (Hengl & Evans, 2009).

Es existieren verschiedene Möglichkeiten, um an die Höheninformation zu gelangen, die es für ein DHM braucht. Die Höheninformation kann erfasst werden mit Hilfe der terrestrische Vermessung, Laser-, Radarmessungen oder dem Digitalisieren der Höheninformation auf topographischen Karten. Jede Methode beinhaltet seine spezifischen Fehlerquellen, verursacht durch die Datenerhebung oder die Datenverarbeitung (Rasemann et al., 2004; Hebeler & Purves, 2009). Die Fehler, welche in DHM vorhanden sind, können grob in folgende Gruppen klassiert werden: grobe Fehler, systematische Fehler und zufällige Fehler (Wise, 2000). Grobe Fehler können Artefakte sein, welche zum Beispiel durch Fehler in der Digitalisierung oder fehlende Ausrüstung entstanden sind. Sie sind visuell relativ leicht zu erkennen, lassen sich jedoch nicht durch Fehlermodelle beschreiben, da sie keinen Regeln gehorchen (z.B. fehlende Werte). Systematische Fehler zeigen einen gemeinsamen Trend oder eine Abhängigkeit, die durch eine spezifische Verarbeitungsmethode entstanden sind (z.B. Radarschatten, Terrassierung bei schlecht interpolierten Höhenlinien). Wenn die Limitationen bekannt sind, können systematische Fehler oft rechnerisch reduziert werden. Zufällige Fehler zeigen keinen allgemeinen Trend, sie sind verursacht durch eine endliche Präzision und nicht systematischen Abweichungen der Messungen vom wahren Wert.

2.2.3 Elementare Oberlächeneigenschaften

Die elementaren Oberflächeneigenschaften sind in der Regel die ersten Parameter, welche für geomorphologische Analysen aus einem DHM extrahiert werden. Sie sind wahrscheinlich auch die nützlichsten, denn sie stehen in direkter Abhängigkeit zu sehr vielen Prozessen in der Hydrologie, der der Geologie oder der Bodenkunde (Olaya, 2009). Sie können in verschiedene Gruppen unterteilt werden. Gebräuchlich ist die Unterteilung in primäre und sekundäre Parameter, je nach dem ob sie direkt aus dem DHM abgeleitet werden oder zusätzliche Prozessierungsschritte benötigen (Wilson & Gallant 2000). Eine andere Unterteilung ist diejenige nach der regionalen oder lokalen Ausdehnung der Geländeeigenschaft (vgl. Tab.2.c).

Eigenschaft	Ausdehnung	Beschreibung
Neigung	Lokal	steilstes Gefälle an einem Punkt
Exposition	Lokal	Ausrichtung des Hanges
Plankurvatur	Lokal	Wölbung in Richtung der Höhenlinien
Profilkurvatur	Lokal	Wölbung in Richtung des steilsten Gefälles
Einzugsgebiet	Regional	Gebiet mit einem gemeinsamen Wasserausfluss
Hypsometrie	Regional	Verteilung der Höhewerte
Einstrahlung	Regional / Lokal	Intensität der direkten Sonneneinstrahlung
sichtbares Gebiet	Regional	sichbarer Bereich von einem Punkt aus
Rauigkeit	Lokal	Oberflächenkomplexität

Tab.2.c: Elementare Oberflächeneigenschaften (abgeändert nach Olaya, 2009)

Oberflächeneigenschaften, welche von vielen Autoren im Zusammenhang mit der Lawinenformation als wichtig erachtet wurden (vgl. Kapitel 2.1.4), sind die Neigung, die Exposition, die Kurvatur und die Rauigkeit.

Die Neigung und die Exposition sind Eigenschaften, welche direkt aus der ersten partiellen Ableitung der Oberfläche hergeleitet werden können. Die Neigung wird definiert als das steilste Gefälle auf der Tangentialebene an einem Punkt auf der Geländeoberfläche (Burrough & McDonnell, 2005). Die Exposition ist die geographische Ausrichtung des steilsten Gefälles. Um die Hangneigung und Exposition aus einem gitterbasierten Geländemodell zu extrahieren, müssen die Ableitungen aus den Höhenwerten geschätzt werden. Es wurden verschiedene mathematische Modelle und Algorithmen entwickelt, welche für die Berechnung der Neigung und der Exposition verwendet werden können (z.B. Fleming & Hoffer, 1979; Horn, 1981; O'Callaghan & Mark, 1984; Zevenbergen & Thorne, 1987; Wood, 1996).

Die Kurvatur wird definiert als die Wölbung einer Oberfläche an einem bestimmten Punkt in eine bestimmte Richtung. Die Profilkurvatur oder vertikale Kurvatur beschreibt die Kurvatur in Richtung des steilsten Gefälles und die Plankurvatur oder tangentiale Kurvatur beschreibt sie in Richtung der Höhenlinien. Dieser Parameter kann dazu gebraucht werden, konkave und konvexe Ausprägungen des Geländes zu unterscheiden. Methoden für die Berechnung der Kurvaturen werden z.B. in Moore et al. (1991) oder Zevenbergen & Thorne (1987) vorgestellt.

Nicht geometrischer, sondern statistischer Natur ist der Parameter Rauigkeit. Es gibt verschiedene Konzepte und Methoden, wie die Rauigkeit gemessen werden soll. Die Einigkeit über die Methode ist nicht so gross wie z.B. für die Neigung oder die Exposition (Olaya, 2009). Häufig verwendet wurde die Variabilität der Höhe oder der Neigung. Hobson (1972) entwickelte eine vektorbasierte Methode, welche die Variabilität der

Neigung und der Exposition miteinander zum „Surface Roughness Factor“ kombiniert. Ansätze, die auf dieser Methode basieren, wurden bereits erfolgreich eingesetzt für die Quantifizierung der Geländerauigkeit für Habitatsanalysen (Sappington et al., 2007) und für die Detektion von Erdrutschen (McKean & Roering, 2004) .

2.2.4 Geländeformen

Nicht nur die klassische Ableitung von elementaren Geländeeigenschaften hat in der Geomorphometrie Tradition, sondern vor allem auch die Ableitung von Geländeformen oder die sogenannte Reliefklassifikation. Denn die Geländeformen unterscheiden sich hinsichtlich der physischen Prozesse, die zu ihrer Entstehung beigetragen haben und sie weiterhin prägen. Sie definieren somit die Grenzkonditionen für Prozesse in der Geomorphologie, Hydrologie, Ökologie oder der Bodenkunde (MacMillan & Shary 2009). Auch für die Lawinenformation sind einige Geländeformen von besonderem Interesse. So wurde z.B. die Kammdistanz schon in verschiedenen Arbeiten verwendet um potentielle Anrissgebiete zu definieren. Gemäss Harvey (2002) ereigneten sich Unfalllawinen in der Schweiz vielfach in Gelände mit mulden- oder runsenhaften Geländeformen.

Hammond (1954) war einer der ersten, der eine numerische Prozedur ausarbeitete, um Geländetypen aufgrund geometrischer Kriterien zu kartieren. Das Aufkommen von modernen Geotechnologien (Remote Sensing, GIS, GPS) hat der Geländeklassifikation nochmals einen methodologischen Auftrieb gebracht (Iwahashi & Pike, 2007). Schon unzählige Autoren haben seither Ansätze hervorgebracht um topographische Einheiten algorithmisch zu identifizieren (z.B. Dymond et al., 1995; Irvin et al., 1997; MacMillan et al., 2000; Iwahashi & Pike, 2007). Ihnen allen ist ähnlich, dass Geländetypen auf Basis von zunehmender Komplexität unterschieden werden. Einzelne Geländeformelemente (z.B. Mulde, Bergspitze, Gebirgskamm) fügen sich zu Landschaftstypen oder Geländeformtypen (z.B. Hügel, Ebene, Berge, Täler) zusammen und diese bilden wiederum Landschaftsräume/-systeme (Minar & Evans, 2008; MacMillan & Shary, 2009). Geländeformelement werden dabei konzeptualisiert als Ausschnitte der Geländeoberfläche, welche relativ homogen bezüglich den geomorphometrischen Eigenschaften wie Neigung, Oberflächenrauigkeit oder Profilkurvatur sind (Schmidt & Hewitt, 2004).

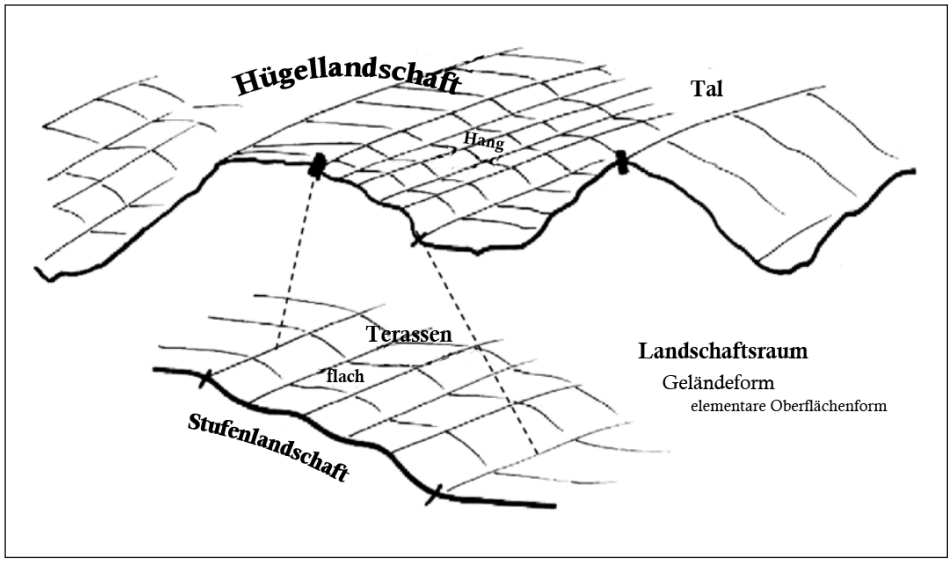


Abb.2.7: Reliefklassifikation (abgeändert nach Minar & Evans, 2008)

Es gibt jedoch keine allgemeingültige Definition von Geländeformen. Die lokale Geometrie spielt eine wichtige Rolle, wie auch der Massstab und der räumliche Kontext (Schmidt & Hewitt, 2004). So lassen sich je nach Auflösung, in welcher eine Landschaft betrachtet wird andere Geländeeinheiten identifizieren (Arrell et al., 2007), z.B. von einem Gletschertal über ein kleines Nebental bis zu einem Blockgletscher. Oder ein Kamm ist generell ein grösseres Formelement als eine Senke und ist erkennbar in einem anderen spezifischen räumlichen Ausschnitt. Das lässt sich auch auf das Konzept der fraktalen Dimensionen von Mandelbrot (1967) zurückführen und lässt sich in folgender Feststellung zusammenfassen: „ Was man siehst, hängt vor allem davon ab, aus welcher Nähe man es betrachtet“ (MacMillan & Shary, 2009). Da es keine klare räumliche Umgrenzung der Geländeeinheiten gibt, werden sie auch als „fuzzy Objects“ bezeichnet (Schmidt & Hewitt, 2004).

2.2.5 Datenqualität

Gemäss Burrough & McDonell (1998) lassen sich die Faktoren, welche die Qualität der Geodaten beeinflussen in fünf Kategorien unterteilen. Es sind dies (1) Allgemeine Faktoren, wie z.B. die Vollständigkeit und die Aktualität der Daten, (2) die Akkuranz und die Präzision der Daten, wie z.B. die Attributsgenauigkeit oder die Repräsentativität der Stichprobe, (3) Quellfehler, die durch das Datenmodell oder eine limitierte Aufnahmefähigkeit des verwendeten Sensors entstanden sind, und (4) Verarbeitungsfehler, die durch Interpolation, Generalisierung oder Klassifikationsmethoden eingeführt wurden. Von verschiedenen Autoren wurde bereits untersucht, inwiefern sich Fehler zwischen verschiedenen Aufnahmetechnologien unterscheiden (z.B. Davis et al., 2001; Baltasavias, 1999; Gong et al., 2000) und welchen Einfluss unterschiedliche Interpolationsmethoden auf die Fehlerverteilung im DHM haben (z.B. MacEachren & Davidson, 1987; Rees, 2000; Wise, 2000). Zudem wurde versucht, die Verteilung der Fehler mit verschiedenen Fehlermodellen zu modellieren und ihre Ausbreitung in aus den DHM abgeleiteten Produkten untersucht (z.B. Oksanen & Sarjakoski, 2005; Hebeler & Purves, 2009).

Ein wichtigeres Anliegen als die absolute Akkuranz der gemessenen Höhen im DHM ist für die Geomorphometrie die Akkuranz der Ergebnisse (Reuter et al., 2009). Die Qualität der abgeleiteten Geländeeigenschaften oder Geländeformen und den geomorphometrischen Applikationen im Allgemeinen hängt nicht nur von der Qualität des DHM ab, sondern auch von der verwendeten Auflösung, des verwendeten Algorithmus und des Betrachtungsgegenstandes (Reuter et al 2009). Verschiedene Autoren haben bereits untersucht, wie unterschiedliche Algorithmen die Ergebnisse beeinflussen (z.B. Moore, 1996; Burrough & McDonnell, 1998) und welchen Einfluss die verwendete Auflösung auf die Resultate hat (z.B. Chang & Tsai, 1991; Thompson et al., 2001; Shary et al., 2002).

Gemäss Fisher & Tate (2006) wird es in Zukunft vor allem wichtig sein abzuschätzen, welche Fehler kritisch sind für bestimmte Applikationen und für welche Auflösung diejenigen Oberflächeneigenschaften identifiziert und extrahiert werden können, die auch tatsächlich relevant sind für einen spezifischen Zweck (Schmidt & Andrew, 2005). Ein DHM sollte nicht zu grob, aber auch nicht zu genau sein für den Prozess, welcher beobachtet wird. Gemäss Hengl & Evans (2009) kann das Rauschen in den Daten die Resultate verfälschen, wenn die Zellgrösse feiner als die vertikale Akkuranz ist und bei zu grober Auflösung wird die Geländeoberfläche zu fest generalisiert (vgl. Abb.2.8). Darum ist es auch wichtig, ein DHM anfänglich vorzuprozessieren und diejenige Fehlergenauigkeit und Auflösung herzustellen, welche für eine spezifische Anwendung gebraucht wird (Reuter et al., 2009).

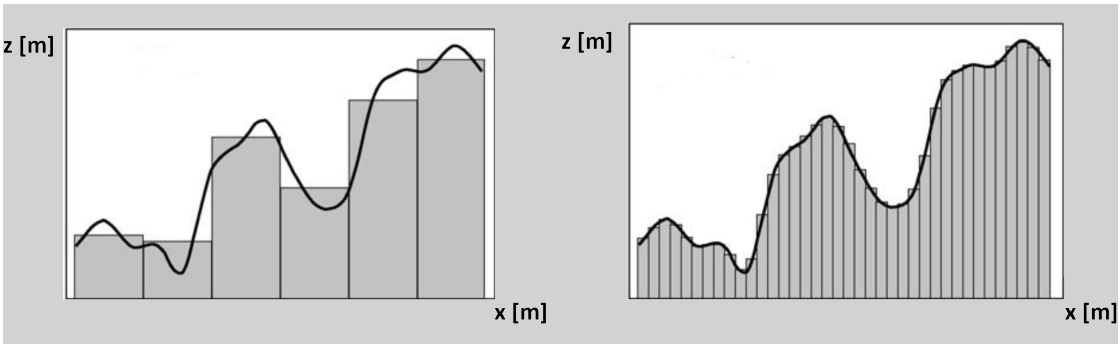


Abb.2.8: Einfluss der Auflösung auf die Geländedarstellung (abgeändert nach Hengl & Evans, 2009)

2.3 Forschungslücken

Lawinen wurden bereits intensiv erforscht, doch standen Unfalllawinen, die heutzutage im Alpenraum am meisten Todesopfer fordern, bis jetzt selten im Zentrum von quantitativen Untersuchungen mittels numerischer Methoden. Vor allem in den Anrissgebieten, in welchen der Auslöseprozess der Schneebrettlawinen stattfindet, könnte es interessant sein, mehr über die vorherrschenden Geländeeigenschaften und ihre räumliche Verteilung zu wissen. Bis jetzt ist darüber noch relativ wenig bekannt (Harvey & Zweifel, 2008), obwohl das Gelände zu einem der Hauptfaktoren gehört, welche zur Lawinenformation beitragen (Schweizer et al., 2003) und in der Lawinenkunde einen wichtigen Stellenwert besitzt (Munter, 2003).

Aus der Geomorphometrie ist bekannt, dass die Qualität der DHM, die verwendete Auflösung und Algorithmen unmittelbaren Einfluss auf die abgeleiteten Parameter haben können. Gemäss Fisher & Tate (2006) wird es in Zukunft vor allem wichtig sein zu erfahren, welche Eigenschaften der DHM relevant sind für eine spezifische Fragestellung. In der Lawinenforschung wurde diesem Thema bis jetzt wenig Beachtung geschenkt. Doch mit dem Wunsch nach höher aufgelösten DHM für die Lawinenforschung (Ghinoi & Chung, 2005), sollte auch untersucht werden, inwiefern eine höhere Auflösung für die Lawinenforschung relevant ist und nützlich sein kann.

In diese Forschungslücke fügt sich die hier verfasste Arbeit ein. Mithilfe von verorteten Unfalllawinen der letzten 10 Jahre in der Schweiz und zwei verschiedener DHM mit unterschiedlicher Auflösung, sollen folgende Fragestellungen beantwortet werden:

(1) Welche Geländeeigenschaften weisen Unfalllawinen und deren Anrissbereiche auf?

(2) Wie ist die Verteilung der Hangneigung und der Geländeformen in den Anrissbereichen?

(3) Wie ist der Zusammenhang zwischen Hangneigung und Geländeform?

(4) Gibt es Zusammenhänge zwischen Geländeeigenschaften und der Anrissmächtigkeit?

(5) Welchen Einfluss haben die Eigenschaften der verwendeten DHM auf die Bestimmbarkeit von lawinenrelevanten Geländeeigenschaften?

„Für das grosse Chaos haben wir Computer. Die übrigen Fehler machen wir von Hand.“

Unbekannt

Kapitel 3
Daten, Untersuchungsgebiet und Software

3.1 Datengrundlage

Für die Analyse der Geländeeigenschaften von Unfalllawinen mittels Geomorphometrie wurden einerseits Daten zur Lage und Ausdehnung von Lawinenereignissen benötigt, andererseits digitale Höhenmodelle und topografische Karten und Landschaftsmodelle zur Orientierungshilfe und Visualisierung der Landschaft.

3.1.1 Lawinenfotos und Lawinenumrisse

Im Jahre 1998 wurde vom SLF im Rahmen des Nationalfond Projektes 31 („Klimaänderungen und Naturkatastrophen“) eine Schadenslawinendatenbank initiiert und seither kontinuierlich aufgebaut. Heute sind darin alle bekannt gewordenen Lawinen mit Personen- oder Sachschaden der Schweiz seit 1970 enthalten. Für diese Arbeit konnte ein Auszug aus dieser Datenbank für Unfalllawinen aus den Winter 1999/2000 bis 2009/2010 genutzt werden.

Lawinenumrisse

Für die Winter 1999/2000 bis 2009/2010 waren 579 verortete Lawinenumrisse aus dem Auszug der SLDB vorhanden. Diese wurden vom SLF anhand von Fotos oder Berichten auf der LK25 digitalisiert und können als .shp-Datei aus der Datenbank exportiert werden. Jeder Lawinenumriss besitzt als Attribut eine Lawinennummer, das Datum des Ereignisses, den Winter (z.B. 1999/00), den Gemeindename und einen Lokalnamen. Folgende Attribute sind ebenfalls für viele, jedoch nicht alle Lawinenumrisse vorhanden: Auslöseart, Breite, Länge, Exposition, maximale Anrissmächtigkeit, mittlere Anrissmächtigkeit, minimale Anrissmächtigkeit, Kommentar zur Anrissmächtigkeit und Informationen dazu, ob die Lawine durch eine Person ausgelöst wurde (Skifahrerlawine: ja oder nein).

In Abbildung 3.1 ist die zeitliche Verteilung und die Häufigkeit der verschiedenen Auslösearten der vorhandenen Lawinen ersichtlich. Im Gesamten wurden 435 Lawinen der 579 durch Personen ausgelöst, 70 Lawinen hatten einen natürlichen Auslöser, 14 wurden gesprengt oder durch Pistenfahrzeuge verursacht und bei 60 Lawinen ist der Auslöser unsicher oder es sind keine Angaben darüber vorhanden. Am meisten Lawinen wurden im Winter 2002/2003 gemeldet, davon wurde jedoch ein grosser Teil natürlich ausgelöst. Die meisten Lawinen, die durch Personen ausgelöst wurden, sind in den Winter 2004/2005 und 2005/2006 zu verzeichnen.

Die räumliche Verteilung ist in Abbildung 3.4 grafisch dargestellt. Die Lawinen sind über den ganzen Alpenraum der Schweiz verteilt. Nur eine einzelne Lawine wurde im Jura gemeldet. Eine Häufung von Lawinen ist in der Region Davos ersichtlich. Dies kann damit erklärt werden, dass das SLF, welches in Davos ihren Standort hat, über fast alle Lawinenereignissen informiert wird in der Region. Für andere Regionen werden Lawinenereignisse, welche nicht verheerend waren, nicht immer dem Institut gemeldet.

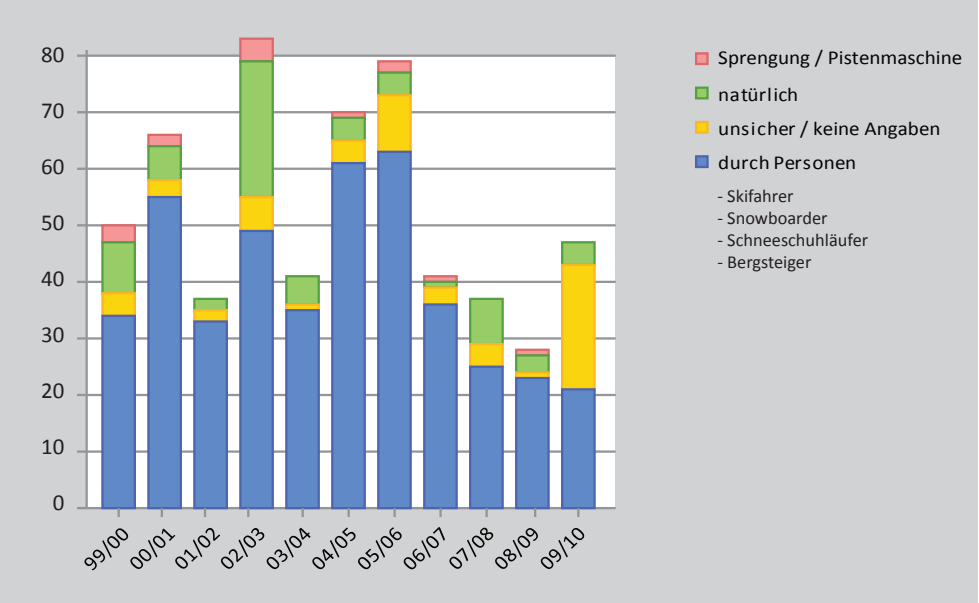


Abb.3.1: Schadenslawinen nach Auslöseart und Winter (N=579)

Lawinenfotos

Für die Winter 1999/2000 bis 2009/2010 standen zudem Fotos von 451 Lawinenereignissen aus dem Fotoarchiv des SLF zur Verfügung. Die Fotos wurden von Rettungskräften oder Augenzeugen innerhalb kurzer Zeit nach dem Niedergang der Lawine geschossen. Sie wurden in dieser Arbeit genutzt, um die Anrissgebiete abzugrenzen und somit eine neue Datengrundlage für ihre Auswertung zu erschaffen. Nicht alle Fotos waren gleich nützlich und brauchbar für die Digitalisierung der Anrissgebiete, da je nach Wetterlage, Perspektive, Standort (z.B. Waldgebiete) und Exposition (z.B. Schattenwurf) die Sicht auf die Anrissgebiete ungenügend war. Anhand der Fotos konnten die Anrissgebiete von 142 Lawinen digitalisiert werden.

3.1.2 Digitale Höhenmodelle (DHM)

Für die Auswertung des Geländes der Unfalllawinen und für das Abschätzen des Einflusses der Eigenschaften von verwendeten DHM auf die Resultate konnten folgende Höhenmodelle verwendet werden:

DHM25 (Level 2)
Das DHM25 ist ein Produkt der swisstopo, dem Bundesamt für Landestopografie, und wurde aus der Höheninformation der Landeskarte 1:25'000 (LK25) abgeleitet und basiert im Wesentlichen auf deren Genauigkeit. Das Matrixmodell, wie es in dieser Arbeit verwendet wurde, wurde durch Interpolation aus dem Basismodell abgeleitet und besitzt eine räumliche Auflösung von 25 m. Der Nachführungsstand entspricht demjenigen der Ersterfassung mit Ausnahme der Gletschergebiete, welche gemäss dem seit Winter 2000/2001 verfügbaren Kartenstand nachgeführt sind. Die mittlere Abweichung der Höhe wird in den Alpen auf 3 - 8 m geschätzt (swisstopo, 2005).

ADS-DOM
Die eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) leitet momentan die Produktion eines flächendeckenden hochaufgelösten digitalen Oberflächenmodells für die Schweiz. Es handelt sich dabei um ein hochaufgelöstes Höhenmodell, welches durch photogrammetrische Bildkorrelation aus digitalen Luftbildern entsteht. Für diese Arbeit konnten einige Kacheln, der noch nicht fertig vorprozessierten Daten, für drei Gebiete in der Schweiz verwendet werden. Die Luftbilder stammen von ADS40/80 Überflügen der swisstopo aus den Jahren 2007 und 2009. Die ADS40/80 ist ein opto-elektronischer Scanner, der Luftbilder aus verschiedenen Aufnahmewinkeln macht. Die Kacheln waren in einer räumlichen Auflösung von einem Meter vorhanden. Da die Daten jedoch eine falsche Rauigkeit aufweisen und zum Teil grobe Fehler enthalten (z.B. wegen Wolken), mussten sie vorprozessiert werden (siehe Kapitel 4.2). Für die Extraktion der lawinenrelevanten Geländeeigenschaften wurden die Daten auf 2 m oder 10 m herunter skaliert.

In den Gebieten, welche mittels des hochaufgelösten Oberflächenmodells der WSL untersucht werden konnten, sind 123 Lawinenumrisse und 55 digitalisierte Anrissgebiete vorhanden (vgl. Abb.3.4). Die meisten davon (112 von 123) wurden von Personen aufgelöst.

3.1.3 Topografische Karten

Als Hilfe bei der Digitalisierung und der Extraktion der Geländeeigenschaften und auch für Visualisierungszwecke wurde die digitale Landeskarte (PK25) und das digitale Landschaftsmodell (VECTOR25) von der swisstopo verwendet.

Pixelkarte (PK25)
Die Pixelkarten sind die digitalen Landeskarten im Rasterformat und werden direkt aus den digital hergestellten Kartengrundlagen abgeleitet. In dieser Arbeit wurde die Pixelkarten im Massstab 1:25'000 verwendet, um darauf die Lawinenumrisse zu digitalisieren. Die Lagegenauigkeit der Pixelkarte entspricht der Kartengenauigkeit der Landeskarte 1:25'000 (LK25) und liegt innerhalb eines Toleranzbandes von 3 - 8m (swisstopo, 2010).

Vektorkarte (VECTOR25, Release 2008)
Beim Datensatz VECTOR25 handelt es sich um das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Dieses gibt die natürlichen und künstlichen Objekte der Landschaft im flexiblen Vektorformat wider. Es besteht aus neun thematischen Ebenen: Strassennetz, Eisenbahnnetz, übriger Verkehr, Gewässernetz, Primärflächen,

Gebäude, Hecken und Bäume, Anlagen, Einzelobjekte. Für diese Arbeit wurden aus der Ebene Primärflächen die Objektarten Gletscher, Geröll auf Gletscher und Wald verwendet. Die Lagegenauigkeit der Objekte entspricht der Kartengenauigkeit der Landeskarte 1:25‘000 (LK25) und liegt innerhalb eines Toleranzbandes von 3 - 8 m (swisstopo, 2007).

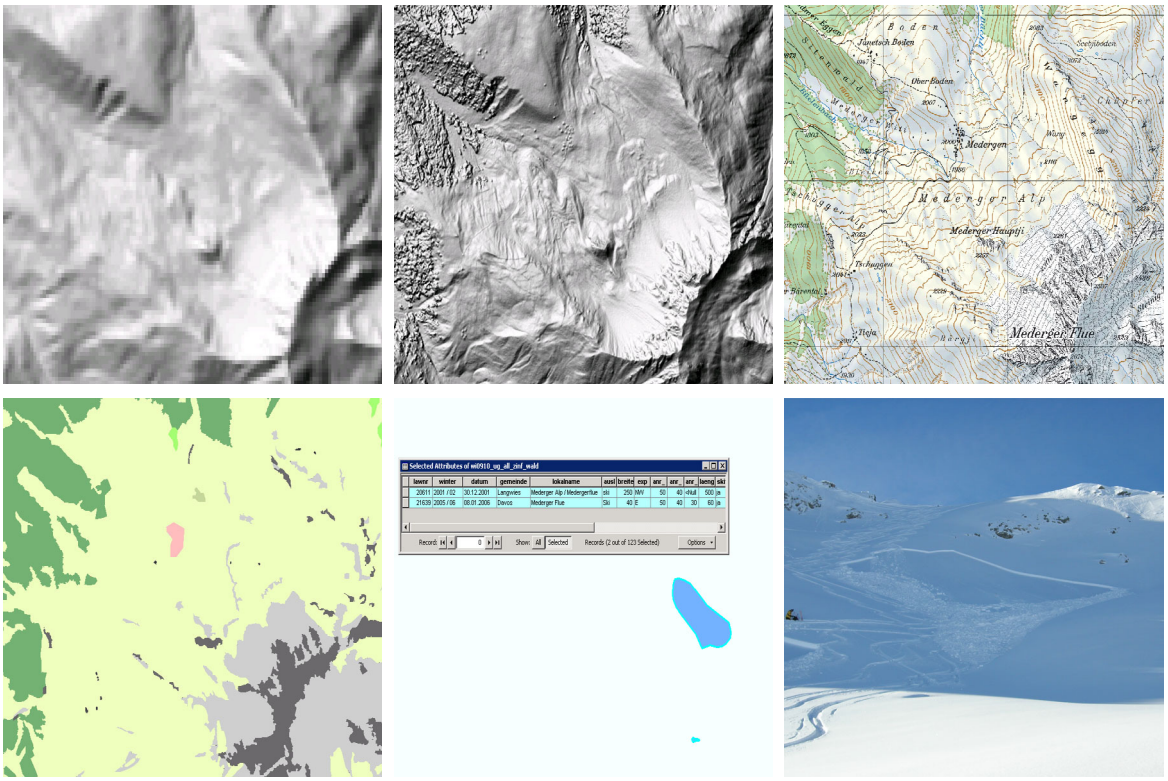


Abb.3.2: Überblick über die Datengrundlage
v.o.l.n.u.r.: DHM25, ADS-DOM, LK25, VECTOR25, Unfalllawinen Umrisse und Attribute, Fotos

3.2 Untersuchungsgebiet

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Gelände von Unfalllawinen der ganzen Schweiz einerseits mittels einer 25 m Auflösung (DHM25) untersucht, andererseits mittels einer Auflösung von 2 m oder 10 m (ADS-DOM) für drei Untersuchungsgebiete in den Bündner und Walliser Alpen.

Das Schweizer Alpengebiet hat eine Gesamtausdehnung von etwa 225 km Länge (SW-NO) und 100 km Breite (NW-SO) und weist eine relativ komplizierte orographische Gliederung auf (Burga et al., 2004). Diese bedingt vielfältige kleinräumige Unterschiede in den Wetterbedingungen und damit auch in der Lawinengefahr. Um die Lawinengefahr in der Schweiz in den Vorhersage zu beschreiben, werden vom SLF, der aktuellen Lage entsprechend verschiedene kleine Teilregionen der Schweiz zusammengefasst und möglichst gebräuchliche Regionsausdrücke verwendet.

Die Untersuchungsgebiete im Unter- und Oberwallis gehören teilweise den inneralpinen Gebieten an, teilweise dem westlichen Alpenhauptkamm. Das Untersuchungsgebiet in Graubünden rund um Davos gehört der politisch-geographischen Region des Nord- oder Mittelbünden an und liegt inneralpin (vgl. Abb.3.3).

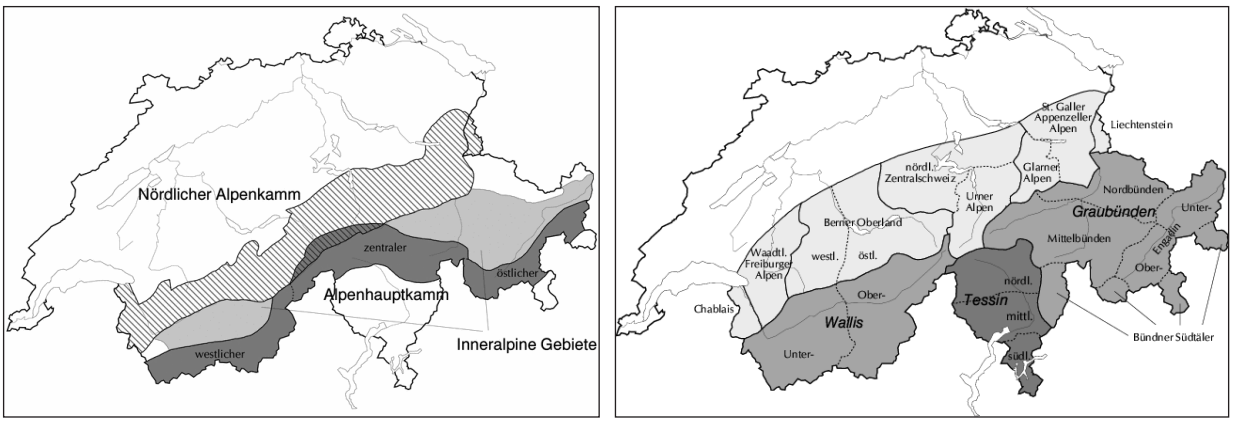


Abb.3.3: Gliederung der Gebirgsregion der Schweiz (SLF, 2011c)
links: Abgrenzung des Alpenhauptkamms, sowie der Inneralpinen Gebiete
rechts: politisch-geographische Gliederung der Schweizer Alpen

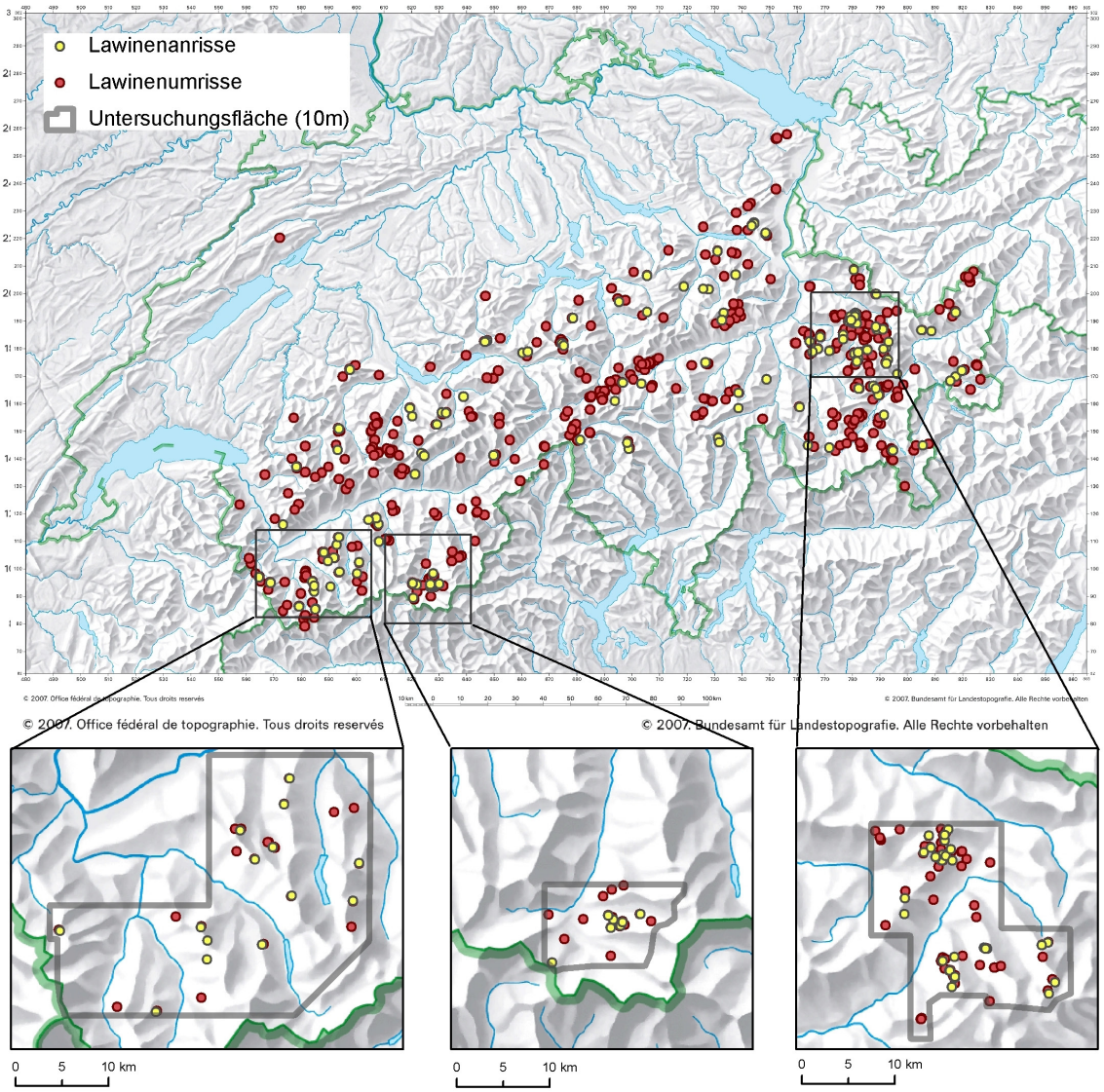


Abb.3.4: Räumliche Verteilung der untersuchten Unfalllawinen und Untersuchungsgebiete

3.3 Software

Für die Analyse von grossen Datenmengen und die Bearbeitung digitaler räumlicher Daten werden mächtige Werkzeuge benötigt. Geographische Informationssysteme (GIS) bieten eine grosse Anzahl an Tools, um räumliche Daten zu verwalten und zu analysieren. Statistikprogramme vereinfachen die Auswertung der Datensätze.

Folgende Software Produkte wurden für diese Arbeit verwendet:

ArcGIS

Eines der bekanntesten kommerziellen GIS Produkte ist ArcGIS der Firma Esri. In dieser Arbeit wurde die Version ArcGIS 9.3.1 und ArcGIS 10 verwendet, um die räumlichen Daten zu verwalten und die topographischen Charakteristiken aus den Höhenmodellen zu extrahieren, sowie die Resultate zu visualisieren. Ergänzend zu den üblichen GIS Werkzeugen wurde ArcPy für erweiterte Analysen und das Automatisieren der Berechnungen eingesetzt.

SPSS

Für die statistische Auswertung der Resultate wurde das Statistikprogramm PASW Statistics 18 der Firma IBM (vormals SPSS Inc.) verwendet. Es handelt sich dabei ebenfalls um ein kommerzielles Produkt und ermöglicht umfangreiche statistische und grafische Datenanalysen.

Mondrian

Mondrian ist ein frei erhältliches Produk t für die interaktive Visualisierung von statistischen Daten (Mondrian, 2011). Dieses Produkt wurde für die explorative Analyse und Darstellung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Resultaten genutzt.

„Knowing where things are, and why, is essential to rational decision making"
(Jack Dangermond (ESRI))

Kapitel 4
Methodik

In folgendem Fliessdiagramm (Abb.4.1) ist das methodische Vorgehen schematisch abgebildet. Es kann in vier Teilschritte unterteilt werden. Diese werden gleichzeitig als Gliederung dieses Kapitels verwendet.

Um eine Auswertung der Anrissgebiete der Unfalllawinen zu ermöglichen, wurden diese anhand von Fotos digitalisiert. In einem ersten Unterkapitel (4.1) wird erläutert, wie die Digitalisierung anhand der Fotos gehandhabt wurde und wie die Anrissgebiete danach in verschiedene Zonen unterteilt wurden, um die räumliche Verteilung der Geländeeigenschaften zu untersuchen. Es wurden zwei verschiedene Höhenmodelle mit unterschiedlicher räumlicher Auflösung verwendet, um die Eigenschaften des Geländes zu analysieren. Somit konnten die Resultate schliesslich untereinander verglichen und der Einfluss der Eigenschaften des Höhenmodells abgeschätzt werden. Für das hochaufgelöste Höhenmodell war eine Vorprozessierung nötig, bevor es für die geomorphometrischen Analysen gebraucht werden konnte. Diese wird im Unterkapitel 4.2 vorgestellt. Für die Beschreibung des Geländes und der Lage der Unfalllawinen wurden fünf verschiedene Geländeeigenschaften und ein Geländeobjekt ausgewählt, die geomorphometrisch aus den Höhenmodellen extrahiert wurden. Die Methoden, welche dafür verwendet wurden, sind im Unterkapitel 4.3 zu finden. Als vierter und wohl zeitintensivster Teilschritt folgte die zonale und statistische Auswertung der Geländeeigenschaften in den Umrissen und verschiedenen Zonen der Anrisse der Unfalllawinen (vgl. Unterkapitel 4.4).

Das Vorgehen ist nicht streng chronologisch zu sehen. Manchmal erforderten Ergebnisse einen iterativen Prozess und hatten Einfluss auf die Wahl der schliesslich verwendeten Methode.

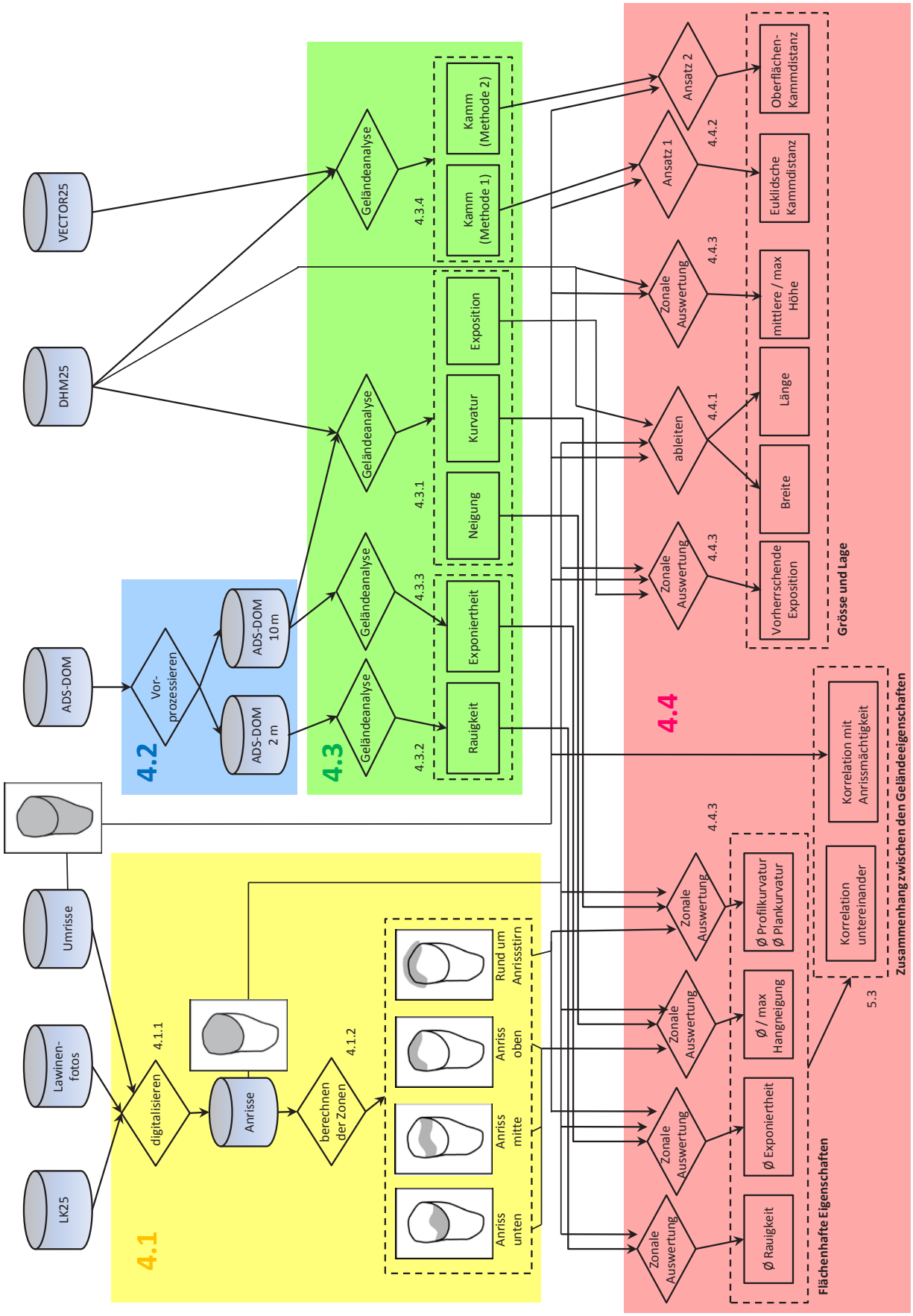


Abb.4.1: Schematische Darstellung des methodischen Vorgehens

4.1 Erstellen der Lawinenzonen

4.1.1 Digitalisieren der Anrissgebiete

Damit es möglich wurde, die Anrissgebiete automatisiert hinsichtlich deren Geländeeigenschaften zu untersuchen, mussten sie selber erst noch digitalisiert werden. Als Quelle dienten Fotos der Unfalllawinen und die bereits vorhandenen Lawinenumrisse. Anhand der Fotos konnten Anrissgebiete ausgeschieden, im Foto eingezeichnet und auf der LK25 auf den schon vorhandenen Lawinenumrissen im GIS eingezeichnet werden. Die LK25 eignet sich als Basiskarte besonders gut, da die wichtigsten Erkennungsmerkmale auf den Fotos, wie Felsen und die Neigung, auf der Landeskarte eingezeichnet sind. Trotzdem brauchte es ein gewisses Mass an räumlichem Vorstellungs- und Abstraktionsvermögen, um die Lage der Anrisse vom dreidimensionalen Raum der Fotos auf den zweidimensionalen Raum der Landeskarte zu übertragen. Bei sehr kleinen Lawinen wurde darauf vertraut, dass der Umriss ungefähr stimmt und die Anrisszone proportionengemäss übertragen, da weder auf den Fotos noch auf der Landeskarte die Lage der Lawine genau lokalisiert werden konnte.

Nicht auf allen Fotos waren die Anrissbereiche so gut zu erkennen, wie in Abb.4.2. Eine Durchsicht durch alle Fotos aus dem Archiv ergab eine Liste mit drei Abstufungen: 1 = gut ersichtlich, 2 = knapp (z.B. Anrisszone stellenweise sichtbar, jedoch keine Sicht auf gesamte Zone), 3 = ungenügend (z.B. sehr schlechte Sicht oder Teilstücke verdeckt durch Gelände), 0 = unbrauchbar (z.B. keine Fotos oder keine Bilder der Anrisszone). Für die Digitalisierung wurden nur diejenigen Lawinen berücksichtigt, welche als 1 klassifiziert wurden. So konnten schlussendlich 143 Anrisszonen aus den Wintern 1999/2000 bis 2009/2010 digitalisiert werden.

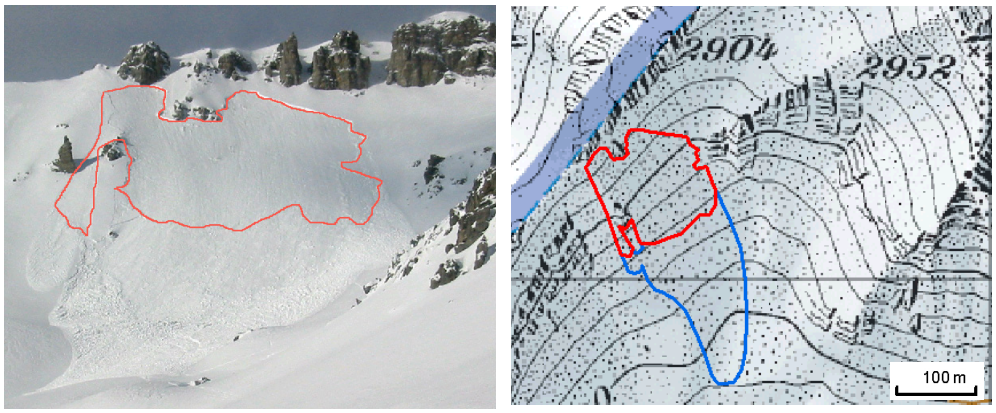


Abb.4.2: Prozess des Abgrenzens und Digitalisierens der Anrissgebiete
links: Foto mit Abgrenzung der Anrissfläche (Quelle Foto: Fotoarchiv SLF)
rechts: digitalisiertes Anrissgebiet (rot) auf dem Lawinenumriss (blau)

4.1.2 Berechnung von verschiedenen Zonen im Anrissgebiet

Um die Verteilung der Geländeeigenschaften innerhalb der Anrissgebiete genauer zu untersuchen, wurde das Anrissgebiet in verschiedene Zonen unterteilt. So konnten schliesslich die Zonen separat ausgewertet und verglichen werden. Um die Zonierung automatisch durchzuführen, musste zuerst festgestellt werden, wo die Anrissstirn der Lawine liegt. Dafür wurde eine Fliessakkumulation mittels einer räumlichen Auflösung von zwei Metern innerhalb der Anrissgebiete berechnet, gefiltert und reklassiert (vgl. Abb.4.3 oben). Danach

wurden mit Hilfe eines Puffers vier verschiedene Unterteilungen der Anrissgebiete vorgenommen (vgl. Abb.4.3 unten). In diesen Zonen konnten zu einem späteren Zeitpunkt verschiedene Geländeeigenschaften zonal ausgewertet werden.

Rund um Anrissstirn:	Zone von durchschnittlich 30 m rund um die Anrissstirn herum, 15 m innerhalb das Anrissgebietes und 15 m hangaufwärts
Anriss oben:	Zone der ersten 15 m unterhalb der Anrissstirn
Anriss mitte:	Zone der nächsten 30 m hangabwärts, anschliessend an die Zone „Anriss oben“
Anriss unten:	Für Lawinen, welche länger als 45 m waren, ergab sich noch eine vierte Zone mit dem verbleibenden Geländeanteil unterhalb der Zone „Anriss mitte“

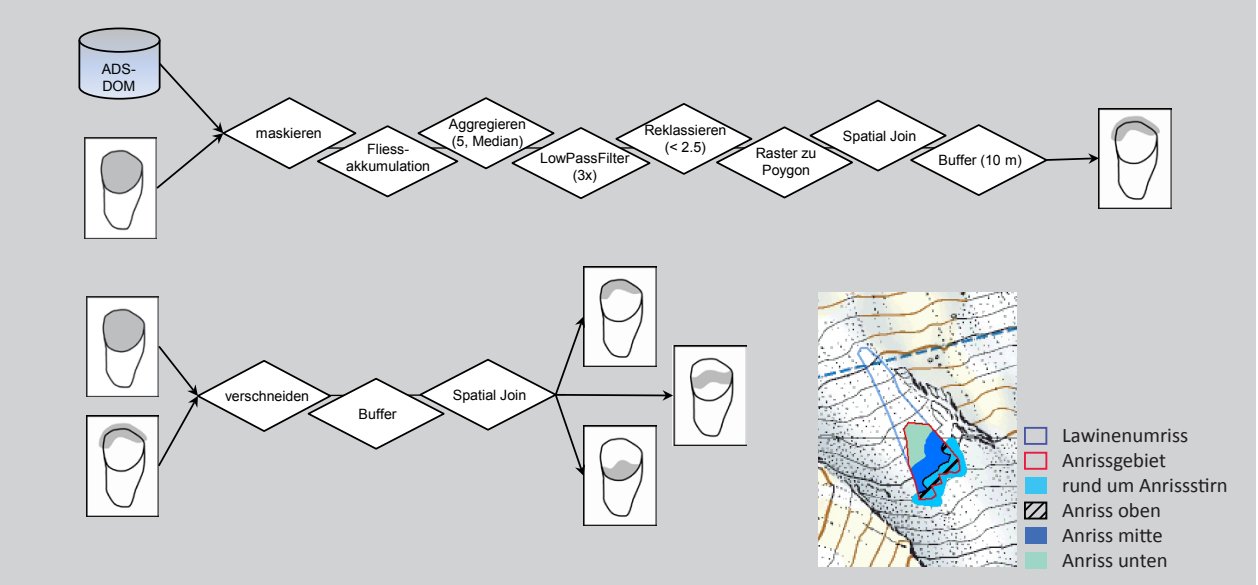


Abb.4.3: Schematische Darstellung des Vorgehens für die Zonierung der Anrissgebiete
oben: Berechnung der Zone Rund um Anrissstirn
unten: Berechnung der Zonen: Anriss oben, Anriss mitte, Anriss unten

4.2 Aufbereitung der digitalen Höhenmodelle

Als Input für die Geländeanalyse standen einerseits Kacheln des DHM25 und andererseits Kacheln des digitalen Oberflächenmodells (ADS-DOM) der WSL zur Verfügung. Die Kacheln des DHM25 wurden bereits vorprozessiert, mosaikartig zusammengeführt und als Raster in einer FileGeoDatabase gespeichert. Sie konnten ohne spezielle Vorprozessierungen für die Analysen gebraucht werden. Die Kacheln des ADS-DOM lagen noch unkorrigiert und als einzelne Kacheln im Rasterdatenformat .tif vor. Sie benötigten eine Vorprozessierung, bevor sie für die geomorphometrischen Analysen gebraucht werden konnten. Die hier durchgeführte Vorprozessierung ist angelehnt an den Arbeitsprozess, der von Reuter et al. (2009) beschrieben wurde. Zu Beginn wurden die Kacheln auf eine 2 m und 10 m Auflösung herauf skaliert, da eine Auflösung von 1m für die Analyse der Lawinen zu genau ist. Die systematische Rauigkeit, welche sich aufgrund der Erhebungsmethode ergibt, wurde mittels viermaligen anwenden eines LowPassFilters[1] entfernt und grobe Fehler ausmaskiert. Die Wald- und Siedlungsflächen, welche auf dem Geländemodell ersichtlich sind, wurden nicht herausgefiltert, da sich der Grossteil der Lawinen ausserhalb der Siedlungsflächen und Waldgebiete

[1] Beim LowPass Filtering mit einem 3x3 Window, wird der mittleren Zelle der durchschnittliche Wert aller 9 Zellen zugeordnet. Extreme Datenwerte werden dadurch ausgeglichen und ein geglättetes Bild entsteht (Burrough & McDonnell, 2005).

ereigneten. Die vereinzelten Lawinen, welche in Waldgebieten niedergingen, wurden für die Analyse der Hangneigung, der Exposition und der Kurvatur weggelassen.

Die durch die Maskierung entstandenen NULL-Werte wurden nicht durch ein niedriger aufgelöstes DHM ersetzt, da dies den Vergleich der Resultate mit dem DHM25 verfälscht hätte. Einzelne Lawinen fielen aufgrund der so entstandenen „Löcher" im Höhenmodell aus. Trotzdem blieben nach der Vorprozessierung noch insgesamt 123 Lawinenumrisse und 53 Anrisse bestehen, welche für die Geländeanalyse mit dem höher aufgelösten Inputmodell gebraucht werden konnten.

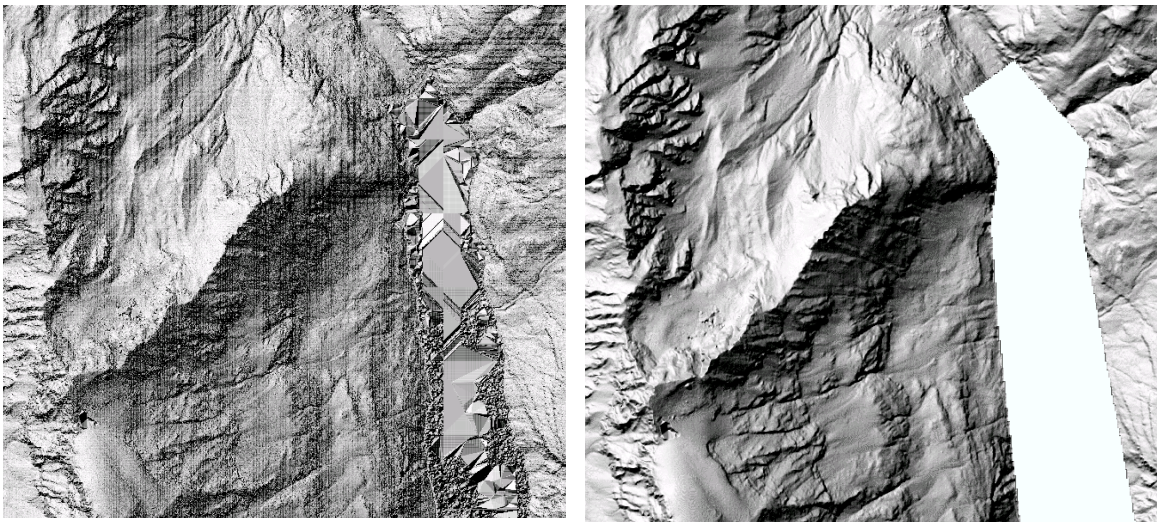


Abb.4.4: Vergleich des ADS-DOM (2m) vor (links) und nach (rechts) der Aufbereitung
Grobe Fehler wurden ausmaskiert, systemmatische Fehler mittels Filter korrigiert.

4.3 Geländeanalyse

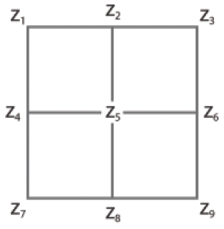
Folgende Geländeeigenschaften und Geländeobjekte wurden für die weitere Auswertung in den Lawinenzonen aus den digitalen Höhenmodellen abgeleitet: Neigung, Exposition, Kurvatur, Rauigkeit, Exponiertheit und die Kämme. Die ersten vier Geländeeigenschaften und die Kämme wurden auch schon in anderen Arbeiten im Zusammenhang mit Lawinen verwendet (vgl. Tab.2.b). Neu ist der Parameter der topographischen Exponiertheit, der beschreiben soll, wie ausgesetzt eine Stelle im Gelände ist. Nachfolgend werden die verwendeten Methoden, Schwellenwerte und Auflösungen für die Extraktion der einzelnen Parameter vorgestellt.

4.3.1 Neigung – Exposition – Kurvatur

Die Geländeeigenschaften Neigung, Exposition, Kurvatur und Geländeform wurden sowohl auf dem DHM25 mittels 25 m Auflösung als auch auf dem ADS-DOM mittels einer 10 m Auflösung berechnet. Es handelt sich dabei um bekannte und gebräuchliche Methoden, welche auch schon in anderen Arbeiten in der Lawinenforschung verwendet wurden (z.B. Maggioni, 2004, Delparte, 2008).

Neigung

Um eine Neigungskarte zu erhalten, wurde die Methode von Horn (1981) verwendet, die standartmässig in ArcGIS (Werkezug „Slope") implementiert ist. Dabei wird für jede Zelle des Höhenmodells die Neigung mittels „finiten Differenzen" aus ihren acht nächsten Nachbarn in einer 3x3 Nachbarschaft berechnet.



$$\frac{dz}{dx} = \frac{(z_3 - z_1) + 2(z_6 - z_4) + (z_9 - z_7)}{8\Delta x}$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(z_9 - z_3) + 2(z_8 - z_2) + (z_7 - z_1)}{8\Delta x}$$

$$Neigung = arctan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2}$$

Abb.4.5: Berechnung der Neigung in einer 3x3 Nachbarschaft (nach Horn, 1981)

Exposition

Ebenfalls wurde die Methode von Horn (1981) verwendet um die Expositionen zu extrahieren (ArcGIS Werkzeug „Aspect"). Für die weiteren Analysen wurde die Exposition in die 9 Klassen N, NO, O, SO, S, SW, W, NW und flach unterteilt.

$$Exposition = arctan\left(\frac{b}{a}\right)^2 \qquad a = \left(\frac{dz}{dx}\right)^2 \quad b = \left(\frac{dz}{dy}\right)^2$$

Kurvatur

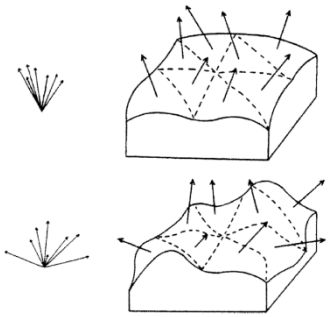
Die verwendete Methode zur Berechnung der Profil- und Plankurvatur ist diejenige von Zevenbergen & Thorne (1987) und ist ebenfalls in ArcGIS standartmässig implementiert (Werkzeug „Curvature"). Sie gebraucht ein lokales Polynom vierter Ordnung mit neun Parametern, das durch alle neun Punkte in einer 3x3 Nachbarschaft des Zentralpunktes geht. Die Werte für die Profilkurvatur sind positiv bei Konkavität und negativ bei Konvexität. Die Werte für die Plankurvatur sind positiv bei Konvexität und negativ bei Konkavität (Esri Webhelp 9.3.1).

4.3.2 Rauigkeit

Die Geländeeigenschaft der Rauigkeit wurde in der Lawinenforschung bisher meistens mittels Fernerkundungsmethoden (z.B. Ghinoi & Chung, 2005, Bühler et al., 2009) oder Feldmessungen (z.B. McClung, 2001) ausgewertet. Um die Rauigkeit der Geländeoberfläche mittels geomorphometrischer Methoden abzuschätzen, wurde in dieser Arbeit der Ansatz von Sappington et al. (2007) verwendet, der auf der Methode von Hobson (1972) gründet. Dieser Ansatz ist vor allem bei einheitlich geneigten Flächen besser geeignet als beispielsweise die Standartabweichung der Neigung, da nicht nur der Neigungswinkel, sondern auch die Veränderung in der Exposition für die Geländerauigkeit berücksichtigt wird (McKean & Roering, 2004). Zudem hat Wiss (2009) gezeigt, dass auch in steilen Flanken noch Rauigkeitswerte erhalten werden können, welche von der Neigung unabhängig sind. Die Geländerauigkeit wurde für eine räumliche Auflösung von 2m berechnet. Damit lassen sich bereits kleine Unebenheiten auf der Geländeoberfläche erkennen (vgl. Abb.4.7). Die Gefahr, die systematische Rauigkeit innerhalb der Daten abzubilden, würde sich mit einer noch höheren Auflösung nochmals vergrössern.

Der vektorbasierte Ansatz von Hobson (1972) kombiniert die Variabilität der Neigung und der Exposition zum „Surface Roughness Factor". Es werden Vektoren konstruiert, die senkrecht zu jeder Zelle im Geländemodell stehen. Danach wird die lokale Variabilität der Orientierung der Vektoren statistisch ausgewertet und durch

die Anzahl Zellen in der Nachbarschaft geteilt, um den Wert zu standardisieren. Wird dieser Wert von 1 subtrahiert, erhält man die „Surface Ruggedness“ nach Sappington et al. (2007) mit einem Wertebereich von 0 (flach) bis 1 (sehr rau).



$X_i = \sin(s) \cdot \cos(a)$
$Y_i = \sin(s) \cdot \cos(a)$
$Z_i = \cos(s)$
s = Neigung, a = Exposition

$$SRF = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^{n} X_i)^2 + (\sum_{i=1}^{n} Y_i)^2 + (\sum_{i=1}^{n} Z_i)^2}}{n}$$

SRF = Surface Roughness Factor
SR = Surface Ruggedness

$$SR = 1 - SRF$$

Abb.4.6: Berechnung der Rauigkeit gemäss Sappington et al.
Die Geländerauigkeit ist durch die Richtung der Vektoren erkennbar gemacht. Bei gleichmässigem Gelände haben die Vektoren eine ähnliche Orientierung, bei rauem Gelände ist die Orientierung sehr variabel (McKean & Roering, 2004).

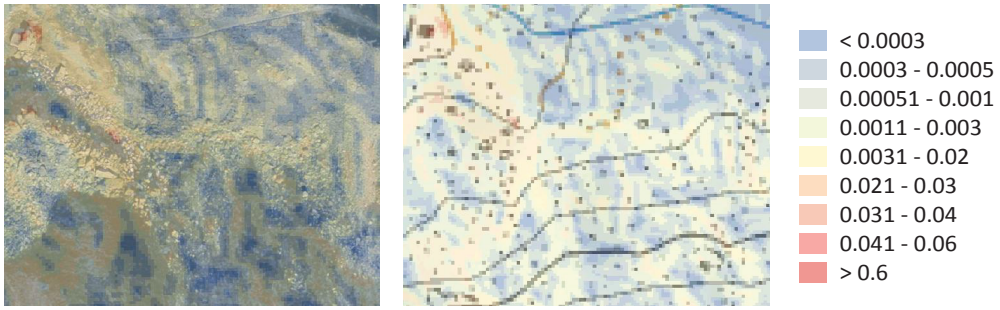


Abb.4.7: Rauigkeitswerte auf einer ebenen, geröllbedeckten Oberfläche
links: Rauigkeitswerte abgebildet auf einem Luftbild von swisstopo (SWISSIMAGE)
rechts: Rauigkeitswerte abgebildet auf der LK25

4.3.3 Exponiertheit

Um abzuschätzen wie ausgesetzt eine Stelle im Gelände ist, wurde mittels der Methode von Niklaus Zimmermann (Zimmermann, 2000) eine multiskalige Exponiertheit berechnen. Dieser Parameter wurde bis jetzt in keiner anderen Arbeit in der Lawinenforschung verwendet, könne für die genauere Beschreibung der Lage der Unfalllawinen aber durchaus interessant sein. Die resultierenden Pixelwerte der Exponiertheit geben die relative topographische Exponiertheit in Meter aus. Die Methode verwendet zirkuläre, iterativ wachsende Radien und berechnet die Differenz zwischen der mittleren Fensterhöhe und der Höhe des Zentralpixels. Die Werte werden danach hierarchisch, über mehrere Skalen integrierend auf das Zentralpixel zurückgeschrieben. Dabei kommt ein Schwellenwert von 120 m zum Einsatz. Falls der Wert für die Exponiertheit eines kleineren Radius grösser als 120 ist, wird dieser Wert verwendet, sonst kommt der Wert des grösseren Radius zum Einsatz.

Als Inputmodell für die Berechnung der Exponiertheit wählte ich eine räumliche Auflösung von 10 m. Als Input Parameter für das Toposcale-Skript wählte ich die Vergrösserung des Radius von einem auf vier Pixel (10 m, 20 m, 30 m, 40 m). Nach einer visuellen Abschätzung lassen sich mit diesen Einstellungen sowohl kleine als auch grosse Geländeerhebungen oder exponierte/nicht exponierte Stellen erkennen.

4.3.4 Kamm

In bisherigen Arbeiten der Lawinenforschung wurden Kämme meistens von Hand auf Luftbilder digitalisiert (Ghinoi & Chung, 2005) oder Methoden basierend auf der Fliessakkumulation verwendet, um die Kämme aus DHM zu extrahieren (Maggioni, 2004; Delparte, 2008). In dieser Arbeit wurden zwei verschiedene Ansätze getestet, welche ebenfalls auf der Fliessakkumulation basieren, sich jedoch von den verwendeten Methoden von Maggioni und Delparte unterscheiden.

Methode 1: prozessorientiert

In einem ersten Versuch wurde versucht, die Kämme anhand einer Fliessakkumulationsberechnung im umgekehrten DHM25 zu finden. Die Fliessakkumulation stellt dabei die Menge an Wasser dar, welche durch jede Zelle fliesst. Hohe Rasterwerte stehen für Flächen mit einem grossen konzentrierten Abfluss. In der Abb.4.8 ist das Modell mit den entsprechenden ArcGIS-Tools abgebildet. Zuerst wurden im umgekehrten DHM Senken gefüllt, welche das Fliessen verhindert hätten. Danach wurde die Fliessrichtung mittels des D8-Fliessmodells berechnet, das bei Jenson & Domingue (1988) vorgestellt wird, und danach die Fliessakkumulation daraus abgeleitet. Es wurden mehrere Grenzwerte getestet und schliesslich aufgrund von visueller Betrachtung ein Grenzwert von 800 Zellen festgesetzt.

Der Nachteil dieser Methode liegt darin, dass nicht nur Kämme, sondern auch Rücken oder Kuppen, die eine grosse abfallende Umgebung in ihrer Nachbarschaft aufweisen als Kämme klassiert werden.

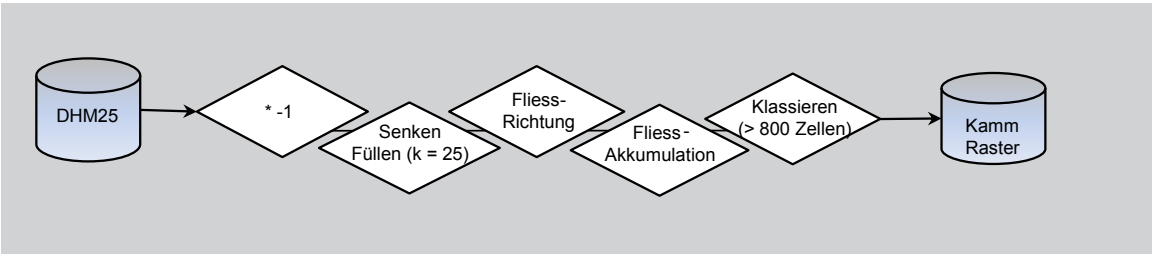


Abb.4.8: Vorgehen bei der Kammberechnung (Methode 1)

Methode 2: objektorientiert

In einem zweiten Versuch wurde mehr auf die Eigenschaften des Kamms fokussiert und ein objektorientierter Ansatz für die Kammextraktion entwickelt. Folgende Annahmen wurden getroffen und wie folgt formalisiert:

1. Ein Kamm entsteht, wenn die zu beiden Seiten sehr steilen Wände durch Erosion abgetragen werden. Das impliziert, dass der Abfluss immer talwärts und nicht dem Kamm entlang erfolgt, folglich weisen die Kämme eine Fliessakkumulation von 0 auf.
2. Im Gegensatz zu kleineren Kuppen sind Kämme grössere Formkomplexe und bilden Netzwerke. Einerseits wurden mithilfe eines Low-Pass-Filters Fehlklassierungen herausgefiltert, andererseits mithilfe eines Grenzwertes für die Grösse (50.6 km^2). Dieser Grenzwert wurde durch visuelle Betrachtung ermittelt, er entspricht einer mittleren Breite des Kammes von 100 m, sowie einer Länge von ungefähr 500 m.
3. Moränen zeichnen sich ebenfalls durch steile seitliche Flanken aus, entsprechen jedoch keinen Kämmen. Um sie herauszufiltern wurde eine Maske der vergletscherten Gebiete aus dem digitalen Landschaftsmodell der Schweiz (VECTOR25) verwendet.

4. Kämme, welche mit Lawinen in Verbindung gebracht werden können, liegen höher als die maximale Höhe der Lawinenumrisse. So wurde eine Höhenmaske (800 m ü.M.) verwendet, um tiefer liegende Kämme herauszufiltern. Die tiefste maximale Höhe der verwendeten Lawinenumrisse entspricht ca. 850 m ü.M..

Die grösste Unsicherheit dieser Methode ist das Kriterium der Grösse, infolge dessen viele kleinere Kämme wegfallen können.

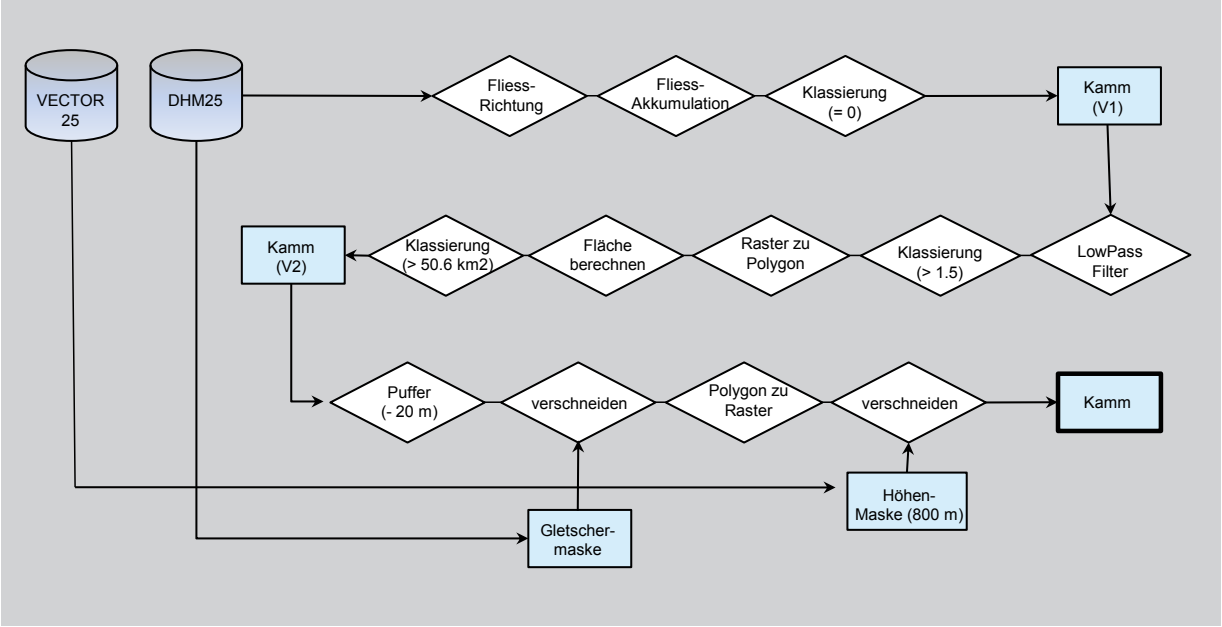


Abb.4.9: Vorgehen bei der Kammberechnung (Methode 2)

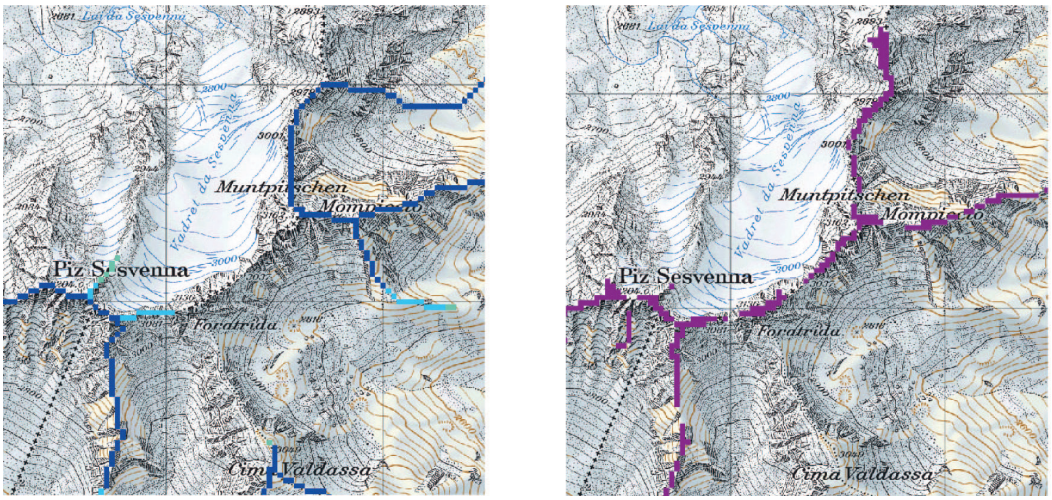


Abb.4.10: Vergleich der Resultate für die beiden Methoden der Kammberechnung
links: Kämme (blau) resultierend aus den Berechnungen mit Methode 1
rechts: Kämme (violett) resultierend aus den Berechnungen mit Methode 2

4.4 Auswertungen

Dank der neuen Datengrundlage der Anrissgebiete wurde es jetzt erstmals möglich, die Geländeeigenschaften quantitativ auszuwerten, aber auch die Form und die Länge der Anrissgebiete quantitativ zu analysieren. Nachfolgend wird beschrieben, wie die Unfalllawinen und ihre Anrissgebiete hinsichtlich Form, Lage und Gelände ausgewertet wurden.

4.4.1 Automatisches Herleiten der Länge und Breite

Um die Form und damit die Länge und Breite der Lawinen und der Anrissgebiete automatisch abzuleiten, wurden Minimum Bounding Rectangle (MBR) verwendet. Mittels des Tools „Minimum Bounding Geometry" in ArcGIS können orientierte MBR berechnet werden, für welche die Breite minimiert wird und sich somit der Form der Lawinen anpassen. Die Länge des Rechtecks steht dabei für die Ausbreitung der Lawine in Fliessrichtung, die Breite des Rechtecks für die horizontale Ausbreitung. Diese Annahme stimmt für diejenigen Lawinen, bei welchen die Ausbreitung in Fliessrichtung grösser ist als die horizontale Ausbreitung. Jedoch gibt es auch Lawinen oder Anrissgebiete, bei welchen die horizontale Ausbreitung grösser ist als die Längsausbreitung. Für diejenigen Lawinen mussten die Angaben zur Länge und Breite ausgetauscht werden. Dafür wurde ein Skript geschrieben, welches die MBR in der Mitte der Länge und Breite teilte (Anhang A). Danach wurden die mittleren Höhen dieser Teilstücke verglichen. War die Differenz in der Breite höher als die Differenz in der Höhe wurden die Angabe zu Länge und Breite ausgetauscht.

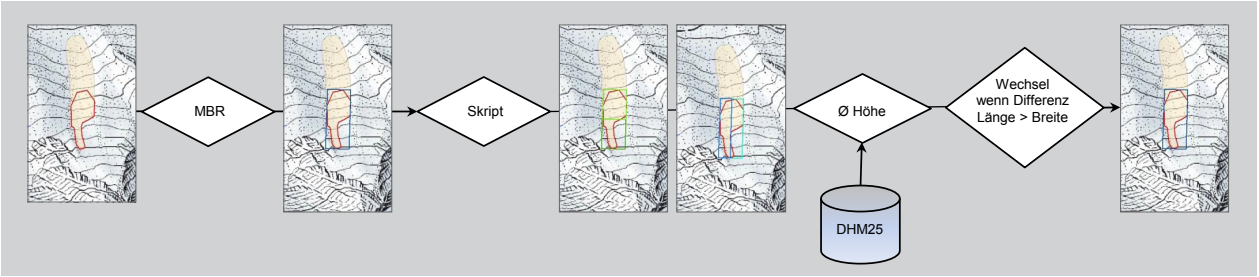


Abb.4.11: Schematische Darstellung des Vorgehens für die Herleitung der Länge und der Breite

4.4.2 Berechnen der Kammdistanz

Für die Berechnung der Kammdistanz wurden zwei verschiedene Ansätze verwendet. Einerseits wurde die euklidische Distanz aus der Vogelperspektive berechnet und andererseits eine euklidische Distanz, welche den Höhenunterschied berücksichtigt und hier Oberflächendistanz genannt werden soll. Die Oberflächendistanz wurde lediglich für den objektorientierten Ansatz der Kammextraktion berechnet.

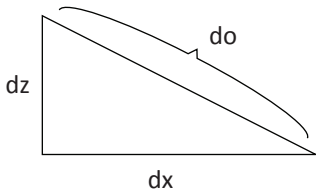
Euklidsche Kammdistanz

Die euklidische Distanz zwischen einer Lawine und dem Kamm konnte mit Hilfe des ArcGIS-Tools „Euclidean Distance" berechnet werden. Dieses berechnet die euklidische Distanz zu jeder Zelle innerhalb des Rasters von der Kammlinie aus. Danach konnte mittels zonaler Statistik der kleinste Wert innerhalb eines Lawinenumrisses ermittelt werden.

Nachteile dieser Methode sind, dass Höhenunterschiede nicht berücksichtigt werden und dass Lawinen, welche eher weit weg von einem Kamm liegen, leicht mit einem falschen Kamm in Verbindung gebracht werden.

Oberflächen- Kammdistanz

Um auch die Höhendifferenz zwischen Lawine und Kamm mit einzubeziehen, wurde zusätzlich eine Oberflächendistanz berechnet. Damit diese berechnet werden konnte, war es nötig, den Höhenunterschied und die horizontale Distanz zwischen der Lawine und dem nächsten Kammpunkt zu kennen. Der nächste Kammpunkt zu einer Lawine wurde mittels des ArcGIS-Tool „Generate Near Table“ gefunden. Die Höhendifferenz wurde von diesem Punkt zur maximalen Höhe innerhalb eines Lawinenumrisses gebildet. Als horizontale Distanz verwendete ich ebenfalls die Werte, welche durch das Tool „Generate Near Table“ entstanden sind.



$$do = \sqrt{d_x^2 + d_z^2}$$

Abb.4.12: Berechnung der Oberflächendistanz (eigene Grafik)

Von 579 Lawinen wiesen nach diesen Berechnungen 82 eine grössere negative Höhendifferenz als -1m auf. Der Grund dafür liegt einerseits darin, dass der höchste Punkt der Lawine nicht zwingend derjenige sein muss, der am nächsten zum Kamm liegt, und andererseits, dass Lawinen, welche weit weg vom Kamm liegen, leicht mit einem falschen Kamm in Verbindung gebracht werden. Somit wurden diejenigen negativen Höhenwerte, bei welchen die Lawine eine horizontale Distanz <= 25 m aufweisen, auf 0 gesetzt. Alle anderen Lawinen wurden von der Berechnung der Oberflächendistanz ausgeschlossen. Es blieben somit 538 Lawinen für die Berechnung übrig.

4.4.3 Zonale Auswertung und Klassierung der Geländeeigenschaften

Um Kennzahlen der Geländeeigenschaften innerhalb der Unfalllawinen sowie innerhalb der Anrissgebiete zu erhalten, wurden die Eigenschaften zonal innerhalb dieser Gebiete ausgewertet. Dafür wurden zwei verschiedene Tools genutzt.

Für die Umrisse der Unfalllawinen und die Anrissgebiete wurde das ArcGIS Tool „Zonal Statistics as Table“ mit dem jeweiligen Inputraster der Geländeeigenschaft und des Inputpolygon der Zone verwendet. Probleme entstanden bei kleineren Anrissgebieten, welche nicht genügend Inputpixel für eine Berechnung aufwiesen. Diese Werte wurden von Hand nachgetragen. Für die Neigung, die Kurvatur, die Rauigkeit und die Exponiertheit wurden der durchschnittliche, der maximale, der minimale Wert und die Standartabweichung pro Gebiet berechnet. Für die bereits klassierte Exposition wurden der Modalwert und die Variation berechnet.

Für die zonale Auswertung der Zonen innerhalb der Anrissgebiete wurde ein anderer Ansatz verwendet. Die Werte der Inputraster wurden auf einen Punkteraster projiziert, welcher alle 5 m einen Punkt aufwies. Danach wurde mittels dem ArcGIS Tool „Spatial Join“ der durchschnittliche und der maximale Wert pro Zone ausgewertet. Dieser Ansatz ist für kleinere Gebiete besser geeignet und liefert die genaueren Resultate. Es können auch Rasterzellen berücksichtigt werden, welche nur zu einem geringen Teil innerhalb der Gebiete liegen. Jedoch entsteht eventuell auch ein falsches Bild der vorhandenen Genauigkeit der Daten, denn die

Lawinenumrisse sind kaum auf 5 m genau eingezeichnet. Für eine einfachere Interpretation und Beschreibung der Geländeeigenschaften wurden danach die einzelnen Eigenschaften klassiert.

Geländeform

Für die Klassierung der Ausprägung der Kurvatur wurden in der Lawinenforschung bisher schon unterschiedliche Schwellenwerte eingesetzt. Gruber & Bartelt (2007) und Delparte (2008) unterscheiden drei verschiedene Ausprägungen der Plankurvatur, um Couloirs (< -3), kanalisierte Bereiche (-3 bis -1.5) und offene Flächen (>-1.5) zu identifizieren. Maggioni & Gruber (2003) und Barbolini (2009) verwenden die Schwellenwerte (-0.2/0.2), um konvexe, gerade und konkave Formelemente voneinander zu trennen.

In dieser Arbeit wurde die Einteilung der Plan- und Profilkurvatur in konvex, gerade/gestreckt und konkav vorgenommen und neun verschiedene Geländeformen unterschieden. Für die Auswertung der Geländeform habe ich den Ansatz von Dikau (1989) gewählt, der auch schon von Maggioni (2004) verwendet wurde, um potentielle Lawinenanrissgebiete zu extrahieren, und von Hörsch (2001), um den Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief zu untersuchen. Profil- und Plankurvatur werden dabei gebraucht, um neun Formelemente zu unterscheiden, welche in geneigten Flächen vorkommen. Der Durchschnittswert der Plan- und Profilkurvatur innerhalb der betrachteten Zonen wird aufgrund eines Schwellenwertes zu einer der drei Ausprägungen konvex, gerade und konkav zugeordnet und damit die Geländeform bestimmt. Um den Einfluss des Schwellenwertes abzuschätzen, wurden verschiedene Schwellenwerte (-0.1/0.1, -0.2/0.2, -0.3/0.3 und -0.5/0.5) getestet (vgl. Kapitel 5.2.1). Schliesslich wurde ein Schwellenwert von -0.2 bzw. 0.2 für die Ergebnisse gewählt.

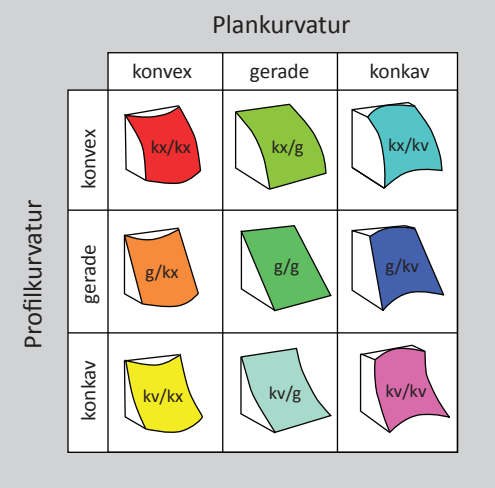


Abb.4.13: Geländeformen nach Dikau (1989)

Rauigkeit

Um eine geeignete Klassierung der Rauigkeitswerte zu finden, wurde für 20 Testflächen (50 x 50 m) in unterschiedlichen Geländesituationen (Wald, Weide, Geröll, Fels) die durchschnittliche Rauigkeit berechnet. Anhand der erhaltenen Rauigkeitswerte, welche sich in unterschiedlichen Wertebereichen befanden, konnten folgende Klassen definiert werden (vgl.Abb.4.14): Wald (0.009 – 0.03), Fels oder buschige Oberfläche (0.004 – 0.008), Geröll (0.001 – 0.003), Wiese/Weide (0.0001 – 0.0009).

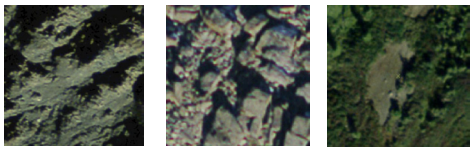
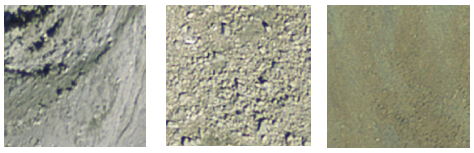
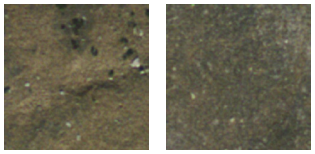
Oberflächenbeispiele	Beschreibung	Rauigkeitswerteberecih
	Wald	0.009 - 0.03
	Fels oder buschige Oberfläche	0.004 - 0.008
	Geröll	0.001 - 0.003
	Wiese / Weide	0.0001- 0.0009

Abb.4.14: Klassierung der Rauigkeitswerte in vier Gruppen

Exponiertheit

Zimmermann (2000) schlägt eine Klassierung der Exponiertheit in vier topographische Geländeobjekte vor (-1100 – 200 = Talboden; -200 – 100 = Hangfuss; -100 – 150 = Hangmitte; 150 – 1100 = Kamm). Ebene Hänge können dabei nicht von flachen Geländeabschnitten unterschieden werden. Diese Einteilung erscheint nach visueller Betrachtung nicht für ein hochaufgelöstes Inputmodell konzipiert zu sei. Kleinere Geländeerhebungen werden nur schlecht abgebildet (vgl. Abb.4.15), darum wurden in dieser Arbeit nach visueller Betrachtung folgende kleinere Schwellenwerte verwendet: <=-150 = Hangfusslage, -150- -50 = Muldenlage, -50 – 50 = Hangmitte, > 50 Kammlage.

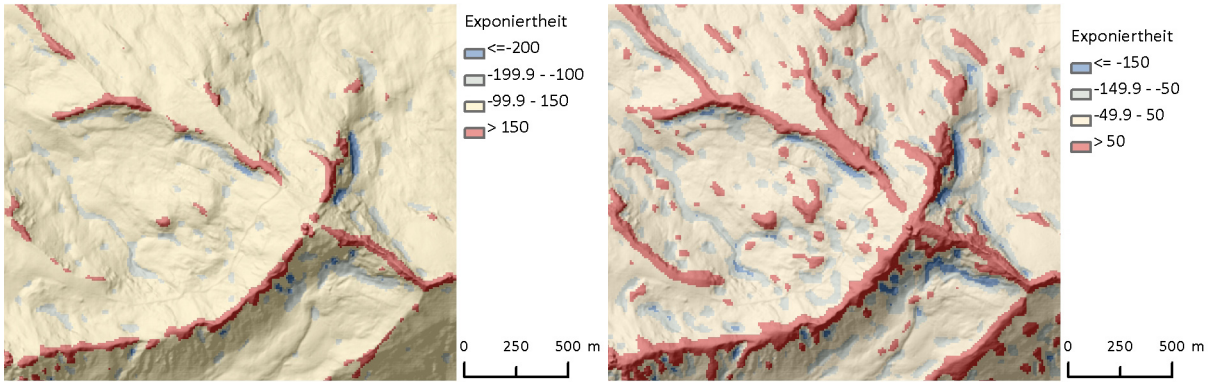


Abb.4.15: Klassierung der Exponiertheit
links: nach Zimmermann (2000)
rechts: mittels eigenen Schwellenwerte, eine genauere Unterteilung wird möglich

Hangneigung

Eine gebräuchliche Klassierung der Hangneigung in der Lawinenvorwarnung ist diejenige nach EAWS (2011) in vier Klassen: mässig steil: < 30, steil: 30-35, sehr steil: 35-40 und extremsteil: > 40. Sie wird in dieser Arbeit verwendet, um die Hangneigung der Unfalllawinen zu beschreiben.

4.4.4 Vergleichende Statistik

Um die Ergebnisse, welche auf verschiedene Methoden oder Auflösungen basieren, miteinander zu vergleichen, wurde je nach Verteilung der Werte der T-Test für abhängige Gruppen für normalverteilte Inputdaten oder der nicht-parametrische Rangsummentest nach Wilcoxon verwendet. Um die Ergebnisse unterschiedlicher Stichproben zu vergleichen, wurde der nicht parametrische Rangsummentest nach Mann-Whitney-U verwendet.

Korrelationsanalysen wurden genutzt, um die Stärke und Richtung des Zusammenhangs zwischen den verschiedenen Geländeeigenschaften zu quantifizieren. Je nach beteiligten Parametern wurde der parametrische Korrelationskoeffizient nach Pearson oder die Spearman-Rangkorrelation und für gruppierte Werte Kendalls Tau genutzt.

Um die statistische Signifikanz anzugeben wurde der p-Wert verwendet und eingefärbt, wenn die Nullhypothese verworfen werden konnte. Das Signifikanzniveau wurde einerseits für 0.05(*) und 0.01(**) gekennzeichnet.

*„However beautiful the strategy,
you should occasionally
look at the results."*
Winston Churchill

Kapitel 5
Resultate

Das Kapitel ist in drei Teile gegliedert.

Zu Beginn werden die Resultate des automatischen Herleitens der Grösse (Länge und Breite) und der Lage (Höhenlage, Exposition, Kammnähe) der Unfalllawinen vorgestellt. Für die Grösse (Länge und Breite), die Exposition und die Höhenlage waren bereits Einträge aus manueller Messung in der Schadenslawinendatenbank oder Auswertungen von Harvey (2002) vorhanden. Diese werden für einen Vergleich beigezogen und helfen, die Qualität der bisherigen und der neu hergeleiteten Ergebnisse abzuschätzen. Für die Abschätzung der Aussagekraft wird zudem die Verteilung der Höhenlage und der Exposition der Unfalllawinen der allgemeinen Verteilung der Höhenlagen und der Exposition in der Schweiz gegenübergestellt. Für das Herleiten der Kammnähe wurden zwei verschiedene Methoden entwickelt. Die jeweiligen Resultate werden einander gegenübergestellt und somit auf ihre Plausibilität untersucht.

Im zweiten Unterkapitel werden die Resultate zur Geländeform, der Geländerauigkeit, der Exponiertheit und der Hangneigung der Anrissgebiete vorgestellt. Diese Parameter wurden flächenhaft in verschiedenen Zonen der Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet ausgewertet. Es lassen sich somit neue Erkenntnisse über die räumliche Verteilung dieser Geländeeigenschaften innerhalb der Anrissgebiete gewinnen. Die Geländeform und die Hangneigung wurden zudem auf zwei verschiedenen DHM ermittelt und die jeweiligen Resultate miteinander verglichen. Dies dient der Abschätzung des Einflusses der räumlichen Auflösung auf die Resultate.

Zuletzt werden verschiedene Geländeparameter miteinander in Beziehung gesetzt und nach Zusammenhängen hinsichtlich der Zusammensetzung innerhalb der Anrissgebiete gesucht. Ebenfalls wird getestet, ob die Anrissmächtigkeit in Beziehung zu gewissen Geländeparametern steht.

Je nach Fragestellung, Vergleichsdaten und Höhenmodell wurde eine unterschiedliche Anzahl Lawinenanrisse oder Lawinenumrisse für die Analysen verwendet. In Tab.5a sind alle verwendeten Daten aufgelistet.

Gebiet	Beschreibung	Anzahl Lawinen
ganze Schweiz	alle Lawinenumrisse	579
	nach Auslöseart:	
	durch Personen	435
	natürlich	70
	unsicher	60
	Sprengung / Pistenmaschine	14
	alle Lawinenanrisse	142
	alle Lawinenanrisse, für welche auch die Länge aus der SLDB vorhander war	133
	alle Lawinenanrisse, für welche auch die Breite aus der SLDB vorhander war	132
	alle Lawinenanrisse, für welche auch die Exposition aus der SLDB vorhander war	135
Untersuchungs-gebiet	alle Lawinenanrisse	55
	Lawinenanrisse welche nicht in bewaldeten Gebieten liegen	53
	Lawinenanrisse, für welche die Zone Rund um Anrissstirn und Anriss oben vorhanden ist	52
	Lawinenanrisse, für welche die Zone Anriss mitte vorhanden ist	50
	Lawinenanrisse, für welche die Zone Anriss unten vorhanden ist	29

Tab.5.a: **Anzahl Lawinenumrisse und Lawinenanrisse für die Auswertung**
für die Winter 1999/00 bis 2009/10 in der ganzen Schweiz, sowie im Untersuchungsgebiet (ADS-DOM)

5.1 Grösse und Lage

5.1.1 Länge und Breite

Die Länge und die Breite wurden einerseits für die Lawinenumrisse (N = 579) und andererseits für die Lawinenanrisse (N = 142) automatisch hergeleitet und mit Werten aus der Schadenslawinendatenbank verglichen. Die Länge und die Breite entsprechen jeweils den Kantenlängen der MBR (Minimal Bounding Rectangle) und berücksichtigen keine Topografie.

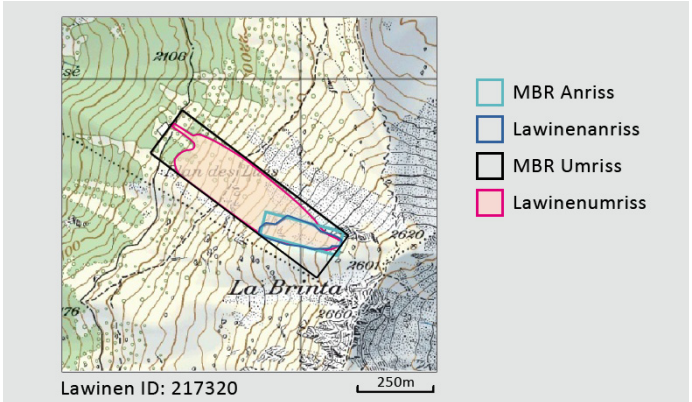


Abb.5.1: **Länge und Breite der Lawinen**
gemessen mittels der MBR (Minimal Bounding Rectangle) für das Anrissgebiet und den gesamten Lawinenumriss

Lawinenumrisse

Die Verteilung der Werte für die Breite und die Länge der Lawinenumrisse ist stark rechtsschief (vgl. Abb.5.2). Die Spannbreite reicht von sehr kleinen bis hin zu grossen Lawinen. Für die Hälfte der betrachteten Unfalllawinen liegt die Breite unter 95 m und die Länge unter 270 m, was nach EAWS (2011) der Grössenordnung von kleinen bis mittleren Lawinen entspricht. Je nach Auslöseart sind grosse Unterschiede zu verzeichnen (vgl. Abb.5.3). Für durch Personen ausgelöste Lawinen beträgt die mittlere Länge 250 m und die mittlere Breite 85m, für natürlich ausgelöste Schadenslawinen 800 m und 205 m. Von Personen ausgelöste Lawinen sind deutlich kleiner als natürlich ausgelöste oder durch Sprengung oder Pistenmaschinen verursachte Lawinen, was sich auch statistisch nachweisen lässt (vgl. Tab. 5.b).

Lawinenanrisse

Die Auswertung der Länge und der Breite der Lawinenanrisse ermöglichte eine genauere Abschätzung der Anrissbreite der Unfalllawinen und eine Abschätzung der Ausdehnung der Anrissgebiete gegenüber der gesamten Lawine. Die Hälfte der betrachteten Anrissgebiete ist weniger als 65 m breit und 85 m lang. Ein positiv linearer Zusammenhang konnte zwischen der Anrisslänge und der gesamten Lawinenlänge festgestellt werden (R^2= 0.615). Die Länge der Anrissgebiete macht im Schnitt ca. 40 % der gesamten Lawinenlänge aus. Eine Übersicht über die Grösse und Form aller Anrissgebiete ist im Anhang B zu finden. Die Anrissgebiete können je nach Gelände und Grösse der Lawine verschiedene Formgestalten aufweisen. Vielfach sind jedoch die Länge und die Breite der Anrissgebiete relativ ausgeglichen. Bei über 60 % unterscheidet sich die Breite von der Länge mit weniger als +-50 m.

Vergleich mit Werten aus der Schadenslawinendatenbank /Abschätzung der Qualität der Ergebnisse

Die Resultate für die Länge der Lawinenumrisse, welche durch die automatisierte Methode zu Stande kamen, sind vergleichbar mit den durch Beobachtungen im Feld erhaltenen Längenangaben aus der Schadenslawinendatenbank. Die mittlere Breite der Lawinenumrisse (83 m) unterscheidet sich zwar nicht wesentlich von der mittleren Breite aus der Schadenslawinendatenbank (70 m), jedoch ist der Unterschied statistisch signifikant (vgl. Tab. 5.c). Die Breite der Lawinenumrisse, wie sie hier berechnet wurde, könnte allenfalls als Annäherung dienen, ist aber kein geeignetes Mass für die Abschätzung der Anrissbreite der Unfalllawinen. Das Resultat für die Breite der Lawinenanrisse ist hingegen vergleichbar mit den Angaben aus der Schadenslawinendatenbank. Das zeigt, dass ein automatisches Herleiten der Länge und Breite der Lawinen mit einer hohen Genauigkeit möglich ist, wenn für die Länge die Lawinenumrisse und die Breite der Lawinenanrisse verwendet werden. Es wäre also denkbar, fehlende Angaben in der Schadenslawinendatenbank automatisch zu ergänzen. Die Voraussetzung dafür ist aber eine hohe Genauigkeit der eingezeichneten Lawinenumrisse und Lawinenanrisse.

Trotz Korrektur von Längen- und Breitenangaben mittels Differenzbildung der durchschnittlichen Höhe entlang der Länge und der Breite, blieben einige wenige Fehlklassierungen bestehen. Sie traten auf, wo die Breite die Länge um ein Mehrfaches übertraf oder die Lawine sich in mehrere Abflusswege auftrennte. Änderungen an der Methode, um diese Spezialfälle zu berücksichtigen, sind also noch nötig. Weiter wäre es für Modellierungen von Lawinen eventuell interessant nicht die Luftdistanzen, sondern die exakte Länge der Lawinen entlang des Geländes zu kennen. Dafür wäre es nötig eine 3D-Linie entlang des Abflussweges der Lawine zu konstruieren und danach die Oberflächenlänge abzuleiten.

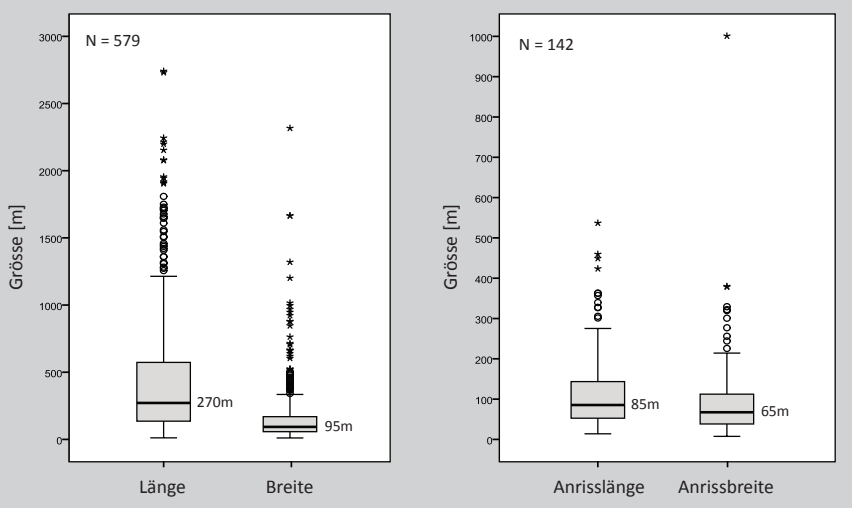


Abb.5.2: Grössenverteilung der Länge und Breite von Unfalllawinen
links: Boxplot der Länge und Breite der Lawinenumrisse
rechts: Boxplot der Anrisslänge und Anrissbreite der Anrissgebiete

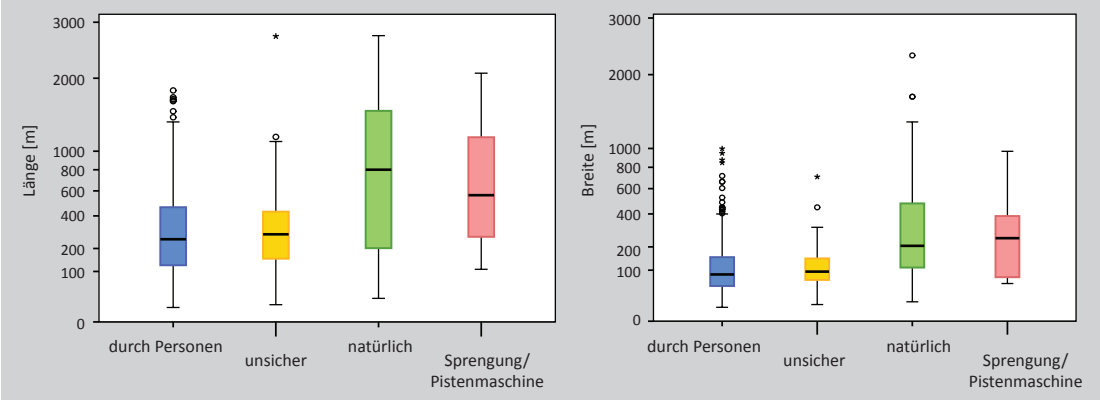


Abb.5.3: Grössenverteilung der Länge und Breite der Lawinenumrisse nach Auslöseart
N Total = 579, durch Personen = 435, unsicher = 60, natürlich = 70, Sprengung/Pistenmaschine=14

Getestete Zusammenhänge	p-Wert	
	Länge	Breite
Per.– Nat.	0.000**	0.000**
Per .– Spr./Pist.	0.003**	0.001**
Per .– unsicher	0.724	0.312
Nat. – Spr./Pist.	0.666	0.838

Tab.5.b: Vergleich der Länge und Breite zwischen den Auslösearten
(Mann Whitney U-Test, H_1: X ≠ Y, Signifikanzniveau: 0.05 *, 0.01**)

	Länge			Breite		
N	133			132		
Daten	Umriss	SLDB	Anrisslänge	Umriss	SLDB	Anrissbreite
Median	214m	210m	87m	83m	70m	69m
p-Wert	0.920	0.000**		0.000**	1.000	

Tab.5.c: Vergleich der Länge und Breite mit den Werten aus der SLDB
(Wilcoxon Test, H_1: X ≠ Y, Signifikanzniveau: 0.05 *, 0.01**)

5.1.2 Höhenlage

Die maximale Höhe aller betrachteten Unfalllawinen der Schweiz liegt zwischen 855 m und 3870 m ü.M. (vgl. Abb.5.4). Der Durchschnitt der maximalen Höhe liegt bei 2430 m ü.M.. Wird die Verteilung der Höhenstufen in der ganzen Schweiz mit der maximalen Höhe der Lawinen verglichen, lässt sich feststellen, dass sich überproportional viele Lawinen zwischen 2000 m und 3000 m ü.M. ereigneten (vgl. Abb.5.4). Ein Teil davon lässt sich mit der grösseren Häufigkeit von Hängen zwischen 30 und 50 Grad erklären, doch die Häufung von Unfalllawinen zwischen 2300 und 2400 m ü.M. und auch in höher gelegenen Gebieten lässt sich damit nicht erklären. Relativ wenige Unfalllawinen sind zwischen 1500 und 2000m ü.M. zu finden im Vergleich zum Potential von lawinengefährdeten Hängen. Erklärende Faktoren dafür könnte die Bewaldung vielen dieser Hänge sein oder die geringere Schneesicherheit in tieferen Lagen.

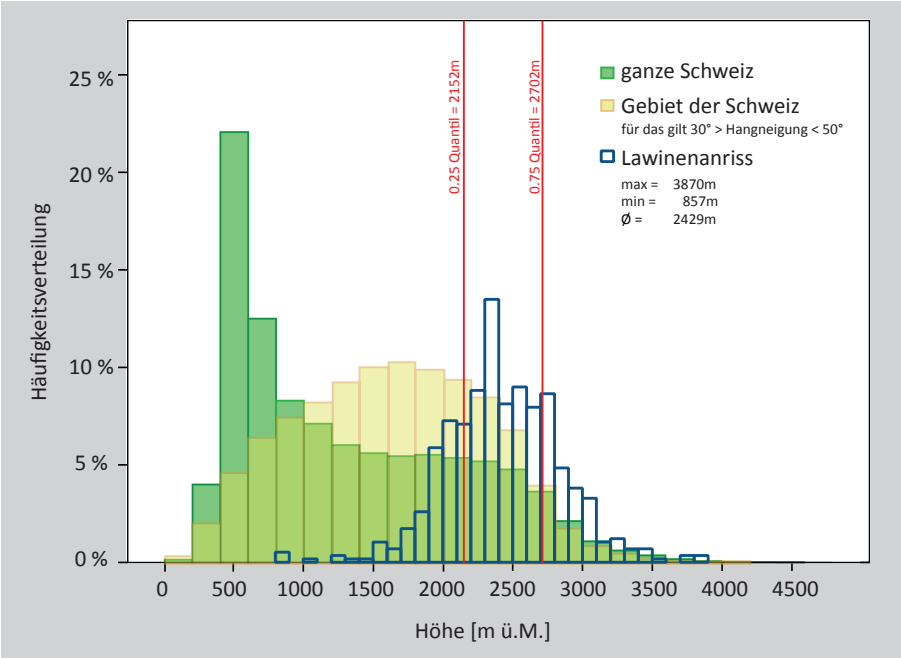


Abb.5.4: Häufigkeitsverteilung der maximalen Höhe der Unfalllawinen (N=579) im Vergleich zur Höhenverteilung über die ganze Schweiz und der Höhenverteilung über die ganze Schweiz zwischen 30 und 50 Grad Hangneigung

5.1.3 Exposition

Die Exposition wurde sowohl in den Lawinenumrissen als auch in den Anrissgebieten zonal ausgewertet. Somit konnte der Einfluss der verwendeten Zonen getestet werden. Die Resultate für die Anrissgebiete wurden zudem für einen Vergleich mit den bestehenden Werten aus der Schadenslawinendatenbank verwendet und für zwei verschiedene DHM verglichen, um den Einfluss der räumlichen Auflösung abzuschätzen.

Allgemeine Verteilung

Die mehrheitlich vorkommende Exposition in den Anrissgebieten unterscheidet sich nicht grundlegend von der Exposition über den gesamten Lawinenumriss. Sowohl für die Anrissgebiete als auch für die Lawinenumrisse zeigen die Unfalllawinen ein gehäuftes Vorkommen in den Expositionen Nord, Nordwest und Nordost (vgl. Abb.5.6a). Vor allem die Expositionen Nord und Nordwest sind zum Vorkommen der Expositionen in der ganzen Schweiz deutlich überproportional vertreten, die Expositionen Süd und Südost deutlich untervertreten

(vgl. Abb.5.7). Unterschiede in der Exposition lassen sich auch zwischen den jahreszeitlichen Vorkommen erkennen (vgl. Abb.5.8). Im Spätwinter ereigneten sich prozentual deutlich mehr Unfalllawinen in nördlicher und nordwestlicher Exposition. Eine Diskussion dieser Verteilung folgt im Kapitel 6.1.2.

Einfluss Auflösung

Die räumliche Auflösung hat auf die Resultate der Exposition einen eher kleinen Einfluss. Die Verteilung der Expositionen ist für beide DHM sehr ähnlich (vgl. Abb.5.6b). Nur für 9 % der Anrissgebiete wechselte die Exposition auf eine andere, benachbarte Exposition. Für ein Anrissgebiet wurde eine komplett andere Exposition zugewiesen, was wahrscheinlich auf die sehr exponierte Lage und die grosse Länge der Lawine zurückzuführen ist (vgl. Abb. 5.5).

Abb.5.5: Lawine mit relevanter Expositionsänderung zwischen ADS-DOM und DHM25
Exposition ändert von Nord nach Ost zwischen ADS-DOM und DHM25

Vergleich mit Werten aus der Schadenslawinendatenbank

Die Resultate des automatischen Herleitens der Exposition sind vergleichbar mit den Beobachtungen im Feld aus der Schadenslawinendatenbank. Die Verteilung der Exposition ist sehr ähnlich, nur einige Lawinen liegen mehr in westlicher als südwestlicher Exposition. Die Tatsache jedoch, dass in der Schadenslawinendatenbank für die Beschreibung der Lage nicht konsequent die acht oder 16 Expositionen verwendet wurden, macht einen Vergleich schwierig. Dadurch entsteht eine relativ ruppige Expositionsverteilung mit Spitzen in den acht Hauptexpositionen (vgl. Abb.5.7a). Für den Vergleich wurden die Zwischenklassen jeweils zur Hälfte den benachbarten Expositionen zugewiesen (vgl. Abb.5.7b).

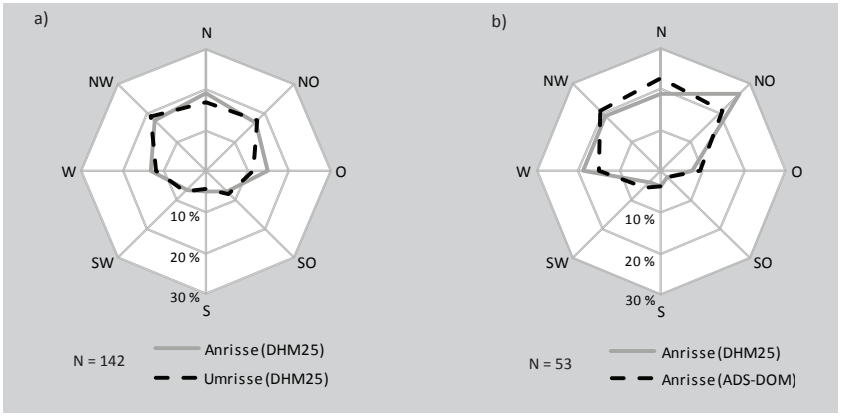


Abb.5.6: Vergleich der Expositionsverteilung

a) zwischen den Resultate für die Anrisse und Umrisse in der gesamten Schweiz (N = 142)

b) zwischen ADS-DOM (10 m) und DHM25 (25 m) für die Anrisse im Untersuchungsgebiet (N = 53)

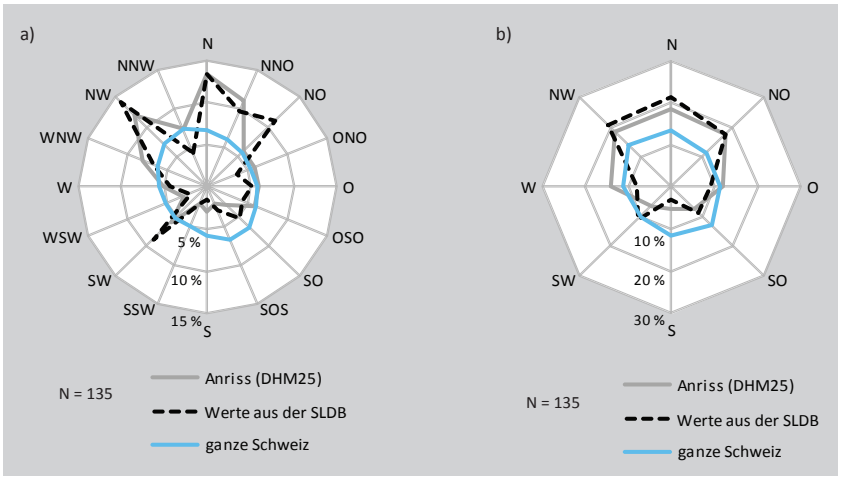


Abb.5.7: Vergleich mit der Expositionsverteilung der ganzen Schweiz

a) und den Werten aus der SLDB unter Verwendung der 16 verschiedenen Expositionen

b) und den Werten aus der SLDB unter Verwendung der acht Expositionen

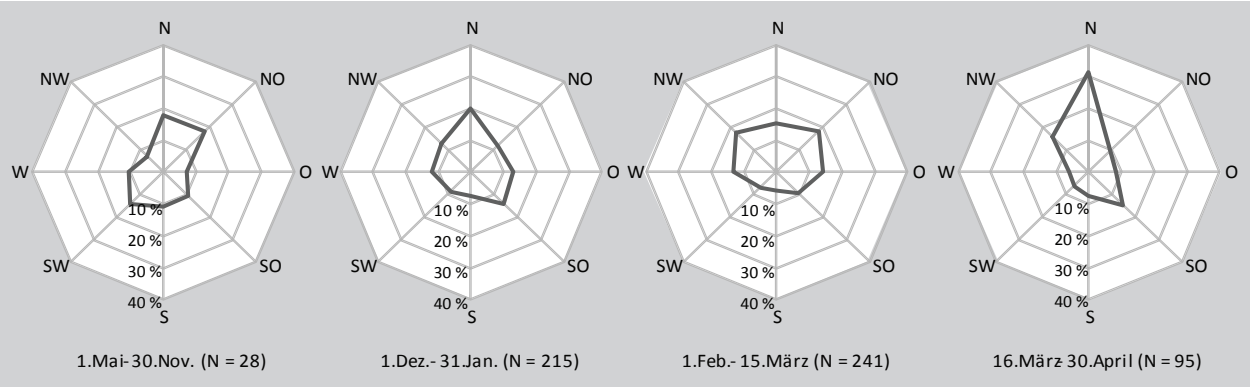


Abb.5.8: Expositionsverteilung in den Lawinenumrissen der ganzen Schweiz nach jahreszeitlichen Ereignissen (N Total = 579)

5.1.4 Kammnähe

Zwei verschiedene Methoden wurden angewandt, um die Kämme aus dem Höhenmodell zu extrahieren und die Kammdistanz zu berechnen. Für beide Methoden ist die Verteilung der Kammdistanzen rechtsschief und der Median liegt unter 200 m (vgl. Abb.5.9). Nach EAWS (2011) ist keine exakte Distanzgrenze definiert, nach der eine Position als kammnah bezeichnet werden könnte. Wird für die Klassierung der Resultate ein Schwellenwert von 100 m festgelegt, so würden rund 200 der 579 Lawinen Kammnähe aufweisen. Das entspräche mehr als einem Drittel aller Unfalllawinen.

Vergleich der Methoden

Die Kammdistanz, welche mithilfe der Fliessakkumulation berechnet wurde (Methode 1), ist im Allgemeinen kleiner als die Kammdistanz, die objektorientiert berechnet wurde (Methode 2). Das hat damit zu tun, dass anhand der Methode 1 mehr Kammlinien extrahiert wurden als mittels Methode 2. Es ist jedoch wahrscheinlich, dass es unter den Kammlinien der Methode 1 einige Fehlklassierungen gibt, welche die Distanz zu einer Kammlinie kleiner erscheinen lassen, als sie in Wirklichkeit ist. Der Unterschied zwischen den Resultaten kann als statistisch signifikant bewertet werden (Wilcoxon-Test: N= 538, H_1: X ≠ Y, Signifikanzniveau: 0.05, p= 0.000**). Jedoch ist dies vor allem auf die grosse Anzahl der betrachteten Lawinen und nicht auf den effektiven Unterschied zurückzuführen. Der Median zwischen den Methoden unterscheidet sich lediglich um 20 m, was im Gelände nicht als grosser Unterschied bewertet werden kann. Für die Auswertung der Kammnähe können daher beide Ansätze als geeignet angesehen werden.

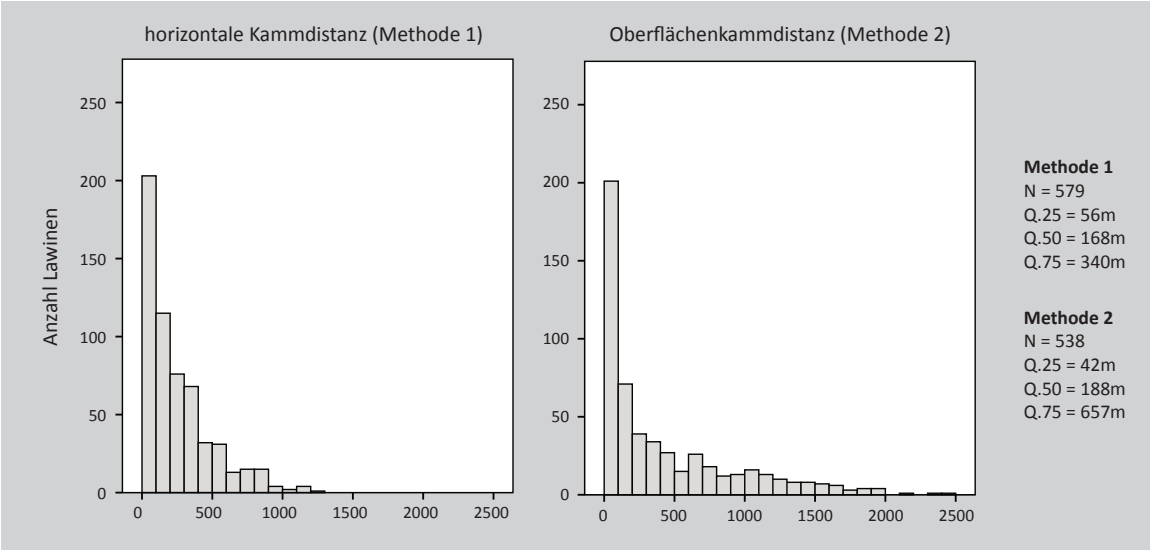


Abb.5.9: Verteilung der Kammdistanzen der Unfalllawinen der ganzen Schweiz
links: horizontale Kammdistanz (Methode 1)
rechts: Oberflächenkammdistanz (Methode 2)

5.2 Flächenhafte Geländeeigenschaften und ihre Verteilung innerhalb der Anrissgebiete

5.2.1 Geländeform

Um die Geländeform der Anrissgebiete genauer zu beschreiben wurde einerseits die durchschnittliche Profil- und Plankurvatur und andererseits die Geländeform nach Dikau (1989) für die Anrissgebiet und in der Zone rund um die Anrissstirn im Untersuchungsgebiet berechnet. Weiter wurden die Auswertungen auf zwei verschiedenen DHM durchgeführt, um den Einfluss der räumlichen Auflösung abzuschätzen, und verschiedene Schwellenwerte für die Kurvatur getestet, um die Stabilität der Ergebnisse zu messen.

Allgemeine Verteilung

Die Unfalllawinen weisen in ihren Anrissgebieten sehr oft konkave Plan- und Profilkurvaturen (kv/kv) auf. Für den Schwellenwert 0.2/-0.2 und eine räumliche Auflösung von 10m ist die Geländeform kv/kv mit 26 % der am meist vorkommende Geländeformtyp (vgl. Abb.5.10). Ebenfalls überdurchschnittlich vertreten sind die Geländeformtypen mit gestreckter Profil- und konkaver Plankurvatur (g/kv), mit konkaver Profil- und gerader Plankurvatur (kv/g) und mit gestreckter Profil- und gerader Plankurvatur (g/g). Eine Auswertung der Lawinen nach der Profilkurvatur rund um die Anrissstirn und der Profilkurvaturen über den gesamten Anrissbereich ergeben sieben verschiedene Geländesituationen, in welchen sich die Unfalllawinen ereigneten (Abb.5.11). Die Anrissgebiete weisen überdurchschnittlich oft eine konvexe oder gestreckte Profilkurvatur rund um die Anrissstirn auf (75 %) und verlaufen gerade oder konkav in Fliessrichtung (83 %). Das lässt vermuten, dass die meisten Anrissgebiete entweder unterhalb einer Kuppe oder eines Grates oder in der Mitte eines Hanges liegen und mit gleichbleibender oder abnehmender Hangneigung verlaufen.

Einfluss Auflösung

Sowohl für eine räumliche Auflösung von 10 m als auch 25 m überwiegen die konkaven Profil- und Plankurvaturen innerhalb der Anrissgebiete (vgl. Abb.5.12). Es kann kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Werten festgestellt werden (vgl. Tab.5d). Der Einfluss der Auflösung zwischen 10m und 25m scheint für die Geländeform innerhalb der Anrissgebiete nicht entscheidend zu sein. Das gilt jedenfalls für den Grossteil der Unfalllawinen. Bei einigen Anrissgebieten kam es zu sehr grossen Unterschieden, welche sich nicht durch eine unterschiedliche Auflösung erklären lassen. Die Werte kippen von stark positiven zu negativen Werten oder umgekehrt. Für die Plankurvatur ist das bei den Lawinen 214320 und 214850 der Fall, bei der Profilkurvatur für die Lawinen 214850 und 219450. Eine genauere Diskussion dieses Verhaltens ist in der Diskussion im Kapitel 6.2.2 zu finden.

Einfluss Schwellenwert

Die Stabilität des Schwellenwertes wurde untersucht indem für vier verschiedene Schwellenwertpaare (0.1/-01, 0.2/-0.2, 0.3/-0.3, 0.5/-0.5) und für zwei unterschiedliche Auflösungen (10 m und 25 m) die Geländeform der Anrissgebiete berechnet wurde. Es ist ersichtlich, dass der Schwellenwert einen grossen und entscheidenden Einfluss auf die extrahierte Geländeform besitzt. Die Geländeformverteilung verläuft von mehrheitlich konkaver Profil- und Plankurvatur bei niedrigem Schwellenwert zu mehrheitlich gerader Profil- und Plankurvatur bei relativ hohem Schwellenwert (vgl. Abb.5.13). In dieser Arbeit wird der Schwellenwert -0.2/0.2 verwendet. Ein relativ niedriger Schwellenwert erscheint sinnvoll, da einerseits mit der Auflösung und andererseits mit der Durchschnittsbildung der Kurvaturwerte eine gewisse Generalisierung des

Geländes stattgefunden hat. Dieser Schwellenwert wurde ebenfalls von Hörsch (2001) verwendet, um den Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief zu untersuchen und von Maggioni (2005), um potentielle Lawinenanrissgebiete zu extrahieren.

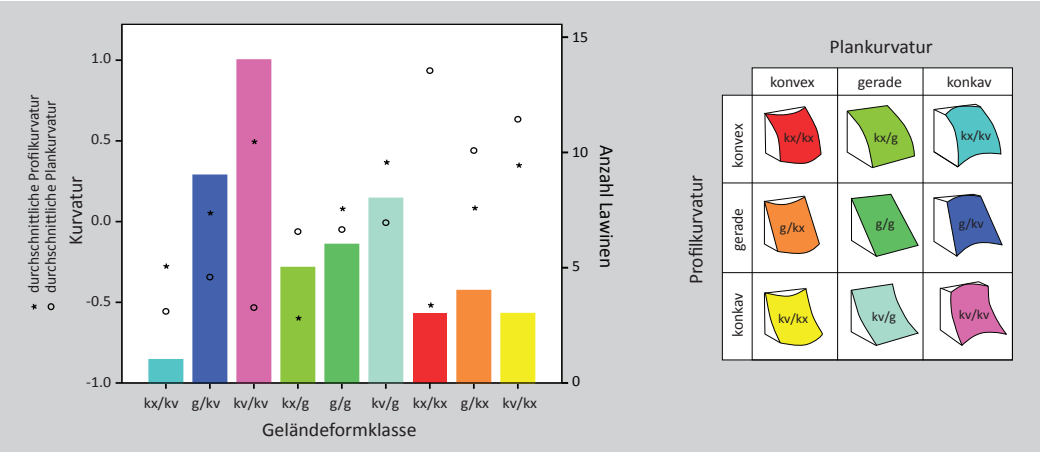


Abb.5.10: Häufigkeitsverteilung der Geländeform (nach Dikau, 1989)
in den Anrissgebieten des Untersuchungsgebietes (N=53)

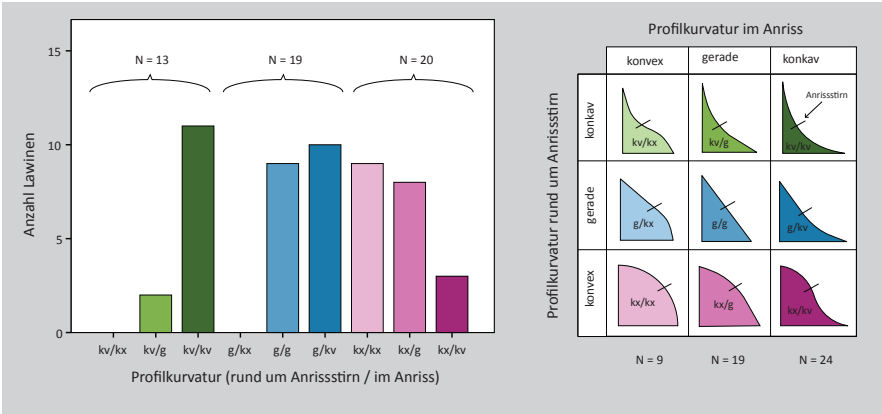


Abb.5.11: Häufigkeitsverteilung der Geländesituation
rund um die Anrissstirn und im gesamten Anrissgebiet für die Lawinen des Untersuchungsgebietes (N=52)

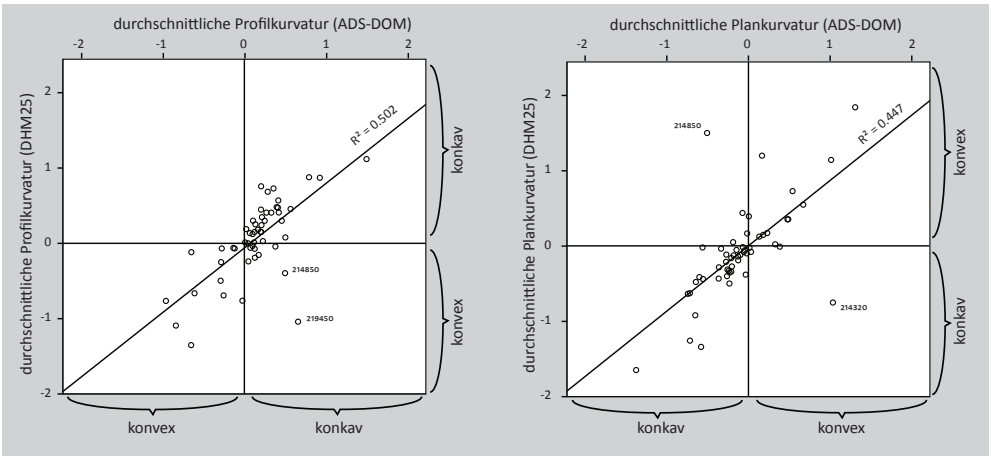


Abb.5.12: Vergleich der durchschnittlichen Kurvatur zwischen ADS-DOM und DHM25
in den Anrissgebieten des Untersuchungsgebietes (N = 53)

	Profilkurvatur		Plankurvatur	
	DOM10	DHM25	DOM10	DHM25
Ø Kurvatur	0.14	0.06	-0.1	-0.08
p-Wert	0.110		0.789	

Tab.5.d: Vergleich der Kurvatur im Anriss zwischen ADS-DOM und DHM25
(Paired T-Test, N=53, H_1: X≠Y, Signifikanzniveau: 0.05*)

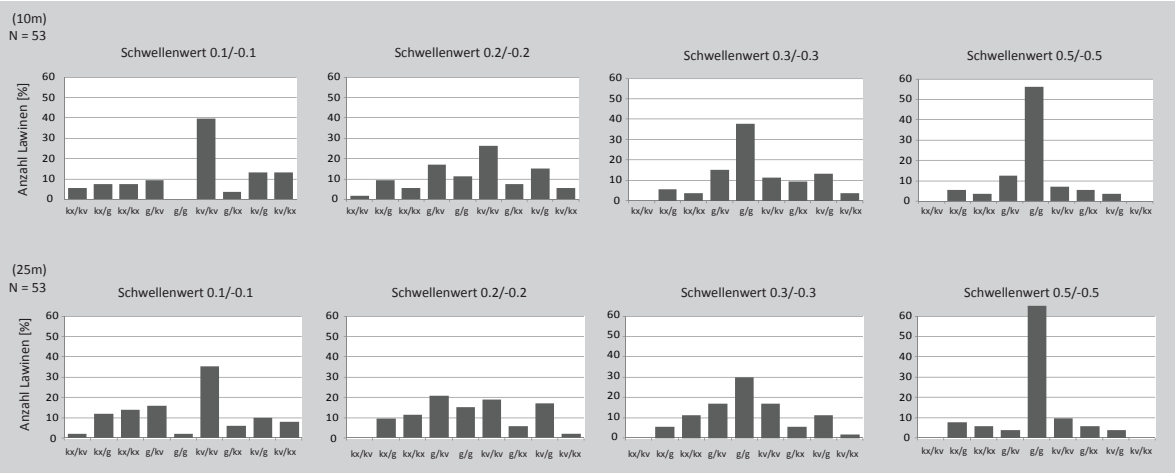


Abb.5.13: Einfluss verschiedener Schwellenwerte auf die Häufigkeitsverteilung der Geländeform im Anrissgebiet unter Verwendung der Schwellenwertpaare 0.1/-01, 0.2/-0.2, 0.3/-0.3 und 0.5/-0.5 und zwei verschiedenen räumlichen Auflösungen (N = 53); oben: ADS-DOM (10 m), unten: DHM25 (25 m)

5.2.2 Rauigkeit

Die durchschnittliche Rauigkeit der Geländeoberfläche wurde mittels der Methode von Sappington et al. (2007) für alle Anrissgebiete des Untersuchungsgebietes berechnet. Dabei wurden auch jene zwei Anrissgebiete in die Berechnung mit einbezogen, die sich teilweise in bewaldeter Region befinden. Dies ermöglichte es zu testen, wie sich die teilweise vorhandene Bewaldung im Parameter Rauigkeit widerspiegelt.

Die Hälfte der Unfalllawinen im Untersuchungsgebiet weisen eine durchschnittliche Rauigkeit zwischen 0.001 und 0.004 in ihren Anrissen auf. Das lässt sich gemäss Klassierung der Rauigkeitswerte mit einer geröllbedeckten, leicht unebenen Geländeoberfläche vergleichen (vgl. Abb.5.14). Sehr raue, felsige oder bewaldete Geländeoberflächen sind in den Anrissgebieten der Unfalllawinen seltener.

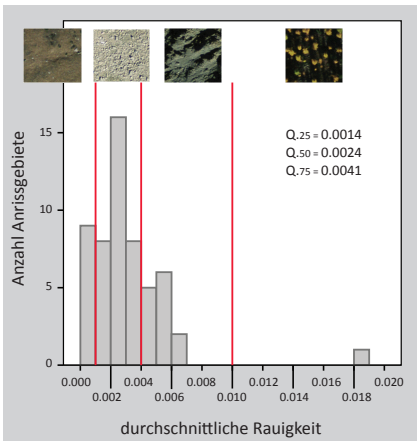


Abb.5.14: Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Rauigkeit in den Anrissen des Untersuchungsgebietes (N= 55)

5.2.3 Exponiertheit

Zusätzlich zur Exposition und der Kammnähe wurde der Parameter Exponiertheit basierend auf Zimmermann (2000) berechnet (vgl. Kap.4.3.4). Die durchschnittliche Exponiertheit wurde sowohl für die Anrissgebiete als auch für die Zonen rund um die Anrissstirn flächenhaft ausgewertet. Anhand der Werte für die Exponiertheit kann erkannt werden, ob sich das Anrissgebiet am Hangfuss, in einer Muldenlage, in der Hangmitte oder in einer Rücken- bzw. Kammlage befindet. Für die Klassierung wurden vier Klassen verwendet mit folgenden Schwellenwerten: Hangfusslage (<=-150), Muldenlage (-150 bis -50), Hangmitte (-50 bis 50), Kammlage (> 50).

Die meisten Anrissgebiete liegen gemäss Klassierung weder an einem Hangfuss noch auf einem Rücken, sondern in der Hangmitte. Bei über der Hälfte der Lawinen ist der Wert für die Exponiertheit in den Anrissgebieten durchschnittlich negativ. Rund um die Anrissstirn sind die Lawinen jedoch in den meisten Fällen positiv exponiert. Dieser Anstieg der Exponiertheit zur Anrissstirn deutet darauf hin, dass viele Anrissgebiete in unmittelbarer Nähe zu einer exponierten Stelle, einem Rücken oder Kamm liegen (vgl. Abb.5.15).

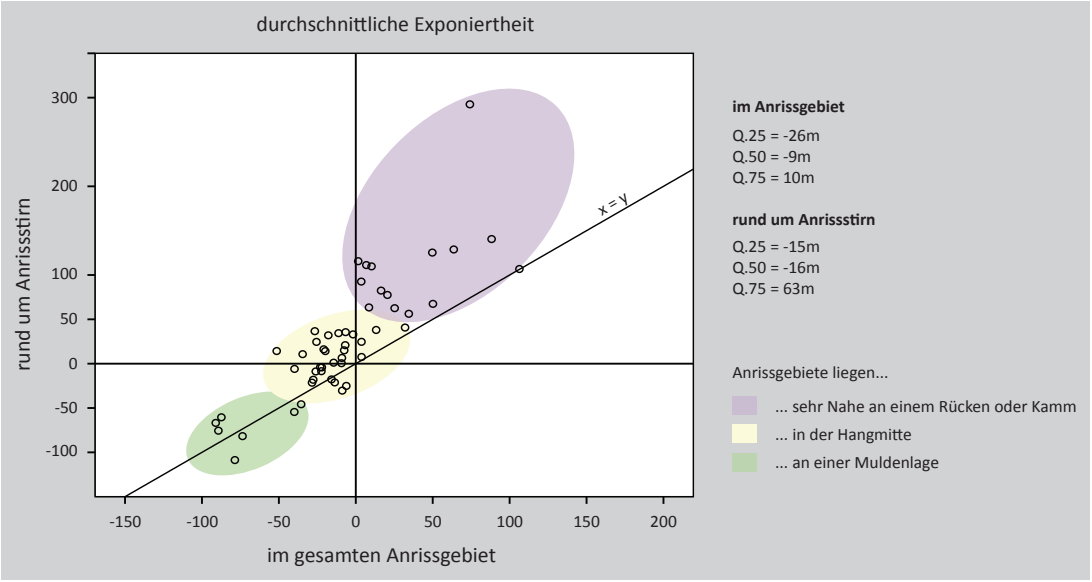


Abb.5.15: Verteilung der durchschnittlichen Exponiertheit
im gesamten Anrissgebiet und rund um die Anrissstirn (N = 52)

5.2.4 Hangneigung

Spricht man im Zusammenhang mit einer Lawine von Hangneigung, so ist meistens die steilste Stelle innerhalb des Anrissgebietes gemeint und wurde im Feld geschätzt oder auf einer topografischen Karte gemessen. Für das automatische Herleiten der Hangneigung der Lawinen wurden in dieser Arbeit zwei verschiedene Methoden und vier unterschiedliche Zonen verwendet. Es wurde die maximale Hangneigung sowie die durchschnittliche Hangneigung innerhalb der Anrissgebiete und innerhalb drei verschiedener Zonen der Anrissgebiete (Anriss oben, Anriss mitte, Anriss unten) berechnet. Das ermöglichte es, die räumliche Verteilung der Hangneigung innerhalb der Anrissgebiete genauer zu untersuchen. Weiter wurde die Hangneigung auf zwei verschiedenen DHM berechnet, um den Einfluss der räumlichen Auflösung zu beurteilen.

Verteilung der Hangneigung in den Anrissgebieten

Die durchschnittliche Hangneigung in den Anrissgebieten liegt für eine räumliche Auflösung von 10 m zwischen 25 und 45 Grad, die maximale Hangneigung zwischen 30 und 60 Grad (vgl. Abb.5.16). Für die Hälfte der Anrissgebiete liegt die durchschnittliche Hangneigung zwischen 33 und 38 Grad, was einer steilen bis sehr steilen Hangneigung entspricht. Die Standardabweichung der Hangneigung innerhalb der Anrissgebiete ist im Mittel 2.8 Grad. Das deutet darauf hin, dass die Hangneigung innerhalb der Anrissgebiete bei den meisten Lawinen relativ homogen ist.

Die Verteilung der maximalen Hangneigung zwischen den Zone Anriss oben, Anriss mitte und Anriss unten lässt erkennen, dass bei 75 % der Anrissgebiete die Hangneigung in Fliessrichtung abnimmt. Das bestätigt das Ergebnis der Kurvatur, wonach viele Unfalllawinen eine konkave Profilkurvatur in ihren Anrissgebieten aufweisen. Auch die durchschnittlichen Hangneigungen nehmen ab, jedoch nicht gleich stark. Diejenigen Anrissgebiete, welche in den ersten 50 m (Anriss oben --> Anriss mitte) eine Zunahme der maximalen oder durchschnittlichen Hangneigung verzeichnen, haben meistens eine konvexe Profilkurvatur oder weisen eine Steilstufe innerhalb der Anrissgebiete auf (vgl. Abb.5.17).

Die Verteilung der Hangneigung in den Anrissgebieten lässt sich mithilfe von Scatterplots relativ gut abbilden. Der Schwachpunkt liegt in der Methode der Zonierung. Je nach Grösse der Lawinen müssten unterschiedlich grosse Zonen gewählt werden, damit für alle Lawinen dieselbe Anzahl Zonen entstehen. Auch spielte die Topografie einen wichtigen Einfluss in der Entstehung der Zonen. Für einige Lawinen mit komplexer Topografie wurden bei der Erstellung der Zonen unbefriedigende Resultate erzielt. Eine flächenhafte, visuelle Darstellung der Hangneigung lässt eventuell einen genaueren Einblick über die Verteilung der Hangneigung innerhalb der Anrissgebiete zu (vgl. Anhang C).

Einfluss Auflösung

Die mittleren Werte für die durchschnittliche und die maximale Hangneigung in den Anrissgebieten sind sowohl für die räumliche Auflösung von 10 m als auch für 25 m ähnlich (vgl. Abb.5.18). Die Werte zwischen den beiden Inputhöhenmodellen weisen für die durchschnittliche Hangneigung ($r = 0.882$) sowie die maximale Hangneigung ($r=0.909$) eine hohe positive Korrelation auf. Dabei sind sowohl für die durchschnittliche als auch für die maximale Hangneigung die Werte für die höhere Auflösung (10m) grösser. Das wurde auch so erwartet und deckt sich mit Aussagen von Thompson (2001), Chang & Tsai (1991), Wolock & Price (1994) und Zhang & Montgomery (1994) und Thieken et al. (1999). Dieser Unterschied in der Hangneigung zwischen den DHM ist vor allem im Bereich unter 30 Grad interessant. In Skitourenkarten der Schweiz werden potentielle Lawinenhänge (Hangneigung > 30 Grad) mittels eines 25 m Rasters eingefärbt. Anrissgebiete, welche eine tiefere maximale Hangneigung für die 25 m Auflösung aufwiesen, ereigneten sich ausserhalb dieser Einfärbung. Somit wurden diese Hänge wahrscheinlich bei der Gefahrenbeurteilung auf der Karte falsch eingestuft. Für das Untersuchungsgebiet war dies für vier der 53 Unfalllawinen der Fall. Es handelt sich dabei um relativ kleine Lawinen (Lauflänge 50 – 280 m), die sich in drei Fällen in einem Gelände mit konvexer Profilkurvatur ereigneten (siehe Kapitel 6.2.2).

Vergleich mit Werten aus der Literatur

Die Hangneigungswerte, welche durch die flächenhafte Auswertung zu Stande kamen, sind vergleichbar mit verschiedenen Angaben in der Literatur und können diese bestätigen. Nach McClung & Schaerer (1993) liegt bei zwei Drittel der Schneebrettlawinen die Hangneigung zwischen 30 und 45 Grad. In den hier präsentierten Resultaten liegen 70 % der maximalen Hangneigungen und 90 % der durchschnittlichen Hangneigungen in diesem Bereich. Auch zeitlich zeigen sich die Werte für die Hangneigung einer Unfalllawine stabil. Harvey (2002) erhielt für die Winter 1987/88 bis 1998/99 einen Wert von 39 Grad für die steilste Hangpartie einer Schneebrettlawine in der Schweiz.

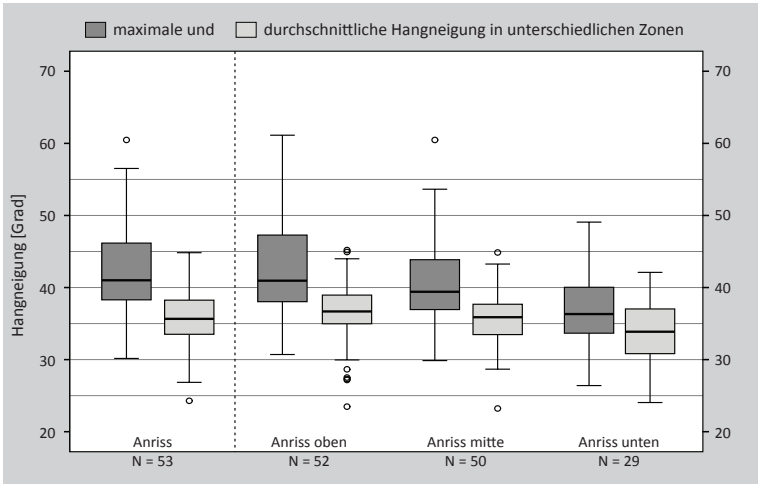


Abb.5.16: Verteilung der maximalen und durchschnittlichen Hangneigung in unterschiedlichen Zonen der Anrissgebiete (ADS-DOM, 10 m)

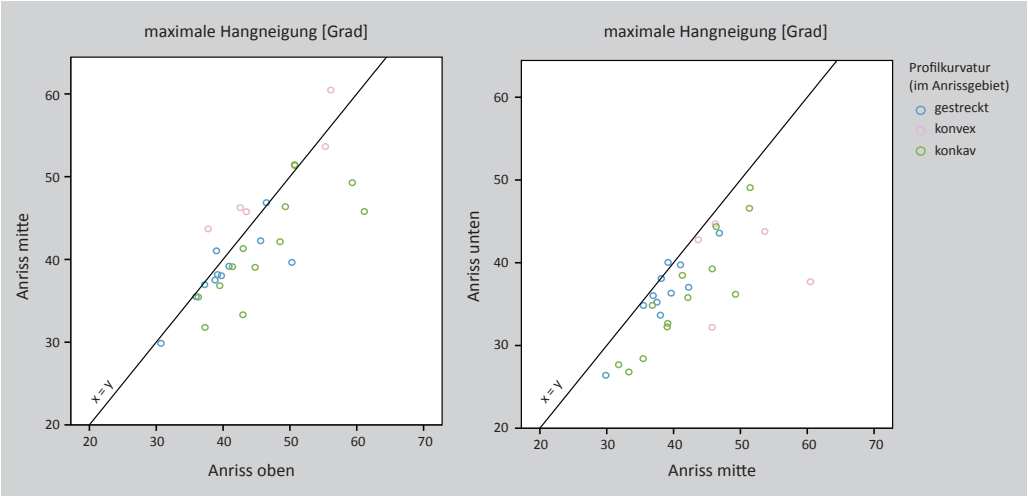


Abb.5.17: Vergleich der maximalen Hangneigung zwischen verschiednen Zonen
links: zwischen den Zonen Anriss oben – Anriss mitte (N=50)
rechts: zwischen den Zonen Anriss mitte – Anriss unten (N=29).
Einfärbung nach der durchschnittlichen Profilkurvatur im gesamten Anrissgebiet

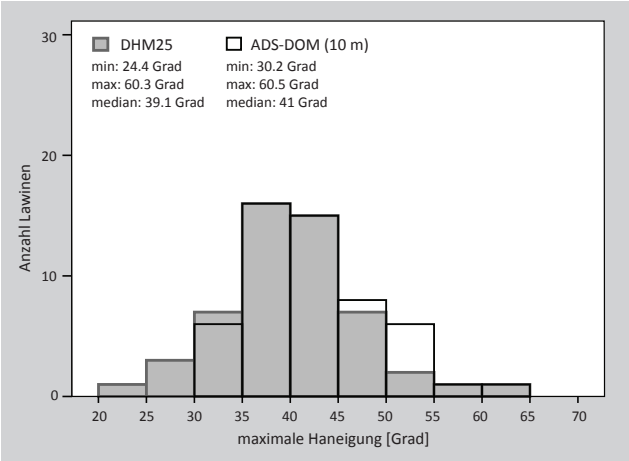


Abb.5.18: Vergleich der max. Hangneigung zwischen DHM25 (25 m) und ADS-DOM (10 m) in den Anrissen des Untersuchungsgebietes (N = 53)

5.3 Zusammenhang zwischen den Geländeeigenschaften

Um allfällige Zusammenhänge zwischen den verschiedenen flächenhaft ausgewerteten Geländeeigenschaften im Anrissgebiet und zwischen diesen und der Anrissmächtigkeit der Unfalllawinen zu entdecken, wurde eine explorative Herangehensweise gewählt. Mithilfe von interaktiven Grafiken wurden die verschiedenen Geländeeigenschaften innerhalb der Anrisse und der Zone „Anriss oben" nebeneinander dargestellt und nach Mustern gesucht. Die gefundenen Muster dienten als Grundlage für Hypothesen, welche danach genauer analysiert und überprüft wurden.

5.3.1 Hypothesenbildung

Im Allgemeinen war auf den interaktiven Grafiken zu erkennen, dass der Parameter Exponiertheit mit der Profil- und Plankurvatur eine enge Verwandtschaft aufweist. Das war zu erwarten, denn sie messen ähnliche Geländeeigenschaften. Die Lage am Hangfuss oder in einer Mulde beispielsweise (negative Exponiertheitswerte) geht meistens einher mit einer konkaven Profilkurvatur bzw. Plankurvatur. Weiter war zu erkennen, dass viele Unfalllawinen in den Anrissgebieten ein ähnliches Muster an Geländeeigenschaften aufweisen (vgl. Abb.5.19). In der „Paralleler Koordinaten"- Darstellung kann ein Band eingezeichnet werden, welches für viele der Unfalllawinen Gültigkeit hat. So war für alle Lawinen die maximale und die durchschnittliche Hangneigung grösser als 30 Grad, 66 % davon hatten zudem eine konkave oder gerade Profil- und Plankurvatur. Davon lagen weitere 63 % näher als 200 m vom nächsten Kamm entfernt.

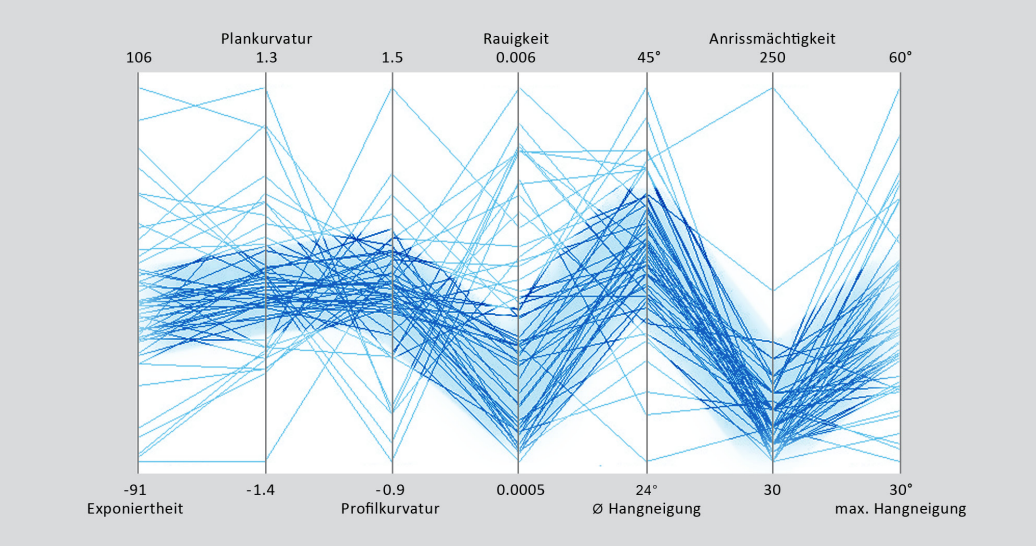


Abb.5.19: Muster der Verteilung der durchschnittlichen Geländeeigenschaften in den Anrissgebieten visualisiert mittels „Paralleler Koordinaten"-Darstellung (jede y-Achse widerspiegelt die Werteverteilung einer Geländeeigenschaft, jede Linie entspricht einem Anrissgebiet, N = 53)

Im Speziellen war ein Muster erkennbar, das auf einen Zusammenhang zwischen den Geländeeigenschaften Profilkurvatur, Rauigkeit und Hangneigung hindeutet. Anrissgebiete mit einer unterdurchschnittlichen Profilkurvatur wiesen häufig überdurchschnittliche Werte für die Plankurvatur und die Rauigkeit auf (vgl. Abb.5.20 oben). Ein Zusammenhang zwischen der Anrissmächtigkeit und den verschiedenen Geländeeigenschaften konnte nicht festgestellt werden. So verteilten sich beispielsweise die Eigenschaften der Anrissgebiete von Unfalllawinen mit einer unterdurchschnittlichen Anrissmächtigkeit über den ganzen Wertebereich (vgl. Abb.5.20 unten). Anhand der gefunden Muster wurden folgende Hypothesen aufgestellt:

1. Der Parameter Exponiertheit, wie er in dieser Arbeit berechnet wurde, widerspiegelt sich in der Profil- und der Plankurvatur und bringt keinen Mehrwert.
2. Unfalllawinen mit konvexer Profilkurvatur im Anrissgebiet befinden sich in einem Gelände mit relativ unregelmässiger Oberfläche.
3. Unfalllawinen mit konvexer Profilkurvatur im Anrissgebiet weisen eine eher hohe maximale Hangneigung auf.
4. Die Geländeeigenschaften des Anrissgebietes stehen in keiner Beziehung mit der Anrissmächtigkeit.

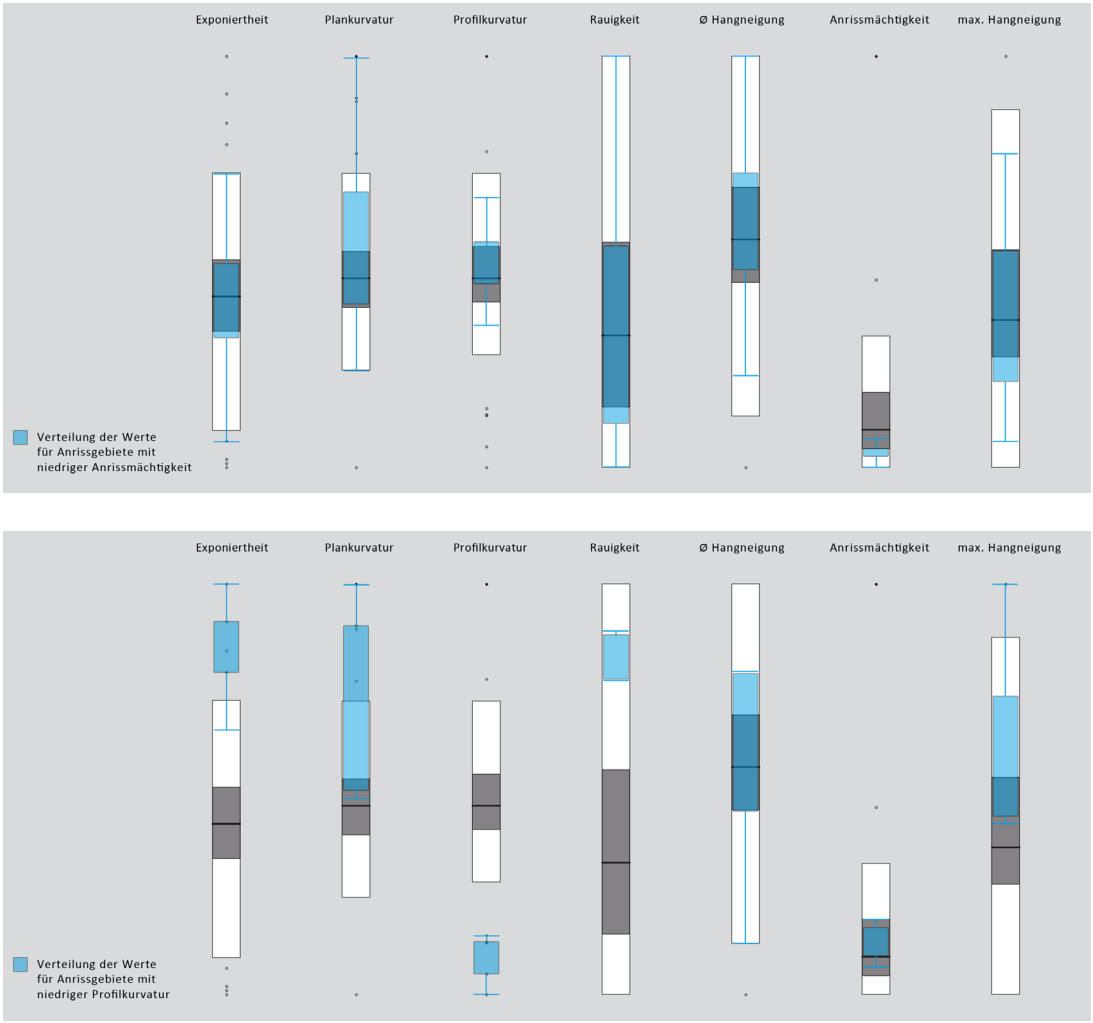


Abb.5.20: Muster von Zusammenhängen zwischen den Geländeeigenschaften und der Anrissmächtigkeit
dargestellt sind Boxplots der Werteverteilung der Geländeeigenschaften (grau-weiss) und darüber Boxplots für die Werteverteilung ausgewählter Lawinen (blau)
oben: die ausgewählten Lawinen weisen eine niedrige Anrissmächtigkeit auf
unten: die ausgewählten Lawinen haben in ihrer Anrissgebieten eine niedrige Profilkurvatur

5.3.2 Zusammenhang Kurvatur – Exponiertheit und Kurvatur - Rauigkeit

Die Abhängigkeit der Parameter Profil- und Plankurvatur mit der Exponiertheit ist auch statistisch nachweisbar. Die durchschnittliche Profilkurvatur weist eine hohe negative Korrelation zur durchschnittlichen Exponiertheit auf. Die durchschnittliche Plankurvatur weist eine hohe positive Korrelation zur

durchschnittlichen Exponiertheit auf (vgl. Tab.5e). Die Hypothese 1 hat sich somit bestätigt. Der Parameter Exponiertheit, wie er in dieser Arbeit berechnet wurde, ist für die Anrissgebiete der Profil- wie auch der Plankurvatur sehr ähnlich. Das positive daran ist, dass die Lage bzw. Geländeform der Anrissgebiete durch zwei unterschiedliche Methoden ähnlich beurteilt wurde.

Ein Zusammenhang zwischen der Kurvatur und der Rauigkeit konnte mittels Korrelationsanalyse nur für die Zone „Anriss oben" statistisch nachgewiesen werden. Bei konvexer Plankurvatur rund um die Anrissstirn ist demnach eine höhere Geländerauigkeit in der Zone „Anriss oben" zu erwarten. Die Hypothese 2 konnte in diesem Sinne nicht bestätigt werden. Da jedoch nur wenige Unfalllawinen im Untersuchungsgebiet eine konvexe Profilkurvatur im Anrissgebiet aufwiesen, wäre es eventuell interessant, diesen Zusammenhang nochmals mit mehr Stichproben zu untersuchen.

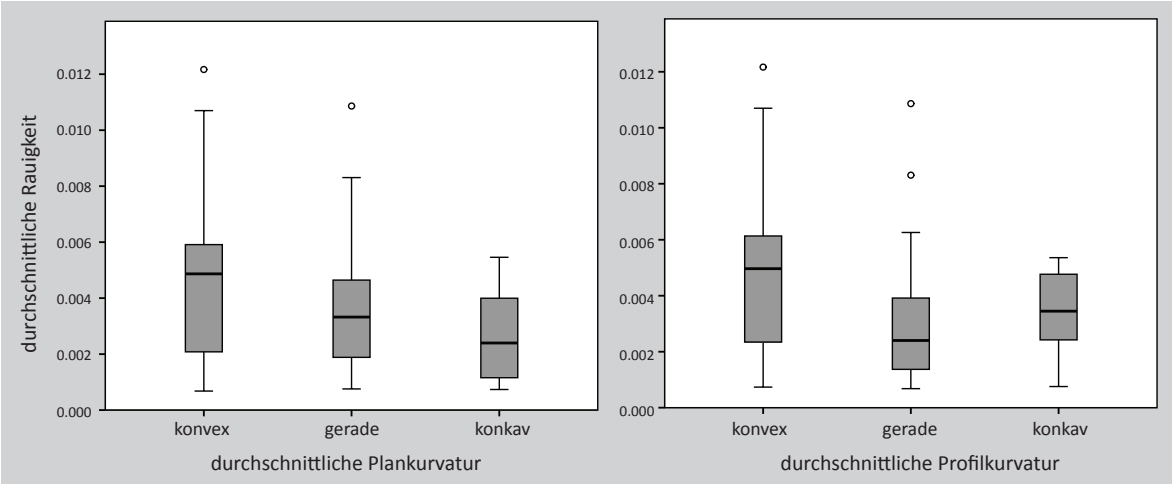


Abb.5.21: Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Rauigkeit und der durchschnittlichen Kurvatur in der Zone „rund um Anrissstirn" (Kurvatur) und „Anriss oben" (Rauigkeit), N=52
links: Abhängigkeit Rauigkeit – Plankurvatur, rechts: Abhängigkeit Rauigkeit – Profilkurvatur

Zone	**Getestete Zusammenhänge**	**Korrelationskoeffizient:** Rp= Pearson, Rs= Spearman	**p-Wert,** Signifikanzniveau: 0.01**,0.05*
Anriss (N=53)	Profilkurvatur - Exponiertheit	Rp = -0.803	0.000**
	Profilkurvatur - Rauigkeit	Rs = -0.122	0.384
	Plankurvatur - Exponiertheit	Rp = 0.742	0.000**
	Plankurvatur – Rauigkeit	Rs = 0.208	0.135
	Exponiertheit - Rauigkeit	Rs = 0.240	0.083
Anriss oben[1] (N=52)	Profilkurvatur - Exponiertheit	Rp = -0.889	0.000**
	Profilkurvatur - Rauigkeit	Rs = -0.270	0.053
	Plankurvatur - Exponiertheit	Rp = 0.851	0.000**
	Plankurvatur – Rauigkeit	Rs = 0.325	0.019*
	Exponiertheit - Rauigkeit	Rs =0.354	0.010*

Tab.5.e: Abhängigkeit zwischen Kurvatur, Rauigkeit und Exponiertheit
[1] Für die Kurvatur wurde anstatt die Zone Anriss oben, die Zone rund um Anrissstirn verwendet.
Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurde, je nach Verteilung der Inputdaten und Vermutung über die Beziehung, der Korrelationskoeffizient nach Pearson (beide Datensätze sind normalverteilt, es wird eine lineare Beziehung vermutet) oder nach Spearman (parameterfreies Mass) verwendet.

5.3.3 Zusammenhang Hangneigung – Rauigkeit und Hangneigung - Kurvatur

Der Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Rauigkeit und der Kurvatur wurde sowohl für die maximale als auch die durchschnittliche Hangneigung untersucht.

Die Abhängigkeit zwischen der maximalen Hangneigung und der Rauigkeit im Anrissgebiet ist statistisch nachweisbar (vgl. Tab.5.f). Ein Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Hangneigung und der Geländerauigkeit ist nicht feststellbar. Eine höhere Geländerauigkeit ist verbunden mit einer höheren maximalen Hangneigung in den Anrissgebieten (vgl. Abb.5.22 links). Das deutet darauf hin, dass hohe Geländerauigkeiten häufiger in Anrissgebieten mit einer oder mehreren extrem steilen Geländeabschnitten zu finden sind, jedoch nicht unbedingt in durchschnittlich steileren Hängen. Ob das einen relevanten Zusammenhang hinsichtlich der Auslösung einer Schneebrettlawine darstellt, ist schwierig zu beurteilen. Es ist zum Beispiel denkbar, dass eine raue Geländeoberfläche vor allem in extrem steilen Geländeabschnitten, wo aufgrund der Schwerkraft tendenziell weniger Schnee liegt, die Auslösung von Schneebrettlawinen begünstigt.

Der Zusammenhang zwischen der durchschnittlichen Profilkurvatur und der maximalen Hangneigung ist für die Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet nicht statistisch signifikant (vgl. Tab.5.f). Werden jedoch die Werte der Profilkurvatur in drei Klassen (konvex, konkav, gestreckt) gruppiert, ergibt sich eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der maximalen Hangneigung und der Profilkurvatur. Anrissgebiete mit einer konvexen Profilkurvatur weisen für das Untersuchungsgebiet einen höheren Mittelwert für die maximale Hangneigung auf als Anrissgebiete mit gestreckter Profilkurvatur (vgl. Abb.5.22 rechts). Da jedoch nur wenige Unfalllawinen im Untersuchungsgebiet eine konvexe Profilkurvatur im Anrissgebiet aufwiesen, ist dieser Zusammenhang mit Vorsicht zu geniessen und sollte noch mit mehr Stichproben verifiziert werden. Die Hypothese 3, dass Unfalllawinen mit konvexer Profilkurvatur im Anrissgebiet eine eher hohe maximale Hangneigung aufweisen, kann zwar statistisch bestätigt werden, jedoch ist der Zusammenhang nicht sicher und bedarf noch weiterer Untersuchungen. Ein statistisch klar signifikanter Zusammenhang konnte zwischen der maximalen Hangneigung und der durchschnittlichen Rauigkeit festgestellt werden.

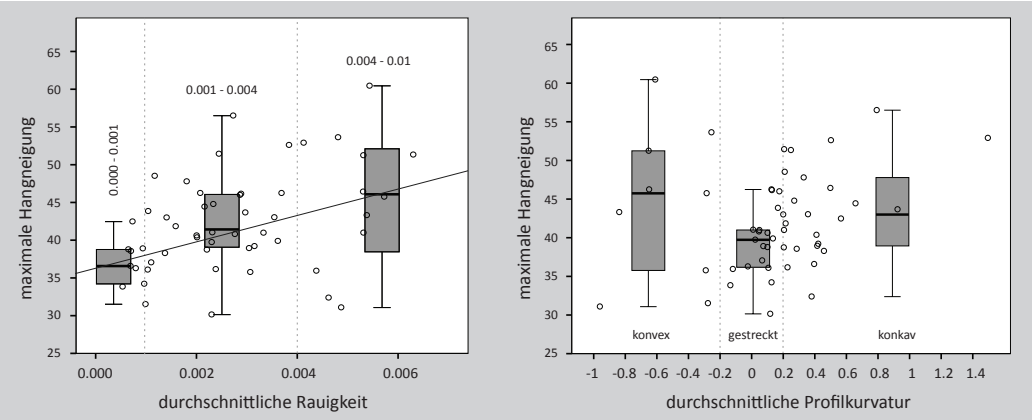


Abb.5.22: Zusammenhang zwischen maximaler Hangneigung und Rauigkeit bzw. Profilkurvatur
links: Abhängigkeit zwischen der durchschnittlichen Rauigkeit und der maximalen Hangneigung
rechts: Abhängigkeit der Profilkurvatur und der maximalen Hangneigung
(in den Anrissgebieten des Untersuchungsgebietes, N=53)

Weiter konnte eine statistisch signifikante Korrelation zwischen der durchschnittlichen Hangneigung in der Zone „Anriss oben“ und der durchschnittlichen Profilkurvatur in der Zone „rund um die Anrissstirn“ festgestellt werden. Eine konkave Profilkurvatur rund um die Anrissstirn ist dabei verbunden mit einer höheren durchschnittlichen Hangneigung in der Zone „Anriss oben“. Dies muss jedoch nicht zwingend bedeuten, dass die Lawinen sich erst bei einer höheren Hangneigung gelöst haben, sondern könnte auch darauf hindeuten, dass sich der Riss in der Schneedecke hangaufwärts weiter ausbreiten konnte. Die Hangneigung, welche für die Auslösung der Lawine verantwortlich war, befindet sich für konvexe Profilkurvaturen eventuell erst weiter hangabwärts in der Zone „Anriss unten“. Es ist also wahrscheinlich, dass es sich bei dieser Korrelation vielmehr um einen logischen Zusammenhang zwischen der Form der Kurvatur und der Hangneigung handelt.

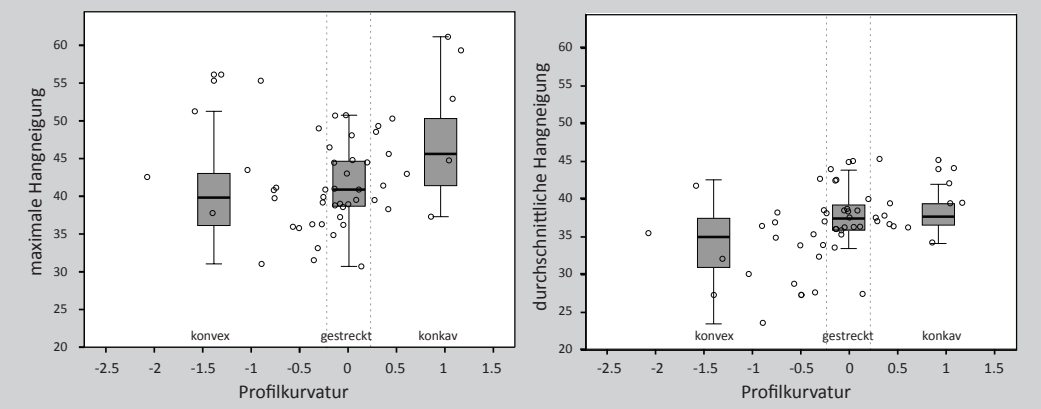


Abb.5.23: Zusammenhang zwischen maximaler Hangneigung und der durchschnittlichen Kurvatur in den Zonen „Anriss oben“ im Untersuchungsgebiet, N=52
links: Abhängigkeit der ø Profilkurvatur und der max. Hangneigung
rechts: Abhängigkeit der ø Profilkurvatur und der ø Hangneigung

Zone	**Getestete Zusammenhänge**	**Korrelationskoeffizient:** Rs= Spearman, Rk= Kendalls Tau	**p-Wert,** Signifikanzniveau: 0.01**,0.05*
Anriss (N=53)	Ø Hangneigung – Profilkurvatur	Rs = 0.232	0.094
	Ø Hangneigung – Plankurvatur	Rs = -0.075	0.592
	Ø Hangneigung – Rauigkeit	Rs = 0.244	0.079
	Ø Hangneigung – Exponiertheit	Rs = -0.030	0.833
	max Hangneigung – Profilkurvatur	Rs = 0.221	0.112
	max Hangneigung – Profilkur. (grup.)	Rk= 0.243	0.027*
	max Hangneigung – Plankurvatur	Rs = -0.047	0.739
	max Hangneigung – Rauigkeit	Rs = 0.417	0.002**
	max Hangneigung – Exponiertheit	Rs = -0.088	0.531
Anriss oben [1] (N=52)	Ø Hangneigung – Profilkurvatur	Rs = 0.438	0.001**
	Ø Hangneigung – Plankurvatur	Rs = -0.251	0.073
	Ø Hangneigung – Rauigkeit	Rs = 0.182	0.197
	Ø Hangneigung – Exponiertheit	Rs = -0.324	0.019*
	max Hangneigung – Profilkurvatur	Rs = 0.258	0.065
	max Hangneigung – Profilk. (grup.)	Rk = 0.174	0.110
	max Hangneigung – Plankurvatur	Rs = -0.119	0.402
	max Hangneigung – Rauigkeit	Rs = 0.489	0.000**
	max Hangneigung – Exponiertheit	Rs = -0.161	0.254

Tab.5.f: Abhängigkeit zwischen Ø und max. Hangneigung mit der Kurvatur, der Rauigkeit und der Exponiertheit
[1] Für die Kurvatur wurde anstatt die Zone Anriss oben, die Zone "rund um Anrissstirn" verwendet.
Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurde für die intervallskalierten Inputdaten der nonparametrische Korrelationskoeffizient nach Spearman verwendet, für die gruppierten Profilkurvaturwerten Kendalls Tau.

5.3.4 Zusammenhang Anrissmächtigkeit – Geländeeigenschaften

Die durchschnittlichen Anrissmächtigkeiten der Unfalllawinen im Untersuchungsgebiet reichen von 30 cm bis 2,50 m. Der mittlere Wert liegt bei 50 cm. Eine signifikante Korrelation zu den Geländeeigenschaften der Anrissgebiete ist nicht vorhanden (vgl. Tab.5.g). Das bestätigt die Hypothese 4, dass die Geländeeigenschaften des Anrissgebietes in keiner Beziehung mit der durchschnittlichen Anrissmächtigkeit stehen.

Zone	**Getestete Zusammenhänge**	**Korrelationskoeffizient Rs**	**p-Wert,** Signifikanzniveau: 0.01**,0.05*
Anriss (N=53)	Anrissmächtigkeit – Profilkurvatur	-0.130	0.354
	Anrissmächtigkeit – Plankurvatur	-0.091	0.518
	Anrissmächtigkeit – Rauigkeit	0.106	0.449
	Anrissmächtigkeit – Exponiertheit	-0.025	0.857
	Anrissmächtigkeit – max Hangneigung	0.186	0.182
	Anrissmächtigkeit – Ø Hangneigung	-0.107	0.444
Anriss oben 1 (N = 52)	Anrissmächtigkeit – Profilkurvatur	-0.095	0.503
	Anrissmächtigkeit – Plankurvatur	0.037	0.796
	Anrissmächtigkeit – Rauigkeit	0.266	0.057
	Anrissmächtigkeit – Exponiertheit	0.026	0.853
	Anrissmächtigkeit – Ø Hangneigung	-0.093	0.514

Tab.5.g: Abhängigkeit zwischen Anrissmächtigkeit und Kurvatur, Rauigkeit, Exponiertheit und Hangneigung
[1] Für die Kurvatur wurde anstatt die Zone Anriss oben, die Zone "rund um Anrissstirn" verwendet.
Für die Berechnung des Korrelationskoeffizienten wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman (Rs) verwendet.

5.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zuerst die Resultate zur Grösse und Lage der Unfalllawinen und ihrer Anrissgebiete vorgestellt und mit bekannten Werten aus der SLDB, zwischen verschiedenen Methoden oder verschiedenen Auflösungen, verglichen. Es konnten bekannte Werte bestätigt werden und darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass verschiedene Zonen, Auflösungen (Exposition) und Methoden (Kammdistanz) keinen entscheidenden Einfluss auf die resultierenden Werte hatten.

Im zweiten Unterkapitel wurden die Resultate zu den flächenhaft ausgewerteten Geländeeigenschaften und ihre Verteilung innerhalb der Anrissgebiete des Untersuchungsgebietes vorgestellt. Es konnte festgestellt werden, dass die Anrissgebiete überdurchschnittlich oft konvexe oder gestreckte Profilkurvaturen rund um die Anrissstirn aufweisen, mehrheitlich gerade oder konkav in Fliessrichtung verlaufen, und eine gerade oder konkave Plankurvatur im gesamten Anrissgebiet aufweisen. Für 75 % der Anrissgebiete nimmt die Hangneigung in Fliessrichtung ab. Raue, felsige oder bewaldete Geländeoberflächen in den Anrissgebieten sind dabei eher selten. Deutlich zu erkennen war, dass für die Beurteilung der Geländeform weniger die Auflösung des Höhenmodells, sondern vielmehr die Wahl des Schwellenwertes einen entscheidenden Einfluss auf die Resultate hatte.

Im dritten Unterkapitel wurde der Zusammenhang zwischen den Geländeeigenschaften der Anrissgebiete untereinander und zur Anrissmächtigkeit untersucht. Es konnte erkannt werden, dass der Parameter der Exponiertheit dem Parameter der Profil- und Plankurvatur sehr ähnlich ist. Zudem konnte ein Zusammenhang zwischen einer hohen Geländerauigkeit und einer hohen maximalen Hangneigung im Anrissgebiet festgestellt werden. Kein Zusammenhang war auszumachen zwischen der Anrissmächtigkeit und den Geländeeigenschaften der Anrissgebiete.

„No snowflake
in an avalanche
ever feels responsible.”
Voltaire

Kapitel 6
Diskussion

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen, insbesondere ihrer Anrissgebiete, auf digitalen Höhenmodellen zu extrahieren und näher zu untersuchen. Zudem sollte der Einfluss der Eigenschaften des Höhenmodells auf die Resultate abgeschätzt werden.

Es wurde bis jetzt dargelegt, wie die Anrissgebiete als neue Datengrundlage erstellt wurden und zum Teil neue Methoden entwickelt oder genutzt wurden, um lawinenrelevante Geländeeigenschaften aus dem DHM abzuleiten. Zudem wurde eine Methode präsentiert, mittels der die Grösse (Länge und Breite) der Anrissgebiete automatisch abgeleitet werden konnte. Um die Qualität der verwendeten Methoden zu überprüfen, wurden die so erhaltenen Werte, wenn möglich, mit von Hand gemessenen Werten aus der SLDB vergleichen. Ebenso wurden die Ergebnisse für einige Geländeeigenschaften zwischen zwei verschiedenen Höhenmodellen verglichen, um den Einfluss der Auflösung auf die erhaltenen Werte abzuschätzen. Allfällige Zusammenhänge zwischen flächenhaft ausgewerteten Geländeeigenschaften untereinander und zur Anrissmächtigkeit wurden mittels Korrelationsanalysen untersucht. Die Resultate der Extraktion, der Vergleiche und der Analyse der Zusammenhänge wurden vorgestellt und haben erste Interpretationen erfahren.

Was nun bleibt, ist zu beurteilen, welche Ergebnisse bisherige Erkenntnisse bestätigen können und was neu und vielleicht unerwartet ist. Weiter ist es wichtig abzuschätzen, welche Eigenschaften der DHM die Resultate beeinflusst haben könnten und ob eine höhere Auflösung für die Lawinenforschung relevant ist oder nützlich sein kann. In diesem Kapitel werden diese Punkte aufgegriffen und es wird aufgezeigt, was an den genutzten Methoden verbessert werden könnte.

6.1 Eigenschaften der Unfalllawinen

Dank den vorhandenen Umrissen von Unfalllawinen aus der SLDB, den neu digitalisierten Anrissgebieten und einem hochaufgelösten DHM war es in dieser Arbeit möglich, Unfalllawinen und ihre Anrissgebiete quantitativ und flächenhaft auszuwerten. Das wurde in dieser Weise bis jetzt noch nicht gemacht. Nachfolgend werden die Ergebnisse anhand von vorhandener Literatur zu Unfalllawinen oder Schneebrettlawinen im Allgemeinen beurteilt.

6.1.2 Grösse und Lage

Länge und Breite

Die untersuchten Unfalllawinen aus den Winter 1999/2000 bis 2009/2010 wiesen eine mittlere Lauflänge von 270 m auf. Die Anrissgebiete hatten eine mittlere Länge von 85m und eine mittlere Breite von 65 m. Schweizer & Jamieson (2000), die 200 Unfalllawinen in der Schweiz und Kanada aus den Winter 1987/88 bis 1996/97 bzw. 1989/90 bis 1999/2000 untersuchten, stellten eine typische Anrissbreite von 20 – 50 m und Lauflänge von 100m fest. Harvey (2002) analysierte ca. 200 Unfalllawinen der Schweiz zwischen 1987/88 bis 1998/99 und beobachtete eine mittlere Breite von 60 m bzw. mittlere Lauflänge von 200 m. Die Grössenordnung der Unfalllawinen entspricht für alle Untersuchungen kleinen bis mittleren Lawinen, jedoch scheinen nach neusten Ergebnissen die Unfalllawinen eine leicht grössere Ausdehnung zu haben als bisher angenommen. Dies könnte jedoch auch auf die relative Genauigkeit der Digitalisierung der Lawinen zurückzuführen sein.

Höhe

Der durchschnittliche Wert für die maximalen Höhe der betrachteten Unfalllawinen liegt bei 2430 m ü.M.. Dieser Wert für die Winter 1999/2000 bis 2009/2010 lässt sich mit den von Harvey (2002) ermittelten Werten von 2440 m ü.M. für Lawinen, die sich bei „erheblicher" Lawinengefahr und 2560m ü.M. für Lawinen, die sich bei „mässiger" Lawinengefahr ereignet haben, vergleichen. Diese Werteverteilung liess sich alleine aufgrund der Höhenverteilung der Schweiz oder der Verteilung der potentiellen Lawinenhänge (Hangneigung zwischen 30 und 50 Grad) nicht erklären. Es wäre wahrscheinlich interessant, weitere Faktoren wie die Bewaldung oder die Schneesicherheit mit einzubeziehen, um diese spezifische Höhenverteilung der Unfalllawinen der Schweiz zu begründen.

Exposition

Die vorherrschenden Expositionen in den Anrissgebieten waren N, NO, NW und W. Sie waren auch im Vergleich mit der Verteilung der Expositionen in der Schweiz deutlich übervertreten. Diese mehrheitlich nördlich exponierten Lagen von Unfalllawinen bestätigen Ergebnisse von Schweizer & Jamieson (2000) sowie Harvey (2002). Es sind die sogenannten Schattenhänge, welche im Winter wenig bis keine direkte Sonneneinstrahlung erhalten. Gemäss McClung & Schaerer (1993) stabilisiert sich an diesen Lagen die Schneedecke nur langsam und tendiert zu Schwachschichten, wie Schwimmschnee und Oberflächenreif. Ihre Stabilität nimmt gegen Frühling mit dem Temperaturanstieg zu. Warum aber gerade im Spätwinter für einen Grossteil der Unfalllawinen eine nördliche Exposition festgestellt werden konnte, liegt wahrscheinlich daran, dass mehr Nordhänge befahren werden. Sonnenhänge werden eher gemieden, da dort im Spätwinter und im Frühjahr die Gefahr von Nassschneelawinen steigt (McClung & Schaerer, 1993). Gemäss Munter (2003) werden auch generell mehr nördlich exponierte Hänge befahren, da dort die bevorzugten Schneeverhältnisse zu finden sind.

Kammdistanz

Die Kammdistanz der Unfalllawinen wurde anhand von zwei verschiedenen Methoden extrahiert und lag für die betrachteten Lawinen beide Male im Mittel unter 200 m. Dieses Ergebnis stützt die Aussage von Schweizer & Lütschg (2001), wonach sich 52 % der Unfalllawinen in Kammnähe ereignen. Obwohl eine Kammlage nicht durch eine Distanz definiert wird (EAWS, 2011), ist es wahrscheinlich, dass sich kleinere Distanzen als 200m innerhalb dieses Übergangs vom extremen Steilgelände ins Steilgelände befinden. Somit bestätigt sich die Vermutung, dass sich Unfalllawinen oft in Kammnähe ereignen. Eine Ursache dafür sind wahrscheinlich die Schneeverhältnisse an Kammlagen, welche oft durch Windverfrachtungen geprägt sind.

An den Lee-Seiten der Kämme befinden sich sehr häufig Triebschneehänge mit kohäsiven Schneeschichten, die für die Auslösung einer Schneebrettlawine förderlich sind (McClung & Schaerer, 1993).

6.1.3 Geländeform und –beschaffenheit

Kurvatur & Exponiertheit

Die betrachteten Anrissgebiete für die Winter 1999/2000 bis 2009/2010 wiesen überdurchschnittlich oft eine konvexe oder gestreckte Profilkurvatur (75 %) rund um die Anrissstirn auf und verliefen gerade oder konkav in Fliessrichtung (83 %). Die Plankurvatur war ebenfalls meistens gerade oder konkav (83 %). Das deutet darauf hin, dass die meisten Unfalllawinen entweder unterhalb einer Kuppe/eines Grates oder in der Mitte eines Hanges liegen und dass sie sich in einem Gelände ereignen, das sowohl in Querrichtung als auch in Fliessrichtung relativ gerade oder konkav ist. Auch die Ergebnisse für den Parameter Exponiertheit bestätigten diese Vermutung. So lagen die meisten Lawinen in der Hangmitte, jedoch in unmittelbarer Nähe zum nächsten Rücken oder Kamm.

Bis jetzt sind noch keine quantitativen Studien über die Kurvatur von Unfalllawinen vorhanden, die für einen Vergleich beigezogen werden könnten. Jedoch konnten bei Jamieson & Geldsetzer (1996), Schweizer & Lütschg (2001) und Harvey (2002) Aussagen über die Geländeform bzw. Geländeobjekte von Unfalllawinen gefunden werden, welche auf Feldmessungen beruhen. Harvey erwähnte in seiner Arbeit, dass Mulden und Runsen (d.h. konkave Plankurvatur) bei Unfalllawinen häufig anzutreffen sind. Jamieson & Geldsetzer beschrieben konvexe Profilkurvatur als anfälliger für Unfalllawinen. Beide Aussagen können durch die präsentierten Resultate bestätigt werden. Es muss aber davon ausgegangen werden, dass die Auslösung der Lawine nicht direkt auf einer Kuppe oder eines Grates erfolgt, sondern in geringem Abstand unterhalb. So ereigneten sich viele Lawinen (26 %) in unmittelbarer Nähe zum nächsten Rücken oder Kamm, wiesen aber innerhalb der Anrissgebiete eine konkave Profil- und Plankurvatur auf. Grundsätzlich gilt, dass sich kein einfacher Merksatz formulieren lässt, sondern verschiedene Geländesituationen für eine Lawinenauslösung in Frage kommen. Sowohl in relativ planaren Hängen als auch bei Übergängen von konvexen zu konkaven Formelementen sind Unfalllawinen häufig.

Hangneigung

Die maximale Hangneigung in den Anrissgebieten lag für die betrachteten Unfalllawinen im Mittel bei 41 Grad. Dieser Wert für die Winter 1999/2000 bis 2009/2010 ist praktisch identisch mit den Ergebnissen aus den Studien von Schweizer & Jamieson (2000), Schweizer & Lütschg (2001) und Harvey (2002), welche eine mittlere maximale Hangneigung von 39 Grad feststellten. In dieser Arbeit wurde zudem die durchschnittliche Hangneigung in den Anrissgebieten berechnet. Sie lag für die mittleren 50 % zwischen 33 und 38 Grad, was immer noch einer steilen bis sehr steilen Hangneigung entspricht. Neu wurde die Hangneigung auch in verschiedenen Zonen der Anrissgebiete ausgewertet und es konnte gezeigt werden, dass für 75 % der Unfalllawinen die maximale Hangneigung in Fliessrichtung abnimmt. Das passt wiederum gut mit den Erkenntnissen zu den häufig konkaven Profilkurvaturen in den Anrissgebieten zusammen. Es zeigt auch, dass die steilste Stelle der Unfalllawine meistens sehr nahe an der Anrissstirn liegt und nur wenige Lawinen zu einem späteren Zeitpunkt eine Steilstufe passieren.

Rauigkeit

Die Hälfte der betrachteten Unfalllawinen ereigneten sich in Gebieten mit einer geröllbedeckten, leicht unebenen Geländeoberfläche (Rauigkeit = 0.001 – 0.004). Für die Geländerauigkeit sind keine

Vergleichswerte aus anderen Studien für Unfalllawinen vorhanden. Für Lawinen in Waldrodungsgebieten untersuchte McClung (2001) die Geländerauigkeit anhand der Konturgrösse der vorhandenen Objekte. Er stellte fest, dass die Geländerauigkeit für 75 % der Lawinen im Bereich von 1 – 2 m lag, konnte jedoch keine eindeutigen Schlüsse aus den Ergebnissen ziehen. Dieses Resultat passt jedoch recht gut mit den hier erhaltenen Ergebnissen überein. Es wäre daher interessant, die Häufigkeit dieser Rauigkeitsklassen im potentiellen Lawinengelände zu untersuchen, um festzustellen, ob sich wirklich weniger Lawinen auf sehr rauen Geländeoberflächen ereignen oder ob diese einfach weniger vorhanden sind.

6.1.4 Zusammenhang zwischen Geländeeigenschaften

Die Ergebnisse für die einzelnen Geländeeigenschaften wiesen vielfach ein relativ klares Muster auf und konnten bisherige Vermutungen oder Ergebnisse aus Feldstudien bestätigen. Dem Zusammenhang zwischen den Eigenschaften wurde bis anhin wenig Beachtung geschenkt und es konnten keine Arbeiten gefunden werden, welche einen Vergleich der Resultate ermöglicht hätten.

Durch eine Darstellung der flächenhaft ausgewerteten Geländeeigenschaften mittels Paralleler Koordinaten konnte visuell erkennbar gemacht werden, dass die Unfalllawinen auch hinsichtlich mehrerer Eigenschaften ein Muster aufweisen. Und das, obwohl die einzelnen Eigenschaften nicht oder nur sehr schwach miteinander korrelieren. Bei den betrachteten Anrissgebieten, für welche die maximale und die durchschnittliche Hangneigung grösser als 30 Grad war, hatten 66 % zudem eine konkave oder gerade Profil- und Plankurvatur. Davon lagen weitere 63 % näher als 200 m vom nächsten Kamm entfernt.

Wenige Unfalllawinen hatten eine konvexe Profilkurvatur und/oder eine felsige oder buschige Geländeoberfläche (relativ grosse Rauigkeitswerte) innerhalb der Anrissgebiete. Diese wiesen aber im Mittel eine höhere maximale Hangneigung auf als Lawinen in regelmässigem oder geröllbedecktem Gelände und/oder gerader bzw. konkaver Profilkurvatur. Dieser Zusammenhang scheint zwar statistisch signifikant, kann aufgrund der geringen Anzahl Stichproben aber nicht definitiv bewiesen werden. Eine Vermutung ist, dass eine raue Geländeoberfläche vor allem in extrem steilen Geländeabschnitten, auf denen tendenziell weniger Schnee liegt, aufgrund der Schwerkraft die Auslösung von Schneebrettlawinen begünstigen könnte. So können grosse Blöcke als Stress Konzentratoren agieren und die Wahrscheinlichkeit von Rissen in der Schneedecke erhöhen, wenn sie genügend nahe an der Schneedeckenoberschicht liegen (McClung & Schaerer, 1993). Ein anderer möglicher Grund wäre auch, dass die Blöcke die Reibung zwischen den frischen Bruchflächen erhöhen und darum der Hang steiler sein muss bis das Schneebrett abgleitet

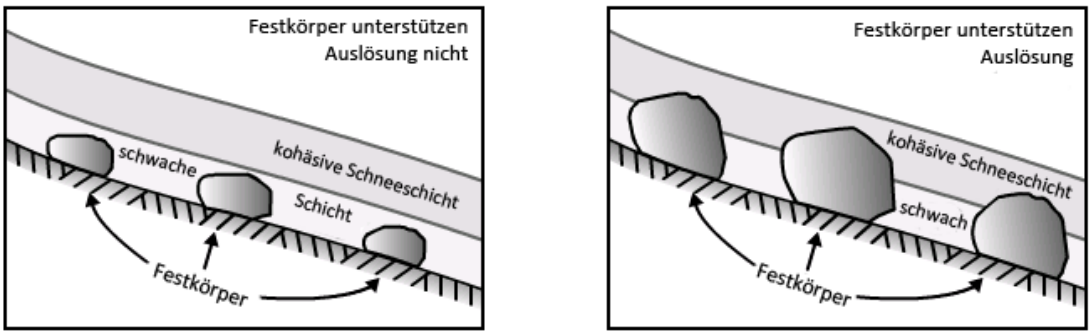


Abb.6.1: Einfluss Geländerauigkeit auf die Schneebrettauslösung
abgeändert nach: Avalanche Glossary (2011)

Ein Zusammenhang zwischen der Anrissmächtigkeit und der Geländeform konnte nicht festgestellt werden für die untersuchten Unfalllawinen. Die meisten wiesen eine ähnliche Anirssmächtigkeit zwischen 40 cm und 70cm auf und das unabhängig davon, welche Geländeform und Geländebeschaffenheit das Anrissgebiet hatte. Es ist darum wahrscheinlich, dass die Anrissmächtigkeit in erster Linie von dynamischen Faktoren wie den Schneeverhältnissen oder bestehenden Schwachschichten in der Schneedecke abhängig ist und nicht primär vom Gelände. Gruber & Bartelt (2007) beispielsweise simulierten für ihre Lawinenmodellierungen die Anrissmächtigkeit durch die Höhenlage und der Zugehörigkeit zu einer bestimmten klimatischen Region. Es wäre vielleicht interessant diesen Zusammenhang auch für Unfalllawinen zu untersuchen.

6.2 Einfluss der Eigenschaften der Höhenmodelle

Für diese Arbeit konnten zwei verschiedene Höhenmodelle verwendet werden. Das ermöglichte es, den Einfluss der Eigenschaften der DHM auf die Ergebnisse der Geländeanalyse zu untersuchen. Nachfolgend soll zuerst diskutiert werden, welche Eigenschaften der hier verwendeten DHM die Ergebnisse beeinflusst haben könnten. Danach werden die Resultate diskutiert, welche für den Vergleich der Inputmodelle für die Exposition, die Neigung sowie die Kurvatur zustande gekommen sind, und interessante Unterschiede genauer betrachtet.

6.2.1 Einflussfaktoren auf die Eigenschaften der DHM

Die verwendeten Höhenmodelle unterscheiden sich hinsichtlich folgender Kriterien voneinander: Herstellungsart, Art, Alter und Auflösung. Der Einfluss dieser Faktoren auf das DHM und die daraus folgenden Unterschiede zwischen den DHM soll nachfolgend kurz präsentiert werden.

Für das DHM25 sind keine grossen Fehler aufgrund der Herstellungsart zu erwarten. Die Qualität des DHM wird vom Hersteller als sehr gut eingestuft, die mittlere Abweichung in den Alpen beträgt nur rund 3 bis 8m (swisstopo, 2005). Das ADS-DOM musste erst noch vorprozessiert werden, um grobe Fehler und falsche Rauigkeit, welche aufgrund der Herstellungsart entstanden sind, zu korrigieren oder auszumaskieren. Die Qualität nach der Vorprozessierung wurde zwar nicht mittels Referenzdaten überprüft, konnte aber rein visuell als gut eingestuft werden. Darum sollte die Herstellungsart kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Höhenmodellen darstellen. Wichtiger ist der Unterschied in der Art des Höhenmodells. Beim DHM25 handelt es sich um ein Höhenmodell, welches die jeweilige Höhe der Bodenoberfläche abbildet. Das ADS-DOM ist ein Oberflächenmodell, das die natürliche oder künstliche Oberfläche abbildet. So wiederspiegelt die Höhe in Waldgebiete diejenige der Bäume und in Siedlungsgebiete diejenige der Gebäude, was zu grossen Höhenunterschieden zwischen den Inputmodellen führt. Der Altersunterschied der Höheninformation beträgt zwischen DHM25 und ADS-DOM je nach Region 6-9 Jahre. Für diese Zeitspanne sind aufgrund von Erosionsprozessen keine flächendeckenden Unterschiede im Gelände zu erwarten. In vergletscherten Gebieten können jedoch einige Jahre bereits zu grossen Unterschieden führen. Grosse Unterschiede aufgrund der Auflösung sind für qualitativ vergleichbare DHM vor allem in steilen Hangpartien zu erwarten.

Die Höhendifferenzen aufgrund der Unterschiede in der Art, des Alters und der Auflösung der DHM lassen sich auf einem Differenzbild gut erkennen und quantifizieren und bestätigen die hier formulierten Annahmen (vgl. Abb.6.2). Die mittlere Abweichung zwischen den Höhenmodellen liegt in der Region Zermatt bei 7 m, was auf eine gute Übereinstimmung schliessen lässt. Für eine Geländeanalyse weit wichtiger sind jedoch die Unterschiede in den abgeleiteten Geländeparametern. Die Unterschiede in der Neigung, der Kurvatur

und der Exposition zwischen den beiden verwendeten Höhenmodellen konzentrieren sich vor allem auf vergletscherte, bewaldete oder bebaute Gebiete, welche auf die Art und das Alter der Höheninformation zurückzuführen sind (vgl. Abb.6.2). Weiter lässt sich ein unterschiedliches Muster der Differenzen zwischen der Exposition und der Hangneigung bzw. der Kurvatur feststellen. Dies ist nicht auf die spezifischen DHM zurückzuführen, sondern kann durch Chang & Tsai (1991) auch im Allgemeinen bestätigt werden. Sie haben den Einfluss der Auflösung auf abgeleitete Geländeeigenschaften untersucht und festgestellt, dass die Unterschiede für die Hangneigung und die Kurvatur ein unterschiedliches räumliches Muster aufweist. Hangneigungsunterschiede konzentrieren sich vor allem auf steile Gebiete, Expositionsunterschiede sind hauptsächlich in flachen Regionen mit wenig komplexen Geländeformen zu finden.

Da sich nur wenige Unfalllawinen der Winter 1999/2000 bis 2009/2010 in bewaldeten oder vergletscherten Regionen ereigneten und diese für den Vergleich zwischen den Höhenmodellen ausgelassen wurden, kann man davon ausgehen, dass das Alter und die Art des Höhenmodells keinen grossen Einfluss auf die Ergebnisse hatten. Für Unterschiede in den Ergebnissen der Geländeanalyse ist in diesem Fall vor allem die Auflösung verantwortlich.

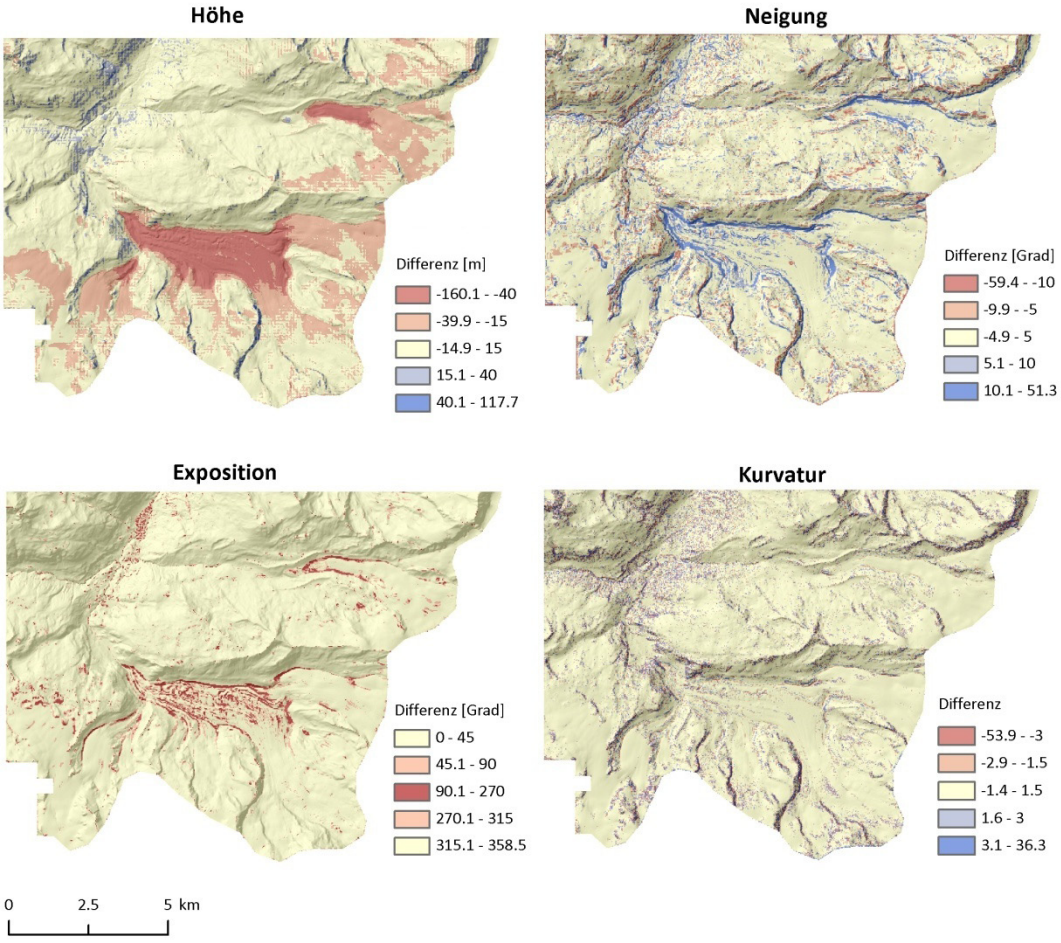


Abb.6.2: Differenz der Inputmodelle ADS-DOM (10m) und DHM25 (25m)
positive Differenzen bei der Höhe, Neigung und Kurvatur bedeuten, dass dort das ADS-DOM grösserer Höhenwerte aufweist. Die Differenzen der Exposition sind absolute Werte

6.2.2 Einfluss der Auflösung

Der Vergleich der Ergebnisse für die Kurvatur, die Exposition und die Hangneigung zeigte, dass nur für die Hangneigung statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Höhenmodellen festzustellen sind. Die Exposition sowie die Geländeform wurden für die allermeisten Unfalllawinen ähnlich eingestuft. Das hat damit zu tun, dass im steilen Gelände, wo sich Schneebrettlawinen ereignen, vor allem die Hangneigung sensibel auf Auflösungsunterschiede reagiert und weniger die Exposition (Chang & Tsai, 1991).

Die Resultate für die Hangneigung und die Kurvatur haben auch gezeigt, dass die Werte zwischen den verschiedenen DHM linear abhängig sind. Die Werte für die Hangneigung oder die Kurvatur sind generell grösser für das höher aufgelöste ADS-DOM (10m), liegen jedoch für beide grösstenteils in einem ähnlichen Wertebereich. Damit ist gemeint, dass es z.B. nicht sehr relevant ist, ob ein Hang nun 39 oder 41 Grad Neigung aufweist oder eher NNW oder NW exponiert ist, da in beiden Fällen ein höheres Lawinenrisiko erwartet wird. Die Grössenordnung der Resultate ist viel wichtiger. Thompson (2001) beispielsweise hat dasselbe Phänomen für Untersuchungen der Bodenvariabilität festgestellt. So beeinflusste die Auflösung zwar die Geländeeigenschaften, es resultierten aber auch brauchbare Resultate mit tiefer aufgelösten Höhenmodellen.

Für einige Unfalllawinen wurden jedoch grosse und relevante Unterschiede in der Hangneigung oder der Kurvatur festgestellt. Diese sollen nun genauer diskutiert werden.

Für 21 % (11/53) der betrachteten Unfalllawinen ergab sich ein Hangneigungsunterschied von mehr als 5 Grad zwischen den DHM . Dieser Unterschied ist vor allem um die 30 Grad kritisch, was bei zwei Lawinen (4 %) der Fall war. Auf Schweizer Skitourenkarten werden mittels 25 m Auflösung die potentiellen Lawinenhänge über 30 Grad rot eingefärbt. Diese Gebiete nehmen viele Tourengänger als Referenz und so kann es vorkommen, dass an gewissen Stellen das Gefahrenpotential unterschätzt wird. Weitere zwei Lawinen ereigneten sich ebenfalls ausserhalb dieser eingefärbten Zonen, jedoch mit weniger als 5 Grad Neigungsunterschied. Alle vier Lawinen waren relativ klein (Lauflänge 50 – 280 m) und ereigneten sich nicht unmittelbar in Kammnähe. Drei der Lawinen lösten sich in einem Gelände mit konvexer Profilkurvatur. Es handelte sich dabei um relativ kleine, steile Hangabschnitte in einem sonst mässig steilen Gelände. In der Lawinenpräventionsbroschüre „Achtung Lawinen!“ (Harvey et al., 2009) wird von diesen S-förmige Geländeprofilen gewarnt, da sie in Wirklichkeit meist steiler sind als auf der Karte gemessen. Es wird darum empfohlen, die Hangneigung für die steilste Stelle im Hang unterwegs neu zu schätzen oder zu messen. Da die Hangneigung einen grossen Einfluss auf die Lawinenauslösung zu haben scheint und in der Lawinenprävention häufig mittels der grafischen Reduktionsmethode (GRM) gearbeitet wird, welche einer 30 Grad Grenze folgt (Munter, 2003), könnte es sinnvoll sein, anstatt einer 25 m Auflösung eine 10 m Auflösung für die Einfärbung der potentiellen Lawinenhänge zu benutzen. Für die 10m Auflösung wiesen alle Anrissgebiete eine grösser Hangneigung als 30 Grad auf (vgl. Tab.6.a). Dieser Unterschied in der verwendeten Auflösung war für die untersuchten Unfalllawinen nur für ganz wenige Lawinen relevant. Es könnte jedoch durchaus interessant sein, diesen Unterschied für eine grössere Anzahl Unfalllawinen zu untersuchen, um ihn bestätigen zu können.

ID	Hangneigung (10m)	Hangneigung (25m)	Profilkurvatur	Breite/Länge	Kammnähe
220110	31.5	29.9	Konvex	60/60	250
216480	31.1	24.4	konvex	60/50	313
217040	30.2	28.7	konvex	90/280	866
220043	35.8	29.2	gestreckt	40/200	436

Tab.6.a: Lawinen, welche den 30-Grad Grenzwert überschreiten zwischen ADS-DOM (10m) und DHM25 (25m) eingefärbt sind Lawinen, welche einen relevanten Unterschied in der Hangneigung aufweisen (> 5 Grad)

Abb.6.3: Lawinen mit kritischem Hangneigungsunterschied zwischen ADS-DOM (10 m) und DHM25 (25 m)
maximale Hangneigung unterscheidet sich um mehr als 5 Grad und lag für DHM25 unter dem 30 Grad- Grenzwert.

Die Kurvatur änderte für 6 % (3/53) der Unfalllawinen zwischen konvex und konkav im Vergleich der beiden DHM. Es handelte sich dabei um Lawinen, welche sich sehr nahe an einem Kamm oder einer Kuppe ereigneten. Sie kamen je nach Auflösung direkt auf dem Kamm oder unterhalb des Kammes zu liegen (vgl. Abb.6.4) und erhielten somit entweder eine konkave oder konvexe Profil- bzw. Plankurvatur. Die einzelnen starken Änderungen in der Geländeform sind somit vor allem lageabhängig. Beim Grossteil der Lawinen scheint der Unterschied in der Kurvatur zwischen den beiden DHM nicht ganz so relevant zu sein.

Ein weit wichtigerer Einfluss kommt wahrscheinlich der Lagegenauigkeit der eingezeichneten Lawinenumrisse zu. Diese ist sowohl für eine Geländeanalyse mittels 25 m Auflösung wie auch für die Analyse mittels 10m Auflösung wichtig. Welchen Einfluss die Lagegenauigkeit auf die Geländeeigenschaften für die verschiedenen Höhenmodelle aber im Detail hat, müsste noch untersucht werden. Vermutet wird, dass bei kleinen Unfalllawinen und hoher Auflösung die Wahrscheinlichkeit einer Fehlklassierung des Geländes steigt, da die Präzision der eingezeichneten Lawinenumrissen weniger hoch ist als in der Auflösung des DHM. Im Grossen und Ganzen lässt sich aber sagen, dass die Wahl des Schwellenwertes für die Kurvatur wahrscheinlich weit einflussreicher ist als eine Veränderung in der Auflösung.

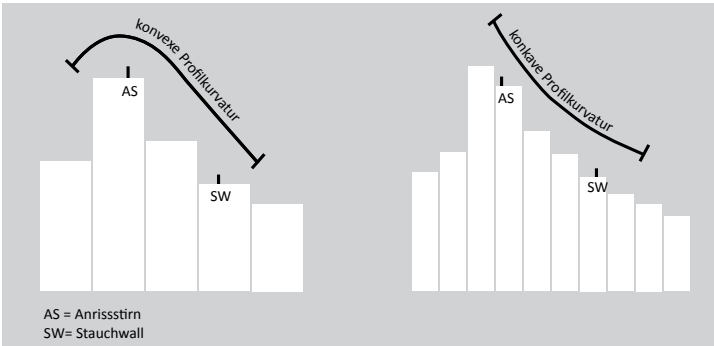


Abb.6.4: Einfluss der Auflösung und der Lagegenauigkeit auf die Profilkurvatur
Die Berechung der Kurvatur mittels einer 3x3 Nachbarschaft ergibt für diese Lage der Lawine einmal eine konvexe Profilkurvatur und einmal eine konkave Profilkurvatur für das Anrissgebiet je nach vorhandener Auflösung.

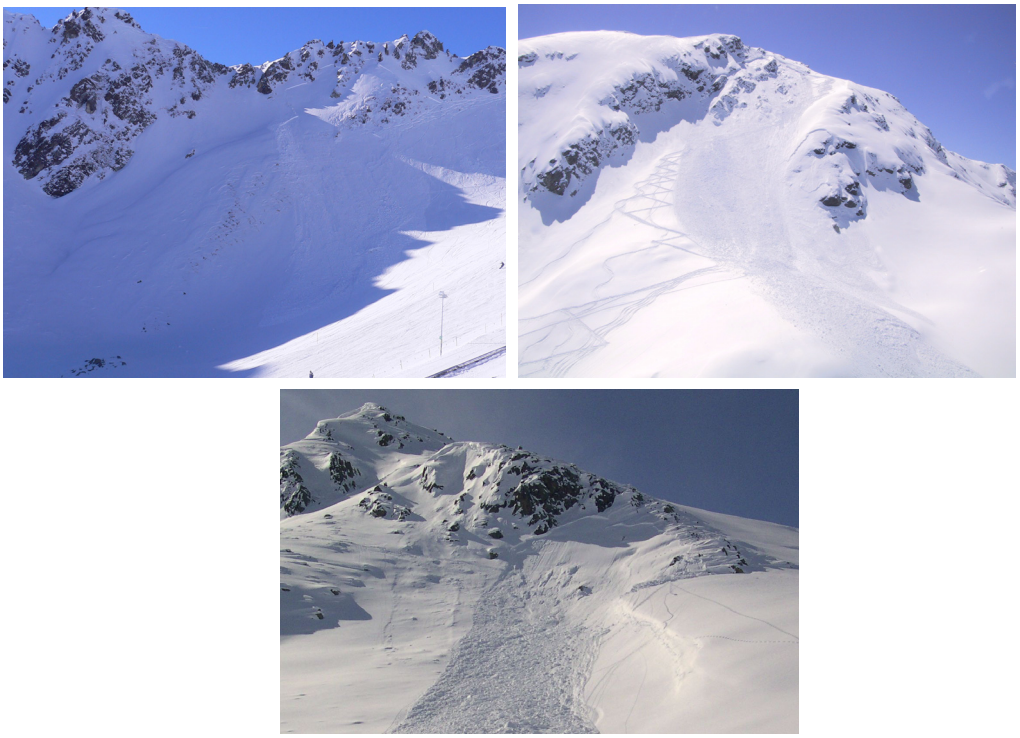


Abb.6.5: Lawinen, für welche sich die Kurvatur diametral änderte zwischen ADS-DOM und DHM25
Lawinen ID v.l.n.r.: 219450, 214850, 214320

6.3 Verbesserungsvorschläge

Mit den verwendeten Methoden war es möglich, lawinenrelevante Parameter aus den DHM zu extrahieren und die Geländeeigenschaften der Unfalllawinen quantitativ zu untersuchen. Die Ergebnisse bestätigten in vielen Fällen vorhandene Vermutungen und Feldmessungen, was als gutes Zeichen gewertet werden kann. Trotzdem können und sollten die Methoden in einigen Punkten noch verbessert werden, damit es für Folgeuntersuchungen möglich wird, noch genauere Resultate zu erzielen. Zukünftige Verbesserungen könnten folgende Aspekte tangieren:

- Die Extraktion der Kämme weist noch Verbesserungspotential auf. Eine präzisere Definition der Kämme würde es ermöglichen, eine genauere Kammdistanz zu berechnen oder diese für Lawinenmodellierungen zu nutzen.
- Mit der automatischen Berechnung der Länge und Breite anhand der Umrisse oder der Anrisse wurden im Grossen und Ganzen gute Resultate erzielt, jedoch wurden für einige Lawinen die Länge und die Breite noch nicht korrekt definiert. Das verwendete Skript für die Zuteilung in Länge und Breite könnte z.B. mittels einer grösseren Anzahl Referenzhöhepunkte verbessert werden.
- Die Extraktion der Anrissstirn kann noch verbessert werden indem z.B. die Höhe als zusätzlicher Faktor in die Berechnung mit einfliesst. In einigen Fällen wurden durch die jetzt hier verwendete Methode nicht alle Kuppen heraus gefiltert, was zu einer gemusterten Zonierung der Anrissgebiete führte.

- Die rasterbasierte, zonale Auswertung hat sich vor allem für eine Auflösung von 25 m im Zusammenspiel mit sehr kleinen Flächen als schwierig erwiesen. Falls die Auflösung innerhalb der Anrissgebiete auf 5 m erhöht würde, könnte eine präzisere Auswertung der Geländeeigenschaften erfolgen. Das wurde für die Analyse der Zonen innerhalb der Anrissgebiete so umgesetzt.
- Bei der Berechnung der Geländeform hat sich gezeigt, dass die Kurvaturklassen stark von den verwendeten Schwellenwerten abhängig sind. Es würde sich daher lohnen, diese noch genauer zu untersuchen. Eine Untersuchung könnte darauf abzielen, festzustellen, ob Geländeabschnitte, welche mittels GIS Methoden als konkav oder konvex beurteilt werden, auch im Winter im Feld so eingestuft werden.

Es darf jedoch nicht vergessen werden, dass jede noch so ausgeklügelte Verbesserung in der Berechnung der Eigenschaften, die Genauigkeit nicht entscheidend erhöhen kann, solange die Lagegenauigkeit der Lawinen nicht genügend gross ist. Darum wäre es in einer zukünftigen Arbeit wichtig zu untersuchen, wie sensibel die Berechnungen der Geländeeigenschaften auf die Digitalisierungsgenauigkeit der Lawinen reagiert.

Kapitel 7
Schlussfolgerung

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Geländeeigenschaften von Unfalllawinen in ihren Anrissgebieten quantitativ und flächenhaft zu analysieren und zu beschreiben. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Anrissgebiete von Unfalllawinen anhand von Fotos digitalisiert, in verschiedene Zonen unterteilt und hinsichtlich verschiedener lawinenrelevanter Geländeeigenschaften ausgewertet. Um den Einfluss des verwendeten Höhenmodells zu untersuchen und die Qualität der Ergebnisse zu überprüfen, wurden diese zwischen zwei verschiedenen Höhenmodellen und mit Ergebnissen aus Feldmessungen verglichen.

Nachfolgend soll dargelegt werden, was in dieser Arbeit erreicht wurde und welche Erkenntnisse aus den verschiedenen Untersuchungen resultieren. Zudem soll ein Ausblick gewagt werden, welches Potential die Methoden und Resultate für weitere Arbeiten haben und in welche Richtung zukünftige Forschungsarbeiten gehen sollten.

7.1 Arbeitsprozess

In vorliegender Arbeit wurde/n…

- … der Forschungsstand in Bezug auf die quantitative Untersuchung vom Gelände für die Lawinenforschung dargelegt und Grundlagen zum Einfluss von digitalen Höhenmodellen auf die Ergebnisse von geomorphometrischen Analysen vorgestellt.
- … Anrissgebiete von Unfalllawinen anhand von Fotos und mithilfe von Landeskarten und Umrissen digitalisiert. Sie dienten als neue Datengrundlage für die darauf folgenden Geländeanalysen.
- … ein hochaufgelöstes Geländemodell vorprozessiert, damit es für die geomorphometrischen Auswertungen gebraucht werden konnte.
- … auf zwei verschiedenen digitalen Höhenmodellen verschiedenen lawinenrelevante Geländeeigenschaften abgeleitet.
- … eine Methode entwickelt, um die Länge und die Breite der Anirssgebiete zu extrahieren und die Anrissgebiete automatisiert in verschiedene Zonen zu unterteilen.

… die Geländeeigenschaften in den Umrissen und den verschiedenen Zonen der Anrissgebiete zonal ausgewertet. Es entstanden Tabellen mit verschiedenen statistischen Kennwerten der Geländeeigenschaften pro Lawine, welche für die Analyse der Zusammenhänge genutzt werden konnten.

… Zusammenhänge zwischen verschiedenen Geländeeigenschaften mithilfe eines Statistikprogramms und interaktiven Grafiken untersucht und quantifiziert.

… die Ergebnisse der Geländeanalyse mit vorhandenen Daten und Angaben aus der Literatur verglichen, hinsichtlich ihrer Qualität beurteilt und neue Erkenntnisse diskutiert.

… die Ergebnisse zwischen zwei unterschiedlichen DHM verglichen und der Einfluss der Eigenschaften der DHM diskutiert und beurteilt.

7.2 Erkenntnisse

Durch die quantitative Auswertung der Geländeeigenschaften in den Anrissgebieten konnte erkannt werden, dass…

… sich Unfalllawinen überdurchschnittlich oft in nördlich exponierten Lagen ereignen und oft in Kammnähe zu finden sind.

… sie sich meistens in relativ planaren Hängen oder an Übergängen von konvexen zu konkaven Formelementen befinden.

… die maximale Hangneigung grösstenteils sehr nahe an der Anrissstirn liegt und in Fliessrichtung abnimmt und im Mittel um die 40 Grad beträgt.

… die durchschnittliche Hangneigung über den gesamten Anrissbereich im Mittel ungefähr 35 Grad beträgt.

Diese Ergebnisse bestätigen die Resultate und Vermutungen aus bisherigen Forschungsarbeiten. Es kann also darauf geschlossen werden, dass sich die verwendeten Methoden gut für die quantitative Geländeanalyse von Unfalllawinen eigenen und auch für andere Gebiete oder Datenstände genutzt werden könnten.

Die untersuchten Zusammenhänge zwischen der Hangneigung und der Geländeform sowie der Anrissmächtigkeit zeigten, dass…

… fast 66 % der Unfalllawinen sowohl eine gerade oder konkave Profil- und Plankurvatur aufwiesen und die maximale sowie die durchschnittliche Hangneigung grösser als 30 Grad war.

… konvexe Profilkurvaturen oft mit einer extrem steilen maximalen Hangneigung in Verbindung gebracht werden können und auch Anrissgebiete mit einer hohen Geländerauigkeit (felsige oder buschige Oberfläche) grösstenteils eine überdurchschnittliche, extrem steile maximale Hangneigung aufweisen.

… die Anrissmächtigkeit keine Abhängigkeit von der vorherrschenden Geländesituation zeigt. Die Geländeform oder die Hangneigung eignen sich also schlecht als Indikatoren für die Anrissmächtigkeit.

Der Zusammenhang zwischen der Profilkurvatur und der Hangneigung bzw. der Rauigkeit und der Hangneigung ist jedoch nur sehr schwach. Nur wenige der 53 betrachteten Anrissgebiete machen den entscheidenden Unterschied. Es ist daher notwendig, diesen Zusammenhang noch mit einer grösseren Stichprobenmenge zu überprüfen.

Der Einfluss der Eigenschaften der verwendeten DHM beschränkt sich aufgrund der Lage der Unfalllawinen und der qualitativ hochwertigen Höhenmodelle vor allem auf die Auflösung. Die Art und das Alter der DHM ist in Waldregionen, bebauten oder vergletscherten Gebieten entscheidend und müsste dort auf die Lawinen angepasst werden. Der Unterschied in der Auflösung zwischen dem DHM25 (25 m) und dem ADS-DOM (10 m) zeigte sich für den Parameter der Hangneigung als besonders entscheidend. Für eine 10 m-Auflösung wiesen alle Unfalllawinen eine höhere maximale Hangneigung als 30 Grad auf, was bei der 25 m Auflösung nicht der Fall war. Dieser Unterschied ist z.B. für die Lawinenprävention relevant, wo die Faustregel gilt, dass alle Hänge, welche eine >30 Grad Neigung aufweisen, potentielle Lawinenhänge sind. Jedoch könnten auch in der Lawinenmodellierung dank einer höheren Auflösung genauere Resultate erzielt werden. Die vereinzelten grossen Unterschiede in der Kurvatur waren vor allem auf die ausgesprochene Kammlage der Lawinen zurückzuführen, welche für die verschiedenen Auflösungen unterschiedlich interpretiert wurde. An diesen Lagen hat die Lagegenauigkeit der Lawinenumrissen einen besonders grossen Einfluss. Für zukünftige Analysen wäre es daher auch wichtig, den Einfluss der Lagegenauigkeit auf die abgeleiteten Geländeeigenschaften zu untersuchen.

7.3 Ausblick

Die Erforschung von Lawinen und Unfalllawinen im Speziellen wird auch in Zukunft wichtig bleiben. Diese Arbeit hat einen kleinen Beitrag dazu geleistet, die Auslösung von Schneebrettlawinen und vor allem den Einfluss des Geländefaktors besser zu verstehen. Doch es gibt noch viel Potential für weitere Forschungsarbeiten bis alle lawinenbildende Faktoren abschliessend verstanden werden.

Die verwendeten Methoden in dieser Arbeit haben sich bewährt und würden auch eine grössere Anzahl Stichproben erlauben. In einer Folgearbeit wäre es darum interessant, die Analyse der Anrissgebiete von einzelnen Regionen auf die ganze Schweiz auszudehnen. So könnte man für alle 597 Lawinen eine Anrissstirn berechnen und das obere Ende des Anrissgebietes automatisch bestimmen. Die 142 digitalisierten Anrissgebiete könnten dabei genutzt werden, um eine automatische Klassifikation zu testen. Eine grössere Anzahl Untersuchungsobjekte würde es auch ermöglichen, den Zusammenhang zwischen konvexer Profilkurvatur und Hangneigung bzw. der Rauigkeit und der Hangneigung zu untersuchen. Weiter wäre es interessant, den Parametern der Rauigkeit und auch allen anderen Geländeeigenschaften Daten zu den Schneeverhältnissen am Ort und Zeit des Lawinenereignisses gegenüberzustellen. So liesse sich eine noch umfassendere Untersuchung von Unfalllawinenereignissen bewerkstelligen.

Literatur

ADAMS, L. (2004). Supporting Sound Desicions. A Professional Perspective on Recreational Avalanche Accident Prevention in Canada. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Jackson Hole, USA, 1-10.

ARRELL, K.E., FISHER, P.F., TATE, N.J. & BASTIN, L. (2007). A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. In: Computers & Geosciences, 33: 1366 - 1381.

BALTSAVIAS, E.P. (1999). A comparison between pho- togrammetry and laser scanning. In: ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 54: 83–94.

BARBOLINI, M., PAGLIARDI, M., FERRO, F. & CORRADEGHINI, P. (2009). Avalanche hazard mapping over large undocumented areas. In : Natural Hazards, 56: 451 - 464.

BÜHLER, Y.A. (2009). Automatisierte Erkennung und Kartierung von Lawinenablagerungen mit optischen Fernerkundungsdaten. Dissertation. Geographisches Institut der Universität Zürich.

BURGA, C. A., KLÖTZLI, F. & GRABHERR, G. (2004). Gebirge der Erde. 504 S., Stuttgart: Ulmer.

BURROUGH, P.A., MCDONNEL, R.A. (1998). Principles of Geographic Information Systems. Oxford: Oxford University Press.

BURROUGH, P.A., MCDONNEL, R.A. (2005). Principles of Geographic Information Systems. Oxford: Oxford University Press.

CAPPABIANCA, F., BARBOLINI, M. & NATALE, L. (2008). Snow avalanche risk assessment and mapping : A new method based on a combination of statistical analysis, avalanche dynamics simulation and empirically-based vulnerability relations integrated in a GIS platform. In: Cold Regions Science Technology, 54: 193 – 205.

CARTWRIGHT, D. (1973). Determinants of Scientific Progress. The Case of Research on the Risky Shift. In: American Psychologist, 222 – 231.

CHANG, K. & TSAI, B. (1991). The Effect of DEM Resolution on Slope and Aspect Mapping. In: Cartography and Geographic Information Science, 18: 69 – 77.

DAVIS, C. H., JIANG, H. & WANG, X. (2001). Modeling and estimation of the spatial variation of elevation error in high resolution DEMs from stereo image pro- cessing. In: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39: 2483–89.

DEEMS, J.S., BIRKELAND, K.W. & HANSEN, K.J. (2002). Topographic influende on the spatial patterns of snow temperature gradients in mountain snowpack. Proceedings of the International Snow Science Workshop, Penticton, BC, Canada.

DELPARTE, D.M. (2008). Avalanche terrain modeling in glacier national park, Canada. Dissertation. Department of Geography, University of Calgary.

DIKAU, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. (Ed.), Three-dimensional Applications in Geographical Information Systems. Taylor & Francis, London, 51–77.

DYMOND, J.R., DEROSE, R.C. & HARMSWORTH, G.R. (1995). Automated mapping of land components from digital elevation data. In: Earth Surface Processes and Landforms, 20: 131–137.

EAWS (2011). European Avalanche Warning Services, Glossary snow and avalanches. http://www.avalanches.org/basics/glossar-en/. Zugriff: 1.7.2011.

ESRI (2011). ArcGIS Desktop 9.3 Help. http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.3. Zugriff: 1.5.2011.

FISHER, P.F., TATE, N.J. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. In: Progress in Physical Geography, 30: 146 – 489.

FLEMING, M. D. & HOFFER, R. M. (1979). Machine processing of landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. In: LARS Technical Report 062879. Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette,Indiana.

FÖHN, P., STOFFEL, M., & BARTELT, P. (2002). Formation and forecasting of large (catastrophic) new snow avalanches. Proceedings of the International Snow and Science Workshop, Penticton, B. C, 141–148.

FÖHN, P. (1987). The "Rutschblock" as a practical tool for slope stability evaluation, In: Symposium at Davos 1986—Avalanche Formation, Movement and Effects, edited by B. Salm and H. Gubler, IAHS Publ., 162: 223–228.

FORSYTHE, K. & WHEATE, R. (2003). Utilization of Landsat TM and Digital Elevation Data for the Delineation of Avalanche Slopes in Yoho National Park (Canada). In: IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41: 2678 – 2682.

GAUER, P. (1999). Blowing and Drifting Snow in Alpine Terrain: A Physically-Based Numerical Model and Related Field Measurements. In: Mitt. Eidg. Inst. Schnee Lawinenforsch, 58: 128 pp.

GHINOI, A., CHUNG, C. (2005). Starter: a statistical GIS-based model for the prediction of snow avalanche susceptibility using terrain features – application to Alta Val Badia, Italian Dolomites. In: Geomorphology, 66: 305 – 325.

GLEASON, J. A. (1995). Terrain parameters of avalanche starting zones and their effect on avalanche frequency, Proceedings of the International Snow Science Workshop, Snowbird, Utah, 393–404.

GRUBER, U. (2001). Using GIS for avalanche hazard mapping in Switzerland. ESRI International User Conference, San Diego, CA.

GRUBER, U. & BARTELT, P. (2007). Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. In: Enivronmental Modelling & Software, 22: 1472 - 1481.

GONG, J., LI, Z., ZHU, Q., SUI, H. & ZHOU, Y. (2000). Effects of various factors on the accuracy of DEMs: an intensive experimental investigation. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66: 1113–17.

HARVEY, S., SCHWEIZER, J., RHYNER, H., NIGG, P. & HASLER, B. (2009). Achtung Lawinen!.

HARVEY, S. & HEIERLI, J. (2009). Interpretation of prevalent avalanche scenarios on the basis of the anticrack model. Proceedings of the International Snow and Science Workshop, Davos, 141–148.

HARVEY, S. & ZWEIFEL, B. (2008). New trends of recreational avalanche accidents in Switzerland. Proceedings of the International Snow and Science Workshop, Whistler, 900 – 906.

HARVEY, S. (2002). Avalanche incidents in Switzerland in relation to the predicted danger degree. Proceedings of the International Snow and Science Workshop, Penticton, B.C., 1 – 6.

HEBELER, F., PURVER, R.S. (2009). The influence of elevation uncertainty on derivation of topographic indices. In: Geomorphology, 111: 4 – 16.

HEIERLI, J., GUMBSCH, P. & ZAISER M. (2008). Anticrack nucleation as triggering mechanism for slab avalanches, Science, 321 (5886): 240-243.

HENDRIKX, J. (2005). An examination of the snow and avalanche hazard on the milford road, Fiordland, New Zealand. Dissertation. University of Canterbury.

HENGL, T. & EVANS, I. (2009). Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, (eds.) T. Hengl & H. Reuter, Elsevier, Kap. 2: 31–64.

HOBSON, R. D. (1972). Surface roughness in topography: quantitative approach. In: Spatial analysis in geomorphology, (eds.) R.J. Chorley, Harper and Row, New York, 221 – 245.

HORN, K.P. & SCHUNCK, B.G. (1981). Determining optical flow. In: Artificial Intelligence, 185 – 204.

HÖRSCH, B. (2001). Zusammenhang zwischen Vegetation und Relief in alpinen Einzugsgebieten des Wallis – Ein multiskaliger GIS- und Fernerkundungsansatz. Dissertation. Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

IRVIN, B.J., VENTURA, S.J. & SLATER, B.K. (1997). Fuzzy and isodata classification of landform elements form digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. In: Geoderma, 77: 137 -154.

IWAHASHI, J. & PIKE, R.J. (2007). Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. In: Geomorphology, 86: 409 – 440.

JAMIESON, B. & GELDSETZER, T. (1996). Avalanche Accidents in Canada 1984-96, 4. Canadian Avalanche Association, Revelstoke, BC, 203 pp.

JENSON S. K. & DOMINGUE, J.O. (1988). Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54: 1593–1600.

LEHNING, M., DOORSCHOT, J. & BARTELT, P. (2000). A snow drift index based on SNOWPACK model calculations, In: Annals of. Glaciology, 31: 382–386.

MACEACHREN, A.M. & DAVIDSON, J.V. (1987). Sampling and Isometric Mapping of Continuous Geographic Surfaces. In: Cartography and Geographic Information Science, 14: 299 – 320.

MACMILLAN, R., & SHARY, P. (2009). Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. In: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, (eds.) T. Hengl & H. Reuter, Elsevier, Kap.9, 227 – 254.

MACMILLAN, R.A., PETTAPIECE, W.W., NOLAN, S.C., GODDARD, T.W. (2000). A generic procedure for automatically segmenting land- forms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. In: Fuzzy Sets Syst. 113: 81–109.

MAGGIONI, M. (2004). Avalanche Release Areas and Their Influence on Uncertainty in Avalanche Hazard Mapping. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Zürich.

MAGGIONI, M. AND GRUBER, U. (2003). The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. Cold Regions Science and Technology, 37: 407-419.

MCCLUNG, D. M. (2002). The elements of applied forecasting—part II: The physical issues and the rules of applied avalanche forecasting. In: Nat. Hazards, 26: 131–146.

MCCLUNG, D. (2001). Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. Annals of Glaciology, 32: 223-229.

MCCLUNG, D. & SCHWEIZER, J. (1999). Skier-triggering, snow temperatures and the stability index for dry-slab avalanche formation. Journal of Glaciology, 45(150): 190-200.

MCCLUNG, D. & SCHAERER, P. (1993). The Avalanche Handbook. The Mountaineers, Seattle, WA, 271 pp.

MCKEAN, J. & ROERING, J. (2004). Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. In: Geomorphology, 57: 331 – 351.

MEISTER, R. (2002). Avalanches: Warning, rescue and prevention, In: Avalanche News, 62: 37–44.

MINAR, J. & EVANS, I.S. (2008). Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. In: Geomorphology, 95: 236 – 259.

MONDRIAN (2011). http://rosuda.org/mondrian/Mondrian.html. Zugriff: 1.8.2011.

MOORE, W.S. (1996). Large groundwater inputs to coastal waters revealed by 226 Ra enrichments. In: Nature, 380: 612–614.

MOORE, I.D., R. B. GRAYSON, & A. R. LANDSON. (1991). Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. In: Hydrological Processes 5: 3–30.

MUNTER, W. (2003). 3x3 Lawinen: Entscheiden in kritischen Situationen, Agentur Pohl & Schellhammer, Garmisch Patenkirchen, Germany.

O'CALLAGHAN, J.F. (1984). The Extraction of Drainage Networks form Digital Elevation Data. In: Computer Vision, Graphics and Image Processing, 28: 323 – 344.

OKSANEN, J. & SARJAKOSKI, T. (2005). Error propagation of DEM-based surface derivatives. In: Computers & Geosciences, 31: 1015 – 1027.

OLAYA, V. (2009). Basic Land-Surface Parameters. In: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, (eds.) T. Hengl & H. Reuter, Elsevier, Kap. 6, 141–170.

PIKE, R., EVANS, I. & HENGL, T. (2009). Geomorphometry: A Brief Guide. In: Geomorphometry: Concepts, Software, Applications, (eds.) T. Hengl & H. Reuter, Elsevier, Kap. 1, 3–30.

RANA, S. (2004). Topological Data Structures for Surfaces: An Introduction for Geographical Information Science.Wiley, New York, 214 pp.

RASEMANN, S., SCHMIDT, J., SCHROTT, L. & DIKAU, R. (2004). Geomorphometry In: Mountain Terrain. In: Geographic Information Science and Mountain Geomorphology, (eds.) M. Bishop & J. Shroder Jr, Springer, Heidelberg, Berlin, 101–146.

REES, W.G. (2000). The accuracy of digital elevation models interpolated to higher resolutions. In: International Journal of Remote Sensing 21: 7–20.

REUTER, H.I., HENGL, T., GESSLER, P. & SOILLE, P. (2009). Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: Geomorphometry: Concepts,Software, Applications, (eds.) T. Hengl & H. Reuter, Elsevier, Kap. 4, 87–120.

POWDERGUIDE (2011). Lawinenkunde für Freerider. http://www.powderguide.com/ais.php?ID_Sub=2798&display=410. Zugriff. 3.1.2011.

SAPPINGTON, J.M., LONGSHORE, K.M. & THOMPSON, D.B. (2007). Quantifying Landscape Ruggedness for Animal Habitat Analysis: A Case Study Using Bighorn Sheep in the Mojave Desert. In: Journal of Wildlife Management, 71: 1419 – 1426.

SCHMIDT, J. & ANDREW, R. (2005). Multi-scale landform characterization. In: Area, 37: 341 – 350.

SCHMIDT, J. & HEWITT, A.E. (2004). Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. In: Geoderma, 121: 243–56.

SCHWEIZER, J. & JAMIESON, B. (2000). Field observations of skier-triggered avalanches, International Snow Science Workshop (ISSW). American Avalanche Association, Big Sky, Montana, USA, pp. 192-199.

SCHWEIZER, J. & JAMIESON, B. (2001). Snow cover properties for skier triggering of avalanches. In: Cold Regions Science and Technology, 33: 207-221.

SCHWEIZER, J., JAMIESON, B. & SCHNEEBELI, M. (2003). Snow avalanche formation. In: Reviews of Geophyics, 41: 2.1 - 2.25.

SCHWEIZER, J. & LÜTSCHG, M. (2001). Characteristics of human triggered avalanches. In: Cold Regions Science and Technology, 33: 147 – 162.

SHARY, P.A., SHARAYA, L.S. & MITUSOV, A.V. (2002). Fundamental quantitative methods of land surface analysis. In: Geoderma, 107: 1–32.

SLF (2011A). Lawinenunfälle. http://www.slf.ch/praevention/lawinenunfaelle/index_DE. Zugriff: 2.1.2011.

SLF (2011B). Lawinenklassifikation. http://www.slf.ch/lawineninfo/zusatzinfos/howto/lawinenklassifikation/. Zugriff: 5.2.2011.

SLF (2011C). Geographische Begriffe. http://www.slf.ch/lawineninfo/zusatzinfos/interpretationshilfe/geographische_begriffe/. Zugriff: 10.9.2011.

STOFFEL, A., MEISTER, R. & SCHWEIZER, J. (1998). Spatial characteristics of avalanche activity in an Alpine valley – a GIS approach. In: Annals of Glaciology, 26: 329 – 336.

STREMPEL, K., ZENKE, B., BELITZ, K., FRISCH, U., MAUKISCH, M., STÖTTER, J., WILHELM, F. (1996). GIS-Analyse des Zusammenhangs zwischen Waldlawinen und Topographie. Internationales Symposion Intrapraevent, Garmisch-Partenkirchen, 113 – 124.

SWISSTOPO (2005). DHM25. Das digitale Höhenmodell der Schweiz. Produktinformation. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

SWISSTOPO (2007). VECTOR25. Das digitale Landschaftsmodell der Schweiz. Produkteinformation. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

SWISSTOPO (2010). Pixelkarten. Produkteinformation. Bundesamt für Landestopographie, Wabern.

THIEKEN, A.H., LÜCKE, A., DIEKKRÜGER, B. & RICHTER, O. (1999). Scaling input data by GIS for hydrological modelling. In: Hydrological Processes, 13: 611 – 630.

THOMPSON, J.A., BELL, C.J. & BUTLER, C.A. (2001). Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. In: Geoderma, 100: 67 – 89.

VOIGHT, B., ET AL. (1990). Snow-Avalanche Hazards and Mitigations in the United States, 84 pp., Natl. Acad. Press, Washington, D. C., 1990.

WEIBEL, R. & HELLER, M. (1991). Digital Terrain Modelling. In: Maguire, D.J., Goodchild ,M.F., Rhind, D.W. (eds.): Geographical Information Systems: Principles and Application. Longman, London, 269–297.

WHITE RISK (2006). Interaktive Lern-CD Lawinenunfall – Prävention. Suvalive. (eds.) suvalive, SLF.

WISS, R. (2009). Extraction of features from alpine rock face based on lidar data. development of new methods using the Monte Rosa east face as an example. Masterarbeit. Centre for GeoInformatics(Z_GIS) Salzburg University.

WILSON, J.P. & GALLANT, J. C. (2000). Terrain analysis: principles and applications, Wiley, Chichester, Kap. 1, 225 – 237.

WISE, S. (2000). Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. In: Hydrological Processes 14: 1909–29.

WOLOCK, D.M. & PRICE, C.V. (1994). Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography based watershed model. In: Water Resour. Res. 30: 3041–3052.

WOOD, J. (1996). The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. Dissertation, University of Leicester, UK.

ZEVENBERGEN, L.W. & THORNE, C.R. (1987). Quantitative analysis of land surface topography. Earth Surf. Processes Landf. 12: 47–56.

ZHANG, W., MONTGOMERY, D.R. (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrological simulations. In: Water Resour. Res, 30: 1019–1028.

ZIMMERMANN, N. E. (2000). Calculation of Topographic Position. http://www.wsl.ch/staff/niklaus.zimmermann/programs/aml4_1.html. Zugriff: 15.7.2011.

Anhang

A ArcPy Skript für die Spaltung der Umrisse und Anrisse

B Abbild aller Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet

C Flächenhafte Darstellung der Hangneigung

D Tabelle der Anrissgebiete und ihren Geländeeigenschaften

Anhang A

ArcPy Skript für die Spaltung der Lawinenumrisse und Anrisse

Dieses Skript wurde für die Berechnung der korrekten Länge und Breite der Lawinenumrisse und Anrisse gebraucht. Es teilt die MBR der Länge und der Breite nach in die Hälfte. Die resultierenden Objekte wurden in einem weiteren Schritt genutzt, um die durchschnittliche Höhendifferenz in der Länge und der Breite miteinander zu vergleichen und so festzustellen, ob die Länge auch wirklich der Lawinenlänge entspricht.

```
# ---------------------------------------------------------------------------
# readpolygon.py
# Author: Irene Vontobel
# Last Update: 13.5.2011
# ---------------------------------------------------------------------------
# Import arcpy module
import arcpy
# Overwrite Output
arcpy.env.overwriteOutput = True
# Set Environment Workspace
arcpy.env.workspace = "W:/msc/anrisszone_mgb/Lawine/Lawine"

# Local Variable for Name of new Featureclass
featname = "mbg_right.shp"
featname2 = "mbg_left.shp"
featname3 = "m_rightb.shp"
featname4 = "m_leftb.shp"

# Create empty Featureclass
arcpy.CreateFeatureclass_management("W:/msc/anrisszone_mgb/Lawine/Lawine", featname, "POLYGON")
arcpy.CreateFeatureclass_management("W:/msc/anrisszone_mgb/Lawine/Lawine", featname2, "POLYGON")
arcpy.CreateFeatureclass_management("W:/msc/anrisszone_mgb/Lawine/Lawine", featname3, "POLYGON")
arcpy.CreateFeatureclass_management("W:/msc/anrisszone_mgb/Lawine/Lawine", featname4, "POLYGON")

 # Create two new fields in Featureclass
arcpy.AddField_management(featname, "ID_Plus", "LONG")
arcpy.AddField_management(featname2, "ID_Plus", "LONG")
arcpy.AddField_management(featname3, "ID_Plus", "LONG")
arcpy.AddField_management(featname4, "ID_Plus", "LONG")

# Create search cursor
cur = arcpy.SearchCursor("wi9910_mbg_minwidth.shp")
#Create insert cursor
incur = arcpy.InsertCursor(featname)
incur2 = arcpy.InsertCursor(featname2)
incur3 = arcpy.InsertCursor(featname3)
incur4 = arcpy.InsertCursor(featname4)

#Loop through each row
for row in cur:
   #Create geomoetry object
   feat = row.getValue("Shape")
   Idplus = row.getValue("ID_Plus")

   #Print out Id of Polygon
   arcpy.AddMessage("Feature " + str(row.getValue("ID_plus")) + ":")
   partnum = 0

   #Count number of points in Polygon
```

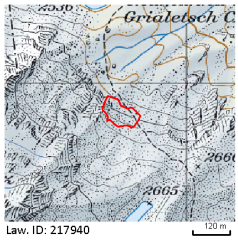
```
partcount = feat.partCount

#While loop for each part in polygon
while partnum < partcount:
   part = feat.getPart(partnum)

   #Create four new Points

   new1 = arcpy.Point()
   point1 = part.getObject(1)
   point2 = part.getObject(2)
   new1.X = point1.X - ((point1.X - point2.X)/2)
   new1.Y = point1.Y - ((point1.Y - point2.Y)/2)

   new2 = arcpy.Point()
   point3 = part.getObject(3)
   point0 = part.getObject(0)
   new2.X = point3.X - ((point3.X - point0.X)/2)
   new2.Y = point3.Y - ((point3.Y - point0.Y)/2)

   new3 = arcpy.Point()
   new3.X = point0.X - ((point0.X - point1.X)/2)
   new3.Y = point0.Y - ((point0.Y - point1.Y)/2)

   new4 = arcpy.Point()
   new4.X = point2.X - ((point2.X - point3.X)/2)
   new4.Y = point2.Y - ((point2.Y - point3.Y)/2)

   ##########
   #First Side
   ##########

   #Insert new Points in array of parts for poly1
   part.replace(2, new1)
   part.replace(3, new2)

    #Create Polygon
   newpoly = arcpy.Polygon(part)
   arcpy.AddMessage("ok Polygon")

   #Insert new Row
   newP = incur.newRow()

   #Insert Polygon in Row
   newP.setValue("Shape", newpoly)
   newP.setValue("ID_Plus", Idplus)
   incur.insertRow(newP)

   ############
   #Second Side
   ############

   #Insert new Points in array of parts for poly2
   part.replace(1, point2)
   part.replace(0, point3)

   #Create Polygon
   newpoly = arcpy.Polygon(part)
   arcpy.AddMessage("ok Polygon")

   #Insert new Row
```

```
        newP = incur2.newRow()

        #Insert Polygon in Row
        newP.setValue("Shape", newpoly)
        newP.setValue("ID_Plus", Idplus)
        incur2.insertRow(newP)

        ############
        #First Width
        ############

        #Insert new Points in array of parts for poly1
        part.reset()
        part.replace(1, new3)
        part.replace(2, new4)
        part.replace(0, point0)
        part.replace(3, point3)

        #Create Polygon
        newpoly = arcpy.Polygon(part)
        arcpy.AddMessage("ok Polygon")

        #Insert new Row
        newP = incur3.newRow()

        #Insert Polygon in Row
        newP.setValue("Shape", newpoly)
        newP.setValue("ID_Plus", Idplus)
        incur3.insertRow(newP)

        #############
        #Second Width
        #############

        #Insert new Points in array of parts for poly1
        part.reset()
        part.replace(1, point1)
        part.replace(2, point2)
        part.replace(3, new4)
        part.replace(4, new3)

        #Create Polygon
        newpoly = arcpy.Polygon(part)
        arcpy.AddMessage("ok Polygon")

        #Insert new Row
        newP = incur4.newRow()

        #Insert Polygon in Row
        newP.setValue("Shape", newpoly)
        newP.setValue("ID_Plus", Idplus)
        incur4.insertRow(newP)

        #To go to next Part
        partnum += 1

#Delete Insert Cursor
del incur
del incur2
del incur3
del incur4
```

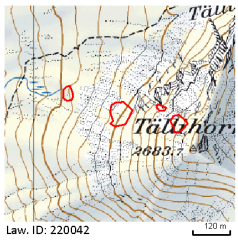
Anhang B

Abbild aller Anrissgebiete (rot dargestellt) im Untersuchungsgebiet (N = 55)

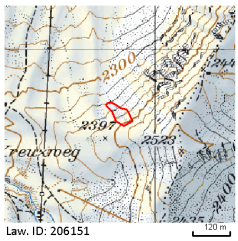
Viele Anrissgebiete weisen ein relativ ausgeglichenes Länge-, Breiteverhältnis auf.



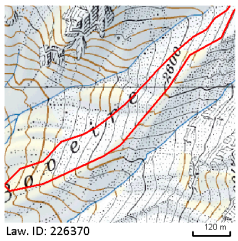
Law. ID: 217940 | Law. ID: 219450 | Law. ID: 219810 | Law. ID: 219980 | Law. ID: 220041



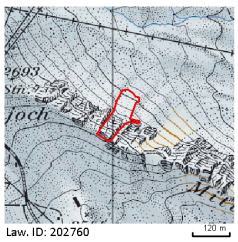
Law. ID: 220042 | Law. ID: 220043 | Law. ID: 220110 | Law. ID: 222421 | Law. ID: 222422



Law. ID: 206151 | Law. ID: 222570 | Law. ID: 222700 | Law. ID: 225430 | Law. ID: 225540

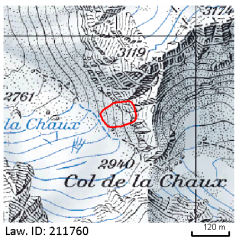


Law. ID: 226370 | Law. ID: 206180 | Law. ID: 206260 | Law. ID: 206690 | Law. ID: 208220



Law. ID: 202760 | Law. ID: 203140 | Law. ID: 213790 | Law. ID: 219030 | Law. ID: 219320

Law. ID: 217770 | Law. ID: 208430 | Law. ID: 208500 | Law. ID: 210660 | Law. ID: 211060

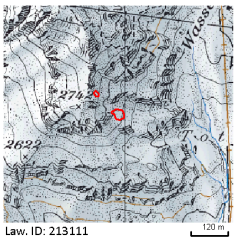


Law. ID: 211760

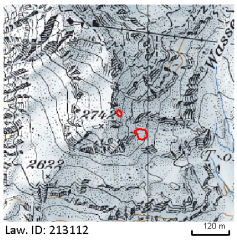
Law. ID: 212270

Law. ID: 212430

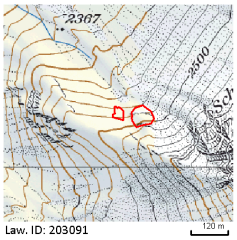
Law. ID: 213010



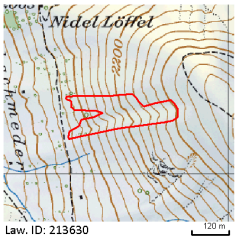
Law. ID: 213111



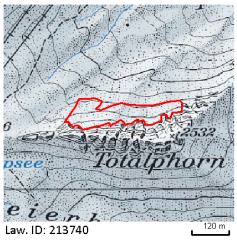
Law. ID: 213112



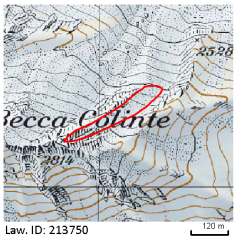
Law. ID: 203091



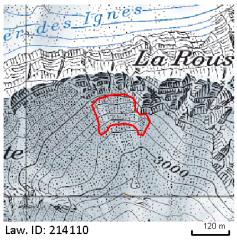
Law. ID: 213630



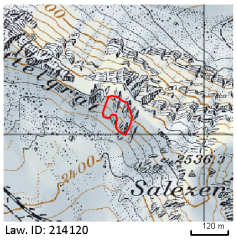
Law. ID: 213740



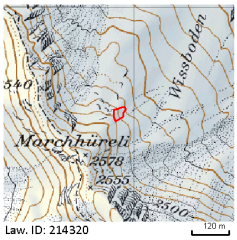
Law. ID: 213750



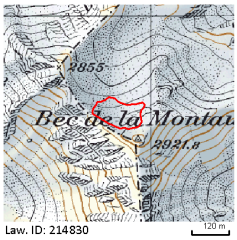
Law. ID: 214110



Law. ID: 214120

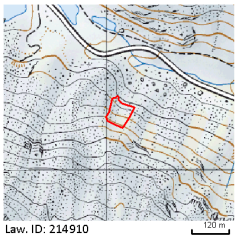


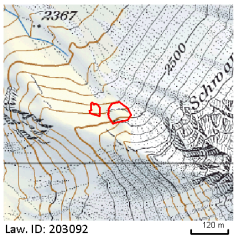
Law. ID: 214320



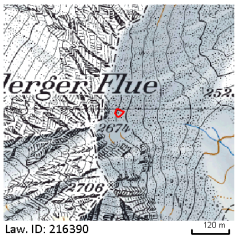
Law. ID: 214830

Law. ID: 214850

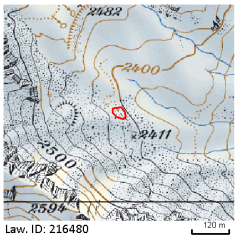

Law. ID: 214910



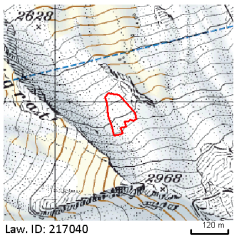
Law. ID: 203092



Law. ID: 216390

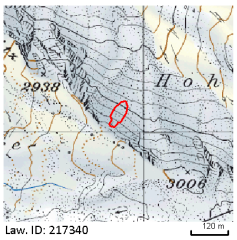


Law. ID: 216480

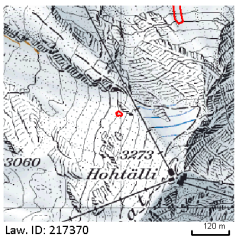


Law. ID: 217040

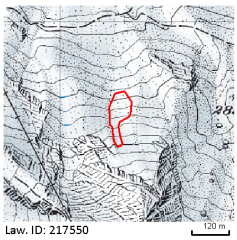
Law. ID: 217080



Law. ID: 217340



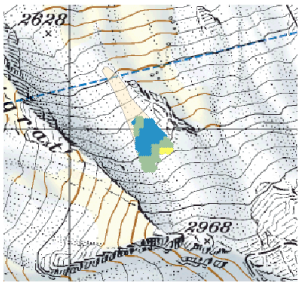
Law. ID: 217370

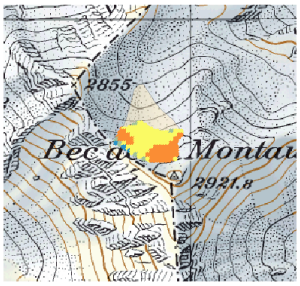

Law. ID: 217550

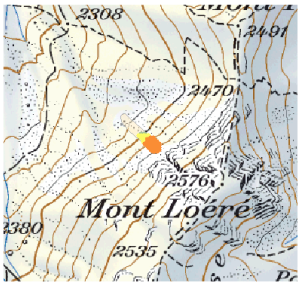
Law. ID: 226630

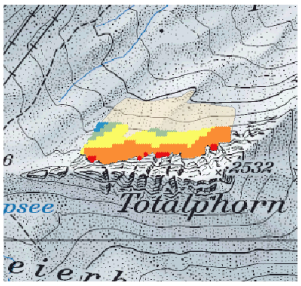
Anhang C

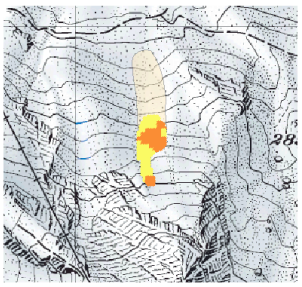
Flächenhafte Darstellung der Hangneigung (5 x 5 m) für einige Anrissgebiete im Untersuchungsgebiet. Eine solche Darstellung erlaubt es, die Verteilung der Hangneigung auf eine visuelle Art zu erfassen.

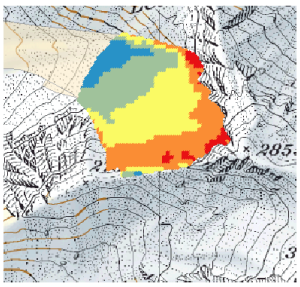

Law. ID: 217040


Law. ID: 214830

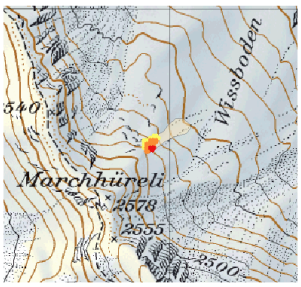

Law. ID: 208430

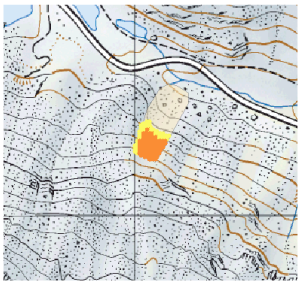

Law. ID: 213740

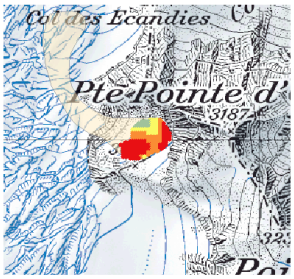

Law. ID: 217550

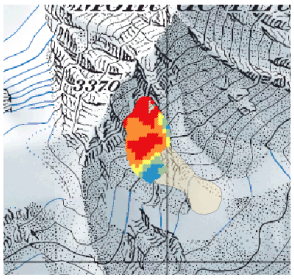

Law. ID: 203140

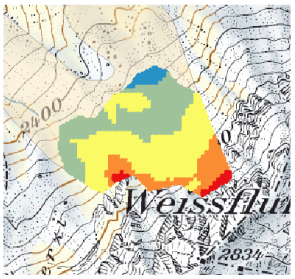
Law. ID: 206151

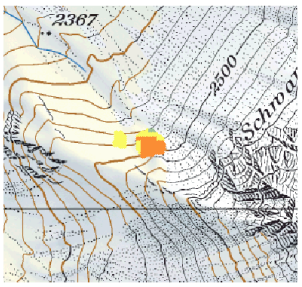

Law. ID: 214320

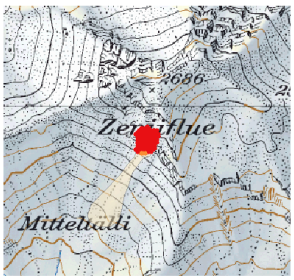

Law. ID: 214910

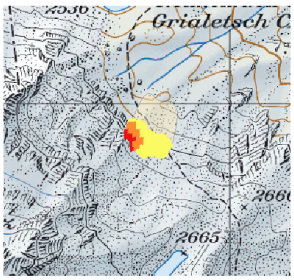

Law. ID: 226630

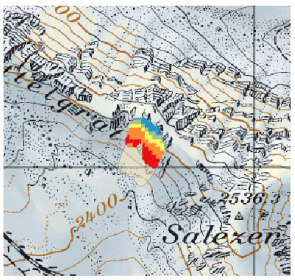

Law. ID: 208220

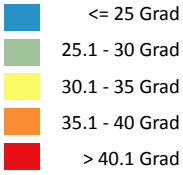

Law. ID: 211060


Law. ID: 203092


Law. ID: 208500


Law. ID: 217940


Law. ID: 214120



Anhang D

Tabelle aller Lawinenanrissgebiete im Untersuchungsgebiet, welche für die Auswertung der Zusammenhänge gebraucht wurden (N = 53), mit den entsprechenden Werten für die verschiedene Geländeeigenschaften.

Lawinen ID	max. Hang.	Ø Hang.	Ø Profilk.	Ø Plank.	Ø Expon.	Ø Rauig.	max. Höh.	Anrissm.
217040	30.2	24.3	0.12	-0.15	-13.7	0.0023	2820	50
216480	31.1	26.8	-0.96	-0.07	34.5	0.0049	2414	65
220110	31.5	28.1	-0.28	-0.56	-14.4	0.0010	2740	60
217080	32.4	31.1	0.38	0.54	-25.0	0.0046	2143	30
203091	33.9	33.0	-0.13	-0.27	-9.3	0.0005	2472	40
216390	34.2	33.3	0.13	-0.64	-19.8	0.0010	2624	40
220043	35.8	33.3	-0.29	0.49	32.0	0.0031	2417	60
226370	36.0	31.9	-0.12	0.18	20.6	0.0044	2683	100
222422	36.1	35.9	0.11	0.23	3.7	0.0010	2443	35
219810	36.2	32.7	0.23	-0.72	-51.4	0.0024	2429	70
213112	36.3	35.5	-0.02	0.38	50.2	0.0008	2728	40
206260	36.6	29.8	0.40	-0.23	-40.0	0.0007	2508	35
217550	37.1	34.6	0.07	-0.20	-7.5	0.0011	2996	70
213111	38.3	36.2	0.46	0.33	-1.8	0.0014	2679	40
217370	38.6	38.1	0.29	-0.72	-39.8	0.0007	3125	50
222421	38.8	37.1	0.20	-0.27	3.8	0.0022	2473	35
214910	38.8	35.7	0.10	-0.36	-20.9	0.0006	2454	50
217340	38.9	37.7	0.07	0.48	13.2	0.0009	2956	60
208430	39.0	36.4	0.42	-0.23	-22.1	0.0030	2436	50
203092	39.2	35.2	0.42	0.01	-34.5	0.0032	2498	40
214830	39.7	33.9	0.02	-0.21	10.3	0.0023	2895	50
206151	39.9	37.3	0.13	-0.07	-11.2	0.0036	2400	40
213740	40.4	34.0	0.41	0.01	-23.1	0.0020	2492	70
222700	40.6	35.1	0.10	-0.24	-15.8	0.0020	3085	60
203140	40.8	35.0	0.05	-0.18	1.6	0.0028	2780	90
219320	41.0	38.3	0.05	-0.56	3.6	0.0033	2624	50
214320	41.0	36.1	0.20	1.03	25.3	0.0053	2474	40
213630	41.0	37.0	0.01	-0.26	-22.3	0.0023	2300	80
220041	41.9	36.6	0.22	-0.13	-6.9	0.0016	2636	60
220042	42.5	32.2	0.57	-0.02	-27.6	0.0007	2508	60
219030	43.0	36.3	0.20	-0.10	-6.6	0.0014	2658	50
212270	43.0	38.9	0.36	-1.38	-91.0	0.0035	3063	40
214120	43.3	33.5	-0.84	-0.05	63.7	0.0054	2509	50
222570	43.7	35.0	0.92	-0.65	-89.3	0.0030	2528	60
206180	43.9	34.5	0.17	-0.02	-8.8	0.0010	2727	60
219450	44.5	40.3	0.66	0.17	6.9	0.0022	2580	30
217940	44.8	34.6	0.27	-0.21	-26.0	0.0023	2627	90

202760	45.8	34.6	-0.28	0.03	49.8	0.0057	2610	80
212430	46.0	44.8	0.18	0.67	16.4	0.0029	2749	40
208500	46.2	43.2	0.13	-0.34	-25.5	0.0029	2608	30
219980	46.3	40.4	-0.65	-0.03	74.2	0.0037	2595	50
211060	46.3	31.3	0.13	-0.06	-6.1	0.0021	2662	60
214850	46.4	41.3	0.50	-0.51	-26.6	0.0053	3060	80
211760	47.8	40.7	0.33	-0.26	-28.4	0.0018	2933	250
213790	48.5	30.9	0.21	-0.37	-35.5	0.0012	2806	40
210660	51.3	40.4	-0.65	1.31	88.3	0.0053	3062	45
208220	51.3	38.2	0.25	0.13	-9.0	0.0063	3302	45
206690	51.5	39.0	0.21	-0.13	-17.8	0.0024	3027	130
226630	52.6	38.8	0.50	-0.74	-78.6	0.0038	2998	30
225540	52.9	41.4	1.50	-0.58	-87.4	0.0041	2775	75
213010	53.6	40.3	-0.25	-0.19	8.6	0.0048	3343	50
214110	56.5	36.1	0.79	-0.60	-73.6	0.0027	3104	70
213750	60.5	33.5	-0.61	1.01	106.4	0.0054	2795	70

Persönliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und die verwendeten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Irene Vontobel

Ennetbaden, 28.Oktober 2011